

# Vedení elektrického proudu v kapalinách, plynech a ve vakuu

---

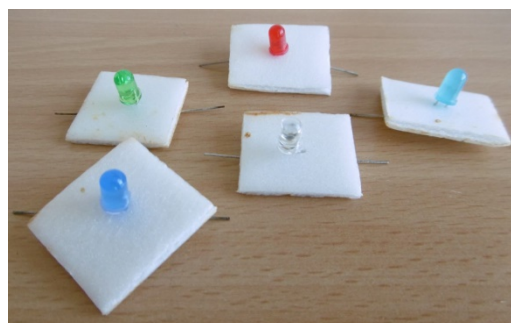
## 1) Vedení proudu v kapalinách

### LEDky v solném roztoku

Jde o motivační pokus k danému tématu, i když se k němu můžeme vícekrát vracet a případně o něm detailněji diskutovat. Z počátku jde jen o poměrně atraktivní předvedení vodivosti kapalin. V rámci PŠP 2 je možno (v rámci úspory času) zvolit nejdříve následující pokus a na něm pak demonstrovat tento. Nicméně z pohledu didaktického je vhodnější při výuce zvolit tento jako motivační, tedy na začátku tématu.

#### Pomůcky

nádobka na elektrolyt (malé akvárium, plastová krabička apod., délka asi 10-15 cm), regulovatelný zdroj napětí (do cca 30 V), několik LED, lehké destičky na plováky pod LED (např. z korku, polystyrénu – viz obrázek; my používáme kousky z polystyrénového táčku pod sýry), krokosvorky, elektrody (stačí i pouhý alobal), kuchyňská sůl, spojovací vodiče



#### Příprava a provedení

Nejdříve si upravíme LED tak, že jejich vývody roztáhneme směrem od sebe, případně je umístíme na malé lehké destičky (z polystyrénu, korku apod.). Do nádoby nalijeme koncentrovaný vodný roztok soli, vložíme elektrody (stačí protilehlé stěny obalit alobalem, zde je ale lepší nejdříve obalit stěny a až pak nalít roztok) a na ně připojíme zdroj napětí. Zapneme zdroj a postupně zvyšujeme napětí (vhodné napětí je dobré si předem vyzkoušet pomocí jedné diody položené na hladinu v propustném směru). Když pak do elektrolytu pod napětím vložíme LED, rozsvítí se podle toho, jak jsou orientované jejich vývody vzhledem ke směru intenzity elektrického pole. Napětí zdroje můžeme upravit tak, aby svit diod byl optimální. Diody můžeme otáčet a zkoumat, jak souvisí jejich svit s orientací vývodů. Nechceme-li se zabývat polaritou (a tedy vlastnostmi LED z pohledu polovodičů), můžeme připojit napětí střídavé

#### Závěr

Ačkoli diody nejsou přímo připojeny k elektrodám, rozsvítí se. Z toho je patrné, že roztok zde slouží jako vodivý můstek mezi diodami a elektrodami, tedy že vede elektrický proud. U elektrod můžeme dále pozorovat vznikající bublinky (a slyšet slabé šumění) jako produkt chemických procesů, které s vedením proudu v roztoku souvisí. Zároveň pozorujeme změnu svitu diod v závislosti na jejich orientaci.

## Vysvětlení

Mezi elektrodami v elektrolytu vzniká elektrické pole (s intenzitou danou poměrem napětí mezi elektrodami a jejich vzdáleností). Poměrně jednoduše můžeme dosáhnout intenzity elektrického pole okolo 2 V/cm a proudu několik mA. Nejjasněji svítí ty diody, jejichž vývody jsou orientované rovnoběžně se směrem intenzity elektrického pole (tedy ve směru největšího spádu potenciálu) a ve směru správné polaritě (katoda LED blíž záporného pólu zdroje).

## Co a jak moc vede elektrický proud?

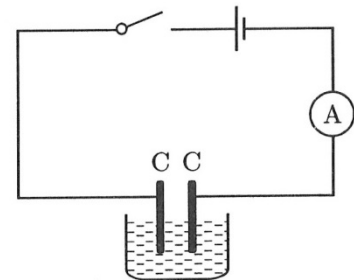
Cílem této série pokusů je zjistit zda (a případně jak moc) vede elektrický proud destilovaná voda, cukerný vodný roztok, osolená voda, voda z vodovodu apod.

### Pomůcky

rozkladný článek s uhlíkovými elektrodami (malá skleněná obdélníková nádobka, jako uhlíkové elektrody je možno použít tuhu do tužky nebo uhlíkové tyčinky monočláneků apod.), ss ampérmetr (3 mA, 30 mA, 3 A), zdroj ss napětí (do přibližně 12 V), propojovací vodiče, destilovaná voda, cukr, kuchyňská sůl, voda z vodovodu (modrá skalice, hydroxid sodný, kyselina sírová apod.)

### Příprava a provedení

Do čisté vaničky s čistými uhlíkovými elektrodami nalijeme destilovanou vodu. Elektrody připojíme přes ampérmetr a spínač ke zdroji a zvyšujeme napětí do cca 10 V. Pokud byly elektrody i vanička opravdu čisté, ručka ampérmetru zůstane na nule. (Pokud by v roztoku byly nečistoty, při vyšších napětích bude procházet slabý proud.)



Do destilované vody nasypeme cukr a pozorujeme, zda došlo k nějaké změně.

Do destilované vody přidáme trochu kuchyňské soli. Již malé množství postačí k zvýšení vodivosti roztoku. Pozor při přidávání soli na rozsah ampérmetru. Sůl ve vodě promícháme. Můžeme ukázat, že při zvyšujícím se napětí zdroje roste i velikost proudu.

Můžeme prozkoumat i další vodné roztoky (jiné soli – např. modrá skalice, kyseliny, zásady).

Pořádně vymyjeme nádobku na roztoky a pro zajímavost (a srovnání) podobným způsobem prozkoumáme vodivost vody z vodovodu, Colu, minerálku apod.

### Poznámka

- 1) Dejte pozor na řádné očištění elektrod a nádobky před zahájením pokusu, ale i po něm (zejména s destilovanou vodou).
- 2) Procházející proud elektrolytem (např. vodným roztokem kyselin) můžeme prokázat také zapojením malé žárovky (např. 2,5 V/0,2 A). Pozor ale na to, aby v případě, že žárovka nesvítí, nevznikla představa, že proud obvodem neprochází (nedokáže pouze nažhavit vlákno žárovky).

