

# Demonstracijski pokusi u nastavi fizike

---

Unetić, Dora

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:014005>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-13**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

Dora Unetić

DEMONSTRACIJSKI POKUSI U NASTAVI  
FIZIKE: UVOD U ELEKTRICITET

Diplomski rad

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ  
FIZIKA; SMJER NASTAVNIČKI

**Dora Unetić**

Diplomski rad

**DEMONSTRACIJSKI POKUSI U  
NASTAVI FIZIKE: UVOD U  
ELEKTRICITET**

Voditelj diplomskog rada: doc. dr. sc. Dalibor Paar

Ocjena diplomskog rada: \_\_\_\_\_

Povjerenstvo: 1. \_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

Datum polaganja: \_\_\_\_\_

Zagreb, 2018.

Zahvaljujem se svojim roditeljima Mariji i Marijanu na beskrajno pruženoj ljubavi, potpori i strpljenju.

Zahvaljujem se svojoj teti Mladenki i tetku Stipi koju su mi pružili svoj dom.

Zahvaljujem se svom djedu Ivanu na pomoći pri izradi pokusa.

Zahvaljujem se svom bratu Ivanu i svojim prijateljima Petru i Marku na savjetima i potpori tijekom studiranja.

Zahvaljujem se svom mentoru na vođenju i pomoći tijekom pisanja ovog rada.

## Sažetak

Ovaj rad se bavi problematikom nastave fizike diskutirajući probleme u savladavanju sadržaja iz područja elektriciteta. U njemu su predstavljene suvremene metode kojima bi se mogla unaprijediti nastava u tom području. Obradeno je osam demonstracijskih pokusa. Njihova je svrha prikazati zanimljivu primjenu fizikalnih pojava, pobuditi znatiželju i potaknuti učenike na promišljanje. Svi pokusi su složeni od predmeta iz kućanstva i njihova izvedba nije zahtjevna. Oni se osim u svrhu demonstriranja fizikalnih pojava mogu upotrijebiti u okviru suvremene, istraživački orijentirane nastave. Učenike treba poticati da postavljaju pitanja i sami osmišljavaju načine na koje da traže odgovore.

**Ključne riječi:** Suvremena nastava fizike, demonstracijski pokusi, elektricitet.

# Modern methods in physics teaching: Introduction to electricity

Dora Unetić

## **Abstract**

This thesis discusses some problems which may occur when teaching physics, specifically in the field of electricity. It presents modern methods that could be used to improve teaching in this field, and help students overcome any issues they might face. Eight demonstration experiments were analyzed. These experiments, simple and not demanding to make, were conducted using some household items. The purpose of these experiments was to show the interesting application of physical phenomena, stimulate curiosity and encourage students to think.

**Keywords:** Modern physics education, demonstration experiments, electricity.

# Sadržaj

|          |                                                                 |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>UVOD</b>                                                     | <b>1</b>  |
| 1.1      | Putevi za učenje elektriciteta . . . . .                        | 1         |
| 1.2      | Pretpostavke o učenju znanosti . . . . .                        | 2         |
| 1.3      | Razvoj modela . . . . .                                         | 2         |
| 1.3.1    | Fenomenološki dio . . . . .                                     | 2         |
| 1.3.2    | Konceptualni dio . . . . .                                      | 3         |
| 1.3.3    | Mikroskopski dio . . . . .                                      | 3         |
| 1.3.4    | Kvantitativni dio . . . . .                                     | 3         |
| <b>2</b> | <b>ELEKTRIČNA SILA I ELEKTRIČNOPOLJE</b>                        | <b>5</b>  |
| 2.1      | Porijeklo elektriciteta . . . . .                               | 5         |
| 2.2      | Električna sila . . . . .                                       | 5         |
| 2.3      | Vodiči i izolatori . . . . .                                    | 6         |
| 2.4      | Influencija . . . . .                                           | 8         |
| 2.5      | Coulombov zakon . . . . .                                       | 8         |
| 2.6      | Električno polje . . . . .                                      | 9         |
| 2.7      | Električno polje unutar vodiča . . . . .                        | 10        |
| 2.8      | Gaussov zakon . . . . .                                         | 11        |
| <b>3</b> | <b>ELEKTRIČNA POTENCIJALNA ENERGIJA I ELEKTRIČNI POTENCIJAL</b> | <b>14</b> |
| 3.1      | Potencijalna energija . . . . .                                 | 14        |
| 3.2      | Električni potencijal . . . . .                                 | 15        |
| 3.3      | Razlika potencijala stvorena jediničnim nabojem . . . . .       | 17        |
| <b>4</b> | <b>ELEKTRIČNI KRUGOVI</b>                                       | <b>19</b> |
| 4.1      | Elektromotorna sila i struja . . . . .                          | 19        |
| 4.2      | Ohmov zakon . . . . .                                           | 19        |
| 4.3      | Otpor i otpornost . . . . .                                     | 20        |
| 4.4      | Električna snaga . . . . .                                      | 21        |
| 4.5      | Izmjenična struja . . . . .                                     | 22        |
| <b>5</b> | <b>DEMONSTRACIJSKI POKUSI</b>                                   | <b>25</b> |
| 5.1      | Balon na zidu . . . . .                                         | 25        |

|          |                                                 |           |
|----------|-------------------------------------------------|-----------|
| 5.2      | Zakretanje putanje vode . . . . .               | 27        |
| 5.3      | Sol i papar . . . . .                           | 29        |
| 5.4      | Kotrljanje limenke . . . . .                    | 32        |
| 5.5      | Levitacija . . . . .                            | 34        |
| 5.6      | Ispuštanje magneta kroz bakrenu cijev . . . . . | 35        |
| 5.7      | Elektromagnetski vlak . . . . .                 | 38        |
| 5.8      | Teslin transformator . . . . .                  | 42        |
| <b>6</b> | <b>ZAKLJUČAK</b>                                | <b>47</b> |
|          | <b>Literatura</b>                               | <b>48</b> |



# 1 UVOD

Razumijevanje elektriciteta koji je sastavni dio osnovnoškolskih i srednjoškolskih kurikula fizike, ključno je za razumijevanje suvremenih tehnologija i uređaja [2]. Digitalne tehnologije, i nebrojene primjene električne struje zahtijevaju dublje razumijevanje te tematike. Stoga je ona aktualna tema i objekt promatranja u mnogim studijama, knjigama i konferencijama te se ističe kao jedan od velikih problema u današnjem obrazovanju. Mnogi učenici diljem svijeta nakon završenog srednjoškolskog obrazovanja nemaju stečena potrebna znanja o električnim krugovima. Rezultati istraživanja pružaju jasnu sliku o različitim učeničkim, alternativnim idejama. Učenici imaju poteškoća s konceptima i razumijevanjem elektriciteta, što uobičajena nastava radije ignorira umjesto da izričito uzme u obzir. Učenici pokazuju poteškoće u učenju s obzirom na:

- i) Razvijanje sustavnog razmišljanja
- ii) Konceptualnu diferencijaciju
- iii) Uspostavljanje fenomenoloških odnosa
- iv) Povezivanje različitih modela.

## 1.1 *Putevi za učenje elektriciteta*

Konsenzus postignut među istraživačima u vezi s učeničkim poteškoćama u učenju elektriciteta nije donio konsenzus o odgovarajućoj pedagogiji. U potrazi za rješenjem, pojavilo se nekoliko istraživačkih puteva proizašlih iz konstruktivističke perspektive poučavanja i učenja, u njima je učenik aktivan činilac izgradnje vlastitog znanja, a učenikovo predznanje je krucijalan čimbenik u stjecanju novih znanja. S jedne strane, prijedlozi dovode u pitanje izvedivost i obrazovnu vrijednost ostvarivanja razumijevanja mehanizma električnih krugova od strane učenika. Budući da je dostatno razumijevanje električnih krugova teško, poučavanje elektriciteta bi se trebalo usredotočiti na važne primjene, kao što su elektricitet u kućanstvima i ušteda električne energije. S druge strane, predlaže se fokus na učinkovite strategije kako bi se naučile bitne značajke tradicionalnih tema kao što je razumijevanje funkcije električnih sklopova.

## **1.2 *Pretpostavke o učenju znanosti***

Prvo, smatra se da učenje znanosti treba uključivati sve razine znanstvenih spoznaja, kao što su teorija, modeli i eksperimenti. Međutim, znanstveni modeli su drugačiji od učeničkih pogleda na svijet. S jedne strane, to znači da razumijevanje znanstvenih modela može značiti konceptualnu promjenu za učenike. S druge strane, znanstveni modeli ne smiju biti previše različiti od učeničkog razmišljanja kako bi bili razumljivi. Drugo, u učenju znanosti treba postojati koherencija između modela koji se uče i eksperimenata koji pružaju iskustvenu osnovu za izradu znanja. Proširenje eksperimentalnog polja kojeg treba učiti znači usvajanje snažnijih, konceptualnih modela. Treće, u znanosti metode učenja treba tretirati kao hipotetske konstrukte.

## **1.3 *Razvoj modela***

### **1.3.1 Fenomenološki dio**

Fenomenološki dio je koncipiran kao razdoblje upoznavanja koje je karakteristično za konstruktivističke pristupe u elektricitetu i drugdje. Fenomenološki dio se bavi pitanjima značajnima za učenike. Pitanja su formulirana na razini fenomena koji se odnose na poznate objekte i događaje, te su u skladu s učeničkim modelom izvora i potrošača, kao na primjer, kako svijetli žarulja. Akumulatori, baterije, žarulje i božićne lampice čine eksperimentalno polje. Treba voditi računa da u eksperimentalno polje treba uvesti događaje koji se ne odnose samo na intenzitet svjetla, već i na trajanje događaja. Učenicima su poznati pojmovi poput trajanje rasvjete ili život akumulatora. Na kraju fenomenološkog dijela od učenika se očekuje da su upoznati s električnim pojavama i eksperimentima, razumiju zatvoreni strujni krug, znaju o čemu ovisi intenzitet svjetla žarulje i što se događa ako u strujni krug uključimo više baterija. Učenici od početka trebaju imati mogućnost eksperimentiranja s baterijama, žaruljama i drugim materijalima, kako bi razumjeli zatvoreni strujni krug i klasificirali materijale kao vodiče i izolatore. Stečeno znanje učenika se provjerava kada tumače poznate, ali ne očite događaje. U sljedećem koraku, učenike se uključuje u eksperimente gdje manipuliraju brojem baterija i žarulja. Nastava na ovoj razini se svodi na osnivanje odnosa između promatranih varijabli, naime broj baterija i žarulja, konfiguracija strujnog kruga i varijacije intenziteta svjetla. Učenici uče da rasvjeta ne

ovisi samo o baterijama i žaruljama, nego i o konfiguraciji kruga. Intenzitet i trajanje rasvjete su važni fenomeni, oni olakšavaju razumljivost novog znanja i grade modele za funkcioniranje strujnog kruga.

### 1.3.2 Konceptualni dio

Konceptualni dio se temelji na modeliranju električnih pojava na makroskopskoj razini, uključujući koncepte električnog napona  $V$ , električne struje  $I$ , energije  $E$ , električnog otpora  $R$  i vremena  $t$ . S obzirom na predznanje učenika, stvaramo dva modela koja će uzeti u obzir intenzitet i trajanje rasvjete. Prvi model je model protoka električne struje, on se bavi veličinama  $V, I, R$  i njihovim međuodnosima. Drugi model je energijski model i on se bavi fizikalnim veličinama  $E$  i  $t$ . Polazište za konceptualno modeliranje električnih krugova je problem oko kojeg se mnogi istraživači ne slažu. U ovom slučaju, napon i energija služe kao ulaz za upoznavanje koncepata  $V, I, E$ . Rano upoznavanje koncepta napona može pomoći učenicima za razumijevanje električnih krugova, tjera učenike da razmišljaju o naponu, a ne o struji u električnom krugu, olakšava formiranje veza između elektrodinamičkih i elektrostat-skih pojava na makroskopskoj i mikroskopskoj razini. Nakon napona, uvodi se pojam struje, a zatim otpor.

### 1.3.3 Mikroskopski dio

Pitanja koja se odnose na mikroskopske mehanizme se pojavljuju kad učenici počnu stvarati koncepte očuvanja struje. Učenici često sekvencijalno tretiraju promjene u električnom krugu. Na primjer smatraju da je struja prije žarulje veća, jer će dio elektrona ostati u žarulji. Učenici si pokušavaju objasniti na mikroskopskoj razini kako funkcioniraju otpornici i struja u strujnom krugu. Ključno pitanje na ovoj razini je kako povezati elektrostatiku i elektrodinamiku. Eksperimenti, analogije, koncepti i konceptualne strukture se koriste za uspostavljanje veze za oba fenomena.

### 1.3.4 Kvantitativni dio

Učenike se podučava o kvantitativnom odnosu između  $V, I$  i  $R$ , kako bi odgovorili na pitanja: "Za koliko se promijeni iznos struje ako povećanjem temperature otpornika, početnu zadanu vrijednost otpora udvostručimo, a napon na izvoru je poznat i

nepromijenjen?”. U ovom dijelu se uvodi Ohmov zakon i pokazuje se ovisnost otpora o temperaturi. Učenici samostalno provode eksperimente i zaključuju o kvalitativnom odnosu napona, struje i otpora na osnovi očitavanja s mjernog instrumenta. Na primjer, mikroskopska ilustracija koncepta otpora je izravno mjerenje otpora pomoću ohmmetra. Zatim učenici uspoređuju dobivenu vrijednost otpora s onom koju su izračunali preko vrijednosti struje i napona koje su pokazali ampermetar i voltmetar.

