



# Elektrické a magnetické pole pre stredné školy

**RNDr. Ondrej Kapusta, PhD.**

**Inštitút:** Spojená škola sv. Jána Pavla II.

**Rok:** Február 2022

**Vydanie:** Prvé



**Norway  
grants**

*Učebnica bola vytvorená v rámci programu Zmierňovanie a prispôsobovanie sa zmene klímy, projektu  
ACC03P27 – Využívajte energiu ekologicky!*

# Obsah

<b>1</b>	<b>Elektrostatické pole</b>	<b>2</b>
1.1	Vlastnosti elektrického náboja . . . . .	2
	Otázky a úlohy . . . . .	6
1.2	Silové pôsobenie elektrických nábojov, Coulombov zákon . . . . .	7
	Otázky a úlohy . . . . .	8
1.3	Intenzita elektrického poľa . . . . .	9
	Otázky a úlohy . . . . .	11
1.4	Práca v homogénnom elektrickom poli . . . . .	11
	Otázky a úlohy . . . . .	12
	Pre seminaristov . . . . .	12
1.5	Potenciál elektrického poľa a elektrické napätie . . . . .	13
	Otázky a úlohy . . . . .	14
1.6	Rozmiestnenie náboja na vodiči a izolante . . . . .	15
	Otázky a úlohy . . . . .	20
	Pre seminaristov . . . . .	21
	Otázky a úlohy . . . . .	23
	Pre seminaristov . . . . .	23
	Otázky a úlohy . . . . .	25
<b>2</b>	<b>Elektrický prúd a obvody</b>	<b>28</b>
2.1	Vznik elektrického prúdu . . . . .	28
	Otázky a úlohy . . . . .	29
2.2	Elektrický obvod . . . . .	29
2.3	Meranie elektrického napätia a elektrického prúdu . . . . .	30
2.4	Vodivosť kovov . . . . .	32
2.5	Elektrický zdroj . . . . .	33
<b>3</b>	<b>Vedenie prúdu v kovoch</b>	<b>36</b>
3.1	Ohmov zákon pre časť elektrického obvodu . . . . .	36
	Otázky a úlohy . . . . .	37
3.2	Závislosť odporu vodiča od jeho geometrických rozmerov . . . . .	37
	Otázky a úlohy . . . . .	39
	Pre seminaristov . . . . .	39
3.3	Závislosť odporu vodiča od jeho teploty . . . . .	42
	Otázky a úlohy . . . . .	44
3.4	Ohmov zákon pre uzavretý obvod . . . . .	44
	Otázky a úlohy . . . . .	46
3.5	Kirchhoffove zákony . . . . .	46
	Otázky a úlohy . . . . .	49
	Pre seminaristov . . . . .	53
3.6	Práca a výkon v obvode s konštantným prúdom . . . . .	54
	Otázky a úlohy . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Vedenie prúdu v polovodičoch</b>	<b>58</b>
	Otázky a úlohy . . . . .	60
4.1	Javy na rozhraní dvoch polovodičov typu P a N (diódový a tranzistorový jav) . . . . .	61



# Úvodom

Učebnica je modelom toho, čo by mali študenti fyziky na stredných školách zvládnuť a ovládať vrátane seminaristov. Jednotlivé témy sú obohatené o aktivity a názorné experimenty pre prepojenie teórie s praxou a ukážkou rozvíjania všeobecných zručností - vyjadrenie názoru, formulácia hypotézy, pozorovanie, návrh experimentu, interpretácia grafov, riešenie problémových úloh, prezentácia výsledkov, práca na projekte, v skupine a pod.

Vydanie knihy reaguje na dopyt slovenského trhu po kvalitných učebniciach fyziky po štrukturálnej, odbornej a vizuálnej stránke. Veríme, že učebnica bude prelomovou z hľadiska smerovania výuky fyziky na stredných školách a nápomocou pri budovaní rozvíjania potrebných zručností pre prax nielen v oblasti fyziky.

Autori



# Elektrostatické pole

Ak za suchého počasia prejdete po koberci a potom sa priblížite ku kovovej kľučke alebo vodovodnému kohútiku, preskočí iskra. Pri vyzliekaní šiat z niektorých materiálov počujeme praskanie a v prítmí vidíme dokonca iskry. Pri česaní suchých vlasov pozorujeme ich priťahovanie k hrebeni a počas búrky pozorujeme blesky.

Príčinou uvedených javov je **elektrický náboj**, ktorý vzniká pri vzájomnom trení dvoch telies. Teleso, na ktorom sa náboj vytvorí označujeme ako **zelektřizované** alebo **elektricky nabité**.

## Definícia 1.1 (Zelektřizované teleso, elektricky nabité teleso)

teleso, ktoré má elektrický náboj.



## Definícia 1.2 (Elektrizovanie telesa, nabíjanie telesa)

vytváranie elektrického náboja na telese, napr. trením s iným telesom. Ak vytvorenie náboja prebehlo práve trením a nie iným spôsobom, tento jav sa označuje ako **triboelektrický jav**.



Elektrický náboj je charakteristickou vlastnosťou niektorých častíc, z ktorých sa skladajú látky okolo nás (ióny (anióny, katióny), elektróny, protóny). Veľkosť elektrického náboja označujeme písmenom  $Q$  a udáva sa v jednotkách C (Coulomb).

Nie každé teleso sa dá nabiť rovnakým spôsobom na rovnako veľký náboj. Veľkosť náboja závisí od materiálu telesa, ktoré nabíjame a rovnako od použitého materiálu na trenie. Podľa týchto vlastností sú látky usporiadané do tzv. **triboelektrického radu**.

## 1.1 Vlastnosti elektrického náboja

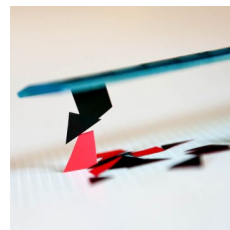
Elektrický náboj nie je definovaný, avšak má niekoľko význačných vlastností:

### 1. Elektricky nabité teleso pôsobí silou na iné telesá.

**Experiment 1.1** Na stôl rozsypte kúsky papiera / polystyrénu / korkovej drviny / bazovej kôry. Zelektřizujte plastové pravítko / tyč z PVC / hrebeň trením o látku (flyš / sveter) / suché vlasy. Priblížte sa ku kúskom použitej látky na stole.

Po priblížení zelektřizovaného pravítka napr. ku kúskom papiera, sa kúsky priťahujú k pravítku.

Vyskúšajte, ktoré materiály majú najväčší efekt. Pozorovania porovnajte s ich postavením v triboelektrickom rade.



**Obr. 1.1:** Kúsky papiera sú priťahovné k zelektřizovanému plastovému pravítku.<sup>a</sup>

<sup>a</sup>prevzaté z blog.padai.org

### 2. Elektrický náboj je možné preniesť z jedného telesa na iné.

**Experiment 1.2** Na nevodivú podložku dajte plechovku. Na stranu plechovky dajte voľne visiace kúsky špagátu alebo tenké pásky alobalu.

Elektricky nabite pravítko a oprite ho o okraj plechovky. Urobte tak niekoľko krát.

Trením pravítka o okraj plechovky sa prenáša náboj z

pravítka na plechovku. Ďalším otieraním sa zvyšuje náboj na plechovke aj voľne visiacich kúskoch alobalu. Keďže plechovka aj alobal sú nabité rovnakým nábojom, začnú sa odpudzovať (odťahovať) od plechovky.

Poskusom sme dokázali, že sa náboj preniesol z pravítka na plechovku.



**Obr. 1.2:** Kúsky alobalu sú odťahované od plechovky v dôsledku rovnakého náboja.

**3. Elektrický náboj sa môže premiestňovať aj v telese.** Látky, v ktorých sa elektrický náboj ľahko premiestňuje označujeme ako **vodiče** a látky, v ktorých sa náboje nepremiestňujú voláme **izolanty** alebo tiež **dielektriká**.

**Experiment 1.3** Pripravte si dve rovnaké plechovky ako v experimente 1.2. Navzájom ich prepojte rôznymi materiálmi. Nabite jednu z plechoviek a pozorujte, či sa bude nabíjať aj druhá plechovka. Ak áno, použitý materiál je vodič, ak nie je izolant.



**Obr. 1.3:** Ak dve plechovky prepojíme vodičom (napr. kuchynským nožom), pri nabíjaní jednej sa nabije aj druhá (pásiky alobalu sa odťahujú od oboch plechoviek).



**Obr. 1.4:** Ak sú plechovky prepojené izolantom (ceruzkou z dreva), pri nabíjaní jednej plechovky sa druhá nenabije (pásiky z alobalu sa neodťahujú).

**4. Existujú dva druhy elektrického náboja.** Jeden sa označuje ako **kladný (+)** a druhý ako **záporný (-)**. Záporný náboj má napríklad zelektrizované pravítko, ktoré sme trelí vlnou.

**Experiment 1.4** Nabite plechovku s páskami z alobalu pomocou pravítka. Ak nabité pravítko budete približovať k alobalovému pásiku, bude sa odťahovať v dôsledku rovnakého náboja.

Teraz nabite plechovku bez dotyku. Nabité pravítko priblížte z jednej strany k plechovke a na opačnom konci

sa jej dotýkajte prstom. Opakujte niekoľko krát, pričom pri odťahovaní pravítka, odtiahnite aj svoju ruku. Po priblížení nabitého pravítka k alobalovému pásiku, sa pásik bude priťahovať, čo znamená, že musí existovať opačný náboj.



Obr. 1.5: Dôkaz existencie dvoch druhov náboja.

Pri nabíjaní plechovky na opačný náboj sme využili jav **elektrostatickej indukcie**. Keďže plechovka je vodič, môže sa v nej ľahko pohybovať náboj. Po priblížení nabitého telesa k plechovke sa opačný náboj v plechovke presunie na stranu nabitého telesa, pričom na opačnej strane je rovnaký náboj ako nabitého telesa, ktorý sme odvedli do zeme pomocou ruky (Obr. 1.5 v strede).

Z experimentu teda vyplýva:

- teleso je možné nabiť aj bez dotyku pomocou **elektrostatickej indukcie**
- rovnaké náboje sa odpudzujú, opačné sa priťahujú.

### Definícia 1.3 (Elektrostatická indukcia)

*pohyb náboja v izolovanom kovovom vodiči pri priblížení nabitého telesa. Na strane telesa prevláda opačný náboj, na protilahlej strane prevláda rovnaký náboj. (Obr. 1.5)*



- Rovnaké náboje sa odpudzujú, opačné sa priťahujú.** Táto vlastnosť bola dokázaná experimentom 1.4.
- Elektrický náboj je deliteľný.** Elektrický náboj nie je možné deliť neobmedzene, ale iba po elementárny náboj. O deliteľnosti sa môžete presvedčiť experimentom 1.2. Alobalové pásiky sa vychylujú viac s každým ďalším prenosením náboja.
- Nosiče elementárnych nábojov sú v atóme elektróny a protóny.** Elektrón nesie záporný náboj a protón rovnako veľký kladný elementárny náboj, ktorý nemožno ďalej deliť. Elementárny náboj má hodnotu:  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

#### Projekt 1.1 - Odkiaľ sa vzali elektrón a protón?

Urobte projekt o objave elektrónu, protónu a neutrónu.

Pri elektróne vychádzajte z nasledovného:

- J. J. Thompson - objav elektrónu
- R. A. Millikan - experiment na určenie veľkosti elementárneho náboja

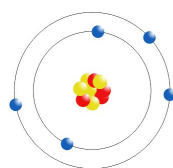
Experimenty doplňte o názorné obrázky a krátke živo-

topisy fyzikov. Pri protóne a neutróne sa sústreďte najmä na:

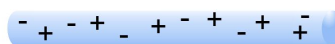
- E. Rutherford - objav jadra a objav protónu
- J. Chadwick - objav neutrónu

Podobne doplňte experimenty o názorné obrázky a krátke životopisy fyzikov stojacich za ich realizáciou.

- Každý atóm predstavuje sústavu elementárnych nábojov.** V jadre atómu sa nachádzajú kladne nabité protóny a v obale záporne nabité elektróny. Ak sa počet elektrónov rovná počtu protónov, atóm sa navonok javí ako **elektroneutrálny**. Obr. 1.6 ukazuje atóm bóru, ktorý má v jadre 5 protónov a v obale 5 elektrónov. Keďže počet protónov a elektrónov je rovnaký, atóm je navonok elektroneutrálny. Za **elektroneutrálne** považujeme aj teleso (napr. sklenenú tyč obr. 1.6), v ktorom je kladný a záporný náboj rovnomerne rozložený a vzájomne kompenzovaný (kladný náboj má rovnakú veľkosť ako záporný).



$$\begin{aligned} N(p^+) &= 5 \\ N(e^-) &= 5 \\ N(p^+) &= N(e^-) \end{aligned}$$



$$Q_+ = Q_-$$

Obr. 1.6: Elektroneutrálny atóm a elektroneutrálna sklenená tyč.

**Joseph John Thomson**

\*1856 - †1940

Narodil sa v Manchestri. Mama bola krajčírka a otec vlastnil antikvariát. Jeho vzdelanie začalo na malej súkromnej škole, kde preukázal veľký talent a ako 14-ročný nastúpil na Owens College, neskôr prešiel na Trinity College v Cambridge.

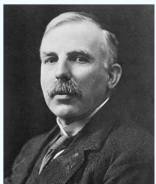
Roku 1906 bol ocenený Nobelovou cenou za jeho prácu vedenia prúdu v plynch. V roku 1897 objavil záporne nabitú subatómovú časticu, ktorá neskôr dostala názov elektrón podľa návrhu fyzika G. J. Stoneyho ako základné jednotkové množstvo elektriny. Na základe svojich objavov navrhol pudingový model atómu.

**Robert Andrews Millikan**

\*1868 - †1953

Narodil sa v USA, meste Morrison. Vysokoškolský titul získal na Oberlin College a doktorandské štúdium ukončil na Columbia University. Ako profesor na Chicago University vykonal experimenty na určenie veľkosti elementárneho náboja za čo mu bola udelená Nobelova cena.

Neskôr pôsobil na Caltech-u (California Institute of Technology), kde sa venoval štúdiu kozmického žiarenia.

**Ernest Rutherford**

\*1871 - †1937

Narodil sa v Brightwater, Nový Zéland, rodičia pochádzali z anglicka. Štúdiá začal na Novom Zélande na Canterbury College a postgraduálne štúdiá absolvoval na Cambridge University pod vedením J. J. Thomsona. Neskôr bol prijatý na McGill University v Montreale, Kanada. V roku 1907 sa vrátil do Veľkej Británie, kde pôsobil na Victoria University of Manchester. V roku 1908 realizoval experiment ostreľovania tenkej zlatej fólie  $\alpha$ -časticami. Na základe experimentu navrhol planetárny model atómu a v tom istom roku mu bola udelená Nobelova cena.

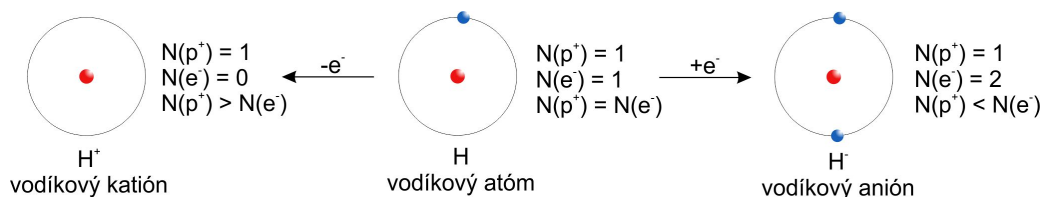
**James Chadwick**

\*1891 - †1974

Narodil sa v Bollingtone, Anglicko. Roku 1908 nastúpil na Victoria University of Manchester. Pod vedením E. Rutherforda objavil ďalšiu subatómárnu časticu bez náboja - neutrón za čo mu bola udelená Nobelova cena. Počas druhej svetovej vojny pracoval na projekte Manhattan (vytvorenia atómovej bomby).



- 9. Atóm môže elektróny uvoľňovať, ale aj prijímať.** Atóm, kde neplatí rovnosť počtu elektrónov a protónov (obr. 1.7) označujeme ako **ión**. Pokiaľ sa z elektrónového obalu atómu odtrhne jeden a viac elektrónov, bude počet protónov prevyšovať počet elektrónov, teda atóm bude mať výsledný náboj kladný. Atóm, ktorý má viac protónov ako elektrónov označujeme ako **katión**. Ak atóm prijme jeden a viac elektrónov, počet elektrónov bude prevyšovať počet protónov v jadre a atóm bude vykazovať záporný náboj. Takýto atóm nazývame **aniónom**.



**Obr. 1.7:** Atóm vodíka môže prijať aj odovzdať jeden elektrón, čím sa z neho vytvorí buď katión alebo anión.

- 10. Elektrický náboj sa prejavuje na telese len pri jeho prenášaní z jedného telesa na druhé alebo v rámci jedného telesa.** Pri premiestňovaní sa však celkový náboj nemení. Pre telesá platí zákon zachovania elektrického náboja.

**Definícia 1.4 (Zákon zachovania elektrického náboja)**

V elektricky izolovanej sústave telies je celkový elektrický náboj stály. Elektrický náboj nemožno vytvoriť ani zničiť. Platí aj pri jadrových reakciách.

**Projekt 1.2 - Elektroskop**

Vytvorte vlastný elektroskop. Vysvetlite ako funguje a na čo slúži. Overte jeho funkčnosť.

**Projekt 1.3 - Elektrostatika okolo nás**

Popíšte využitie triboelektrického javu v nasledovných oblastiach:

- antistatické podlahy a podložky - opíšte ako fungujú a ich využitie
- senzory na pohyb tela, fyzickú aktivitu
- autonómne senzory požiaru
- nanášanie farieb - popíšte princíp antistatického nanášania farieb
- domácnosť - utieranie prachu antistatickými

utierkami

- tlač - popíšte princíp tlače pomocou elektrostatiky
- možnosti využitia ako obnoviteľného zdroja energie - výroba energie trením pri pohybe a pod.
- využitie bleskov

**Projekt 1.4 - Van de Graaffov generátor**

Popíšte význam van de Graaffovho generátora, popíšte fyzikálne princípy na akých funguje. Vytvorte vlastný funkčný model van der Graaffovho generátora.

**Projekt 1.5 - Wimshurstov generátor**

Popíšte fyzikálne princípy Wimshurstovho generátora. Vysvetlite jeho význam. Vytvorte vlastný funkčný model generátora.

**Robert Jemison Van de Graaff**

\*1901 - †1967

Narodil sa v USA, otec bol pôvodom holanďan. Študoval na University of Alabama, naštevoval prednášky M. Currie v Sorbone a doktorandské štúdiá dokončil na Oxford University. Roku 1929 predstavil svoj prvý generátor, ktorý bol schopný vytvoriť napätie 80 000 V. Po roku 1933 skonštruoval väčší generátor, ktorý vyprodukoval  $7 \cdot 10^6$  V.

Roky 1929-1931 strávil na Princetone a 1931-1960 strávil na MIT (Massachusetts Institute of Technology), kde sa stal docentom.

**James Wimshurst**

\*1832 - †1903

Bol anglický vynálezca, inžinier a lodiar. Svoje vynálezy tvoril vo voľnom čase. Zostrojil niekoľko známych typov generátorov. Jeden z nich našiel uplatnenie v medicíne - rádiografii a elektroterapii.

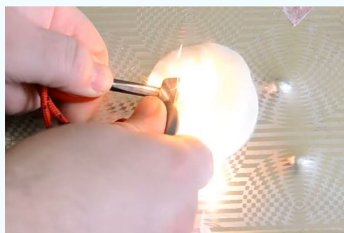


## 🏰 Otázky a úlohy 🏰

1. Prečo atóm vystupuje navonok ako elektroneutrálny?
2. Ako vyrobíte z neutrálneho atómu kladný ión?
3. Vyjadrite elektrický náboj 1 C počtom elementárnych nábojov [ $6,24 \cdot 10^{18}$  e]
4. Povedzte aspoň 3 príklady vodičov a izolantov.
5. Vysvetlite princíp činnosti elektroskopu a elektrometra.
6. Pomocou elektroskopu dokážte, že ľudské telo je vodič.
7. Kovové časti automobilu sa môžu počas jazdy zelektrizovať. Navrhnite ako je možné zabrániť iskrovému výboju, ktorý môže nastať. Uvedte iné príklady zelektrizovania telies v technickej praxi.
8. Prečo sa pri plnení cisterny benzínom, cisterna uzemňuje a vodivo spája s nádržou, z ktorej sa má čerpať benzín?



## Fyzika prežitia - triboelektrický jav



Oheň v prírode je možné pripraviť pomocou triboelektrického javu.<sup>a</sup> Na založenie ohňa je potrebný podpaľ - materiál, ktorý je možné ľahko zapáliť kresadlom alebo zápalkou. Podpaľom môže byť - brezová kôra (obsahuje olej, ktorý je ľahko zápalný, dobre horí aj vlhká), mastné

drevo z borovice, suchá tráva, spráchniveté drevo alebo živica z ihličnatých stromov. V prírode je možné nájsť aj iné druhy podpaľov napr. suché vtáčie hniezda, machy, suché lístie, padáčky z púpavy a pod. K podpaľu pridajte tenšie konáre, ktoré sa od horiaceho podpaľu zapália a nakoniec hrubšie drevo. Podpaľ je možné zapáliť kresadlom. Kresadlo funguje na princípe triboelektrického javu. Kresaciu tyčinku, ktorá je tvorená horčíkovou oceľovou zliatinou sa trie pomocou kresacieho pliešku, pričom vznikajú iskry, ktorými je možné jemné vlákna zapáliť.

<sup>a</sup>Obrázok prevzatý z youtube kanálu - coolgearSK



## 1.2 Silové pôsobenie elektrických nábojov, Coulombov zákon

V experimente 1.1 sme overili silové pôsobenie nabitých telies na iné telesá. Sily, ktorými pôsobia elektricky nabité telesá na iné, označujeme ako **elektrické sily**. Veľkosť pôsobiacej sily dvoch nábojov experimentálne našiel **Ch. Coulomb**:

### Definícia 1.5 (Coulombov zákon)

veľkosť sily je priamo úmerná súčinu bodových nábojov a nepriamo úmerná druhej mocnine ich vzdialenosti.



Matematicky Coulombov zákon vyjadruje vzťah:

$$|\vec{F}_e| = k \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2} \quad (1.1)$$

kde  $F_e$  je elektrická sila,  $k$  konštanta úmernosti závislá na prostredí,  $Q_1$  a  $Q_2$  sú veľkosti dvoch nábojov, ktoré na seba vzájomne pôsobia a  $r$  je ich vzájomná vzdialenosť.

### Charles Augustin de Coulomb



\*1736 - †1806

Pochádzal z Francúzska. Bol úradník, inžinier a fyzik. Študoval na Mazarinovom kolégiu v Paríži. Medzi jeho známe inžinierske stavby patrí Fort Bourbon v Martiniku.

Venoval sa štúdiu torzných síl, vysvetlil zákony príťažlivosti a odpudzovania elektrických nábojov a magnetických pólov.



Konštantu  $k$  je tiež možné vyjadriť ako:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \quad (1.2)$$

kde  $\epsilon$  je veličina závislá na prostredí a označujeme ju ako **permitivita prostredia**. Táto veličina nám hovorí, nakoľko je schopné elektrické pole prechádzať daným prostredím. Permitivita prostredia je daná ako súčin permitivity vákuua  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-2}$  a relatívnej permitivity  $\epsilon_r$  daného prostredia, ktorú nájdeme v tabuľkách. Relatívna permitivita pre vákuum  $\epsilon_r = 1$ . Čím je relatívna permitivita vyššia, tým je priepustnosť materiálu pre elektrické pole nižšia.

Pri našich ďalších úvahách, podobne ako v mechanike, pre jednoduchosť zanedbáme rozmery telesa, tvar a obmedzíme sa iba na náboj. Akékoľvek teleso budeme považovať za **bodový náboj**.

### Definícia 1.6 (Bodový náboj)

hmotný bod, ktorého veľkosť náboja je rovnaká ako veľkosť náboja na zelektrizovanom telese, ktoré sme hmotným bodom nahradili.



Elektrická sila rovnako ako ktorákoľvek iná je vektor. Má teda svoje pôsobisko, smer, veľkosť a orientáciu. Už sme sa presvedčili, že rovnaké náboje sa odpudzujú a rôzne priťahujú. Dva rovnaké bodové náboje budú teda podľa III. Newtonovho zákona na seba navzájom pôsobiť rovnako veľkými opačne orientovanými silami. Pričom ak majú rovnaký náboj smerujú od seba, ak majú opačný náboj, smerujú k sebe, ležia na jednej priamke spájajúcej bodové náboje s pôsobiskom (začiatok) v danom bodovom náboji:



Obr. 1.8: Dva bodové náboje pôsobia na seba navzájom elektrickými silami.

**Príklad 1.1** Vzďialenosť dvoch guľôčok vo vákuu, z ktorých má elektrický náboj  $+8\mu\text{C}$  a druhá  $-5\mu\text{C}$  je 6 cm. Akou veľkou silou sa guľôčky priťahujú?

**Riešenie:** Zo zadania možno vyčítať, že ide o dva náboje, ktoré na seba silovo pôsobia. Vzťah pre silu, ktorou na seba pôsobia dva náboje vyjadruje Coulombov zákon:

$$|\vec{F}_e| = k \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2}$$

Všetky potrebné údaje na pravej strane máme a je potrebné vypočítať pôsobiacu silu. Jednotky premeníme a dosadíme:

$$F_e = k \frac{|8 \cdot 10^{-6}| |-5 \cdot 10^{-6}|}{(6 \cdot 10^{-2})^2}$$

Pozor! Náboje vo vzťahu vystupujú v absolútnych hodnotách (uvažujeme teda len o kladnej hodnote, hoci náboj je záporný)

$$F_e = \frac{1}{4\pi \cdot 8,854 \cdot 10^{-12}} \frac{40 \cdot 10^{-12}}{(36 \cdot 10^{-4})} = 0,4 \text{ kN}$$

**Príklad 1.2** Ako sa zmení veľkosť elektrickej sily medzi dvoma bodovými nábojmi, ak ich vzdialenosť zväčšíme 2-krát?

**Riešenie:** Zadanie vyžaduje určiť zmenu elektrickej sily. Elektrická sila je vyjadrená Coulombovým zákonom:

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2}$$

Na príklad je možné sa pozerať ako na dva stavy. Prvý, v ktorom sú veličiny nezmenené:

$$F_{e1} = k \frac{|Q_{11}||Q_{21}|}{r_1^2}$$

V druhom prípade sa zväčšila vzdialenosť bodov dvakrát:

$$r_2 = 2r_1$$

$$F_{e2} = k \frac{|Q_{12}||Q_{22}|}{(2r_1)^2}$$

Keďže náboje sa nezmenili, ani prostredie, vzťah prepíšeme nasledovne:

$$F_{e2} = k \frac{|Q_{11}||Q_{21}|}{4r_1^2}$$

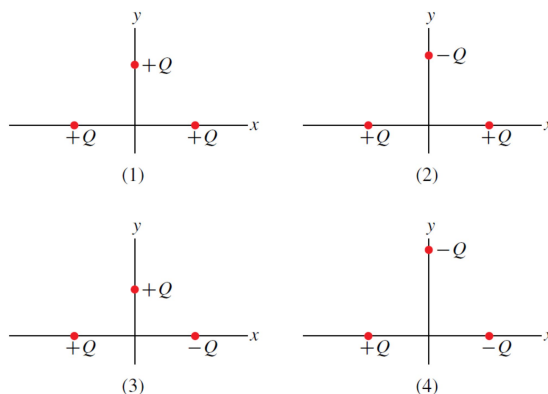
Porovnaním so vzťahom pre silu  $F_{e1}$ , nahradíme veličiny, ktoré ju vyjadrujú, zvyšok vyjme dopredu:

$$F_{e2} = \frac{1}{4} F_{e1}$$

Nová sila po zväčšení vzdialenosti dvakrát je len 1/4 z pôvodnej.

## 🌊 Otázky a úlohy 🌊

1. Zakreslite výslednicu síl pôsobiacich na prostredný bodový náboj. Porovnajtie tieto sily. Ktorá z nich je najväčšia?



Obr. 1.9: K úlohe 1.

2. Dva bodové náboje s rovnakou veľkosťou elektrického náboja sa vzájomne priťahujú vo vákuu elektrickou silou  $4.10^{-3}$  N. Vzďialenosť nábojov je 3 cm. Vypočítajte aký náboj má každá z guľôčok. [ $2.10^{-8}$  C]
3. Koľko krát klesne príťažlivá sila medzi nábojmi ak vzdialenosť zväčšíme 10 krát? [100-krát]
4. Dva rovnaké bodové náboje  $5.10^{-8}$  C sa odpudzujú vo vzduchu silou  $2,5.10^{-4}$  N. Aká je vzdialenosť medzi nimi? [30 cm]

## 1.3 Intenzita elektrického poľa

Vzájomné silové pôsobenie dvoch nabitých telies sa uskutočňuje prostredníctvom elektrického poľa. Elektrické pole je v okolí každého nabitého telesa a každej častice s nábojom. Elektrické pole rovnako ako gravitačné je jednou zo základných foriem hmoty. Silu elektrického poľa definujeme fyzikálnou veličinou - **intenzita elektrického poľa E**.

### Definícia 1.7 (Intenzita elektrického poľa)

sila, ktorá pôsobí na kladný jednotkový náboj v danom mieste elektrického poľa budené elektricky nabitým telesom. ♣

Matematicky:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{Q}; \quad [E] = \frac{N}{C} = \frac{V}{m} \quad (1.3)$$

kde  $F_e$  je elektrická sila, ktorou nabité teleso pôsobí na kladný testovací náboj  $Q'$ . Kladný náboj nie preto, aby sme nemohli na testovanie poľa použiť záporný náboj, ale aby sme merané veličiny a dohodnuté smery určovali jednotne na celom svete, fyzici sa dohodli, že elektrické polia sa budú testovať kladným nábojom. Tento náboj musí byť dostatočne malý, aby zase svojou elektrickou silou nenarušil rozloženie nabitého telesa. Intenzita elektrického poľa je podľa vzťahu 1.3 a definície vektorovou veličinou, ktorá má rovnaký smer ako pôsobiaca sila (vektor sily delíme len veľkosťou náboj a náboj ako vlastnosť telesa je skalárnou veličinou a vektor delený skalár (len číslo) je opäť vektor s inou veľkosťou). Elektrické pole v okolí telesa je teda možné znázorniť pomocou **siločiar**.

### Rozšírenie 1.1 (Intenzita elektrického poľa)

Vo všeobecnosti je intenzita elektrického poľa závislá od polohy (polohového vektora). Pozri príklad 1.3. Intenzitu poľa testujeme veľmi malým kladným nábojom. V prípade veľkého náboja, by sa rozloženie náboja na testovanom telese mohlo zmeniť, čo by malo za následok nesprávne určenie intenzity. Matematicky to vyjadríme:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \lim_{Q' \rightarrow 0} \frac{\vec{F}_e(\vec{r})}{Q'}$$

V takýchto prípadoch musíme poznať alebo experimentálne zistiť ako sa mení elektrická sila pôsobiaca na malý testovací náboj v závislosti od polohy. ♠

### Definícia 1.8 (Siločiara elektrického poľa)

myslená čiara, ktorej dotyčnica v danom bode má smer intenzity elektrického poľa E. Siločiar majú nasledovné vlastnosti:

- sú spojité, začínajú na kladnom náboji a končia na zápornom podľa dohody,
- predstavujú dráhu malého kladného testovacieho náboja, po ktorej by sa pohyboval po vložení na dané miesto,
- sú kolmé na povrch nabitého telesa,
- navzájom sa nepretínajú. ♣

### Experiment 1.5 - Elektrické pole bodového náboja

Hoci pole nie je možné vidieť, poznávame ho podľa jeho účinkov. Nasledujúcimi experimentmi si elektrické

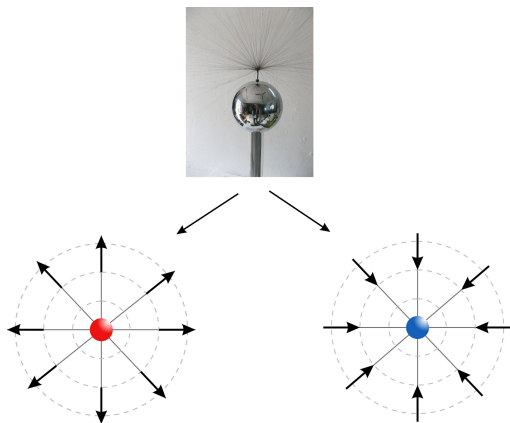
pole "zobrazíme". Najprv preskúmame elektrické pole v okolí bodového náboja. Ako model použijeme ping-pongovú alebo inú malú loptičku.



