

# Elektrostatika

---

## 1) Základní vlastnosti elektrického náboje

### **Zeлектроvané brčko drží na zdi**

A nejen na zdi, ale i na tabuli, kovovém rámu dveří, ... Experiment je vhodný jako úvodní motivační pokus. K jeho vysvětlení je ale vhodné se vrátit až později, při probírání polarizace dielektrik a elektrostatické indukce.

#### **Pomůcky**

brčko, papírový kapesník

#### **Postup**

Brčko nabijeme třením o látku nebo papírový kapesník a přiložíme na zeď či jiný povrch.

Je vhodné vyzkoušet různé povrchy včetně kovových.

#### **Závěr**

Brčko se udrží na různých površích včetně vodivých obvykle po velmi dlouhou dobu (i v řádech dnů).

Experiment lze vysvětlit pomocí polarizace dielektrika (v případě nevodivých povrchů) či elektrostatické indukce (v případě vodivých povrchů). V obou případech se v podložce do blízkosti brčka dostane opačný náboj (obvykle kladný, brčko se obvykle nabíjí záporně) a brčko tak drží pomocí elektrostatické síly. Vzhledem k tomu, že brčko je velmi dobrý izolant, vybije se i při dotyku s vodivou podložkou jen velmi malá část brčka, která se přímo dotýká podložky. Zbytek brčka zůstane nabitý, a brčko je tak stále k podložce přitahováno.

#### **Poznámky, na co si dát pozor**

Na hladkém povrchu se může brčko „kutálet“ dolů. Pomůže dát ho svisle, případně (pokud má brčko kloub), můžeme ho zalomit.

Brčko není třeba pro nabití „zuřivě třít“ mnohokrát za sebou. Podstatný je dobrý kontakt brčka s látkou, kterou ho třeme.

Je potřeba předem vyzkoušet vhodný typ brčka – některá se nabíjejí velmi špatně.

## **Polarita náboje**

Pomocí měřiče náboje zjistíte znaménko náboje, který vzniká na plastové a skleněné tyči třené různými materiály.

### **Pomůcky**

PVC tyč, flanel, skleněná tyč, kůže, teflon, měřič náboje (coulombmetr), vodiče

### **Provedení**

K určení polarity náboje použijeme coulombmetr, jehož jedna svorka je uzemněna.

PVC tyč třeme flanelem, poté k ní přiblížíme vodič (z neuzemněné) svorky coulombmetru. Ten ukáže zápornou hodnotu náboje. Naopak, pokud coulombmetr vybijeme a přiblížíme k němu flanel, ukáže kladný náboj.

Totéž zopakujeme se skleněnou tyčí třenou kůží.

Plastovou i skleněnou tyč třeme teflonovou folií a pomocí měřiče náboje určíme, zda je náboj indukovaný na tyči kladný nebo záporný.

### **Závěr**

Při tření PVC tyče flanelem vzniká na tyči záporný náboj, flanel se nabíjí kladně. Při tření skleněné tyče kůží vzniká na tyči kladný náboj, kůže se nabíjí záporně. Pokud PVC tyč třeme teflonem, zjistíme, že tyč se nabíjí kladně a teflon záporně.

To, který materiál se při vzájemném tření nabije kladně a který záporně, lze zjistit v tzv. triboelektrické řadě. Pokud třeme o sebe dva materiály, ten, který je v této řadě výše, se nabíjí kladně, druhý záporně. Vzhledem k tomu, že teflon stojí v této řadě velmi nízko, „nabíjí“ v podstatě všechny materiály kladně.

### **Na co si dát pozor**

Flanel není dobrý izolant, náboj se z něj velmi rychle vybíjí. Proto je dobré měření provést rychle – „hodit ho“ na svorku coulombmetru ihned po otření tyče.

### **Poznámka**

Termín „elektrický náboj vzniká třením“ je vlastně nesprávný – třením pouze přerozdělíme náboj z jednoho materiálu na druhý podle toho, z kterého materiálu se snáz uvolní elektrony. Přesto budeme tuto nepřesnou formulaci pro jednoduchost občas používat.

### **Další informace**

Umístění různých látek v triboelektrické řadě lze nalézt např. na <https://www.alphalabinc.com/content/tribo-electric-series/>

## Indikace náboje

Cílem tohoto bloku experimentů je vyzkoušet si různé způsoby, jak lze zjistit, že na tělese je náboj, a shrnout jejich principy.

### Pomůcky

PVC tyč, skleněná tyč, flanel, kůže, doutnavka, plechovka na izolační podložce, lístek alobalu, elektrooskop, „elektretka“, indikátor náboje, digitální měřič náboje, destička ukazující princip digitálního měřiče náboje, voltmetr Vernier, vodiče

### Provedení

Postupně vyzkoušejte různé způsoby, jak lze zjistit, že na daném tělese je náboj.

**a) Mezi nejjednodušší způsoby** indikace náboje patří dotyk; pokud se nabitá tyč dotknete rukou/vodičem, přeskóčí jiskra, která bývá slyšet a mnohdy i vidět.

**b) Kromě přeskóčení jiskry může při dotyku bliknout doutnavka;** dotkněte se doutnavkou nabitá tyč a nabitá plechovka. Čím se bliknutí liší?

Pozorovat lze i různou polaritu náboje po nabití plechovky záporným a kladným nábojem.

**c) Mnoho typů indikátorů využívá odpuzování dvou souhlasných nábojů** – díky tomu se vychýlí plíšek na elektrooskopu, případně alobalový lístek zavěšený na nabitá plechovce (vhodnější je ho zavěsit na kousek drátku, vychyluje se potom snáz). Vyzkoušejte jejich chování při opakovaném nabíjení nábojem stejného znaménka, vybití, nabíjení nejdřív nábojem jednoho znaménka a potom nábojem opačným. Princip indikace náboje vysvětlete.

### d) „Elektretka“

Brčko je uprostřed propíchnuté špendlíkem, který slouží jako osička, a je zapíchnutý do silnější špejle; mezi brčko a špejli je vhodné dát malý korálek pro zmenšení tření. Špejli zapíchněte např. do polystyrenu, aby stála svisle. Pokud jeden konec brčka zelektrujeme třením, bude se natáčet podle toho, zda k němu přiblížíme souhlasně nebo nesouhlasně nabitou tyč.