## Vysvětlení

Podmínkou vodivosti je přítomnost volně pohyblivých nosičů náboje (v tomto případě iontů). Přidáme-li do vody látku s nerovnoměrně rozloženým nábojem v molekule, dojde k tzv. disociaci (tj. rozštěpení molekul na ionty – zde vlivem polárních molekul vody). Vzniklé ionty (obalené navíc molekulami vody, zde se jedná o tzv. hydráty) způsobí proud v obvodu. Dojde tedy k elektrolýze. Na elektrodách začnou probíhat oxidačně redoxní procesy, na katodě se při tom bude vylučovat vodík, nebo kov. Chemické produkty je možno pozorovat pouhým okem (vznikající bublinky), případně je indikovat vhodným indikačním činidlem (např. fenolftaleinem).

## Závěr

Voda z vodovodu a obecně vodné roztoky solí, kyselin a zásad vedou elektrický proud. Již nepatrné množství kuchyňské soli značně zvýší vodivost roztoku. Podmínkou vodivosti je přítomnost volně pohyblivých nosičů náboje (v tomto případě iontů).

## Demonstrace krokového napětí – „krokáček“

Jedná se o obdobu pokusu s LEDkami, přičemž navíc demonstrujeme tzv. krokové napětí, tedy napětí, které vznikne mezi nohama člověka (ale i zvířete), např. při pádu vedení vysokého napětí na zem, udeří-li blesk apod. Toto napětí je pak příčinou vzniku proudu, který může vést ke smrti člověka.

## Pomůcky

Miska z nevodivého materiálu, písek (vhodný je písek pro domácí mazlíčky, např. činčily), koncentrovaný vodný roztok soli, zdroj střídavého napětí (nejlépe regulovatelný), propojovací vodiče, „krokáček“ (materiál na jeho výrobu: LED, dva silnější dráty pokryté bužírkou)

## Příprava a provedení

Ze dvou drátů sestavíme „krokáčka“. (Odizolujte konce drátů a sestavte z nich panáčka, přičemž nožičky jsou tvořeny vždy jedním koncem drátů a ručičky druhým koncem drátů. Mezi ručičky připojte LED – je možné buď připájet, nebo jen vsunout konce LED pod bužírku jako pod rukávky.) Do misky nasypete písek, zalejte solným roztokem a promíchejte tak, aby byl písek vlhký. Na protilehlé stěny misky do vlhkého písku připojte zdroj napětí. „Krokáčka“ postavte do vlhkého písku s roztaženými nožkami, aby mezi nimi měl co největší napětí, a nastavte hodnotu napětí tak, aby se dioda rozsvítila. Dáme-li pak nožičky „krokáčka“ blíž k sobě, dioda pohasne. Dále je vhodné „krokáčka“ obracet (tj. aby měl „nožky“ kolmo na ekvipotenciální plochy, případně obě zhruba na jedné ekvipotenciální ploše).

## Vysvětlení

Mezi elektrodami v písku s elektrolytem vzniká elektrické pole (s intenzitou danou poměrem napětí mezi elektrodami a jejich vzdáleností). Má-li „krokáček“ nožičky blízko sobě, dioda nesvítí. Naopak má-li nožičky roztažené, napětí mezi nimi bude větší (tzv. krokové napětí), dioda se rozsvítí. Svit LED je důkazem toho, že „tělem“ panáčka prochází dostatečný proud.

## Závěr

Pokud v naší blízkosti udeří blesk, nebo spadne stožár či drát vysokého napětí, nikdy se nepřemisťujeme dlouhým kroky, ale vzdalujeme se krůčky co nejkratšími (nejlépe šoupáním nohou u sebe).

## Elektrolýza vodného roztoku kuchyňské soli

Tento pokus přímo navazuje na pokusy předcházející a je ho možné provést okamžitě po nasypání kuchyňské soli do vody. Úlohou tohoto pokusu je si rozmyslet, jaké produkty při elektrolýze na elektrodách vznikají a jaké jsou možnosti jejich identifikace.

### Pomůcky

rozkladný článek s uhlíkovými elektrodami (vanička na roztok, jako uhlíkové elektrody je možno použít tuhu do tužky nebo uhlíkové tyčinky monočlánků), ss ampérmetr (3 A), akumulátor, propojovací vodiče, vodný roztok kuchyňské soli, lihový roztok fenolftaleinu

### Příprava a provedení

Do série zapojíme spínač, akumulátor, ampérmetr a elektrody ponořené do (nasyčeného) solného roztoku v nádobce. Přidáme několik kapek indikátoru (fenolftaleinu).

Uzavřeme-li spínačem obvod, začne procházet elektrický proud. Na elektrodách se začnou vylučovat bublinky plynu a v okolí katody se roztok začne zbarvovat do červena.

Pokus můžeme zopakovat i s jinými roztoky.

### Vysvětlení

Ve vodném roztoku kuchyňské soli jsou přítomny kladné sodíkové ionty a záporné ionty chlóru. Po vložení elektrod, připojených ke zdroji napětí, budou ionty chlóru putovat k anodě, kde předávají elektrony, vytváří se molekuly chlóru a v podobě bublinek se vylučují. Kolem anody tedy uniká chlór (což je i cítit). Ionty sodíku putují ke katodě, kde naopak elektrony přijímají, vzniklý sodík ale reaguje s vodou za vzniku NaOH, vylučuje se vodík. Vznikající hydroxid je „prozrazen“ zbarvením roztoku (tj. reakcí s fenolftaleinem).

## Elektrolýza v pipetě

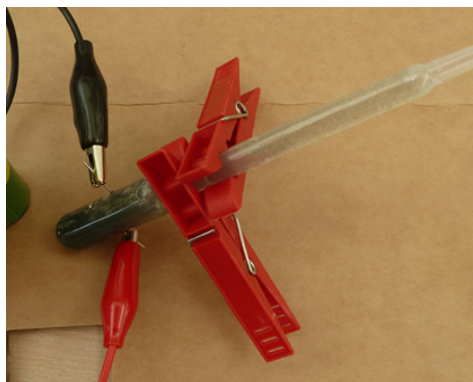
Tento pokus je vhodné zařadit jako motivační na začátku tématu elektrolýza. Při tom si žáci sami (ve skupinách) vyzkouší, že při průchodu proudem roztokem NaCl dochází k chemickým reakcím. Pro žáky je přítom velmi efektní, že uvolněný vodík lze pak zapálit.