## 2 ELEKTRIČNA SILA I ELEKTRIČNO POLJE

### 2.1 *Porijeklo elektriciteta*

Atom se sastoji od male, relativno masivne jezgre koja sadrži čestice koje zovemo protonima i neutronima te elektrona [1]. Proton ima masu  $1.673 \times 10^{-27}$  kg i neutron ima malo veću masu  $1.675 \times 10^{-27}$  kg. Poput mase, električni naboj je unutrašnje svojstvo protona i elektrona. Postoje dva tipa naboja, pozitivni i negativni. Proton ima pozitivan naboj, a elektron ima negativan naboj. Neutron nema naboja. Eksperimenti pokazuju da apsolutna vrijednost naboja protona točno odgovara naboju elektrona, proton ima naboj  $+e$ , elektron ima naboj  $-e$ . SI jedinica za naboj je Coulomb C, eksperimentalno je određeno da elementarni naboj  $e$  ima vrijednost:

$$e = 1.6 \times 10^{-19} C$$

U prirodnom stanju atomi su električki neutralni, što znači da je njihov ukupni naboj, koji je jednak zbroju naboja svih protona i elektrona jednak nuli. Neutroni u jezgrama su čestice koje su električki neutralne. Električni naboj u prirodi je očuvan. Pojedina slobodna čestica može imati samo cijeli broj elementarnih naboja (naboj je kvantiziran).

### 2.2 *Električna sila*

Elektricitet ima brojne korisne primjene zato što je moguće prenositi naboj s jednog tijela na drugo. Prenose se elektroni, tijelo koje dobije elektrone ima višak negativnog naboja. Tijelo koje gubi elektrone ima višak pozitivnog naboja. Takvo odvajanje se događa kad se dva različita tijela trljaju jedno o drugo. Na primjer, kad se gumeni štap trlja o krzno, neki elektroni s atoma krzna prijeđu na štap. Štap ostaje negativno nabijen, a krzno je pozitivno nabijeno. Slično, ako se stakleni štap trlja o svilenu tkaninu, neki atomi sa staklenog štapa prijeđu na svilu, ostavljajući svilu negativno nabijenom i stakleni štap pozitivno nabijenim.

Kad se gumeni štap trlja o krzno, proces trljanja samo služi da razdvoji elektrone i protone koji već postoje u materijalu. Niti jedan elektron ili proton nije stvoren ili

uništen. Kad god je elektron prenesen na gumeni štap, proton ostaje na krznu. Kako naboji elektrona i protona imaju jednak iznos, ali suprotne predznake, algebarska suma naboja protona i elektrona iznosi nula, i prijenos naboja s krzna na štap ne mijenja ukupni naboj sustava krzno-gumeni štap. Ako svaki materijal sadrži jednak broj protona i elektrona na početku, ukupni naboj sustava je nula u početku i ostaje nula tijekom procesa trljanja.

### ZAKON OČUVANJA ELEKTRIČNOG NABOJA

Tijekom svakog procesa, ukupni naboj izoliranog sustava ostaje sačuvan (konstantan je).

Dva električno nabijena tijela vrše silu jedno na drugo. Dvije kuglice koje nose suprotne naboje se međusobno privlače. S druge strane, kuglice s istim nabojem, obje pozitivno ili negativno nabijene, se međusobno odbijaju. Ovo ponašanje opisuje jedno od fundamentalnih svojstva električnog naboja:

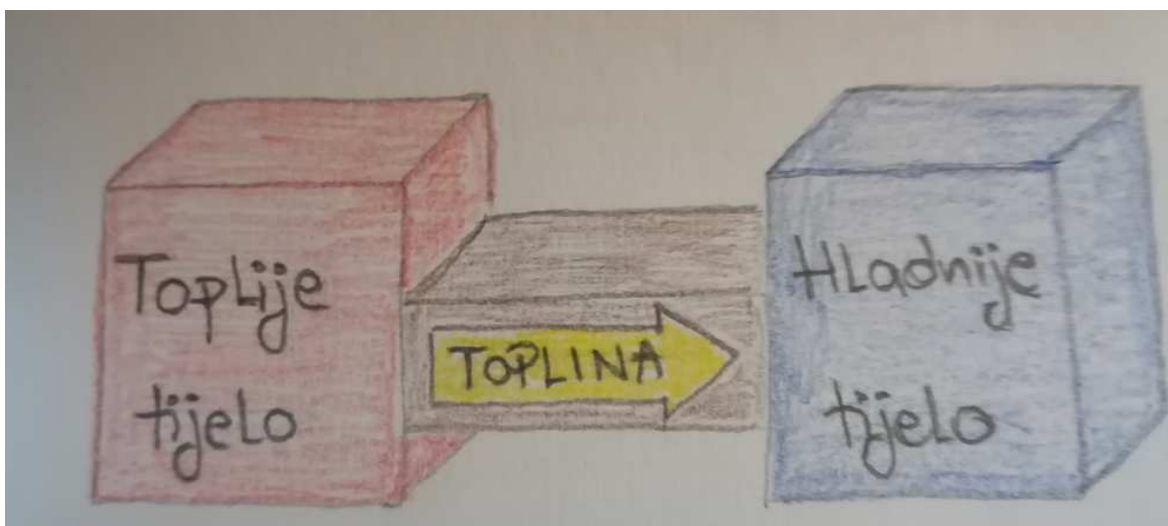
Naboji istog predznaka se međusobno odbijaju, a naboji različitog predznaka se međusobno privlače.

## 2.3 Vodiči i izolatori

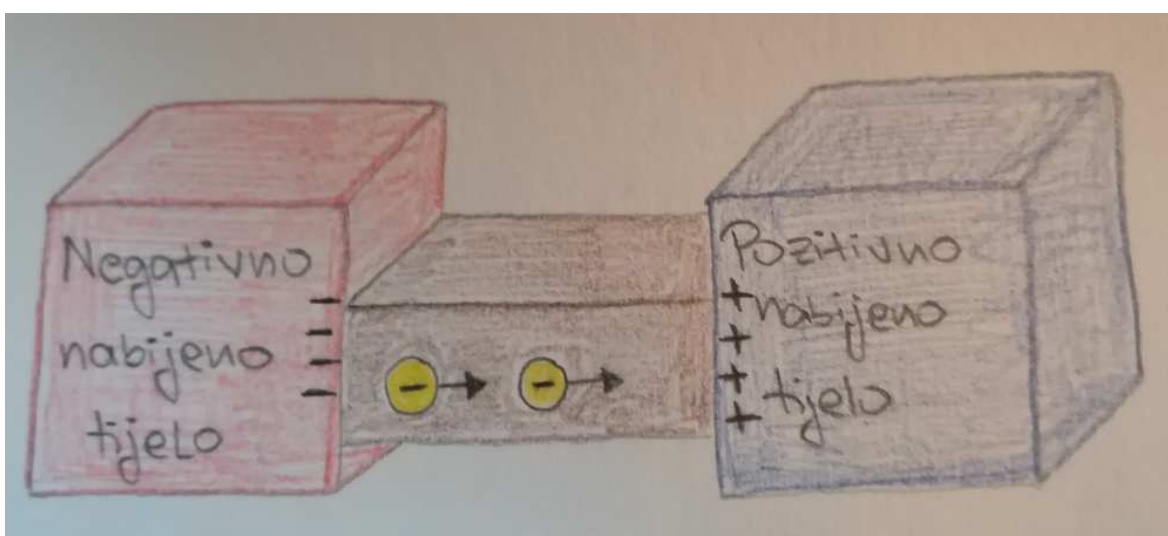
Električni naboj osim po površini predmeta se može kretati kroz predmet. Materijali se razlikuju po sposobnosti prolaska naboja kroz materijal. Da bi se lakše ilustrirale razlike u vodljivosti na slici 2.1 je prikazano vođenje topline kroz metalnu šipku čiji su krajevi održavaju na različitim temperaturama.

Primjer dobrog toplinskog vodiča je metal, a primjer lošeg toplinskog vodiča je led. Situacija analogna vođenju topline se javlja kad je metalna šipka smještena između dva električki nabijena tijela, prikazana na slici 2.2.

Tvari koje dobro vode električni naboj su električni vodiči. Iako postoje iznimke, dobri termički vodiči su generalno dobri električni vodiči. Metali kao što su bakar, aluminij, srebro i zlato su izvrsni električni vodiči i koriste se u strujnim krugovima. Materijali koji slabo vode električne naboje su električni izolatori. U mnogim slučajevima, termalni izolatori su i električni izolatori. Uobičajeni izolatori su guma, mnoge plastike i drvo. Vodiči se oblažu izolatorima kako bi se spriječilo neželjeno kretanje naboja.



Slika 2.1: Prijenos topline



Slika 2.2: Prijenos električnog naboja

Razlika između vodiča i izolatora je povezana s atomskom strukturom. Elektroni koji su u vanjskim ljuskama su slabije privučeni silom privlačenja prema jezgri atoma, od onih koji se nalaze u unutrašnjim ljuskama. Zbog toga, ti elektroni se mogu lakše otpustiti iz atoma od unutrašnjih elektrona. U dobrom vodiču, nekoliko valentnih elektrona je ispušteno iz svojih "roditeljskih" atoma, slobodno se kreću kroz materijal, ne pripadajući niti jednom od atoma. Kad je jedan kraj vodeće šipke u kontaktu s negativno nabijenim tijelom, a drugi kraj šipke je u kontaktu s pozitivno nabijenim tijelom, kao što je prikazano na slici 2.2, slobodni elektroni se kreću od negativnog prema pozitivnom kraju. U izolatoru, situacija je drugačija, tamo se jako malo elektrona slobodno kreće kroz materijal. Bez slobodnih elektrona, nema prijenosa naboja kad je materijal smješten između dva suprotno nabijena tijela, pa je taj materijal elek-

trični izolator.

## 2.4 *Influencija*

Kad negativno nabijeni gumeni štap dodirne metalnu sferu, višak elektrona prijeđe sa štapa na sferu. Jednom kad se elektroni nalaze na sferi i gumeni štap je uklonjen, elektroni se međusobno odbijaju te se rašire po cijeloj površini metalne sfere. Izolirano postolje ih sprječava da prijeđu u zemlju gdje bi se dalje mogli raširiti. Proces u kojem tijelo postane električki nabijeno na način da je stupilo u kontakt s već nabijenim tijelom se zove električno nabijanje kontaktom.

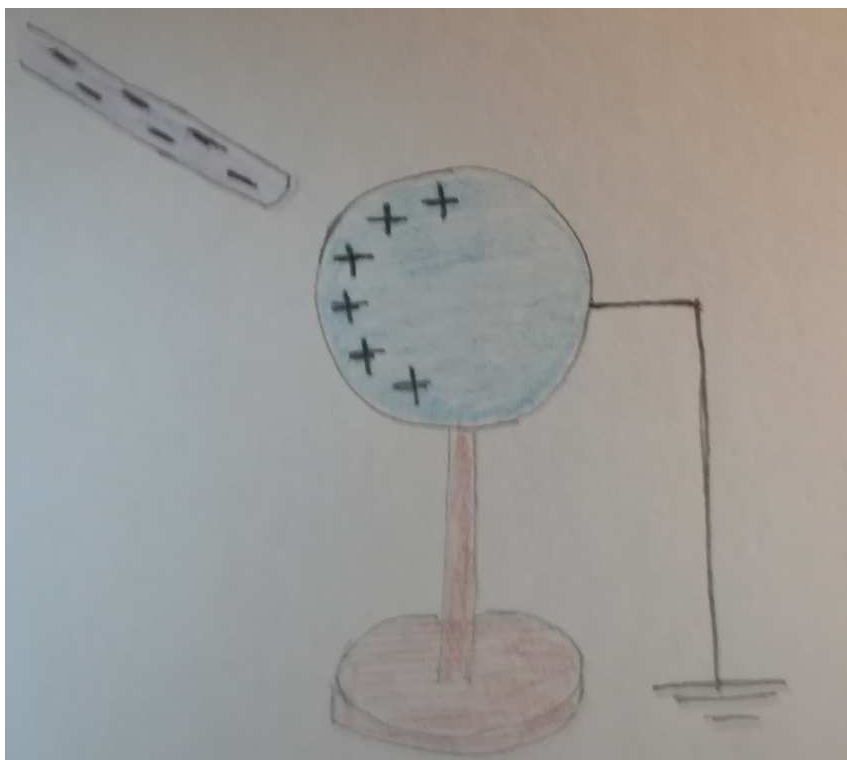
Moguće je nabiti vodič i bez kontakta. Negativno nabijeni štap je stavljen blizu metalne sfere, bez da ju dodiruje. U sferi, slobodni elektroni koji su se nalazili u blizini štapa se pomaknu na suprotnu stranu sfere. Kao rezultat imamo da dio sfere koji je najbliži štapu je pozitivno nabijen, a dio sfere koji je najdalji od štapa je negativno nabijen. Ova pozitivna i negativna nabijena područja su inducirana da se naprave zbog odbojne sile negativno nabijenog štapa i slobodnih elektrona koji se nalaze na sferi. Ako se štap pomakne, elektroni će se vratiti na prvobitne položaje i neće postojati nabijena područja na sferi.

Zemlja je dobar električni vodič. Ako umetnemo metalnu žicu između sfere i zemlje, kao što je prikazano na slici 2.3, dio slobodnih elektrona napušta sferu i raspoređuje se po zemlji, koja je mnogo veća od sfere. Kad uklonimo žicu i gumeni štap, sfera ostaje pozitivno nabijena. Proces u kojem električki nabijemo tijelo bez dodirivanja tog tijela se zove influencija.

## 2.5 *Coulombov zakon*

Električna sila koju stacionarna nabijena tijela vrše jedno na drugo ovisi o iznosu naboja tijela i udaljenosti između njih. Eksperimenti pokazuju da što je veći naboj i što su tijela bliža, to je sila veća. Ako je naboj tijela različitog predznaka, tijela se međusobno privlače silom koja je usmjerena duž linije između ta dva tijela;  $+\vec{F}$  je sila koju tijelo 2 vrši na tijelo 1,  $-\vec{F}$  je sila koju tijelo 1 vrši na tijelo 2. Ako su naboji istog predznaka, tijela se međusobno odbijaju. Odbojna sila, kao i privlačna, djeluje duž linije između dva naboja. Privlačna i odbojna sila su jednake u iznosu, ali različite u smjeru. Ove sile uvijek dolaze u paru, svaka djeluje na drugo tijelo u





Slika 2.3: Influencija

skladu s Newtonovim zakonom akcije i reakcije.

### COULOMBOV ZAKON

Iznos električne sile  $F$  koju jedinični naboj  $q_1$  vrši na jedinični naboj  $q_2$  je direktno povezan s vrijednostima naboja  $|q_1|$  i  $|q_2|$ , i obrnuto proporcionalan s kvadratom udaljenosti  $r$  između njih.