Poznámka: Název „elektretka“ je vytvořen podle vzorku magnetka, protože se v mnoha ohledech chová jako „elektrický kompas“. Pokud jeden konec brčka označíme a zelektrujeme druhý konec tak, že bude nabit záporně, bude označený konec ukazovat ve směru elektrické intenzity.

**\*e) Indikátor z tranzistorů** – souvislost mezi elektrickým nábojem a proudem

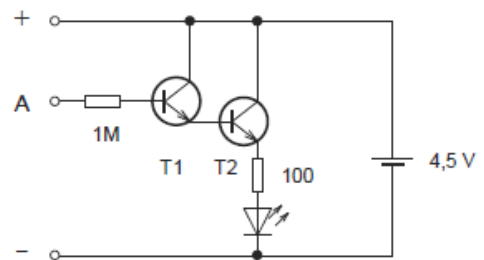
Ke svorce A indikátoru přiblížte (a poté od ní oddalujte) zelektrovanou PVC tyč a pozorujte, kdy LED svítí. Totéž zopakujte se zelektrovanou skleněnou tyčí.

Indikátor svítí, pokud ke svorce A přiblížíme kladně nabitý předmět, při jeho oddalování nesvítí. Je-li předmět nabitý záporně, indikátor reaguje opačně – svítí při oddalování předmětu. Díky tomu lze

rozlišit polaritu přibližovaného/oddalovaného předmětu. Indikátor reaguje na změnu náboje (tedy vlastně na proud). Je-li předmět i indikátor v klidu, LED indikátoru nesvítí.

### Princip indikátoru:

Na obrázku se schématem indikátoru lze ukázat jeho princip: pokud do svorky označené A poteče kladný náboj (např. pokud ji spojíme s kladným pólem baterie), bude do báze prvního tranzistoru téct proud, ten se zesílí, teče do báze druhého tranzistoru, je znovu zesílen a tento zesílený proud v emitorovém obvodu rozsvítí LED.



Vzhledem k dvojímu zesílení proudu tranzistory stačí k rozsvícení LED, pokud do báze prvního tranzistoru (tedy do svorky A) přivedeme proud v řádu jednotek až desítek nanoampér.

### Poznámky:

Které náboje označujeme za kladné a které za záporné je věcí dohody. Pokus však ukazuje, jak tato dohoda souvisí s označením + a – na baterii. Pokus také ukazuje souvislost pohybujícího se náboje a proudu.

V textu je sice zmíněno že „kladný náboj teče do báze“, ovšem je potřeba si uvědomit, že v kovovém vodiči se uspořádaným pohybem pohybují pouze elektrony nesoucí záporný náboj. Tzn. věta „kladný náboj teče do báze“ znamená, že záporné elektrony tečou opačným směrem.

### \*e) Digitální měřič náboje – využití vztahu mezi kapacitou kondenzátoru a nábojem

Digitálním měřičem náboje lze kromě polarity určit i velikost měřeného náboje. Jeho princip je založen na nabití kondenzátoru a změřením napětí na něm. Ze známé kapacity kondenzátoru a vztahu  $U = \frac{Q}{C}$  lze potom určit velikost náboje.

Podrobnější popis principu a experiment, kterým lze princip měřiče náboje demonstrovat, je v článku L. Dvořáka [4].

### Další informace

Některé z výše zmíněných indikátorů (konkrétně „elektretka“ a indikátor z tranzistorů), jsou podrobněji popsány v textu L. Dvořáka ([3]).

## Lze nabít i vodič

Experiment ukazuje, že třením lze nabít i vodič, nejen izolant.

### Pomůcky

kovová deska s izolačním držátkem, polystyrenová deska, coulombmetr, vodiče, krokosvorky

## Postup

Coulombmetr uzemníme, do druhé zdířky umístíme vodič, kterým budeme sbírat náboj z polystyrenové i kovové desky. Kovovou desku s izolačním držátkem třeme polystyrenovou deskou. Poté sesbíráme náboj z kovové desky (deska je vodivá, stačí se jí tak dotknout na jednom místě), coulombmetr ukáže hodnotu náboje. Jestliže vodičem sesbíráme náboj z polystyrenu, ukáže coulombmetr opačnou polaritu náboje.

## Závěr

Kovová deska se dá zelektrovat třením. Při tření kovové desky o polystyren vzniká na kovové desce kladný náboj, na polystyrenu záporný.

## Vodiče a izolanty

Experiment porovnává vodivost různých materiálů.

### Pomůcky

Dvě větší plechovky na izolačních podložkách, lístky alobalu, PVC tyč, flanel, tyčky z různých materiálů

### Provedení

Umístíme dvě větší plechovky s alobalovými lístky na izolační podložky tak, aby se vzájemně nedotýkaly. Obě plechovky postupně spojujeme různými materiály (plastové brčko, drát, dřevěná špejle, proužek papíru,...) a zjišťujeme, zda se po nabití jedné plechovky náboj přenesl i na druhou.

### Závěr

Mezi velmi dobré vodiče patří například kovy, dobře vede ale také vlhké dřevo. Proto se náboj přenesl například i po špejli, která ležela nějakou dobu vystavena vzdušné vlhkosti. Naopak velmi dobrým izolantem je plastové brčko, polystyren apod.

## 2) *Vzájemné elektrostatické silové působení*

### Kutálení plechovky

Experiment je vhodný jako úvodní motivační pokus. Jeho vysvětlení je vhodné nechat až k probírání elektrostatické indukce. Pohyb plechovky „do kopce“ může sloužit k velmi hrubému odhadu síly mezi brčkem a plechovkou, případně ke kvalitativnímu porovnání velikostí sil mezi plechovkou a brčkem/ dvěma brčky/ tyčí.

### Pomůcky

plechovka od nápoje, brčko nebo PVC tyč, papírový kapesník nebo flanel ke tření



## Postup

Zelektrované brčko nebo tyč přiblížíme k plechovce položené na bok a pozorujeme, že se plechovka začne kutálet směrem k brčku/tyči. Brčko by se nemělo plechovky přímo dotknout.

Plechovku můžeme přitahovat i do (velmi mírného) svahu, z toho lze odhadnout velikost síly, kterou brčko/tyč plechovku přitahuje.

Lze udělat i první pozorování závislosti velikosti síly na velikosti náboje: jestliže k plechovce přiblížíme dvě brčka, začne plechovka reagovat z větší vzdálenosti, stejně tak vyjede strmější svah ve srovnání s jedním brčkem.