### Pomůcky (pro jednu skupinu)

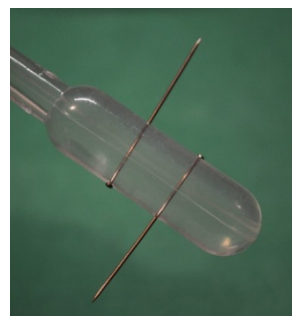
Umělohmotná pipeta, dva špendlíky, dva kolíčky, zdroj napětí (plochá nebo devítivoltová baterie), kousek akvarijní hadičky vhodného průměru, dva propojovací vodiče, malá nádobka s roztokem saponátu, slaná voda, sirky

## Příprava a provedení

Do pipety nasajte roztok NaCl. Tu pak propíchněte dvěma špendlíky ve vzdálenosti cca 1cm proti sobě. Špendlíky (elektrody) se v žádném případě nesmí dotýkat. Na pipetu nasadte hadičku. Z kolíčků vytvořte stojánek na pipetu. Stojan upravte tak, aby hadička dosahovala do nádoby se saponátem.



Po připojení špendlíků ke zdroji napětí začne probíhat elektrolyza. Produktem reakce je plyn (vodík), který v podobě bublinek začne unikat z pipety do hadičky a následně do saponátu, na hladině saponátového roztoku se začnou vytvářet bubliny. Když se zapálenou sirkou přiblížíte k bublině, ozve se jakési štěknutí (miniexploze). Uvolněná energie je natolik malá (cca 10 mJ), že nehrozí žádné nebezpečí.



Při elektrolyze si prohlédněte elektrody (případně si je prohlédněte po vytažení z pipety) i roztok. Špendlík, na kterém se netvoří bublinky, se částečně rozpustí (po delší době dojde k jeho zničení). Druhý špendlík zůstane prakticky nezměněn. Solný roztok silně ztmavne.



## Vysvětlení

Jedná se o elektrolyzu vodného roztoku NaCl pomocí železných elektrod. Sodíkové ionty přecházejí k záporné elektrodě, od které přijímají elektrony, reagují s vodou na hydroxid sodný, uvolňují se vodík. Ke kladné elektrodě putují záporné ionty chlóru, neutrální chlór reaguje s železem na chlorid železitý, který způsobuje ztmavnutí roztoku. (Jedná se přesněji o hexahydrát chloritu železitého).

## Poznámka

Pokus je převzat od Václava Piskače, viz [2].

## Galvanický článek a akumulátor

Vložíme-li dvě elektrody z různých materiálů do roztoku, zjistíme, že mezi nimi vznikne nenulové napětí. Máme tedy jednoduchý elektrochemický článek. Dáme-li však dvě stejné elektrody do jednoho (tedy stejného) roztoku, nebude mezi nimi žádné napětí, protože se obě elektrody sice nabijí, ale obě stejně. Pokud ale k elektrodám připojíme zdroj, začne probíhat elektrolyza, vlivem chemických reakcí na elektrodách dojde ke změně poměrů, resp. jejich složení (elektrody již nejsou zcela stejné, případně roztok v jejich blízkosti není stejný) a po odpojení zdroje zjistíme, že mezi elektrodami již nějaké nenulové napětí je. To je základní princip dvou druhů elektrochemických zdrojů.

### Varianta 1

#### Pomůcky

voltmetr, citrón (případně další ovoce a zelenina), hřebíky (měděný, zinkový, železný), tzv. bramborové hodiny (jde o digitální hodiny, kde zdrojem mohou být např. právě brambory, do kterých zabodneme připravené elektrody; pod tímto názvem je můžeme koupit v řadě internetových obchodů), nádobka s roztokem kuchyňské soli (případně modré skalice), propojovací vodiče, krokosvorky

#### Příprava a provedení

Do citrónu zabodněte dva různé hřebíky a změřte napětí mezi nimi. Prozkoumejte různé druhy „roztoků“, elektrod a jejich kombinací (měď, zinek, železo, hliník apod.). Zkoumejte, zda se mění napětí mezi elektrodami v závislosti na vzdálenosti elektrod a hloubce ponoření do roztoku. Zapojte také bramborové hodiny.

#### Závěr

Vložíme-li dvě různé elektrody do roztoku, vznikne mezi nimi napětí, které závisí na chemickém složení elektrod i elektrolytu.

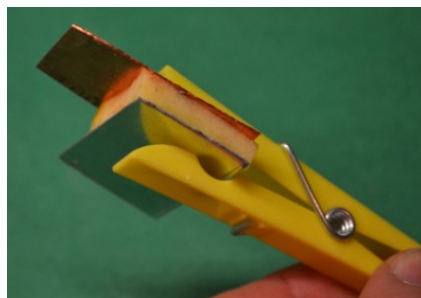
### Varianta 2

#### Pomůcky

Cu a Zn plíšky, kousek jablka (nebo jiného ovoce), kolíček, krokosvorky, dva propojovací vodiče, voltmetr (event. multimetr), LED (lépe vysoko svítivá bílá)

#### Příprava a provedení

Ze zinkového a měděného plíšku, mezi které vložíme např. kousek jablka, vytvoříme „ovočlánek“, který zajistíme kolíčkem na prádlo (viz obr.). K takto vytvořenému ovočláнку připojíme voltmetr a změříme napětí naprázdno (tedy napětí nezatíženého zdroje). Při připojení jedné LED nedojde k jejímu rozsvícení, ale již při spojení cca 4 ovočláneků můžeme vidět slabý svit.



## Možné rozšíření varianty 2

Pomocí této varianty je možné změřit také zkratový proud, a to pouhým přepnutím mutimetru na měření proudu. Dále je možné proměřit celou zatěžovací charakteristiku (viz další experiment) a určit, kdy má daný ovočlánek maximální výkon.