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$

gdje je  $k$  konstanta proporcionalnosti:  $k = 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \text{C}^{-2}$ . Konstanta  $k$  se može izraziti kao  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ , gdje je  $\epsilon_0$  permitivnost vakuuma. Električna sila je usmjerena duž linije između naboja, i ona je privlačna ako su naboji suprotnog predznaka i odbojna je ako su naboji istog predznaka.

## 2.6 Električno polje

Na naboj u prostoru djeluje električna sila zbog prisustva drugih naboja. Da bi karakterizirali to svojstvo prostora uvodimo koncept električnog polja.

## DEFINICIJA ELEKTRIČNOG POLJA

Električno polje  $\vec{E}$  koje postoji u točki je električna sila  $\vec{F}$  koju doživljava mali, pozitivni, testni naboj  $q_0$  podijeljena s tim nabojem.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

Električno polje je vektor čiji je smjer jednak smjeru sile na pozitivan testni naboj. SI jedinica za električno polje je  $\frac{N}{C}$  ili  $\frac{V}{m}$ .

Okolni naboji stvaraju električno polje u danoj točki. Električno polje je svojstvo prostora. Kada u tu točku prostora stavimo pozitivni ili negativni naboj, na njega se javlja sila koja je proporcionalna električnom polju u toj točki. Električno polje naboja  $q$  može biti dobiveno iz Coulombovog zakona. Iznos sile koju vrši naboj  $q$  na testni naboj  $q_0$  je  $F = k \frac{|q||q_0|}{r^2}$ , kad ga podijelimo s iznosom naboja  $|q_0|$  dobijemo iznos električnog polja. Iznos  $|q_0|$  je eliminiran algebarski iz rezultata, pa električno polje ne ovisi o testnom naboju:

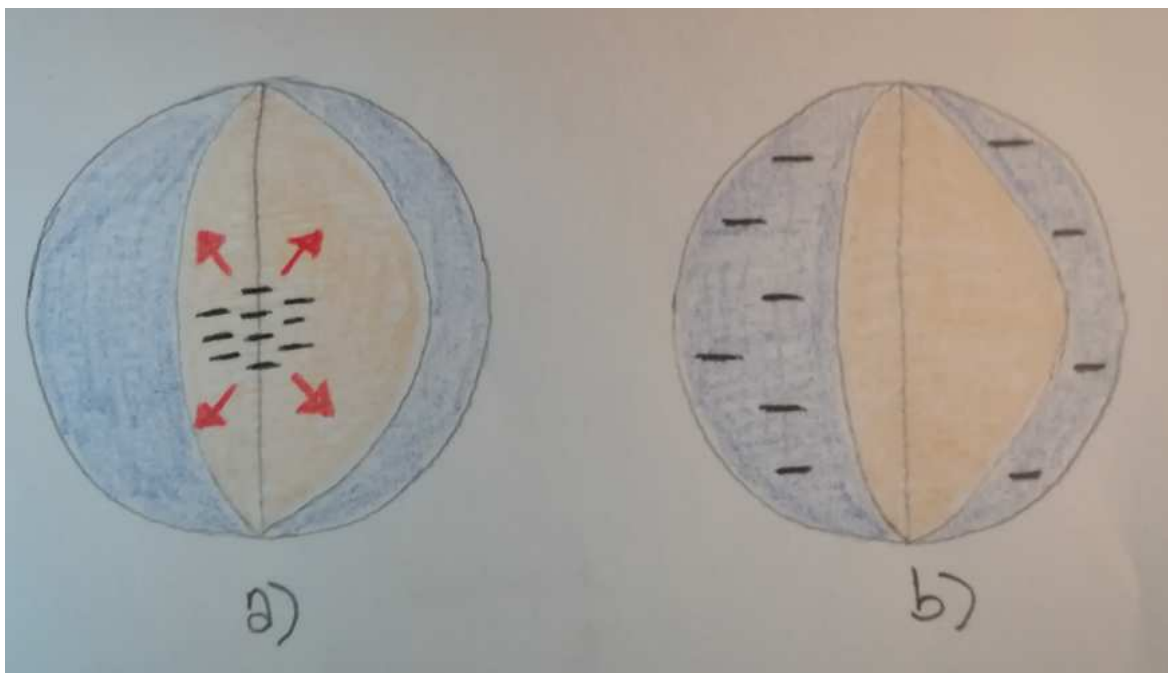
$$E = k \frac{|q|}{r^2}$$

Ako je  $q$  pozitivan, električno polje  $\vec{E}$  je usmjereno od naboja  $q$ . Ako je  $q$  negativan,  $\vec{E}$  je usmjereno prema  $q$ , jer se negativni naboj i pozitivni testni naboj međusobno privlače.

## 2.7 Električno polje unutar vodiča

Ako u vodiču imamo električno polje, ono će rezultirati silom na elektrone. Pretpostavimo da komad bakra sadrži nekoliko slobodnih elektrona. Zbog električnog odbijanja elektrona, uspostavlja se ravnoteža na način da se elektroni jednolike rasporede po površini vodiča.

Promotrimo unutrašnjost bakra prikazanu na slici 2.5. Unutrašnjost je električki neutralna, iako postoje slobodni elektroni koje se mogu pomicati pod utjecajem električnog polja. Odsutnost kretanja slobodnih elektrona ukazuje da nema električnog polja prisutnog unutar vodiča. U stvari, višak naboja se međusobno organizira na površini vodiča točno tako da električno polje unutar vodiča iščezava. U ravnoteži u elektrostatičkim uvjetima, električno polje je nula u bilo kojoj točki unutar vodljivog materijala.



Slika 2.4: Višak naboja unutar vodiča se brzo rasporedi po površini

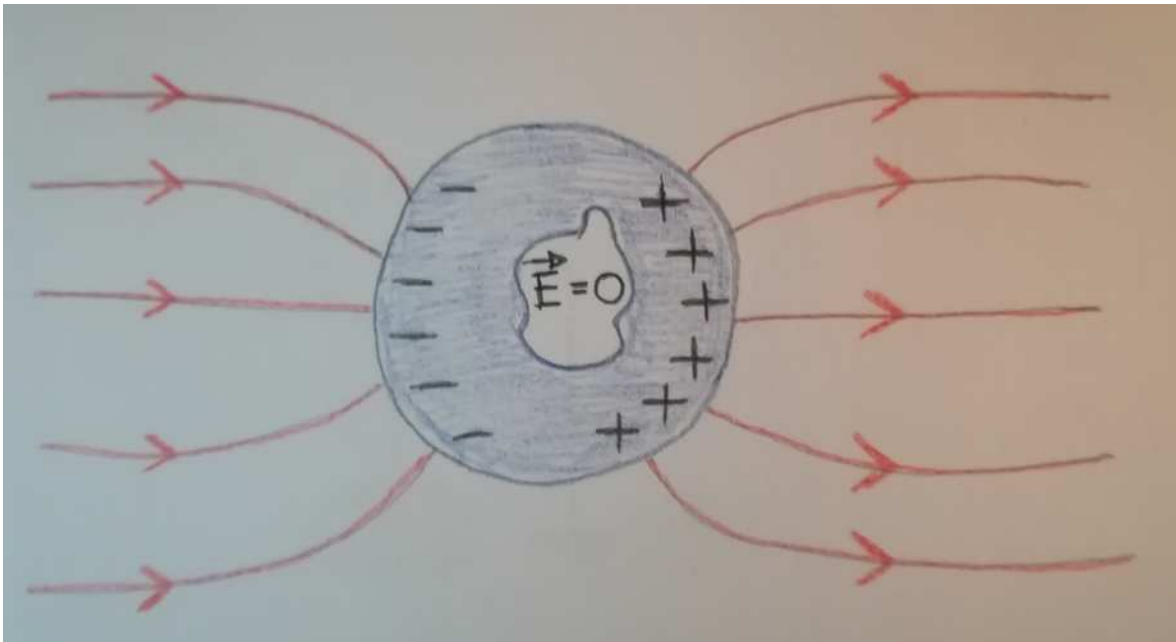
## 2.8 Gaussov zakon

Raspored naboja u prostoru i vremenu zovemo distribucijom naboja. Gaussov zakon opisuje vezu između distribucije naboja i električnog polja koje proizvode. U predstavljanju Gaussovog zakona je potrebno se upoznati s idejom toka električnog polja. Ideja toka uključuje električno polje i površinu kroz koju prolazi. U slučaju pozitivnog, točkastog naboja, silnice električnog polja usmjerene su od naboja u svim smjerovima u prostoru. Iznos električnog polja  $E$  na udaljenosti  $r$  od naboja je  $E = \frac{kq}{r^2}$ . Postavimo jedinični naboj u centar zamišljene sferične površine radijusa  $r$ . Površina sfere je  $A = 4\pi r^2$ , iznos električnog polja se može zapisati preko površine  $A$ ;  $E = \frac{q}{A\epsilon_0}$  ili:

$$EA = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Lijeva strana jednadžbe je umnožak iznosa električnog polja  $E$  i površine  $A$ . Ovaj produkt nazivamo tokom električnog polja  $\Phi_E$ ;  $\Phi_E = EA$ . Za odabrani naboj  $q$ , tok električnog polja je konstanta, što olakšava izračun električnog polja na danoj površini, odnosno radijusu. Izrazimo li električno polje iz gornjeg izraza, dobijemo upravo izraz koji proizlazi iz definicije električnog polja i Coulombove sile.

Slika 2.6 prikazuje distribuciju naboja čiji ukupni naboj označavamo s  $Q$ . Distri-



Slika 2.5: Električno polje je nula unutar šupljine u vodiču

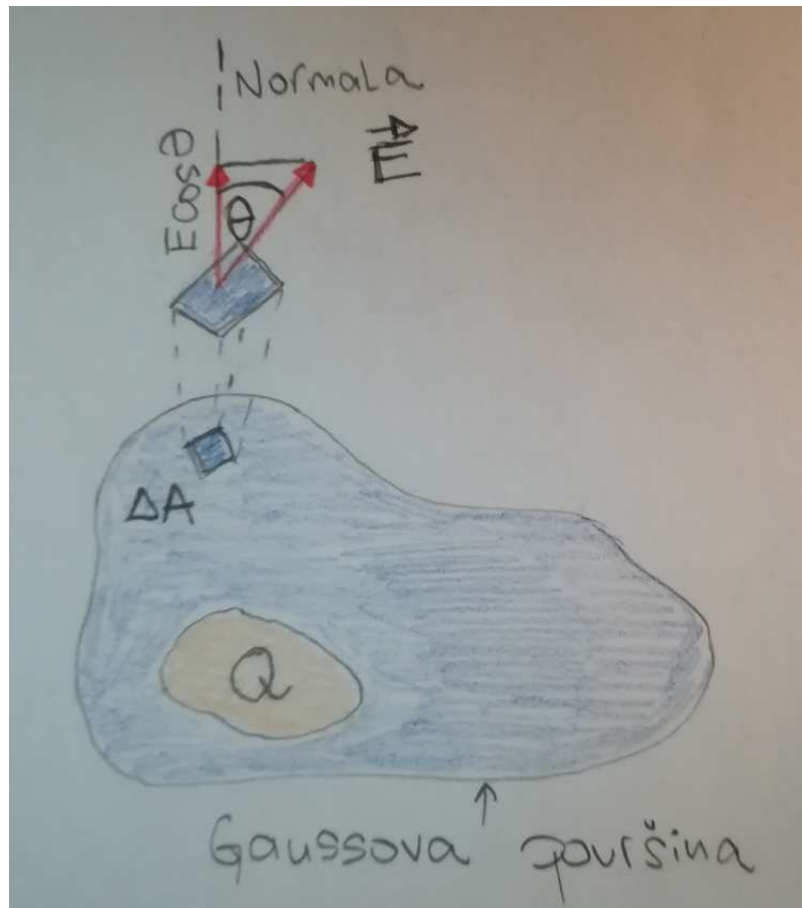
bucija naboja je okružena Gaussovom površinom, odnosno zamišljenom zatvorenom površinom. Površina može imati bilo koji oblik, ali mora biti zatvorena. Smjer električnog polja nije nužno okomit na Gaussovu površinu, ali će samo okomita komponenta doprinositi toku. Iznos električnog polja ne mora biti konstantan na površini, može varirati od točke do točke.

Da bismo odredili tok električnog polja kroz takvu površinu, podijelimo površinu na mnogo malih dijelova površine  $\Delta A_1, \Delta A_2$  itd. Pretpostavimo da je svaki dio površine dovoljno mali da površinu možemo smatrati ravnom, a iznos električnog polja  $\vec{E}$  na tom dijelu je konstantan u iznosu i smjeru. Da bismo odredili tok električnog polja kroz svaki dio, koristimo samo komponentu  $\vec{E}$  koja je okomita na površinu. Sa slike 2.6 vidimo da ta komponenta ima iznos  $E \cos \phi$ , gdje je  $\phi$  kut između električnog polja i normale. Električni tok kroz bilo koji dio je:  $(E \cos \phi) \Delta A$ . Električni tok  $\Phi_E$  kroz cijelu Gaussovu površinu je suma pojedinačnih tokova:

$$\Phi_E = \Sigma (E \cos \phi) \Delta A$$

## GAUSSOV ZAKON

Električni tok  $\Phi_E$  kroz Gaussovu površinu jednak je ukupnom naboju  $Q$  zatvore-



Slika 2.6: Prikaz Gaussovog zakona

nog površinom, podijeljenim s konstantom permitivnosti vakuumu  $\epsilon_0$ :

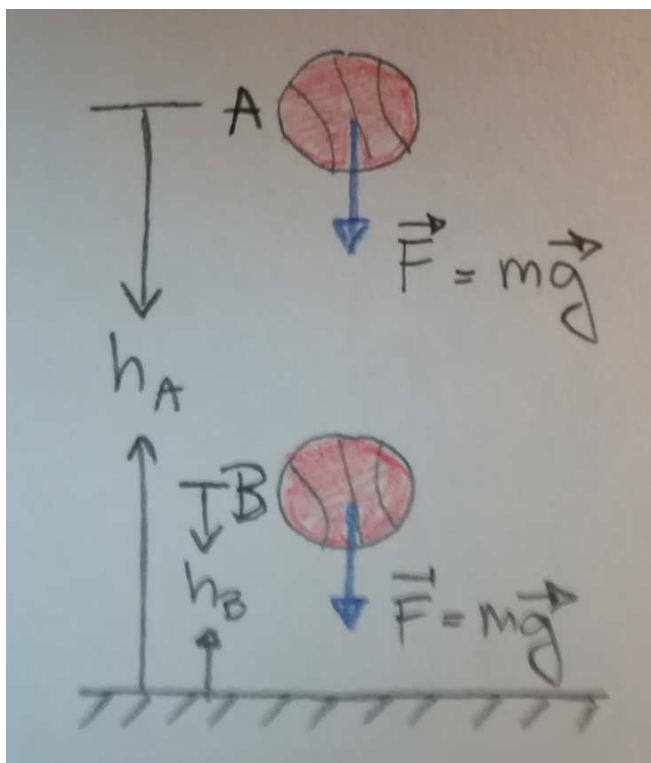
$$\Sigma(E \cos \phi) \Delta A = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

SI jedinica električnog toka je:  $N \cdot m^2/C$ .

