

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI

Přírodovědecká fakulta

Katedra anorganické chemie



ELEKTRICKÝ PROUD V CHEMII

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor práce:	Bc. Tomáš Holík
Vedoucí práce	Mgr. Peter Antal, Ph.D.
Studijní obor:	Učitelství chemie pro střední školy (maior) a matematiky (minor)
Typ studia:	Prezenční

Olomouc 2023

Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora:	Bc. Tomáš Holík
Název práce:	Elektrický proud v chemii
Typ práce:	diplomová práce
Pracoviště:	Katedra anorganické chemie, PřF Univerzity Palackého v Olomouci
Vedoucí práce:	Mgr. Peter Antal, Ph.D.
Rok obhajoby práce:	2023

Abstrakt:

Tato diplomová práce je primárně zaměřena na významné objevy a zákonitosti spojené s elektrickým proudem v oblasti chemie. Teoretická část pojednává z pohledu historie chemie o jednotlivých epochách od počátků lidské civilizace až do první poloviny 20. století, kde je věnována hlavní pozornost práci vědců, kteří se za svého života této problematice aktivně věnovali (například Luigi Galvani, Alessandro Volta, Humphry Davy, Michael Faraday aj.). Jedná se tedy pro běžného čtenáře o souhrn těch nejdůležitějších milníků spojených s oborem elektrochemie, ze kterých těžíme dodnes. Praktická část se naopak věnuje pokusům o replikaci některých experimentů, které výše zmínění přírodovědci sami prováděli, a jejich následnou analýzu. Mimo to byly sestaveny i didaktické materiály ve formě prezentace, pracovního a metodického listu, které mohou sloužit k osvětě tohoto tématu v oblasti historie chemie zejména u mladší generace.

Klíčová slova:	statická elektřina, elektrochemie, elektrolýza, Luigi Galvani, Alessandro Volta, Humphry Davy, Michael Faraday, galvanické články
Počet stran:	87
Jazyk:	čeština

Bibliographic identification

Author's first name and surname:	Bc. Tomáš Holík
Title of thesis:	Electric current in chemistry
Type of thesis:	diploma thesis
Department:	Department of Inorganic Chemistry, Palacky University in Olomouc
Supervisor:	Mgr. Peter Antal, Ph.D.
The year of presentation:	2023

Abstract:

This diploma thesis is primarily focused on important discoveries and patterns associated with electric current in the field of chemistry. The theoretical part deals from the perspective of the history of chemistry about individual epochs from the beginnings of human civilization until the first half of the 20th century, where the main focus is on the work of scientists who have been actively engaged in this issue in their lifetimes (for example Luigi Galvani, Alessandro Volta, Humphry Davy, Michael Faraday etc.). It is therefore, for the ordinary reader, a summary of the most important milestones associated with the field of electrochemistry, from which we still benefit today. The practical part, on the other hand, is devoted to attempts to replicate some of the experiments that the aforementioned scientists themselves conducted and their subsequent analysis. In addition, didactic materials have also been compiled in the form of a presentation, a working and methodical paper, which can serve to educate this topic in the history of chemistry especially in the younger generation.

Keywords: static electricity, electrochemistry, electrolysis, Luigi Galvani, Alessandro Volta, Humphry Davy, Michael Faraday, galvanic cells

Nuber of pages: 87

Language: Czech language

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci sepsal zcela samostatně pod odborným dohledem vedoucího diplomové práce Mgr. Petera Antala, Ph.D. za použití pramenů uvedených v seznamu literatury. Dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s vytvořením této diplomové práce neporušil autorská práva.

Souhlasím s tím, aby byla tato diplomová práce přístupná v knihovně katedry anorganické chemie Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci.

V Olomouci dne 27.4. 2023

.....

Bc. Tomáš Holík

Poděkování:

Tímto bych chtěl upřímně poděkovat mému vedoucímu diplomové práce Mgr. Peteru Antalovi, Ph.D., za poskytnutí velice cenných a obohacujících rad, času při řešení samotné diplomové práce a za dodatečné nápady či připomínky, na základě kterých mohla vzniknout takto rozsáhlá práce zachycující ve svém obsahu vývoj elektrického proudu napříč historií a jeho následné využitelnosti v oblasti chemie. Mimo to bych chtěl ještě poděkovat své rodině a nejlepším přátelům za podporu a rovněž také všem pracovníkům katedry anorganické chemie za umožnění vypracovat předloženou diplomovou práci.

OBSAH

1.	ÚVOD	8
2.	CÍLE PRÁCE	10
3.	TEORETICKÁ ČÁST	11
3.1.	STRUČNÝ PŘEHLED SOUČASNÉ VÝUKY ELEKTROCHEMIE NA ZÁKLADNÍCH A STŘEDNÍCH ŠKOLÁCH	11
3.2.	POČÁTKY ELEKTRINY – THALES Z MILETU	12
3.3.	OBJEVY 17. A 18. STOLETÍ SPOJENÉ S ELEKTRINOU	14
3.4.	ITALŠTÍ VELIKÁNI KONCE 18. STOLETÍ	20
	3.4.1. Luigi Galvani a žabí stehýnka	20
	3.4.2. Alessandro Volta a jeho šokující objevy	22
3.5.	HISTORICKY PRVNÍ PROVEDENÁ ELEKTROLÝZA.....	30
3.6.	ZLATÁ ÉRA ELEKTROLÝZY VE SLUŽBÁCH BRITSKÝCH VĚDCŮ.....	32
	3.6.1. Humphry Davy, objevitel nespočtu prvků	32
	3.6.2. Michael Faraday, král elektrochemie.....	36
3.7.	NASTUPUJÍCÍ ÉRA GALVANICKÝCH ČLÁNKŮ	41
	3.7.1. Tajemství Bagdadské baterie	41
	3.7.2. Daniellův článek, vedoucí celého konvoje.....	43
	3.7.3. Palivový článek soudce Grovea	45
	3.7.4. Bunsenův článek s uhlíkovou modifikací.....	47
	3.7.5. Leclancheův článek, předchůdce tužkové baterie.....	48
3.8.	HLINÍK JAKO GENERÁL PRŮMYSLOVÉ REVOLUCE	50
3.9.	IZOLACE PROBLEMATICKÉHO FLUORU	53
3.10.	METODA VAN ARKEL – DE BOER, KOMERČNÍ PŘÍPRAVA VYSOCE ČISTÝCH KOVŮ	55
4.	PRAKTICKÁ ČÁST	57
4.1.	POUŽITÉ CHEMIKÁLIE A MATERIÁLY.....	57
4.2.	APLIKOVANÉ ANALYTICKÉ METODY A MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE.....	57
4.3.	PRAKTICKÉ ÚKOLY	58
	4.3.1. Úkol číslo 1: Sestavení funkční repliky Voltova sloupu	58

4.3.2. Úkol číslo 2: Pokus o elektrolytickou izolaci draslíku a sodíku modifikovaným postupem Humphry Davyho	60
4.3.3. Úkol číslo 3: Replikace Faradayova pokusu zaměřeného na vodivost prostředí	62
4.3.4. Úkol číslo 4: Vytvoření učebních materiálů v rámci popularizace vědy pro žáky SŠ.....	63
5. VÝSLEDKY A DISKUZE.....	66
5.1. DOKUMENTACE A VYHODNOCENÍ PROVÁDĚNÝCH ÚLOH.....	66
5.1.1. Sestavení funkční repliky Voltova sloupu	66
5.1.2. Pokus o elektrolytickou izolaci draslíku a sodíku modifikovaným postupem Humphry Davyho	69
5.1.3. Replikace Faradayova pokusu zaměřeného na vodivost prostředí	73
5.1.4. Vytvoření učebních materiálů v rámci popularizace vědy pro žáky SŠ.....	76
6. ZÁVĚR.....	80
7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	82
8. PŘÍLOHY	87

1. ÚVOD

Už od počátku věků lidské civilizace elektřina měla a vždycky mít bude dopad na naše životy, ať už v pozitivním či negativním smyslu. V pradávných dobách tato magická forma energie byla opředená spousty tajemstvími a všemožnými mýty. Kdo si podle legend dokázal podmanit její moc, vládl potom všem (např. v antickém Řecku bůh blesku Zeus nebo slovanský bůh bouře Perun). Trvalo pak doslova celá staletí, než se lidstvo fascinované touto silou zbavilo svého strachu a začalo se zajímat, co stojí za jejím vznikem a jestli by se nedala nějak tato energie podmanit k užítku všem.

Dějiny využitelnosti elektrického proudu napříč historií jsou co do objevů velmi bohaté, zejména pak na poli chemie. Ať už od počátečního experimentování spojeného se vznikem elektrické energie, až po spoutání této síly ve formě první provizorní baterie a následně jejího dalšího užití při izolování čistých forem některých těžce dostupných prvků tehdejší doby. V současnosti si už vůbec neuvědomujeme, jak velký pokrok nastal na poli poznání a využití elektrické energie, než jsme se stali na ni zcela závislími. Přímou v chemickém odvětví ji dlužíme doslova za mnohé epochální objevy, z kterých těžíme dodnes. Na co však nesmíme nikdy zapomínat, že stejně jako u ohně se může elektrický proud chovat jako velmi dobrý sluha, ale také jako velmi zlý pán.

V předložené diplomové práci je kladen za cíl vypracovat všeobecný přehled historie objevování elektřiny od počátků civilizace až do první poloviny 20. století, přičemž budou vybrány primárně ty nejvýznamější objevy, osobnosti a jejich přínos vědě.

Na hodinách chemie základních a středních škol je věnováno obecně elektrochemii jen velmi málo prostoru. Na základních školách se vyučují především úvodní pojmy (např. iont, kation, anion, oxidace, redukce aj.). Na středních školách kromě obohacení nových poznatků v podobě konkrétnějších informací vztahených k elektrolýze (elektrolyt, disociace, katoda, anoda, galvanický článek, elektrochemická řada napětí kovů aj.) se nejčastěji zavádí ještě s ní spojené téma Faradayových zákonů a popřípadě se i především v části výuky věnované anorganické chemii poukazuje na její využitelnost v průmyslovém odvětví (výroba některých kovů v surové podobě, galvanické pokovování aj.). Vzhledem k tomu že se jedná o obsahově velmi bohaté a zajímavé téma, tak si předložená diplomová práce klade za cíl v teoretické části především přiblížit a vzpomenout některé z nejnámějších a z mého pohledu nejvýznamnějších objevů v chemii za použití elektrického proudu. V praktické části diplomové práce bude snaha konkrétně se zaměřit na některé vybrané replikace experimentů, které ve své době provedli přední světoví vědci tohoto oboru (Alessandro Volta, Humphry Davy, Michael Faraday aj.).

Zároveň bych se chtěl držet co nejvíce autentičnosti (tzv. dodržet pomůcky a chemikálie, při vytváření modelu Voltova sloupu se držet přibližných rozměrů a vzhledu, ...) nebo je také vhodně modifikovat s ohledem na dodržení všech platných směrnic bezpečnosti v chemii, aby si případně i zjednodušené verze těchto vybraných experimentů mohli vyzkoušet sami žáci základních a středních škol. V neposlední řadě bych v rámci své práce také chtěl sestavit komplexní pracovní list, přednášku formou prezentace či návody k některým pokusům jakožto výukové materiály pro žáky základních a především středních škol (včetně metodického listu pro pedagogy), které by zábavnou a poutavou formou dokázaly obohatit výuku na školách. Předložená práce by se tak mohla stát pro vyučující významnou didaktickou pomůckou při popularizaci vědy a taktéž v dnešní době dosti opomíjené historie chemie.

2. CÍLE PRÁCE

- 1) Vypracování přehledu výuky chemie na téma elektrický proud v chemii.
- 2) Tvorba výukových materiálů na téma elektrický proud v chemii (historie, využití).
- 3) Zpracování výsledků ve formě diplomové práce o rozsahu 40 – 60 stran.