## Závěr

Pomocí elektrostatické síly lze plechovku od nápoje ovládat na dálku. Vysvětlení experimentu je podobné jako vysvětlení toho, proč brčko drží na vodivé podložce.

## Poznámky

K experimentu je vhodná lehká vodivá plechovka (od nápoje). Konzerva je příliš těžká a špatně se rozpohybuje. Je vhodné dbát na to, aby podložka, po které se plechovka kutálí, nebyla skloněná. Síla mezi plechovkou a brčkem je poměrně malá, při větší nerovnosti na podložce nebo větším pomačkání plechovky se plechovka nemusí rozpohybovat.

## Silové působení mezi dvěma brčky

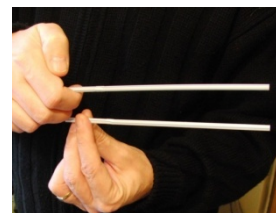
Experimenty jednoduchou formou ukazují silové působení mezi dvěma souhlasně nabitými brčky. Z experimentu lze také odhadnout velikost působící síly a velikost náboje na nabitém brčku.

## Pomůcky

dvě brčka, papírový kapesník/flanel

## Provedení

- 1) Nabijte dvě brčka a držte je svisle za kratší část „před kolínky“ a zkuste je k sobě přiblížit.
- 2) Nabijte dvě brčka a držte je v prstech vodorovně tak, aby byla nad sebou; horní brčko držte jen velmi volně, aby neuhýbalo do strany. V jisté vzdálenosti brček se bude horní brčko v podstatě „vznášet“, jeho tíha bude vyrovnána silou elektrostatického odpuzování. Pomocí vah lze zvážit horní brčko a z rovnováhy sil určit přibližně náboj na brčku.



## Závěr

Mezi dvěma souhlasně nabitými brčky působí elektrostatická odpudivá síla. Jestliže brčka držíme dle provedení 1), je síla cítit v prstech díky tomu, že brčka působí jako páka.

Tíha brčka a elektrostatická síla se vyrovnají ve vzdálenosti několika cm. Hmotnost brčka bývá 0,3 až 0,5 g. Z toho plyne, že tíha brčka (a tedy elektrostatická síla mezi oběma brčky) je přibližně  $4 \cdot 10^{-3}$  N. Známe-li elektrostatickou sílu, lze z Coulombova zákona odhadnout náboj na každém z brček, ten vychází řádově v desítkách nC.

### **Další informace**

Experiment je podrobně popsán v textu L. Dvořáka ([3]). V textu je rozebrán i vliv toho, že nabitě brčko nemá charakter bodového náboje.

## **Coulombův zákon popisující působení mezi dvěma nabitými kuličkami**

Cílem experimentu je demonstrovat závislost velikosti síly mezi dvěma bodovými náboji na vzdálenosti mezi náboji a na jejich velikosti. Jako modely bodového náboje jsou využity pingpongové míčky natřené vodivou barvou, k měření síly se používají citlivé váhy.

### **Pomůcky**

VN zdroj (příp. indukční elektrika), pingpongové míčky natřené vodivou barvou na stojáncích, digitální váhy s citlivostí alespoň 0,01 g, spojovací vodiče, příp. stativ

### **Provedení**

Experiment provedeme v několika krocích:

- 1) Jednu kuličku na stojánku postavíme na váhy, ty vynulujeme. Druhou kuličku držíme v ruce nebo ji umístíme do stativu. Obě kuličky nabijeme nábojem stejného znaménka z VN zdroje. Pokud volnou kuličku přiblížíme seshora ke druhé na vahách, pozorujeme, že se výchylka na vahách zvětšuje – váhy měří odpuzivou elektrostatickou sílu.
- 2) Totéž provedeme s kuličkami nabitými náboji opačného znaménka. Na vahách pozorujeme zápornou výchylku.
- 3) Obě kuličky nabijeme opět souhlasnými náboji, ale postupně měníme velikost náboje (tj. po provedení měření se kuliček dotkneme uzemněným vodičem a opět je nabijeme, ale na jiný potenciál nastavený na VN zdroj). Horní kuličku přiblížíme do stejné vzdálenosti jako v přechozím případě a pozorujeme výchylku na vahách – s klesající velikostí náboje se zmenšuje výchylka.
- 4) Pro ověření závislosti velikosti elektrostatické síly na vzdálenosti kuličky opět nabijeme, jednu postavíme na váhy, druhou posouváme do různé vzdálenosti. Pokud změníme vzdálenost mezi kuličkami např. dvakrát, zjistíme, že se výchylka na vahách změnila přibližně čtyřikrát. Při měření je třeba uvažovat vzdálenost mezi středy obou kuliček. Jsou-li kuličky příliš blízko u sebe, dojde k přerozdělení náboje a je potřeba započítat vliv nenulové velikosti kuliček (viz „další informace“).

### **Závěr**

Souhlasně nabitě kuličky se odpuzují, nesouhlasně nabitě kuličky se přitahují. Velikost síly mezi nabitými kuličkami je tím větší, čím větší je náboj na kuličkách; velikost síly je nepřímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti mezi středy obou kuliček.

## Poznámky

Jak získat nesouhlasné náboje na kuličkách: Pokud máme k dispozici indukční elektriku, je možné každou kuličku nabít z jiného vývodu indukční elektriky. Pokud máme k dispozici pouze VN zdroj, který je schopen nabít kuličky pouze jednou polaritou náboje, je pro nabití opačným nábojem třeba využít elektrostatické indukce: Jednu kuličku nabijeme, druhou se k ní přiblížíme (bez dotyku). Nenabitě kuličky se pak krátce dotkneme uzemněným vodičem, tím na ni přivedeme opačný náboj, než má nabitá kulička.

Pokud váhy neumožňují zobrazení záporné výchylky, předem je netárujeme a ve všech experimentech uvažujeme rozdíl mezi hmotností kuličky a zobrazenou výchylkou.

## Další informace

Experiment je podrobněji popsán v textu L. Dvořáka ([3]). Je zde uvedena i korekce potřebná ke kvantitativnímu měření na nabitých kuličkách nenulové velikosti.

## Coulombův zákon se dvěma brčky

Experiment slouží k názorné demonstraci toho, že elektrostatická síla je nepřímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti. Reaguje tak na častou miskoncepci studentů, kteří jsou přesvědčeni, že elektrostatická síla je nepřímo úměrná první mocnině vzdálenosti (a to i poté, co typicky strávili několik hodin počítáním úloh na Coulombův zákon).