### Závěr

Ovočláanky umožňují jednoduché a rychlé seznámení žáků s chemickými zdroji napětí. Pomocí nich je možné dále bezpečně demonstrovat zkrat zdroje a proměřit i jeho zatěžovací charakteristiku.

Je také vidět, že různé druhy ovoce se chovají trochu odlišně. Na druhou stranu např. citrón a jablko až tak velké rozdíly nevykazují.

Dále je zřejmé, že k rozsvícení LED nejsou ovočláanky příliš vhodné. Při hlubším rozboru je možné ukázat, že na uvedení LED do plného svitu je třeba několika stovek ovočláanků. (Je-li maximální výkon ovočláanky 0,1 mW a červená LED je na plném výkonu při napětí 1,8 V a proudu 20 mA – tedy 36 mW, je na její plný svit třeba 360 daných ovočláanků).

### Další informace

Pokus je převzat od Václava Piskače, viz [2].

## Zatěžovací charakteristika zdroje, vnitřní odpor zdroje

Cílem tohoto pokusu je ukázat závislost svorkového napětí zdroje na odebíraném proudu (sestrojit zatěžovací charakteristiku zvoleného zdroje napětí), tuto závislost vysvětlit, určit vnitřní odpor zdroje a porovnat různé zdroje s ohledem na jejich vnitřní odpor.

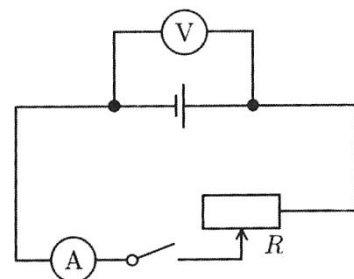
### Pomůcky

akumulátor (plochá baterie,...) reostat 10  $\Omega$ /6 A (20  $\Omega$ /3 A), ampérmetr, voltmetr, spínač, propojovací vodiče

### Příprava a provedení

Protože nám jde o to, proměřit, jak se mění napětí na svorkách zdroje (tzv. svorkové napětí) v závislosti na odebíraném proudu, je třeba v obvodu měnit proud v co nejširším rozsahu (tedy od téměř nulového odběru – resp. nezátíženého zdroje – až po odběr maximální, tj. při **téměř** nulovém odporu vnějšího obvodu, tj. zkratu. (Pozor, u akumulátoru tuto krajní možnost raději nezkoušejte.) Toho dosáhneme zapojením reostatu (o relativně nízkém odporu) do série s ampérmetrem, spínačem a zdrojem.

Protože chceme měřit napětí na svorkách, připojíme voltmetr přímo na zdroj.



Nejprve změříme napětí téměř nezátíženého zdroje (tj. při rozpojeném spínači). Protože odpor voltmetru je poměrně velký, můžeme toto měření prohlásit za měření tzv. naprázdno (zatížení

tekoucím proudem voltmetrem můžeme zanedbat). Tím jsme změřili (téměř) elektromotorické napětí, tedy napětí, které je avizované výrobcem.

Dále reostatem nastavíme co nejmenší proud v obvodu a sepneme spínač. Sledujeme výchylku ampérmetru a zejména pak voltmetru a postupně pomocí reostatu zvyšujeme odebíraný proud. Tím se kvalitativně seznámíme s průběhem zjišťované závislosti.

Nyní přistoupíme k proměření zatěžovací charakteristiky; změříme několik (minimálně 5) hodnot procházejícího proudu a příslušného svorkového napětí. Situaci, kdy dojde ke zkratu, raději (s ohledem na ampérmetr, ale i zdroj samotný) neprovádíme. Můžeme ji ukázat např. u ploché baterie krátkodobým spojením svorek zdroje (a bez zapojeného ampérmetru).

Měření zatěžovací charakteristiky provedeme u několika různých zdrojů (akumulátor, plochá baterie, tužková baterie).

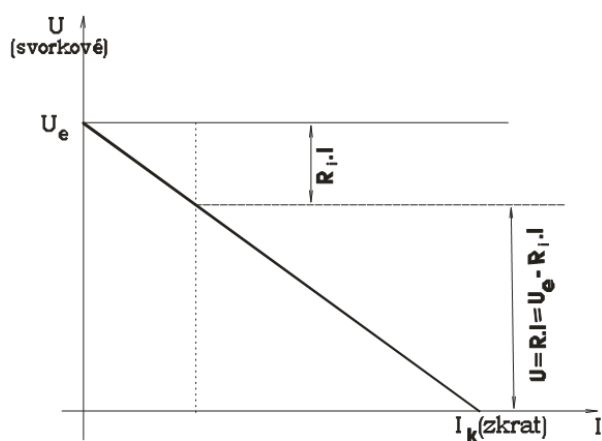
### Závěr

Proměření zatěžovací charakteristiky jsme ukázali, že napětí na zdroji klesá s odebíraným proudem, největší je při nulovém zatížení (tzv. elektromotorické napětí), při zkratu dokonce toto napětí klesá až na nulu.

### Poznámky a vysvětlení

S žáky je vhodné diskutovat o tom, proč napětí na svorkách zdroje klesá. (Můžeme uvést, že jde ve své podstatě o jakýsi zákon zachování – 2. Kirchhoffův zákon – a že naměřená hodnota na voltmetru je úměrná energii, kterou je zdroj při daném proudu schopen dodávat.)

Představíme-li si reálný zdroj jako sériové spojení zdroje ideálního a rezistoru, který reprezentuje ztráty uvnitř zdroje, tedy vnitřní odpor zdroje, je zřejmé, že voltmetrem měříme napětí, které vznikne rozdílem elektromotorického napětí a (úbytku) napětí na vnitřním odporu (tedy  $U_{\text{na svorkách}} = U_e - R_i \cdot I$ ). Napětí elektromotorické se tedy rozdělí na napětí na vnějším obvodu (tedy reostatu a ampérmetru) a na úbytek napětí uvnitř zdroje (tedy vnitřním odporu  $R_i$ ). Je dobré se na tyto úvahy „dívat“ jak ve „světle vzorečků“ (tedy  $U_{\text{na svorkách}} = U_e - R_i \cdot I$ , resp.  $R \cdot I = U_e - R_i \cdot I$ , kde  $R$  je odpor vnější části obvodu,  $R_i$  vnitřní části,  $I$  proud tekoucí obvodem a  $U_e$  elektromotorické napětí), tak prostřednictvím grafu  $U=U(I)$ .