Ako model možno použiť aj ihlu (s tupým koncom, ostrý koniec zapichnete napr. do korku pomocou, ktorého budete môcť ihlu upevniť na stojan, prípadne samotný korok môže slúžiť ako stojan) s vlásokami, prípadne inú vhodnú alternatívu.

1. Loptičku obalte alobalom a urobte z jednej strany vývod resp. miesto, ktoré bude možné upevniť do stojana.
2. Na rôzne miesta pripevnite úzke pásiky papiera alebo tenkého plastového obalu napr. mikrotónového sáčka.
3. Loptičku nabite.

V dôsledku rovnakého náboja sa pásiky rozostúpia do priestoru. Výsledok experimentu je na obr. 1.10 (kde bol použitý nastaviteľný stojan s vlásokami a Van der Graaf generátor). Na obr. 1.10 sú na základe experimentu znázornené siločiar bodových nábojov. Pole bodových nábojov je **radiálne**. V obrázku sú znázornené aj vektory elektrickej intenzity.



**Obr. 1.10:** Znázornenie elektrického poľa v okolí bodových nábojov.

Pole kladného a záporného náboja sa líšia iba v smere vektora elektrickej intenzity. Pole kladného a záporného náboja sa líšia iba v smere vektora elektrickej intenzity. Vektor intenzity smeruje od kladného náboja, nakoľko kladný testovací náboj by bol odpudzovaný a smeruje do záporného náboja, nakoľko v tomto prípade by bol kladný testovací náboj priťahovaný.

#### Experiment 1.6 - Elektrické pole dvoch bodových nábojov

Teraz budete potrebovať dve loptičky.

1. Najprv obe loptičky nabite na rovnaký náboj a pomaly ich približujte k sebe.
2. Potom jednu z loptičiek nabite na opačný náboj (najlepšie elektrostatickou indukciou, podobne

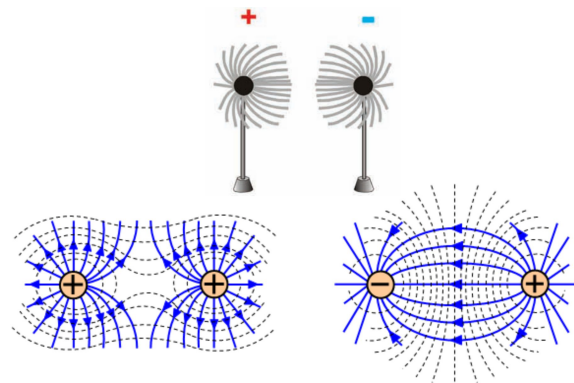
ako v experimente 1.4. Pri priblížení sa k loptičke s nabitým telesom, prst držte na opačnej strane, odialenie prsta vykonajte naraz s oddialením nabitého telesa).

3. Nabité loptičky na opačný náboj pomaly približujte k sebe.

Výsledky experimentov sú schematicky znázornené na obr. 1.11. Ak približujeme k sebe dve rovnako nabité loptičky, pásiky (vlásoky) sa od seba odpudzujú. Dve loptičky s rôznym nábojom po priblížení sa pásiky priťahujú.

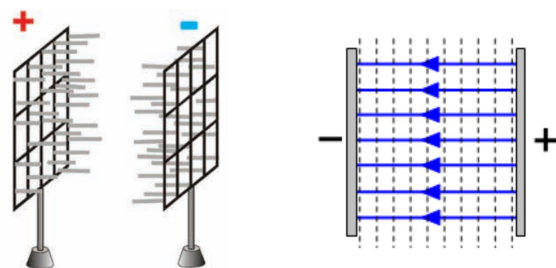
#### Experiment 1.7 - Elektrické pole medzi dvomi nabitými platňami

1. Na dve platne prípadne kovové sieťky pripevnite kúsky alobalu prípadne vlásoky.
2. Každú z platin nabite na opačný náboj.
3. Platne pomaly približujte k sebe.



**Obr. 1.11:** Znázornenie siločiar medzi dvoma bodovými nábojmi. <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Prevzaté z schoolphysics.co.uk a M. Rojko - Pokusy z elektrostatiky v heuristické výuce fyziky II.



**Obr. 1.12:** Znázornenie siločiar medzi dvoma bodovými nábojmi. <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Prevzaté z schoolphysics.co.uk a M. Rojko - Pokusy z elektrostatiky v heuristické výuce fyziky II.

Výsledok experimentu je na obr. 1.12. Elektrické pole medzi dvomi opačne nabitými platňami je **homogénne**.

**Príklad 1.3** Odvodte vzťah pre intenzitu bodového náboja.

**Riešenie:** Pre intenzitu elektrického poľa platí vzťah (1.3). Do vzťahu za elektrickú silu Coulombov zákon, ktorý vyjadruje silu medzi dvoma nábojmi. V našom prípade medzi testovaným bodovým nábojom  $Q$  a malým testovacím kladným nábojom  $Q'$ :

$$|\vec{E}| = \frac{\vec{F}_e}{Q'} = \frac{k \frac{|Q||Q'|}{r^2}}{Q'} = k \frac{Q}{r^2}$$

Intenzita bodového náboja je priamo úmerná veľkosti bodového náboja a nepriamo úmerná druhej mocnine vzdialenosti od bodového náboja. Odvođením sme vylúčili veľkosť testovacieho náboja.

**Príklad 1.4** Nenabitá kovová guľôčka s objemom  $1 \text{ cm}^3$  obsahuje  $1,0 \cdot 10^{22}$  voľných elektrónov. Aký je jej celkový náboj? Aká je veľkosť intenzity  $10 \text{ cm}$  od nej?

**Riešenie:** Jeden elektrón predstavuje elementárny náboj  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .  $10^{22}$  elektrónov teda predstavuje celkový náboj:

$$Q = 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{22} = 1,602 \cdot 10^3 \text{ C}$$

Tento náboj vo vzdialenosti  $10 \text{ cm}$  budí pole intenzity:

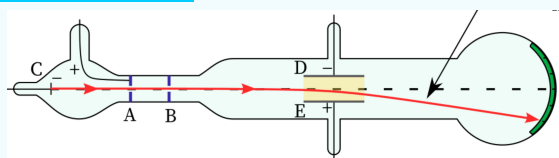
$$E = k \frac{Q}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

$$E = \frac{1}{4\pi \cdot 8,854 \cdot 10^{-12}} \frac{1,602 \cdot 10^3}{(10^{-2})^2} = 1,4 \cdot 10^9 \text{ V/m}$$

## 🌀 Otázky a úlohy 🌀

- Určte veľkosť intenzity elektrického poľa v mieste, kde na bodový náboj  $200 \mu\text{C}$  pôsobí sila  $1 \text{ N}$ . [ $5 \cdot 10^3 \text{ N/C}$ ]
- Určte veľkosť intenzity elektrického poľa vo vzdialenosti  $30 \text{ cm}$  od bodového náboja  $10 \mu\text{C}$  vo vákuu. [ $10^6 \text{ N/C}$ ]
- V homogénnom elektrickom poli s intenzitou  $4 \cdot 10^5 \text{ N} \cdot \text{C}^{-1}$  je umiestnený náboj  $2,5 \mu\text{C}$ . Akou veľkou silou pôsobí pole na náboj? [ $1 \text{ N}$ ]
- Koľko elektrónov je na štvorcovej platni ( $a = 5 \text{ cm}$ ) ak  $12 \text{ cm}$  od nej, náboj vytvára elektrické pole s intenzitou  $2,5 \text{ N/C}$ ? Predpokladajte, že platňa je vo vákuu.
- Aká veľká elektrická sila pôsobí na protón, ktorý sa nachádza v elektrostatickom poli v bode s intenzitou  $2 \cdot 10^5 \text{ N/C}$ ? Aké veľké bude jeho zrýchlenie v danom mieste poľa? Pokojová hmotnosť protónu je  $1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ . [ $3,2 \cdot 10^{-14} \text{ N}$ ;  $1,9 \cdot 10^{13} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ]

### Fyzika v praxi



Nabité častice (červené) sa pôsobením elektrickej sily v elektrickom poli ( $D-E$ ) a intenzitou  $E$  medzi dvomi

nabitými platňami vychylujú.<sup>a</sup> Na základe nastavenej intenzity a merania výchylky nabitých častíc je možné určiť pomer hmotnosti k náboju  $m/Q$ . Týmto princípom bol objavený elektrón a určený náboj protónu. Dnes sa využíva v tzv. hmotnostnej spektrometrii, na základe ktorej sa určuje prvkové zloženie vzorky alebo molekuly.

<sup>a</sup>Obrázok prevzatý zo stránky: chemistrygod.com



## 1.4 Práca v homogénnom elektrickom poli

**Príklad 1.5** Aká veľká práca  $W$  sa vykoná na prenesenie náboja  $Q$  z bodu  $A$  do bodu  $B$  obr. 1.13 v homogénnom poli s intenzitou  $E$  medzi dvomi nabitými platňami.

**Riešenie:** Pri odvodení veľkosti práce v homogénnom elektrickom poli vychádzame zo vzťahu pre mechanickú prácu:

$$W = F s$$

Prácu v tomto prípade vykonáva elektrická sila po dráhe,

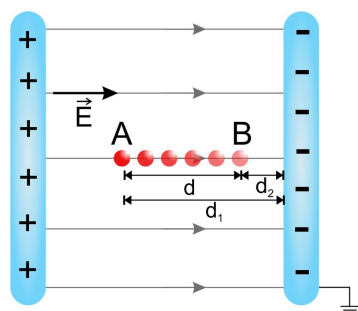
ktorá je z obrázku označená ako  $d$ :

$$W = F_e d$$

Elektrickú silu môžeme nahradiť odvodením zo vzťahu 1.3 pre intenzitu:

$$|\vec{E}| = \frac{|F_e|}{Q} \Rightarrow |F_e| = |\vec{E}| Q$$

$$W = |\vec{E}| Q d \quad (1.4)$$



**Obr. 1.13:** Presun bodového náboja  $Q$  v elektrickom poli s intenzitou  $E$ .

Práca vykonaná na prenesenie bodového náboja podľa výsledku nezávisí od trajektórie náboja, iba od vzdialeností bodov A a B, veľkosti náboja a veľkosti intenzity elektrického poľa. Podobne ako pre gravitačné pole, vykonaná práca predstavuje zmenu potenciálnej energie:

$$W = \Delta E_p \quad (1.5)$$

**Elektrická potenciálna energia** náboja v istom mieste

elektrického poľa je určená prácou, ktorú vykoná elektrická sila pri premiestnení náboja z daného miesta na povrch Zeme (uzemnenú platňu), nezávisle od trajektórie.

**Príklad 1.6** V homogénnom elektrickom poli pôsobí vo vákuu na náboj  $5 \cdot 10^{-8}$  C sila  $10^{-4}$  N. Určte veľkosť intenzity elektrického poľa v tomto bode a veľkosť vykonanej práce pri prenosení náboja o 5 cm.

**Riešenie:** Pre intenzitu elektrického poľa ak máme zadanú silu a náboj platí vzťah:

$$E = \frac{F_e}{Q} = \frac{10^{-4}}{5 \cdot 10^{-8}} = 2 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{C}^{-1}$$

Pre prácu sme odvodili vzťah:

$$W = |\vec{E}Q|d$$

Všetky veličiny na pravej strane poznáme:

$$W = 2 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-8} \cdot 0,05 = 5 \mu\text{J}$$

### Rozšírenie 1.2 (Práca v elektrickom poli)

V úvahách sme uvažovali o homogénnom poli, teda takom, kde je intenzita vo všetkých miestach rovnaká. Vo všeobecnosti to tak nemusí byť a intenzita sa so vzdialenosťou mení. Práca predstavuje skalárnu veličinu, avšak intenzita je veličinou vektorovou. Na pravej strane teda potrebujeme skalárny súčin vektorov. Ak vzdialenosť  $d$  nahradíme posunutím, čo je tiež vektor, vzťah pre prácu môžeme vyjadriť pomocou skalárneho súčinu vektorov:

$$W_{A-B} = \int_A^B Q \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

## 🎀 Otázky a úlohy 🎀

- Určte veľkosť intenzity elektrického poľa v bode, v ktorom na elektrický náboj  $1,0 \cdot 10^{-4}$  C pôsobí elektrická sila 2,0 N. Akú prácu vykonajú sily poľa pri prenosení tohto náboja z daného bodu do bodu vo vzdialenosti 4 cm? [ $2 \cdot 10^4$  N/C;  $8 \cdot 10^{-2}$  J]
- Akú veľkú prácu vykoná sila, ktorá premiestni časticu s kladným nábojom  $20 \mu\text{C}$  v homogénnom poli s intenzitou  $10^4 \text{ N} \cdot \text{C}^{-1}$  pozdĺž siločiar po dráhe 10 cm? [0,02 J]
- Určte veľkosť intenzity elektrického poľa medzi dvoma rovnobežnými vodivými platňami, keď náboj  $5 \mu\text{C}$  prenosený na kladne nabitú platňu má vzhľadom na uzemnenú platňu potenciálnu energiu 1 J. Vzdialenosť platní je 20 cm. [ $10^6$  N/C]

## 🎀 Pre seminaristov 🎀

- Pre prácu, ktorá sa vykoná pri premiestnení kladného náboja  $Q'$  podĺž siločiar radiálneho poľa guľového vodiča s polomerom  $R$ , na ktorom je rovnomerne rozmiestnený kladný náboj  $Q$ , z miesta so vzdialenosťou  $r > R$  od guľového vodiča na jeho povrch, platí vzťah:

$$W = kQ'Q \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{r} \right)$$

kde  $k$  je konštanta zo vzťahu 1.2. Podľa uvedeného vzťahu vypočítajte, akú veľkú prácu vykonajú vonkajšie sily, ktoré premiestnia náboj  $+10^{-2}$  C z nekonečne veľkej vzdialenosti na povrch guľového vodiča s polomerom 3 cm. Guľový vodič má náboj  $+1 \mu\text{C}$ . [ $3 \cdot 10^{-3}$  J]

- V elektrickom poli kladného bodového náboja, v bode 30 cm od neho, pôsobí vo vákuu na náboj  $2 \cdot 10^{-6}$  C sila  $10^{-3}$  N. Určte veľkosť práce vykonanej na prenosenie náboja do vzdialenosti 35 cm od kladného bodového náboja. (Uvedomte si, že intenzita elektrického poľa bodového náboja sa so vzdialenosťou mení.)

## 1.5 Potenciál elektrického poľa a elektrické napätie

Podobne ako pre gravitačné pole je potenciál elektrického poľa definovaný ako práca potrebná na prenesenie daného náboja na miesto s nulovým potenciálom. Za miesta s **nulovým potenciálom** považujeme Zem a telesá vodivo spojené so Zemou.

$$\phi_e = \frac{W}{Q'} = \frac{\Delta E_p}{Q'}; \quad [\phi_e] = \frac{J}{C} = V \quad (1.6)$$

Jednotkou elektrického potenciálu je V - volt.

### Definícia 1.9 (Potenciál elektrického poľa)

*práca, ktorú vykonajú elektrické sily na premiestnenie kladného náboja na povrch Zeme.*



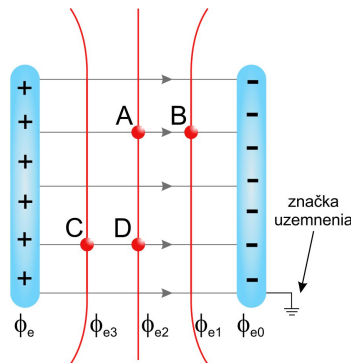
Dosadením za elektrickú prácu dostaneme pre potenciál:

$$\phi_e = \frac{W}{Q'} = \frac{|\vec{E}|Q'd}{Q'} = Ed \quad (1.7)$$

Ak zo vzťahu vyjadríme intenzitu elektrického poľa, vyplnie pre intenzitu jednotka, ktorá sa používa v praxi, ktorá je uvedená už vo vzťahu 1.3:

$$\phi_e = Ed \longrightarrow E = \frac{\phi_e}{d}; \quad [E] = \frac{V}{m} \quad (1.8)$$

Potenciál je skalárnou veličinou. Elektrické pole opisujeme pomocou **ekvipotenciálnych hladín** (skalárne pole) - miest s rovnakým potenciálom, ktoré spájame čiarou, pričom zo vzťahu 1.8 vyplýva, že čiary predstavujúce ekvipotenciálne hladiny sú kolmé na siločiaru elektrického poľa, keďže vykonaná práca (potenciál) je tým väčšia, čím väčšia je vzdialenosť od miesta s nulovým potenciálom (záporne nabitá platňa na obrázku, tá je uzemnená):



**Obr. 1.14:** Znáročnenie ekvipotenciálnych hladín v homogénnom elektrickom poli medzi dvomi elektricky nabitými platňami.

V homogénnom elektrickom poli má kladne nabitá platňa vzhľadom na zápornú (ktorá je uzemnená, teda ju považujeme za miesto s nulovým potenciálom) potenciál  $\phi_e$  (predstavuje prácu, ktorú vykonajú elektrické sily na prenesenie kladného náboja z kladne nabitej platne na uzemnenú zápornú platňu).

Aboslútna hodnota rozdielu potenciálov dvoch bodov elektrického poľa predstavuje **elektrické napätie**  $U$ :

$$U = |\phi_{e1} - \phi_{e0}| \quad [U] = V \quad (1.9)$$

### Definícia 1.10 (Elektrické napätie)

*predstavuje prácu, ktorú vykonajú elektrické sily na prenos náboja medzi dvomi bodmi. Vykonaná práca pritom nezávisí od trajektórie, iba od rozdielu potenciálov dvoch bodov.*

$$U = \Delta\phi_{A-D} = |\phi_A - \phi_D| = 0V; \quad U = \Delta\phi_{B-A} = \Delta\phi_{D-C}$$



Veľkosť intenzity medzi dvoma nabitými platňami možno teda na základe vzťahov 1.8 a 1.9 určiť meraním napätia a vzdialenosti medzi dvoma platňami:

$$U = |\phi_e - \phi_{e0}| = |E|d \rightarrow E = \frac{U}{d}; \quad [E] = \frac{V}{m} \quad (1.10)$$

Podľa vzťahov 1.4 a 1.10 pre prácu v elektrickom poli dostaneme:

$$W = EQd = \frac{U}{d}Qd = UQ \quad (1.11)$$

### Fyzika v praxi



V praxi sa pre určenie intenzity elektrického poľa medzi dvomi platňami používa meranie napätia<sup>a</sup> a vzdialenosti dvoch platní ako bolo ukázané (pozri vzťah 1.10). Pred-

stava merania sily pôsobiacej na testovací náboj je prakticky nemožná, ale nápomocná pri odvodení veličín pomocou, ktorých možno v praxi elektrické pole charakterizovať. Ukázali sme tiež, že v praxi sa nestretávame s pojmom potenciál, ktorý predstavuje vykonanú prácu na prenesenie náboja, ale používa sa pojem elektrické napätie.<sup>b</sup>

<sup>a</sup>S meraním napätia sa oboznámite v ďalších kapitolách.

<sup>b</sup>Obrázok prevzatý zo stránky: [electrical-engineering-portal.com](http://electrical-engineering-portal.com)



## 🌊 Otázky a úlohy 🌊

- Nakreslite skalárne pole potenciálu v okolí kladne nabitého bodového náboja.
- Aký potenciál má vodič, keď na prenesenie náboja  $50 \mu\text{C}$  z miesta z nulového potenciálu na jeho povrch sa vykonala práca  $0,2 \text{ J}$ ? [4 kV]
- Určte veľkosť intenzity elektrického poľa medzi dvoma rovnobežnými vodivými platňami, z ktorých jedna má vzhľadom na uzemnenú platňu potenciál  $1,2 \text{ kV}$ . Vzdialenosť platní je  $20 \text{ cm}$ . [ $5 \cdot 10^3 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ ]
- Medzi dvoma rovnobežnými platňami vzdialenými  $12 \text{ cm}$  sa nameralo napätie  $600 \text{ V}$ . Určte veľkosť intenzity poľa medzi platňami. [ $5000 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ ]
- V homogénnom elektrickom poli s intenzitou  $10^4 \text{ V/m}$  sa pohyboval elektrón po siločiare dĺžky  $20 \text{ cm}$ . Akú prácu vykonali sily elektrického poľa? [ $3,2 \cdot 10^{-16} \text{ J}$ ]
- Aká veľká práca je potrebná na prenesenie kladného elektrického náboja  $1,1 \text{ C}$  zo záporného pólu batérie s napätím  $4,5 \text{ V}$  na kladný pól? [ $4,95 \text{ J}$ ]
- V elektrickom poli je v mieste A potenciál  $300 \text{ V}$  a v mieste B  $1,2 \text{ kV}$ . Aká práca je potrebná na prenesenie náboja  $3,0 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  z bodu A do bodu B? Aká práca sa vykoná pri prenose náboja opačným smerom po tej istej krivke, prípadne po inej? [ $2,7 \cdot 10^5 \text{ J}$ ;  $-2,7 \cdot 10^5 \text{ J}$ ]
- Dokážte, že pri premiestňovaní náboja po tej istej ekvipotenciálnej ploche sa práca nekoná.

### Projekt 1.6 - Thomsonov experiment

Pripravte prezentáciu, v ktorej opíšete Thomsonov experiment:

- stručne opíšete životopis Josepha Johna Thomsona,
- vysvetlíte význam Thomsonovho experimentu a jeho súvis s elektrostatickým poľom,
- vysvetlíte fyzikálne princípy Thomsonovho experimentu, doplňte vhodnou schémou,
- matematicky experiment popíšete, ukážte odvodenie rovníc.

### Projekt 1.7 - Millikanov experiment

Pripravte prezentáciu, v ktorej opíšete Millikanov experiment:

- stručne opíšete Millikanov životopis,
- vysvetlíte význam Millikanovho experimentu a jeho súvis s elektrostatickým poľom,
- vysvetlíte fyzikálne princípy Millikanovho experimentu, doplňte vhodnou schémou,
- matematicky experiment popíšete, ukážte odvodenie rovníc.

**Projekt 1.8 - Rutherfordov experiment**

Pripravte prezentáciu, v ktorej opíšete Rutherfordov experiment:

- stručne opíšete životopis E. Rutherforda,
- vysvetlite význam jeho experimentu a jeho súvis s elektrostatickým poľom,
- vysvetlite fyzikálne princípy Rutherfordovho experimentu, doplníte vhodnou schémou,
- matematicky experiment popíšete, ukážte odvodenie rovníc,
- poukážete na problémy, ktoré sa týkajú jeho planetárneho modelu.

**Projekt 1.9 - Potenciál a napätie v medicíne**

Pripravte prezentáciu, v ktorej opíšete význam potenciálu a napätia pri:

- prenášaní nervových vzruchov - stručne opíšete mechanizmus (pomôžte si názorným videom alebo simuláciou),
- meraní EKG - stručne opíšete princíp a výslednú krivku elektrokardiogramu, vysvetlite rozdiel medzi elektrokardiogramom a elektrokardiografom,
- stručne uvedte príspevok Augustusa Wallera a Willema Einthovena k elektrokardiografii.

## 1.6 Rozmiestnenie náboja na vodiči a izolante

**Experiment 1.8 - Rozmiestnenie elektrického náboja na vodiči a izolante<sup>a</sup>**

Pripravte si izolačnú podložku (napr. polystyrénovú tenkú dosku), plechovku s hliníkovými páskami, plastovú kanalizačnú rúru (alebo iný vhodný izolátor), PVC rúrku, flanel, držiak na alobalové pásiky a tlejivku. V experimente je možné použiť iné alternatívy, ktoré použijete na nabitie plechovky a plastovej rúry.



**Obr. 1.15:** Senzor na skúmanie rozloženie náboja na telesách.

<sup>a</sup>Experiment zo stránky [physicsexperiments.eu](http://physicsexperiments.eu)

1. Najprv si pripravte "senzor", ktorým budete skúmať rozloženie náboja na vodiči a izolante. Na kúsok drôtika pripevnite pásik alobalu tak, aby pásik bol voľne pohyblivý obr. 1.15.
2. Položte plechovku a plastovú rúru na izolačnú podložku.
3. Nabite plechovku a rúru na jednom mieste. Prešetrite rozmiestnenie náboja na plechovke a rúre.
4. Nabite plechovku a rúru na niekoľkých miestach. Prešetrite rozmiestnenie náboja na plechovke a

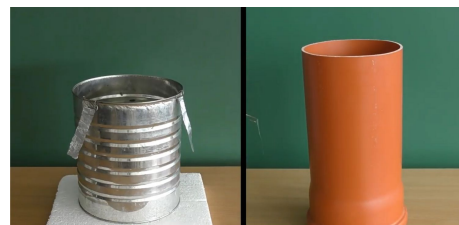
rúre.

5. Dotknite sa rúry a plechovky na jednom mieste prstom alebo tlejivkou.

Vo vodiči sa náboj pohybuje voľne. Ak vodič nabijeme, náboj sa rozmiestni rovnomerne po povrchu vodiča (v prípade pravidelného tvaru bez ostrých hrán).

Vnútri vodiča prítomnosť náboja nepozorujeme, pretože rovnaké náboje sa vo vnútornom priestore odpudzujú a snažia sa dostať od seba čo najďalej - na vonkajší povrch. V prípade izolanta, náboj sa nemôže voľne pohybovať. Ak izolant nabijeme, náboj ostáva v bode nanosenia náboja. Ak je nabitých niekoľko miest, náboj sa drží na nich a mimo týchto oblastí prítomnosť náboja nepozorujeme.

Podobne je to v prípade vybíjania. Ak sa dotkneme nejakého bodu vodiča, vybije sa celý náboj z vodiča. V prípade izolanta sa vybije len časť náboja, ktorý je v oblasti dotyku.



**Obr. 1.16:** Náboj na plechovke je rozložený rovnomerne na vonkajšom povrchu, na rúre pozorujeme prítomnosť náboja len v mieste nabitia.



Z experimentu sme videli, že náboj rozložený na izolante je nepravidelne kým na vodiči sa v dôsledku voľnej pohyblivosti rozmiestni rovnomerne na vonkajšom povrchu. Pre opis rozloženia náboja slúži veličina - **plošná hustota náboja**:

$$\sigma = \frac{Q}{S} \quad [\sigma] = \frac{C}{m^2} \quad (1.12)$$

Pre označenie plošnej hustoty sa používa grécke písmeno sigma -  $\sigma$ .  $Q$  predstavuje množstvo náboja a  $S$  plochu, na ktorej je náboj rovnomerne rozložený. Pre povrch gule je plošná hustota náboja:

$$\sigma = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{4\pi r^2} \quad (1.13)$$

Zo vzťahu 1.13 môžeme odvodiť vzťah pre intenzitu elektrického poľa nabitej gule:

$$E = k \frac{Q}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q}{r^2} = \frac{\sigma}{\epsilon} \implies \sigma = \epsilon E \quad (1.14)$$

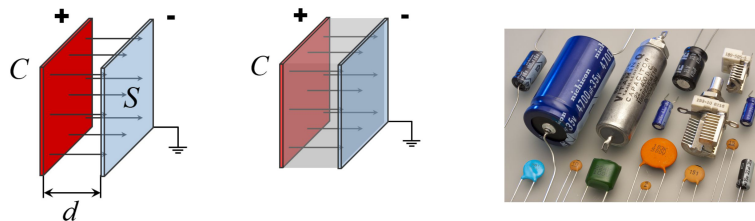
Plošnú hustotu náboja je teda možné určiť meraním intenzity elektrického poľa budeného nabitou guľou. Intenzitu je zase možné merať napätím ako bolo ukázané v predchádzajúcej podkapitole 1.5. Uvedený vzťah 1.14 má všeobecnú platnosť a platí pre všetky vodiče.

## Kapacita vodiča, kondenzátor

V podkapitole 1.1 sme sa experimentom 1.2 presvedčili, že čím viac nabíjame teleso, tým viac náboja obsahuje. Viac náboja zároveň znamená väčší potenciál:

$$Q = C\phi_e \quad (1.15)$$

kde konštanta  $C$  predstavuje konštantu úmernosti, ktorú voláme **kapacita**. Kapacita predstavuje koľko náboja je daný vodič schopný poňať. Kapacita rovných vodičov je veľmi malá, preto sa v praxi používajú rôzne druhy zariadení, ktoré nazývame **kondenzátory**. Princíp kondenzátora je na obr. 1.17:



**Obr. 1.17:** Schematické znázornenie kondenzátora a ukážky používaných kondenzátorov v praxi.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Upravené podľa J. Beňuška - Digitálna učebnica fyziky a stránky <https://cs.wikipedia.org>

### Definícia 1.11 (Kondenzátor)

elektrotechnická súčiastka tvorená dvomi platňami odelenými dielektrikom. Patrí medzi pasívne súčiastky elektrických obvodov a slúži na uskladnenie elektrickej energie. Elektrotechnické značky pre niektoré kondenzátory sú uvedené na obr. 1.19.



Aby sme si odvodili od čoho je závislá kapacita kondenzátora, budeme vychádzať z vzťahov, ktoré sme odvodili pre elektrické pole. Na platniach kondenzátora sa nachádza náboj s plošnou hustotou  $\sigma$ , pre ktorú platia vzťahy 1.12 a 1.14. Z týchto vzťahov je veľkosť náboja:

$$\sigma = \frac{Q}{S} = \epsilon E \implies Q = \epsilon ES \quad (1.16)$$

Pre potenciál medzi dvomi nabitými platňami sme odvodili vzťah 1.8, z ktorého pre intenzitu poľa medzi dvomi nabitými platňami platí:

$$\phi_e = Ed \implies E = \frac{\phi_e}{d} \quad (1.17)$$

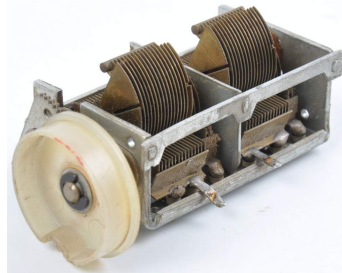
Dosadením intenzity do vzťahu 1.16 pre náboj dostaneme:

$$Q = \epsilon \frac{S}{d} \phi_e \quad (1.18)$$

Porovnaním so vzťahom 1.15 pre kapacitu dostaneme:

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad [C] = F \quad (1.19)$$

Kapacita platňového kondenzátora je priamo úmerná prostrediu dielektrika, ktoré sa nachádza medzi platňami (jeho permitivitve  $\epsilon$ ), plošnému prekryvu platní (veľkosť plochy, ktorou sa obe platne pokrývajú)  $S$  a nepriamo úmerná vzájomnej vzdialenosti oboch platní  $d$ . Zmena veľkosti prekryvu plôch sa využíva v otočných kondenzátoroch, kde séria platní s jednou polaritou sa otáčaním kolieska zasúva medzi platne s opačnou polaritou. Tým je možné plynule meniť kapacitu kondenzátora.

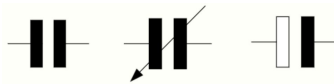


Obr. 1.18: Otočný kondenzátor<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Prevzaté zo stránky: odkarla.cz

Jednotkou kapacity kondenzátora je F - farad. Najčastejšie sa v praxi stretávame s kondenzátormi s kapacitami v rozmedzí pF -  $\mu$ F, ale existujú aj superkondenzátory s kapacitami do kF.

V praxi sa používajú rôzne druhy kondenzátorov obr. 1.17 s viacerými vrstvami, ktoré sú rôzne stočené (napr. do valca) s rôznymi dielektrikami. Kondenzátor ako elektrotechnická súčiastka slúži na uskladnenie elektrickej energie a patrí medzi pasívne súčiastky elektrických obvodov. Kondenzátor má svoju elektrotechnickú značku, ktorou ho v elektrických obvodoch rozpoznáte:



Obr. 1.19: Elektrotechnické značky pre kondenzátor: platňový, s premenlivou kapacitou, elektrolytický.

### Pieter van Musschenbroek



\*1692 - †1761

Bol holandský vedec. Ako profesor pôsobil v Duisburgu, Utrechte a Leidene. Vo vtedajšej dobe bola výroba elektrostatickej energie známa. Problém bol však vytvorenú energiu uskladniť. Musschenbroek navrhol prvého predchodcu dnešných kondenzátorov známy tiež ako Leydenská fľaša. Nezávisle od neho s rovnakým riešením prišiel pruský fyzik Ewald Georg von Kleist.



#### Projekt 1.10 - Kondenzátor

Vytvorte vlastný funkčný model kondenzátora - zariadenie, v ktorom je možné uskladniť elektrickú energiu. Popíšte princíp fungovania vášho modelu.