### 3 ELEKTRIČNA POTENCIJALNA ENERGIJA I ELEKTRIČNI POTENCIJAL

#### 3.1 Potencijalna energija

Električna, odnosno Coulombova sila između dva naboja je  $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$ . Matematički oblik ove relacije sličan je izrazu za gravitacijsku silu između dvije mase  $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ . Obje sile su konzervativne, a potencijalnu energiju možemo povezati s konzervativnim silama. Električna potencijalna energija je analogna gravitacijskoj potencijalnoj energiji.



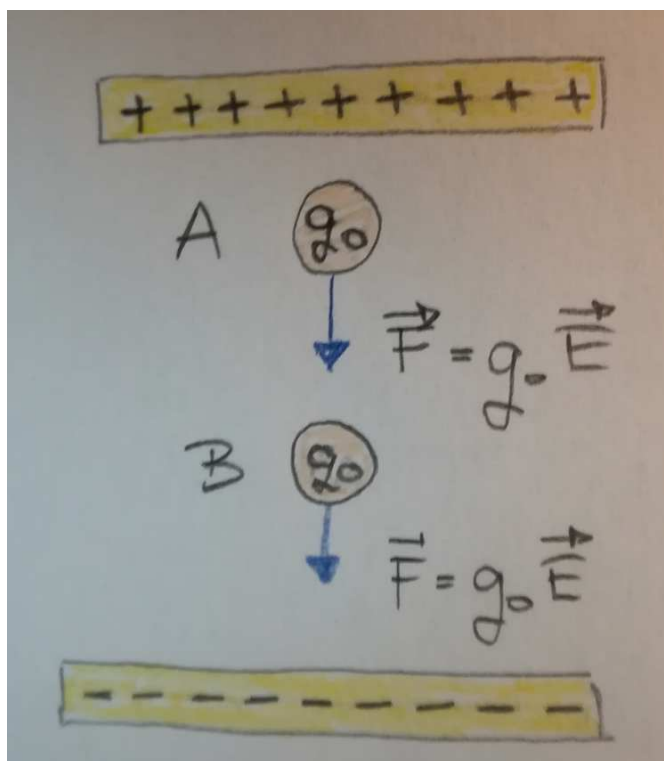
Slika 3.1: Gravitacijska sila je izvršila rad na lopti koja pada od A do B

Na slici 3.1 je prikazana košarkaška lopta mase  $m$  kako pada od točka A do točke B. U blizini površine Zemlje gravitacijsku silu na masu  $m$  prikazujemo izrazom kojeg nazivamo sila teže,  $F = mg$  gdje je  $g$  ubrzanje sile teže. Rad  $W_{AB}$  koji gravitacijska sila izvrši na loptu koja pada od visine  $h_A$  do visine  $h_B$  je:

$$W_{AB} = mgh_A - mgh_B = GPE_A - GPE_B$$

Veličina  $mgh$  je gravitacijska potencijalna energija lopte;  $GPE = mgh$  i pred-

stavlja energiju koju lopta ima u ovisnosti o relativnom položaju naspram Zemljine površine. Rad koji je izvršila gravitacijska sila je jednak početnoj gravitacijskoj potencijalnoj energiji minus konačnoj gravitacijskoj potencijalnoj energiji.



Slika 3.2: Električna sila je izvršila rad na naboju  $q_0$  koji se kreće od A do B

Slika 3.2 razjašnjava analogiju između električne i gravitacijske potencijalne energije. Pozitivan testni naboj  $+q_0$  se nalazi u točki A između dvije suprotno nabijene ploče. Zbog naboja na pločama, električno polje  $\vec{E}$  postoji između ploča. Zbog toga, testni naboj doživljava silu,  $\vec{F} = q_0 \vec{E}$ , koja je usmjerena prema donjoj ploči. (Gravitacijsku silu ovdje zanemarujemo.) Kako se naboj pomiče iz točke A u točku B, rad vrši električna sila, analogno kako je na lopti gravitacijska sila vršila rad. Rad  $W_{AB}$  je jednak razlici između električnih potencijalnih energija u točkama A i B.

$$W_{AB} = EPE_A - EPE_B$$

### 3.2 Električni potencijal

Sila na naboj  $q_0$  u električnom polju  $E$  dana je s  $F = q_0 E$ , pa će i rad te sile ovisiti o  $q_0$ . Uvedimo stoga novu veličinu koja je jednaka radu podijeljenom s  $q_0$

$$\frac{W_{ab}}{q_0} = \frac{EPE_A}{q_0} - \frac{EPE_B}{q_0}$$

Veličina  $\frac{EPE}{q_0}$  je električna potencijalna energija po jediničnom naboju i ona je važan koncept za elektricitet. Zovemo je električni potencijal i označava se sa simbolom  $V$ .

#### DEFINICIJA ELEKTRIČNOG POTENCIJALA

Električni potencijal  $V$  u danoj točki je električna potencijalna energija  $EPE$  malog testnog naboja  $q_0$  smještenog u toj točki podijeljena s nabojem:

$$V = \frac{EPE}{q_0}$$

SI jedinica za električni potencijal je  $\frac{J}{C} = volt(V)$ .

Možemo povezati rad  $W_{AB}$  kojeg je izvršila električna sila kad se naboj  $q_0$  pomaknuo iz točke  $A$  u  $B$  s razlikom potencijala  $V_B - V_A$  između dvije točke.

$$V_B - V_A = \frac{EPE_B}{q_0} - \frac{EPE_A}{q_0} = -\frac{W_{AB}}{q_0}$$

Često se koristi delta notacija kako bi se izrazila razlika u potencijalu i potencijalnoj energiji:

$$\Delta V = \frac{\Delta(EPE)}{q_0} = -\frac{W_{AB}}{q_0}$$

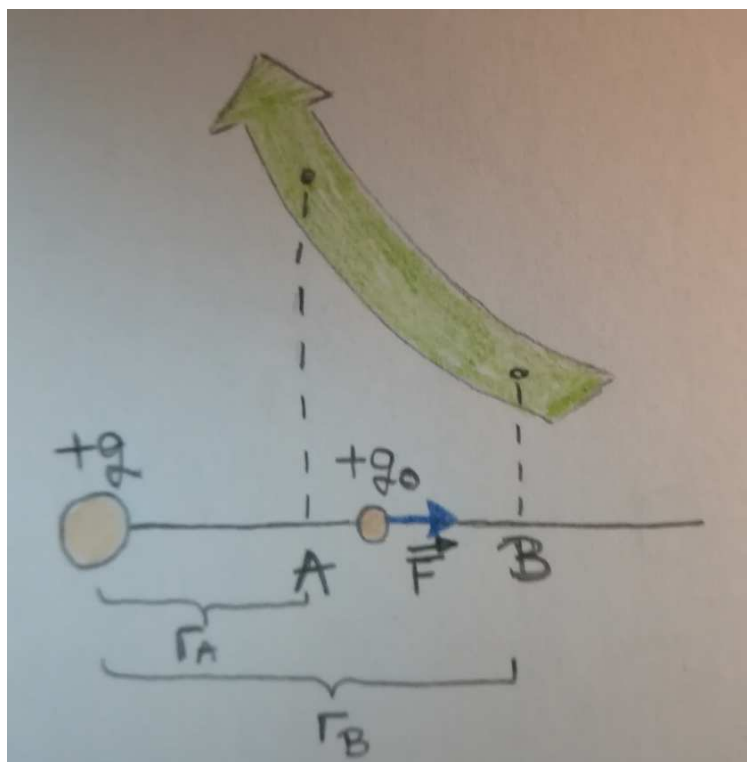
Potencijal  $V$  i potencijalna energija  $EPE$  se ne mogu odrediti u apsolutnom smislu, zato što samo razlika  $\Delta V$  i  $\Delta(EPE)$  su mjerljive u okviru rada  $W_{AB}$ .

Na slici 3.1 brzina košarkaše lopte se povećava kako pada od  $A$  do  $B$ . U točki  $A$  je veća gravitacijska potencijalna energija nego u točki  $B$ , vidimo da tijelo mase  $m$  ubrzava kad se pomiče iz područja više potencijalne energije u područje niže potencijalne energije. Slično, pozitivni naboj na slici 3.2 ubrzava kako se pomiče iz  $A$  u  $B$  zbog električnog odbijanja od gornje ploče i privlačenja prema donjoj ploči. Točka  $A$  je na višem potencijalu od točke  $B$ , možemo zaključiti da pozitivan naboj ubrzava od područja višeg električnog potencijala prema području nižeg električnog potencijala. S druge strane, ako postavimo negativni naboj između tih ploča, ponašat će se obrnuto, jer električna sila koja djeluje na negativni naboj je usmjerena suprotno od



električne sile koja djeluje na pozitivni naboj. Negativni naboj ubrzava iz područja nižeg potencijala prema području višeg potencijala.

### 3.3 Razlika potencijala stvorena jediničnim nabojem



Slika 3.3: Razlika potencijala stvorena jediničnim nabojem

Pozitivan jediničan naboj  $+q$  stvara električni potencijal kako je prikazano na slici 3.3 Slika prikazuje dva položaja  $A$  i  $B$ , na udaljenostima  $r_A$  i  $r_B$  od naboja  $q$ . Na bilo kojem mjestu između  $A$  i  $B$ , električna sila odbijanja  $\vec{F}$  djeluje na pozitivan testni naboj  $+q_0$ . Iznos sile je dan Coulombovim zakonom  $F = k \frac{q_0 q}{r^2}$ , ova sila obavlja rad kad se testni naboj pomiče od točke  $A$  do  $B$ . Kako  $r$  varira između  $r_A$  i  $r_B$ , tako varira i sila  $F$ , i rad nije produkt sile i udaljenosti među točkama. Rad  $W_{AB}$  nalazimo pomoću integralnog računa. Rezultat je:

$$W_{AB} = \frac{kq_0q}{r_A} - \frac{kq_0q}{r_B}$$

Potencijalna razlika,  $V_B - V_A$ , se može odrediti preko izraza:

$$V_B - V_A = -\frac{W_{AB}}{q_0} = \frac{kq}{r_B} - \frac{kq}{r_A}$$

Potencijal točkastog naboja u odnosu na beskonačno udaljenu točku potencijala 0 stoga je:

$$V = \frac{kq}{r}$$

Ovaj izraz opisuje električni potencijal - svojstvo prostora u okolini točkastog naboja.

## 4 ELEKTRIČNI KRUGOVI

### 4.1 *Elektromotorna sila i struja*

Unutar baterije, javljaju se kemijske reakcije zbog kojih se elektroni pomiču od jednog pola (ostavljajući ga pozitivno nabijenim) do drugog pola (ostavljajući ga negativno nabijenim). Zbog pozitivnog i negativnog naboja na polovima baterije postoji razlika potencijala između njih. Maksimalna potencijalna razlika se zove elektromotornom silom baterije. Baterija stvara električno polje koje je usmjereno od pozitivnog prema negativnom polu. Električno polje vrši sila na slobodnim elektronima u žici, i zato se oni kreću. Naboji se kreću unutar žice i prolaze preko zamišljene površine koja je okomita na njihovo kretanje. Ovakav tok naboja zovemo električnom strujom. Električna struja  $I$  je definirana kao količina naboja po jediničnom vremenu koji prolaze kroz zamišljenu površinu:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

SI jedinica za struju je amper  $A$ .

Ako se naboji kreću kroz strujni krug u istom smjeru, cijelo vrijeme, za struju kažemo da je istosmjerna struja, takvu struju proizvodi baterija. Postoji i izmjenična struja, kad se naboji prvo kreću u jednom smjeru, pa se kreću u suprotnom smjeru, mijenjajući smjer i jakost struje od trenutka do trenutka. Mnogi izvori energije proizvode izmjeničnu struju, npr. električni generatori.

### 4.2 *Ohmov zakon*

Struja koju baterija pogura kroz žicu je analogna vodi koju pumpa pogura kroz cijev. Veći tlak pumpe vodi na veći protok vode, slično, baterija s većim naponom vodi na veću električnu struju. U jednostavnom slučaju, struja  $I$  je proporcionalna naponu  $V$ . Prema tome, baterija od  $12V$  daje dvaput veću struju od baterije koja ima  $6V$ , kad je svaka priključena na isti krug.

U vodenoj cijevi, protok nije određen samo tlakom pumpe, na njega utječe duljina i promjer cijevi. Dulje i uže cijevi pružaju veći otpor proticanju vode i vode na manji protok za dani tlak pumpe. Slična situacija postoji u električnim krugovima. Električni otpor je definiran u okvirima električne struje i razlike električnog potencijala

koju nazivamo napon  $V$  i izražavamo u jedinici  $Volt(V)$ . Električni otpor  $R$  je definiran kao omjer napona  $V$  i struje  $I$  kroz materijal;  $R = \frac{V}{I}$ . Kad imamo malu struju za veliki napon, znači da se pojavljuje veliki otpor za kretanje naboja. Za mnoge materijale omjer  $\frac{V}{I}$  je isti za različite vrijednosti struje i napona. U tom slučaju, otpor je konstantan.