3. TEORETICKÁ ČÁST

3.1. Stručný přehled současné výuky elektrochemie na základních a středních školách

V současně nastaveném systému školství (v rámci osnov RVP a ŠVP) a nutně náplně probíraného učiva jednotlivých tematických celků se žáci především základních škol setkávají většinou s elektrochemií v hodinách chemie jenom velmi vzdáleně a okrajově. Úzce s tím souvisí také problematika toho, že pro zdárné pochopení tohoto tematického celku musí mít žák znalostně osvojený alespoň v základním měřítku aparát zahrnující pojmy jako jsou: elektrický proud, napětí, odpor, zdroje elektrické energie (z běžného života) aj. Tyto znalosti nabývají až během 8. ročníku ZŠ při výuce fyziky, kde je tomuto odvětví věnováno dostatek času a je tady i konkrétně zmíněno vedení elektrického proudu v kapalinách. Zde jim však už v drtivém množství případů ze strany pedagoga není nikterak hlouběji z chemického hlediska daná provázanost vysvětlena. Přitom se jedná o učebnicový příklad možnosti využití v dnešní době tolik popularizovaných mezipředmětových vztahů (fyzika – chemie). Nutné je také zmínit, že některé ze základních škol v současnosti nedisponují ani tím nejzákladnějším vybavením k realizaci alespoň některých výběrově nejjednodušších demonstračních pokusů (např. elektrolýza roztoku chloridu sodného, galvanické pokovování mědi aj.), které by tak výrazně přispěly k lepšímu pochopení elektrochemických procesů názornou formou a téma by tak bylo pro žáky daleko poutavější a záživnější. Zavádí se tedy pro ně alespoň zcela nové pojmy jako jsou iont (konkrétně jejich následné dělení na kation a anion) a vysvětleny jsou jim také obecně redoxní děje (dělení na oxidaci a redukci).

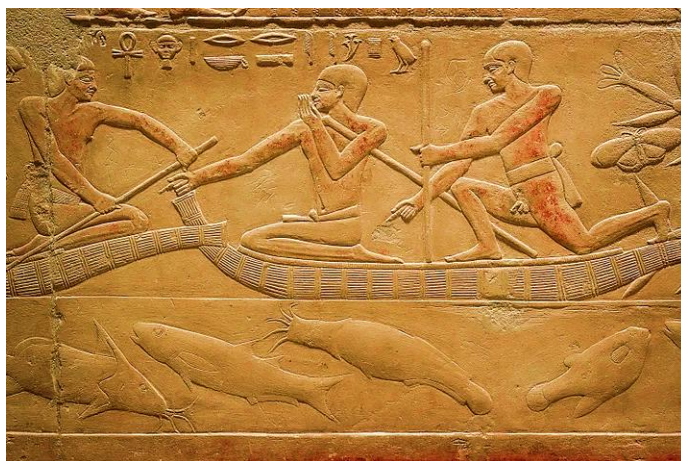
Naopak na odborných středních školách a gymnáziích (nižší i vyšší stupeň) můžeme konstatovat, že je situace v globálním měřítku daleko příznivější. Žáci zde už získávají alespoň ucelenější přehled o využitelnosti elektrického proudu v chemii, kdy zejména v oblasti anorganické chemie je jim tento obor konkrétněji přiblížen například ve spojitosti s průmyslovou výrobou kovů (hliník, alkalické kovy, kovy alkalických zemin aj.) nebo jejich reaktivností s kyselinami či zásadami (úzká souvislost s elektrochemickou řadou napětí kovů). Dále se také seznámí s pojmy provázanými s tématem elektrolýzy jako jsou elektrolyt, elektrody (konkrétní dělení na katodu a anodu), disociace, galvanické články aj. Získají také bližší povědomí o dějích, které se během elektrolytických procesů v systému odehrávají, čímž proniknou lépe k samotné podstatě. Mimo to se, jak ve fyzice, tak v chemii dozví o Faradayových zákonech elektrolýzy, které svou využitelností přispívají především v kvantitativní analýze (matematický aparát ke stanovení obsahu složek v některých

neznámých roztocích), ale také třeba konkrétně v průmyslu (galvanické pokovování). Navíc daleko dostupnější vybavení plně zařízených chemických laboratoří umožňuje žákům provádět pod dohledem svého vyučujícího širokou škálu elektrochemicky zaměřených experimentů, které jim danou látku ještě více do detailu osvětlí. Za zmínku také stojí to, že především v nástavbových seminářích chemie se mohou žáci setkat ještě dodatečně s okrajovým výkladem o redoxních rovnováhách (Nernstova rovnice a příklady konkrétních typů elektrod prvního a druhého druhu).

Stále je však i vzhledem k omezené časové dotaci jednotlivých hodin opomíjen ze strany pedagogů aspekt historického kontextu jednotlivých pouček a vynálezů spojených s elektrochemií, který se může jevit k co nejlepšímu pochopení látky jako zcela klíčový a nezanedbatelný.

3.2. Počátky elektřiny – Thales z Milétu

Ohromující síla přírody projevující se v podobě bouře, blesků, zemětřesení a záplav vedla lidi k pokoře a myšlence, že tyto síly ovládají bohové. Podstata blesků byla dlouhá staletí zcela neznámá. Na stěnách uvnitř hrobek v Sakkáře pocházejících z dob starověkého Egypta (cca 2 750 let před Kristem) lze najít malby zachycující výjevy lovu ryb v řece Nil (obr. 3.1.). Za povšimnutí určitě stojí především vyobrazení sladkovodní ryby z rodu „*Malopterus electricus*“ zvané též jako Pasumec elektrický. Tento druh ryb je schopen generovat elektrické napětí o velikosti až 350 V pomocí zvláštních svalových vláken. Díky tomu může svou kořist ve zlomku vteřiny usmrtit případně alespoň paralyzovat. Není proto divu, že Egypťané přisuzovali této rybě doslova božský původ a lovili ji pouze pro faraóny tehdejší doby, jako výraz té nejvyšší úcty a symbolu moci. Navíc měli pro něj speciální pojmenování „*ten, který zachránil ve vodách mnoha*“. Dnes už můžeme pouze hádat, že to nejspíše bylo z důvodu toho, že každý takový Pasumec elektrický nacházející se v úlovku spolu s ostatními rybami uštědřil dotyčnému rybáři ochromující elektrickou ránu, když se dotknul při výlovu mokré vodácké tyče či sítě, a pak následně nechtěně v křeči vypustil všechny ryby na svobodu. Jedná se tedy o jednu z prvních dochovaných zmínek o střetu člověka s elektřinou a jejími účinky, respektive se specifickým druhem elektřiny, kterou vytvářel živý tvor. ^{[1] [2]}



Obrázek 3.1. – vyobrazení lovu ryb v Nilu Egyptány z hrobky Kagemni v Sakkáře ^[3]

Pokud bychom se přesunuli do antického Řecka, které se vyznačuje až neskutečným rozvojem myšlení, mohli bychom střetnout několik významných myslitelů. Jedním z nich by byl bezesporu Thales z Milétu (624 – 546 př. n. l.), který je dodnes považován za hlavního předsókratovského myslitele a jednoho ze sedmy mudrců starověkého světa. Thales už od mládí tíhnul k různým oborům jako byly například matematika, astronomie, finance, ale nejvíce upřednostňoval politiku, ve které udělal rovněž velkou kariéru. Posléze svůj život zasvětil studiu přírodních jevů. Chtěl objasnit některé problémy tehdejší doby běžnému obyvatelstvu (např. příčiny zemětřesení, magnetismu, zatmění Slunce – jeho přesné předpovězení aj.). Není proto náhodou, že díky jeho přístupu ke zkoumání (kladl si vždy klíčovou otázku „*Proč se věci chovají tak, jak se chovají?*“) jej Aristoteles označil za zakladatele přírodní filozofie.

Za zmínku určitě stojí i fakt, že se při jeho bádání dotknul i oblasti elektřiny. Při svých experimentech si totiž všimnul (cca 585 př. n. l.), že pokud bude třít jantar (mineralizovanou pryskyřici jehličnanů z doby třetihor) (obr. 3.2.) dostatečně dlouho plátnem z konopného vlákna nebo kožešinou z kočičí srsti, tak získá tento minerál schopnost přitahovat některé velmi lehké materiály (např. jemný popel, prach aj.). Thales si myslel, že tento jev je nejspíše způsoben tím, že i neživé předměty mají duši, která se dokáže na okamžik projevit díky tření. Samozřejmě se jednalo z jeho strany o zcela mylný závěr. Alespoň okrajové vysvětlení tohoto úkazu bylo nalezeno až téměř o 2 200 let později.

V roce 1600 anglický lékař a vědec William Gilbert (1544 – 1603) publikoval své pojednání o magnetismu (*De Magnete, Magneticisque Corporibus et de Mago Magnete Tellure* – O magnetu, magnetických tělesech a velkém magnetu zemském), ve kterém zaznamenal sérii pokusů s jantarem vycházející z poznámek právě Thalese z Milétu. Na rozdíl od něj však tvrdil, že tato zkamenělá pryskyřice dokáže akumulovat třením na jistou dobu náboj

a zavedl zcela nový pojem elektřina (z řeckého „*elektron*“ znamenajíc jantar), který používáme dodnes. [4] [5] [6]



Obrázek 3.2. – jantar z naleziště v Litvě

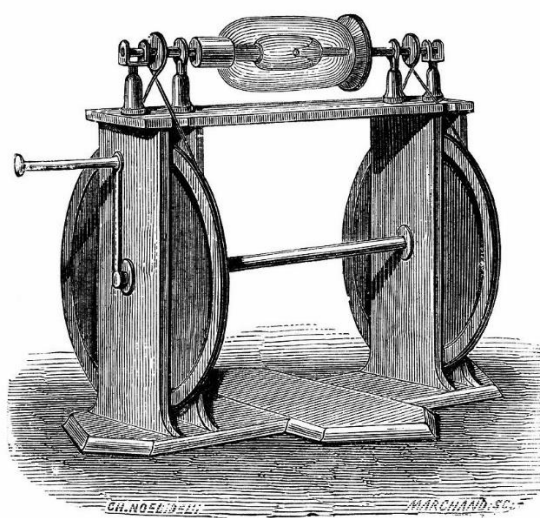
3.3. Objevy 17. a 18. století spojené s elektřinou

I když bychom zajisté našli příklady vědců napříč staletími od doby Thalese z Milétu, kteří prováděli při svých bádáních i některé experimenty, které měly do jisté míry spojitost s elektřinou, stále bylo patrné, že se jednalo z jejich strany spíše o magické triky sloužící ve většině případů k pobavení vyšších vrstev (zejména od 18. století). Důvodem malého zájmu o tento fenomén mohl být také způsoben strachem z neznámého. V době, kdy lidstvo stále věřilo, že blesky při bouřce jsou od samotného Boha (v antickém Řecku byly dokonce připisovány bohu Diovi jako jeho zbraň určená k trestání) se spíše myslitelé a vynálezci až do počátků 17. století od jevů spojených s touto pro ně magickou a zapovězenou silou odvraceli. Vše následně odstartovaly objevy zařízení sloužící ke generování a uchovávání statické elektřiny, neboť to byly ty nejhlavnější problémy, které se musely prioritně vyřešit. Bez nich by se totiž nadále nemohly zkoumat vlastnosti a účinky tohoto fenoménu, a tím by tak pokrok v tomto odvětví nadále stagnoval.

První vynález generátoru na statickou elektřinu je připisován německému politikovi a vědci Otto von Guerickovi (1602 – 1686), který je známý především pro své experimenty s vakuem. Nejprve nalil do duté skleněné koule roztavenou síru a po jejím vychladnutí skleněný obal následně odstranil jednoduše rozbitím. Takto zhotovenou dostatečně velkou sirnou kouli poté opatřil dřevěnou tyčí a umístil ji do dřevěné nádoby připomínající svým vzhledem kolébku. Elektrostatický náboj se generoval obyčejným třením koule ze síry rukou. Guerick si uvědomoval, že při provádění dalších pokusu s nashromážděnou statickou elektřinou musí

pracovat velmi rychle a obezřetně, aby ji nechtěně případnou neuváženou manipulací nevybil, což byla přední nevýhoda úplně prvních generátorů. Musíme si uvědomit, že povědomí o tom, jestli se dá elektřina transportovat z jednoho místa na druhé nějak efektivněji (např. rozvodem pomocí vodičů) než přenášet celé zařízení, nebylo do této chvíle žádné a čekalo teprve na své objevení. Při dalších pokusech von Guerick zjistil, že statickou elektřinu lze generovat i použitím prázdné skleněné baňky, tedy bez použití sirné koule.