Předpokládáme-li, že je průběh závislosti napětí na proudu lineární (což obecně být nemusí), získáme proložením a následnou extrapolací orientační hodnotu zkratového proudu. Maximální proud, který ze zdroje může téci, lze také určit ze vztahu  $U_{(\text{na svorkách})} = U_e - R_i \cdot I$ .



S žáky pak můžeme diskutovat, jak spočítat vnitřní odpor zdroje a zamyslet se nad tím, jaké jsou důsledky (výhody a nevýhody) malého (velkého) vnitřního odporu. Na základě diskuse dále můžeme rozdělit zdroje na měkké a tvrdé a uvést příklady takových zdrojů (např. porovnat „tvrdost“ ploché baterie s olověným akumulátorem, nabitou plechovkou apod.).

## 2) *Vedení proudu v plynech, proud ve vakuu*

### **Nesamostatný výboj ve vzduchu**

Výboj, tedy vedení proudu v plynu, můžeme rozdělit na dvě skupiny, a to na výboj nesamostatný, kdy k jeho udržení je potřeba vnějším zásahem způsobit (a udržovat) ionizaci plynu (pomocí tzv. ionizačního činidla), a na výboj samostatný, který se „udrží sám“, tedy samotná existence výboje stačí k další ionizaci plynů (letící elektrony a ionty mají dostatečnou energii k tomu, aby mohly dále „atakovat“ a ionizovat okolní neutrální molekuly).

Ionizačním činidlem pro vzduch za běžných podmínek může být třeba obyčejná svíčka.

#### **Pomůcky**

plechovka s alobalem (případně elektroskop), izolační podložka (polystyrén), tyč s flanelem, svíčka.

#### **Provedení**

Plechovku (event. elektroskop) nabijte ze elektrovanou tyčí. Přiblížíme-li k plechovce svíčku (radionuklidový zářič, zdroj UV záření), alobalový lístek „spadne“, čímž signalizuje vybití plechovky. Necháme-li nabitou plechovku (elektroskop) delší dobu v klidu, dojde i tak k postupnému vybíjení, ionizátor vybíjení viditelně urychlí.

#### **Vysvětlení**

Ionizátor (svíčka apod.) způsobí ionizaci plynu kolem plechovky, vzniklé ionty/elektrony jsou pak k plechovce přitahovány, a způsobí tak její vybití. Dopadají-li na plechovku relativně těžké kationty, mohou z ní vyrážet přebytečné elektrony, což proces vybíjení ještě urychlí.

#### **Poznámky**

- 1) Většinou si žáci pod pojmem výboj vybaví spíše výboj samostatný, který je doprovázen optickými případně i akustickými jevy. Výše uvedeným pokusem (pokusy) tak ukážeme (třeba pro žáky známý, ale „neviditelný“) fakt, že plyny mohou vést elektrický proud i bez těchto doprovodných a efektních jevů a že i zdánlivě nevodivé látky mohou být za určitých okolností dobrými (a třeba „nenápadnými“) vodiči.
- 2) Z didaktického pohledu je ale vhodnější zvolit při výuce nejdříve efektnější pokusy (např. s plazmovou koulí apod.) a teprve pak přejít k detailnějšímu zkoumání, a tedy i k pokusům méně efektním.
- 3) Pro ionizaci je možné použít i vhodný radioaktivní zdroj či zdroj UV záření. Pro vytvoření samostatného výboje (a viditelného poklesu lístku elektroskopu v relativně krátkém čase) je

potřeba silnější zdroj. Takový zdroj již není pro organismus zcela bezpečný, a proto tuto variantu ani nezařazujeme.

## Samostatný výboj ve vzduchu – jiskra

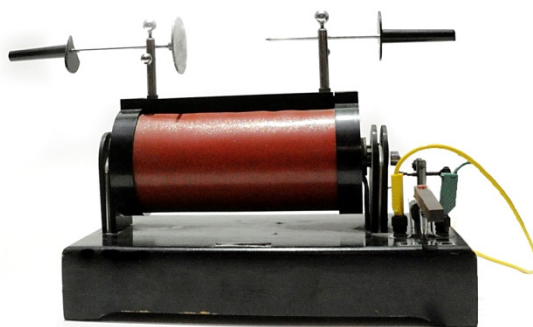
Nesamostatný výboj může do samostatného přejít buď zvyšováním napětí mezi elektrodami, nebo (zejména při nižších napětích) snížením tlaku plynu. Při zvýšení napětí mezi elektrodami získají ionizované částice dostatečně velkou energii na další ionizaci na relativně krátké dráze, tj. již za běžných podmínek – normálních tlaků, při snížení tlaku se zase prodlouží urychlující dráha (tedy dráha mezi dvěma po sobě následujícími srážkami). Při nárazech nemusí dojít přímo k ionizaci, ale třeba jen k excitaci atomů plynu, čímž se při následné deexcitaci přebytečná energie přemění v záření a výboj plynu může být tak doprovázen světelnými efekty.

V této části si vyzkoušíme samostatný výboj za normálního tlaku ve vzduchu. Takovým výbojem může být obloukový, jiskrový výboj nebo tzv. koróna (Eliášův oheň). Na přípravu je asi nejjednodušší, a přitom efektní, výboj jiskrový. Navíc každý určitě viděl jiskru mnohonásobně mohutnější, než si připravíme ve třídě, a to blesk. Jiskrový výboj můžeme předvést například s Wimshurstovou indukční elektrikou nebo pomocí Ruhmkorffova transformátoru (někdy zvaného Ruhmkorffův induktor).

Ruhmkorffův transformátor se používá k získání vysokého napětí řádově desítek kV, proto **při práci dbejte zvýšené opatrnosti!!!**

### Pomůcky

Wimshurstova indukční elektrika, Ruhmkorffův transformátor, akumulátor 6 V, spojovací vodiče, (případně van de Graaffův generátor)



Ruhmkorffův transformátor

([http://ara.karlov.mff.cuni.cz:8080/mediawiki/images/0/06/10.41\\_01.jpg](http://ara.karlov.mff.cuni.cz:8080/mediawiki/images/0/06/10.41_01.jpg))

### Příprava a provedení

Při vhodné vzdálenosti elektrod indukční elektriky (event. van de Graaffova generátoru) dojde k přeskočení jiskry. Z délky jiskry můžeme odhadnout i napětí mezi elektrodami, elektrická pevnost vzduchu je přibližně 30 kV/cm.