#### Projekt 1.11 - Význam kondenzátorov v praxi

Vytvorte prezentáciu, v ktorej ukážete využitie kondenzátorov v praxi:

- fotografický blesk - popíšte princíp fungovania fotografického blesku, popíšte úlohu kondenzátora,
- defibrilátor - vysvetlite, čo je to defibrilátor a

princíp na akom funguje, popíšte úlohu kondenzátora,

- počítačová pamäť - opíšte úlohu kondenzátora v počítačovej pamäti,
- svetloemitujúce kondenzátory - využitie,
- kondenzátorové prepínače - popíšte ich princíp,
- kondenzátorové mikrofóny - popíšte ich funkciu a výhody,
- ladenie v prijímačoch - popíšte úlohu kondenzátora v ladiacich obvodoch



- odstránenie jednosmernej zložky prúdu - opíšte aká je funkcia kondenzátora pri odstraňovaní jednosmernej zložky prúdu.

### Projekt 1.12 - Kondenzátory a elektrická energia

Vytvorte projekt na diskusiu o nasledovných možnostiach využitia kondenzátorov v oblasti energetiky:

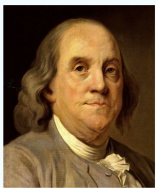
- kondenzátory ako zásobníky elektrickej energie,
- využitie kondenzátorov ako zachytávačov energie z bleskov,
- využitie kondenzátorov na výrobu laserových zbraní a prácu s pulznou energiou.

O jednotlivých možnostiach diskutujte so spolužiakmi. Aké sú výhody a aké nevýhody aplikácií kondenzátorov? Robili sa o niektorých spomenutých možnostiach vedecké štúdie? Pri diskusii uvážte aj ekonomické a ekologické dopady aplikácií.

### Projekt 1.13 - Franklinov zvonček

Vytvorte vlastný funkčný model Franklinovho zvončeka. Presentujte funkčnosť svojho modelu a opíšte jeho možné využitie. Informujte spolužiakov o vynájdení zvončeka už roku 1742 A. Gordonom. Právý význam zvončeka však dal až B. Franklin.

## Benjamin Franklin



\*1706 - †1790

*Bol americký polyhistor aktívny spisovateľ, vedec, štátnik a diplomat. Jeho meno sa spája najmä s politickou kariérou, kde bol jedným z tvorcov Deklarácie nezávislosti. Vo fyzike sa venoval najmä pokusom so statickou elektrinou. Zistil, že náboj z telies uniká najviac na ostrých hranách. Franklin uskutočnil nasledujúci pokus: Na strechu svojho domu vo Filadelfii postavil neuzemnenú železnú tyč, dole vidlicovito rozvetvenú s rozpätím asi pol metra. Medzi hroty zavesil na hodvábnu niť bronzové zvončeky. Keď nad domom tiahli búrkové mraky, zvončeky sa rozoznali. Tento pokus viedol k ochrane domov pred bleskom bleskozvodmi.*



**Príklad 1.7** Vypočítajte kapacitu platňového kondenzátora, ktorého každá platňa má plochu  $0,01 \text{ m}^2$ . Vzďialenosť platní je  $2 \text{ cm}$ . Medzi platňami je vzduch.

**Riešenie:** Pre kapacitu kondenzátora platí vzťah:

$$C = \epsilon \frac{S}{d} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}$$

Veličiny máme dané, nič nám teda nebráni pristúpiť k výpočtu. V tomto prípade potrebujeme však nájsť relatívnu permitivitu vzduchu v tabuľkách. Vzďialenosť platní je v  $\text{cm}$  potrebujeme ju premeniť na  $\text{m}$ :

$$C = 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 1,00060 \frac{0,01}{0,02} = 4,43 \text{ pF}$$

**Príklad 1.8** Vypočítajte kapacitu platňového kondenzátora, ktorého každá platňa má plochu  $0,01 \text{ m}^2$ . Vzďialenosť platní je  $2 \text{ cm}$ . Medzi platňami je vzduch.

**Riešenie:** Pre kapacitu kondenzátora platí vzťah:

$$C = \epsilon \frac{S}{d} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}$$

Veličiny máme dané, nič nám teda nebráni pristúpiť k výpočtu. V tomto prípade potrebujeme však nájsť relatívnu permitivitu vzduchu v tabuľkách. Vzďialenosť platní je v  $\text{cm}$  potrebujeme ju premeniť na  $\text{m}$ :

$$C = 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 1,00060 \frac{0,01}{0,02} = 4,43 \text{ pF}$$

**Príklad 1.9** Vložením dielektrika do vzduchového kondenzátora sa jeho kapacita zväčšila 7-krát. Určte relatívnu permitivitu dielektrika.

**Riešenie:** Pre prípad, že vnútorný priestor kondenzátora tvorí vzduch platí:

$$C_0 = \epsilon_0 \epsilon_{r0} \frac{S_0}{d_0}$$

Pre prípad vloženia dielektrika medzi platne bude nová kapacita:

$$C_1 = \epsilon_0 \epsilon_{r1} \frac{S_0}{d_0}$$

Ak do vnútorného priestoru vložíme neznáme dielektrikum, pre kapacity podľa zadania platí:

$$7C_0 = C_1$$

Za jednotlivé kapacity dosadíme vzťahy, ktoré sme si vyjadrili:

$$7\epsilon_0 \epsilon_{r0} \frac{S_0}{d_0} = \epsilon_0 \epsilon_{r1} \frac{S_0}{d_0}$$

Rovnaké veličiny vyškrtáme, z čoho dostaneme:

$$\epsilon_{r1} = 7\epsilon_{r0}$$

Permitivita dielektrika je 7-krát väčšia ako vzduchu. Keďže relatívna permitivita vzduchu je približne rovná 1, relatívna permitivita dielektrika je:

$$\epsilon_{r1} = 7 \cdot 1 = 7$$

## Nabíjanie kondenzátora

### Experiment 1.9 - Nabíjanie a vybíjanie kondenzátora v reálnom obvode

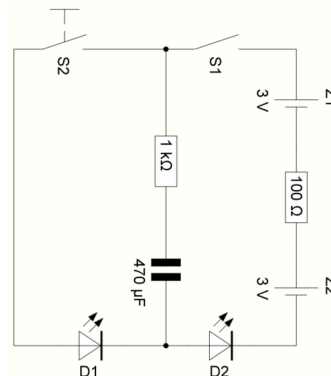
K demonštrácii uskladnenia a uvoľnenia elektrickej energie z kondenzátora použijeme elektrický obvod obr. 1.20 (so značkami a zapájaním sa oboznámite v ďalších kapitolách).

1. Zapnite spínač S1 a po chvíli ho vypnite. Pozorujte deje v obvode.
2. Teraz stlačte na niekoľko sekúnd spínač S2. Pozorujte deje v obvode.

Pri zopnutí spínača S1 dioda D2 svieti najprv jasným svetlom, ale jej svetlo postupne zoslabne, pretože zdroj Z1 nabíja kondenzátor. Po nabití ďalší prúd obvodom netečie, nakoľko v mieste kondenzátora je obvod prerušený (spomeňte si, že medzi platňami sa nachádza dielektrikum - izolant). Po tomto kroku je kondenzátor nabitý (uchováva elektrický náboj) a je na ňom uskladnená elektrická energia.

Po stlačení vypínača S2 sa rozosvieti dióda D1, ktorá

najprv svieti veľmi jasne, ale jej svetlo postupne slabne súčasne s vybíjaním kondenzátora.



Obr. 1.20: Elektrický obvod na demonštráciu nabíjania a vybíjania kondenzátora.

Hodnota kapacity kondenzátora ( $470\mu\text{F}$ ) určuje, aké množstvo elektrického náboje (elektrickej energie) je možné v ňom uchovať a hodnota odporu  $1\text{ k}\Omega$  zasa určuje, ako rýchlo sa kondenzátor vybije.

### Rozšírenie 1.3 (Nabíjanie a vybíjanie kondenzátora)

Proces nabíjania kondenzátora popisujú rovnice vyjadrujúce okamžitý prúd a okamžité napätie v obvode:

$$i(t) = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{RC}}; \quad u_c(t) = U - U e^{-\frac{t}{RC}}$$

Závislosti sú exponenciálne závislé a rýchlosť ich rastu alebo poklesu určuje člen v exponente  $RC$ .

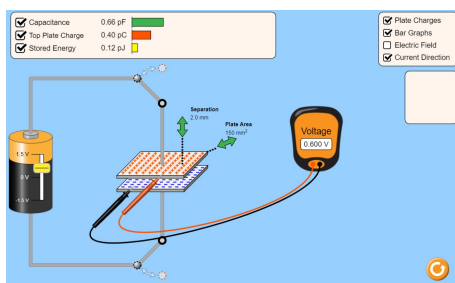
Odvođením sa dá určiť približne čas vybitia a nabitia kondenzátora:

$$t = 5RC$$

Rýchlosť nabíjania a vybíjania je teda závislá od kapacity kondenzátora a odporu, cez ktorý sa kondenzátor vybíja.

### Experiment 1.10 - Nabíjanie kondenzátora

Nabíjanie kondenzátora preskúmame pomocou fyzikálneho appletu zo stránky [phet.colorado.edu](http://phet.colorado.edu).



Obr. 1.21: Prostredie appletu.

1. Otvorte applet capacitor. Nastavte vzdialenosť platní na  $2\text{ mm}$  a ich veľkosť na  $150\text{ mm}^2$ . Zapnite zobrazenie náboja vrchnej platne (Top plate charge)

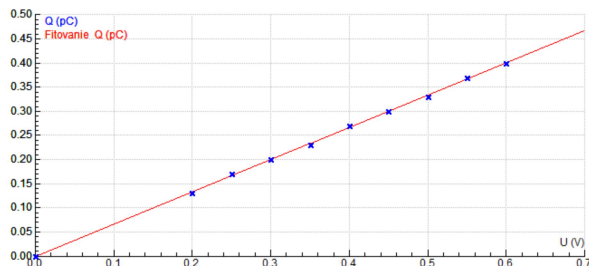
2. Na platne kondenzátora pripojte digitálny voltmeter. Čiernu sondu napojte na spodnú platňu a červenú na vrchnú obr. 1.20.
3. Postupne zvyšujte napätie na batérii a do tabuľky v programe Coach (alebo inom vhodnom) zapisujte dvojice napätia a náboja. Urobte 10 dvojíc.
4. Zo získaných hodnôt zostrojte graf  $Q(U)$ . Výsledok preložte vhodnou funkciou.
5. Určte veľkosť vykonanej práce elektrických síl pri nabíjaní kondenzátora a odvodte príslušné vzťahy.

Graf  $Q(U)$  je lineárnou závislosťou. Pre závislosť platí vzťah:

$$Q = kU$$

Kde konštantu úmernosti predstavuje kapacitu kondenzátora. So vzťahom sme sa už stretli (vzťah 1.15).

Výsledok preto nie je prekvapivý. Veľkosť náboja na kondenzátore je priamo úmerný napätiu.



Obr. 1.22: Výsledná závislosť  $Q(U)$ .

Pre prácu, v homogénom elektrickom poli platí vzťah 1.11:

$$W = QU$$

Ak by závislosť  $Q(U)$  bola rovnobežka s osou  $x$ , prácu by sme určili ako obsah obdĺžnika  $S = ab = QU$ .

Prácu je teda možné určiť zo závislosti  $Q(U)$  a pred-

stavuje plochu pod krivkou tejto závislosti. V našom prípade plochu tvorí pravouhlý trojuholník, pre ktorého obsah platí:

$$S = \frac{1}{2}av_a$$

Prepísaním cez fyzikálne veličiny pre prípad nabíjania kondenzátora pre vykonanú prácu dostaneme:

$$W = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2}CU^2 \quad (1.20)$$

Vieme, že práca zároveň predstavuje množstvo energie. V tomto prípade je teda veľkosť uskladnenej elektrickej energie v kondenzátore možné určiť na základe vzťahu:

$$E_e = \frac{1}{2}CU^2 \quad (1.21)$$

Vzťahy 1.20 a 1.21 platia pre kondenzátor. Elektrickú energiu, ktorá je uskladnená na kondenzátore sme vyjadrili pomocou kapacity a napätia, nakoľko v praxi je ich určenie jednoduché. Kapacitu kondenzátora udáva výrobca a napätie je možné merať.

**Príklad 1.10** Aká veľká energia sa nahromadí na kondenzátore s kapacitou  $16 \mu\text{F}$  ak ho pripojíme na zdroj s napätím  $100 \text{ V}$  a potom  $1000 \text{ V}$ ?

**Riešenie:** Zo zadania potrebujeme vzťah, ktorý spája elektrickú energiu, kapacitu a napätie:

$$E_e = \frac{1}{2}CU^2$$

Dosadíme za známe veličiny, dáme pozor na premenu jednotiek:

$$E_e = \frac{1}{2}16 \cdot 10^{-6} \cdot 100^2 = 0,08 \text{ J}$$

Ak napojíme kondenzátor na  $1000 \text{ V}$ :

$$E_e = \frac{1}{2}16 \cdot 10^{-6} \cdot 1000^2 = 8 \text{ J}$$

Hoci napätie sme zvýšili len 10-krát, uskladnená energia sa zvýšila 100-násobne. Na prvý pohľad očakávame rovnaké zvýšenie, avšak v tomto prípade si musíme uvedomiť, že elektrická energia uskladnená na kondenzátore je priamoúmerná druhej mocnine napätia:

$$E_e \sim U^2$$

## 🏹 Otázky a úlohy 🏹

- Určte plošnú hustotu na povrchu kovovej gule s polomerom  $10 \text{ cm}$ , keď je na nej rovnomerne rozmiestnený náboj  $1 \mu\text{C}$ . [ $8 \mu\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
- Plošná hustota elektrického náboja na povrchu guľového vodiča je  $1,0 \text{ C} \cdot \text{m}^{-2}$ . Určte veľkosť intenzity elektrického poľa pri povrchu vodiča, ktorý je vo vákuu. [ $1,1 \cdot 10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ ]
- Meraním elektrického náboja a potenciálu na guľovom vodiči sa získali hodnoty uvedené v tabuľke. Určte kapacitu vodiča pomocou počítača.

$\phi_e$ [ $10^3 \text{ V}$ ]	0,8	1,2	1,6	2,4
$Q$ [ $10^{-8} \text{ C}$ ]	2,4	3,6	4,8	7,2

- Na aký potenciál sa nabije vodič s kapacitou  $20 \text{ pF}$  nábojom  $1 \mu\text{C}$ ? [ $5 \cdot 10^4 \text{ V}$ ]
- Aká je kapacita platňového kondenzátora, ktorý má obdĺžnikové platne s rozmermi  $30 \text{ cm}$  a  $20 \text{ cm}$  vo vzdialenosti  $6 \text{ mm}$ ? Vnútorý priestor je tvorený vzduchom. [ $88,5 \text{ pF}$ ]
- Ako možno zmeniť energiu nabitého otočného kondenzátora bez toho, aby sme zmenili náboj na ňom?
- Akú energiu má kondenzátor s kapacitou  $50 \mu\text{F}$ , ktorý nabijeme na napätie  $400 \text{ V}$ ? [ $4 \text{ J}$ ]
- Aká je kapacita kondenzátora, ktorý sa po dodaní náboja  $2,0 \cdot 10^{-4} \text{ C}$  nabije na  $100 \text{ V}$ ? [ $2 \text{ mF}$ ]

9. Kondenzátor s kapacitou  $20 \mu\text{F}$  pripojíme k vreckovej batérii s napätím  $4,5 \text{ V}$ . Aký veľký náboj prijme kondenzátor? Čo budeme pozorovať ak nabitý kondenzátor pripojíme na ampérmetr? [ $9 \cdot 10^{-5} \text{ C}$ ]
10. Koľkokrát sa zväčší napätie medzi platňami nabitého kondenzátora, ak platne vzdialíme na trojnásobnú hodnotu pôvodnej vzdialenosti? [zväčší sa 3-krát]
11. Ako sa zmení napätie na otočnom kondenzátore ak prekryv platní sa zmenší na polovicu? Predpokladáme, že náboj platní sa nemení.

## Pre seminaristov

1. Porovnajme čas nabitia a vybitia kondenzátora v experimente 1.9 so vzorcom z rozšírenia 1.3. Čím môžu byť zapríčinené odchýlky? Ako by ste mohli meranie spresniť? Aké iné metódy použiť?
2. Navrhnete experiment, ktorým by ste potvrdili časovú závislosť priebehu napätia / prúdu počas nabíjania alebo vybíjania kondenzátora.

### Spájanie kondenzátorov

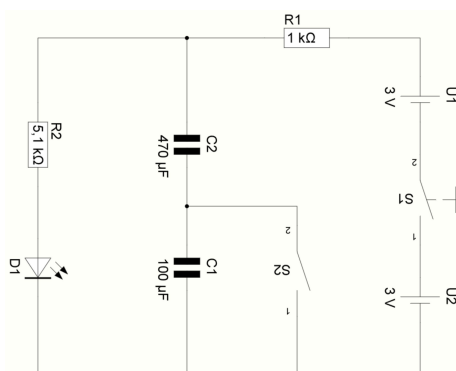
Do elektrického obvodu môže byť zapojených viacero kondenzátorov. Spôsob ich zapojenia mení celkovú kapacitu obvodu. Princiálne, prvky obvodu môžu byť zapojené **sériovo** (za sebou) alebo **paralelne** (vedľa seba).

#### Experiment 1.11 - Sériové zapojenie kondenzátorov

Zostavte elektrický obvod podľa schémy na obr. 1.23.

1. Zapnite vypínač S2 a potom stlačte a uvoľnite tlačidlo S2. LED dióda D1 bude svietiť jasným svetlom. Kondenzátor s kapacitou  $470 \mu\text{F}$  sa nabíja po zapnutí tlačidla S1. Po vypnutí vypínača S1 začne svetlo LED diódy pomaly slabnúť.
2. Teraz vypnite vypínač S2. Zopakujte test - stlačte vypínač S1 a potom ho uvoľnite. LED dióda zhasne oveľa rýchlejšie.

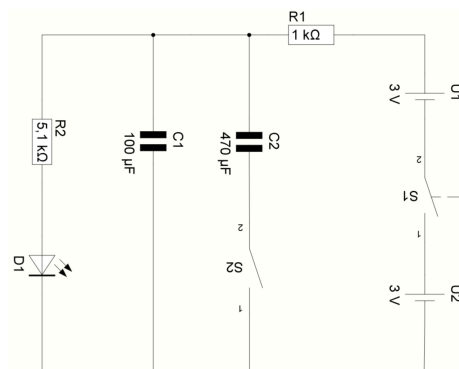
V sériovom zapojení kondenzátorov C1 a C2 je celková kapacita nižšia, preto sa rýchlejšie vybíjajú.



**Obr. 1.23:** Obvod na skúmanie sériového zapojenia kondenzátorov.

#### Experiment 1.12 - Paralelné zapojenie kondenzátorov

Zostavte elektrický obvod podľa schémy na obr. 1.25.



**Obr. 1.24:** Obvod na skúmanie paralelného zapojenia kondenzátorov.

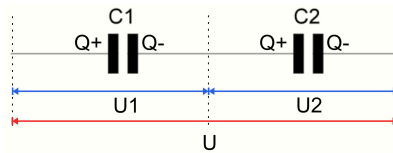
1. Zapnite vypínač S2 a potom stlačte a uvoľnite tlačidlo S2. LED dióda D1 bude svietiť jasným svetlom. Kondenzátor s kapacitou  $470 \mu\text{F}$  sa nabíja po zapnutí tlačidla S1. Po vypnutí vypínača S1 začne svetlo LED diódy pomaly slabnúť.
2. Teraz vypnite vypínač S2. Zopakujte test - stlačte vypínač S1 a potom ho uvoľnite. LED dióda zhasne oveľa rýchlejšie.

V sériovom zapojení kondenzátorov C1 a C2 je celková kapacita nižšia, preto sa rýchlejšie vybíjajú.

Pri sériovom zapojení kondenzátorov sa celkové napätie  $U$  rovná súčtu napätí na jednotlivých kondenzátoroch  $U_1$  a  $U_2$ :

$$U = U_1 + U_2 \quad (1.22)$$

Zapojením kondenzátorov na zdroj je náboj veľkosti  $Q$  privedený len na krajné platne t.j. ľavú platňu kondenzátora C1 a pravú platňu kondenzátora C2. Vnútorne platne medzi kondenzátormi získajú rovnaký náboj prostredníctvom



Obr. 1.25: Sériové zapojenie kondenzátorov.

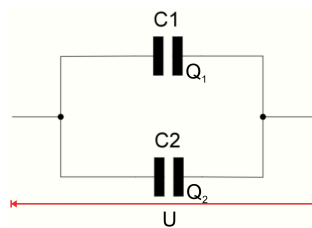
elektrostatickej indukcie (uvedomte si, že elektrický obvod je v mieste dielektrika kondenzátora prerušený) a teda aj na jednotlivých kondenzátoroch bude uskladnený rovnako veľký náboj  $Q$ . Potom pre celkové napätie použitím vzťahu (1.15) napísať:

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} \quad (1.23)$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (1.24)$$

Vzťah možno zovšeobecniť pre  $n$  kondenzátorov, ktoré budú zapojené v sérii:

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \quad (1.25)$$



Obr. 1.26: Paralelné zapojenie kondenzátorov.

Pri paralelnom zapojení kondenzátorov je celkový uskladnený náboj rovný súčtu nábojov na jednotlivých kondenzátoroch:

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (1.26)$$

Veľkosť náboja uskladneného na kondenzátoroch závisí od vonkajšieho napätia a platí pre neho vzťah (1.15):

$$UC = UC_1 + UC_2 \quad (1.27)$$

V paralelnom zapojení je rovnaké napätie  $U$  privedené na obe platne kondenzátora  $C_1$  aj  $C_2$ . Veľkosť náboja na danom kondenzátore v tomto prípade závisí od jeho kapacity.

$$C = C_1 + C_2 \quad (1.28)$$

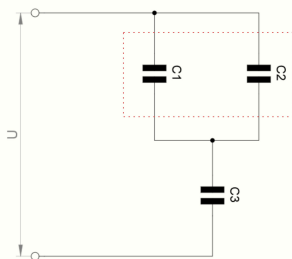
Vzťah možno zovšeobecniť pre  $n$  kondenzátorov, ktoré budú zapojené vedľa seba:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \quad (1.29)$$

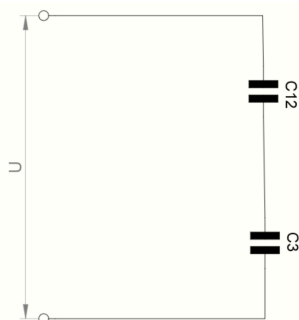
**Príklad 1.11** Určte výslednú kapacitu kondenzátorov na obr. 1.27 ak sú známe kapacity kondenzátorov:  $C_1 = 12,0\mu\text{F}$ ;  $C_2 = 5,3\mu\text{F}$  a  $C_3 = 4,5\mu\text{F}$ .

**Riešenie:** Kondenzátory sú v zloženom zapojení. Obvod teda rozdelíme na menšie úseky paralelných zapojení alebo sériových, na ktorých vypočítame výslednú

kapacitu podľa vyššie uvedených vzťahov pre paralelné a sériové zapojenie. V našom prípade sú kondenzátory  $C_1$  a  $C_2$  zapojené paralelne. Vypočítame výslednú kapacitu pre nich a nahradíme ich kondenzátorom  $C_{12}$ , ktorý je zapojený voči kondenzátoru  $C_3$  sériovo.



Obr. 1.27: Zapojenie kondenzátorov.



Obr. 1.28: Nahradenie paralelného zapojenia, výslednou kapacitou.

Pre paralelné zapojenie  $C_1$  a  $C_2$  bude platiť:

$$C_{12} = C_1 + C_2$$

$$C_{12} = 12 + 5,3 = 17,3 \mu F$$

Kapacitu paralelného zapojenia kondenzátorov  $C_1$  a  $C_2$  nahradíme výslednou kapacitou  $C_{12}$ . Tá je v sériovom zapojení s kondenzátorom  $C_3$ :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{12}} + \frac{1}{C_3}$$

$$\frac{1}{C} = \frac{C_3 + C_{12}}{C_{12}C_3}$$

$$C = \frac{C_3C_{12}}{C_{12} + C_3}$$

$$C = \frac{4,5 \cdot 17,3}{17,3 + 4,5} = 3,57 \mu F$$

Všimnite si, že sme nepoužili premenu jednotiek a to z toho dôvodu, že všetky kapacity sú uvedené v rovnakých jednotkách  $\mu F$  a vo vzťahoch nevystupujú iné veličiny, iba kapacity zapojených kondenzátorov.

## 🌊 Otázky a úlohy 🌊

- Určte výslednú kapacitu troch kondenzátorov s kapacitami 20 pF, 0,03 nF; 50 pF spojených paralelne a sériovo. [100 pF; 9,7 pF]
- Ku kondenzátoru s kapacitou 400 pF treba pripojiť druhý kondenzátor tak, aby výsledná kapacita bola 240 pF. Ako treba pripojiť druhý kondenzátor a akú má kapacitu? [sériovo; 600 pF]
- Na aké napätie sa nabijú kondenzátory s kapacitami 0,1  $\mu F$  a 0,2  $\mu F$ , ak ich spojíme za sebou a pripojíme na zdroj s napätím 30 V? Aké náboje budú na jednotlivých kondenzátoroch po odpojení zdroja? [20 V; 10 V; 2  $\mu C$ ; 2  $\mu C$ ]

## 🌊 Pre seminaristov 🌊

- Rádioamatér má k dispozícii dva kondenzátory s rovnakou kapacitou. Sústavu s akou kapacitou môže získať vzájomným zapojením týchto kondenzátorov?

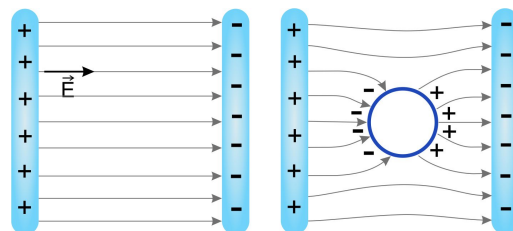
## Vodič a izolant v elektrickom poli

### Experiment 1.13 - Vodič v elektrickom poli

Opäť si pripravte pravítko a plechovku s alobalovými pásikmi, ktoré ste použili pri úvodných experimentoch. Nabité pravítko približujte k plechovke s alobalovými pásikmi a následne nabité pravítko oddialte. Pri priblížení nabitého telesa k vodiču pozorujeme pohyb náboja - vychýlenie pásikov na krátky čas. Pri oddialení nabitého telesa, pásiky znova klesnú.

Voľné častice s nábojom sa vo vodičoch ustavične a neusporiadane pohybujú. Preto je vo vodiči, ktorý nie je nabitý a nie je vo vonkajšom elektrickom poli, ich rozloženie také, že v ľubovoľnej časti vodiča je výsledný náboj nulový (pásiky sú pri plechovke). Navonok sú

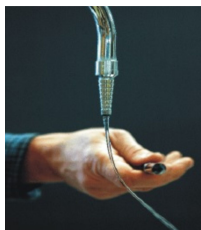
vodiče elektricky neutrálne. Po vložení do elektrického poľa nastáva na krátky okamih pohyb nábojov. Vnútri plechovky však nepozorujeme pomocou pásikov žiadny náboj.



Obr. 1.29: Vodič po vložení do elektrického poľa zakrýva siločiaru. Vnútri vodiča sa však pole nenachádza.

Detailnejšie je možné preskúmať tento jav tak, že plechovku s pásikmi vložíte medzi dve platne rovnako s pásikmi. Po nabití platní vzniká medzi nimi elektrické pole, ktoré spôsobí pohyb náboja vo vodiči (plechovke) k nabitým platniam, avšak vnútri vodiča (plechovky) elektrické pole nepozorujeme.

#### Experiment 1.14 - Dielektrikum v elektrickom poli

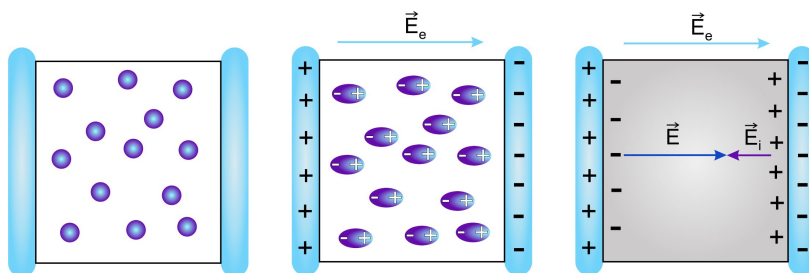


**Obr. 1.30:** Ilustračný obrázok experimentu. Experiment je možné realizovať aj napr. pomocou nabitého hrebeňa a tenkého prúdu vody pustenej priamo z vodovodu. Pripravte si pohárik, do ktorého urobíte tenkú dierku pomocou ihly. Na pohárik urobte "závesný mechanizmus"

pomocou nití. Pripravte si pravítko, pohárik zaveste na stojan. Pohárik naplňte vodou a nechajte vytekať. K prúdu sa priblížite nabitým pravítkom alebo balónom. Po priblížení nabitého telesa sa prúd tečúcej vody ohne. Voda obsahuje polárne molekuly, ktoré sa priťahujú k nabitému pravítku.

Izolanty obsahujú rovnako veľký počet častíc s nábojom, ale takmer všetky sú viazané vzájomnými silami tak, že sa v látke nemôžu voľne pohybovať (Obr. 1.31 vľavo). Pôsobením elektrického poľa nastáva v molekulách zmena rozloženia náboja v molekulách pričom vznikajú tzv. **dipóly** (Obr. 1.31 v strede). Vnútri dielektrika sa vzájomné pôsobenie dipólov kompenzuje, vzniká povrchovo viazaný náboj. Tento jav nazývame **polarizácia dielektrika**.

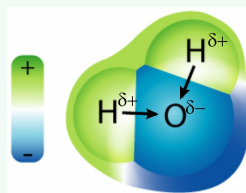
Nakoľko voda je tekutina, dokážu sa v nej dipóly ľahšie hýbať ako v tuhých látkach, preto je priťahovaná k nabitému telesu.



**Obr. 1.31:** Viazaný náboj v izolantoch oslabuje vonkajšie elektrické pole.

#### Definícia 1.12 (Dipól)

vo všeobecnosti pár dvoch rovnako veľkých opačných nábojov. Veľa molekúl tvorí dipól v dôsledku nerovnomerného rozloženia náboja medzi atómami. Typickým príkladom je voda, kde atóm kyslíka je elektronegatívnejší a priťahuje viac elektrónov od vodíka, ktorý sa stáva kladným. V rámci jednej molekuly sa tak nachádza kladný náboj aj záporný - teda oba póly = dipól.



**Obr. 1.32:** Nerovnomerné rozloženie elektrického náboja v molekule vody.



Voda je tiež príkladom dielektrika, kde na vytvorenie dipólov nie je potrebná prítomnosť elektrického poľa, nakoľko samotné molekuly vody tvoria prirodzene dipóly v dôsledku nerovnomerného rozloženia náboja medzi atómami.

Bez prítomnosti poľa sú dipóly neusporiadané alebo nie sú vytvorené. Dielektrikum je navonok elektricky neutrálne. Po vložení do elektrického poľa sa dipóly orientujú v smere intenzity vonkajšieho elektrického poľa. Vnútri dielektrika sú vzájomné polia dipólov kompenzované, nie však tie na okraji. Na kraji dielektrika vzniká povrchový náboj, ktorý vytvára elektrické pole intenzity  $E_i$ , ktoré má opačný smer ako vonkajšie pole s intenzitou  $E_e$ . Výslednú intenzitu získame



odčítaním:

$$|\vec{E}| = |\vec{E}_e| - |\vec{E}_i| \quad (1.30)$$

Výsledné pole je teda dielektrikom oslabené. Relatívne oslabenie vyjadrujeme veličinou permitivity, ktorá predstavuje koľkokrát je elektrické pole silnejšie vo vákuu oproti dielektriku:

$$\epsilon_r = \frac{|\vec{E}_e|}{|\vec{E}|} \quad (1.31)$$

Čím je teda relatívna permitivita vyššie číslo, tým izolant menej prepúšťa elektrické pole. S touto veličinou sme sa už stretli v podkapitole 1.2.

**Príklad 1.12** Dokážte, že jednotkou permitivity je  $F.m^{-1}$ .

**Riešenie:** Pri odvodení jednotky je potrebné nájsť správny vzťah, v ktorom permitivita vystupuje. Keďže máme dokázať, že jednotkou je farad na meter, kde farad je jednotka kapacity kondenzátora, použijeme vzťah pre kapacitu kondenzátora:

$$C = \epsilon \frac{S}{d}$$

Zo vzťahu vyjadríme permitivitu:

$$\epsilon = \frac{Cd}{S}$$

Značky fyzikálnych veličín na pravej strane rovnice nahradíme fyzikálnymi veličinami:

$$\epsilon = \frac{Cd}{S} = \frac{F.m}{m^2} = \frac{F}{m} = F.m^{-1}$$

Tým sme dokázali, že jednotkou permitivity je  $F.m^{-1}$ .