Po dalších experimentech v této oblasti vědci přišli roku 1730 na podstatu vedení elektřiny především z využití vlastností plynů a jejich schopnosti ionizace, což je děj, při kterém se plyn stává vodičem elektrického proudu. Nikdo ovšem nečekal, že v tom klíčovou roli sehraje právě rtuťové barometrické zařízení objevené italským matematikem a fyzikem Evangelistou Torricellim (1608 – 1647). Všimli si totiž, že pokud se větší zkumavka naplněná rtuťí řádně protřepe, tak posléze v její částečně vakuované části můžou ve tmě pozorovat emisi světla (ve starých spisech lze narazit i na specifické označení tohoto pozoruhodného jevu jako takzvané „*barometrické světlo*“). Za zmínku určitě stojí i anglický vědec Francis Hauksbee (1660 – 1713), který byl laboratorním asistentem sira Isaaca Newtona (1643 – 1727) a demonstrátorem Královské společnosti. Hauksbee se mimo své běžné povinnosti věnoval výzkumu elektřiny. Přišel na to, že když do částečně vakuované skleněné válcovité nádoby obsahující mimo jiné páry rtuti umístí malý rotor sloužící k tření disku z jantaru, tak se po následném uvedení mechanismu do chodu otáčením kliky nádoba rozsvítí (obr. 3.3.). Toto zařízení lze pokládat za první prototyp rtuťové výbojky.



Obrázek 3.3. – náčrt generátoru statické elektřiny Francise Hauksbeeho ^[9]

Čeho si dále Hauksbee při svých experimentech povšimnul bylo to, že pokud si vezme obyčejnou skleněnou trubici a začne ji třít hadříkem, tak se po chvíli elektricky nabije. Posléze ji přiblížil k misce obsahující plevy z obilí, které byly viditelně k takto nabitě skleněné trubici přitahovány. Napadlo ho tedy zda by nemohla prázdná částečně evakuovaná libovolná skleněná nádoba rovněž produkovat „*barometrické světlo*“. Sestrojil tak zjednodušené zařízení, kdy použil dutou skleněnou kouli, z které pomocí přístroje připomínající dnešní vývěvu vysál částečně vzduch. Na rozdíl od jeho primitivní rtuťové výbojky tentokrát umístil připravenou baňku do aparátu, který po uvedení do chodu s ní otáčel. Nakonec stačilo podle dochovaných poznámek od Francise Hauksbeeho jako vnější třecí médium použít pouhé ruce, které se přiložily na rotující částečně evakuovanou skleněnou nádobu. V tmavé místnosti pak šlo dostatečně jasně pozorovat vznik jemně modrého záření uvnitř skleněné koule, které pro představu osvětlilo zčásti menší místnost a umožnilo tak třeba i četbu v relativně dostatečné blízkosti. Tímto zařízením Hauksbee vyvrátil myšlenku, že je rtuť uvnitř nádoby potřebná k vyvolání efektu „*barometrického světla*“. Dále rovněž popsal, že kupodivu vysátím vzduchu z nádoby a jejím hermetickým uzavřením při tření ztratila na povrchu svůj elektrický náboj (tzv. skleněná koule se nechovala už jako klasický generátor statické elektřiny). Není proto divu, že se na tehdejší dobu jednalo o průlomový objev, i když vysvětlení na dostatečné vědecké bázi samotné podstaty vzniku statické elektřiny stále pokulhávalo.

V současnosti jsme v procesu poznávání tohoto úkazu poněkud dál, kdy vycházíme z toho, že centrem všeho je hmota složená z jednotlivých atomů, které mají v základu elektroneutrální charakter. Při tření (způsob dodání energie do systému) dvou navzájem různých materiálů o sebe se nabije jeden z nich kladně (tzv. atomy ztrácí své valenční elektrony) a druhý záporně (tzv. naopak atomy získávají elektrony do jejich valenční sféry). Výsledkem je, že se mezi nimi vytvoří rozdíl elektrostatických potenciálů, tedy elektrické napětí. O tom, jak ochotně jednotlivé typy materiálů ztrácejí či přijímají elektrony nám pojednává tzv. triboelektrická řada (obr. 3.4.), kterou v její nejzákladnější podobě publikoval roku 1757 švédský fyzik John Carl Wilcke (1732 – 1796). V rámci této řady jsou seřazeny jednotlivé materiály tak, že na tzv. záporném konci jsou umístěny látky s vysokou pravděpodobností zisku elektronů při tření (např. ebonit, teflon, PVC, polyethylen, síra, ...). Na tzv. kladném konci jsou látky s vysokou pravděpodobností odevzdání elektronů při tření (např. vlna, sklo, lidská kůže, vzduch, ...). Za povšimnutí také určitě stojí střed triboelektrické řady, kde mají látky spíše neutrální charakter (např. bavlna, papír, nerezová ocel, dřevo, ...). Z uvedené řady vyplývá nesporný fakt, že čím dále od sebe se materiály nacházejí, tím snadněji se při jejich vzájemném tření o sebe vytváří statická elektřina. Mimo to také vědci postupně zjišťovali, že velikost

vygenerovaného elektrostatického náboje závisí rovněž na rychlosti a přitlačné síle (tzv. čím rychleji a silněji třeme látky o sebe, tím silnější účinek bude mít vzniklá statická elektřina).

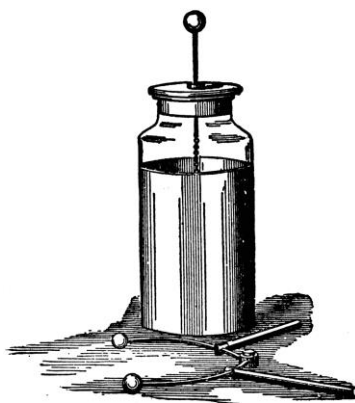


Obrázek 3.4. – zjednodušená verze triboelektrické řady obsahují některé příklady materiálů

Cesta ke generování statické elektřiny byla tak všemožnými způsoby a stále dokonalejšími zařízeními pro všechny vědce a myslitele té doby volná. Vyvstal však další, zcela zásadní problém a to ten, jakým způsobem takto vytvořenou elektřinu uchovat. Dnes už víme, že cesta k objevení součástky zvané kondenzátor vedla napříč staletími usilovné práce a inovátorství, na jejímž konci vzniklo miniaturní zařízení schopné v sobě akumulovat a následně uchovávat elektrickou energii, ne o tolik větší než špendlíková hlavička, které je ve 21. století součástí takřka každého obvodu spotřebiče či zařízení využívající ke svému chodu elektrický proud.

Jak už to bývá při bádání po něčem novém doslova okázalým zvykem, pomohla opět náhoda, kdy si okolo roku 1745 při své práci v laboratoři na zařízení umožňující ukládat statickou elektřinu do zásoby německý vědec Ewald Georg von Kleist (1700 – 1748) všimnul, že může použít obyčejnou skleněnou vialku z části naplněnou vodou nebo popřípadě rtutí. Následně stačilo hrdlo opatřit korkovou zátkou a do ní potom zapíchnout větší železný hřebík nebo dokonce i drát tak, aby jeho konec byl ponořen do oné použité kapaliny. První primitivní prototyp kondenzátoru spatřil světlo světa. Pro jeho nabití stačilo přiblížit vnější část hrotu vyčnívajícího z korku ke generátoru statické elektřiny na určitou dobu. Demonstrace, že opravdu došlo k uložení elektrické energie, se prováděla tak, že se člověk pomalu přibližoval k vnějšímu hrotu láhve s nataženým prstem na vzdálenost, dokud náhle nepřeskočil výboj, který uštedřil dotyčnému slabou paralyzující ránu. Kleist měl ovšem tu smůlu, že nezávisle na něm zkoumal tento fenomén roku 1746 na univerzitě v Leydenu i holandský matematik a fyzik

Pieter van Musschenbroek (1692 – 1761). Ten v dopise adresovaný jeho příteli a kolegovi, francouzskému vědci René – Antoine Ferchault de Réaumurovi (1683 – 1757) ho informuje o jednoduše sestavitelném zařízení, které je schopné uskladnit a spoutat ve vodě okem nezpozorovatelnou elektrickou sílu. Sám mu však výslovně nedoporučuje pokus opakovat, protože podle jeho slov mučivé účinky při uvolnění statické elektřiny zakusil přímo na svém těle a přežil jenom díky milosti Boží. Historické prameny neuvádí přesně, kdo z nich prezentoval svůj vynález první, ale soudě podle zachovaného ustáleného slovního spojení Leydenská láhev, které dodnes používá celý svět, můžeme jasně určit, komu je spíše přisuzováno prvenství za tento významný objev. Zajímavostí ovšem je, že zejména v Německu, rodišti Ewalda George von Kleista, se můžeme setkat i s příznačným označením Kleistova láhev. S postupem času se začali vědci zabírat otázkou, která kapalina je pro naplnění Leydenské láhve nejvhodnější a na jakém alespoň základním principu toto zařízení funguje. Stále se vynořovalo více a více otázek, na něž nebyly dány uspokojivé odpovědi. Až později se zjistilo, že láhev se vůbec nemusí plnit kapalinou. Důvod byl jednoduchý. Pokud se totiž vnitřek a zevnějšek stěn skleněné láhve, která sloužila jako izolant lépe dielektrikum, potáhnul tenkou kovovou folií do určité přijatelné výšky a korková zátka utěšňující hrdlo byla pak opatřena mosaznou tyčí, která se musela dotýkat vnitřní potáhnuté stěny láhve, potom takto vylepšené zařízení fungovalo jako velmi šikovný skladovač statické elektřiny. Tuto podobu Leydenské láhve (obr. 3.5.) známe i dnes, kdy zejména na některých školách slouží k demonstraci pokusů spojených se statickou elektřinou. Princip je ve výsledku velmi jednoduchý. Při nabíjení se uvnitř láhve rovnoměrně rozloží po celé ploše kovové folie kladný elektrický náboj, vnějšek ofoliované části je naopak pokryt nábojem záporným. Takto nerušeně se zde pak může přechovávat vygenerovaná elektrická energie, dokud nedojde ke kontaktu vnější vrstvy a mosazné tyče s vodivým materiálem. Je rovněž důležité, aby vybíjecí médium bylo řádně uzemněno a nedošlo tak při nastřádání obrovského množství statické elektřiny ke katastrofě.



Obrázek 3.5. – nákres Leydenské láhve (včetně vybíjecích kleští) ^[13]

Generátory statické elektřiny a různé alternativy Leydenských láhví, než našly své oprávněné místo pro podstatné využití jejich potenciálu, byly v 18. století společností vnímány jako obrovské senzace vědy. Lidi doslova magicky přitahovala tato neznámá energie. Zařízení se staly po určitý čas součástí salonní zábavy jako hračky po pobavení zejména tehdejší aristokratické smetánky. Nebylo osoby, která by nechtěla zažít na vlastní kůži elektrický šok, kterému se vznešeně začalo přezdívat „elektrický polibek“. Na scénu vstoupili dokonce i lékaři a šarlatáni, kteří si vehementně všímali, jaké účinky ve formě otupělosti a paralýzy může elektrický šok nabídnout. Například přímo na bolest zubů sestrojili přístroj, který dotyčnému pacientovi pouštěl do úst slabé elektrické šoky. Léčba elektřinou byla ještě do 20. století ordinována sanatorii pro duševně choré jako denní chleba doslova na jakýkoliv domnělý problém, ačkoliv byl prokazatelně výsledný efekt pro dotyčného především mučícího charakteru a někdy končil i bohužel smrtí (v současnosti tento trend v medicíně s daleko více humánním přístupem a zcela bezpečným provedením přetrvává jako nejzazší možnost alternativní léčby například pro silně drogově závislé – restartování paměti).