#### OHMOV ZAKON

Omjer  $\frac{V}{I}$  je konstantan, gdje je  $V$  napon na materijalu (npr. žica), a  $I$  je struja kroz materijal:

$$\frac{V}{I} = R = konstanta$$

$R$  je otpor materijala. SI jedinica otpora je  $\frac{V}{A} = ohm(\Omega)$ .

Ohmov zakon nije fundamentalan zakon prirode kao što su Newtonovi zakoni. On samo ukazuje kako se neki materijali ponašaju u električnim krugovima.

### 4.3 Otpor i otpornost

U vodenoj cijevi, duljina cijevi i površinski presjek cijevi određuju otpor koji cijev pruža protoku vode. Dulje cijevi s manjim površinskim presjekom pružaju veći otpor. Za mnoge materijale duljine  $L$  i površinskog presjeka  $A$  vrijedi da je električni otpor  $R$ :

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

gdje je  $\rho$  konstanta proporcionalnosti poznata kao električna otpornost materijala. Mjerna jedinica otpornosti je  $\Omega m$ . Vodiči imaju malu vrijednost otpornosti. Izolatori, poput gume, imaju veliku otpornost. Materijali poput germanija i silicija imaju srednju vrijednost otpornosti i njih zovemo poluvodičima. Otpornost je intrinzično svojstvo materijala. Otpor pak ovisi o otpornosti i geometriji materijala. Dvije žice mogu biti napravljene od bakra koji ima otpornost  $\rho = 1.72 \times 10^{-8} \Omega m$ , ali kraća žica s većim površinskim presjekom ima manji otpor od dulje, tanje žice.

Otpornost materijala ovisi o temperaturi. U metalima, otpornost se povećava s povećanjem temperature, dok u poluvodičima vrijedi obratno. Za mnoge materijale i limitirane raspone temperature može se pretpostaviti linearna ovisnost otpornosti o

temperaturi:

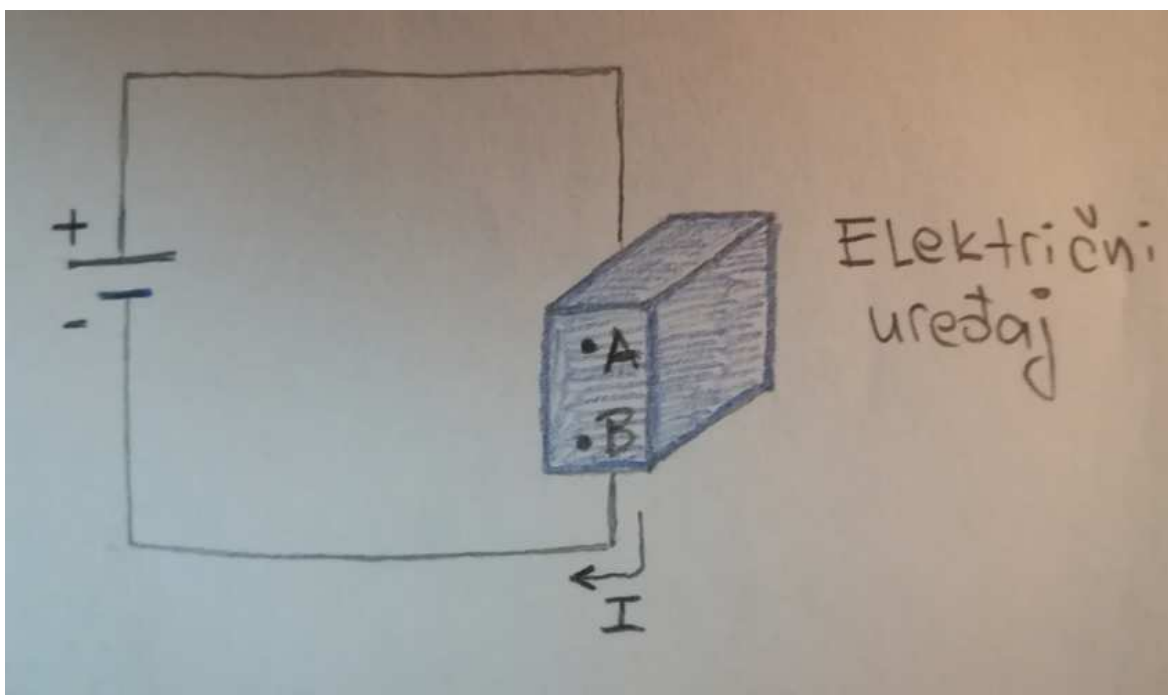
$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

Izrazi  $\rho$  i  $\rho_0$  su otpornosti na temperaturama  $T$  i  $T_0$ . Izraz  $\alpha$  je temperaturni koeficijent električnog otpora. Kad se otpornost povećava s povećanjem temperature,  $\alpha$  je pozitivan, to većinom vrijedi za metale. Kad se otpornost smanjuje s povećanjem temperature,  $\alpha$  je negativan, što vrijedi za poluvodiče. Ako jednadžbu pomnožimo s  $\frac{L}{A}$  dobijemo ovisnost otpora o temperaturi:

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

#### 4.4 Električna snaga

Jedna od najvažnijih funkcija struje u električnom krugu je prijenos energije od izvora (npr. baterije) do električnog uređaja, kao što je prikazano na slici.



Slika 4.1: Struja  $I$  donosi energiju električnom uređaju

Pozitivan (+) pol baterije je žicom spojen s točkom  $A$  u uređaju, također negativan (–) pol baterije je žicom spojen s točkom  $B$  u uređaju. Na taj način baterija održava konstantnu potencijalnu razliku između točaka  $A$  i  $B$ , točka  $A$  nalazi se na višem potencijalu. Kad se količina pozitivnog naboja  $\Delta q$  kreće od višeg potencijala ( $A$ )

prema nižem potencijalu ( $B$ ), potencijalna energija se smanjuje za iznos  $(\Delta q)V$ , gdje je  $V$  iznos napona između točaka  $A$  i  $B$ . Promjena energije u vremenu je snaga  $P$ , električna snaga povezana s ovom promjenom u energiji je:

$$P = \frac{(\Delta q)V}{\Delta t} = \frac{\Delta q}{\Delta t}V = I \cdot V$$

Izraz  $\frac{\Delta q}{\Delta t}$  je naboj po jediničnom vremenu, odnosno struja  $I$  u uređaju. Električna snaga je produkt struje i napona.

### ELEKTRIČNA SNAGA

Kad električni naboj teče od točke  $A$  do točke  $B$  u električnom krugu, dolazi do struje  $I$ , a napon između točaka  $A$  i  $B$  je  $V$ , električna snaga povezana sa strujom i naponom je:

$$P = IV$$

SI mjerna jedinica električne snage je  $watt(W) = [A \cdot V]$ .

Kad se naboj kreće kroz uređaj, naboj gubi električnu potencijalnu energiju. Zakon očuvanja energije nam kaže da smanjenje potencijalne energije prati prijenos energije u neke druge oblike. U mobitelu, prenesena se energija pojavljuje kao svjetlosna energija (osvijetljen ekran), zvučna energija (zvuk iz zvučnika), termalna energija (uslijed zagrijavanja kućišta), itd.

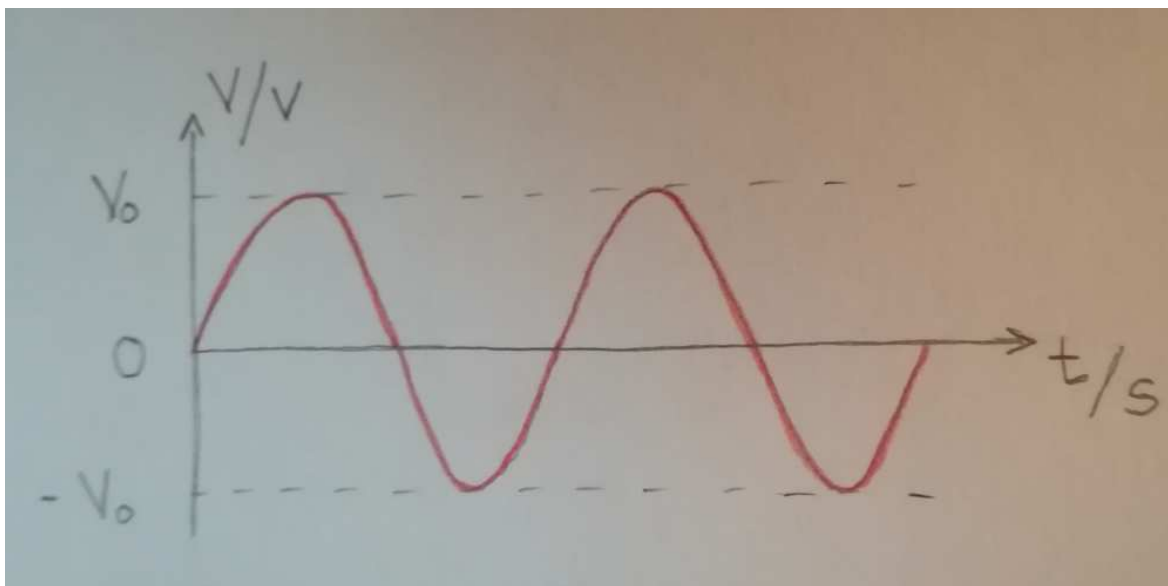
Naboj u električnom krugu može i dobiti energiju. Kad se naboj kreće kroz bateriju prikazanoj na slici, naboj se kreće od nižeg prema višem potencijalu, upravo suprotno od onog što se događa unutar električnog uređaja. U ovom slučaju, naboj dobiva električnu potencijalnu energiju. Do povećanja u energiji unutar baterije dolazi od kemijske energije koja je pohranjena u bateriji. Na taj način, naboj stječe energiju koju je izgubio u električnom uređaju, na račun kemijske energije u bateriji.

## 4.5 Izmjenična struja

U strujnim krugovima u kojima imamo izmjeničnu struju, naboj mijenja smjer kretanja periodički. Generator u krugu izmjenične struje ima ulogu kao baterija u krugu istosmjerne struje, on daje energiju električnim nabojima.

Svi u kućanstvu koristimo izmjeničnu struju. Generator je smješten u elektrani.

Slika 4.2 prikazuje graf ovisnost napona  $V$ , proizvedenog između polova izmjeničnog generatora, o vremenu  $t$ .



Slika 4.2: Graf ovisnosti napona  $V$  o vremenu  $t$

Ovo je uobičajeni tip izmjeničnog napona. Napon fluktuirá između pozitivne i negativne vrijednosti kao funkcija vremena:

$$V = V_0 \sin(2\pi ft)$$

gdje je  $V_0$  maksimalna vrijednost napona, a  $f$  je frekvencija (mjerena u  $Hz$ ) kojom napon oscilira.

Struja u izmjeničnom krugu također oscilira. U krugovima koji sadrže samo otpor, struja mijenja smjer svaki put kad se promijeni polaritet generatora. Supstitucijom  $V = V_0 \sin(2\pi ft)$  u jednadžbu  $I = \frac{V}{R}$  dobijemo izraz za struju:

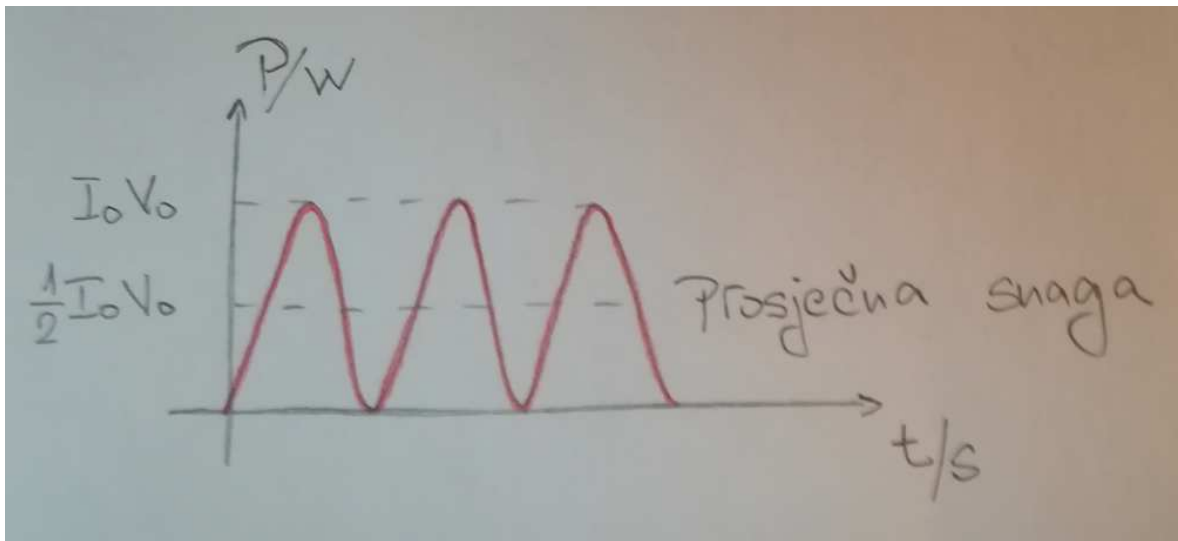
$$I = I_0 \sin(2\pi ft)$$

Maksimalna struja  $I_0$  je određena ako znamo iznos maksimalnog napona i otpora,  $I_0 = \frac{V_0}{R}$ .

Snaga koju generator preda izmjeničnom krugu je dana izrazom  $P = IV$ , isto kao i u istosmjernom krugu. Međutim, kako  $I$  i  $V$  oboje ovise o vremenu, snaga fluktuirá kako vrijeme prolazi:

$$P = I_0 V_0 \sin^2(2\pi ft)$$

ovaj izraz je prikazan na slici 4.3.