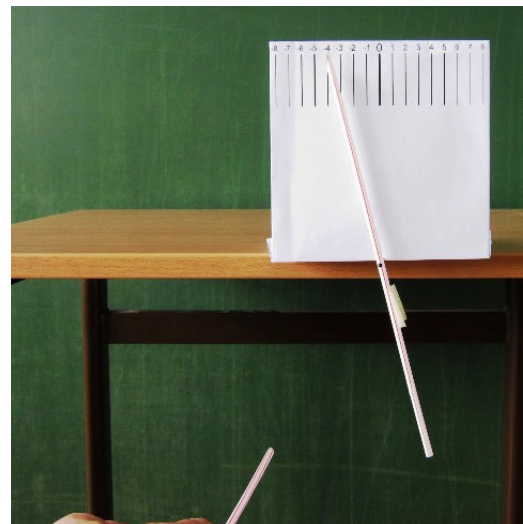
## Pomůcky

Dvě brčka, stupnice, špendlík, papírové kapesníky, špejle

## Příprava a provedení

Brčko uprostřed propíchneme špendlíkem a ten zapíchneme do špičky špejle. Na špejli umístíme stupnici (viz obr.). Zkontrolujeme, že se brčko může volně otáčet.

Spodní část brčka nabijeme třením papírovým kapesníkem, horní část brčka slouží jako ukazatel na stupnici. Druhé brčko nabijeme a přiblížíme se s ním ke spodní části otočného brčka. Poté vzdálenost mezi konci obou brček zmenšíme na polovinu a pozorujeme, že se výchylka zvětšila přibližně čtyřikrát.



Experiment lze využít i k demonstraci závislosti elektrostatické síly na velikosti náboje – lze srovnat výchylku brčka, jestliže k němu do stejné vzdálenosti přiblížíme jedno či dvě brčka, případně brčko a nabitou PVC tyč.

## Závěr

Elektrostatická síla je úměrná náboji na obou tělesech a nepřímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti mezi nimi.



## Poznámka

Brčka nejsou bodové náboje, ale vzhledem k tomu, že nabíjíme a přibližujeme k sobě vždy jen jejich konce, lze závislost dostatečně dobře demonstrovat.

## Elektrostatické kyvadélko

Experiment ukazuje, že elektrické síly mohou konat práci. Pokus je v uspořádání popsaném v poznámce níže vhodný i jako motivační.

### Pomůcky

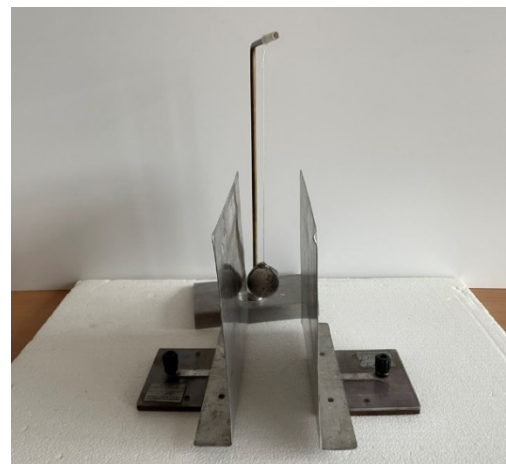
dvě kovové desky na izolovaných stojáncích, polystyren, indukční elektrika (příp. VN zdroj nebo van de Graaffův generátor), pingpongový míček natřený vodivou barvou zavěšený na nevodivé niti, vodiče

### Příprava a provedení

Obě kovové desky umístíme na polystyren a připojíme je k indukční elektrice nebo jinému vysokonapětovému zdroji. Mezi desky umístíme vodivý pingpongový míček zavěšený na nevodivé niti a umístěný na stojánku.

Pokud máme k dispozici VN zdroj pouze s jednou polaritou náboje (např. van de Graaffův generátor), spojíme jednu desku s koulí generátoru, druhou desku uzemníme.

Zapneme VN zdroj (roztočíme indukční elektriku/zapneme generátor), míček vychýlíme tak, aby se dotkl jedné z desek, a pustíme ho. Při dotyku se míček nabije souhlasným nábojem, jako má příslušná deska, a od desky se odpudí. Dotkne se druhé desky, vybijí se, hned se nabije nábojem opačného znaménka a opět se od této desky odpuzuje. Míček proto bude kmitat mezi deskami, frekvence kmitání se mění se vzdáleností desek.



Zapneme VN zdroj (roztočíme indukční elektriku/zapneme generátor), míček vychýlíme tak, aby se dotkl jedné z desek, a pustíme ho. Při dotyku se míček nabije souhlasným nábojem, jako má příslušná deska, a od desky se odpudí. Dotkne se druhé desky, vybijí se, hned se nabije nábojem opačného znaménka a opět se od této desky odpuzuje. Míček proto bude kmitat mezi deskami, frekvence kmitání se mění se vzdáleností desek.

### Poznámky

Míček bude kmitat tak dlouho, dokud bude na deskách odlišný náboj – i po odpojení VN zdroje (indukční elektriky/generátoru) bude nějakou dobu kmitat, než se vyrovnají náboje na obou deskách.

Místo vodivé barvy lze míček začernit tuhou nebo obalit alobalem.

### Varianta

V experimentu lze místo kovových desek použít dva dobrovolníky na polystyrenových deskách, místo míčku pak můžeme použít např. lehkou plechovku od nápoje. Plechovka pak kmitá např. mezi dlaněmi dobrovolníků, případně mezi dvěma pokličkami, které dobrovolníci drží.

Žákovsky lze experiment provádět s plechovkami od nápoje místo desek. Plechovky se dobře nabíjí např. „magickou hůlkou“ (viz dále).

### 3) Rozložení náboje

#### Hustota náboje uvnitř dutiny – Faradayova klec

Experiment ukazuje princip Faradayovy klece – uvnitř kovové dutiny není žádný náboj.

##### Varianta 1

###### Pomůcky

Plechovka, polystyren, lístky alobalu, PVC tyč, flanel

###### Provedení

Plechovku postavíme na polystyren. Na plechovku pověsíme lístky alobalu z vnější i vnitřní strany. Plechovku nabijeme a pozorujeme, že lístky pověšené z vnější strany se zvedly (na vnější straně plechovky je náboj), ale lístky z vnitřní strany plechovky se nevychýlily.