Nesmíme se ovšem divit, protože do té doby nebyly žádné zásadní zprávy, které by informovaly o negativních účincích elektřiny na živý organismus, a tudíž něco tak na tu dobu výstředního a stále opředěného tajemnem se těšilo ohromné popularitě. Až v roce 1745 nalzáme první zmínky o experimentech na zvířatech, kdy francouzský fyzik Jean Antoine Nollet (1700 – 1770) si povšimnul, že vystavením elektrického šoku na drobných ptácích či rybách okamžitě umírají. I tak se začaly posouvat hranice a aplikovat vše ve větším měřítku, kdy Leydenské láhve byly na toto smýšlení ideální. Pokud se jich totiž spojilo několik dostatečně nabitých za sebou, výsledný elektrický výboj se svou velikostí a jasnou září vymykal všem měřítkům tehdejší doby. Co však nikdo stále nechápal, byl fakt, že riziko smrti při provádění takovýchto experimentů je už enormně vysoké. Asi největší pozdvižení způsobila událost, kdy německý fyzik Georg Wilhelm Richmann (1711 – 1753) se pokoušel za bouřky nabít několik větších spojených Leydenských láhví. Naneštěstí se při tomto procesu hlavou přiblížil příliš blízko k hrotu jedné z láhví a téměř okamžitě ho zasáhl enormní výboj, a tak 6. srpna roku 1753 umírá. Podle dochovaných záznamů měl po zásahu elektřinou Richmann pouze drobnou vypálenou díru na čele, ožehnutou podrážku levé boty a tmavě modrou podlitinu na noze. Podrobná patologická analýza odhalila, že jeho mozek neutrpěl žádnou viditelnou újmu, naopak zadní stěna plic zhnědla až místy dokonce zčernala nejspíše od krve. Závěr pitvy byl jednoznačný a to takový, že elektrický výboj si jednoduše prorazil cestu skrze Richmannovo tělo. Společně s ním pracoval v laboratoři toho osudného dne i jeho asistent. Ten naštěstí vyvázl téměř bez zranění a mohl pouze přihlížet, jak jeho zaměstnavatel umírá. Elektřina se tak

konečně projevila ve své plné síle a upozornila tak se zdviženým varovným prstem širokou veřejnost, že při nesprávném zacházení a nedostatku respektu a pozornosti, může snadno, jako blesk z čistého nebe způsobit i smrt. ^{[6] [7] [8] [10] [11] [12]}

3.4. Italští velikáni konce 18. století

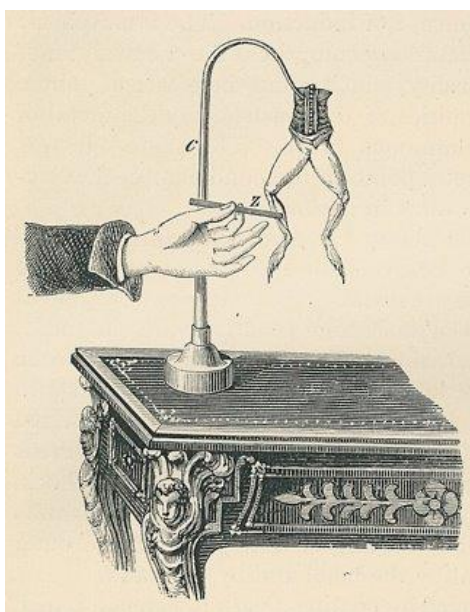
Během konce 17. století a první poloviny 18. století se doslova roztrhnul pytel s objevy spojenými s generováním a uchováváním statické elektřiny. Koncem 18. století se v Itálii odehrál velký souboj mezi dvěma předními vědci tehdejší doby, kteří elektřinu zkoumali. Byli to Luigi Galvani (1737 – 1798) a Alessandro Volta (1745 – 1827), kteří na základě výsledků své práce dokázali demonstrovat ať už vědomě, či nevědomě, že i elektřina je s chemií značně propojena. ^[15]

3.4.1. Luigi Galvani a žabí stehýnka

Luigi Galvani se narodil v italském městě Boloni 9. září 1737. V mládí se při svých studiích věnoval teologii, ale posléze spíše tíhnul k medicíně. Později se stal lékařem, který zejména přispěl k novým poznatkům v porodnictví, ale také získal pozici profesora anatomie na tamější univerzitě v Boloni. Galvani se nikdy netajil tím, že vedle všech svých povinností měl i stále čas na svůj největší koníček, čímž byly všemožné experimenty se statickou elektřinou. Jeho pracovna byla opatřena různými druhy generátorů statické elektřiny, ale také zařízeními na její skladování v podobě známých Leydenských láhví. Jednou při svém bádání si všimnul opravdu nevídané věci. Při vytváření statické elektřiny se totiž na blízkém podnose s vypreparovanými žabími stehýnkami začali dít nevídané věci v podobě záškubů a nekontrolovaných pohybů, jako kdyby mrtvé žáby opět ožily. Dnes už se nedozvíme, jestli k tomuto fenomenálnímu objevu nepřispěla i jeho žena Lucia Galeazzi Galvani (1743 – 1788), která asi nedopatřením zde tác se žabími stehýnkami nechala, když žáby kuchala a chystala k večeři. Galvaniho tento objev uchvátil natolik, že se jej snažil stále dokola opakovat a přijít tak na podstatu tohoto děje. Později, zejména mezi svými kolegy vědci, začal šířit tyto nové poznatky, jenomže k jeho smůle a tím, že byl pouze vystudovaným lékařem bez potřebného vzdělání v oblasti fyziky, nebyl brán vážně a řadu let na něj a jeho práci nahlíželi všichni s vysokou dávkou skepse a pohrdání. Galvani však i nadále pokračoval v bádání, a to co se jevilo jako pro něj podstatná nevýhoda, dokázal přetavit v nevídaný triumf. Totiž, tím že byl oproštěn od všech do této doby známých poznatků na poli fyziky a nedisponoval v této oblasti

takovými znalostmi jako jiní, prováděl pokusy nespočetně krát, obměňoval je a snažil se podstatu elementarizovat natolik, aby on sám dokázal jádro věci pochopit a následně ho pak snadno vysvětlit. Jiní vědci dávno mávnuli nad tímto rukou, někteří dokonce i naznali dle dochovaných pramenů, že takovéto pro ně šarlatánské výzkumy nejsou hodny jejich génia. Galvani se ovšem nevzdával, a i nadále pokračoval ve svém výzkumu.

Co se musí uznat, doslova ho v tomto ohledu provázelo štěstí a o náhody neměl nouze. Jedna taková šťastná okolnost se stala, když zpozoroval, že se na těle mrtvé žáby zavěšené na měděném háku projevují ony svalové kontrakce, pokud se při větru žabí končetiny dotkly kovového zábradlí balkonů. Galvani zprvu nedokázal uvěřit, že by tento úkaz bylo možné provést i bez vnějšího zdroje elektřiny, ale bezesporu to byla zásadní informace, která přinášela pro něj trochu více osvětlení do už tak velmi komplikované situace. Po publikování svého pozorování vzbudil mezi obyvateli zejména Evropy nemalé pozdvižení, a tak se stalo, že tuto novinku si chtěl doslova vyzkoušet každý. S trochou nadsázky se dá říct, že toto období se stalo pro žabí druh oprávněně osudným, neboť byly odchyťovány a následně podrobeny tomuto experimentu v masivním měřítku. Luigi Galvani následně provedl pokus v laboratorních podmínkách, kdy popisuje, že nejprve se odřízne hlava žáby a posléze se zbytek těla pověsí na měděný hák tak, aby se provlékl mezi hřbetní kostí a nervovými vlákny, které procházejí po každé její straně. Dále se do ruky vezme podlouhlá zinková destička, která se nejdříve propojí se stojanem rovněž z mědi, na kterém je umístěn onen měděný hák s žabím tělem. Potom už se stačí pouze dotknout druhým koncem zinkové destičky žabích končetin, a můžeme pak ihned pozorovat chvění, ohýbání a záškuby žabích stehýnek (obr. 3.6.).



Obrázek 3.6. – vyobrazení schématu Galvaniho pokusu s žabími stehýnkami v praxi ^[16]

Aby tento fenomén mohl vysvětlit, začal z pohledu lékaře předpokládat existenci takzvané „živočišné elektřiny“, někdy také používal slovní spojení „vital fluid“. Tato elektřina v každém živém organismu měla pak schopnost procházet skrze nervy do svalové tkáně, která zároveň byla i jejím zdrojem, a dále pak kovy, které použil při svém pokusu, čímž vznikl uzavřený elektrický obvod, jehož odezvou bylo nahodilé škubání a kontrakce žabích končetin. Nevídaný ohlas sklídl u svých kolegů mediků a fyziologů, kteří se domnívali, že tímto objevem Luigi Galvani odhalil tajemství života. Opět můžeme pouze vést spory o tom, kdo onu žabu na balkon tenkrát tak šikovně zavěsil. Jestli to byl samotný Galvani, pro kterého žabí stehýnka byly prý gurmánskou delikatesou, či jeho žena nebo případně jejich služka, když žabu nechala sušit na slunci. Tak či onak se jedná o ukázkový příklad toho, kdy vědě znovu pomohla náhoda a souhra okolností, ze kterých těžíme dodnes, a ačkoliv se Galvaniho závěry později ukázaly, jako zcela mylné, nemůžeme mu odeprít zásluhy za to, že započal cestu, které napomohla ve výrazném posunu v oblasti elektrochemie. Na jeho počest se této živočišné elektřině začalo přezdívat také po mnoho let „galvanická elektřina“. Za zmínku určitě stojí i to, že inspiroval svou prací i některé umělce tehdejší doby. Asi nejznámější je příklad britské autorky Mary Wollstonecraft Shelleyové (1797 – 1851), která se proslavila svým hororovým románem Frankenstein. ^{[14] [15] [17] [20]}

3.4.2. Alessandro Volta a jeho šokující objevy

Galvaniho současníkem byl významný vědec a fyzik, původem ze šlechtického rodu, Alessandro Volta (celým jménem Conte Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta), který se narodil 18. února 1745 ve městě Como v oblasti dnešní Lombardie. Už od mladí tíhnul k přírodním vědám a v pouhých 29 letech se stal profesorem experimentální fyziky na Royal School of Como. Aktivně se věnoval výzkumu elektřiny. Zdokonalil například přístroj zvaný elektrofor, což bylo jednoduché zařízení určené ke generování elektrického náboje. První známý elektrofor byl zkonstruován švédským fyzikem Johanem Carlem Wilckem v roce 1762. Ten objevil nový jev, takzvanou elektrostatickou indukci, která ve velmi zjednodušeném kontextu popisovala, že pokud přiblížíme zelektrizované těleso k tělesu nezelektrizovanému, dojde následně také k jeho zelektrizování. Voltu jeho práce natolik zaujala, že na základě Wilckeho výzkumu významně přispěl ke značnému zefektivnění již dříve zmíněného elektroforu. Ten se skládal z jedné desky vyhotovené z dielektrika (látky zvané někdy také jako izolant, ve které je obecně elektrický náboj velmi špatně veden), což mohla být především přírodní pryskyřice, případně vosk, který byl z důvodů nízké mechanické pevnosti dosti

nepraktický. Druhá deska byla naopak vyhotovena z kovu a navíc byla ještě opatřena rukojetí z nevodivého dřevěného materiálu. Princip elektroforu je pak založen v základu na tom, že se nejprve zelektrifikuje deska z dielektrika, následně se k ní přiblíží druhá deska z kovu, čímž je vlivem elektrostatické indukce rovněž zelektrifikována. Dále stačí kovovou desku na nějaký krátký časový úsek uzemnit, načež se zbavíme části záporného náboje na ní a zbude nám tak především nadbytek kladného náboje, který se rovná přibližně náboji na desce z dielektrika, které má vždy konstantní záporný náboj. Po odstranění uzemnění si kovová deska zachovává stále kladný náboj nahromaděný na ní a to i tehdy, pokud jí od dielektrické desky oddálíme. Tento proces se může opakovat nespočetně krát. Alessandro Volta měl velmi dobře vyvinutý pozorovací talent, a tak se stalo, že jako první objevil roku 1776 a následně izoloval methan, když shromažďoval bublinky unikajícího plynu z bahnitých vod jezera Maggiore. Po sérii podrobených experimentů ho nazval přízračně „*hořlavý vzduch*“, bezbarvý plynný uhlovodík bez jakéhokoliv zápachu, který jak víme se vyskytuje v přírodě jako hlavní složka zemního plynu. Jeho úspěchy nezůstaly bez odezvy, a tak roku 1779 v kariérním žebříčku povyšuje až na post profesora fyziky na univerzitě v Pavii, jednu z nejstarších univerzit světa. Špičkově vybavená laboratoř a pracovna, dostatečný přísun financí, to vše Voltovi výrazně zjednodušovalo bádání v různých odvětvích.

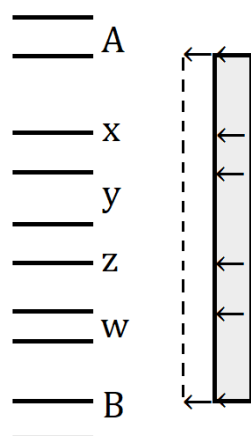
Na rozdíl od ostatních vědců začal koncem 18. století bedlivě sledovat výzkum Luigi Galvaniho. Ačkoliv byl fascinován popisem mrtvolného pohybu žabích končetin, nepozdával se mu jeho závěr o existenci živočišné elektřiny vznikající ve svalové tkáni živých organismů. Už při úvodním prostudování jeho dokumentace, závěrů a sérii provedených experimentů i na jiných zvířatech zjistil, že takzvaná živočišná elektřina narozdíl od elektřiny například v podobě blesků za bouřky, nebo statické generované třením má ve srovnání s nimi velmi slabý účinek. Uvědomoval si, že některé v té době už známé živé organismy mají schopnost díky speciálnímu orgánu vygenerovat ve svém těle elektřinu. Zářným příkladem může být Paúhoř elektrický (*Electrophorus electricus*), kterému tato schopnost byla dána především k lovu potravy a jeho obraně. Navíc se stále nedokázal smířit s tím, že podstata tohoto jevu, který pobláznil celou Evropu, není stále podložena čistě vědeckými fakty, nýbrž domněnkami a neucelenými závěry. Udržel si však jeho pověstný racionální odstup a začal si pohrávat s myšlenkou, proč Galvani k pokusu potřeboval vůbec použít dva naprosto rozdílné kovy.