Ke správné funkci Ruhmkorffova transformátoru je třeba připojit akumulátor/y (8-12 V) a vyladit přerušovač (Wagnerovo kladívko) vhodnou vzdáleností kontaktů přerušovače se šroubem, vzdálenost elektrod (vybíječů) je při tom 2 cm až 5 cm.

Do cesty výboje můžeme dát tenký papír, proti světlu pak uvidíme malinké otvory.

### **Závěr**

Dosáhne-li velikost intenzity elektrického pole mezi elektrodami hodnoty elektrické pevnosti vzduchu, dojde k jeho probití jiskrovým výbojem.

### **Poznámka**

Vzdálenost hrotů od jiskřiště Ruhmkorffova transformátoru nesmí být větší než několik centimetrů, pokud není výstup zatížen (např. při připojení výbojové trubice). Stejně tak nesmí být uveden do chodu bez elektrod jiskřiště, protože by mohlo dojít k probití sekundárního vinutí, a tím ke zničení celého transformátoru.

### **Další informace**

O principu Wimshurstovy indukční elektriky se lze podrobněji dočíst např. na stránkách FyzWebu:

<http://fyzweb.cz/materialy/videopokusy/POKUSY/JISKRENI/INDUKCNIELEKTRINA.htm>

Aplet popisující činnost Wimshurstovy indukční elektriky je možné nalézt např. na stránkách:

[https://www.vacak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=ele\\_wimshurst&l=cz](https://www.vacak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=ele_wimshurst&l=cz)

Ruhmkorffův transformátor v činnosti a jednoduchý popis jeho principu je uveden např. na:

<http://fyzweb.cz/materialy/videopokusy/POKUSY/RUHMORFF/INDEX.HTM>

## **Plazmová koule**

Plazmová koule je efektní fyzikální hračka, která se používá pro dekorativní, ale i výukové účely. Ačkoli se vyrábějí baňky různých tvarů (zejména válce a kužele), dále o nich budeme psát jen jako o koulích. Autorem plazmové koule je fyzik William Parker, který ji v roce 1973 zkonstruoval při pokusech s elektrickými výboji v neonu a argonu. Elektrický výboj je napájen střídavým proudem o frekvenci 10-35 kHz při napětí 2-5 kV (velké koule mohou pracovat i s napětím až 35 kV). Nejběžnější plazmová koule (svítící růžovofialově) je plněna směsí o složení 95 % neonu a 5 % xenonu, plazmová koule s oranžovými trsy a zelenými provazci obsahuje směs 95 % neonu s 2,5 % xenonu a 2,5 % kryptonu při tlaku asi 50krát nižším, než je tlak atmosférický.

### **Pomůcky**

plazmová koule, zářivka, výbojky s různými plyny

### **Příprava a provedení**

Pozorujte výboje v plazmové kouli, při přiblížení a dotknutí jedním a dvěma prsty. Přibližujte ke kouli zářivku a výbojky s různými plyny.

## Poznámky a vysvětlení

Výboj v plazmové kouli je uzavírán okolním vzduchem, který se na povrchu koule ionizuje a trochu charakteristicky zapáchá ozónem (v důsledku korónového výboje, který je však slabý), dotykem se korónový výboj na povrchu koule uzavře přes dotýkajícího, protože lidské tělo je vzhledem k vysokému obsahu vody mnohem vodivější než okolní vzduch, a provazce plazmy se soustřeďují do místa dotyku. Ačkoli je napětí relativně velké, výboj má poměrně malou proudovou hustotu, a navíc vysoká frekvence zajišťuje, že proud teče po povrchu vodiče (tzv. skinefekt). Nejenže nám tak proud neublíží, ale necítíme ani brnění, můžeme cítit jen nepatrné zvýšení teploty v místě dotyku.

Výboj v kouli je poměrně komplikovaným a komplexním jevem. Tvar výboje je ovlivněn i konvekcí teplého plynu ve výboji (je to patrné u plazmových „koulí“ válcovitého tvaru), fluktuacemi tlaku, vzájemným působením pohybujících se iontů (nedotýkáme-li se povrchu, jednotlivé výboje – provazce – se rozvrství přibližně rovnoměrně) apod. Můžeme si také všimnout, že těsně u povrchu skla se provazce plazmy rozšiřují a mění barvu na růžovou. Vrstva plynu těsně přiléhající k povrchu skla se poměrně hodně chladí, a proto se zde plyn ionizuje obtížněji, současně se zde částice pohybují nejpomaleji. V důsledku toho je při povrchu skla výboj veden především atomy plynu, které se ionizují nejnáze (mají malou ionizační energii), což je právě růžově svítící neon. Barva místa dopadu může být ovlivněna naneseným luminoforem, jak tomu u některých koulí bývá.

Vysoké napětí vytváří kolem koule poměrně silné pole. O tom se můžeme přesvědčit tím, že k zapnuté kouli přiblížíme úspornou žárovku nebo zářivku. Ta se rozsvítí energií vyzařovanou do vzduchu (nemusíme se zářivkou ani dotýkat koule). Výboj se opět uzavírá přes naši ruku (můžeme předvést „kouzlo“ s nabíráním světla apod.). Vyzařovaná energie koule ruší příjem rádia a působí problémy počítačovým periferiím (zejména myším). Naopak můžeme vysoké napětí využít k rozsvěcení výbojek s různými plyny, aniž bychom měli k dispozici jiný zdroj vysokého napětí (např. Ruhmkorffův transformátor).

## Další informace

Další zajímavý článek najdete na adrese <http://3pol.cz/950-plazmova-koule>.