##### Varianta 2

###### Pomůcky

Klec z drátěného pletiva s navázanými polystyrenovými kuličkami, vysokonapěťový zdroj, polystyren

###### Provedení

Klec postavíme na polystyren a nabijeme ji z vysokonapěťového zdroje. Pozorujeme, že kuličky na vnější straně se od klece odpudí, kuličky na vnitřní straně klece zůstávají na místě.

##### Varianta 3

###### Pomůcky

Plastové a kovové sítko stejné velikosti, polystyren, PVC tyč, flanel, vodivá kulička

###### Provedení

Vodivou kuličku umístíme na polystyren a přiklopíme nejdříve plastovým sítkem. Z vnější strany se k sítku přiblížíme nabitou tyčí, pozorujeme chování kuličky. Plastové sítko vyměníme za kovové a pokus zopakujeme.

###### Závěr

Uvnitř vodivé dutiny není žádný náboj.

###### Aplikace

Fakt, že v kovové dutině není žádný náboj, a tedy žádné elektrické pole<sup>1</sup>, je široce využíván. Jako příklad lze uvést např. ochranný oděv osob pracujících pod napětím, auto, ve kterém lze přežít úder blesku apod. Další příklady využití lze najít pomocí vyhledávače zadáním termínu „Faradayova klec“.

---

<sup>1</sup> To, že uvnitř duté koule nabité na povrchu není žádné elektrické pole, plyne z Gaussovy věty. Viz např. <http://reseneulohy.cz/270/pole-rovnomerne-nabite-sfery>

## Rozložení náboje na vodiči a izolantu

Experiment ukazuje, jak se liší rozložení náboje na vodiči a izolantu podobného tvaru i velikosti. Experiment reaguje na častou miskoncepci studentů, kteří jsou přesvědčeni, že náboj se na izolantu neudrží a „zmizí“. Základní myšlenkou pokusu je tedy nechat studenty porovnat chování náboje na vodiči a izolantu podobného tvaru.

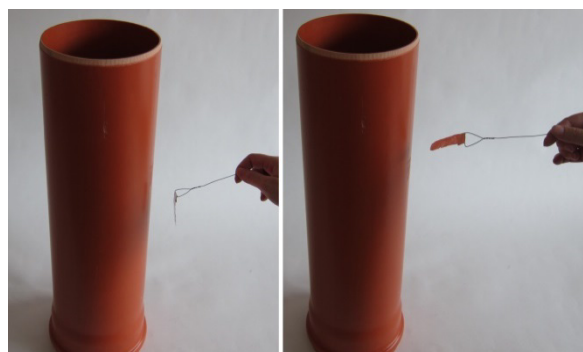
### Pomůcky

plechovka na izolační podložce, plastová kanalizační trubka, PVC tyč, flanel, alobalový lístek na držátku, doutnavka

### Provedení

Před provedením pokusu si rozmyslete, jak se bude chovat náboj na plechovce a izolantu, jestliže:

- Obě tělesa nabijeme na jednom místě.
- Obě tělesa nabijeme na několika místech.
- Obě tělesa nabijeme na několika místech a poté se jednoho z míst dotkneme rukou nebo doutnavkou.
- Obě tělesa nabijeme na jednom místě a náboj budeme detekovat až po několika minutách.



Poté jednotlivé kroky experimentu proveďte a porovnejte výsledky se svými hypotézami. K detekci náboje na izolantu je vhodné použít alobalový lístek na držátku – k nabitým místům se jednoznačně přitahuje (na obrázku je vlevo lístek poblíž nenabitého místa, vpravo poblíž nabitého).

### Závěr

Pokud plechovku nabijeme na jednom místě, náboj se rozloží po celém vnějším povrchu. Oproti tomu náboj na plastové trubce zůstane jen na tom místě, kde jsme ji nabili. Pokud kanalizační trubku nabijeme na několika místech, zůstane náboj jen na nich, ostatní místa budou bez náboje. Jestliže se plechovky na jednom místě dotkneme, vybijeme plechovku celou. Oproti tomu, pokud vybijeme jedno místo na trubce, ostatní zůstanou nabitá. Náboj zůstane na plechovce i trubce dost dlouho, ani po několika minutách nikam nezmizí (na trubce lze pozorovat, že se náboj nerozšířil mimo místa, která byla nabita).

### Poznámky

Kanalizační trubka je velmi dobrým izolantem, proto se na ní náboj drží dlouhou dobu. K jejímu vybití je vhodné ji otřít mokrým hadrem a nechat uschnout.

Je vhodné nechat studenty nejdříve vyslovit (a napsat) hypotézu, jak se bude náboj v jednotlivých případech chovat. Výsledek experimentu je pro mnohé studenty velmi překvapivý, je proto potřeba nechat dostatek času na diskuzi mezi studenty a vysvětlení experimentu.

## Sršení v okolí hrotu

Experiment demonstruje sršení náboje v okolí hrotů a jeho účinky na plamen svíčky.

### Pomůcky

Vodivá koule s hrotem na izolačním stojánku, svíčka, indukční elektrika

### Postup

Jeden vybíječ indukční elektriky spojíme s kovovou koulí s hrotem, druhý vybíječ uzemníme. Před hrot umístíme svíčku tak, aby plamen byl od hrotu vzdálen asi 1 cm. Otáčíme-li klikou indukční elektriky, plamen se odklání.

Pokud svíčku přiblížíme k jinému místu vodivé koule, k odklonu plamene nedochází.

### Závěr a vysvětlení

Z hrotu srší elektrický náboj, který způsobuje ionizaci vzduchu v okolí hrotu. Tím vznikají v okolí hrotu ionty nabitě stejně jako hrot. Tyto ionty se od hrotu odpuzují a strhávají okolní vzduch, který odklání plamen svíčky.



## Elektrický vítr

### Pomůcky

indukční elektrika, elektrický větrník, polystyrenová deska, kovová deska, vodiče

### Příprava a provedení

Elektrický větrník na kovovém stojánku umístíme na polystyrenovou desku a připojíme k jednomu vybíječi indukční elektriky. Druhý vybíječ uzemníme. Otáčíme klikou indukční elektriky a pozorujeme, že se větrník roztočí.

### Vysvětlení

V blízkosti nabitých hrotů větrníku dochází k ionizaci vzduchu. Ionty, stejného náboje, jako je náboj na hrotu, jsou od hrotu odpuzovány, vzniká tak „elektrický vítr“. Na základě zákona akce a reakce je větrník uváděn do pohybu. Ionty opačného náboje, než má náboj na hrotu, se k hrotu přibližují a neutralizují tak jeho náboj.