Slika 4.3: Graf ovisnost snage P o vremenu t

Pošto snaga fluktuira u vremenu, uobičajeno je promatrati prosječnu snagu  $\bar{P}$ , koja se nalazi na polovini maksimalne snage:

$$\bar{P} = \frac{1}{2} I_0 V_0$$

Preuređivanjem gornje jednadžbe dobijemo sljedeći izraz:

$$\bar{P} = \left( \frac{I_0}{\sqrt{2}} \right) \left( \frac{V_0}{\sqrt{2}} \right) = I_{eff} V_{eff}$$

$I_{eff}$  i  $V_{eff}$  su efektivne vrijednosti struje i napona, dobijemo ih tako da maksimalnu vrijednost podijelimo s  $\sqrt{2}$ .

$$I_{eff} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$$

$$V_{eff} = \frac{V_0}{\sqrt{2}}$$



## 5 DEMONSTRACIJSKI POKUSI

### 5.1 *Balon na zidu*

Pribor: balon, vunena vesta, štoperica, zid.



Slika 5.1: Balon na zidu

#### EKSPERIMENT:

Držite balon za kraj na kojem je zavezan [5]. Balon protrljajte jednom o vunenu vestu, u jednom smjeru. Prislonite balon o zid tako da uza zid prijanja ona strana balona koja je bila u kontaktu s vestom. Drži li se balon za zid? Ako se balon drži, pokrenite štopericu i izmjerite vrijeme tijekom kojeg je balon bio na zidu. Ako se balon nije držao ponovite postupak, s tim da svaki put povećavate broj trljanja balona o vunenu vestu. Trljajte balon u istom smjeru svaki put. Ne trljajte balon naprijed - nazad. Koliko puta ste protrljali balon tako da se on držao na zidu nekoliko sekunda? Koliko za nekoliko minuta? Hoće li trljanje u jednom smjeru dati različite rezultate

od trljanja balona naprijed - nazad? Probajte usporediti isti broj trljanja balona u jednom smjeru s onim naprijed - nazad. U kojem slučaju balon ostaje dulje na zidu?

#### PRINCIP RADA:

Zašto kad skinemo zimsku kapu kosa ostane stajati u zraku? Ovaj efekt nastaje zbog statičkog elektriciteta, ali kako statički elektricitet nastaje i zašto drži kosu u zraku? Statički elektricitet je posljedica viška električnog naboja u predmetu. Ponekad se statički elektricitet može odjednom isprazniti, na primjer munja, pražnjenja atmosferskog električnoga naboja koncentriranog u olujnim, grmljavinskim oblacima. Statički elektricitet može uzrokovati da se predmeti drže jedno za drugo. Takav primjer su čarape iz sušilice koje su zalijepljene zajedno. To se događa kad predmeti imaju suprotne naboje, pozitivne i negativne, koji se međusobno privlače. Predmeti s istim nabojima se odbijaju. Statički elektricitet može nastati kad se predmeti trljaju jedan o drugi. Trljanjem prenosimo elektrone s jednog tijela na drugo. Na primjer, kad trljamo stopala o tepih, stvaraju se brojni površinski kontakti između stopala i tepiha koji dopuštaju elektronima da prijeđu s tepiha na stopala, na taj način se nakuplja statički naboj na koži. Kad dotaknemo drugu osobu ili predmet možemo se izbiti putem električnog šoka. Slično, kad se balon trlja o kosu, suprotni naboji se uspostavljaju na balonu i kosi. Kad balon polagano odvojimo od kose, možemo vidjeti kako se suprotni naboji privlače i ostavljaju kosu da stoji uspravno.

Općenito, u kojem slučaju se balon dulje držao na zidu?

Tijekom trljanja vuna lakše od balona predaje elektrone. Zato kad se balon trlja o vunu, elektroni s vune prelaze na površinu balona. Guma je električni izolator, što znači da se opire tome da se električni naboj kreće kroz nju. To je razlog zašto je samo dio balona negativno nabijen, onaj dio koji je bio trljan o vunenu vestu, a ostatak balona je neutralan. Kad balon protrljamo toliko puta da dobije dovoljnu količinu negativnog naboja, on će se privući uza zid. Iako je zid inače električki neutralan, naboji unutar zida se mogu preraspodijeliti tako da pozitivno nabijeno područje privlači negativno nabijen balon. Zid je električni izolator i zato se naboj ne izbije odmah.

## 5.2 Zakretanje putanje vode

Pribor: balon, slavina s vodom.

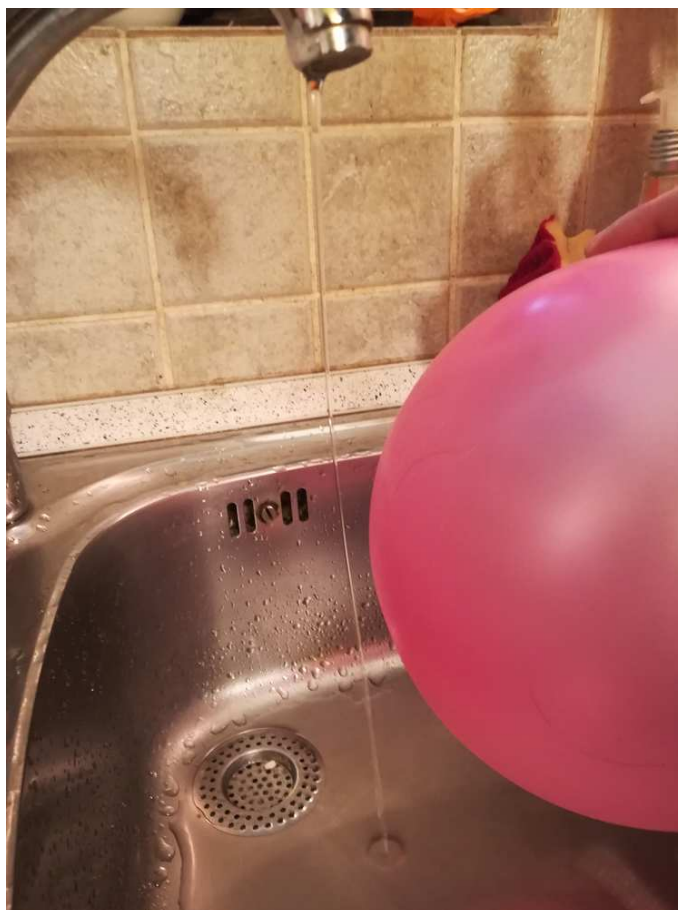


Slika 5.2: Ravan mlaz vode

### EKSPERIMENT:

Pustimo vodu da teče iz slavine, namjestimo da voda teče u tankom mlazu [4]. Tražimo učenike da primijete kako voda teče ravnim mlazom iz slavine do slivnika. Protrljamo balon nekoliko sekundi o čistu i suhu kosu. Balon i kosa su naelektrizirani kad vlasi kose ostanu stajati u zraku. Naelektrizirani balon prinesemo mlazu vode bez da smočimo balon. Što se događa s mlazom vode? Odmaknemo balon od mlaza vode. Što se sad događa s mlazom vode?

Dodatno se mogu i drugi materijali prinijeti mlazu vode. Učenici mogu samostalno istraživati što će zakrenuti mlaz vode, a što neće.



Slika 5.3: Mlaz vode zakrivljen u blizini električki nabijenog balona

#### PRINCIP RADA:

Što se događa kad balon protrljamo o kosu? Kad balon protrljamo o kosu, balon povuče elektrone iz kose. Negativno nabijen balon privlači nabijene predmete. Kosa je ostala pozitivno nabijena.

Što se događa s mlazom vode kad statički nabijen balon dovedemo u blizinu? Što se događa kad balon odnesemo? Što mislite zašto se to događa?

Kad se balon protrlja o kosu, negativni naboji (elektroni) se pomaknu s kose na balon, ostavljajući balon negativno nabijenim. Mikroskopski, voda se sastoji od molekula s neravnomjernom raspodjelom električnog naboja. Približimo li negativno nabijen balon mlazu vode, pozitivno nabijeni dijelovi molekule vode (atomi vodika) su privučeni negativnom naboju i zakrenu mlaz vode prema balonu.

Zašto se voda ne privuče skroz na balon tako da počne teći po njemu? Iako je električno privlačenje između balona i vode jako, voda je sama po sebi dovoljno teška pa ju sila gravitacija povlači prema dolje. Tako da kad se makne balon od mlaza

vode, gravitacija povlači vodu ravno prema slivniku.

### 5.3 *Sol i papir*

Pribor: sol, papir, tanjur, balon, komad vune.



Slika 5.4: Smjesa soli i papra

#### EKSPERIMENT:

Sol i papir pomiješamo na tanjuru. Balon protrljamo komadom vune. Naelektrizirani balon prinesemo smjesi soli i papra. Papir se prilijepi uz balon.

#### PRINCIP RADA:

Tvari se sastoje od molekula i atoma [6]. Atomi, odnosno molekule su u normalnom stanju električki neutralni (njihov ukupni naboj je nula) jer imaju isti broj



Slika 5.5: Zrnca papra na balonu

protona i elektrona.

Zašto se male, električki neutralne i nevodljive čestice, poput onih soli i papra, lijepe za balon?

Razlog je pojava električne polarizacije. Kad se električki nabijen balon postavi u blizinu neutralnih čestica, dolazi do njihove polarizacije - razdvajanja električnih naboja pod utjecajem električnog polja. Električno polje balona utječe na raspodjelu naboja u česticama na način da se pozitivni naboji okrenu prema balonu, a negativni od njega. Na taj način dolazi do privlačne sile između čestica i balona.

Zrnca soli i papra su privučena balonu, i što je balon bliži zrnцу to jače su privučeni jedno drugom. Odnos električne i gravitacijske sile određuje koja zrnca će se prilijepiti uz balon, a koja će ostati na tanjuru. Masa zrnca papra je manja od mase zrnca soli, gravitacijska sila je slabija u odnosu na električnu, tako da će se zrnca papra prije prilijepiti uz balon. Međutim, na manjoj udaljenosti, električna sila je mnogo

jača i može privući i zrnca soli. Stoga ako želimo dobru separaciju soli i papra, važno je da nađemo udaljenost balona od tanjura na kojoj su zrnca papra prilijepljena uz balon, a zrnca soli nisu.

## 5.4 Kotrljanje limenke

Pribor: prazna limenka, balon, komad tkanine.



Slika 5.6: Balon i limenka

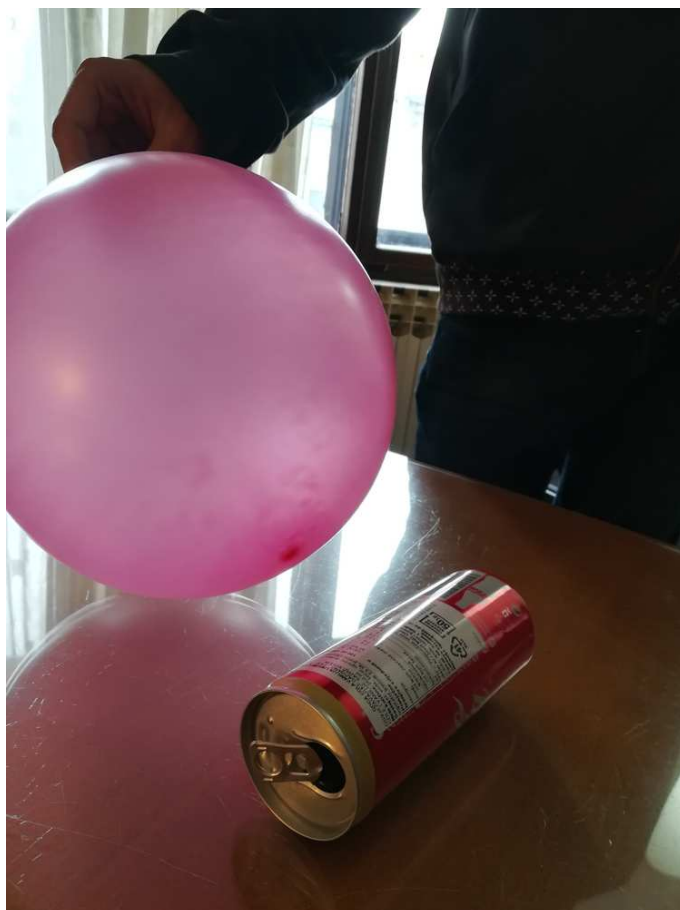
### EKSPERIMENT:

Limenku polegnemo na rub ravnog i glatkog stola [8]. Balon električki nabijemo pomoću komada tkanine. Primaknemo nabijeni balon limenci, bez dodirivanja i polagano odmičemo balon od limenke. Limenka se kotrlja prema balonu.

### PRINCIP RADA:

Balon smo negativno nabili kad smo ga protrljali komadom tkanine [9]. Za razliku od prethodnog pokusa, materijal limenke je vodič. U ovom slučaju približavanjem nabijenog balona, efekt električne polarizacije je jači. Pod utjecajem električnog polja balona, odnosno uslijed odbijanja s elektronima na balonu, vodljivi





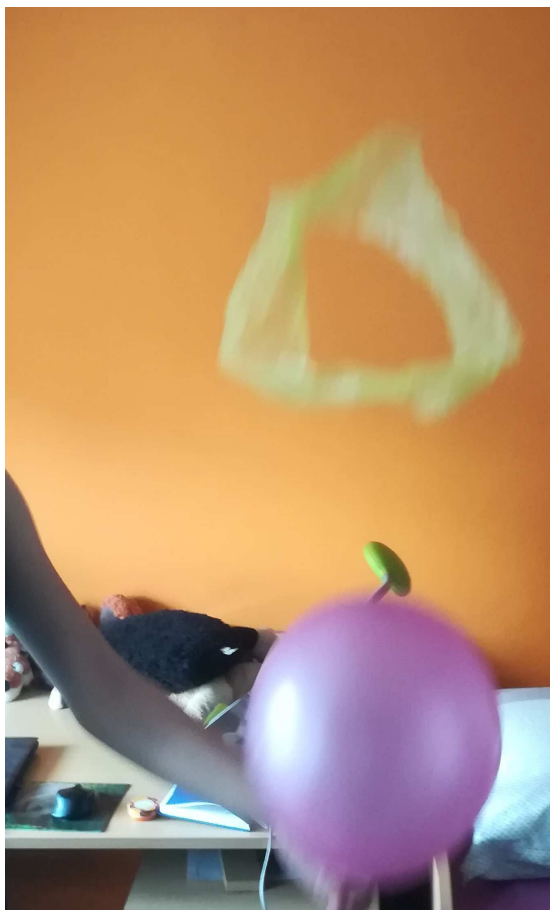
Slika 5.7: Kotrljanje limenke pomoću električki nabijenog balona

elektroni u limenci će biti pomaknuti prema suprotnoj strani limenke. Na taj način strana limenke prema balonu će postati pozitivna te će se jače privlačiti s balonom.