Prvotní experiment, který doslova otřese už tak chatrnými základy celé teorie živočišné energie, provede konkrétně na sobě. Volta si totiž položil zásadní otázku, která zněla: „*Co když bude stimulovat nerv, který není přímo propojen se svalem ?*“. Vzal dva tenké kovové proužky (jeden ze stříbra a druhý z cínu) a položil si je v těsné blízkosti na dva izolované body na špičce

jeho jazyka. Následně kovové proužky opačnými konci spojil, čímž došlo k uzavření obvodu. K jeho úžasu po chvilce pocítil pouze ztuhlou chuť na jazyku, nikoliv kontrakci či případné záškuby. Volta usoudil, že nervy na jazyku nemají vztah k vyvolání samovolných pohybů, nýbrž ke změně chuti, kterou vnímáme smysly. Později Volta v dochovaných zápisech nachází, že o 40 let dříve provedl obdobný pokus i švýcarský přírodovědec a matematik Johann Georg Sulzer (1720 – 1779). Aby si svou hypotézu ověřil, okamžitě provádí obdobnou modifikaci s jazykem, který tentokrát však čerstvě oddělil od mladého beránka. Při aplikaci stejného bimetalického obvodu na oblast tentokrát kořene jazyka, kde se nachází síť nervů sloužící k jeho ovládnutí, dojde opět k mimovolnému škubání a chvění. Volta proto konstatoval, že elektřinou vybuzený nerv v organismu vykoná vždy svou přirozenou funkci. Následně provedl další kvanta pokusů s použitím různých druhů zvířat jako jsou například hadi, úhoři, ale také s různými druhy kovů jako je zinek, olovo, železo, měď, stříbro, zlato, platina a i rtuť. U zvířat sledoval rozdílnost v nervově svalovém systému a u kovů zase jejich schopnost vybuzovat nervy při jejich párování v bimetalickém obvodu. Získaná data z pokusů pečlivě klasifikoval a zjistil, že orgány jako střeva či žaludek, u kterých není vykazována žádná přirozená nervová kontrola svalů, na stimul bimetalového obvodu nijak nereagují. Co však bylo spíše pro něj jako fyzika poutavější, že použití různých párů kovů vyvolává diametrálně odlišný účinek. Pro lepší představu například zjistil, že stimul je daleko silnější, pokud použije dvojici kovů zinek – platina narozdíl od dvojice kovů zinek – olovo. Tento poznatek okamžitě upřel Voltovu pozornost na použité kovy, které byly po celou dobu zkoumání podstaty Galvaniho jevu opomíjeny. Paradoxně mnoho přírodovědců hledalo zdroj elektrické energie jako Svatý grál a přitom ho měl každý po celý ten čas doslova na očích. Galvaniho smýšlení jako špičkového anatoma a lékaře prostě přehlédlo kvůli nedostatku fyzikálních znalostí, že podstata tohoto „zázraku“ mohla být v něčem tak prostém jako je použití rozdílných druhů kovů. Volta nachází novou, doteď nepozorovanou vlastnost kovových materiálů, že kromě pasivní schopnosti vést elektřinu ji mohou také vytvářet. Aby Galvaniho tvrzení o existenci živočišné elektřiny zcela vyvrátil, publikoval vylepšenou verzi pokusu se žabími stehýnkami. Trup žáby bez hlavy s odhaleným nervovým systémem položil na destičku A vyrobenou ze stříbra. Posléze jednu z dolních končetin umístil na destičku B rovněž vyhotovené ze stříbra a druhou dolní končetinu na destičku C, která byla tentokrát ze zinku. Při propojení destiček drátem ve verzi A – B nedošlo k žádnému pozorovatelnému jevu, naopak při propojení destiček A – C docházelo opět k nekontrolovatelnému škubání končetin, což zřetelně poukazovalo na nutnost použití dvou odlišných kovů. Jasnější důkaz si Volta nemohl přát, neboť tím názorně objasnil fakt, že zdrojem elektrické energie je použitá dvojice rozdílných kovů. Žabí tělo sloužilo pouze

jako vodivé prostředí k stále blíže nespecifikované chemické reakci, která stála za vznikem elektřiny v obvodu, ale zároveň i jako detektor elektrické energie, jejímž účinkem se daly pozorovat viditelné stahy svalů. V následujících letech se zejména fyzikové a přední vědci této doby přiklonili k Voltově teorii, naopak lékaři a samotný Luigi Galvani se snažili všemožně Voltovi studie zdiskreditovat či zpochybnit. Nevraživost byla v obou táborech značná, a tak se Volta na základě vlastního uvážení odprošťuje zcela od zkoumání živých tvorů a účinků tohoto fenoménu na jejich těla. To, co hledal, stejně už našel, nový alternativní zdroj elektrické energie, který příznačně nazval pojmem „*kovová elektřina*“, přičemž příčinu jejího vzniku stále nepoznal, a i přesto hledal pro ni praktické využití.

Na základě svého propracovaného výzkumu zformuloval několik postulátů. První říká, že tato elektřina obecně vzniká při blízkém kontaktu na hranici mezi dvěma vodiči z odlišného materiálu, kdy je tento kontakt zprostředkován pomocí cirkulující elektricky vodivé tekutiny. Ze druhého jasně vyplývá, že pokud dojde k narušení elektrické rovnováhy, vyústí to zákonitě k toku elektrického proudu. Navíc na rozdíl od chvilkového výboje vytvořeného třeba s využitím Leydenské láhve tento tok pokračuje neomezeně aniž by byla obnovena rovnováha. A třetí zahrnuje asi nejvíce podstatnou věc, kdy podle Volty obvod nemohou tvořit výhradně kovové vodiče, neboť by vznikaly pouze takzvané bimetalické kontakty, jejichž kombinované účinky by se navzájem rušily. Zavádí rovněž nové pojmy jako je vodič třídy I, ten je tvořen čistě kovem, a vodič třídy II, který má zahrnovat vlhké, elektricky vodivé prostředí případně další typy vodičů. Nepřetržitý tok elektřiny v bimetalickém obvodu je pak možný z důvodu toho, že protichůdná síla vznikající na místě přímého kontaktu mezi vodičem třídy I a třídy II má daleko menší potlačující účinek než tatáž síla vznikající na rozhraní dvou vodičů tentokrát stejné třídy I. Obvod obsahující dva vodiče třídy I a jeden třídy II umožňuje nepřetržitý tok elektřiny. Pokud se vrátíme ke Galvaniho experimentu s žábou, zde jde krásně vidět, že jeden vodič třídy I tvoří zinek a druhý vodič rovněž třídy I zase měď a žabí tělo je vodivým médiem, které se už dle Volty řadí mezi vodiče třídy II. Kovy považuje za jakési „*motory elektřiny*“, které lze seřadit do řady vyjadřující míru schopnosti generovat elektrický proud (tzv. čistý výkon) a směr jeho toku. Volta se posunul v uvažování ještě dál a zavedl nový postulát, který říká, že čistý výkon kontaktů kovů AB je vždy roven součtu jednotlivých dílčích kontaktů, které pro názornost příznačně označí jako Ax, xy, yz, zw a wB (viz obr. 3.7.). Vodiče mezilehlé v okruhu nemají podle něj žádný významný účinek na výslednou velikost síly. Když si uspořádání v takovémto okruhu představíme obrazně jako žebřík, pak rozdíl ve formě vertikálního prostoru mezi jednotlivými kontakty reprezentuje onu sílu, čímž je jasná platnost teorému.



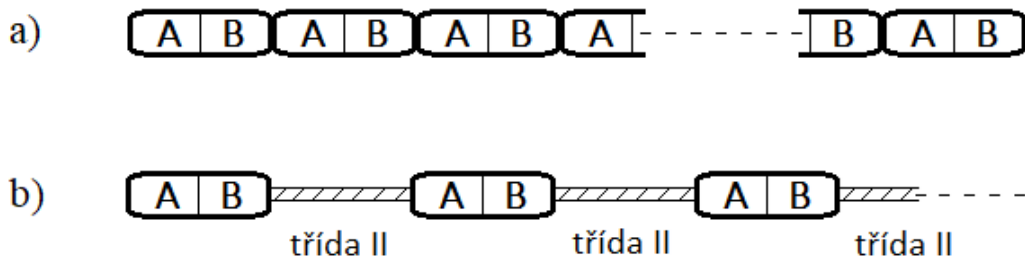
Obrázek 3.7. – čistý výkon kontaktů kovů AB daný součtem dílčích kontaktů Ax, xy, yz, zw, wB

Během roku 1794 představil prvotní podobu uspořádání některých kovových prvků podle jejich vlastnosti tvořit dostatečně velikou kovovou elektřinu. Na začátek řady umístil dvojici zinku s cínem a na opačný konec zase prvky stříbro a rtuť. Mezitím Galvaniho publikované závěry o galvanické elektřině vzbudily velký zájem u vědců napříč celou Evropou a začal závod, ve kterém Alessandro Volta nechce za žádnou cenu prohrát. Kupříkladu jeho největší tehdejší rival, profesor chemie ve Florenci jménem Giovanni Valentino Mattia Fabbioni (1752 – 1822) správně upozornil na některé paralely mezi galvanickou elektřinou a chemickou interakcí. Své domněnky opíral především o typ pokusu již dříve zmíněného švýcarského přírodovědce Sulzera, který byl doprovázen chemickým působením. Mladý německý fyzik a chemik Johann Wilhelm Ritter (1776 – 1810) zase aktivně poukazoval na fakt, že Voltovo uspořádání kovů odpovídá přibližně jejich chemické afinitě ke kyslíku. Podle něj pak má ať už kovová či galvanická elektřina základ naprosto stejný a to v chemii.

Volta usoudil, že v čistě kovovém obvodu není nepřetržitý tok elektřiny možný bez vodivého prostředí, ale pokud kovy fungují jako takzvané motory elektřiny, jak je sám s nadsázkou nazval, potom při sepnutí jednoduchého kontaktu dvou různých kovů v obvodu musí být vznikající elektřina nucena proudit od jednoho směrem k druhému, dokud nahromaděný „protitlak“ nezastaví tok. Dále uvažoval, že při následném oddělení by měly být vodiče stále mírně elektrifikované, čili jeden s pozitivním přebytkem a druhý naopak s negativním deficitem k němu velikostně odpovídajícím. Vzhledem k tomu, že se jednalo o velmi malé elektrické náboje, bylo potřeba velmi citlivého přístroje na jeho detekci. Volta naštěstí disponoval vlastnoručně zkonstruovaným zařízením zvaným příhodně mikroelektrometr, někdy se mu také přezdívalo dle dochovaných zápisů podle jeho charakteristické hlavní součásti „slaměný elektrometr“. Ve zkratce se jednalo o skleněnou

láhev, ve které byla umístěna dřevěná stupnice a nad ni byly těsně vedle sebe zavěšené volně pohyblivá rovná stébla vysušené slámy, které byly vodivě spojeny se sběrnou elektrodou ve tvaru koule. Hrdlo láhve bylo pro zlepšení izolačních vlastností a minimalizování případných vnějších vlivů utěsněno vrstvou vosku. Po přivedení i slabého elektrického náboje na sběrnou kulovou elektrodu se stébla trávy od sebe oddálily. Volta tak jasně ověřil svou hypotézu v praxi a naměřil velmi nízké hodnoty kovové elektřiny vyvolané pouze dotykem dvou kovů v jednom bodě, kdy jako první zkoumal dvojici stříbro a cín, a zavedl tak nový pojem elektrický potenciál, s nímž úzce souvisí elektrické napětí, které je dáno jejich rozdílem. Logicky mu vyvstala na mysl další otázka: „*Pokud pouhý kontakt dvou kovů vytváří detekovatelné nabití, nezvětší se zákonitě jeho účinek na daleko větší aktivní ploše?*“. Pro ověření platnosti tohoto tvrzení udělal velmi jednoduchý pokus. Vzal si dva do hladka vyleštěné, zcela suché plíšky většího průměru s otvorem uprostřed, přičemž jeden byl ze zinku a druhý ze stříbra. Plíšky navlékl na tenkou tyčku z nevodivého materiálu a posléze je v rychlém sledu obezřetnou manipulací vždy k sobě přiblížil tak, aby se celou svou plochou na okamžik dotýkaly, a následně je zcela bezprostředně poté zase od sebe oddělil. Během tohoto děje se desky zelektrifikovaly, přičemž stříbro se nabilo kladně a zinek záporně. Volta tento postup nabíjení potom mnohokrát opakoval a každý takto vzniklý náboj postupně shromáždil v Leydenské láhvi. Nakonec po dostatečném naakumulování elektrické energie demonstroval před svědky relativně viditelný jiskrový výboj. Tímto jasně deklaroval existenci kovové elektřiny.