## 4) Elektrostatická indukce

### Vytváření indukovaných nábojů

#### Pomůcky

PVC tyč, flanel, skleněná tyč, kůže, plechovka s lístkem alobalu, izolační podložka

#### Příprava a provedení

Plechovku s lístkem alobalu sloužícím jako indikátor náboje umístíme na izolační podložku. Zelektrovanou plastovou tyč přiblížíme k plechovce na vzdálenost několika cm a pozorujeme, že se lístek alobalu vychýlí. Po oddálení tyče se lístek vrátí do původní polohy. Totéž zopakujeme i se skleněnou tyčí.

#### Závěr

Při přiblížení nabitě tyče k plechovce dojde k přerozdělení nábojů tak, aby náboje stejné polarity byly pokud možno co nejdál od tyče. Naopak náboje opačné polarity se přiblíží k tyči.

#### Poznámka

Je vhodnější tyč přibližovat k opačné straně plechovky, než na které je umístěn alobalový lístek – při přiblížení tyče příliš blízko může lístek naopak vyskočit a přitáhnout se k tyči, což může vést ke zmatení studentů.

### Nabití vodiče nábojem opačného znaménka

#### Pomůcky

plechovka s alobalovým lístkem na izolační podložce, plastová tyč, flanel, skleněná tyč, kůže

#### Příprava a provedení

Plechovku s alobalovým lístkem umístíme na izolační podložku. Zelektrovanou plastovou tyč přiblížíme k plechovce bez dotyku (například ji vložíme dovnitř plechovky, ale tak, aby se nedotýkala žádné stěny). Pozorujeme výchylku lístku. Plechovku se dotkneme rukou a ruku opět oddálíme (pozorujeme, že lístek alobalu opět klesl) a poté tyč oddálíme. Pozorujeme, že se lístek znovu zvedl. Pokud se tyčí přiblížíme k lístku, jeho výchylka se zvětší – plechovka je nabitá nábojem opačného znaménka než tyč.

Pokus opakujeme se zelektrovanou skleněnou tyčí.

#### Závěr a vysvětlení

Vložení nabitě tyče do plechovky dojde k přerozdělení nábojů na plechovce – náboje opačného znaménka se přesunou poblíž tyče, náboje stejného znaménka co nejdále od tyče. Pokud jsme tyč umístili dovnitř plechovky, budou souhlasné náboje vně plechovky a na lístku, lístek se proto zvedne.

Jestliže se plechovky zvenku dotkneme, odvedeme náboj stejné polarity jako má tyč, lístek proto klesne zpět do původní polohy. Při oddálení tyče se všechen zbylý náboj (tj. náboj opačné polarity než má tyč) přerozdělí opět po celém vnějším povrchu plechovky.

Pokud jsme tedy vložili do plechovky záporně nabitou plastovou tyč, bude na konci experimentu plechovka nabitá kladně a naopak.

### **Terminologická poznámka**

Přestože v textu hovoříme o přemísťování nábojů stejného a opačného znaménka, reálně se přesunují jen volné elektrony – nosiče záporného náboje. „Odvedení kladného náboje do země“ tak znamená, že se záporné elektrony přesunou ze země na plechovku.

## **Oddělení indukovaných nábojů**

### **Pomůcky**

dvě plechovky s indikátory náboje z alobalových lístků, izolační podložky, plastová tyč, flanel, skleněná tyč, kůže, kovová tyčka s izolovaným držátkem

### **Příprava a provedení**

Obě plechovky s alobalovými lístky umístíme na izolační podložky kousek od sebe a vodivě je spojíme kovovou tyčkou. Do jedné plechovky vložíme zeлектроvanou plastovou tyč, pozorujeme výchylku na obou alobalových lístcích. Odstraníme spojovací tyčku (tak, abychom plechovky nevybili) a poté odstraníme zeлектроvanou tyč. Pomocí tyče se přesvědčíme o polaritě náboje na obou plechovkách.

Pokus zopakujeme se zeлектроvanou skleněnou tyčí.

### **Závěr a vysvětlení**

Při vložení zeлектроvané tyče do plechovky došlo k přerozdělení náboje – na plechovce, ve které je tyč, zbyl náboj opačného znaménka, než má tyč, na druhé plechovce je náboj souhlasný. Odstraněním vodivého spojení obou plechovek došlo k oddělení obou nábojů.

Pokud jsme k experimentu použili plastovou tyč zeлектроvanou záporně, bude na plechovce, do které jsme tyč vložili, kladný náboj, na druhé plechovce bude náboj záporný.

### **Aplikace**

Principu, který jsme tímto pokusem ukázali, využívá indukční elektrika.

## 5) Kapacita a kondenzátor

### Kapacita vodiče

Experiment velmi jednoduchou formou ukazuje, jak souvisí kapacita vodiče s jeho rozměry.

#### Pomůcky

dvě různě velké plechovky na izolačních podložkách, PVC tyč, flanel, kovová tyčka

#### Provedení

Různě velké plechovky postavte na izolační podložky, spojte je vodičem a nabijte plastovou tyčí. Pak vodič odstraňte tak, abyste plechovky nevybili. Dotkněte se nejprve malé plechovky, pak velké a porovnejte, jak velkou ránu vám jednotlivé plechovky daly. Plechovky se také lze dotknout např. doutnavkou a porovnat intenzitu bliknutí. Pro přesnější porovnání lze náboj na obou plechovkách změřit coulombmetrem.

#### Závěr

Obě plechovky jsou vodivě spojené, jsou proto na stejném potenciálu (tj. na stejném napětí vzhledem k Zemi). Velká plechovka přesto dá citelně větší „ránu“, příp. doutnavka na ní intenzivněji blikne. Coulombmetrem můžeme potvrdit, že na větší plechovce je větší náboj – větší plechovka má větší kapacitu.

### Kelímkový kondenzátor

Experiment ukazuje jednoduchý model kondenzátoru – dva vodiče a mezi nimi izolant. Nabízí i srovnání kapacity takového kondenzátoru s kapacitou plechovky.

#### Pomůcky

Tři plastové kelímky (maximálně 0,3 litru), alobal, měřič kapacity, vodiče, plechovka a polystyren, zdroj náboje (indukční elektrika, van de Graaffův generátor, „magická hůlka“)

#### Příprava a provedení

Jeden kelímek obalíme zvenku i zevnitř dvěma listy alobalu. Zbylé dva kelímky slouží k upevnění listů alobalu (viz obr.), tím jsme vyrobili kondenzátor. Kapacitu tohoto kondenzátoru lze změřit pomocí měřiče kapacity.