Koliko daleko možete kotrljati limenku pomoću nabijenog balona? Može li se limenka kotrljati uzbrdo?

## 5.5 Levitacija

Pribor: balon, komad tkanine, plastična vrećica, škarice.



Slika 5.8: Lebdenje vrećice iznad balona

### EKSPERIMENT:

Pomoću škarica se odreže 2 cm široka traka s otvorene strane plastične vrećice. Balon se napuše i zaveže [10]. Plastični prsten protrljamo komadom tkanine 15 do 20 puta u jednom smjeru. Balon također protrljamo tkaninom dvadesetak puta. Držimo balon u jednoj ruci, a u drugoj ruci držimo plastični prsten. Plastični prsten dignemo iznad glave i pustimo ga da pada prema podu. Prije nego što padne na pod, podmetnemo balon ispod plastičnog prstena. Treba paziti da prsten ne dođe u kontakt sa zidom ili balonom. U slučaju da pokus ne uspije, potrebno je ponovno električki nabiti prsten i balon.

## PRINCIP RADA:

Trljanjem tkanine o plastični prsten, elektroni prelaze s tkanine na prsten, ostavljajući prsten negativno nabijenim. Isti proces je obavljen i na balonu što znači da je i on negativno nabijen. Dva negativno nabijena predmeta se međusobno odbijaju i zato plastični prsten lebdi iznad balona.

### 5.6 Ispuštanje magneta kroz bakrenu cijev

Pribor: 4 neodimijska magneta, bakrena cijev, štoperica.



Slika 5.9: Bakrena cijev

## EKSPERIMENT:

Pustimo jedan neodimijski magnet da pada kroz bakrenu cijev i mjerimo vrijeme prolaska kroz cijev. Ponovimo postupak za dva, tri i četiri magneta.



Slika 5.10: Neodimijski magneti

#### PRINCIP RADA:

Kad magnet pada kroz električki vodljivu, ali nemagnetsku cijev, dolazi do induciranja magnetskog polja [11]. Iz Lenzovog pravila znamo da će se inducirati struja u cijevi koja će stvoriti magnetsko polje koje će pokušati poništiti povećanje magnetskog polja magnetu. Koristeći pravilo desne ruke, ako usmjerimo desni palac u smjeru suprotstavljenog magnetskog polja, prsti ruke su uvijaju u smjeru struje.

Silnice magnetskog polja imaju oblik ravnih linija uz bok magnetu, gdje je polje konstantno. U tom području cijev ne osjeća promjenjivo polje pa struja pada skoro na nulu. Kad zadnji dio magnetu prolazi kroz cijev, magnetsko polje počinje konvergirati prema južnom polu i cijev doživljava smanjenje u jakosti polja. Lenzovo pravilo kaže da će se inducirati struja koja će stvoriti magnetsko polje koje će pokušati ojačati smanjenje polja. U ovom slučaju to znači da inducirano polje će pokazivati prema dolje u istom smjeru kao polje magnetu. Kako inducirano polje pokazuje prema dolje, što je smjer magnetskog sjevernog pola i pošto se suprotni polovi privlače, južni pol padajućeg magnetu doživljava povlačenje prema gore. Pravilo desne ruke nam kaže da blizu kraja padajućeg magnetu struja teče u suprotnom smjeru, od desno prema lijevo.

Padajući magnet inducira dvije struje. Jednu koja rotira nadesno oko donjeg kraja i jednu koja rotira nalijevo oko gornjeg kraja magneta. Struja s donjeg kraja magneta stvara magnetsko guranje prema gore, a struja s gornjeg kraja stvara magnetsko povlačenje prema gore. Ove dvije sile usporavaju pad magneta. Ovaj opis podrazumijeva da inducirane struje i njihova odgovarajuća magnetska polja poništavaju dio gravitacijske sile koja povlači magnet prema dolje. Kad bi inducirane struje samo poništile dio gravitacijske sile imali bi ukupnu silu prema dolje koja djeluje na magnet. Tada bi magnet ubrzavao prema dolje kad bi padao kroz bakrenu cijev. Međutim to se ne događa. Magnet pada kroz cijev konstantnom brzinom. Magnet prolazi kroz mnoštvo ubrzavanja i usporavanja.

Zašto se vrijeme pada kroz cijev smanjuje s povećanjem broja magneta?

Silnice magnetskog polja uz bok magneta su ravne i nema promjenjivog magnetskog polja na cijevi. Stoga Lenzova struja i pridruženo magnetsko polje su nula. Zato povećanje broja magneta ne mijenja jakost magnetskog polja dovoljno da bi nadjačao povećanje gravitacijske sile uzrokovane većom težinom magneta.

## 5.7 *Elektromagnetski vlak*

Pribor: 10 m neizolirane bakrene žice, 4 neodimijska magneta, AA baterija.



Slika 5.11: Namotana, bakrena žica i baterija s neodimijskim magnetima

## EKSPERIMENT:



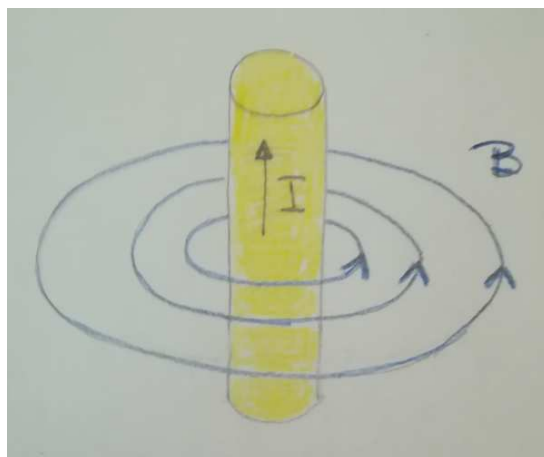
Slika 5.12: Kretanje baterije s magnetima kroz namotanu, bakrenu žicu

Na svaki kraj baterije se stavi po dva magneti [12]. Magneti trebaju biti postavljeni na krajeve baterije tako da su im polovi orijentirani u suprotnom smjeru. Bakrenu žicu treba namotati tako da ide oko baterije. Na hrvatskom tržištu ne postoji neizolirana bakrena žica, tako da je potrebno s PVC žice pomoću kliješta za skidanje izolacije skinuti izolaciju. Bateriju na čijim su krajevima neodimijski magneti pustimo da prođe kroz bakrenu zavojnicu.

## PRINCIP RADA:

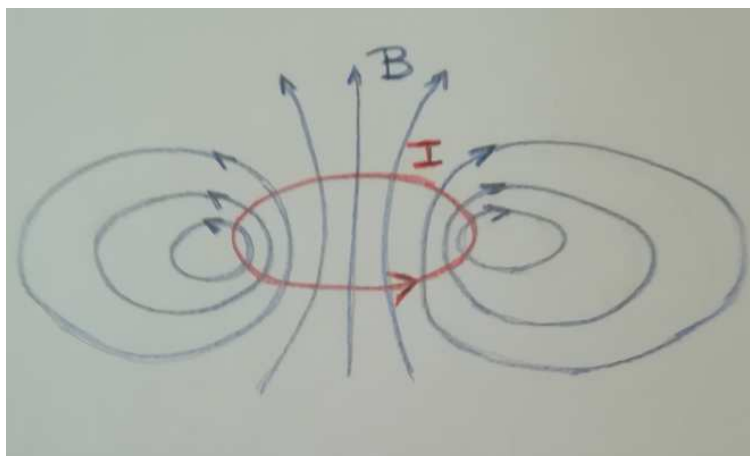
Princip rada elektromagnetskog vlaka ovisi o vezi između pokretnih električnih naboja i magnetizma [7]. Danski fizičar Hans Oersted je pokazao da struja koja teče kroz ravni vodič stvara magnetsko polje oko vodiča.

Polje  $B$  predstavlja polje sile koja međudjeluje s bilo kojim magnetom kojeg prine-



Slika 5.13: Silnice magnetskog polja oko dugog, ravnog vodiča

semo. Takav magnet će nastojati učiniti dvije stvari: on će se rotirati kako bi orijentirao sjeverni i južni pol u pravcu silnica magnetskog polja i bit će privučen u područje jačeg polja, tamo gdje su gušće silnice magnetskog polja. Silnice magnetskog polja stvaraju se oko pravca kretanja električne struje prema pravilu desne ruke: palac desne ruke pokazuje u smjeru struje, a prsti se zakrivljuju u smjeru silnica. Pravilom desne ruke prikazujemo polje oko petlje kojom teče struja.

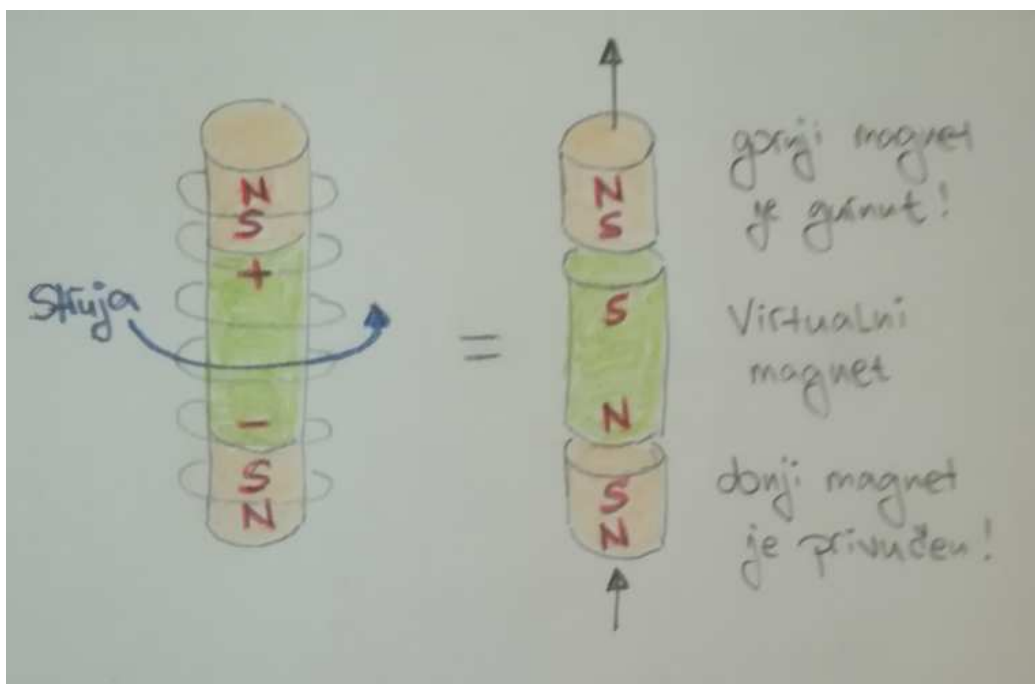


Slika 5.14: Magnetsko polje magnetskog dipola

Petlja ima "vrh" i "dno" ili prikladno "sjeverni" i "južni" pol. Sjeverna strana petlje je strana iz koje linije polja proizlaze, južna strana je strana u koju linije polja ulaze. Petlja ima dva pola i zato ju zovemo dipol. Strujna petlja se ponaša poput magneta, što znači da se južni i sjeverni polovi međusobno privlače, dok se sjeverni - sjeverni i južni - južni polovi međusobno odbijaju. Kad postavimo bateriju s magnetima unutar zavojnice, zatvorili smo strujni krug i struja teče kroz zavojnicu. Zavojnica je mnoštvo strujnih petlji složenih jedne na drugu, te je područje u zavojnici između magneta



također magnet. "Virtualni magnet" kojeg čini struja koja teče kroz zavojnicu gura prema naprijed gornji magnet i vuče prema sebi donji magnet. Baterija koja se nalazi između magnetata je također povučena.



Slika 5.15: Virtualni magnet

Pri izvođenju pokusa potrebno je paziti da magneti koji se prislanjaju na krajeve baterije imaju sjeverne polove orijentirane u suprotnim smjerovima, inače se vlak neće kretati jer će oba magnetata gurati ili vući. Baterija AA se koristi kao izvor napajanja. Važno je da žica bude neizolirana, u suprotnom struja neće poteći i ništa se neće dogoditi.