### Projekt 1.14 - Blesky

Prezentujte spolužiakom projekt na tému blesky, opíšte v ňom:

- vznik bleskov, ich príčina,
- čo je blesk,
- ako možno spoznať kde udrie blesk,

- ochrana budov pred bleskami,
- ochrana osôb pred bleskami (Faradayova klieťka),
- Franklinove pokusy a zavedenie bleskozvodu,
- ako sa správne chrániť pred bleskami v otvorenej prírode.

## 🌀 Otázky a úlohy 🌀

1. Môže blesk, ktorý udrie do auta, ohroziť cestujúcich? Vysvetlite.
2. Vysvetlite rozdiel medzi zelektrovaním kovového nenabitého vodiča a elektrostatickou indukciou. Dokážte experimentálne.
3. Vysvetlite rozdiel medzi pôsobením elektrického poľa na izolovaný vodič a na izolant.
4. Veľkosť intenzity elektrického poľa nabitého platňového kondenzátora so vzduchom je  $6 \text{ kV.m}^{-1}$ . Kondenzátor má kapacitu  $5 \text{ pF}$ . Zmení sa intenzita a kapacita tohto kondenzátora, ak priestor medzi platňami vyplníme sklom? Určte kapacitu a intenzitu poľa.
5. Vložením dielektrika do vzduchového kondenzátora sa jeho kapacita zväčší 7-krát. Aká je relatívna permitivita dielektrika? [ $\epsilon_r = 7$ ]
6. Elektrické napätie medzi búrkovými mrakmi a zemou dosiahlo v okamihu vzniku blesku hodnotu  $10^9 \text{ V}$ . Búrkový mrak mal náboj  $10 \text{ C}$ . Vypočítajte koľko energie sa uvoľnilo a na aké formy sa táto energia premenila. [ $5 \cdot 10^9 \text{ J}$ ]



## Zhrnutie

Veličina	Jednotka	Vzťah
elektrický náboj - Q elementárny náboj - e	C (coulomb) C	- $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
elektrická sila - $F_e$	N	$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$
permitivita vákua - $\epsilon_0$	$\text{C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-2}$	$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-2}$
intenzita elektrického poľa - E	$\text{Vm}^{-1}$	$E = \frac{F_e}{Q}$
intenzita elektrického poľa bodového náboja - E	$\text{Vm}^{-1}$	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$
intenzita homogénneho poľa medzi dvomi platňami - E	$\text{Vm}^{-1}$	$E = \frac{U}{d}$
práca v homogénnom elektrickom poli - W	J	$W = QEd = QU$
elektrický potenciál - $\phi_e$	V	$W = Q \phi_2 - \phi_1 $ $\phi_e = \frac{E_p}{Q}$
elektrické napätie - U	V	$U =  \phi_2 - \phi_1  = Ed$
plošná hustota náboja - $\sigma$	$\text{Cm}^{-2}$	$\sigma = \frac{Q}{S} = \epsilon_0 E$
kapacita vodiča - C	F (farad)	$C = \frac{Q}{\phi_e} = \frac{Q}{U}$
kapacita guľového vodiča - C	F (farad)	$C = 4\pi\epsilon R$
kapacita platňového kondenzátora - C	F (farad)	$C = \epsilon \frac{S}{d}$
energia elektrického poľa platňového kondenzátora - E	F (farad)	$E_e = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2}CU^2$
výsledná kapacita paralelného zapojenia kondenzátorov - C	F (farad)	$C = \sum_i^n C_i$
výsledná kapacita sériového zapojenia kondenzátorov - C	F (farad)	$\frac{1}{C} = \sum_i^n \frac{1}{C_i}$

## Porovnanie gravitačného a elektrického poľa

Gravitačné a elektrické pole patria medzi statické polia. Obe polia majú spoločné vlastnosti:

1. viažu sa na vlastnosť hmoty - gravitačné pole na hmotnosť  $m$  a elektrické na elektrický náboj  $Q$ ,
2. pôsobia silou na iné telesá,
3. charakterizuje ich intenzita a potenciál,
4. modelujeme ich pomocou siločiar.

Keďže oba polia sú podobné, dajú sa opísať podobnými (analogickými) vzťahmi a veličinami:

Gravitačné pole	Elektrické pole
hmotnosť - $m$	elektrický náboj - $Q$
gravitačná sila	elektrická sila
$F_g = \kappa \frac{m_1 m_2}{r^2}$	$F_e = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$
intenzita gravitačného poľa	intenzita elektrického poľa
$\vec{K} = \frac{\vec{F}_g}{m}$	$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{Q}$
práca v gravitačnom poli homogénne pole	práca v elektrickom poli homogénne pole
$W = mKh$	$W = QEd$
gravitačný potenciál	elektrický potenciál
$\phi_g = \frac{E_p}{m}$	$\phi_e = \frac{E_p}{Q}$
pre homogénne pole	pre homogénne pole
$\phi_g = Kh$	$\phi = Ed$

Oba polia majú aj rozdielnosti:

1. rozdielny pôvod polí - gravitačné sa viaže na hmotnosť, elektrické na elektrický náboj,
2. rozdiel v silovom pôsobení - gravitačné sily sú len príťažlivé, elektrické sú aj príťažlivé (medzi rôznymi nábojmi) aj odpudivé (medzi rovnakými nábojmi)
3. rozdiel v silovom pôsobení - gravitačné sily jednotkovej hmotnosti sú oveľa menšie ako elektrické sily pripadajúce na jednotkový náboj
4. rozdiel v konštantách -  $\kappa$  je univerzálna konštanta nezávislá od prostredia,  $k$  závisí na vlastnostiach prostredia.

# Elektrický prúd a obvody

## 2.1 Vznik elektrického prúdu

V doterajších úvahách sme uvažovali o elektrických poliach, kde sa náboj nepohybuje. Celú túto oblasť elektrického poľa označujeme ako **elektrostatika**. V niektorých prípadoch sme pozorovali presun náboja na krátky čas, napr. pri priblížení nabitého telesa k plechovke, pozorujeme výchylku alobalových pásičiek. Po oddialení pásičky klesnú. Nastal pohyb náboja na krátky čas.

### Experiment 2.1 - Vznik elektrického prúdu

Plechovku s alobalovými pásičkami nabijete pomocou nabitého pravítka alebo iného telesa. Alobalové pásičky sa tým viac oddiaľujú, čím viac plechovku nabijete (čím väčší náboj preniesiete na plechovku). Ak sa plechovky dotknete jedným pólom tlmivky, pričom druhý držíte,

budete pozorovať v tlmivke krátky záblesk a alobalové pásičky klesnú. Nastal pohyb náboja na krátky čas. Pohyb častíc s nábojom označujeme ako **elektrický prúd**, podobne ako, pri prenose hmoty napr. vody, hovoríme o prúde vody.

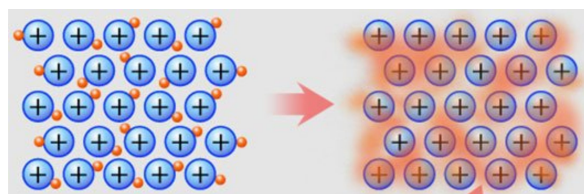
### Definícia 2.1 (Elektrický prúd)

je usporiadaný pohyb nosičov elektrického náboja (elektrónov, iónov) v látkach v plynnom, kvapalnom alebo v tuhom skupenstve (prípadne aj vo vákuu). Podmienkou vzniku elektrického prúdu v látke je **prítomnosť nosičov elektrického náboja** (voľných častíc s elektrickým nábojom) a **utvorenie elektrického poľa** v tejto látke.



V experimente nastal pohyb elektrónov iba na krátky čas. V prípade trvalého pohybu elektrónov je potrebné udržiavať elektrické pole pomocou **elektrických zdrojov**, ktorým sa venuje ďalšia kapitola.

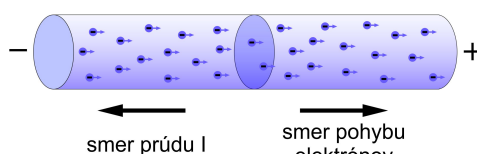
V experimente 1.3 sme videli, že nie vo všetkých látkach sa náboj dokáže pohybovať. Tie, v ktorých sa náboj pohybovať môže, označujeme ako **vodiče**. Medzi vodiče patria najmä kovy, kde jednotlivé atómy sú viazané kovovou väzbou, ktorú si môžeme predstaviť ako plyn (tzv. **elektrónový plyn**) voľne sa pohybujúcich elektrónov medzi kationmi kovov Obr. 2.1.



Obr. 2.1: Znázornenie väzby v kovoch. Voľne pohybujúce sa elektróny tvoria elektrónový plyn.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Prevzaté zo stránky: quora.com

Vo vodiči, ktorý je bez elektrického poľa sa elektróny pohybujú neusporiadane a teda vo vodiči nepozorujeme elektrický prúd. Ak však na jeho konce privedieme elektrické pole, nastane usporiadaný pohyb elektrónov ku kladnému pólu Obr. 2.2. Tento pohyb jedným smerom označujeme ako **jednosmerný prúd**. Avšak **smer prúdu** je určený na základe konvencie (dohody) v smere, kam by sa pohybovali **kladné častice**, keďže historicky sa o prúde vedelo (štúdie prúdu začínajú koncom 18. storočia), ale nie o jeho príčinách (elektrón bol objavený v roku 1897).



Obr. 2.2: Elektrický prúd.

Matematicky a fyzikálne prúd  $I$  predstavuje celkový náboj, ktorý pretečie prierezom (plochou) vodiča za jednotku

času:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad [I] = A \quad (2.1)$$

Jednotkou prúdu je ampér A, ktorý je základnou jednotkou SI. Jeho definícia vyplýva zo vzájomného silového pôsobenia dvoch vodičov s prúdom, čomu sa budeme venovať v neskorších kapitolách.

Usporiadaný pohyb voľných častíc s nábojom vo vodiči bezprostredne nedokážeme pozorovať, avšak o existencii prúdu sa denne presvedčame na základe jeho účinkov (svetlo, teplo, nabíjanie mobilu a pod.).

**Aktivita 2.1** Diskutujte so spolužiakmi možnosti využitia poznatkov správania sa vodičov a izolantov v elektrickom poli. Naštudujte si ich praktické použitie. Inspirujte sa aj nasledovnými bodmi.

- ochrana pred zásahom elektrickým prúdom

- ochrana spotrebičov pred vonkajšími vplyvmi
- ochrana pred bleskom
- označovanie ochrany (značky)
- nebezpečné hodnoty prúdu

## 🌊 Otázky a úlohy 🌊

1. Objasnite pojmy elektrický prúd ako fyzikálny jav a ako fyzikálnu veličinu.
2. Uvážte, či prúd prechádzajúci vodičom spájajúcim platne kondenzátora je konštantný prúd.
3. Vysvetlite, prečo sa v žiadnej časti kovového vodiča s konštantným prúdom nemôžu hromadiť voľné elektróny.
4. Vodičom prechádza konštantný prúd 20 mA. Vypočítajte celkový náboj častíc, ktoré prešli prierezom vodiča za 2 h.
5. Vypočítajte počet voľných elektrónov, ktoré prejdú prierezom kovového vodiča s prúdom 1,6 A za čas 10 s.
6. Meranie malých elektrických prúdov rádovo 1 nA, je v súčasnosti na hraniciach meracej techniky. Koľko voľných elektrónov prejde prierezom vodiča za 1 s pri uvedenom prúde?
7. Molekula kuchynskej soli je tvorená kladným iónom sodíka a záporným iónom chlóru, ktoré sú spolu viazané elektrickou príťažlivou silou. Čo môže byť príčinou zoslabenia príťažlivých síl medzi uvedenými iónmi, ak sa molekula dostane zo vzduchu do vody?

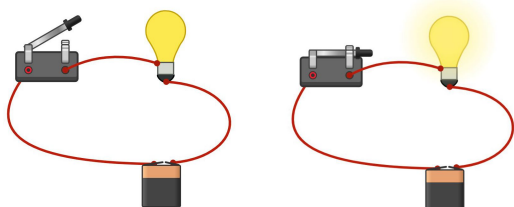
## 2.2 Elektrický obvod

### Definícia 2.2 (Elektrický obvod)

súhrn prvkov, ktoré vytvárajú cestu pre voľný prechod elektrického prúdu. Táto cesta musí byť uzavretá a spojenie týchto prvkov musí byť vodivé.



### Experiment 2.2 - Zapojenie elektrického obvodu

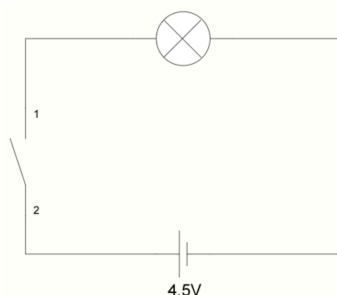


**Obr. 2.3:** Jednoduchý elektrický obvod tvorený batériou, sínačom, žiarovkou a vodičmi.

Vytvorte elektrický obvod podľa obrázka 2.3. Obvod zostavte s rozopnutým spínačom.

Pokiaľ je spínač rozopnutý, žiarovka nesvieti (obrázok naľavo), pretože cesta pre elektrický prúd je prerušená. Pri zostavovaní obvodov z bezpečnostných dôvodov, vždy najprv nechávame obvod prerušený a až po kontrole ho zapneme. Po zopnutí spínača sa žiarovka rozsvieti, vytvorila sa vodivá cesta pre prúd. Hoci prúd priamo v obvode nevidíme, o jeho existencii nás presvedča svietiaci žiarovka (účinnok prúdu).

V praxi sa elektrické obvody zakresľujú pomocou elektrotechnických značiek. Jednak kvôli prehľadnosti a tiež z toho dôvodu, že kresliť zložité obvody pomocou náčrtov by bolo komplikované a neprehľadné. Zoznam elektrotechnických značiek nájdete vo fyzikálnych tabuľkách. Príklad obvodu z obrázka 2.3 by cez elektrotechnické značky vyzeral nasledovne:



Obr. 2.4: Schéma elektrického obvodu z obr. 2.3 zakreslená elektrotechnickými značkami.

#### Projekt 2.1 - Vynález, ktorý rozsvietil mestá

- vytvorte plagát formátu A3, na ktorom objasnite históriu vývoja žiarovky a princíp jej fungovania,
- uveďte stručný životopis vynálezcu žiarovky,
- uveďte najnovších predstaviteľov svetidiel - LED, neónky, žiarivky a pod., stručne objasnite princíp ich fungovania,

- vytvorte vlastnú žiarovku, prezentujte jej funkčnosť.

#### Projekt 2.2 - Sú všetky žiarovky rovnaké?

- navrhnete experiment, ktorým preskúmate moderné žiarovky, žiarivky, či LED svetidlá,
- porovnajete ich svietivosť, výkon a urobte rebríček ekologickosti.

#### Humphry Davy

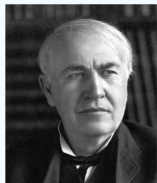


\*1778 - †1829

Bol anglický chemik, ktorému sa podarilo izolovať pomocou elektrického prúdu niekoľko prvkov z ich zlúčenín ako sodík, draslík, vápnik, horčík a i. Vo svojom laboratóriu mal najväčší Voltov článok pozostávajúci z 2000 párov elektród. Takto výkonný zdroj mu umožnil pozorovať zahrievanie vodičov ak nimi prechádza prúd a pri dostatočnej veľkosti vodiče začínajú vyžarovať svetlo vo viditeľnej oblasti. Ako chemik sa ďalej tomuto javu nevenoval.



#### Thomas Alva Edison



\*1876 - †1931

Bol americký vynálezca. Vynašiel a vylepšil mnoho zariadení, medzi jeho najvýznamnejšie patrí fonograf a žiarovka. V škole strávil len pár mesiacov a mnohé poznatky získal samostatným štúdiom a experimentami, ktoré realizoval doma. Kariéru začínal ako pouličný predajca, z ktorého sa vypracoval na podnikateľa s vlastným laboratóriom v Menlo Park, New Jersey.



## 2.3 Meranie elektrického napätia a elektrického prúdu

Pri meraní elektrických veličín ako je napätie, prúd a i. je potrebné dodržiavať niekoľko zásad. Základný prístroj na meranie napätia je **voltmeter** a prúdu **ampérmeter**. Univerzálne prístroje - **multimetre** je možné použiť na meranie aj napätia aj prúdu príp. iných elektrických veličín. Meranú hodnotu ukazuje buď ručička alebo ide o digitálny prístroj, z ktorého odčítanie meranej hodnoty je pomerne jednoduché. Pokiaľ ide o ručičkové prístroje, merané hodnoty meriame tak, že na ručičku sa pozeráme kolmo, aby odčítanie nebolo zaťažené chybou z úkosu (paralaxou), ktorá vzniká vtedy, ak sa na ručičku prístroja nepozierame kolmo.

Na meradlách sú okrem displejov alebo stupníc, často uvedené aj značky výrobcu o meraných jednotkách, meracej sústave, polohe prístroja pri meraní, triede presnosti, skúšobnom napätí a pod. Z toho dôvodu je potrebné venovať zvýšenú pozornosť výberu správneho meracieho prístroja.

Podmienkou vykonania správneho merania je kvalitné prepojenie všetkých prvkov obvodu. Pred meraním je preto potrebné prekontrolovať funkčnosť použitých vodičov. Obvod je potrebné zapájať opatrne, aby sa konce vodiča (banániky) nedeformovali a nepoškodili pružný dotyk zabezpečujúci pružné spojenie.

Pri zostavovaní obvodu postupujeme podľa schémy. Vychádzame od jednej svorky zdroja k opačnému. Až po zapojení základného obvodu sa venujeme aj paralelným častiam napr. zapojeniu voltmetra. Na regulačnom rezistore zvolíme najväčší odpor, na meracích prístrojoch navolíme najväčšie rozsahy (na voltmetri rozsah, ktorý zodpovedá napätiu zdroja). Zostavený obvod nikdy hneď nenapájame na zdroj. Najprv ho skontrolujte sami a potom nechajte skontrolovať ešte vyučujúcim. Obvod uzavrite. Ak sú výchyľky prístrojov veľké, obvod ihneď vypnite a prekontrolujte. Ak merané hodnoty neprekračujú rozsah, vhodne upravíme meracie rozsahy prístrojov.

Pri práci s elektrickým obvodom dbáme na pravidlá bezpečnosti pri práci. Nikdy sa nedotýkame odizolovaných častí obvodu, pracujeme len s dovolenými hodnotami napätia a prúdu. Úpravy obvodu robíme len pri odpojenom zdroji a po vykonaní úprav obvod znova prekontrolujeme sami a tiež vyučujúcim.

## Meranie napätia

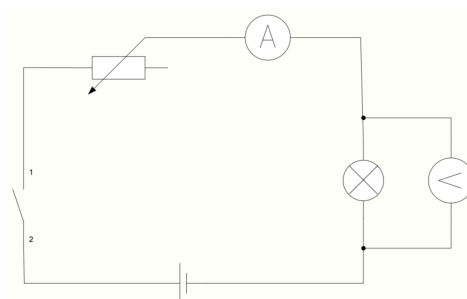
Elektrické napätie sa meria pomocou **voltmetra**. Voltmeter sa do obvodu zapája vždy **paralelne** na prvok obvodu, na ktorom napätie určujeme (obr. 2.5). Spomeňte si, že napätie predstavuje prácu, ktorú vykonávajú elektrické sily na prenesenie náboja z jedného miesta na iné, a to je práve dôvod prečo sa voltmeter zapája paralelne - určuje veľkosť vykonanej práce medzi dvomi bodmi.

Pred meraním sa vždy najprv oboznámte s daným typom voltmetra. Sú voltmetre, ktoré sú určené len na meranie jednosmerných napätí. Pokiaľ ide o multimeter, nastavte ho na správny druh meraného napätia a vždy najprv zvolte najvyšší rozsah. Po zopnutí obvodu prispôbte nastavený rozsah meraným hodnotám napätia.

## Meranie prúdu

Veľkosť elektrického prúdu určujeme pomocou **ampérmetra**. Keďže ampérmeter má za úlohu určovať veľkosť prúdu, čo predstavuje množstvo náboja za čas, ktorý prejde vodičom, zapája sa do obvodu **sériovo** (obr. 2.5).

Rovnako sa pred meraním vždy najprv oboznámte s daným typom ampérmetra. Nastavte ampérmeter najprv na najvyšší rozsah a správny typ prúdu. Po zopnutí obvodu prispôbte nastavený rozsah meraným hodnotám prúdu.



**Obr. 2.5:** Schéma elektrického obvodu so správnym zapojením ampérmetra, voltmetra a regulačného rezistora.



**Obr. 2.6:** Ukážka zapojenia obvodu podľa schémy obr. 2.5.

## 2.4 Vodivosť kovov

V prvej podkapitole sme už uviedli, že podstatou vedenia prúdu je kovová väzba, ktorá je tvorená **elektrónovým plynom**, teda voľne pohyblivými elektrónmi. Tie sa vo vodiči pohybujú všetkými smermi rovnako, preto pre usmernený pohyb je potrebné na konce vodiča priviesť elektrické napätie. Vlastnosť kovov viesť elektrický prúd prostredníctvom voľných elektrónov sa označuje ako **elektrónová vodivosť kovov**. Predstavy o vedení prúdu a ich experimentálne preskúmanie videli k utvoreniu teórie **vodivosti kovov**.

Teória vodivosti kovov vychádza z poznatku, že elektrický prúd v kovoch je tvorený len voľnými elektrónmi s dostatočnou energiou. Elektróny, ktoré majú dostatočnú energiu sa označujú ako **vodivostné**. Klasická teória, ktorej predstaviteľmi sú H. A. Lorentz a P. Drude, si predstavuje voľné elektróny ako **ideálny plyn**.

Vodivostné elektróny konajú v kove tepelný pohyb. Stredná rýchlosť tohto pohybu sa rádovo pohybuje od  $10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  až  $10^6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Zmena tejto rýchlosti s teplotou je zanedbateľná, čo je prvý náznak rozdielu vodivostných elektrónov od ideálneho plynu.

### Hendrik Antoon Lorentz



\*1853 - †1928

Bol holandský fyzik, ktorý spolu s P. Zeemanom dostal Nobelovu cenu za objasnenie Zeemanovho javu. Matematiku a fyziku študoval na Leidskej univerzite, kde neskôr pôsobil ako profesor. Významne prispel svojou prácou k rozvoju fyziky v oblasti elektromagnetizmu, relativity a kvantovej mechaniky. Patril k podporovateľom Einsteinovej teórie relativity.



### Paul Drude

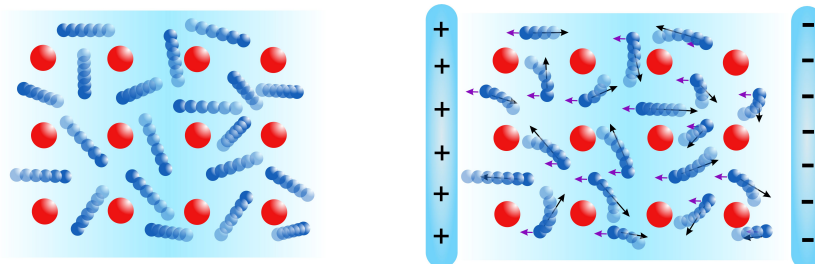


\*1863 - †1906

Bol nemecký fyzik, ktorý sa špecializoval na optiku. Drude študoval najprv matematiku a neskôr prešiel na fyziku na univerzite v Göttingene. Po ukončení štúdia pôsobil ako profesor na Lipskej univerzite, potom pôsobil aj na Humboltovej univerzite v Berlíne a na univerzite v Giessene. Pracoval na vzťahoch medzi optickými a elektrickými vlastnosťami látok na základe čoho, navrhol svoj model, ktorý vysvetľoval termické, optické a elektrické vlastnosti látok.



Ďalším dôkazom, že vodivosť nie je spôsobená pohybom elektrónov, spočíval v pozorovaní **unášavej rýchlosti**. V dôsledku tepelného pohybu elektrónov, sa elektróny pohybujú rovnako vo všetkých smeroch a teda ľubovoľným prierezom vodiča je celkový pretečený prúd rovný nule. Toto pozorovanie je v súlade s **zákonom zachovania energie**. Drôtom teda neprechádza samovoľne prúd z jedného konca na druhý.



**Obr. 2.7:** Voľné elektróny (modré guľičky) vykonávajú tepelný pohyb. Vo všetkých smeroch sa elektróny hýbu rovnako - prúd je nulový. (Obrázok vľavo) Pri naložení elektrického poľa na konce vodiča, začne na elektróny pôsobiť dodatočná sila, ktorá elektrónom udeľuje tzv. unášavú rýchlosť, ktorá má za následok len vychýľovanie elektrónov z ich pôvodných dráh. Unášavá rýchlosť je tak malá, že z pohľadu tohto modelu by sa prakticky nič nezmenilo a prúd by ostal nulový. Prax však ukazuje, že vodičom preteká prúd.

Ak na konce kovového vodiča privedieme zdroj elektrického napätia, vznikne medzi koncami vodiča elektrické pole intenzity  $\vec{E}$ . Na voľne pohyblivé elektróny začne pôsobiť elektrická sila:

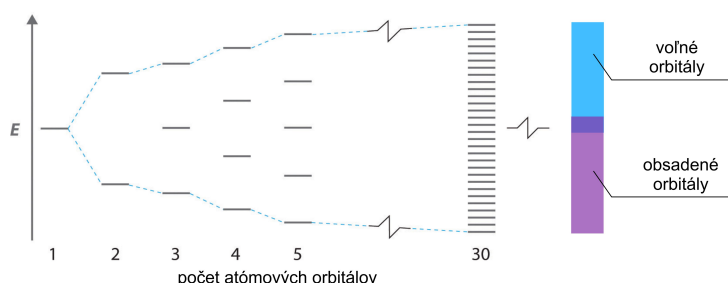
$$\vec{F}_e = -e\vec{E} \quad (2.2)$$



Táto sila spôsobí, že elektróny okrem okamžitej rýchlosti v dôsledku tepelného pohybu získajú aj dodatočnú rýchlosť v smere od zápornej ku kladnej elektróde, ktorá sa označuje ako **unášavá rýchlosť**. V dôsledku tejto dodatočnej rýchlosti vznikne vo vodiči jednosmerný elektrický prúd. Unášavá rýchlosť je však rádovo  $10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  -  $10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , čo je oveľa nižšia hodnota ako rýchlosti tepelného pohybu. Preto striktná predstava o tvorení prúdu pohybom elektrónov je nesprávna, na druhej strane je pre pochopenie definície elektrického prúdu kľúčová.

Experiment však ukazuje, že v kovovom vodiči po jeho zapojení na zdroj nastáva veľmi rýchlo konštantný prúd. Tento rozpor klasickej teórie s experimentom pomohol vysvetliť **kvantový model elektrónového plynu**. A. Sommerfeld vytvoril model, v ktorom zbral do úvahy aj kvantové správanie elektrónov. Ďalšie rozpory sa odstránili **pásovou teóriou**, ktorú vytvoril F. Bloch. Vodivosť elektrónov si na základe týchto modelov predstaviť nasledovne:

- veľký počet atómov sa spája, vytvárajú medzi sebou väzby prekryvom orbitálov, až pri veľkom počte atómov sa prekryje veľké množstvo orbitálov a vytvorí sa tzv. pásy,
- pásy, ktoré sú plne obsadené elektrónmi nespôsobujú vodivosť, označujú sa ako **nevodivostné pásy**,
- prekryvom vzniknú aj pásy, kde sa nachádzajú voľné elektróny a tieto elektróny sa nepohybujú v dôsledku pôsobenia elektrického poľa, ale odovzdávajú si hybnosť - dochádza teda k prenosu energie,
- tento prenos energie je oveľa rýchlejší v dôsledku tepelného pohybu ako unášavý pohyb elektrónov.



**Obr. 2.8:** Prekrytím veľkého počtu atómových orbitálov vznikajú pásy, ktoré sú plne obsadené a voľné. U kovov sa tieto pásy prekryvávajú a elektróny z plne obsadených pásov, môžu prejsť do voľných. Napr. pri zavedení elektrického poľa na kraje vodiča, prechádzajú elektróny na vyššie energetické hladiny pôsobením elektrického poľa.

## 2.5 Elektrický zdroj

### Definícia 2.3 (Elektrický zdroj)

*každé zariadenie medzi, ktorého dvoma rozličnými časťami (pólmi) je aj po pripojení vodiča udržiavaný stály rozdiel potenciálov alebo napätia.*



Preto elektrický zdroj nazývame aj zdroj napätia. Póly vyvedené na povrch zdroja a upravené na praktické pripojenie nazývame **svorky**. Pri zapojení zdroja do obvodu začne obvodom pretekať prúd. Elektróny sa premiestňujú zo zápornej svorky na kladnú. Aby sa elektróny mohli premiestňovať v obvodu, vnútri zdroja musia prejsť z kladnej svorky na zápornú. Avšak, dva rovnaké elektrické náboje sa odpudzujú. Vnútri zdroja musia teda pôsobiť **neelektrostatické** sily, ktoré prekonávajú elektrostatické pole utvorené medzi svorkami zdroja. Na základe pôvodu neelektrostatických síl rozdelujeme zdroje na:

- elektrochemické,
- fotoelektrické,
- termoelektrické,
- elektrodynamické,
- mechanické.

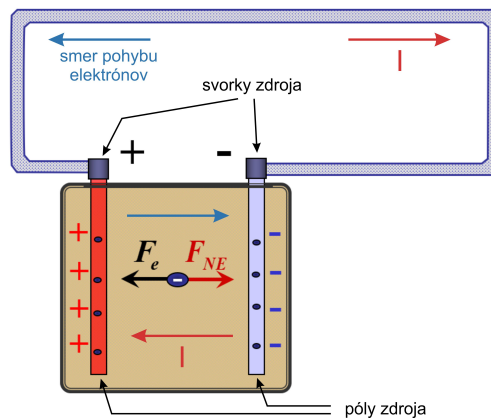
Neelektrostatické sily pri presune nabitých častíc s celkovým nábojom veľkosti  $Q$  vykonávajú prácu  $W_z$ . Podiel týchto



veličín – prácu potrebnú na prenesenie náboja a veľkosti preneseného náboja predstavuje **elektromotorické napätie** zdroja:

$$U_e = \frac{W_z}{Q} \quad (2.3)$$

Toto napätie charakterizuje zdroj a nameriame ho ak na zdroj nie je zapojený do obvodu (teda zdrojom netečie prúd).



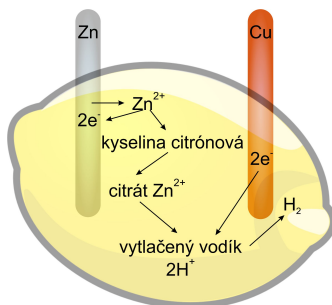
**Obr. 2.9:** Vnútri zdroja prúd aj elektróny tečú opačným smerom. Elektróny prechádzajú z kladného na záporný pól zdroja.

#### Definícia 2.4 (Elektromotorické napätie zdroja)

je napätie, ktoré nameriame voltmetrom, ktorý priamo pripojíme na svorky zdroja, ktorý nie je zaťažený - nie je zapojený do obvodu s inými prvkami (spotrebičmi). Predstavuje prácu, ktorú vykonávajú neelektrické sily na prenesenie náboja vnútri zdroja proti smeru prúdu.



#### Experiment 2.3 - Ovocná batéria

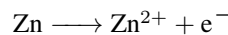


**Obr. 2.10:** Princíp ovocnej batérie.

Citrón rozkrojte na polovicu. Do jednej časti zasuňte zinkovú elektródu, do druhej časti zasuňte medenú elektródu. Elektródy pripojte vodičmi na voltmeter.

Vzniknuté napätie sa pohybuje v okolí 0,8 V. Výška napätia závisí od čistoty, veľkosti, vzdialenosti a hĺbky zasunutia elektród do citrónu. Napätie v takto zostrojenom zdroji vzniká v dôsledku chemických reakcií prebiehajúcich na elektródach a v prostredí citrónovej šťavy. Keď sa zinok dostane do kontaktu s kyselinou cit-

rónovou, začne sa oxidovať. Ióny zinku sa začnú z elektródy uvoľňovať, čím sa elektróda nabije záporne.



Keďže zinok je neušľachtilý kov, vytlačá z kyseliny citrónovej vodíkové katióny. Meď patrí medzi ušľachtilé kovy, preto s kyselinou nereaguje. Na medenej elektróde vzniká kladný potenciál a to v dôsledku odovzdávania elektrónov medzi vodíkovým katiómom. Vodíkové katióny sa redukujú a zostávajú v blízkosti medenej elektródy ako plyn  $\text{H}_2$ .