Je vhodné srovnat kapacitu tohoto kondenzátoru a kapacitu plechovky na vlastní kůži podobně, jako v předchozím pokusu – plechovku umístíme na izolační podložku, spojíme ji s jednou „deskou“ kondenzátoru, obě tělesa nabijeme, poté spojení odstraníme a obou těles se dotkneme rukou/doutnavkou (u kondenzátoru je potřeba prsty spojit oba listy alobalu).



## Závěr

Kapacita kelímkového kondenzátoru je mnohem větší než kapacita plechovky.

## Poznámky

**Je třeba dbát na bezpečnost** – kondenzátor z kelímků může mít už poměrně velký náboj. Je proto potřeba spojovat obě desky prsty jedné ruky tak, aby proud neprošel přes srdce. Ze stejného důvodu není vhodné použít kelímky o větším objemu než 0,3 litru – kapacita větších kondenzátorů už je příliš velká. Vybíjení by také neměla provádět osoba s nemocí srdce nebo kardiostimulátorem.

K nabíjení kondenzátorů se velmi osvědčila „magická hůlka“ – vysokonapěťový zdroj prodáváný jako hračka (viz pokus „Vysokonapěťové generátory“).

**Před měřením kapacity je potřeba kondenzátor vybit! Jinak hrozí zničení měřiče.**

## Deskový kondenzátor

Experiment ukazuje závislost kapacity deskového kondenzátoru na obsahu plochy a vzdálenosti desek.

## Pomůcky

tlustší větší kniha nebo balík kancelářských papírů, dva listy alobalu, měřič kapacity, vodiče

## Příprava a provedení

Do silnější knihy vložíme dva listy alobalu, ty připojíme ke svorkám měřiče kapacity. Listy alobalu slouží jako desky kondenzátoru, papír mezi nimi jako izolant (dielektrikum).

Pokus provedeme v několika krocích:

- 1) Změříme kapacitu vyrobeného deskového kondenzátoru.
- 2) Knihu rukou zmáčkne a pozorujeme změnu kapacity kondenzátoru.
- 3) Mezi alobalové listy vkládáme postupně např. 20, 40, 60,... stran, vždy změříme kapacitu. Naměřené hodnoty vyneseme do grafu závislosti kapacity na vzdálenosti mezi deskami (tj. na počtu listů knihy).
- 4) Jeden list alobalu překládáme a měníme tak jeho plochu, pokaždé změříme kapacitu vzniklého kondenzátoru.
- 5) Oba listy kondenzátoru přehneme na polovinu a vzájemně je vůči sobě posouváme, vždy změříme kapacitu.

## Závěr

Kapacita kondenzátoru vzniklého z knihy formátu přibližně A4 je v řádu stovek pF.

Pokud knihu zmáčkne, zmenšíme vzdálenost mezi deskami, a kapacita se tak zvětší. Přesněji lze závislost kapacity deskového kondenzátoru na vzdálenosti mezi deskami demonstrovat změnou



počtu listů mezi deskami. Změřené hodnoty vynesené do grafu ukáží nepřímou úměrnost mezi vzdáleností desek a kapacitou kondenzátoru.

Jestliže zmenšíme plochu jedné desky na polovinu, zmenší se na polovinu i kapacita kondenzátoru, obdobně při zmenšení plochy na čtvrtinu atd. Kapacita deskového kondenzátoru je tedy přímo úměrná ploše desek.

Poslední část experimentu demonstruje tzv. účinnou plochu desek kondenzátoru.

## Model svitkového kondenzátoru

Experiment ukazuje jiný než deskový kondenzátor; je vhodný jako součást laboratorní práce, případně jako dobrovolný domácí úkol.

### Pomůcky

tenká plastová folie („euroobal“), dva listy alobalu, měřič kapacity

### Postup

Jeden list alobalu vložte do euroobalu tak, aby kousek přesahoval. Druhý list alobalu položte na euroobal seshora tak, aby kousek přesahoval na druhé straně. Euroobal s alobalovými listy svižte podél delší strany a konce smotejte tak, aby se kondenzátor nerozbaloval (viz obr.).



Připojte měřič kapacity k přesahujícím koncům listů alobalu a změřte kapacitu takto vzniklého kondenzátoru; pozorujte změnu při zmáčknutí kondenzátoru.

Najděte nějaký způsob, jak zvětšit kapacitu takto vzniklého kondenzátoru.

### Závěr

Kapacita takto vzniklého kondenzátoru je v řádu nF.

Vzhledem k velmi malé vzdálenosti mezi deskami kondenzátoru lze dosáhnout poměrně velké kapacity i s relativně malou plochou desek.

V reálných svitkových kondenzátorech se jako dielektrikum používal obvykle papír, v dnešní době bývá nahrazován polyesterem.

Chceme-li zvětšit kapacitu, je nejjednodušší kondenzátor zmáčknout (a zmenšit tak vzdálenost mezi listy alobalu).

## **\*Náboj a napětí na kondenzátoru**

Experiment demonstruje přímou úměrnost mezi nábojem a napětím na kondenzátoru.

### **Pomůcky**

kondenzátor 10  $\mu\text{F}$ , kondenzátor 0,1  $\mu\text{F}$ , baterie 9 V (nebo plochá baterie 4,5 V), voltmetr

### **Provedení**

Kondenzátor 0,1  $\mu\text{F}$  nabijeme z baterie a vzápětí vybijeme do kondenzátoru 10  $\mu\text{F}$ , tím dosáhneme toho, že se kondenzátor 0,1  $\mu\text{F}$  nabije vždy na stejný náboj, který předá kondenzátoru 10  $\mu\text{F}$ . Celý proces několikrát opakujeme. Voltmetr připojený ke kondenzátoru 10  $\mu\text{F}$  ukáže, že napětí roste vždy o přibližně stejnou hodnotu.

### **Závěr**

Menší kondenzátor se připojením k baterii nabil vždy stejným nábojem  $Q$ . Po opakovaném vybití do kondenzátoru 10  $\mu\text{F}$  na něm tedy postupně vzrůstá náboj na  $Q$ ,  $2Q$ ,  $3Q$ ,... a stejně tak vzrůstá napětí na tomto kondenzátoru dvakrát, třikrát,... Náboj a napětí na kondenzátoru jsou tedy vzájemně přímo úměrné.