## Elektrický výboj ve vzduchu o různém tlaku

### Pomůcky

sada výbojových trubic se vzduchem různého tlaku, Ruhmkorffův transformátor, akumulátor/y, propojovací vodiče, krokosvorky



Připojení sady výbojových trubíc se vzduchem různého tlaku  
([http://ara.karlov.mff.cuni.cz:8080/mediawiki/index.php/10.45\\_Crookesova\\_trubice](http://ara.karlov.mff.cuni.cz:8080/mediawiki/index.php/10.45_Crookesova_trubice))

### **Příprava a provedení**

Připravíme Ruhmkorffův transformátor, vodiči propojíme jiskřiště s první výbojovou trubící, uvedeme transformátor do provozu a pozorujeme výboj. Vypneme a postupně připojujeme další výbojové trubice a pozorujeme, jak se se snižujícím se tlakem mění charakter výboje.

**Při práci s Ruhmkorffovým transformátorem dbejte zvýšené opatrnosti!!!**

### **Závěr**

Vzhled a charakter výboje závisí na tlaku vzduchu v trubici. Nejdříve pozorujeme provazcovitý výboj, při dalším snížení tlaku vznikne doutnavý výboj, který má poměrně složitou strukturu v závislosti na rychlosti letících elektronů, a tedy na jejich „ionizační a excitační schopnosti“ (modrofialové katodové doutnavé světlo kolem katody, Faradayův tmavý prostor, červenavě oranžový anodový sloupec). Při tlaku řádově jednotek pascalů výboj mizí, nazelenalé světélkování vnitřního povrchu trubice je způsobeno dopadajícími elektrony (luminiscence), a tedy je důkazem katodových paprsků (tj. elektronů vylétávajících z katody).

## **Závislost barvy elektrického výboje na druhu plynu**

### **Pomůcky**

sada výbojových trubíc s různými plyny, Ruhmkorffův transformátor, akumulátor(y), propojovací vodiče, krokosvorky

### **Příprava a provedení**

Připravíme Ruhmkorffův transformátor, pomocí vodičů propojíme jiskřiště s první výbojovou trubící, uvedeme transformátor do provozu a pozorujeme výboj. Vypneme a postupně připojujeme další trubice a pozorujeme barvu výbojů.

### **Závěr**

Barva výboje závisí na druhu použitého plynu.

## Elektrický proud ve vakuu (katodové záření)

### Pomůcky

Katodová trubice s kovovým křížem případně úzkou štěrbinou (na pomůcce se štěrbinou je lépe vidět vliv magnetického pole, na kříži zase lépe vynikne jeho stín na stínítku), Ruhmkorffův transformátor, akumulátor(y), propojovací vodiče, krokosvorky, tyčový magnet

### Příprava a provedení

Připravíme k provozu Ruhmkorffův transformátor, k vybíjecím elektrodám transformátoru připojíme katodovou trubici s křížem. Po spuštění transformátoru pozorujeme na stěně trubice zelenavou fluorescenci skla a stín kříže. Katoda, ze které vylétají elektrony, musí být proti kříži. Je-li obraz nezřetelný, je katodou kříž, proto přepneme komutátor transformátoru a změníme polaritu napětí. Jedná-li se o letící elektrony, musí být paprsek ovlivnitelný magnetickým polem. Prozkoumáme proto vliv magnetického pole na paprsek tak, že přibližujeme magnet severním a pak jižním pólem kolmo k předpokládané trajektorii elektronů. Pokud již žáci znají Flemingovo pravidlo levé ruky, nechte je, aby si nejdříve rozmysleli, na kterou stranu by se měl paprsek (resp. stín kříže) vychylovat. Jejich závěr (predikci) pak ověřte pokusem.

### Závěr

Katodové záření je proud elektronů vylétajících z katody. Bez přítomnosti magnetického a elektrického pole se šíří přímočaře, vychyluje se magnetickým polem, má fluorescenční účinky.

## Zářivka

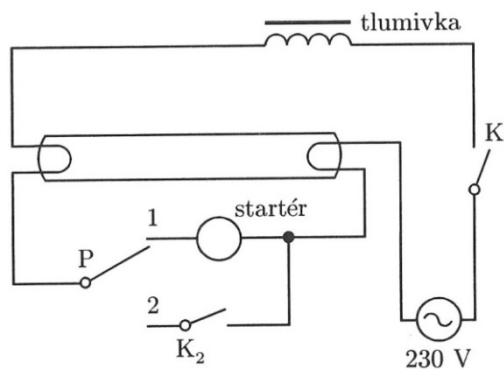
### Pomůcky

K provedení tohoto pokusu je na KDF sestavena pomůcka (panel) podle následujícího obrázku (je zde připevněna zářivka s tlumivkou a startérem na desce, přepínač P, jeden spínač vypínač –  $K_2$ ), zdroj síťového napětí, spojovací vodiče, případně spínač  $K_1$ .

### Příprava

Na obrázku je schéma zapojení zářivky. (Využitím připraveného panelu propojte jednotlivé prvky vodiči podle schématu, který je přímo na panelu). Tlumivka (cívka s velkou indukčností) se používá při provozu zářivky s výhodou místo ochranného rezistoru, protože má minimální spotřebu elektrické energie v důsledku fázového posunu napětí vůči proudu (téměř o  $\pi/2$ ).

Pokusem předvedeme dva způsoby rozsvícení zářivky: bez startéru a se startérem.



## Provedení

1) Přepínač P dáme do polohy (2), čímž je vyřazen startér. Na označené svorky panelu připojíme síťové napětí 230 V. Sepneme vypínač  $K_1$  a pak sepneme na dobu asi 3 s vypínač  $K_2$ . (Místo spínače  $K_1$  můžeme příslušné vodiče zapojit přímo do zdroje. **Pozor ale na bezpečnost!!**) Za tuto dobu se stačí nažhavit elektrody zářivky. Ponecháme-li spínač  $K_2$  delší dobu sepnutý, je vidět slabá naoranžovělá záře rozžhavených elektrod. Vypneme-li vypínač  $K_2$ , proud tlumivkou začne prudce klesat a vlivem přechodového děje se na cívce-tlumivce indukuje relativně vysoké napětí (cca 500 V). Toto napětí spolu s elektronovým mrakem kolem elektrod (vzniklým jejich žhavením) pak může stačit k zapálení výboje v zářivce. Po jeho zapálení značně poklesne napětí mezi elektrodami (na tzv. provozní napětí, které je cca 120 V). Aby nedošlo k značnému zvýšení proudu a případnému zapálení obloukového výboje, je třeba do obvodu zařadit předřadný odpor – po zapálení výboje tuto funkci plní samotná tlumivka. Pokud však indukované napětí nestačí k zapálení výboje, celý proces (vypínání a zapínání) opakujeme.