Tým, že potenciál elektród je rôzny, vznikol zdroj elektrického napätia. Podstatou vytvorenia elektrického zdroja sú dve elektródy, ktoré sa polarizujú na rôzne polarity a vodivý roztok, ktorý ich spája cez polopriepusnú membránu, tak, aby bol zabezpečený prenos elektrónov vnútri zdroja z kladnej na zápornú elektródu. Pri používaní zdroja dochádza k chemickým zmenám, preto sa označuje ako **elektrochemický zdroj napätia**. V tomto prípade sú neelektrostatickými silami chemické reakcie.

**Projekt 2.3 - Zdroje elektrického napätia** Vytvorte projekt, v ktorom popíšete princípy nasledovných zdrojov:

- elektrochemického,

- fotoelektrického,
- termoelektrického,
- elektrodynamického,
- a mechanického.

**Luigi Galvani**

\*1737 - †1798

Bol taliansky lekár, fyzik, biológ a filozof, ktorý objavil elektrický prúd v živých organizmoch. Známy je jeho experiment so žabacím stehnom. Dotykom elektród na určitých miestach žabacieho stehna pozoroval sťah svalstva, napriek tomu, že žaba bola mŕtva. Svojou prácou poukázal na súvis medzi elektrickým poľom a životom. Na jeho prácu nadviazal Alessandro Volta.

**Alessandro Volta**

\*1745 - †1827

Bol taliansky fyzik a chemik, ktorý ako prvý zhotovil elektrickú batériu (Voltov článok) a objavil metán. Svoju kariéru začal na kráľovskej škole v Como. Neskôr sa stal profesorom na univerzite v Pavii. Jeho batéria je prvým elektrochemickým zdrojom napätia. Pozostávala zo zinkových a medených elektród, ktoré boli prepojené flyšou namočenou v kyseline sírovej. Takto volta prepojil niekoľko takých elektród, ktoré dosahovali napätie okolo 1 V.

**John Frederic Daniell**

\*1790 - †1845

Bol anglický fyzik a chemik. Roku 1831 sa stal profesorom na novozaloženom King's college v Londýne. Je známy vďaka svojmu vynálezu - Daniellovmu článku, ktorý bol vylepšením Voltovho článku a dosahoval napätia 1,5 V a bol oveľa stabilnejším zdrojom elektrického napätia.



**Projekt 2.4 - História batérie** Vytvorte časovú os, na ktorej znázorníte vývoj batérie od minulosti po dnes. Stručne opíšte objav, ktorý sa v danom období odohral:

- 1780 Galvaniho experiment,
- 1800 Voltov článok,
- 1836 Daniellov článok,
- 1859 Gaston Planté a jeho batéria,
- 1868 Leclanchéov suchý článok,
- 1888 Carl Gassner a jeho suchý článok,
- 1899 vytvorenie Ni-Cd batérie Waldemarom Jungnerom,
- 1990 vytvorenie Ni-Fe batérie Thomasom Edison,
- 1967 vytvorenie alkalických batérií,
- 1989 nikel-hydridové batérie,
- 1992 Li-ion batérie.

**Aktivita 2.2** Diskutujte so spolužiakmi o výhodách a nevýhodách používaných batérií v súčasnosti. V diskusii sa venujte otázkam:

- Potrebujeme dnes ešte batérie?
- Kde všade batérie využívame?
- Čo nás stojí výroba batérie?
- Ako by sme dokázali batérie nahradiť?
- Aké sú možnosti recyklácie batérií?

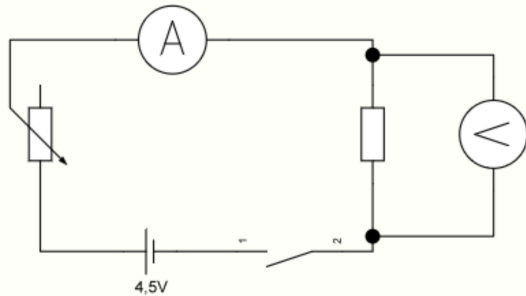
**Zhrnutie**

Veličina	Jednotka	Vzťah
elektrický prúd - $I$	A (ampér)	$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$
elektromotorické napätie zdroja - $U_e$	V (volt)	$U_e = \frac{W_z}{Q}$

# Vedenie prúdu v kovoch

## 3.1 Ohmov zákon pre časť elektrického obvodu

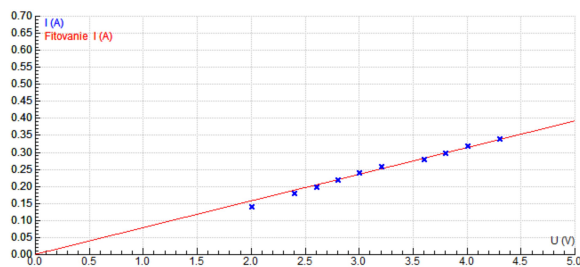
### Experiment 3.1 - Ako vedú elektrický prúd kovy



Obr. 3.1: Obvod na skúmanie vodivosti kovov.

Zostrojte elektrický obvod podľa Obr. 3.1. Kov v našom prípade predstavuje elektrotechnická súčiastka označovaná ako rezistor alebo odpor, ktorý predstavuje dlhý kovový drôtik na vinutý na valcové jadro, ktoré je najčastejšie keramické.

Pomocou reostatu meňte hodnoty prúdu v obvode a odčítavajte k nim prislúchajúce hodnoty napätia. Urobte 10 dvojíc a z nich zostrojte graf závislosti  $I(U)$ .



Obr. 3.2: Výsledná závislosť  $I(U)$  pre rezistor s odporom  $10\Omega$ .

Z merania vidieť (Obr. 3.2), že závislosť prúdu od napätia je lineárna. Túto závislosť objavil už roku 1827 G. Ohm - Prúd vo vodiči je priamo úmerný napätiu na jeho koncoch. Závislosť matematicky vyjadruje vzťah:

$$I = G.U$$

Kde  $G$  predstavuje vodivosť a má jednotky  $S$  - siemens. Aby sme získali hodnotu vodivosti z nameraných dvo-

jíc prúdu a napätia, zostrojené údaje v grafe  $I(U)$  sme preložili lineárnou funkciou:

$$f(x) = ax + b$$

Ak chceme zistiť vodivosť z merania, potrebujeme si uvedomiť fyzikálny význam jednotlivých premenných a parametrov funkcie. Na y-ovej osi máme vynesené hodnoty prúdu, na x-ovej hodnoty napätia, preto funkciu môžeme prepísať cez fyzikálne veličiny nasledovne:

$$I = a.U + b$$

Parameter funkcie  $b$  predstavuje priesečník s osou  $y$  a fyzikálne predstavuje prúd, ktorý bude tiecť vodičom ak napätie bude rovné nule. Ten by preto mal byť v ideálnom prípade rovný  $0$ , nakoľko pri nulovom napätí nepozorujeme v kovoch prúd, čo sme ukázali v predchádzajúcich kapitolách. Ostal nám parameter  $a$ , ktorý porovnaním s rovnicou 3.1 predstavuje vodivosť:

$$a = 0,0786 = G = 0,0786S$$

V praxi sa pri vedení prúdu v kovoch, však málo stretávame s pojmom vodivosť. Skôr nás zaujíma aký veľký odpor kladie kov pretekajúcemu prúdu. Elektrický odpor označujeme písmenom  $R$  a meriame ho v jednotkách  $\Omega$  - ohmoch. Vzájomný vzťah vodivosti a odporu je:

$$G = \frac{1}{R} \quad (3.1)$$

Vzájomne sú si prevrátenými hodnotami. Ak chceme určiť z merania odpor, potrebujeme vypočítať prevrátenú hodnotu parametra  $a$  funkcie:

$$R = \frac{1}{a} = \frac{1}{0,0786} = 12,7\Omega$$

Výsledná hodnota odporu je oproti uvedenej výrobcom -  $10\Omega$  približne rovnaká. Odchýlky môžu byť zapríčinené presnosťou vybraných meracích prístrojov, opotrebovanosti kontaktov a pod.

### Definícia 3.1 (Ohmov zákon pre časť elektrického obvodu)

elektrický prúd  $I$  v kovovom vodiči je priamo úmerný elektrickému napätiu  $U$  naloženému na jeho koncoch. Matematicky tento zákon popisuje vzťah:

$$I = G.U \quad (3.2)$$



**Definícia 3.2 (Elektrická vodivosť)**

predstavuje pohyb elektricky nabitých častíc cez vodič. Elektrická vodivosť závisí od materiálu vodiča. Vodivosť meriame v jednotkách siemens.

$$[G] = S$$

**Definícia 3.3 (Elektrický odpor)**

schopnosť materiálu brániť toku elektrického prúdu. Z Ohmovho zákona predstavuje podiel napätia a k nemu prúdu:

$$R = \frac{U}{I} \quad (3.3)$$

**Werner von Siemens**

\*1816 - †1892

Bol nemecký inžinier, vynálezca a priemyselník. Siemens pracoval na vylepšeniach viacerých existujúcich zariadení a niektoré sám navrhol. Zostrojil prvý elektrický výťah, dynamo, jeho firma prišla s prvou elektrickou a tiež sa Siemens považuje za otca trolejbusov. Na jeho počesť je po ňom pomenovaná jednotka elektrickej vodivosti.

**Georg Simon Ohm**

\*1789 - †1854

Bol nemecký fyzik a matematik. Prvé vzdelanie dostal doma od svojho otca, ktorý napriek tomu, že bol zámočníkom bol pomerne vzdelaný. Ako jedenásť ročný začal navštevovať gymnázium v Erlangene. Otec ho neskôr poslal do Švajčiarska, kde pôsobil ako učiteľ matematiky. Roku 1811 sa vrátil na univerzitu v Erlangene. Na univerzite vydržal tri semestre a vystriedal niekoľko škôl až sa dostal na profesorské miesto Mníchovskej univerzity. Ako učiteľ začal svoj výskum s novým elektrochemickým článkom, ktorý navrhol A. Volta. Použitím zariadení, ktoré si sám vytvoril prišiel na to, že pretekajúci prúd vodičom je priamo úmerný napätiu, ktoré je na ňom naložené. Podľa neho je tento jav pomenovaný ako Ohmov zákon.



## 🌀 Otázky a úlohy 🌀

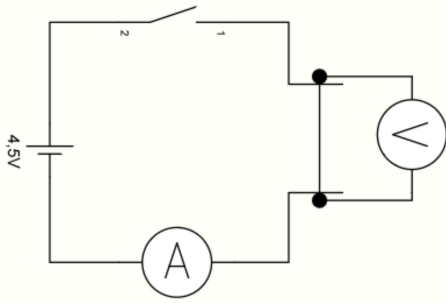
- Zostrojte graf závislosti prúdu od napätia pre lineárny vodič s elektrickým odporom 0,5 kΩ.
- Na päťici malej žiarovky sú údaje 6,3 V/0,3 A, ktoré sa vzťahujú na jej vlákno, keď žiarovka svieti. Určte elektrický odpor vlákna. [21 Ω]
- Pri napätí 3,6 V na koncoch lineárneho vodiča prechádza ním prúd 72 mA. Aké napätie je na koncoch, ak týmto vodičom prechádza prúd 1 A? Aký elektrický odpor má vodič? [50 V; 50 Ω]
- Aký elektrický odpor má cievka telefónneho slúchadla, ak po pripojení slúchadla na batériu s napätím 4,5 V prechádza ním prúd 1,12 mA? [4018 Ω]

## 3.2 Závislosť odporu vodiča od jeho geometrických rozmerov

**Experiment 3.2 - Nie je vodič ako vodič**

Zostrojte elektrický obvod podľa Obr. 3.3. Na skúmanie budete potrebovať sériu vodičov s rôznou hrúbkou a rôznych materiálov. Na prevé experimenty dobre poslúžia aj tuhy rôznej hrúbky.

Odmerajte dvojice prúdu a napätia pre 5 rôznych vzdialeností zapojenia krokosvoriek na vybranom vodiči. Výsledkom je, že čím zvolíme dlhší úsek vodiča, tým je odpor väčší, nakoľko elektróny na svojej ceste narážajú na väčší počet atómov kryštálovej mriežky.



**Obr. 3.3:** Obvod na skúmanie závislosti odporu od geometrických zozmerov vodičov.

Odmerajte dvojice prúdu a napätia pre 3 rôzne hrúbky vodiča z rovnakého materiálu na rovnakej vzdialenosti krokosvoriek. Meraním zistíte, že čím je väčšia hrúbka materiálu, tým je odpor menší. Tento jav súvisí opäť so štruktúrou látok. Ukázali sme si v predchádzajúcich kapitolách, že náboj sa na vodičoch prevažne zdržuje na ich povrchu. Zväčšením hrúbky sa teda zväčšuje aj vonkajšia plocha vodiča, čo má za následok nižší odpor. Porovnajme dvojice napätia a prúdu rôznych vodičov pri rovnakej dĺžke a približne rovnakej hrúbke. Zmenou materiálov zisťujeme, že odpor je rôzny pre rôzne materiály, keďže každý má inú kryštalickú štruktúru a teda kladie rôzny odpor pretekajúcemu prúdu.

Výsledky experimentovania je potom možné zhrnúť nasledovne:

Odpor je tým väčší, čím je dlhší vodič. Odpor je teda priamo úmerný dĺžke vodiča.

$$R \sim l$$

Odpor je tým menší, čím je hrúbka väčšia. Keďže prúd tečie celým prierezom, odpor je nepriamo úmerný prierezu vodiča.

$$R \sim \frac{1}{S}$$

Tiež sme zistili, že odpor závisí od druhu použitého vodiča.

$$R \sim \rho$$

kde  $\rho$  predstavuje **merný elektrický odpor**. Jeho hodnota sa stanovuje experimentálne a pre jednotlivé materiály ho nájdeme v tabuľkách.

Výslednú závislosť elektrického odporu vodiča od geometrických rozmerov teda možno zhrnúť do výsledného vzťahu:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (3.4)$$

**Príklad 3.1** Drôt z medi ( $\rho_1 = 0,02 \cdot 10^{-6} \Omega m$ ) s priemerom  $d_1 = 4 mm$  je potrebné nahradiť hliníkovým drôtom ( $\rho_2 = 0,03 \cdot 10^{-6} \Omega m$ ) rovnakej dĺžky. Aký hrubý musí byť hliníkový drôt, aby sa odpor nezmenil?

**Riešenie:** Výsledný odpor má byť rovnaký a teda musí platiť:

$$R_{Cu} = R_{Al}$$

Keďže ide o prípad, kedy sa menia rozmery vodiča, zoberieme vzťah, ktorý vyjadruje závislosť odporu vodiča od jeho geometrických rozmerov a dosadíme do predchádzajúceho vzťahu:

$$\rho_{Cu} \frac{l_{Cu}}{S_{Cu}} = \rho_{Al} \frac{l_{Al}}{S_{Al}}$$

Prierezy nemáme zadané, a preto ak predpokladáme, že ide o kruhové prierezy, vyjadríme ich nasledovne:

$$\rho_{Cu} \frac{l_{Cu}}{\pi \left(\frac{d_{Cu}}{2}\right)^2} = \rho_{Al} \frac{l_{Al}}{\pi \left(\frac{d_{Al}}{2}\right)^2}$$

Rovnaké veličiny môžeme z rovnice vykrátiť, nakoľko zadanie hovorí, že drôty majú mať rovnakú dĺžku, vykrátime aj dĺžky:

$$\frac{\rho_{Cu}}{d_{Cu}^2} = \frac{\rho_{Al}}{d_{Al}^2}$$

Matematickými úpravami pre potrebnú hrúbku hliníkového drôtu dostaneme:

$$d_{Al} = \sqrt{\frac{\rho_{Al} d_{Cu}^2}{\rho_{Cu}}} = \sqrt{\frac{0,03 \cdot 10^{-6} \cdot (4 \cdot 10^{-3})^2}{0,02 \cdot 10^{-6}}} = 4,9 mm$$

**Príklad 3.2** V homogénnom kovovom vodiči dlhom  $l = 5 m$  a priemerom  $d = 1,2 mm$ , ktorého konce sú pripojené k elektrickému napätiu  $U = 4,5 V$  je stály prúd  $I = 5 A$ . Určte odpor a merný odpor vodiča.

**Riešenie:** Elektrický odpor vodiča pri zadanom napätí a prúdu možno určiť použitím Ohmovho zákona:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{4,5}{5} = 0,9 \Omega$$

Merný elektrický odpor získame zo vzťahu (3.3) pre závislosť elektrického odporu od geometrických rozmerov vodiča:

$$R = \rho \frac{l}{S} \rightarrow \rho = \frac{R \cdot S}{l}$$

Po dosadení ak predpokladáme, že vodič má kruhový prierez:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l} = \frac{R \cdot \pi r^2}{l} = \frac{0,9 \cdot \pi \cdot (0,6 \cdot 10^{-3})^2}{5}$$

$$\rho = 2,03 \cdot 10^{-7} \Omega m$$

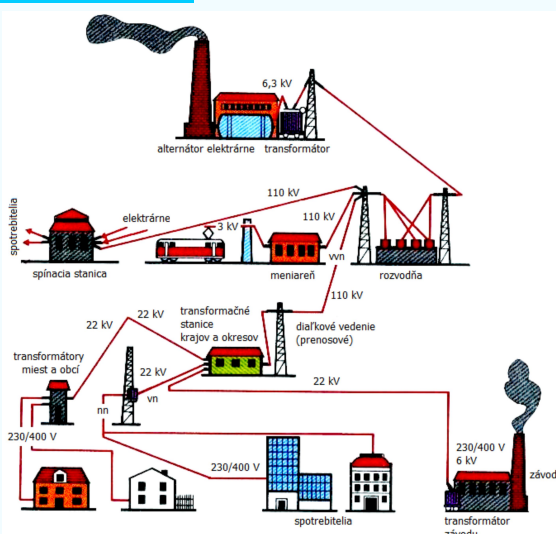
## 🌊 Otázky a úlohy 🌊

1. Ako sa zmení elektrický prúd na vzdialenosti 1 km pri konštantnom Edisonovom napätí 110 V a tečúcom prúde 1 A? Ako by sa musel zmeniť prierez, aby sa pôvodný prúd zachoval? [Pri predpoklade, že ide o vodič z Cu a prierezom  $10 \text{ mm}^2$ , dané napätie nebude stačiť, aby prúd prišiel na koniec vodiča.]
2. Aby sa zabránilo prehrievaniu vodičov, sú pre rôzne prierezy medených vodičov s gumovou izoláciou prijaté obmedzenia elektrického prúdu takto: pre obsah prierezu  $1 \text{ mm}^2$  je povolený maximálny prúd 17 A, pre  $5 \text{ mm}^2$  je to 52 A, 80 A pre  $10 \text{ mm}^2$  a pre obsah prierezu  $50 \text{ mm}^2$  maximálny prúd 215 A. Vidíme, že maximálny prúd nie je úmerný obsahu prierezu. Nie je chyba v bezpečnostných predpisoch? S čím súvisí obmedzenie elektrického prúdu vo vodiči?
3. Nikelínový drôt ( $\rho = 0,40 \mu\Omega \cdot \text{m}$ ) má dĺžku 1,25 m. Akú dĺžku by mal konštantánový drôt s rovnakým odporom a obsahom prierezu? [1 m]
4. Určte merný elektrický odpor striebra, medi, hliníka a konštantánu, ak vieme, že vodič s prierezom  $1 \text{ mm}^2$ , ktorý by mal odpor  $1 \Omega$ , musí mať pri striebre dĺžku 62,5 m, pri medi 55,6 m, pri hliníku 37,0 m a pri konštantáne 2,0 m.
5. Vzdialenosť elektrárne od mesta, ktoré elektrárne zásobuje elektrickou energiou je 900 km. Za aký čas od zapnutia prúdu v elektrárni začnú v meste pracovať elektrické spotrebiče. Rýchlosť, ktorou sa vo vodiči šíri elektrické pole je  $v = c$ .

## 🌊 Pre seminaristov 🌊

1. Určte hmotnosť medi potrebnej na zhotovenie elektrického vedenia s dvomi vodičmi s dĺžkou 5 km, ak elektrický odpor vedenia nemá prekročiť hodnotu  $5\Omega$ . [aspoň 3204 kg]
2. Určte pokles napätia na hliníkovej dvojlinke dlhej 500 m, ak ňou prechádza elektrický prúd 15 A. Každý z vodičov má prierez  $10 \text{ mm}^2$ . [ $\Delta U = 40,5 \text{ V}$ ]

### Fyzika v praxi



Ohmov zákon a závislosť odporu vodiča od geometrických rozmerov má niekoľko ďalekosiahlych dôsledkov na prenášanie elektrickej energie. Aj preto sa začala v

Spojených štátoch amerických vojna medzi používaním jednosmerého a striedavého prúdu na prenos elektrickej energie.

Prenos elektrickej energie jednosmerným prúdom mal niekoľko nevýhod. Prvou je nárast elektrického odporu so zvyšujúcou sa vzdialenosťou (dĺžkou vodiča), čo sa riešilo zvyšovaním prierezu vodiča. Prúd sa ale nedokázal udržiavať zvyšovaním prierezu na dlhé vzdialenosti, preto bolo potrebné stavať generátory po niekoľkých sto metroch, čo bolo ekonomicky nevýhodné. Striedavý prúd narozdiel od jednosmerného nevyžaduje zvyšovanie prierezu vodiča. Elektrickú energiu pomocou transformátorov je možné prenášať na oveľa väčšie vzdialenosti ako pomocou jednosmerného prúdu. Preto sa v sieťach používa striedavý prúd. K úprave na jednosmerný prúd dochádza až v konkrétnych spotrebičoch, ktorých činnosť vyžaduje jednosmerný prúd.<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Obrázok prevzatý zo stránky: encyklopediapoznania.sk



### Projekt 3.1 - Vojna prúdov

Vytvorte projekt, v ktorom informujete vašich spolužiakov o vývoji používania jednosmerného a striedavého prúdu, venujte sa najmä nasledovným historickým

bodom a osobnostiam:

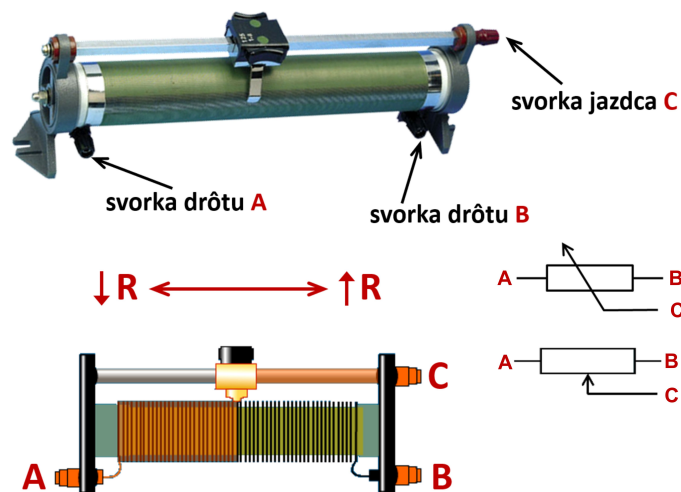
- 1870 - svietenie oblúkovými lampami
- Edisonova DC spoločnosť
- AC transformátor vymyslený v Európe



- Westinghouse vstupuje na scénu s AC prúdom
- Obavy o bezpečnosť z používania striedavého prúdu a boj Edisona proti používaniu striedavého prúdu
- Popravy elektrickým prúdom
- Harold Brownove experimenty
- Koniec vojny a súčasný stav používania jednosmerného a striedavého prúdu, bezpečnosť používanie jednosmerného a striedavého prúdu

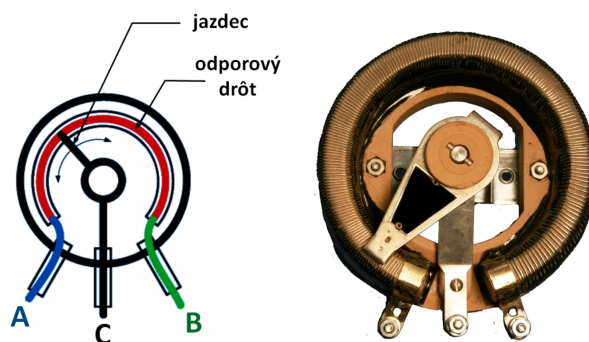
## Reostat a potenciometer

Závislosť odporu od geometrických rozmerov vodiča sa využíva v elektronických súčiastkach, ktoré označujeme ako reostaty a potenciometry. Z praktického hľadiska v priebehu toku elektrického prúdu obvodom nemeníme materiál (charakterizovaný  $\rho$  - merným elektrickým odporom), ani hrúbku vodiča (charakterizovaná prierezom  $S$ ), ale najjednoduchšie je meniť dĺžku  $l$  vodiča. V podstate ide o rezistor s premelivým odpor, kde hodnotu odporu meníme dĺžkou zapojeného vodiča v obvode.



**Obr. 3.4:** Rezistor s premelivým odporom s vyznačenými svorkami na elektronickej súčiastke, schéme a elektrotechnickej značke.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Upravené podľa slideserve.com



**Obr. 3.5:** Rezistor s premelivým odporom v tvare prstenca.<sup>1</sup>

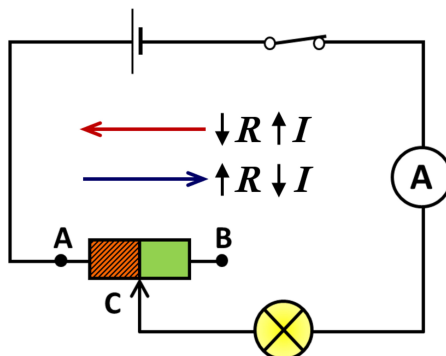
<sup>1</sup> Upravené podľa slideserve.com

Rezistor s premelivým odporom sa skladá z dlhého odporového drôtu navinutého na valcové jadro, ktoré je spravidla keramické. Drôt má **dve svorky** (A, B) a jeden kontakt, ktorý je napojený na svorku C tzv. **jzdec**. Pohybom jazdca vpravo sa zvyšuje dĺžka odporového drôtu zapojeného do obvodu medzi svorkami A a C. Pohybom doľava podľa obr. 3.4 zase dĺžku odporového drôtu medzi svorkami A a C znižujeme a tým znižujeme aj odpor rezistora. Takýto rezistor je v praxi najčastejšie navrhnutý do tvaru prstenca Obr. 3.5.



**Definícia 3.4 (Odporový drôt)**

ide o vodivý drôt z kovu, ktorý je ale prednostne určený na výrobu odporových súčiastok (rezistor, reostat, potenciometer) a to vďaka svojej hodnote merného elektrického odporu. Rovnako je to teda kovový vodič, ale nepoužíva sa na prepojenie jednotlivých súčastí obvodu.



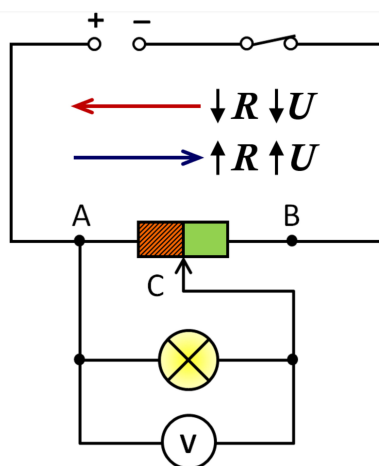
**Obr. 3.6:** Obvod so zapojením rezistora s premenlivým odporom ako reostatu.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Upravené podľa slideserve.com

Rozdiel medzi reostatom a potenciometrom spočíva len v zapojení do obvodu. Podstata oboch súčiastok je, že majú premenlivý odpor a tri svorky. O reostate hovoríme ak rezistor s premenlivým odporom má zopejené len svorky A a C (jazdca) Obr. 3.6. Svorka B ostáva nezapojená do obvodu. Posúvaním jazdca doprava podľa obr. 3.6 zvyšujeme dĺžku odporového drôtu a tým aj odpor reostatu, čo má za následok pokles prúdu v obvode. Ak jazdec C pouívame na opačnú stranu - doľava, znižujeme dĺžku odporového drôtu a tým aj odpor v obvode, čím prúd v obvode narastá.

**Definícia 3.5 (Reostat)**

rezistor s premenlivým odporom, ktorý má do obvodu zapojenú jednu svorku drôtu a svorku jazdca. Zmenou polohy jazdca reguluje v obvode pretekajúci elektrický prúd. Reostat je teda **regulátorom prúdu**.



**Obr. 3.7:** Obvod so zapojením rezistora s premenlivým odporom ako potenciometra.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Upravené podľa slideserve.com

Potenciometer predstavuje rezistor s premenlivým odporom, ktorý má všetky svorky zapojené v obvode (Obr. 3.7). Medzi svorkami A a B je zapojený celý odporový drôt, odpor sa teda nemení. Posúvaním jazdca C sa mení odpor medzi svorkami A, C a B, C. Posunutím jazdca C k svorke A, klesne medzi bodmi A a C odpor, avšak elektróny, ktoré idú cez bod A, žiarovkou a bod C musia prejsť celým odporovým drôtom do bodu B. To má za následok zvýšenie celkového odporu a teda pokles prúdu v tejto časti a podľa Ohmovho zákona rovnako klesne aj napätie. Pri posune jazdca do opačnej strany, odporu medzi bodmi A, C sa zvyšuje, ale skraca sa cesta elektrónov, ktoré musia prejsť žiarovkou do bodu B, čo má za

následok zníženie celkového odporu a teda vzrast prúdu a zároveň vzrast napätia. V tomto prípade hovoríme, že dochádza k deľeniu napätia medzi bodmi A, C a C, B.

### Definícia 3.6 (Potenciometer)

rezistor s premelivým odporom, ktorý má do obvodu zapojené obe svorky (celý odporový drôt) a svorku jazdca. Zmenou polohy jazdca sa rozdeľuje napätie medzi bodmi A, C a C, B. V tomto prípade hovoríme, že potenciometer je **deľič napätia**.



### Fyzika v praxi



S reguláciou napätia alebo prúdu sa stretávame vždy ak potrebujeme meniť, rýchlosť ohrevu elektrickej varnej platne, teplotu rúry, výkon mikrovlnky, teplotu klímy v

aute, veľkosť hlasitosti na rádiu, autorádiu, televízore, či mobile. Teda všade tam, kde chceme nastaviť priateľnú hodnotu určitej fyzikálnej veličiny ako jas, teplota, hlasitosť a pod.

Mnohé deľiče majú stále tvar kolieska (hlasitosť na rádiu), iné prešli na krokové - napr. hlasitosť meníme po určitých nastavených krokoch tlačidlami + a - (hlasitosť na mobilnom telefóne, hlasitosť televízie). Ich fyzikálny princíp je však zachovaný ako sme si ukázali v predchádzajúcej stati. Prvý potenciometer uzrel svetlo sveta roku 1872 z dielne T. A. Edisona. <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Obrázok prevzatý zo stránky: ralphs.ca



**Aktivita 3.1** Rozdeľte sa v triede na skupiny podľa oblasti ľudskej činnosti napr.

- domácnosť
- obce a mestá
- strojársky priemysel
- poľnohospodárstvo
- hutníctvo

- doprava
- potravinárstvo
- medicína

V každej skupine vytvorte plagát, na ktorý uvediete, obrázky a popisy, kde všade sa regulácia prúdu a deľiče napätia používajú vo vybranej oblasti.

## 3.3 Závislosť odporu vodiča od jeho teploty

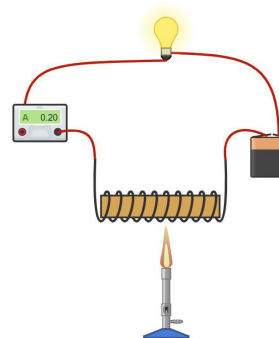
### Experiment 3.3 - Zmena prúdu v kovovom vodiči zmenou teploty

Prípravte experiment podľa schémy na Obr. 3.8. Ako testovaný vodič použite Fe drôt s dĺžkou cca 50 cm a hrúbkou 0,2 mm. Ako zdroj vezmite 4,5 V batériu a žiarovku určenú na napätie 3,8 V a 0,3 A alebo inú vhodnú alternatívu.

Najprv odmerajte tečúci prúd drôtkom bez zahrievania. Potom drôtko zahrievajte a pozorujte zmenu prúdu.

Pri zahrievaní kovového vodiča pozorujeme pokles prúdu v obvode. So zvyšujúcou sa teplotou narastá elektrický odpor a to v dôsledku väčších tepelných kmi-

tov mriežky.



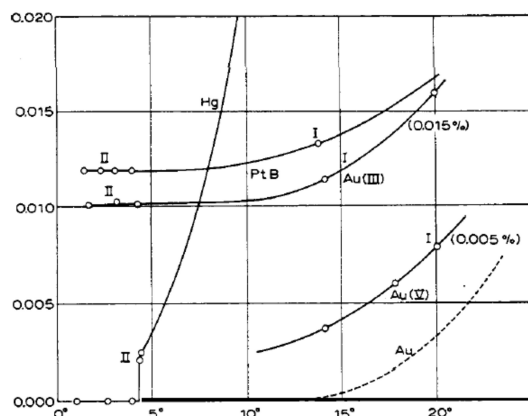
**Obr. 3.8:** Schematické znázornenie experimentu.