To, co mu však přineslo nesmrtelnou slávu, stále čekalo na své objevení, onen pověstný Voltův sloup, předchůdce všech baterií. Objev natolik průlomový, že katapultoval nový obor elektrochemii na přední pozice zájmu světových badatelů počátku 19. století. Alessandro Volta si uvědomoval, že i když dokáže kovovou elektřinu vytvořit a následně v dostatečném množství nasbírat, jedná se o zdlouhavý a nepraktický proces. Vrátil se proto zpět k poznatku, že zapojením vodiče třídy II, čili elektricky vodivého prostředí, do obvodu získá nepřetržitý tok elektrické energie. Nyní se však objevily značné komplikace s vhodnou kombinací zapojení několik desítek až stovek jednotlivých částí obvodu tak, aby znatelně zvýšil dle svých dříve formulovaných postulátů účinky vznikající elektřiny. Nemělo samozřejmě smysl zapojovat střídavě jeden kov za druhým (viz obr. 3.8. situace a), neboť vedle elektrické energie by vznikaly již zmíněné bimetalické kontakty, jejichž kombinované účinky by se navzájem rušily a výsledkem by byl nulový elektrický potenciál. Nabízela se tedy varianta, kdy by spojoval vždy dva vodiče třídy I s vodičem třídy II v řetězovém sledu libovolné délky (viz obr. 3.8. situace b).



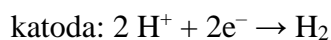
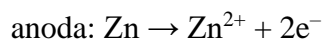
Obrázek 3.8. – schémata dvou variant zapojení vodičů v libovolně dlouhém řetězovém sledu podle Volty, kde A i B reprezentují kovové vodiče třídy I

Zakomponování vodivého prostředí do obvodu by navíc zapříčinilo převážení kumulativních výkonů na jednotlivý jeho částech, což by ve výsledku vedlo k nasčítání velikosti výsledné elektrické energie. Z praktického hlediska bral i v potaz myšlenku, že uzavřením obvodu vodičem třídy II by probíhala cirkulace elektrického proudu nepřetržitě. Pro lepší kompaktnost výsledného zařízení si zhotovil dřevěný stojánek s podstavcem a nasazovací stříškou, kdy prostor mezi nimi vyplňovaly tři do vrcholů rovnostranného trojúhelníku rozmístěné tyče. To bylo z toho důvodu, aby se dovnitř daly naskládat přes vrchní oddělovací část na sebe v daném pořadí plíšky vhodně zvoleného průměru a vše tak drželo pohromadě, čímž se zabránilo případnému sesunutí vzniklého komínku. Volta potřeboval přijít jenom na vhodnou kombinaci seskládání plíšků, použitých kovů a vodivého prostředí. Po několika sériích pokusů našel optimální řešení. Spárováním kovů měď – zinek a použitím slané vody, později také například slabého roztoku vitriolu (kyselina sírová – H_2SO_4), nasáknuté do hustější látky, silnějšího papíru nebo vyčiněné zvířecí kůže jako vodivého prostředí získal uspokojivé výsledky. Nesporně důležité bylo také pořadí, ve kterém jednotlivé plíšky a navlhčenou látku na sebe vrstvil. Úplně naspod umístil jako první plíšek ze zinku, následovala navlhčená látka ve formě vystříhnutého kolečka o průměru použitých plíšků a na tu položil tentokrát měděný plíšek a na něj znovu zinkový, poté opět vrstvil vlhkou látkou a na ni položil zase měděný plíšek a tak stále dokola. V takovém sledu mohl na sebe dotýčný naskládat teoreticky nekonečné množství vodičů třídy I a II. Voltovi stačilo v průměru od 30 do 60 vrstev pro demonstraci jeho zařízení, nejsvrchnější vrstvu zde však musela vždy tvořit měď. Pak už jenom stačilo první a poslední plíšek výsledného sloupu opatřit kouskem drátu (obr. 3.9.). Při jejich následném přiblížení na dostatečnou vzdálenost se v potmělé místnosti dalo i pozorovat menší přeskočení jiskry.



Obrázek 3.9. – replika Voltova sloupu

Daleko lepších účinků se dalo podle Volty dosáhnout zaměněním měděných disků za plíšky vyhotovené ze stříbra. To však přinášelo úskalí z hlediska financí, neboť čím ryzejší materiál, tím se cena takového zařízení rapidně zvyšovala. Navíc se vlivem času a probíhajícími chemickými reakcemi v systému součástky Voltova sloupu opotřebovávaly a znehodnocovaly, takže byly potřeba za nějakou dobu obměnit. Dnes už víme, že chemické reakce a především usměrněný pohyb volných elektronů při nich vznikajících, které jsou v tomto případě klíčem k tvorbě elektřiny v této první provizorní baterii svého druhu, zapíšeme následovně:



V roce 1800 Alessandro Volta vítězně završil svou cestu, při které pátral po novém zdroji elektrické energie. Poznatky, které získal na poli výzkumu elektřiny, otevřely cestu k novým objevům a vzniku nového oboru elektrochemii. Voltův sloup byl zcela novým zdrojem elektrického proudu, navíc byl plně přenosný a umožňoval i měnit velikost vznikající elektrické energie podle potřeby. V roce 1801 se Voltovi dostalo nevídané pocty, kdy demonstroval účinky Voltova sloupu před samotným Napoleonem I. Bonapartem (1769 – 1821), který jej brzy na to za jeho zásluhy na poli vědy povýšil na hraběte a senátora Lombardského království.

Rakouský císař František I. (1768 – 1835) ho roku 1815 dokonce jmenoval ředitelem filozofické fakulty Padovské univerzity.

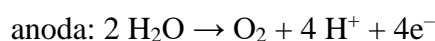
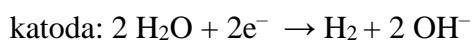
Ať už byly historické roztržky na vědecké bázi těchto dvou italských velikánů jakékoliv, nemůžeme jim odeprít fakt, že velkou měrou přispěli k poznání o elektřině. Luigimu Galvani se po jeho smrti dostalo časem cti tím, že se po něm začala skupina různých druhů nově objevených článků generující elektřinu souhrnně označovat jako takzvané galvanické články, kdy toto slovní spojení se používá až dodnes. Po Alessandru Voltovi byla zase roku 1881 pojmenována jednotka elektrického napětí. ^{[15] [18] [19] [20] [63] [64]}

3.5. Historicky první provedená elektrolýza

Roku 1800 zaslal Alessandro Volta rozsáhlý dopis popisující jeho nové poznatky spojené s elektřinou prezidentovi Královské vědecké společnosti v Londýně, siru Josephu Banksovi (1743 – 1820). Není známo jak, ale k obsahu onoho dopisu se neoprávněně dostali dříve, než byl publikován, i dva významní Britové. Nejschůdnější možnost připadající v úvahu podle některých záznamů je taková, že během pravidelných setkání pořádaných sirem Banksem pro přední vědeckou elitu Anglie se pod nátlakem zvědavých vrstevníků o Voltových objevech prorekl. Jedním z nich byl chirurg a lékař Anthony Carlisle (1768 – 1840), druhý byl naopak chemik a spisovatel William Nicholson (1753 – 1815).

Tuto dvojici kolegů nové poznatky o Voltově sloupu natolik zaujaly, že si ihned jeden exemplář rovněž zkompletovali, avšak tentokrát s využitím zinku a stříbra, kterým nahradili měď. Pokynem osudu jednoho z nich napadlo, že pro lepší vodivý kontakt ocelového drátu s nejsvrchnějším kotoučem kápnou na spoj několik kapek říční vody. K jejich překvapení upozoroval náhodou Carlisle, že se v tomto místě začaly po zapojení baterie tvořit malé bublinky plynu. Nicholson odbornou expertízou unikajícího plynu se začne posléze domnívat, že se jedná o vodík. Je až doslova neuvěřitelné, že se mu z tak malého vzorku podařilo neznámou látku přibližně identifikovat hned napoprvé. Oba měli následně podezření, že vodík vznikl při rozkladu vody elektrickým proudem. Proto ihned provedli nový pokus v daleko větším měřítku s použitím mosazných drátů ponořených do skleněné trubice naplněné říční vodou. Z drátu připojenému k zinkovému disku Voltovy baterie se po chvíli začal uvolňovat jemný proud bublin, který přisoudili opět vznikajícímu plynnému vodíku, načež drát vedoucí od stříbrného kotouče k jejich úžasu se postupně na povrchu zakaloval až zcela ponořená část zčernala. Neočekávaný výsledek, který přinesl pro ně několik obtížných otázek jako například: *„Proč se vyvíjený kyslík, který nejspíše způsobil oxidaci mosazného drátu, netvořil na stejném*

vodiči jako vodík ?“, „Z jakého důvodu a jakým konkrétním způsobem se kyslík přemísťuje v elektrizované kapalině ?“. Podle jejich úvah musely mít jejich nové poznatky nejspíše spojitost s nějakým dosud neznámým zákonem o působení elektriny na chemické děje. Pokus dále opakovali i s použitím platinových elektrod, přičemž na drátu připojeném k zinkovému plíšku se vytvářelo větší množství bublin plynu a na druhém vodiče rovněž z platiny, který byl naopak v kontaktu se stříbrným diskem, zase vznikal viditelně menší proud bublin a nepodléhal už ani žádnému vedlejšímu poškození. Ze zastoupení prvků v molekule vody – H₂O, publikovaného v díle (*Traité elementaire de Chimie, présenté dans un ordre nouveau et d'après les découvertes modernes – Základní ujednání v chemii*, prezentována v novém pojetí na základě nových objevů) roku 1789 věhlasným francouzským chemikem a vědcem Antoine-Laurent Lavoisiera (1743 – 1794), bylo namíste se domnívat, že silnější proud patřil vodíku a slabší kyslíku. Postupně zaměřili svou pozornost i zpátky na Voltův sloup, kde zaregistrovali značnou změnu ve vzhledu zinkových disků, které vlivem používání podléhaly rovněž procesu oxidace. Necháпали, že si tohoto jevu Volta vůbec nevšimnul, neboť v jeho dokumentaci nebyla o tom ani zmínka. Stanovili hypotézu s ohledem na to, že hlavně ze začátku pokrýval dle jeho vlastních poznámek vytvořené sloupky ze článků vrstvou vosku, která měla zabránit vysychání vodivé kapaliny, tím pádem mohl viditelnou změnu Volta snadno přehlédnout. Navíc jako experimentální fyzik upřednostňoval pohrávání si se vznikající elektrinou a nevěnoval takovou pozornost chemické podstatě, která byla pro její vznik markantní. Paradoxem bylo, že byl takový kousek od objevu podstaty celé elektrochemie a to konkrétně elektrolýzy (slovo vzniklé složením z francouzského „*électro*“ a řeckého „*lysis*“ znamenající doslova elektrický rozklad).