## 5.8 *Teslin transformator*

Pribor:

plastična cijev duljine 30cm

100m bakrene žice

30cm PVC izolirane žice

drveno postolje

2222A tranzistor

22k $\Omega$  otpornik

prekidač

vodiči

4.5V baterija



Slika 5.16: Teslin transformator



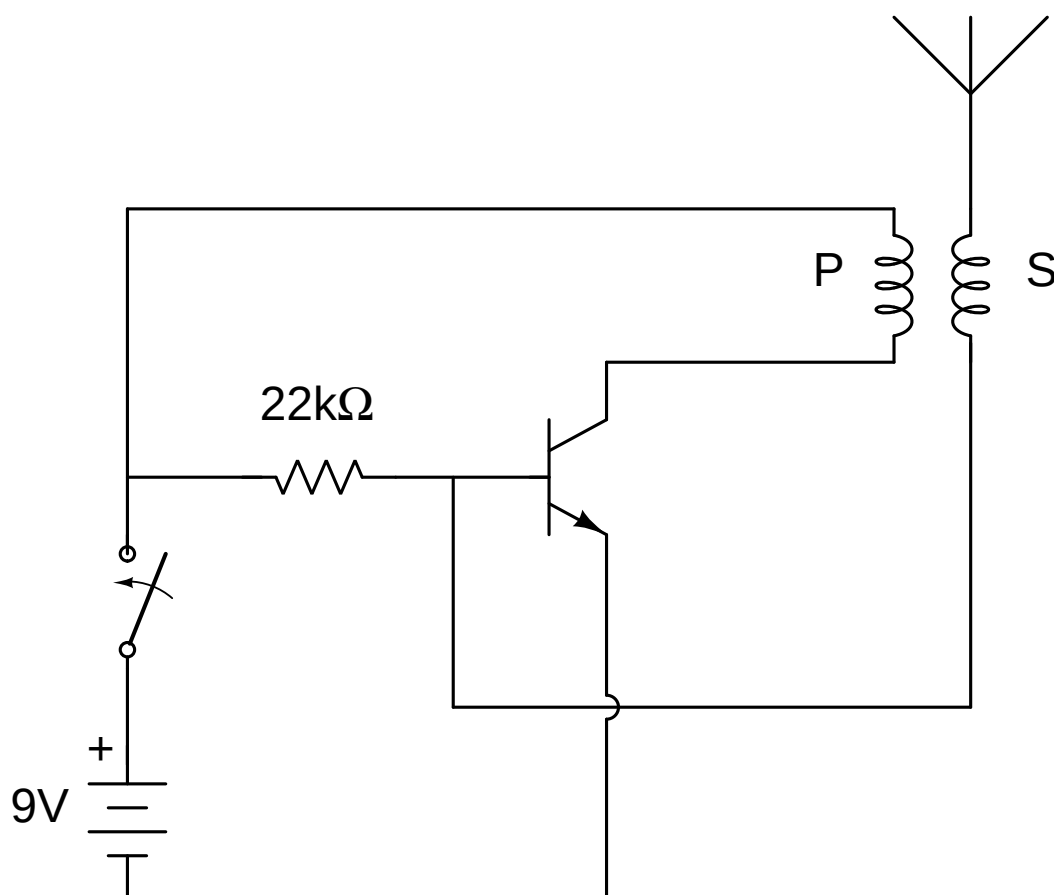
Slika 5.17: Teslin transformator

#### EKSPERIMENT:

Prvo namotamo bakrenu žicu na plastičnu cijev. Treba paziti pri namatanju žice da ne ostaju prazna mjesta među žicama, i da žice ne prelaze jedna preko druge. Bakrenu žicu je najbolje namotati pomoću bušilice. Prvo se smanji broj okretaja na bušilici pomoću regulacijskog transformatora. Zatim se na bušilicu postavi plastična cijev i bakrenu žicu polagano namatamo na cijev. Potom, primar i sekundar spojimo u strujni krug prikazan na slici 5.17. Na shemi je primar prikazan kao kraća, a sekundar kao dulja zavojnica. Na vrh sekundara se postavlja bakreni prsten koji ima ulogu antene. Teslin transformator je najbolje koristiti vani, jer nije siguran za električna trošila.

Princip rada Teslinog transformatora:

Teslin transformator ili Teslina zavojnica je transformator za proizvodnju visokog



Slika 5.18: Shema Teslinog transformatora

napona i izmjenične struje visokih frekvencija kojeg je izumio Nikola Tesla [3]. Primar Teslina transformatora se sastoji od električne zavojnice načinjene od žice s malo zavoja, visokonaponskog električnog kondenzatora i iskrišta. Sekundar je električna zavojnica načinjena od mnoštva zavoja tanke žice, te je smještena unutar primara. Za razliku od uobičajenih transformatora, Teslin transformator ne sadrži željeznu jezgru jer bi gubici energije bili preveliki. Električni kondenzator se nabija do velikih napona pomoću izvora. Kondenzator se prazni preko iskrišta kroz primarnu zavojnicu, uslijed čega dolazi do stvaranja visokofrekventnog magnetskog polja koje uzrokuje indukciju u sekundarnoj zavojnici. Da bi inducirani napon bio velik, sekundarna zavojnica ima vrlo velik broj zavoja. Visoki naponi u Teslinu transformatoru stvaraju snažne iskre ili duge pramenove svjetlosti ako se na vrh sekundarne zavojnice stavi metalni prsten.

Postoji mnogo modela Teslinog transformatora. Model koji je napravljen u ovom radu je Single resonant solid state Tesla coil (SRSSTC) [13]. U ovom sklopu primar nema kondenzator, tako da postoji samo strujni krug sekundara.

Što će se dogoditi sa žaruljom ako ju prinesemo upaljenom Teslinom transformatoru?

Vrh Tesline zavojnice ima jako visok električni potencijal, te ga možemo smatrati modelom pozitivnog točkastog naboja. Uključivanjem Teslinog transformatora i dovodenjem neonske cijevi koja nam služi kao detektor električnog polja, u njenu neposrednu blizinu neonska cijev zasvijetli. Tako smo pokazali da postoji električno polje u prostoru oko Tesline zavojnice.

Koje su karakteristike električnog polja koje stvara Teslin transformator?

Pomicanjem neonske cijevi od Teslinog transformatora može se primijetiti da neonska cijev svijetli sve slabijim intenzitetom. Učenici mogu zaključiti da je električno polje koje djeluje na neonsku cijev slabije. Električno polje je najjače na samom vrhu Teslinog transformatora. Učenici mogu zaključiti da je Teslin transformator izvor električnog polja i da je polje u izvoru najjače.

Kako se jakost električnog polja mijenja od izvora u prostor?

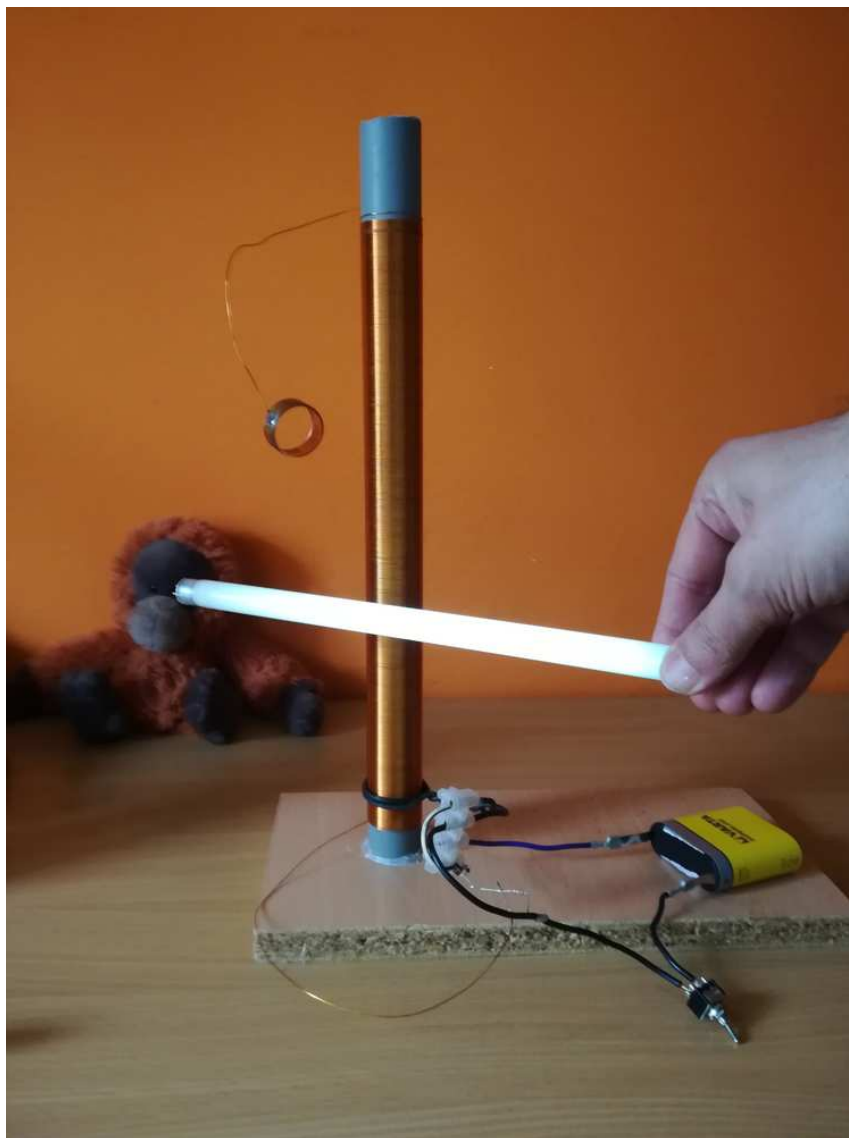
Intenzitet električnog polja se smanjuje udaljavanjem žarulje od izvora električnog polja. Iz izraza:

$$E = k \frac{q}{r^2}$$

gdje je  $k$  konstanta, vidimo da je jakost električnog polja  $E$  obrnuto proporcionalna s kvadratom udaljenosti  $r$ . Gdje je  $r$  udaljenost od izvora električnog polja do neonske cijevi. Pomicanjem neonske cijevi od Teslinog transformatora u bilo kojem smjeru možemo vidjeti da neonska cijev na istoj udaljenosti  $r$  od izvora svijetli jednakim intenzitetom. Učenici mogu zaključiti da se električno polje od izvora širi radijalno u prostor. Korisno je napraviti analogiju s kamenčićem koji pada na mirnu površinu vode. Valovi koje je stvorio kamenčić se šire radijalno od mjesta gdje je upao u vodu.

Stigne li sva energija iz Teslinog transformatora do žarulje?

Učenici sad već znaju da se odmicanjem neonske cijevi od Teslinog transformatora intenzitet svjetlosti smanjuje i mogu samostalno zaključiti da količina energije koju će elektromagnetski val prenijeti neonskoj cijevi ovisiti o udaljenosti Teslinog transformatora od neonske cijevi.



Slika 5.19: Neonska žarulja svijetli pomoću Teslinog transformatora

## 6 ZAKLJUČAK

Elektricitet je dio osnovnoškolskog i srednjoškolskog kurikula. Istraživanja su potvrdila da učenici imaju mnogo poteškoća s učenjem o elektricitetu. Istraživanja o nastavi temelje se na konstruktivističkom pristupu i usmjerena su na alternativne puteve koji mogu učenicima olakšati izgradnju znanstvenih spoznaja. Značajan pomak je da se pri poučavanju elektriciteta pokušava prilagoditi poteškoćama učenika, a ne samo prezentirati sadržaj na odgovarajući način.

Da bi učenici lakše shvatili fizikalne pojave uvodimo demonstracijske pokuse. Oni se izvode pred cijelim razredom i koriste za uvođenje nove fizikalne pojave, ali se mogu koristiti za provjeru učenikovog razumijevanja. Svrha demonstracijskih pokusa je da pokažu primjenu fizikalnih pojava, te da potaknu učenike na razmišljanje i samostalno donošenje zaključaka. Uvođenje demonstracijskih pokusa u nastavu ne zahtijeva veliku potrošnju novca. Pokuse u većini slučajeva možemo izvesti s predmetima iz svakodnevnog života. Nastavnik treba isplanirati i isprobati pokuse prije izvođenja u razredu, razmisliti kako će pokus uvrstiti u nastavni sat i osmisлити pitanja za učenike kako bi ih potaknuo na razmišljanje i lakše doveo do zaključaka.

U ovom je radu dan prikaz demonstracijskih pokusa na temu elektriciteta. Navedeni su i objašnjeni pokusi pri čijoj se izvedbi koriste jednostavni predmeti poput baterija, balona, magneta, bakrene žice, soli i papra, prazne limenke što omogućuje izvedbu u svakoj školi. Stoga ovaj rad može pomoći nastavnicima da uključe demonstracijske pokuse u svoje nastavne aktivnosti.

Jednostavnost opreme za izvedbu pojedinih pokusa otvara i druge mogućnosti vezano uz metode izvedbe nastave. Suvremena nastava usmjerena je prema aktivnom sudjelovanju učenika koje uključuje istraživanje i samostalno zaključivanje. To je osnova istraživački orijentirane nastave. Pokusi prezentirani u ovom radu lako se mogu uklopiti u ovaj oblik nastave. Nastavnik treba prirediti istraživačke zadatke, odnosno potaknuti učenike da postavljaju pitanja te da odgovore traže izvođenjem pokusa. Rezultate svojih istraživanja mogu na primjer unositi na prethodno priređene radne listiće. Učenici mogu prezentirati rezultate do kojih su došli istraživanjem te diskutirati o zaključcima.

## Literatura

- [1] Cutnell, J.D.; Johnson K.W. Physics. 8th ed. New Jersey: John Wiley and sons, Inc., 2009.
- [2] Teaching introductory electricity, <https://www.univie.ac.at/pluslucis/Archiv/ICPE/E4.html>, 5.5.2018.
- [3] Gagić, D. Metodičko oblikovanje kompleksnih fiziklanih opažanja – Teslina zavojnica. Diplomski rad. Zagreb : Prirodoslovno-matematički fakultet, 2010.
- [4] Bend water with static electricity, (4.5.2011.) Scientific American, <https://www.scientificamerican.com/article/static-electricity-bring-science-home/>, 5.5.2018.
- [5] Attraction with static electricity, (January 2012.) Scientific American, <https://www.scientificamerican.com/article/bring-science-home-static-electricity-attraction/>, 5.5.2018.
- [6] Separating a mixture of salt and pepper, (7.6.2014.), Davidson Institute, <https://davidson.weizmann.ac.il/en/online/scienceathome/separating-mixture-salt-and-pepper>, 5.5.2018.
- [7] The mystery of the magnetic train, (12.12.2014.), Skulls in the stars, <https://skullsinthestars.com/2014/12/12/the-mystery-of-the-magnetic-train/>, 5.5.2018.
- [8] Remote control roller, [https://www.exploratorium.edu/science\\_explorer/roller.html](https://www.exploratorium.edu/science_explorer/roller.html), 5.5.2018.
- [9] Aluminium can static roll, Questacon, <https://www.questacon.edu.au/outreach/programs/science-circus/videos/aluminium-can-static-roll>, 5.5.2018.
- [10] At Home Experiment 2: Static Levitation, (9.10.2014.), Explosions, Inc., <http://www.explosionsinc.com/blog/2014/10/09/at-home-experiment-2-static-levitation>, 5.5.2018.



- [11] Lenz's law: magnet falling through a copper tube or pipe,  
<http://www.waynesthisandthat.com/Lenz's%20Law%20Magnet%20Falling%20Through%20a%20Copper%20Tube%20or%20Pipe.html>, 5.5.2018.
- [12] How to build a simple electromagnetic train, (10.3.2015.), Frugal fun for boys and girls, <https://frugalfun4boys.com/2015/03/10/how-to-build-a-simple-electromagnetic-train/>, 5.5.2018.
- [13] Tesla coil, Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla\\_coil](https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_coil), 5.5.2018.