Závislosť odporu kovového vodiča od teploty je v určitom teplotnom intervale lineárna a je ju možné opísať vzťahom:

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta t) = R_0(1 + \alpha(t - t_0)) \quad (3.5)$$

kde  $R$  je odpor vodiča pri teplote  $t$ ,  $R_0$  odpor vodiča pri teplote  $t_0$ ,  $\Delta t$  teplotný rozdiel a  $\alpha$  označujeme ako **teplotný koeficient elektrického odporu**. Hodnoty teplotného koeficientu elektrického odporu sa určujú experimentálne a hodnoty pre dané materiály nájdeme v tabuľkách. Rovnaký zákon pre určité teplotné rozmedzie platí aj pre **merný elektrický odpor**, ktorý sme uviedli v stati 3.2:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta t) \quad (3.6)$$



**Obr. 3.9:** Závislosť odporu pri extrémne nízkych teplotách niektorých kovov nameraných H. Kamerlingh-Onnesom.

Na obr. 3.9 je niekoľko závislostí odporu daných kovov pri extrémne nízkych teplotách, ktoré nameral H. Kamerlingh-Onnes. Z grafu vidieť, že závislosť nie je lineárna. Kamerlingh-Onnes tiež zistil, že pri 4,2 K odpor ortuti klesne na nulu a pod touto teplotou sa správa ako ideálny vodič. Tento jav označujeme ako **supravodivosť**.

### Definícia 3.7 (Supravodivosť)

*jav, kedy pri určitej teplote klesne odpor vodiča na  $0 \Omega$ . Pre Hg je to 4,2 K a Pb 7,26 K. Pod danou teplotou sa daný vodič správa ako ideálny, prúd ním tečie bez odporu. Teoreticky by zavedením prúdu do takého vodiča stočeného do slučky mohol prúd pretekať do nekonečna.*



### Heike Kamerlingh-Onnes



\*1853 - †1926

*Holandský fyzik a držiteľ Nobelovej ceny. Študoval na univerzite v Heidelbergu pod zvučnými menami ako R. Bunsen (vynálezca plynového kahanu) a G. Kirchhoffom (známy vďaka svojím Kirchhoffovým zákonom).*

*V rokoch 1882-1923 bol profesorom experimentálnej fyziky na Leidenskej univerzite. Roku 1908 sa mu podarilo vytvoriť zariadenie, ktoré dosahovalo extrémne nízke teploty 1,5 K a vďaka tomu skvapalnil aj He. Roku 1911 pozoroval u ortuti supravodivosť pri nízkych teplotách a roku 1913 mu za jeho objavy bola udelená Nobelova cena.*



**Príklad 3.3** Vláknom volfrámovej žiarovky s teplotou  $0^\circ\text{C}$  prechádza pri napätí 10 V prúd 0,3 A. a pri napätí 220 V prúd 0,5 A pričom sa vlákno zohreje na  $2976^\circ\text{C}$ . Určite teplotný koeficient odporu volfrámu.

**Riešenie:** Výsledný odpor má byť rovnaký a teda musí platiť:

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta t)$$

Našou úlohou je určiť koeficient alfa, takže si ho z rovnice najprv vyjadríme:

$$R = R_0 + R_0\alpha\Delta t$$

$$R - R_0 = R_0\alpha\Delta t$$

$$\alpha = \frac{R - R_0}{R_0\Delta t}$$

Upravenú rovnicu nemožno krátiť, keďže v čitateli je  $R_0$  v rozdiely a v menovateli je v súčine! Zvlášť si teda vypočítame odpor wolfrámu pri  $0^\circ\text{C}$  a  $2976^\circ\text{C}$ , pre ktoré zo zadania vyplýva:

$$R_0 = \frac{U_0}{I_0} = \frac{10}{0,3} = 33,3\Omega$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0,5} = 440\Omega$$

Tieto hodnoty dosadíme do vzťahu, ktorý sme si vyjadrili pre  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{R - R_0}{R_0 \Delta t} = \frac{440 - 33,3}{33,3 \cdot 2976} = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$$

**Príklad 3.4** Vypočítajte, o koľko percent sa zmení odpor

medeného drôtu pri zmene teploty  $20^\circ\text{C}$  na  $50^\circ\text{C}$ .

**Riešenie:** Zadanie je zamerané na zmenu odporu s teplotou, kde pre kovy platí vzťah:

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta t)$$

Keďže nám ide o zmenu odporu v percentách, stačí ak vypočítame člen v zátvorke. V ňom máme zadanú teplotu, ale chýba nám teplotný koeficient odporu pre meď, ktorý vyhľadáme v tabuľkách:

$$R = R_0(1 + 4,10 \cdot 10^{-3} \cdot 30)$$

$$R = 1,12R_0$$

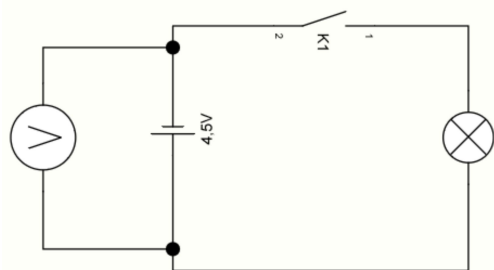
Výsledok, ktorý sme získali znamená, že odpor stúpne o 12%.

## 🌊 Otázky a úlohy 🌊

1. Vláknom wolfrámovej žiarovky s teplotou  $28^\circ\text{C}$  prechádza pri napätí 10 V prúd 300 mA. Určte teplotu vlákna žiarovky, ak vláknom prechádza prúd 0,5 A a napätie na koncoch vlákna je 220 V. [ $2570^\circ\text{C}$ ]
2. Na akú teplotu sa zahriala medená cievka vinutia elektromotora, keď jej odpor pred zapnutím motora (pri izbovej teplote) mal hodnotu 0,15  $\Omega$  a hneď po vypnutí motora 0,17  $\Omega$ ? [ $53,3^\circ\text{C}$ ]
3. Platinový odporový teplomer má pri teplote  $0^\circ\text{C}$  odpor 500  $\Omega$ . Odpor teplomera v rozpálenej peci je 3600  $\Omega$ . Aká je teplota pece? [ $1590^\circ\text{C}$ ]
4. Vypočítajte o koľko percent sa zmení odpor konštantánového drôtu pri zmene teploty z  $0^\circ\text{C}$  na  $100^\circ\text{C}$ . [ $0,5\%$ ]

## 3.4 Ohmov zákon pre uzavretý obvod

**Experiment 3.4 - Elektromotorické a svorkové napätie**



Obr. 3.10: Schéma zapojenia.

Zapojte elektrický obvod podľa Obr. 3.10. Voltmeter pripojte priamo na zdroj, použite 4,5 V batériu. Pri rozopnutom spínači K1 voltmeter ukazuje napätie batérie, ktorá je **nezaťažená** t.j. nie sú na ňu napojené žiadne spotrebiče. Toto napätie voláme **elektromotorické napätie zdroja**.

Po zopnutí spínača K1 pozorujeme pokles napätia na zdroji a žiarovka sa rozsvieti. Zdroj sme teraz **zaťažili**. Napätie, ktoré ukazuje voltmeter voláme **svorkové napätie zdroja**.

### Definícia 3.8 (Elektromotorické napätie zdroja)

odmeriame voltmetrom na nezaťaženom zdroji t.j. na zdroji, ktorý nie je zapojený do obvodu so spotrebičmi. Spravidla je to hodnota, ktorú udáva výrobca. Táto hodnota môže byť nižšia a to v dôsledku postupného vybíjania batérie.

### Definícia 3.9 (Svorkové napätie zdroja)

nameríme voltmetrom na zaťaženom zdroji, t.j. na zdroji, ktorý je zapojený do obvodu so spotrebičmi. Hodnota svorkového napätia je vždy nižšia ako hodnota elektromotorického napätia.

Kde sa stratilo napätie v obvode pri experimente? Tento jav hlbšie pochopíme použitím zákona zachovania energie:

Lubovoľný elektrický obvod sa skladá z dvoch častí: **vonkajšej** a **vnútornej**. Vonkajšiu časť obvodu predstavujú prvky mimo zdroja - v našom prípade vodiče, žiarovka a spínač. Vnútnu časť predstavuje samotný zdroj, kde ako sme si ukázali v stati 2.5 sa náboj prenáša proti smeru prúdu vo vonkajšej časti obvodu. Celková práca zdroja  $W_z$  sa teda spotrebuje na prenos náboja vo vonkajšej časti obvodu  $W$  a prenos náboja vnútri zdroja  $W_i$ :

$$W_z = W + W_i \quad (3.7)$$

Prácu v homogénnom elektrickom poli môžeme vyjadriť vzťahom 1.11 a prepísať na tvar:

$$U_e Q = UQ + U_i Q \quad (3.8)$$

kde  $U_e$  je elektromotorické napätie zdroja,  $U$  svorkové napätie zdroja (vonkajšej časti obvodu),  $U_i$  úbytok napätia na zdroji. Celkový prenesený náboj  $Q$  je rovnaký pre vonkajšiu časť obvodu aje pre vnútro zdroja. Platí zákon zachovania elektrického náboja a teda náboj  $Q$  musí byť prenesený celým obvodom. Po úprave dostaneme:

$$U_e = U + U_i \quad (3.9)$$

Zo vzťahu vyplýva, že súčet napätí na vonkajšom obvode a vnútornom obvode sa rovná elektromotorickému napätiu zdroja. Ak chceme zistiť ako sa bude správať prúd v uzavretom obvode, použijeme pre členy vnútorného a vonkajšieho obvodu Ohmov zákon pre časť elektrického obvodu:

$$U = RI \quad U_i = R_i I$$

kde  $R$  je odpor vonkajšej časti obvodu,  $R_i$  **vnútorný odpor zdroja** a  $I$  je pretekajúci prúd obvodom. Upravením dostaneme vyjadrenie pre závislosť prúdu, čo predstavuje matematické vyjadrenie Ohmovo zákona pre uzavretý obvod:

$$U_e = RI + R_i I = I(R + R_i) \implies I = \frac{U_e}{R + R_i} \quad (3.10)$$

#### Definícia 3.10 (Ohmov zákon pre uzavretý obvod)

prúd v uzavretom obvode sa rovná podielu elektromotorického napätia zdroja a súčtu odporov na vonkajšej a vnútornej časti obvodu. Matematicky zákon vyjadruje vzťah:

$$I = \frac{U_e}{R + R_i} \quad (3.11)$$

Menovateľ vzťahu 3.11 predstavuje **celkový odpor** obvodu. Svorkové napätie môžeme vyjadriť úpravou vzťahu 3.10:

$$U = U_e - R_i I \quad (3.12)$$

Preto v experimente nameráme voltmetrom napätie nižšie o úbytok napätia na zdroji. Ak vonkajší odpor  $R$  je oveľa väčší než vnútorný odpor zdroja, potom vnútorný odpor zdroja možno zanedbať:

$$U \doteq U_e = RI \quad (3.13)$$

Z toho vyplýva, že ak meriame napätie zdroja voltmetrom, pre ktorý platí  $R_v \gg R_i$  a obvod je rozpojený, môžeme nameranú hodnotu považovať s dostatočnou presnosťou za elektromotorické napätie zdroja.

V prípade ak by sme spojili vodičom priamo svorky zdroja, bude v obvode tiecť maximálny prúd:

$$I_{max} = \frac{U_e}{R_i} \quad (3.14)$$

Nastáva **skrat** a dochádza k zničeniu zdroja. Toto spojenie tiež označujeme ako **spojenie nakrátko** = skrat.

#### Definícia 3.11 (Skrat)

alebo tiež spojenie nakrátko nastáva ak priamo vodičom spojíme svorky zdroja. Zdrojom začne pretekať maximálny prúd a dochádza k jeho zničeniu.

**Príklad 3.5** Keď na akumulátor pripojíme vodič s odporom  $1 \Omega$ , prechádza ním prúd  $1 \text{ A}$ , pri odpore  $2,5 \Omega$  prúd  $0,5 \text{ A}$ . Určte vnútorný odpor akumulátora. **Riešenie:** Ide o dva prípady, keď na zdroj sú pripojené iné rezistory. Pre zapojený zdroj so spotrebičom platí Ohmov zákon pre uzavretý obvod:

$$I = \frac{U_e}{R + R_i}$$

Odiaľ si vyjadríme elektromotorické napätie zdroja cez odpory a prúd, nakoľko ich máme v zadani:

$$U_e = RI + R_i I$$

Pre prvý a druhý prípad budú platiť rovnice:

$$U_e = 1 \cdot 1 + R_i \cdot 1$$

$$U_e = 2,5 \cdot 0,5 + R_i \cdot 0,5$$

Elektromotorické napätie ako aj vnútorný odpor zdroja sú konštantami, ktoré charakterizujú použitý zdroj. Dostali sme dve rovnice o dvoch neznámych, ktoré je možné riešiť viacerými metódami. Tu dosadíme za

elektromotorické napätie do druhej rovnice vyjadrenie z prvej:

$$1 \cdot 1 + R_i \cdot 1 = 2,5 \cdot 0,5 + R_i \cdot 0,5$$

Rovnicu upravíme a vypočítame z nej vnútorný odpor zdroja:

$$1 + R_i = 1,25 + 0,5R_i$$

$$0,5R_i = 0,25$$

$$R_i = 0,5 \Omega$$

Vypočítaný vnútorný odpor dosadíme do prvej alebo druhej rovnice a dopočítame elektromotorické napätie zdroja:

$$U_e = 1 + R_i = 1 + 0,5 = 1,5V$$

## 🏠 Otázky a úlohy 🏠

1. V uzavretom obvode je zdroj elektromotorického napätia s  $U_e = 12,0 \text{ V}$  a vnútorným odporom  $0,2 \Omega$ . Vonkajší odpor je  $19,8 \Omega$ . Určte prúd a svorkové napätie. [0,60 A; 11,9 V]
2. Vonkajší obvod s odporom  $3,8 \Omega$  je zapojený na zdroj elektromotorického napätia s  $U_e = 12,0 \text{ V}$ . Obvodom prechádza prúd 3 A. Vypočítajte svorkové napätie zdroja, vnútorný odpor zdroja, prúd pri skrate. [11,4 V; 0,2  $\Omega$ ; 60 A]
3. Elektrický obvod tvorí pružina z odporového drôtu s dĺžkou 1,5 m a priemerom 0,2 mm ( $\rho = 4,10^{-7} \Omega \cdot \text{m}^{-1}$  pri  $20^\circ\text{C}$  a  $\alpha = 11 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ), zdroj s  $U_e = 12 \text{ V}$  a vnútorným odporom  $0,2 \Omega$ . Aký prúd tečie drôtom, ktorého teplota sa zvýšila na  $90^\circ\text{C}$ ? Zmenu dĺžky drôtu s teplotou zanedbajte. [0,62 A]
4. Na svorky batérie s elektromotorickým napätím 4,5 V a vnútorným odporom  $0,9 \Omega$  pripojíme rezistor s odporom  $8,1 \Omega$ . Aký prúd bude prechádzať obvodom? Aký bude skratový prúd? [0,5 A; 5 A]
5. Pri zapnutí štartéra automobilu prechádza ním prúd 120 A. Elektromotorické napätie akumulátora je 12 V, vnútorný odpor akumulátora je  $0,06 \Omega$ . Aký je odpor štartéra? [0,04  $\Omega$ ]
6. Na svorkách nezaťaženej batérie nameriame voltmetrom hodnotu 6 V. Pri zaťažení batérie prúdom 50 A klesne údaj na voltmetri na 5,2 V. Aký vnútorný odpor má akumulátorová batéria? [0,016  $\Omega$ ]

## 3.5 Kirchhoffove zákony

V podkapitole 2.2 sme si definovali elektrický obvod. Pod týmto pojmom rozumieme súhrn prvkov, ktoré vytvárajú cestu pre voľný prechod elektrického prúdu (napr. vodiče, žiarovka, rezistor, ampérmeter a pod.). Vodivá cesta, ktorú tvorí obvod musí byť uzavretá a spojenie medzi jednotlivými prvkami obvodu vodivé. Elektrické obvody môžu byť **jednoduché** (doteraz sme sa zaoberali len jednoduchými obvody) alebo **rozvetvené** (zložené). Zložené obvody tiež označujeme ako **elektrická sieť**.

### Definícia 3.12 (Elektrická sieť)

*rozvetvený (zložený) obvod tvorený viacerými zdrojmi a rezistormi, ktoré sú rôznym spôsobom spojené.*



Na Obr. 3.11 je príklad jednoduchého obvodu a rozvetveného obvodu. V rozvetvenom obvode nachádzame miesta, kde sa stretávajú najmenej tri vodiče. Také miesto označujeme ako **uzol** elektrického obvodu.

### Definícia 3.13 (Uzol elektrického obvodu)

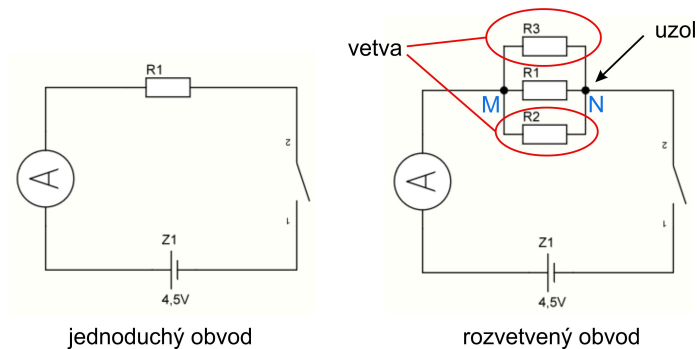
*miesto v rozvetvenom obvode, kde sa spájajú najmenej tri vodiče, môže ich byť viac. Uzol v schéme kreslíme zreteľnou bodkou v mieste prepojenia.*



Časť elektrickej siete medzi dvomi uzlami je označovaná ako **vetva** elektrického obvodu. Vetvu v zloženom obvode na Obr. 3.11 tvorí napr. rezistor R2, ale aj R3 alebo R1 - všetky sú zapojené medzi dvomi uzlami. Ďalšiu vetvu tvorí ampérmeter, zdroj a spínač, taktiež sú to prvky obvodu nachádzajúce sa medzi dvomi uzlami.

**Definícia 3.14 (Vetva elektrického obvodu)**

časť elektrického obvodu medzi dvomi uzlami.



**Obr. 3.11:** Jednoduchý a zložený (rozvetvený) elektrický obvod.

G. R. Kirchhoff zovšeobecil Ohmov zákon pre rozvetvené obvody:

## 1. Kirchhoffov zákon

Na Obr. 3.11 je rozvetvený obvod, ktorý má dva uzly M a N a štyri vetvy, ktoré sme popísali vyššie. Keď by sme ampérmeter postupne zapájali do všetkých vetiev a zmerali prúdy  $I$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ , a  $I_3$ , zistíme, že prúd  $I$  sa rovná súčtu prúdov  $I_1$ ,  $I_2$  a  $I_3$  vo vetvách. Na všetkých vetvách je rovnaké napätie  $U$  zdroja, keďže všetky tri vetvy sú medzi uzlami M a N.

Pre prípad z obrázka uvažujme o prípade, kde prúd  $I$  zo zdroja vstupuje do uzla M a v ňom sa delí do vetiev na tri prúdy, ktoré z uzla vystupujú. Podľa konvencie značíme **vstupujúce prúdy kladným** znamienkom a **vystupujúce záporným**. Pre uzol M bude o prúdoch platiť:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad \Rightarrow \quad I - I_1 - I_2 - I_3 = 0 \quad (3.15)$$

Rovnica 3.14 vedie k formulácii 1. Kirchhoffovho zákona:

**Definícia 3.15 (1. Kirchhoffov zákon)**

algebraický súčet prúdov v uzle sa rovná nule. Matematicky:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0A \quad (3.16)$$

Zákon platí pre uzol obvodu s jednosmerným prúdom a vyjadruje zákon zachovania elektrického náboja t.j., že pri konštantnom prúde sa v žiadnom mieste vodiča a teda ani v uzle, nehromadia častice s nábojom. 1. Kirchhoffov zákon možno použiť na výpočet výsledného odporu **paralelne zapojených rezistorov**. Už sme si ukázali, že pre uzol M platí:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (3.17)$$

Využijeme Ohmov zákon a rovnicu prepíšeme cez jednotlivé napätia a odpory, pričom ako sme uviedli, napätie medzi uzlami M a N je to isté  $U$ :

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} \quad (3.18)$$

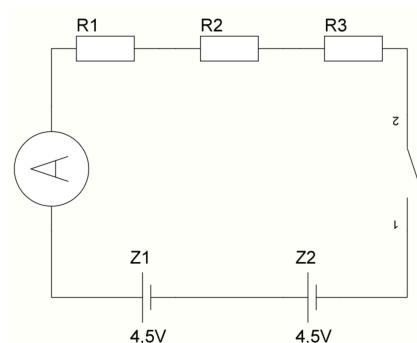
Pre  $n$  **paralelne zapojených rezistorov** teda bude platiť:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (3.19)$$

Pri paralelnom zapojení rezistorov sa prevrátená hodnota celkového odporu rovná súčtu prevrátených hodnôt jednotlivých odporov rezistorov.



## 2. Kirchhoffov zákon



Obr. 3.12: Jednoduchý elektrický obvod s dvomi zdrojmi a tromi rezistormi.

Pre obvod na Obr. 3.12 platí Ohmov zákon pre uzavretý obvod s tým, že v obvode máme prítomné dva zdroje, ktoré sú zapojené sériovo. Rovnicu 3.10 teda prepíšeme na tvar:

$$I = \frac{U_e(Z1) + U_e(Z2)}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (3.20)$$

Úpravou získame rovnicu, ktorá matematicky vyjadruje 2. Kirchhoffov zákon:

$$U_e(Z1) + U_e(Z2) = R_1 I + R_2 I + R_3 I \quad (3.21)$$

#### Definícia 3.16 (2. Kirchhoffov zákon)

v jednoduchom uzavretom obvode sa súčet elektromotorických napätí zaradených zdrojov rovná súčtu úbytkov napätí. Matematicky:

$$\sum_{i=1}^n U_{ei} = \sum_{k=1}^m R_k I_k \quad (3.22)$$



2. Kirchhoffov zákon platí pre jednoduché uzavreté obvody, ktoré vieme vyčleniť v rámci siete. Praktické aplikácie a ukážky sú opísané v ďalších statiach.

V danom obvode sú prvky zapojené za sebou, môžeme teda z 2. Kirchhoffovho zákona odvodiť vzťah pre výsledný odpor n sériovo zapojených rezistorov:

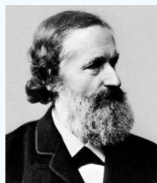
$$U_e = R_1 I + R_2 I + \dots + R_n I \quad (3.23)$$

$$RI = R_1 I + R_2 I + \dots + R_n I \quad (3.24)$$

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (3.25)$$

Výsledný odpor n rezistorov, ktoré sú zapojené sériovo sa rovná súčtu odporov jednotlivých rezistorov. Pričom si všimnite, že sme vnútorné odpory zdrojov v odvodzovaní zanedbali. V niektorých praktických situáciách to nie je možné a do členov na pravej strane rovníc je nutné zaradiť aj vnútorné odpory zapojených zdrojov.

#### Gustav Robert Kirchhoff

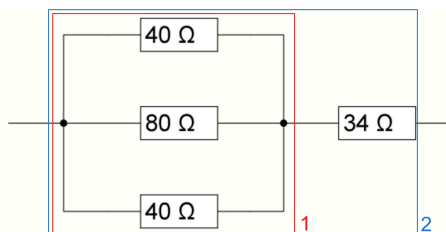


\*1824 - †1887

Nemecký fyzik, ktorý prispel k pochopeniu elektrických obvodov, spektroskopie a žiareniu čierneho telesa. Narodil sa v Königsberg, vtedajšom Prusku, kde chodil na univerzitu. Neskôr dostal miesto profesora vo Wroclave. Svoje zákony formuloval ešte ako študent v rámci domácich zadaní.



**Príklad 3.6** Na obr. 3.13 sú zapojené 4 rezistory. Vypočítajte výsledný odpor zapojených rezistorov.



**Obr. 3.13:** Schéma zapojenia rezistorov.

**Riešenie:** Podobne, ak si pamätáte, sme riešili výslednú kapacitu zapojených kondenzátorov. Obvod si teda vhodne rozdelíme na menšie časti, ktoré sú zapojené len paralelne alebo sériovo a nahradíme ich rezistorom s výsledným odporom. V našom prípade sú tri rezistory zapojené paralelne a k nim je pripojený jeden rezistor sériovo. Najprv teda spočítame výsledný odpor rezistorov zapojených paralelne (Obr 3.13 červený rámček) a tie nahradíme rezistorom s výsledným odporom  $R_v$  (Obr. 3.14). Pre výsledný odpor paralelného zapojenia rezistorov platí:

$$\frac{1}{R_v} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_v} = \frac{1}{40} + \frac{1}{80} + \frac{1}{40}$$

$$\frac{1}{R_v} = \frac{2 + 1 + 2}{80}$$

$$R_v = \frac{80}{5} = 16\Omega$$



**Obr. 3.14:** Paralelné zapojenie nahradíme rezistorom s výsledným odporom  $R_v$ .

Po nahradení paralelného zapojenia jedným rezistorom s výsledným odporom nám ostane sériové zapojenie dvoch rezistorov, pre ktorých výsledný odpor platí:

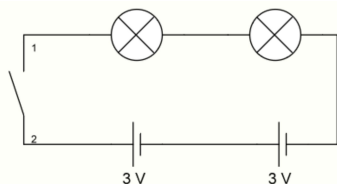
$$R = R_v + R_4$$

$$R = 16 + 34 = 50\Omega$$

Výsledný odpor tohto zapojenia je  $50\Omega$ . Všimnite si tiež výsledok pre paralelné zapojenie rezistorov. Hodnota  $16\Omega$  je dokonca nižšia ako najnižšia hodnota odporu v paralelnom zapojení. Preto sa v praxi napr. pri napájaní elektrických zásuviek, či svetiel využíva práve paralelné zapojenie spotrebičov.

### Experiment 3.5 - Sériové a paralelné zapojenie žiaroviek

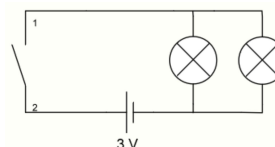
Zostavte obvod podľa schémy na obr. 3.15.



**Obr. 3.15:** Sériové zapojenie žiaroviek.

Po zopnutí spínača sa obe žiarovky rozosvetia. Pokiaľ je jedna zo žiaroviek nefunkčná, nebude svietiť ani jedna z nich. Obvod je príkladom zapojenia osvetlenia na

vianočný stromček.

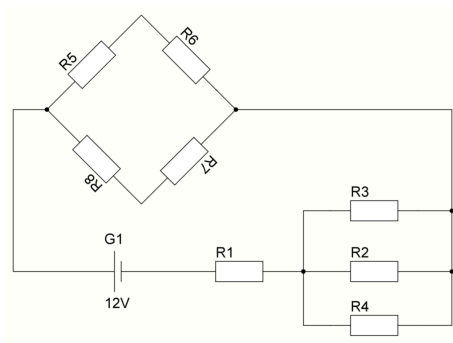


**Obr. 3.16:** Paralelné zapojenie žiaroviek.

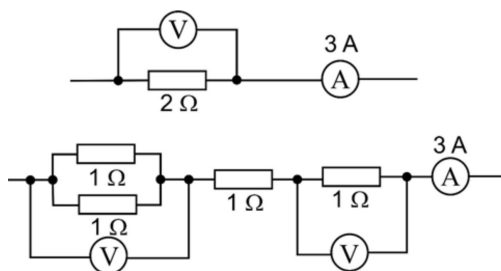
Pre paralelné zapojenie žiaroviek, zostavte obvod podľa schémy na obr. 3.16. Po zopnutí spínača sa obe žiarovky rozosvetia. Pokiaľ je jedna zo žiaroviek nefunkčná, neovplyvní to svietivosť druhej žiarovky. Zapojenie je príkladom zapojenia svetidiel v domácnosti. Porucha jednej žiarovky neovplyvní funkčnosť ostatných.

## 🎨 Otázky a úlohy 🎨

- Vypočítajte aké napätie nameráme na sériovo zapojených rezistoroch s odpormi  $2\Omega$  a  $4\Omega$  ak prúd prechádzajúci obvodom je  $1\text{ A}$ . [ $2\text{ V}$ ;  $4\text{ V}$ ]
- Prečo musí mať ampérmeter čo najmenší odpor a voltmeter čo najväčší odpor?
- V elektrickom obvode sú spojené dva rezistory s odpormi  $20\Omega$  a  $25\Omega$  paralelne a k nim je pripojený tretí sériovo s odporom  $30\Omega$ . Nakreslite schému obvodu so  $150\text{ V}$  zdrojom a vypočítajte výsledný odpor rezistorov. [ $41,1\Omega$ ]
- Tri rezistory sú spojené sériovo. Ako môžete pomocou ďalších vodičov spojiť tieto rezistory paralelne a to bez prerušenia pôvodného obvodu?
- Vypočítajte celkový prúd, ktorý prechádza obvodom ak viete, že každý rezistor má odpor  $3\Omega$  a zdroj má napätie  $7\text{ V}$ . [ $1\text{ A}$ ]
- Aké napätia ukazujú voltmetre? (Bez toho, aby ste počítali)

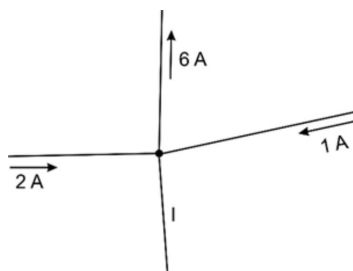


Obr. 3.17: K úlohe 5.



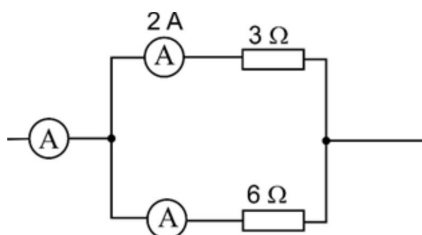
Obr. 3.18: K úlohe 6.

7. Aký prúd prechádza štvrtým vodičom?



Obr. 3.19: K úlohe 7.

8. Určte bez počítania aké prúdy prechádzajú ostatnými ampérmetrami.



Obr. 3.20: K úlohe 8.

9. Prúd 1,5 A sa rozvetvuje do dvoch paralelne zapojených rezistorov s odpormi 4  $\Omega$  a 6  $\Omega$ . Bez použitia kalkulačky určte aký veľký prúd tečie každým z rezistorov.
10. Dva spotrebiče s odpormi 400  $\Omega$  a 200  $\Omega$  sú zapojené paralelne na napätie 150 V. Určte bez použitia kalkulačky prúdy tečúce spotrebičmi.
11. Spotrebiče s odpormi 20  $\Omega$  a 35  $\Omega$  sú zapojené za sebou. Bez použitia kalkulačky určte úbytky napätí na spotrebičoch ak prúd v obvode je 1,2 A.
12. Tri rezistory sú zapojené do série. Úbytok napätia na rezistore  $R_1 = 3 \Omega$  je  $U_1 = 9 \text{ V}$ . Určte napätie  $U_2$  na rezistore  $R_2 = 64 \Omega$  a odpor  $R_3$ , ak napätie na svorkách zdroja je  $U = 120 \text{ V}$ .

13. Prúd  $I = 4 \text{ A}$  sa rozvetvuje do troch vodičov s odpormi  $R_1 = 2 \Omega$ ,  $R_2 = 5 \Omega$ ,  $R_3 = 10 \Omega$ . Vypočítajte celkový odpor zapojenia a napätie zdroja. Aké veľké prúdy sú v jednotlivých vodičoch?