Carlisle a Nicholson bez nějakého cíleného záměru použili říční vodu jako elektrolyt. Při provádění dalších experimentů nechali například po dobu třinácti hodin elektrolyticky vyvíjet plynný vodík a kyslík tak, že je jímali do vysokých trubic naplněných vodou. Výsledné zvážené množství vytlačené vody z každé trubice zvlášť je dostalo na poměr vodík : kyslík = 142 : 72, což se velmi blíží k poměru 2 : 1. Nutno podotknout, že v čase kdy Carlisle a Nicholson dělali své pokusy, ještě nebyl známý Avogadrův zákon: „*Stejně objemy navzájem zcela různých plynů obsahují při stejném tlaku a teplotě rovnocenný počet molekul.*“, neboť ho formuloval italský fyzik Amedeo Avogadro (1776 – 1856) až kolem roku 1811. ^[21]

[22]

3.6. Zlatá éra elektrolýzy ve službách britských vědců

Počátkem 19. století má čerstvě objasněná metoda „elektrolýza“ mezi veřejností jasně zelenou a stává se tak prozatím dostatečně neprobádanou technikou, která otevírá vědcům dosud nemyslitelné možnosti. První, kdo se nejvýrazněji zasloužili o pochopení podstaty tohoto procesu a zároveň jej použili v praxi, byli dva přední britští vědci Humphry Davy (1778 – 1829) a Michael Faraday (1791 – 1867), jejichž životní dráhy se v jednu chvíli výrazněji protkly a jejich následná spolupráce obohatila chemii v mnoha směrech. I s ohledem na téma této práce a na opravdu monumentální záběr všech objevů a fenomenálních poznatků, které za život učinili v oblasti přírodních věd, omezíme se především na jejich výzkum ve sféře elektrochemické. ^[23] ^[28]

3.6.1. Humphry Davy, objevitel nespočtu prvků

Ve Velké Británii se 17. prosince 1778 narodil do šlechtického rodu sir Humphry Davy, který během své nesmírně plodné vědecké činnosti významně obohatil elektrochemii. Od malička byl velmi zvědavý a zapálený do odhalování různých tajemství přírody. Každou volnou chvíli strávil venku, kde například vášnivě rybařil, sbíral všemožné vzorky hornin, vytvářel za nocí pompézní ohňostroje, a dokonce i někdy skládal verše, neboť poezie byla jeho tajnou vášní. Řadil se svým záběrem dovedností a zálib k té malé skupince géníů napříč staletími, které nazýváme polyhistory (někdy se používá také slovní spojení renesanční člověk). Prvotně se vyučil chirurgem a lékárníkem s nadějí, že se v budoucnu vypracuje až na medika. Později však hlavně díky přátelství s tehdejší prezidentem Královské vědecké společnosti v Londýně inženýrem Davisem Gilbertem (1767 – 1839), který mu poskytl neomezený přístup, jak do své osobní velmi obsáhlé knihovny v Tradea, tak i do chemické laboratoře určené pro jeho výzkum. Davy začal nenávratně propadat kouzlu chemie. Navíc na Gilbertovo doporučení se stává superintendantem na v té době nově založeném Pneumatickém institutu v Cliftonu, kde má za úkol prověřit možné terapeuické účinky některých plynů. Okamžitě se pouští do práce s náturou horlivého experimentálního badatele, který neváhá použít i riskantnější metody výzkumu. Prioritně připravoval velké dávky azoxidu (oxid dusný – N_2O , triviálně rajský plyn) a posléze jej ve velkých množstvích v uzavřené místnosti inhaloval, aby se přesvědčil o tehdejší domnělé principu šíření nakažlivých chorob z člověka na člověka vzduchem. Výsledkem intoxikace oxidu dusného bylo to, že namísto nebezpečné virové nákazy se vystavil pouze nekontrolovatelným návalům smíchu, což bylo vedle postupné otupělosti a ospalosti

jeden z klíčových účinků tohoto plynu na člověka. Dále se věnoval rovněž zkoumání všemožných jiných oxidů a kyselin dusíku, popřípadě i amoniaku (triviálně čpavek). Avšak i jeho přehnaná urputnost a menší obezřetnost malém zapříčinily, že jednou při vdechování vodního plynu (směs vodní páry a oxidu uhelnatého) mohl umřít. Časem si Humphry Davy publikováním svých závěrů buduje reputaci u svých kolegů akademiků, čímž jeho jméno postupně nabývá na věhlasu. Roku 1801 získal místo na nově založeném Královském institutu v Londýně, kde ve spolupráci s vědci té doby, jako byl angloamerický fyzik sir Benjamin Thompson (1753 – 1814) nebo britský přírodovědec sir Joseph Banks, připravuje pro širokou veřejnost v rámci popularizace přírodních věd předem sestavené a následně dostatečně nacvičené vědecké přednášky vždy obohacené o názorné ukázky všemožných poutavých experimentů (obr. 3.10.). V kariérním žebříčku i nadále stoupá až na post profesora chemie (v roce 1802) a díky jeho sepsané práci věnující se využití některých prvků v zemědělství, kterou následně v rámci cyklu úvodních seminářů prezentuje před samotnou radou pro hospodářskou a zemědělskou produkci v irském Dublinu, obdrží v roce 1805 významné vědecké ocenění v podobě Copleyho medaile. Humphry Davy toho stihnul za život opravdu mnoho, ale tomu nejdůležitějšímu, co nám zanechal, se budeme věnovat až nyní.



Obrázek 3.10. – karikaturní vyobrazení jedné z vědeckých přednášek Humphry Davyho [27]

Jakmile světlo světa spatřil Voltův sloup, první přenosný zdroj stejnosměrného elektrického proudu, Davy se okamžitě pouští do zkoumání účinku elektřiny na různé látky. Při prvotním bádání se pokoušel vyjít z poznatků již dříve zmíněných kolegů Carlisle a Nicholsona

a na základě provedených měření formuluje nová tvrzení, které se stávají základem celé teorie elektrochemie. Například si uvědomí, že chemická vazba v látkách je obecně elektrické povahy, čili elektrina může mít schopnost rozdělit je případně zase zpět na jejich původní stavební kameny, tedy chemicky čisté prvky. Aby navíc při elektrolyze proud mohl procházet mezi kladným a záporným pólem zdroje skrze zkoumanou látku, musí mít minimálně viskózní charakter pro hladký přesun kladných a záporných iontů v ní obsažených, což jsou nezbytné podmínky pro zdárný průběh elektrolyzy. Takové látky získávají originální označení elektrolyt, které užíváme dodnes. Davy si brzy začne být vědom, že se mu do rukou dostal nástroj, který mu může pomoci k nalezení nových prvků a izolovat je v čisté podobě.

Roku 1807 začne ve své laboratoři se svým synovcem, rovněž skvělým chemikem, Edmundem Davym (1785 – 1857), který se zasloužil zejména o objev acetylenu, vystavovat účinkům elektrolyzy chemickou sloučeninu, které v této době přezdívali potaš (dnes je to triviální název pro uhličitan draselný – K_2CO_3). Svě jméno si nejspíše vysloužila tak, že před průmyslovou revolucí se připravovala primárně namáčením a macerováním popela, ať už rostlinného či dřevěného původu ve vodě. Po následné filtraci a časově náročném postupném odpařování do sucha vznikla látka obsahující různé draselné soli. Primárně ve složení převažoval hydroxid draselný – (KOH), který měl silné hygroskopické účinky a po určité době volně nechaný na vzduchu vstřebával vzdušnou vlhkost, čímž měnil postupně své skupenství z čistě pevného na spíše dosti hustou kaši a stal se tak z něj vhodný elektrolyt. Podle dobové dokumentace Davy sestrojil elektrolytickou vanu tak, že použil menší kovovou nádobku (platinová, ale později i železná), kterou připojil ke kladnému pólu Voltova sloupu a platinový drátek se zploštělým koncem pro zvětšení aktivního povrchu zapojil zase k zápornému pólu. Pro zvýšení velikosti vstupního elektrického proudu, čímž by značně znásobil výsledný účinek elektrolyzy, chytře zapojil tři větší Voltovy baterie do série, a tak získal napětí o velikosti přibližně 200 V. Pak už stačilo jenom do kalíšku umístit mírně navlhčený tehdejší potaš a po sepnutí obvodu se začaly dít věci. Kolem platinového drátku se postupně shromažďovaly velice drobné, stříbrně lesklé, tekuté kuličky kovu, které ihned poté prudce a bouřlivě reagovaly po vystavení vzduchu a vlhkosti z kašovitého elektrolytu. Mimo to z něj viditelným probubláváním také unikaly plyny, které explozivní gejzír ještě umocňovaly. Byla to směs vodíku vznikajícího chemickou reakcí po kontaktu draslíku s vodou (případně i vzdušnou vlhkostí) a kyslíku generujícího se z povrchu kovové nádoby, který byla, jak víme, připojena ke kladnému pólu zdroje. Edmund Davy popisuje neskutečnou radost strýčka v podobě spontánního křiku „heuréka“ a tancování po laboratoři. Euforie to byla oprávněná, neboť se mu právě podařilo izolovat úplně nový prvek draslík, který pojmenoval podle látky, ze které vzešel

(anglicky potassium odvozené ze slova potaš). Navíc se jednalo o první objevený prvek na světě vyrobený elektrolyticky, čímž se rok 1807 stal najednou důležitým milníkem pro masovou výrobu do této doby špatně dostupných kovů. Následně modifikuje celou soustavu, kdy se předně opírá o dřívější výzkumy slavného švédského chemika Jönse Jacoba Berzelia (1779 – 1848), který experimentoval mimo jiné se schopností rtuti tvořit s kovy slitiny se zcela ojedinělými vlastnostmi, a tak namísto platinového drátku použil jako vodič v elektrolytu pro změnu právě rtuť. Během dalších experimentů využil Berzelie popsaný fenomén, totiž že rtuť může se vznikajícím draslíkem tvořit dočasně pevnou, ale zároveň tvárnou slitinu – amalgám. Z něj pak po ukončení elektrolýzy mohl získat kov jednoduchou destilací. Davy byl novým prvkem naprosto uchvácen načež ho posléze podrobil sérii testů. Předně draslík bouřlivě reagoval s vodou. Vzhledem k jeho nízké hustotě plove na hladině a vlivem vznikajícího tepla se roztál načež vytvářel kuličky hořící jasným fialovým plamenem, které po chvíli i vybuchovaly. Na rozdíl od doposud známých kovů byl draslík první, který měl hustotu menší než voda a byl na tolik měkký, že se dal krájet nožem. Davy také zkoumal reakce draslíku s různými sloučeninami (například s kyselinou chlorovodíkovou, což rovněž vedlo opět k bouřlivé reakci doprovázené červeným plamenem šlehajícím vysoko z kádinky). Dále reakcí draslíku s kyselinou boritou se Humphry Davymu podařilo připravit nečistý amorfni bor. Překvapivě pro něj při namočení draslíku do petroleje ihned klesá ke dnu a nezpůsobuje žádnou reakci, a proto ho začne v něm uchovávat, neboť na vzduchu vlivem vzdušné vlhkosti podléhá rovněž rychlé reakci a ztrácí svůj typicky kovový lesk.

Obdobným způsobem týdně až měsíce ve svém elektrolyzáru zkouší rozkládat i jiné látky, a tak postupně objevuje v těsném sledu další a další dosud neobjevené prvky jako jsou sodík (izolovaný z hydroxidu sodného – NaOH), vápník, hořčík, stroncium a baryum, které rovněž podrobuje důkladnému zkoumání a zjišťuje tak postupně v alespoň základním měřítku jejich chemické a fyzikální vlastnosti. Davy pomocí elektrolýzy oficiálně objevil celkem 6 prvků, které se do této doby nikomu před ním nepodařily izolovat. Zajímavostí rovněž je, že ačkoliv Francie a Anglie byly v té době ve válečném sporu, obdržel roku 1807 za své zásluhy na poli vědy a stanovení základních principů elektrolýzy od císaře Napoleona, který k pokroku choval značné sympatie, cenu francouzského institutu. Takové popularity uznání se těšil postupně Humphry Davy napříč celou Evropou.