2) Přepínač P přepneme do polohy (1), na označené svorky panelu připojíme síťové napětí 230 V a zapojíme zářivku vypínačem  $K_1$ . Funkci mechanického zapínání a vypínání převezme teď startér (viz obrázek), ve kterém je doutnavka s jednou pevnou elektrodou a druhou bimetalovou a odrušovacím (svitkovým) kondenzátorem. (Doporučujeme si startér rozebrat a podívat se na jeho složení.) Jak již víme, napětí 230 V nestačí k zapálení doutnavého výboje v zářivce, ale po sepnutí spínače  $K_1$  stačí k zapálení (doutnavého) výboje ve startéru (namodralé probliknutí), který tak uzavře elektrický obvod. Výbojem ve startéru se ohřeje bimetalový kontakt. Ten svým ohnutím způsobí sepnutí obou kontaktů v doutnavce, takže se startér zkratuje. Výboj v něm zanikne. Elektrický proud procházející obvodem (při tomto zkratu startéru) nažhává vlákna obou elektrod zářivky. Kontakty startéru se po ochlazení opět rozpojí (pro snížení možnosti zapálení obloukového výboje mezi elektrodami startéru, má bimetál prakticky dvě polohy, tedy se neohýbá postupně (pomalu), ale rychle přeskočí/přepíná mezi jeho krajními polohami, tedy podobně jako vypínač ve varné konvici). Přerušování obvodu vyvolá zvýšení napětí mezi elektrodami zářivky (viz přechodový jev v obvodu s cívkou). Toto napětí může pak stačit k zapálení výboje mezi elektrodami zářivky (viz předchozí bod). Provozní napětí při zapálení výboje v zářivce je nižší, než je třeba k zapálení výboje ve startéru, proto se startér už znovu (při výboji v zářivce) nesezne.



Podrobný popis zářivky a její srovnání s žárovkou najdete např v [4].

## Poznámka

Na daném pokusu lze žákům ukázat celou řadu jevů a jejich užití v praxi (vedení proudu v plynech, luminiscence, funkce cívky v obvodu apod.). Je na zvážení učitele, který z těchto jevů chce právě demonstrovat. Zde je pokus uveden v souvislosti s vedením proudu v plynech (nutné žhavení a samostatný výboj). Ostatní jevy zde zdůrazňovány nejsou. Podobně při výuce není vždy vhodné se zabývat všemi jevy, ale jen některé vypíchnout. Záleží vždy na cíli a situaci ve třídě (celá třída, seminář apod.). Pochopitelně je možné se k danému pokusu několikrát v průběhu výuky vracet a

demonstrovat (resp. zdůrazňovat) ty jevy, které jsou právě v oblasti našeho zájmu. Tím dojde k lepšímu porozumění a zafixování poznatků. Navíc si žáci uvědomí, že se v praxi nemusí vždy uplatňovat jen jeden jev, že reálné procesy a využití fyzikálních jevů jsou komplexnější, že se postupně seznamujeme s dílčími poznatky, které je pak třeba propojovat.

### **Závěr**

Při konstrukci zářivky je využita tepelná emise pro snížení zápalného napětí zářivky. Pro zapálení doutnavého výboje je třeba vyšší napětí, než je napětí provozní.

### **Literatura**

[1] E. Svoboda a kol.: Pokusy z Fyziky na střední škole 3. Prometheus, Praha 1999.

ISBN: 80-7196-009-8

[2] V.Piskač: <http://fyzikalnisuplik.websnadno.cz/Elektrina-a-magnetismus.html>

[3] P.Žilavý: <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/navody-na-pokusy/2135-krokovy-napeti>






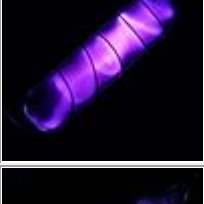

[4] FyzWebu: <http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=109>




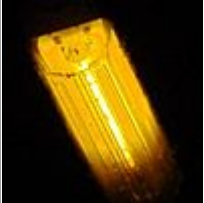
Tento materiál vznikl v rámci opatření na podporu studijních programů zaměřených na přípravu budoucích učitelů na pedagogických i nepedagogických fakultách veřejných vysokých škol (2021).



## Dodatek pro inspiraci

Tabulka barev výbojů v různých plynech

plyn	Barva	Poznámka	Obrázek
Helium	Bílá až oranžová; za určitých podmínek může být šedá, modrá, nebo zelená-modrá.	Používané umělci pro speciální účely osvětlení.	
Neon	Červená-oranžová	Intenzivní světlo. Často používán v neonových nápisech a zářivkách.	
Argon	Fialová až světle fialově modrá	Často se používá společně s rtuťovými parami.	
Krypton	Světle šedá až zelená. Při vysokých špičkových proudech, jasně modro-bílá.	Použité umělci pro speciální účely osvětlení.	
Xenon	Šedá nebo modro-šedá až bílá. Při vysokých špičkových proudech, velmi světle zeleno-modrá.	Používá se v blescích, xenonových světlometech a xenonových obloukových lampách.	
Dusík	Podobně jako argon, ale méně výrazně, růžovější, při vysokých špičkových proudech jasně modro-bílá.		
Kyslík	Fialová až levandulová, slabší než argonové		

Vodík	Levandulová při malých proudech, růžová až purpurová nad 10 mA		
Oxid uhličitý	Modro-bílá až růžová, při nižších proudech jasnější než xenon.	Použití v CO <sub>2</sub> laserech.	
Rtuťové páry	Světlo je modré, intenzivní ultrafialové.	V kombinaci s fosforem se používá k výrobě mnoha barev světla. Široce používané rtuťovou výbojkou.	
Sodíkové páry (nízký tlak)	Jasně oranžovo-žlutá	Široké použití v sodíkových výbojkách.	

(<http://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%BDbojka> - na daném odkazu najdete i obrázky spektrálních čar)



Obr. Dvojitá lampa osazená rtuťovou i (vysokotlakou) sodíkovou výbojkou a jejich spektra.  
(Foto: Pavel Nesét, spektra: Jan Martiš, <http://www.vybojky-zarovky.cz/text26.html>)