### Praktické aplikácie Kirchhoffových zákonov

V predchádzajúcej stati sme si ukázali ako je možné vypočítať pomocou Kirchhoffových zákonov výsledné odpory ak sú rezistori zapojené sériovo alebo paralelne. Kirchhoffove zákony sa využívajú aj v meracích prístrojoch. To, že otočením kolieska na prístroji zmeníme merací rozsah sú Kirchhoffove zákony v praxi:

#### Rozšírenie 3.1 (Zväčšenie rozsahu ampérmetra)

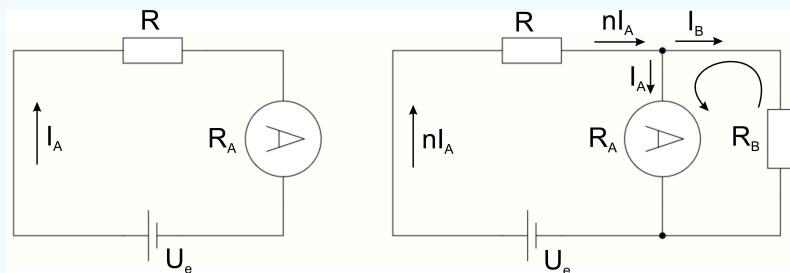
Elektrický prúd meriame ampérmetrom, ktorý spájame sériovo so spotrebičom. Odpor  $R_A$  ampérmetra musí byť veľmi malý, aby čo najmenej ovplyvnil prúdové a napäťové pomery v obvode. Ampérmetrom môže najvyšš prechádzať prúd  $I_A$ . Pre meranie  $n$ -krát väčších prúdov zaradíme paralelne k ampérmetru rezistor s odporom  $R_b$  tzv. **bočník**. Odpor bočnika vypočítame pomocou Kirchhoffových zákonov. Podľa Obr. 3.21 pre vetvu, ktorú tvorí ampérmeter a bočník budú platiť rovnice:

$$nI_A - I_A - I_B = 0A$$

$$R_A I_A - R_B I_B = 0V$$

Vyjadrením z odporu bočnika z rovníc dostaneme:

$$R_b = \frac{1}{n-1} R_A \quad (3.26)$$



Obr. 3.21: Schéma zväčšenia rozsahu ampérmetra priradením tzv. bočnika.

V najnovších prístrojoch sú bočníky súčasťou prístroja a jednoduchým nastavením (zmenou polohy stredového kolieska) zmeníme merací rozsah. Nezabúdajme na zásadu, že pri meraní, vždy ampérmeter nastavíme na najväčší rozsah a až potom merací rozsah prispôbíme meraným hodnotám prúdu!

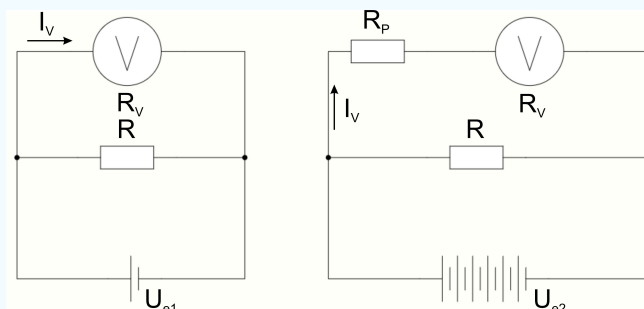
#### Rozšírenie 3.2 (Zväčšenie rozsahu voltmetra)

Voltmetrom meráme v obvode napätie. Voltmeter zapájame paralelne, kde sa prúd rozdeľuje do vetiev obvodu a aby voltmeter čím menej zaťažoval sieť musí mať čo najväčší odpor, aby ním pretekal minimálny prúd. Každý voltmeter je konštruovaný na určité maximálne napätie  $U_V$ , dané maximálnym prúdom  $I_V$ , ktorý môže prechádzať cievkou voltmetra s odporom  $R_V$ . Ak chceme meraný rozsah zväčšiť  $n$ -krát, sériovo spojíme voltmeter s tzv. **predradným rezistorom** s odporom  $R_p$ . Tým sa utvorí delič napätia, ktorého časťami prechádza rovnaký prúd. Pomocou Kirchhoffových zákonov dostaneme výsledný vzťah:

$$I - I_V = 0A$$

$$nRI - R_p I_V - R_V I_V = nR_V I_V - R_p I_V - R_V I_V = 0V$$

$$R_p = (n-1)R_V$$

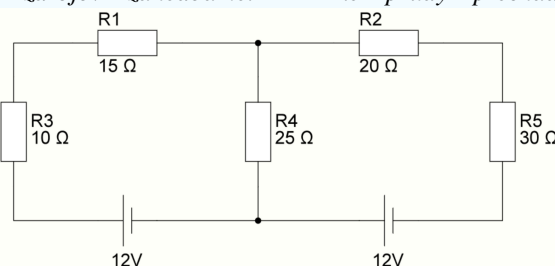


**Obr. 3.22:** Schéma zväčšenia rozsahu voltmetra predradným rezistorom.

Pomocou Kirchhoffových zákonov je možné vypočítať parametre prvkov siete:

### Rozšírenie 3.3 (Výpočet parametrov prvkov elektrickej siete)

Na obrázku je znázornená elektrická sieť, v ktorej sú zapojené dva zdroje a päť rezistorov. Vnútorne odpory zdrojov zanedbáme. Aké prúdy prechádzajú jednotlivými vetvami?



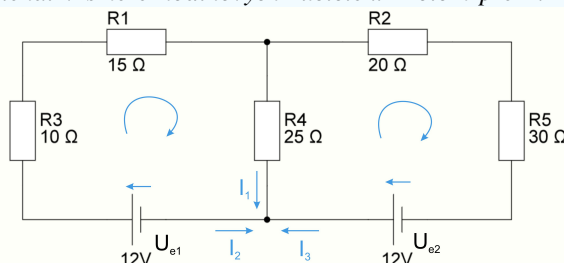
**Obr. 3.23:** Schéma elektrickej siete k úlohe.

Keďže v donom alebo hornom uzle sa stretávajú tri vodiče, znamená to, že potrebujeme určiť tri neznáme. Aby sme tak mohli urobiť, potrebujeme na základe Kirchhoffových zákonov napísať tri rovnice, aby úloha bola riešiteľná.

V prvom kroku, keďže máme vypočítať tečúce prúdy, si vyberieme ľubovoľný z uzlov, povedzme dolný. Prúdom priradíme určité smery, smery si určujeme ľubovoľne. Povedzme, že všetky prúdy budú do uzla vtekať. Potom podľa nášho nákresu pre dolný uzol platí:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

Potrebujeme teda ešte dve rovnice. Tie nájdeme pomocou Kirchhoffových 2. zákonov pre vetvy. Opäť je na nás, ktoré vetvy vyberieme. Ďalej určujeme smer toku prúdov v zdrojoch, ktorý smeruje od zápornej svorky (v značke kratšia čiara) ku kladnej (v značke dlhšia čiara). Potom zvolíme smer obiehania t.j. akým smerom budeme danú vetvu popisovať. Znova tieto smery sú na našej voľbe. Povedzme, že si zvolíme dve vnútorné vetvy a obe budeme obiehať v smere hodinových ručičiek. Potom pre 1. a 2. vetvu napíšeme rovnice.



**Obr. 3.24:** Schéma elektrickej siete k úlohe doplnená o naše úvahy - znázornené modrou.

Pre vetvu platí 2. Kirchhoffov zákon. Rovnicu nájdeme postupným obiehaním po vetve. Zčať môžeme kdekoľvek, tak, aby sme obehli celú vetvu. Začneme povedzme vetvou, ktorá je naľavo a začneme ju opisovať od dolného uzla. Od neho pokračujeme v nami zvolenom smere - v smere hodinových ručičiek. Najbližšie na ceste je zdroj, v

ktorom smer prúdu je súhlasný so smerom obiehania, preto napätie zapíšeme na ľavej strane rovnice s kladným znamienkom. ďalšie zdroje vo vetve nie sú prítomné, preto pokračujeme písaním pravej strany rovnice a ďalším prvkom obvodu je rezistor R3, cez ktorý tečie prúd  $I_2$ , ktorý sme zvolili proti smeru obiehania, teda člen  $R_3I_2$  napíšeme na pravú stranu rovnice so záporným znamienkom. Ďalší je rezistor R1, s rovnakým prúdom  $I_2$ , ktorý tečie vo vetve proti nášmu zvolenému smeru obiehania, rovnako teda píšeme člen  $R_1I_2$  so záporným znamienkom. Posledný v zvolenej vetve je rezistor R4, cez ktorý tečie prúd  $I_1$  v súlade s našim zvoleným smerom obiehania, preto člen  $R_4I_1$  píšeme s kladným znamienkom:

$$U_{e1} = -R_3I_2 - R_1I_2 + R_4I_1$$

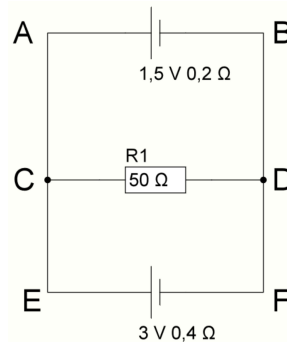
Obdobne postupujeme pre pravú vetvu:

$$U_{e2} = -R_4I_1 + R_2I_3 + R_5I_3$$

Riešením tejto sústavy rovníc dostaneme:  $I_1 = 0,096$  A;  $I_2 = -0,384$  A;  $I_3 = 0,288$  A. Číselné hodnoty prúdov 1 a 3 sú kladné, preto ich smery sú v schéme označené správne. Číselná hodnota prúdu 2 je záporná, preto v schéme opravíme jeho smer na opačný. Sústavu rovníc je možné riešiť tiež cez determinant alebo vytvorením programu. Metódami riešenia sa nezaobráame na tomto mieste nakoľko by to bolo nad rámec tejto knihy. Chceli sme predovšetkým poukázať na možnosti využitia Kirchoffových zákonov v praxi, ktoré sú často zložitejšie, keďže skutočné obvody obsahujú aj ďalšie elektrotechnické prvky ako kondenzátory, cievky a pod.

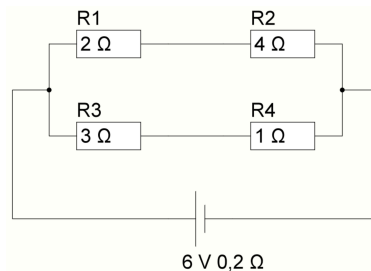
### Pre seminaristov

- Na Obr. 3.25 je schéma zapojenia dvoch zdrojov napätia a rezistora. Vetvou AB prechádza prúd  $I_1$ , vetvou CD prúd  $I_2$  a vetvou EF prúd  $I_3$ . Určte hodnoty, týchto prúdov. [ $I_1 = I_3 = 7,5$  A;  $I_2 = 0$  A]



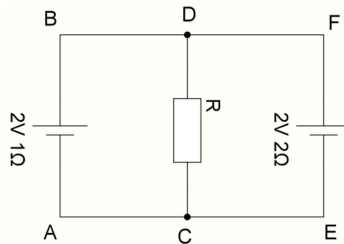
Obr. 3.25: K úlohe 1.

- Štyri rezistory s elektrickými odpormi  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  a  $R_4$  sú zapojené na zdroj napätia podľa schémy na Obr. 3.26. Aký je celkový elektrický odpor zapojených rezistorov? Aké prúdy prechádzajú jednotlivými vetvami? [ $R_v = 2,6$  Ω;  $I = 2,3$  A;  $I_{12} = 0,92$  A;  $I_{34} = 1,38$  A]



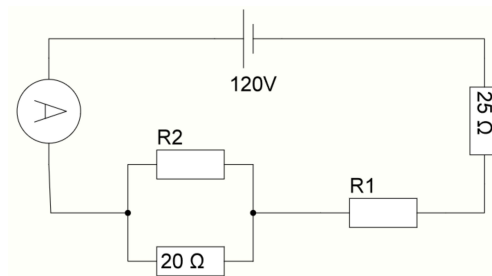
Obr. 3.26: K úlohe 2.

- Na Obr. 3.27 je schéma zapojenia dvoch zdrojov napätia a rezistora. Vypočítajte: a) elektrický odpor rezistora ak vetvou AB prechádza prúd 1 A, b) prúd  $I_1$  prechádzajúci vetvou CD a prúd  $I_2$  vetvou EF. Určte smery týchto prúdov. [ $R = \frac{2}{3}$  Ω;  $I_1 = 1,5$  A;  $I_2 = 0,5$  A]



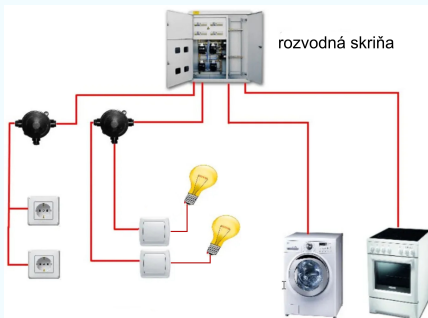
Obr. 3.27: K úlohe 3.

4. Štyri rezistory, zdroj napätia a ampérmetr tvoria obvod na Obr. 3.28. Napätie na rezistore s elektrickým odporom  $R_1$  je 40 V a ampérmetrom prechádza prúd 2 A. Určte elektrický odpor  $R_1$ ,  $R_2$ , prúd prechádzajúci rezistorom  $R_2$ . Vnútorňý odpor zdroja a ampérmetra zanedbajte.



Obr. 3.28: K úlohe 4.

## Fyzika v praxi



Na obrázku je schematicky znázornený privod elektrickej energie k spotrebičom v domácnosti. Jednotlivé prvky

ako zásuvky, spínače, žiarovky a iné spotrebiče sú napojené z rozvodnej skrine navzájom paralelne. V prípade poruchy na jednom mieste, ostatné spotrebiče fungujú naďalej. Na obrázku nižšie (Obr. 3.29) je schéma zapojenia pre jednoizbový byt. Schéma znázorňuje vedenie jednotlivých vodičov k zásuvkám a svetidlám z rozvodnej skrine. Na schéme sú farebne odlišené jednotlivé vodiče, nakoľko v domácnosti používame sústavu so striedavým prúdom. Viac sa o ňom dozviete v knihe *Kmitanie pre gymnáziá*.



### 3.6 Práca a výkon v obvode s konštantným prúdom

Pri elektrostatickom poli už bolo ukázané, že práca, ktorá sa vykoná pri prenesení náboja je:

$$W = UQ$$

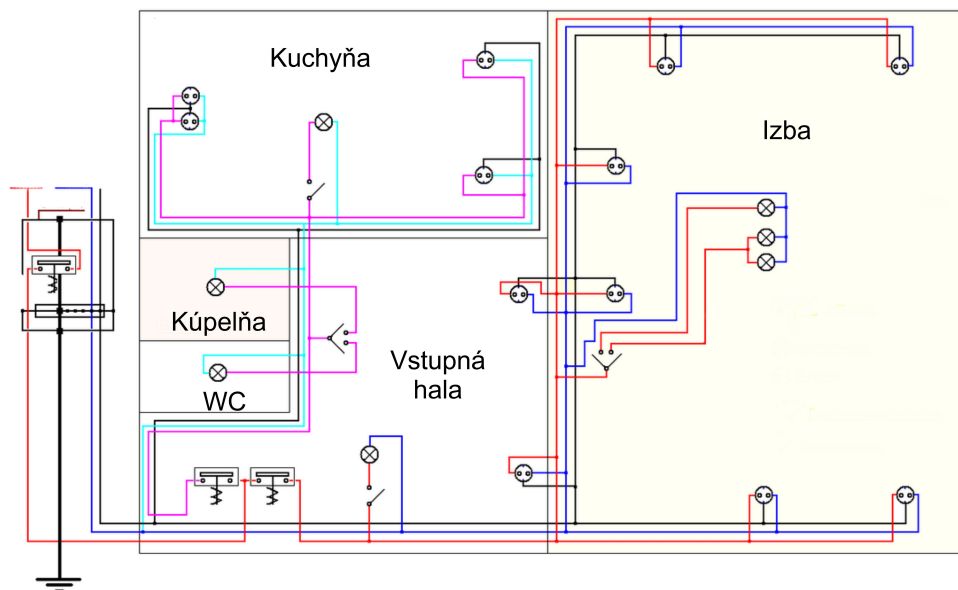
Náboj, ale nevieme merať, preto hľadáme súvis medzi nábojom a veličinami, ktoré vieme dobre v obvode merať. Poznáme súvis medzi prúdom a nábojom. Za náboj teda dosadíme vyjadrenie zo vzťahu 2.1:

$$W = UIt \quad (3.27)$$

Ak vonkajšia časť obvodu má celkový odpor  $R$ , môžeme napätie alebo prúd nahradiť podľa Ohmovho zákona:

$$W = RI^2t = \frac{U^2}{R}t \quad (3.28)$$





**Obr. 3.29:** Schéma elektroinštalácie jednoizbového bytu.

Práca spojená s prenosom častíc vo vonkajšej časti obvodu sa prejaví zahriatím vodiča (Např. nabíjanie mobilnej alebo notebookovej batérie). Mierou zahriatia je tzv. **Joulovo teplo**, pre ktoré platí vzťah:

$$Q = W = UIt = RI^2t = \frac{U^2}{R}t \quad (3.29)$$

V niektorých prípadoch je tento jav nežiadúci a snažíme sa zahrievanie eliminovať (např. chladiče v notebookoch alebo stolových PC), inde naopak vzniknuté teplo využívame, např. v ohrievačoch, fénoch, elektrických rúrach a pod.

S prácou rovnako ako v mechanike súvisí výkon. Teraz sa pozrieme na výkon zdroja. Práca vykonaná vnútri zdroja na prenos náboja je:

$$W_Z = U_e Q = U_e I t = \frac{U_e^2 t}{R + R_i} \quad (3.30)$$

Pre výkon použijeme známy vzťah z mechaniky:

$$P_Z = \frac{W_Z}{t} = U_e I = \frac{U_e^2}{R + R_i} = (R + R_i) I^2 \quad (3.31)$$

Pre výkon konštantného prúdu v obvode budú platiť analogické vzťahy:

$$P = \frac{W}{t} = UI = \frac{U^2}{R} = RI^2 \quad (3.32)$$

V praxi sa práca prúdu meria v kWh. Prevod medzi kWh a J je nasledovný:

$$1 \text{ kWh} = 3600000 \text{ Ws} = 3600000 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ} \quad (3.33)$$

Ako sme ukázali v predchádzajúcich kapitolách a v mechanike, nikdy sa celá práca zdroja nepremení na užitočnú prácu, ale je vždy potrebné rátať s energetickými stratami. Pre účinnosť zdroja elektrického napätia platí:

$$\eta = \frac{W}{W_Z} = \frac{P}{P_Z} = \frac{UIt}{U_e I t} = \frac{R}{R + R_i} \quad (3.34)$$

Tým, že zdroj má svoj vnútorný odpor, nikdy jeho účinnosť nebude 100% podobne ako sme si ukázali pri Carnotovom cykle.

**Príklad 3.7** Za aký čas sa v elektrickom prietokovom ohrievači zohreje voda z vodovodu s teplotou  $10^\circ\text{C}$  na teplotu  $80^\circ\text{C}$ ? Ohrievač má objem 120 l, takže sa v ňom zohrieva voda s hmotnosťou 120 kg. Výkon výhrevného

telesa ohrievača sú 2 kW. Koľko zaplatíte za zohriatie, ak 1 kWh stojí 0,3 €.

**Riešenie:** 120 l vody na ohriatie musí prijať teplo:

$$Q = mc\Delta t = 120 \cdot 4180 \cdot (80 - 10) = 35,1 \text{ MJ}$$

Elektrický varič s výkonom 2 kW dodá vypočítané množstvo energie za čas  $t$ , ktorý vyjadríme zo vzťahu pre výkon:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{Q}{t} \rightarrow t = \frac{Q}{P}$$

$$t = \frac{Q}{P} = \frac{35,1 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^3} = 17556 \text{ s} = 4,9 \text{ h}$$

Ak predpokladáme 100% účinnosť ohrievača, bude 120 l vody ohrievať na 80°C 4,9 hodiny. V skutočnosti nepotrebujeme ohrievať vodu až na tak vysokú teplotu, tá sa v domácnostiach pohybuje v okolí 40°C a tiež

nikdy ohrievače nepracujú so 100% účinnosťou. Cenu za ohrev vypočítame, tak, že najprv musíme potrebnú energiu premeniť na kWh:

$$35,1 \text{ MJ} = 9,75 \text{ kWh}$$

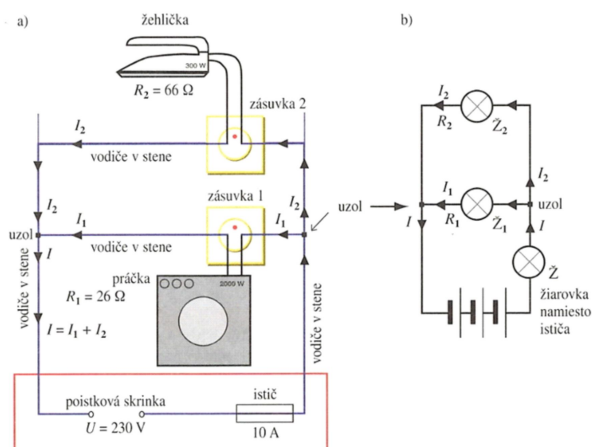
Cena za 9,75 kWh bude:

$$9,75 \cdot 0,3 = 2,92 \text{ eur}$$

Na internete nájdite skutočnú cenu a vypočítajte podľa aktuálneho cenníka. My sme cenu stanovili len ako príklad výpočtu.

## 🌀 Otázky a úlohy 🌀

- Zistíte kedy bude zdroj napätia najúčinnnejší. Navrhните a zostrojте graf.
- Dve žiarovky s príkonmi 45 W a 5 W sú paralelne zapojené na zdroj napätia, ktorým prechádza prúd 3 A. Určte prúd, ktoré prechádzajú žiarovkami. [2,7 A; 0,3 A]
- Na obrázku je príklad elektrickej siete malého bytu. Rozhodnite, či je možné naraz prať aj žehliť. Svoje tvrdenia podoprite výpočtami.



**Obr. 3.30:** Schéma zapojenia elektrospotrebičov k úlohe 3.

- Ponorným varičom s príkonom 625 W sa zohrieva voda s objemom 0,4 l. Do varu sa uvedie za 4 min. Vypočítajte pôvodnú teplotu vody, ak je účinnosť variča 95,2%. [15°C]
- Elektrickým varičom pripojeným na sieť s napätím 220 V prechádza prúd 3 A. Aký je príkon variča? Akú spotrebu elektrickej energie zaznamená elektromer, ak varič bol zapnutý na sieť dve hodiny? Koľko aktuálne zaplatíte za spotrebovanú energiu? [660 W; 1,32 kWh]
- Ako dlho bude svietiť žiarovka pripojená na nabitý akumulátor s napätím 12 V a s kapacitou 80 Ah, ak príkon žiarovky je 40 W? Vnútny odpor zdroja zanedbajte. [24 h]
- Elektrický prietokový ohrievač vody zohreje za minútu 1 l vody z vodovodu z teploty 14°C na teplotu 80°C. Aký je príkon a elektrický odpor výhrevnej špirály ohrievača? [4,6 kW; 10,5 Ω]
- Sušič na vlasy nasáva ventilátorom vzduch z miestnosti a vyfukuje horúci vzduch s teplotou 70°C, ktorý sa zohrieva odporovou 300 W špirálou. Aké množstvo vzduchu v m<sup>3</sup> sa muselo zohriať z 20°C na 70°C a vyfúkať von za 0,5 h? Koľko by ste za spotrebovanú energiu zaplatili? [8330 l]
- Žiarovka je vyrobená na 220 V a 60 W. Koľko potrebuje ampérov? Aký je jej elektrický odpor? [0,27 A; 815 Ω]
- V byte svietime 25 W žiarovkou denne 4 hodiny. Koľko elektrickej energie spotrebujeme za mesiac a koľko za ňu zaplatíme? [3 kWh]
- Koľko hodín môžeme svietiť 50 W žiarovkou, kým sa spotrebuje 1 kWh? [20 h]

### Projekt 3.2 - Elektrická energia a teplo

Vytvorte projekt o súvisi a vzájomnej premene medzi elektrickou a tepelnou energiou, venujte sa nasledovným bodom:

- Joule-Lencov zákon, jeho matematická formulá-

cia

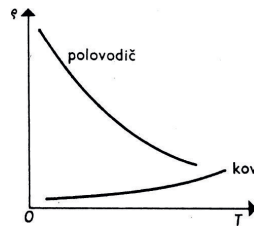
- Využitie Joule-Lencovho zákona v praxi - ohrievače, sušiče, fény, tavné poistky a ďalšie
- Eliminácia Joule-Lencovho zákona v praxi - chladenie, druhy chladičov a pod.

# Vedenie prúdu v polovodičoch

Látky podľa merného elektrického odporu (vodivosti) delíme na:

- **vodiče** -  $\rho = 10^{-7} - 10^{-8} \Omega\text{m}$  (kovy, elektrolyty (roztok NaCl  $10^{-2}\Omega\text{m}$ ))
- **polovodiče** -  $\rho = 10^{-2} - 10^9 \Omega\text{m}$  (Si, Ge, Se, zlúčeniny PbS, CdS, GaAs, hemoglobín, chlorofyl)
- **izolanty** -  $\rho > 10^9 \Omega\text{m}$  (bakelit, sklo, niektoré plasty)

Takéto delenie je však len veľmi hrubým, nakoľko merný elektrický odpor je závislý od teploty a inak sa správa u polovodičov a inak u kovov. Rozdiel v teplotnej závislosti merného elektrického odporu je zobrazený na Obr. 4.1. V učitom teplotnom intervale merný elektrický odpor polovodičov výrazne klesá, kým u kovov s teplotou narastá. U kovov ako sme si ukázali sa s rastúcou teplotou zvyšuje počet zrážok elektrónov s iónmi mriežky. V polovodičoch je to naopak, so zvyšujúcou sa teplotou narastá počet voľných nosičov náboja. Viac tento jav rozoberieme v nasledujúcej podkapitole.

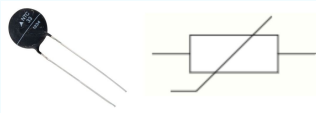


Obr. 4.1: Schéma zapojenia elektrospotrebičov k úlohe 3.

## Definícia 4.1 (Polovodič)

látka, ktorá za určitých podmienok vedie elektrický prúd. V určitých medziach pôsobením nejakého fyzikálneho faktora napr. svetla, tepla a pod. ich elektrická vodivosť narastá.

## Fyzika v praxi



Polovodičová súčiastka, ktorá sa označuje ako **termistor** využíva teplotnú závislosť merného elektrického odporu

od teploty  $\rho(t)$ . Táto závislosť sa najprv určí experimentálne, čo sa označuje ako **kalibrácia**. Následne táto súčiastka mení svoj odpor s teplotou, čo umožňuje teplotu merať. Využíva sa všade, kde je potrebná kontrola teploty napr. v autách, počítačoch a pod.

## Definícia 4.2 (Termistor)

pasívna elektronická súčiastka, ktorej elektrický odpor závisí od teploty. Termistory sa líšia od odporových snímačov teploty, ktoré sú zložené z čistých kovov, zatiaľ čo termistory sú konštruované na báze polovodičov.

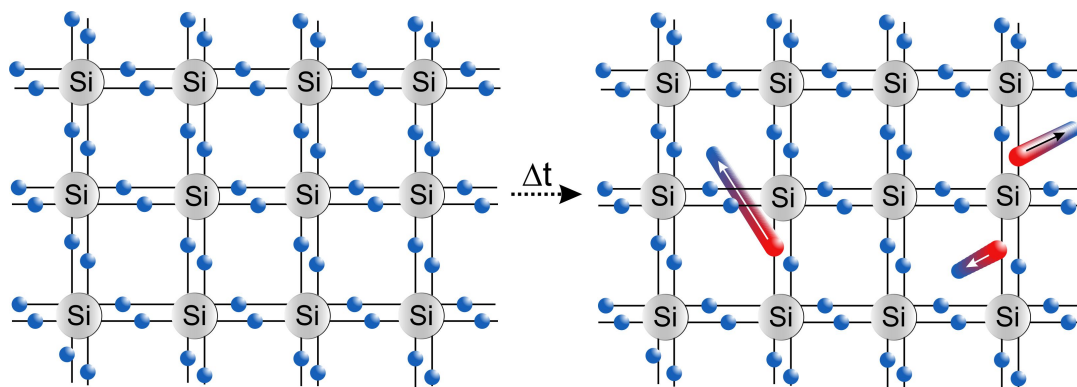
Polovodiče delíme na dve veľké skupiny - **vlastné** a **nevlastné** polovodiče.

## Vlastné polovodiče

### Definícia 4.3 (Vlastný polovodič)

sú napr. prvky Si a Ge, ktoré neobsahujú žiadne iné atómy. Chemicky čisté vlastné polovodiče nemajú voľné elektróny a preto sa pri izbovej teplote správajú ako izolant. Pri vyšších teplotách sa začínajú uvoľňovať elektróny z väzieb, ktoré spôsobujú zvyšovanie vodivosti Obr. 4.2.

Typickými predstaviteľmi vlastných polovodičov sú Si a Ge. Deje, ktoré vo vlastných polovodičoch nastávajú si ukážeme na príklade kremíka. Kremík má jednotlivé elektrónové vrstvy (orbitály), obsadené nasledovne: Si:  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$ . Vo valenčnej vrstve (najvrchnejšej, navzdialenejšej od jadra) 4 elektróny, ktoré môže využiť na tvorbu väzieb.



**Obr. 4.2:** Schematické znázornenie väzieb v kremíku a deje pri zvýšenej teplote. Elektróny sú vyznačené modrou, vzniknuté diery červenou.

Pokiaľ sa kremík viaže s ďalšími atómami kremíka, každý z atómov sa snaží naplniť **oktetové pravidlo** - chce mať spolu 8 elektrónov, preto v mriežke tvorí 4 väzby s ďalšími atómami Obr. 4.2. V chemicky čistom kremíku sa teda nanachádzajú voľné elektróny, všetky elektróny sú vo väzbách. Kremík sa teda pri nízkych teplotách správa ako **izolant**.

Zvyšovaním teploty narastajú kmity mriežky a niektoré elektróny sa vzniknutými kmitmi uvoľnia z väzieb. V takom stave kremík obsahuje voľné elektróny a začína sa správať ako **vodič**. Pri zvýšenej teplote v polovodiči nastávajú deje:

- **generácia** - vznik páru elektrón + diera (voľné, neobsadené miesto elektrónom v mriežke)
- **rekombinácia** - zánik páru elektrón + diera (elektrón sa vráti do prázdneho miesta - diery)

Dierou v polovodiči označujeme miesto, ktoré vznikne uvoľnením elektrónu. Toto miesto má kladný náboj, nakoľko z elektroneutralnej väzby bol odobratý elektrón. Diery v polovodičoch konajú len **zdanlivý pohyb**. Častice, ktoré sa môžu uvoľniť a voľne pohybovať sú elektróny. Ďalším zahrievaním sa počet uvoľnených elektrónov môže v určitých medziach zvyšovať. V určitých preto, lebo nie je možné zahrievať polovodič do nekonečna a tak nekonečne zvyšovať jeho vodivosť. Hustota voľných elektrónov a dier v čistom kremíku je  $\rho_{diery} = \rho_e = 6,8 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$ . Opísaný jav označujeme ako **vlastná vodivosť** a príslušné materiály ako **vlastné polovodiče**.

Na príklade kremíka sme si ukázali, že elektrický odpor je možné meniť pomocou teploty. Už sme spomenuli, že elektrickú vodivosť je možné meniť aj pomocou svetla. Jav, kde sa mení vodivosť pomocou svetla označujeme ako **fotoelektrická vodivosť**. Za ňou stojí **fotoelektrický jav**, ktorý viac rozoberieme v Jadrovej a kvantovej fyzike pre gymnáziá.

## Nevlastné polovodiče

### Definícia 4.4 (Nevlastný polovodič)

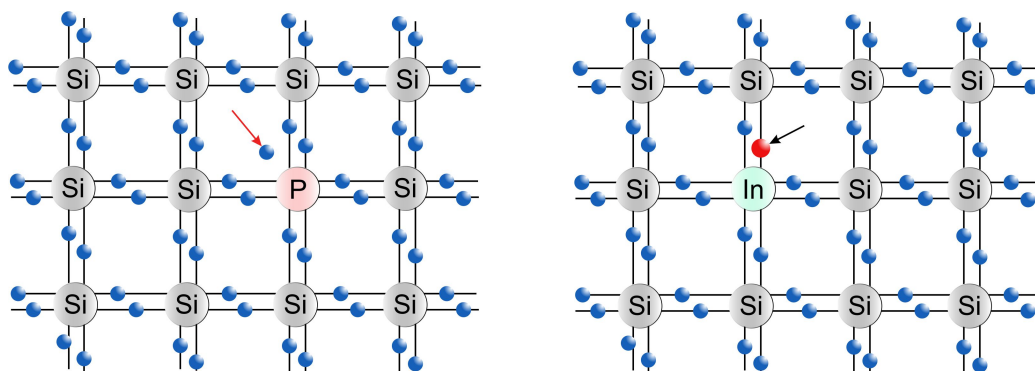
sú polovodiče napr. prvky Si a Ge, ktoré obsahujú **prímiesné atómy (prímiesy)**.