### **Poznámky**

Oba kondenzátory před pokusem vybijeme, tj. zkratujeme oba vývody.

Opakované vybití menšího kondenzátoru do většího je potřeba dělat rychle, aby se kondenzátor 10  $\mu\text{F}$  příliš nevybíjel do voltmetru a napětí na něm tedy příliš neklesalo. Z tohoto důvodu je lepší dělat experiment s voltmetrem s větším vnitřním odporem.

S rostoucím počtem vybití kondenzátoru 0,1  $\mu\text{F}$  do většího samozřejmě přestane být napětí na větším kondenzátoru přímo úměrné počtu přenosů náboje. Jakmile je totiž na větším kondenzátoru nezanedbatelné napětí, nevybije se do něj celý náboj  $Q$  z menšího kondenzátoru. Z tohoto důvodu je dobré volit pro experiment kondenzátory s velmi rozdílnou kapacitou.

Kondenzátor 10  $\mu\text{F}$  musí být svitkový, ne elektrolytický. Chemické děje v elektrolytickém kondenzátoru totiž mohou zapříčinit, že po vybití původně nabitého kondenzátoru na něm nezůstane nulové napětí, což by zvětšovalo nepřesnost experimentu.

### **Aplikace**

Přímé úměrnosti mezi nábojem a napětím na kondenzátoru využívá běžný měřič náboje (viz experiment „Indikace náboje“).

## \*Kapacita sériově a paralelně spojených kondenzátorů

### Pomůcky

kondenzátory 1 nF a 2 nF, měřič kapacity, vodiče

### Provedení

Nejdříve změříme kapacitu každého kondenzátoru jednotlivě. Kondenzátory spojíme do série a změříme kapacitu celé soustavy. Pro naměřené hodnoty ověříme, zda pro kapacitu celé soustavy platí  $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$ , kde  $C_1$  a  $C_2$  jsou kapacity obou kondenzátorů.

Poté kondenzátory spojíme paralelně a opět změříme kapacitu celé soustavy a ověříme, že tentokrát je celková kapacita součtem kapacit obou kondenzátorů.

### Závěr

Pokud označíme kapacity dvou kondenzátorů jako  $C_1$  a  $C_2$ , pak pro celkovou kapacitu soustavy těchto dvou kondenzátorů zapojených v sérii platí  $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$ . Pro soustavu kondenzátorů zapojených paralelně pak platí  $C = C_1 + C_2$ .

## 6) Elektrostatické generátory

### Pomůcky

Indukční elektrika, van de Graaffův generátor, „magická hůlka“

### Úkol

Seznamte se s nejběžnějšími elektrostatickými generátory, diskutujte jejich princip.

### Komentář

Indukční elektrika využívá elektrostatickou indukci a oddělení indukovaných nábojů: je-li jeden vodivý polep nabit např. kladným nábojem, přerozdělí se na protilehlém polepu náboj tak, aby strana blíž k nabitému polepu byla nabita záporně. Pokud se polepy od sebe při otáčení odsunou, náboje se na polepu přerozdělí zase zpět. Pokud se ale polep dotýká vyrovnávací tyčky s kartáčkem, dojde k přerozdělení náboje – kladný náboj se přesune na opačný polep na druhé straně vyrovnávací tyčky. Při odsunutí polepů tak bude původně nenabitý polep nabit záporně. Situace se opakuje i u dalších polepů, až je jedna polovina polepů každého kotouče nabita kladně, druhá polovina záporně. Náboj je pomocí sběračů odváděn do leidenských lahví (kondenzátorů) a posléze vybíjen přes vybíječe.

Elektrický náboj ve van de Graaffově generátoru vzniká díky tření: nekonečný pás z dielektrika je natažen mezi dvěma otáčivými válci. Spodní válec je uváděn do pohybu elektromotorkem, čímž se pohybuje i pás. Mezi pásem a spodním válcem dochází ke kontaktu, díky kterému je pás nabíjen a náboj unášen do kulové dutiny, ve které je pomocí řady ostrých hrotů sesbírán a odváděn na vnitřní

stranu kulového vodiče. Odtud přechází na jeho vnější povrch. Díky tomu je vnitřní povrch stále na nulovém potenciálu a může na něj přejít další náboj (toto by nefungovalo, kdybychom náboj přenášeli rovnou na vnější povrch koule).

„Magická hůlka“ prodáváná pod názvem „Magic fly stick“ je určena k levitování lehkých předmětů. Její princip je fakticky stejný jako princip van de Graaffova generátoru.

## Literatura

Při zpracování experimentů jsme vycházeli z následujících zdrojů:

- [1] E. Svoboda a kol.: Pokusy z Fyziky na střední škole 3. Prometheus, Praha 1999. ISBN: 80-7196-009-8
- [2] E. Svoboda a kol.: Pokusy z Fyziky na střední škole 4. Prometheus, Praha 2001.
- [3] L. Dvořák a kol.: Náboje, proudy a elektrické obvody. Projekt OPPA. Praha 2012. ISBN: 978-80-87186-78-7. Dostupné na <http://kdf.mff.cuni.cz/projekty/oppa/#materialy>
- [4] L. Dvořák: Náboje, kam se podíváš. Dílny Heuréky 2009-2010. Sborník konferencí projektu Heuréka. Prometheus, Praha 2011. ISBN: 978-80-7196-426-1. Dostupné na: <http://kdf.mff.cuni.cz/heureka/clanky-a-materialy>
- [5] V. Koudelková: Elektřina a magnetismus vlastníma rukama a hlavou. Dizertační práce. Praha 2016. Dostupné na: <https://kdf.mff.cuni.cz/~koudelkova/dizertace.pdf>
- [6] Koudelková, V., Dvořák, L.: Tři experimenty inspirované miskoncepcemi SŠ studentů v elektřině a magnetismu. Veletrh nápadů učitelů fyziky 18. Hradec Králové 2013. Dostupné na: <http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/18-16-Koudelkova.html>

Tento materiál vznikl v rámci opatření na podporu studijních programů zaměřených na přípravu budoucích učitelů na pedagogických i nepedagogických fakultách veřejných vysokých škol (2021).

Některé experimenty jsou také zpracované ve sbírce fyzikálních pokusů – viz <http://kdf.mff.cuni.cz/pokusy/>.