Vlastnosti polovodičov výrazne závisia od prímiesí. Znečistenie kremíka tak, že na sto miliónov atómov pripadá jediný atóm prímiesi výrazne ovplyvní jeho elektrické vlastnosti. Ako príklad vezmeme atómy z vedľajších skupín PSP. Kremík sa nachádza v 14. skupine PSP. Do kremíka možno primiešať atómy 15. skupiny PSP ako P, As, Sb alebo Bi. Tieto atómy majú 5 valenčný elektrónov, teda o jeden viac ako atómy kremíka. V mriežke kremíka sa teda tieto atómy s atómami kremíka viažu 4 elektrónmi, pričom jeden elektrón ostane voľný (Obr. 4.3). Tieto voľné elektróny prímiesových atómov spôsobujú vodivosť už pri nízkych teplotách. Nakoľko v takomto polovodiči prevládajú nosiče záporného elektrického náboja (elektróny) označujú sa ako **polovodiče typu N**, z angl. negative = záporný.

Ak do mriežky kremíka primiešame prvky z 13. skupiny PSP ako B, Al, Ga alebo In bude v polovodiči prítomných voac dier. Atómy 13. skupiny PSP majú na valenčnej vrstve len 3 elektróny, teda budú sa viazať len s tromi atómami kremíka a jedna väzba ostane bez elektrónu - s dierou (Obr. 4.3). V takýchto polovodičoch prevládajú diery nad elektrónmi, pričom diery nesú kladný náboj, preto sa takéto polovodiče označujú ako **polovodiče typu P** z angl. positive = pozitívny, kladný. Vodivosť polovodičov spôsobená prímiesnými atómami sa označuje ako **nevlastná** a polovodiče ako **nevlastné**.

polovodiče. Sumárne vlastnosti sú zhrnuté v tabuľke.



polovodič typu N

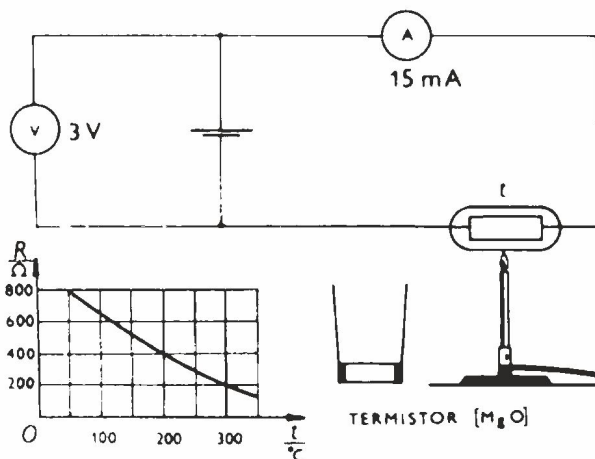
polovodič typu P

Obr. 4.3: Schematické znázornenie nevlastných polovodičov typu N a typu P.

Polovodič	TYPU N (negative)	TYPU P (positive)
<b>vodivosť</b>	elektrónová	dierová
<b>majoritné náboje</b>	elektróny	dieri
<b>minoritné náboje</b>	dieri	elektróny
<b>prímesové atómy</b>	15. sk PSP (donory)	13. sk. PSP (akceptory)

### 🌊 Otázky a úlohy 🌊

1. Termistor zapojený do elektrického obvodu podľa obrázku, zahrievame plameňom plynového kahana. Akú teplotu má termistor, keď údaj na voltmetri je 3 V a na ampérmetri 15 mA? Graf na obrázku znázorňuje závislosť odporu termistora od teploty.



Obr. 4.4: K úlohe 1.

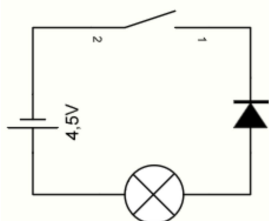
2. Z uvedených materiálov vyberte polovodiče typu P: 1) Si s prímiesou P, 2) Ge s prímiesou Ga, 3) P s prímiesou Si, 4) Cu s prímiesou In, 5) Si s prímiesou In, 6) Se s prímiesou Bi.
3. Z uvedených materiálov vyberte polovodiče typu N: 1) Si s prímiesou Fe, 2) Ge s prímiesou Sn, 3) As s prímiesou Ge, 4) Si s prímiesou In, 5) Si s prímiesou Sb, 6) Ge s prímiesou Bi.

## 4.1 Javy na rozhraní dvoch polovodičov typu P a N (diódový a tranzistorový jav)

Diódový a tranzistorový jav patria k jedným z najdôležitejších javov v polovodičoch. Tieto javy prebiehajú na rozhraní dvoch polovodičov typu P a typu N (tzv. **PN prechod**). Zariadenie, v ktorom sa nachádza jeden PN prechod nazývame **polovodičovou diódou**. Tento prechod má schopnosť prepúšťať prúd iba jedným smerom o čom sa presvedčíme jednoduchým experimentom:

### Experiment 4.1 - Prepúšťanie prúdu diódou

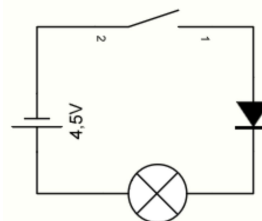
Zostavte obvod podľa schémy na obr. 4.5.



Obr. 4.5: Zapojenie diódy v priepustnom smere.

Po zopnutí spínača sa žiarovka rozsvieti, dióda je zapojená v **priepustnom smere**. To, že dióda neprepúšťa prúd v opačnom smere overíme, tak, že diódu v obvode

zapojíme opačne ako na Obr 4.6.

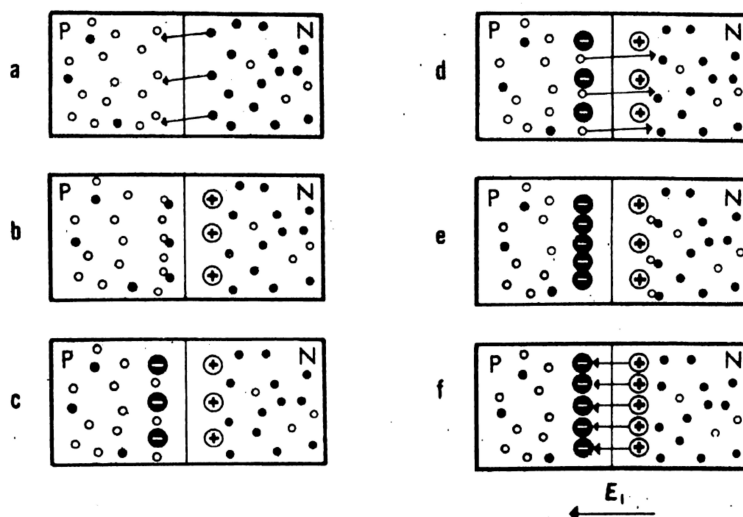


Obr. 4.6: Zapojenie diódy v nepriepustnom smere.

Po zopnutí spínača nepozorujeme žiadne zmeny v obvode, žiarovka nebude svietiť. Vysvetlenie javov, ktoré v dióde prebiehajú si ukážeme v nasledovnom texte.

### 4.1.1 Vznik PN prechodu

Skutočná dióda je vyrobená z jedného kusu polovodiča, nie je to len mechanické spojenie dvoch polovodičov. Pri spojení polovodiča typu P a typu N vzniká **difúzia** voľných elektrónov z polovodiča typu N do polovodiča typu P a difúzia dier z polovodiča P do polovodiča N.



Obr. 4.7: Javy pri vytváraní PN prechodu.<sup>1</sup>

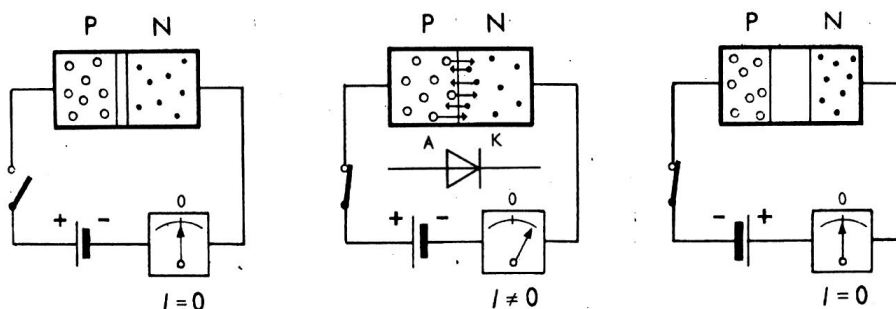
<sup>1</sup> Prevzaté z učebnice M. Bednařík a kol.: Fyzika pre 2. ročník gymnázií, Bratislava SPN 1993. ISBN 80-08-02100-4.

Pri difúzii elektrónov z polovodiča N do P (obr. 4.7 a), ostanú v polovodiči N nevykompenzované kladné ióny donorov (obr. 4.7 b), v časti P voľné elektróny sa rýchlo rekombinujú s dierami a ostanú v blízkosti rozhrania nevykompenzované záporné náboje akceptorov (obr. 4.7 c). Analogicky prebieha dej pri difúzii dier z polovodiča P do N (obr. 4.7 d). V okolí rozhrania zostávajú v polovodiči typu P nevykompenzované záporné ióny akceptorov (obr. 4.7 e) a v čast N nevykompenzované ióny donorov (obr. 4.7 f).



V dôsledku difúzie sa vytvorí na rozhraní PN prechod, ktorý tvorí **elektrickú dvojvrstvu s opačne nabitými iónmi**. Vzniknuté elektrické pole v PN prechode (obr. 4.7 f) zabraňuje ďalšej difúzii. Pri veľkosti intenzity rádovo  $10^5 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$  nastáva v PN prechode rovnovážny stav. Vnútri prechodu sa takmer nenachádzajú voľné častice s nábojom, čo spôsobuje veľký elektrický odpor diódy.

### 4.1.2 Diódový jav

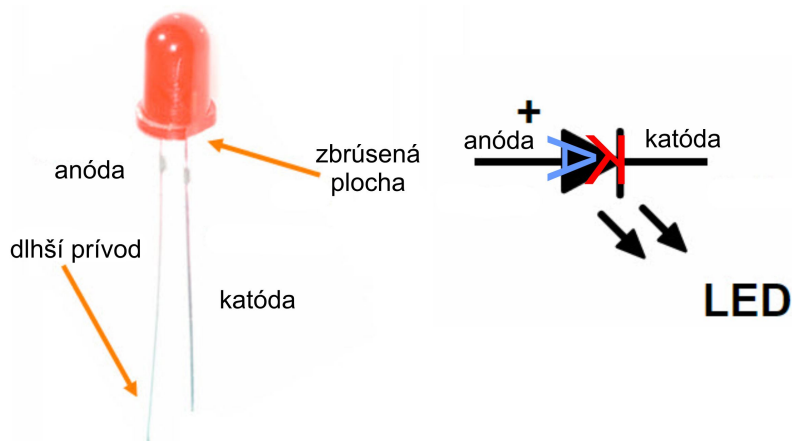


**Obr. 4.8:** Zapojenie diódy v priepustnom a nepriepustnom smere so znázornením prechodu PN.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Prevzaté z učebnice M. Bednařík a kol.: Fyzika pre 2. ročník gymnázií, Bratislava SPN 1993. ISBN 80-08-02100-4.

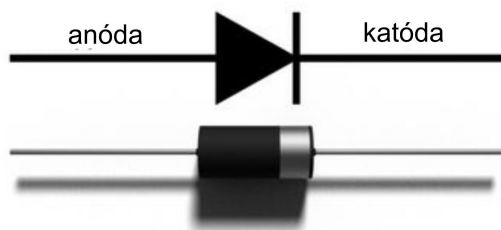
V experimente 4.1 ste najprv kladnú svorku zdroja napojili na polovodič typu P a zápornú svorku na polovodič typu N (obr. 4.5 a obr. 4.8). V tomto prípade dochádza k zoslabeniu elektrického poľa prechodu, elektrickým poľom zdroja. Kladné náboje zo zdroja "tlačia" (odpuďujú) kladné diery v smere do N polovodiča. Záporné náboje svorky zdroja zas odpuďujú záporne nabité ióny v polovodiči N v smere do polovodiča P. Dochádza k porušeniu rovnováhy, do oblasti prechodu PN difundujú diery a elektróny zo vzdialenejších oblastí, PN prechod sa zmenšuje. Elektrickým obvodom v tomto prípade prechádza prúd. PN prechod je teda zapojený v **priepustnom smere** a tečúci prúd označujeme ako **priepustný**.

V prípade zámene polarity zdroja (alebo zapojenia diódy)(obr. 4.6 a obr. 4.8) sa zväčší intenzita elektrického poľa PN prechodu, častice sa pohybujú od rozhrania, rozhranie sa zväčšuje. Kladne nabité ióny sú priťahované záporným pólom zdroja a záporne ióny v polovodiči N sú priťahované kladným pólom zdroja. PN prechodom prechádza iba veľmi malý prúd, PN prechod je zapojený v **závernom smere** a prechádza ním **záverný prúd**.



**Obr. 4.9:** Na LED diódach sa polovodiče typu P znázorňujú dlhším vývodom a polovodiče typu N, zbrúsenou bočnou časťou do rovnej plochy.

Zapojenie diódy v obvode je veľmi dôležité preto sa kontakty označujú technickými prvkami ako napr. zafarbením, dlhším vedením do jedného z polovodičov a pod. (obr. 4.9). Polovodič typu P sa tiež označuje ako anóda, nakoľko ako nositeľ kladného náboja priťahuje anióny (časť značky, ktorá pripomína ležiace písmeno A, obr. 4.9) a polovodič typu N sa označuje ako katóda, keďže ako nositeľ záporného náboja priťahuje kationy (časť značky, ktorá pripomína obrátené písmeno K, obr. 4.9).



**Obr. 4.10:** U polovodičových diód je polovodič typu N označený prúžkom podľa zvislej časti značky, ktorá sa kreslí na stranu katódy, teda polovodiča typu N.

#### Projekt 4.1 - Využitie diódového javu

Opíšte oblasti a uveďte konkrétne príklady využitia diódového javu:

- jednocestný usmerňovač - uveďte schému zapojenia a vysvetlite princíp jeho činnosti, uveďte konkrétne príklady použitia
- dvojcestný usmerňovač s filtrom - uveďte schému

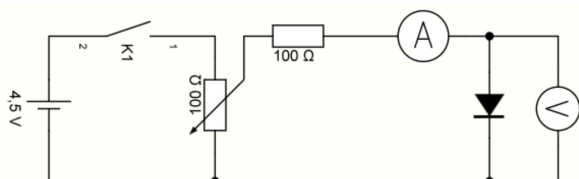
zapojenia, princíp jeho činnosti a príklady použitia v praxi

- opíšte princíp činnosti tzv. Graetzovho mostíka a uveďte schému jeho zapojenia
- porovnajte a vysvetlite rozdiely medzi polovodičovými a elektrónkovými usmerňovačmi

#### Experiment 4.2 - Voltampérová charakteristika polovodičovej diódy

Usmerňovací účinok polovodičovej diódy vystihuje tzv. voltampérová charakteristika, čo je závislosť prúdu od napätia. Keďže ako sme si ukázali, dióda môže byť zapojená v priepustnom alebo závernom smere, meranie realizujeme zvlášť pre zapojenie v priepustnom smere a zvlášť pre zapojenie v závernom smere.

Z diódy odčítajte hodnoty **maximálneho povoleného prúdu** a **maximálneho záverného napätia**. **Dbajte, aby ste tieto hodnoty počas merania neprekročili! Môžete totiž trvalo zničiť diódu!** Najprv odmerajte závislosť prúdu od napätia diódy pre priepustný smer. Na toto meranie zostavte elektrický obvod podľa obr. 4.11.

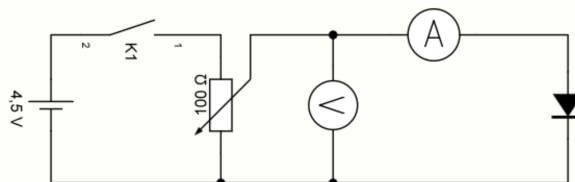


**Obr. 4.11:** Schéma obvodu pre meranie voltampérovej charakteristiky polovodičovej diódy v priepustnom smere.

Posuvný kontakt potenciometra nastavte do polohy zodpovedajúcej nulovému napätiu na dióde. Na ampérmetri nastavte maximálny rozsah, rozsah voltmetra prispôbte napätiu zdroja. Po kontrole zapojenia zapnite zdroj a prispôbte rozsahy prístrojov meraným hod-

notám prúdu a napätia. Posuvným kontaktom potenciometra zvyšujte postupne prúd prechádzajúci diódou a pri každej polohe kontaktu potenciometra odčítajte údaje meracích prístrojov a zapíšte ich do tabuľky. **Neprekročte maximálny povolený prúd!** Po meraní, potenciometrom zmenšite napätie na dióde a odpojte zdroj napätia.

V druhej časti, zapojte diódu v závernom smere podľa obr. 4.12, pričom zdroj nechajte vypnutý.



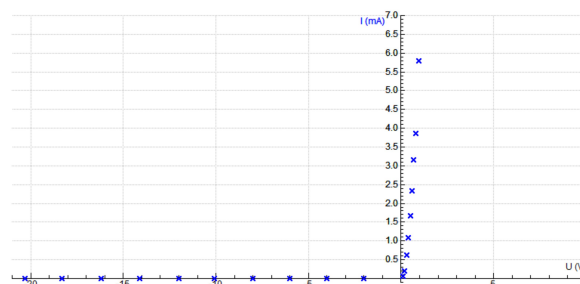
**Obr. 4.12:** Schéma obvodu pre meranie voltampérovej charakteristiky polovodičovej diódy v závernom smere.

Nastavte maximálny rozsah ampérmetra. Rozsah voltmetra prispôbte **dovolenému napätiu na dióde**. Posuvný kontakt potenciometra nastavte do polohy zodpovedajúcej nulovému napätiu na dióde. Zapnite zdroj a posuvným kontaktom potenciometra opatrne nastavte napätie a prúd na dióde. Rozsahy meracích prístrojov prispôbte meraným hodnotám prúdu a napätia. Potenciometrom zvyšujte postupne napätie na dióde a pri každej polohe posuvného kontaktu potenciometra odčítajte údaje na meracích prístrojoch a zapíšte ich do tabuľky.

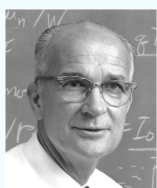
**Neprekročte maximálne dovolené záverné napätie**

**diódy!** Potenciometrom znížte napätie na dióde, vypnite spínač a odpojte zdroj napätia. Z nameraných hodnôt zostrojte graf závislosti prúdu od napätia (voltampérovú charakteristiku) tak, že hodnotám prúdu a napätia pre záverný smer formálne priradíte záporné znamienka. Získaná závislosť je na obr. 4.13. Pri zapojení diódy v priepustnom smere, pomerne malými napätiami zdroja dosahujeme vysoké prúdy tečúce diódou. V závernom smere naopak, aj pri pomerne vysokých napätiah je prúd rádovo  $\mu\text{A}$ . Výsledok merania je v súlade s naším

skorším experimentom 4.1 a diódovým javom.



Obr. 4.13: Výsledky merania pre germániovú diódu spracované v programe Coach 6.

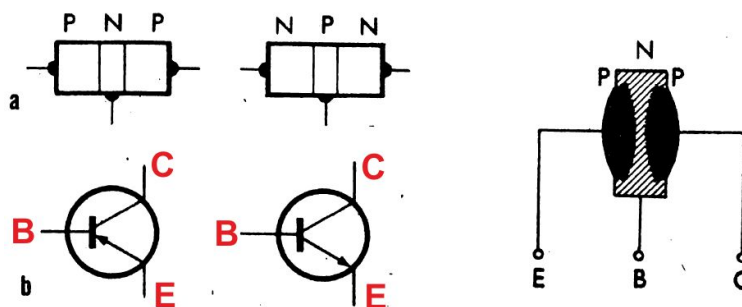
**William Bradford Shockley**

\*1910 - †1989

Bol americký fyzik a vynálezca. Pracoval ako manažér výskumného tímu v Bellových laboratóriách, ktorý zahŕňal aj J. Bardeena a W. Brattaina. Všetci traja získali spoločne Nobelovú cenu za ich prelomové výskumy v oblasti polovodičov. Shockley vytvoril podrobnú teóriu PN prechodu v kryštáli germánia a experimentálne bola potvrdená schopnosť usmerňovania. Medzi Shockleyho alma mater patrí Caltech a MIT. Na druhej strane je neslávne známy kvôli svojim extrémistickým názorom v oblasti eugeniky.

**4.1.3 Tranzistorový jav**

Tranzistor je významná súčiastka pre prax. Ide o elektrotechnický polovodičový prvok s dvomi prechodmi PN. Technické usporiadanie s elektrotechnickými značkami sú na obr. 4.14. Jednotlivé polovodiče, z ktorých sa tranzistor skladá označujeme ako **báza** B (v značke je naznačená rovnou hrubšou čiarou), **kolektor** C (v značke ho tvorí čiara napojená na bázu) a **emitor** E (v značke sa označuje šípkou, pre PNP tranzistor smeruje na bázu, pre NPN smeruje von z bázy).



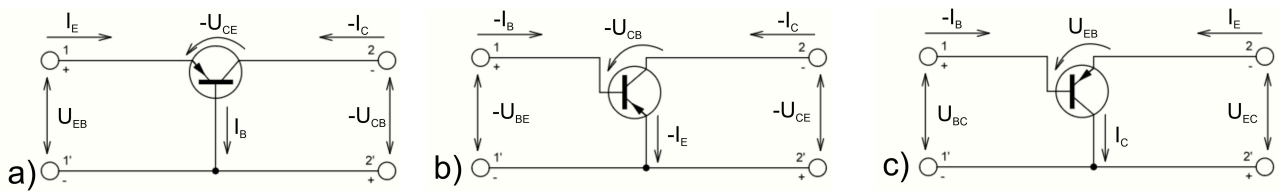
Obr. 4.14: a) Schéma usporiadania tranzistorov PNP a NPN s b) ich elektrotechnickými značkami. Vpravo technická konštrukcia tranzistora.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Prevzaté z učebnice M. Bednařík a kol.: Fyzika pre 2. ročník gymnázií, Bratislava SPN 1993. ISBN 80-08-02100-4.

Tranzistor je z hľadiska obvodových veličín prvkom, ktorého jedna elektróda je zvyčajne spoločná vstupnému aj výstupnému obvodu. V závislosti na spoločnej elektróde sa rozoznávajú tri základné zapojenia tranzistora:

- so spoločnou bázou (SB),
- so spoločným emitorom (SE),
- so spoločným kolektorom (SC).

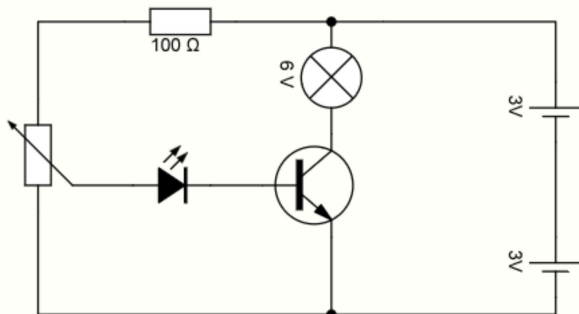
Pre polarizáciu, ktorá zodpovedá tzv. **aktívnej oblasti**, kedy jeden z prechodov je zapojený v priepustnom smere a druhý v závernom, sú základné zapojenia tranzistora zobrazené na obr. 4.15:



Obr. 4.15: Schémy zapojenia tranzistora so a) spoločnou bázou, b) emitorom a c) kolektorom.

### Experiment 4.3 - NPN a PNP zosilovač

Zostavte obvod podľa obr. 4.16. Prechod NP kolektor-báza je zapojený v závernom smere. Napätie  $U_{CB}$  je zapojené kladnou svorkou na kolektor a zápornou na bázu. Odpor tohto prechodu je pomerne veľký. Pri rozpojenom emitorovom prechode tečie prechodom kolektor-báza malý záverný prúd.

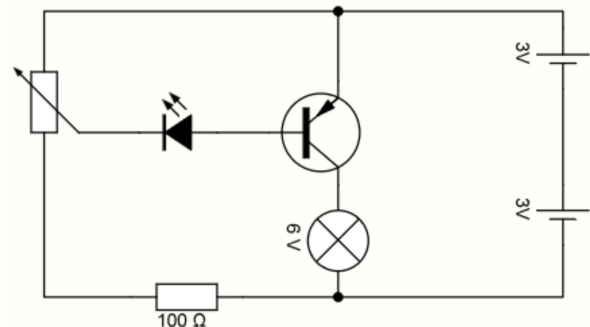


Obr. 4.16: Schéma obvodu zapojenia tranzistora NPN so spoločnou bázou.

Prechod báza-emitor je zapojený v prechodnom smere. Báza je napojená na kladnú svorku a emitor na zápornú. Odpor tohto prechodu je malý a pri rozpojenom kolektorovom prechode tečie cez prechod váza emitor pomerne vysoký prúd  $I_E$  v priepustnom smere. Pomocou potenciometra postupne zvyšujte hodnotu odporu. V prípade, že sa LED dióda jasne rozsvieti, žiarovka sa tiež rozsvieti. Pri pripojení oboch prechodov na jednosmerné napätia, ktoré polarizujú kolektorový prechod v závernom smere a emitorový v priepustnom, potom v tranzistore typu NPN, prechádzajú elektróny z emitora do bázy typu P a postupujú ďalej úzkou bázou pomocou difúzie do kolektora. V kolektorovom obvode sa prejaví **tranzistorový jav**, ktorý vzniká difúziou elektrónov z emitora až na záverne polarizovaný kolektorový prechod. (Obr. 4.18).

Na podobnom princípe funguje tranzistor PNP. Zostavte obvod podľa obr. 4.17. Emitorový prechod je zapojený v priepustnom smere a kolektorový v závernom smere. Emitor je pripojený na kladnú svorku zdroja a báza na zápornú. Odpor v tomto prechode je malý a môže ním pretekať pomerne veľký prúd. Kolek-

tor je pripojený na zápornú svorku zdroja. Prechod báza-kolektor má pomerne veľký odpor a preteká ním malý záverný prúd. Pri zväčšovaní odporu potenciometrom sa LED dióda bude rozjasňovať a s ňou aj žiarovka. Diery z emitora difundujú až do kolektora.

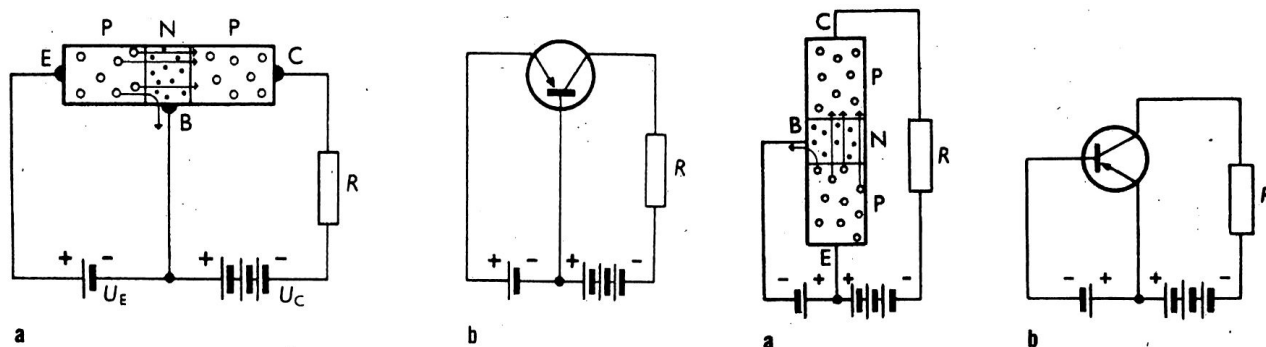


Obr. 4.17: Schéma zapojenia PNP tranzistora so spoločnou bázou.

Prúd emitora je tvorený jednak dierami, ktoré prechádzajú cez prechod v smere emitor-báza a jednak elektrónmi, ktoré postupujú v opačnom smere z bázy do emitora. Určitá časť dier vystupujúcich z emitora sa v oblasti bázy rekombinuje s elektrónmi, preto kolektorový prúd  $I_C$  je menší ako prúd  $I_E$ . Pomer hodnôt obidvoch prúdov pri nulovom kolektorovom napätí  $U_{CB}$  sa v zapojení SB označuje  $\alpha_B$  a nazýva sa statický prúdový zosilňovací koeficient nakrátko:

$$\alpha_B = \frac{I_C}{I_E} \quad (4.1)$$

Vzhľadom k tomu, že množstvo dier, ktoré prechádzajú na kolektor, závisí iba na prúde emitora, dá sa zväčšením záverného napätia  $U_{CB}$  zväčšiť odpor kolektorového obvodu až na  $10^6 \Omega$ . To umožňuje zaradiť do výstupného obvodu veľký zafazujúci odpor bez toho, aby sa podstatne zmenila veľkosť kolektorového prúdu. Pritom emitorový prechod, ktorý je polarizovaný v priepustnom smere, má odpor malý rádovo  $10 \Omega$ . Zo zafazovacieho odporu v kolektorovom obvode sa odoberá veľké napätie pri malom vstupnom napätí. Tomu odpovedá značné napäťové zosilnenie tranzistora. V praxi sa však najčastejšie používa zapojenie so spoločným emitorom.



**Obr. 4.18:** Schéma zapojenia a vysvetlenia tranzistorového javu pre zapojenie tranzistora so spoločnou bázou vľavo a spoločným emitorom vpravo.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Prevzaté z učebnice M. Bednařík a kol.: Fyzika pre 2. ročník gymnázií, Bratislava SPN 1993. ISBN 80-08-02100-4.

### John Bardeen



\*1908 - †1991

Bol americký fyzik a inžinier. Ako jediný bol ocenený Nobelovou cenou dvakrát. Prvú získal spolu s W. B. Shockleyom a W. H. Brattainom za objav tranzistorového javu a druhýkrát spolu s L. N. Cooperom a J. R. Schreifferom za teóriu konvenčnej supravodivosti známej ako BCS teória.



### Walter Houser Brattain



\*1902 - †1987

Bol americký fyzik pracujúci v Bellových laboratóriách, vanálezca tranzistorového javu spolu s W. B. Shockleyom a J. Bardeenom. Väčšinu svojho výskumu venoval povrchovým javom na pevných látkach. Počas druhej svetovej vojny pracoval v skupine vedcov, ktorej sa podarilo vyvinúť magnetometer, ktorý súžil na detekciu ponoriek.



## Zosilňovač

### Definícia 4.5 (Zosilňovač)

Vo všeobecnosti sa dá za zosilňovač považovať aktívny nelineárny štvorpól, tvorený zosilňovacím prvkom (elektrónkou, tranzistorom), pomocnými obvodmi pre nastavenie, príp. stabilizáciu polohy pracovného bodu a záťažou, prejavujúcej sa na výstupných svorkách zosilňovacieho prvku ako účinná záťaž.

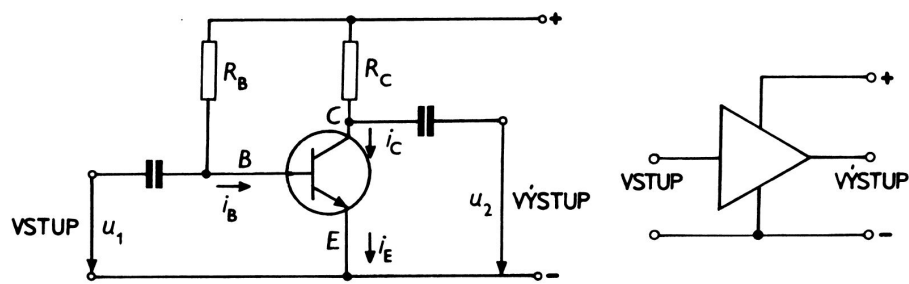


### Definícia 4.6 (Štvorpól)

časť elektrického obvodu, ktorá je s okolím spojená štyrmi svorkami.



- vstup a výstup sú oddelené kondenzátormi, pre zosilnenie napätia predstavujú malú impedanciu, pre jednosmerný prúd je obvod prerušený → zabezpečená činnosť tranzistora
- súčasť zosilňovačov (zosilňovače - niekoľko takýchto zapojení)
- integrované obvody - súčasť čipov, operačných pamätí



**Obr. 4.19:** Technická realizácia a schematická značka zosilňovača.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Prevzaté z učebnice M. Bednařík a kol.: Fyzika pre 2. ročník gymnázií, Bratislava SPN 1993. ISBN 80-08-02100-4.

## História verzií

Prvú publikáciu sme vydali v rámci projektu Využívajte energiu ekologicky v roku 2022.

---

### **Zdroje** *Použitá a odporúčaná literatúra*

- ① M. BEDNAŘÍK a kol.: Fyzika pre 2. ročník gymnázií: Elektrické pole, elektrický prúd. 1. vyd. Bratislava: SPN, 1993. 155 s. ISBN 80-08-02100-4
- ② J. DEGRO: Enviromentálne vzdelávanie vo vyučovaní fyziky. Košice: UPIŠ, 2006. 26s. ISBN 80-7097-627-6