Ani poté však v bádání nepolevoval, jelikož se i nadále věnoval plynům, kdy úspěšně syntetizoval například tellan – (H_2Te) nebo fosfan – (PH_3). Také vyvrátil tvrzení zakladatele moderní chemie, francouzského vědce Antoine-Laurent Lavoisiera, že všechny kyseliny musí obsahovat ve své struktuře kyslík. Demonstroval to konkrétně na jedné z nejsilnějších kyselin

dané doby, a to kyselině chlorovodíkové – (HCl) (triviálně kyselina solná), kdy osvětlil její správné složení opět na základě využití elektrolytického rozkladu. Klasifikoval tak konečně chlor jako prvek, nikoliv jako doposud pro něj mylně užívané označení „kyselina oxymuratiová“. Rovněž demonstruje a vysvětluje jeho bělicí účinky. Mezi obyvateli Británie je stále více proslulý svými propracovanými vědeckými představeními, kdy se na jednom z nich v roce 1812 setkává s nadějným mladým vědcem Michael Faradayem (1791 – 1867). Stává se na nějaký čas jeho mentorem, když u něj začne pracovat jako laboratorní asistent. Davy s Faradayem se mezi lety 1813 až 1815 vydali na evropské turné. Brzy si však Davy začne všimát, že ho mladý Faraday svým intelektem a nápady dalekosáhle předchází. Můžeme říct, že to byla nejspíše ješitnost a také závist, které způsobily, že se nedlouho na to v roce 1820 jejich cesty nadobro rozejdou. V poslední etapě svého života ještě nachází nový prvek s obdobnými vlastnostmi jaké má chlor. Ten se později začne nazývat jod. Věnuje se rovněž analýze některých přírodních pigmentů, nebo převratně odhalí, že diamant není nic jiného než jiná forma uhlíku. [23] [24] [25] [26]

3.6.2. Michael Faraday, král elektrochemie

Jestli byl v dějinách někdo, kdo se zasloužil o největší přínos v elektrochemie, rozhodně se jednalo o Michaela Faradaye. Narodil se do velmi chudé kovářské rodiny 22. září 1791 na anglickém venkově ve vesnici Newington. V mládí se mu dostalo pouze toho nejzákladnějšího vzdělání ve formě čtení, psaní a počítání v nedělní církevní škole. Mezitím se aktivně snažil o zlepšení finanční situace své rodiny tím, že se vyučil vazačem knih u místního knihaře. Toto byl pro něj v životě důležitý zlom, neboť zde po večerech četbou knih, které zde byly dodávány především ke svázání, nabyl rozsáhlé informace z oboru přírodních věd. Na první pohled ho nejvíce uchvátila elektřina. Podle podrobných popisů si sám sestaví z defacto zbytků a nepotřebných věcí například primitivní generátor statické elektřiny, či repliku Voltova sloupu a provádí s jejich pomocí jednoduché experimenty. Ve 21 letech se dozvídá o pořádání velkolepých vědeckých přednášek sira Humphry Davyho v Královském institutu, o které je až natolik vysoký zájem, že pro chudší lid je skoro nemožné se na ně dostat. Naštěstí se k němu čistou náhodou dostane vstupenka na jeden z jeho seminářů. Faraday je plně vtáhnut prostřednictvím jeho interpretace pestrého výběru experimentů do chrámu vědy. Vše si pečlivě zaznamenává, kdy kupříkladu Davy za pomoci draslíku ilustruje erupci sopky. Před zraky všech uplácá z vlhkého jílu, kamení a hrubšího písku její miniaturní napodobeninu. Potom do jejího jícnu umístí opatrně několik větších kousků surového draslíku, které nakonec zalije

přiměřeným množstvím vody. To, co se stane posléze, je dechberoucí. Ze sopky začnou stoupat oblaka bílého dýmu doprovázené rukou v ruce fialovými plameny. Nezapomenutelný zážitek korunuje chrlení hořících kousků onoho draslíku do všech světových stran. Nutno podotknout, že se Davy příliš nezabýval bezpečností, tudíž zranění jeho i publika byly na denním pořádku. Nebo jiný experiment věnuje celý Voltovu sloupu, kdy jich zapojí před zraky všech několik vyšších desítek do série, čímž získá najednou soustavu schopnou vyprodukovat napětí o několika tisících voltů. Na oba koncové vývody připevní tyče z uhlíku a pomalu je k sobě začne přibližovat, dokud se neobjeví oslnivý obloukový výboj na délku čítající desítky centimetrů. Nebylo ani divu, že někteří přítomní v sále v domnění, že Davy právě vytvořil zkázonosné zařízení metající blesky jako za bouřky, začali úprkem v boji o holý život chaoticky opouštět místnost. Faraday mu za čas pošle svázaný soubor všech zápisků z jeho vystoupení a přikládá k nim dopis, ve kterém ho prosí o práci pod jeho odborným dohledem. Zanedlouho se stane, že získá na nějakou dobu u něj zaměstnání v podobě jeho osobního asistenta, což je pro něj, jak se brzy ukáže, velmi cenná životní zkušenost. Nutno podotknout, že vykazoval obrovské nadání a cit pro vědecké myšlení, velmi rychle se učil a během let vstřebával všechny poskytnuté informace, které mu později pomáhaly jako pevný základ v jeho soukromé dráze badatele. Davy si uvědomoval, že ačkoliv se jeho žákovi od malička nedostalo skoro žádného vzdělání, byly u něj patrné stále více vlohy génia, který by jej dokonce mohl ve všech směrech předčít až dokonce zcela zastínit, čehož se začínal obávat. Měl přece jenom v té době vybudovanou reputaci a proslulé renomé po celé Evropě, a tak se tedy stalo, že po vzájemných neshodách roku 1820 natrvalo jejich společná pouť skončí.^[55]

Faraday vybaven nespočtem nových poznatků se pouští na vlastní pěst okamžitě do práce, má totiž před sebou velmi plodná léta, která nezadržitelně popoženou soukolí pokroku rychle kupředu. Vzhledem k povaze tohoto dokumentu a jeho cílům musíme bohužel opomenout a případně podrobněji rozebrat jeho největší objevy v oblasti fyziky spojené s elektřinou a magnetismem. Po definování základů elektromagnetické indukce (v uzavřeném obvodu se indukuje elektrické napětí na základě změny magnetického indukčního toku), sestrojí zcela převratný zdroj elektřiny zvaný dynamo a následně se pomalu vrací zpět do náruče elektrochemie, kde je stále mnohé neobjasněno. Se svou povahou vizionář jasně vidí, že elektrický proud získal už v chemii neodmyslitelně své místo, neboť jeho účinek takřka rozdělovat hmotu na její elementárnější podstatu je do této chvíle něco stále těžce uvěřitelného a uchopitelného. Člověk si v zjednodušeném slova smyslu podmanil chemickou vazbu, protože

ji konečně může i účelově ovládat, a to ne jenom slučováním a přeskupováním prvků v molekulách, ale i jejím zpětným rozkladem u látek, u kterých to nebylo doposud možné.

Zpočátku testoval, jaký bude mít elektrická energie dosah a účinek ve vodivém prostředí. Demonstroval to na velmi důmyslném experimentu. Vzal si dva stejně dlouhé papírky, kdy jeden obsahoval jako indikátor lakmus a druhý kurkumový extrakt. Oba dostatečně navlhčil v roztoku síranu sodného – (Na_2SO_4), a na jednom z jejich konců je překryl přes sebe tak, aby vznikl dlouhý provizorní vodič. Potom připojil kladný pól zdroje ke konci lakmusového papírku a záporný naopak ke konci papírku kurkumového. Ihned po zapojení bylo jasné na základě zbarvení, že vzniká vlivem elektrolýzy kyselá látka v oblasti spoje drát ze zdroje – lakmusový papírek a na druhém spoji drát ze zdroje – kurkumový papírek zase látka zásaditá. Verzi pokusu opakoval s drobnou modifikací tak, že tentokrát umístil opět dostatečně navlhčené papírky do roztoku jako v prvním případě každý zvlášť na skleněné tabulky. Mezi nimi natahoval od země izolovaný bavlněný provázek rovněž řádně namočený do roztoku síranu sodného různých délek tak, aby konce šňůrky se vždy překrývaly s každým z papírků. Potom už jenom stačilo celou soustavu připojit ke zdroji elektřiny. Vždy pozoroval naprosto totožný výsledek, a to i tehdy, když elektrolyt zaměnil za jodid draselný – (KI). Mohl tedy s určitostí říci, že na intenzitu a dosah rozkladného napětí dodaného do systému nemá vliv délka elektricky vodivého prostředí s elektrolytem.

Brzy na to z vlastní iniciativy si jako hlavní prioritu stanovil ujednotit základní elektrochemické pojmy, které se dodnes používají. Ve starých používaných označeních jako byl kupříkladu pól viděl značnou nesystematičnost, která nově zasvěcenému mohla způsobit značné problémy se v celé problematice elektrochemie zorientovat. Ve spolupráci s anglickým vědcem Williamem Whewellem (1794 – 1886) zavedl zcela ojedinělou terminologii, jak dokazuje jeho dopis zaslaný 9. ledna 1834 Královské společnosti. V něm se píše kromě jiných poznatků o elektrolýze, že třeba dosavadně používané označení póly zdroje elektrického proudu je přirozenější nahradit slovem elektrody. Elektrolytem by se mělo obecně rozumět, že se jedná o jakoukoliv látku, která se dá rozložit vlivem elektřiny. Šel však ještě dál, když konkrétně pro kladnou elektrodu vymyslel unikátní označení anoda a pro záporně nabitou naopak katoda. Na separované složky pocházející z elektrolytu rovněž nezapomněl, kdy ty s kladným nábojem nazval kationty a se záporným pro změnu anionty. Není pak určitě překvapením, že souhrnně všechny částice nesoucí náboj se klasifikují jako ionty.

Od teorie se Faraday konečně přesunul k praxi a začíná jeho doslova testovací maratón. Trápí jej totiž nejprve určitý problém spojený s kvantitativním stanovením při elektrolýze, což byl doposud nijak blíže nekvantifikovaný jev. Sestrojí proto zařízení, které má jako zdroj

elektrického proudu několik Voltových sloupů zapojených do série. Vedle sebe taktéž rozmístí pár identických elektrolytických van obsahující vždy stejné množství elektrolytu o totožné koncentraci (v jeho případě se jednalo o okyselenou vodu). Elektrody použil v každé z van vyhotovené z platiny, avšak měly různé tvary a rozměry (v jedné byly například pouhé dráty v jiné zase ploché destičky). Všechny takto připravené kádě zapojil do jednoho obvodu s jednotným zdrojem elektrického proudu a po určitý čas jímá separovaně plyny vznikající při elektrolýze vody (kyslík a vodík). Faraday došel k fascinujícímu závěru, neboť zjistil, že množství uvolněných plynných látek z každé vany je vždy naprosto stejné. Aby eliminoval všechny ostatní pochybnosti, experiment opakuje ještě s bateriemi o různých hodnotách generovaného elektrického napětí (tzv. různé výšky sloupců, vybitější vlivem opotřebení elektrod či zcela nové) a s elektrolytem o různých koncentracích. Všechna měření vykazují stále totožné výsledky. A tak se tedy dostáváme k samotné podstatě prvního Faradayova zákona elektrolýzy (obr. 3.11.), který zjednodušeně říká, že množství látky vznikající elektrochemickým rozkladem nijak nezáleží na velikosti elektrod, intenzitě elektrického proudu, či koncentraci látky v použitém roztoku, ale pouze na množství elektriny, která projde elektrolytem za určitý čas. Z jeho výzkumu vyvstane u něj myšlenka na sestavení prvního voltametrického zařízení svého druhu. Nesmí ale primárně opomenout efekty, které mohou neblahým způsobem výrazně ovlivnit účinky elektrolýzy (tzv. sekundární efekty). Jeden z nich zahrnuje případ, kdy uvolněný ion může reagovat s materiálem, ze kterého je vyhotovená elektroda. Druhý zase popisuje verzi, že vzniklá kladně či záporně nabitá částice se sloučí s elektrolytem, což může vnést do obvodu jako celku vedlejší chemické účinky nad rámec elektrického proudu.

$$m = A \cdot Q = A \cdot I \cdot t$$

m ... hmotnost látky [kg]	I ... elektrický proud [A]
t ... čas [s]	Q ... přenesený elektrický náboj [C]
A ... elektrochemický ekvivalent látky [kg·C ⁻¹]	

Obrázek 3.11. – výpočetní vztah pro první Faradayův zákon elektrolýzy včetně veličin a jednotek

Faraday sestavil tzv. voltametrický přístroj pomocí delší odměrné skleněné trubice naplněné okyselenou vodou, a navíc opatřené z obou stran platinovými deskami, které plnily funkci elektrod. Uvnitř byla ještě cela obsahující chlorid cínatý – (SnCl₂), který z dřívějšího

bádání v pevném skupenství sice vykazoval povahu izolantu, ale v roztaveném stavu se jednalo o vynikající vodič podléhající postupnému rozkladu. Celou soustavou nechal procházet proud, dokud se viditelně v trubici nevygenerovalo přiměřené množství plynu, které po ukončení elektrolytického procesu porovnal s množstvím vyredukovaného cínu. Faraday zaznamenal, že kovu se uvolnilo 3,2 zrna a plynné směsi kyslíku s vodíkem 0,49742 zrna (v přepočtu na aktuální jednotku hmotnosti $m_{cin} = 0,207$ g a $m_{plynu} = 0,032$ g). Posléze vyšel z úvahy, že kyslík s vodíkem se slučuje v základním poměru vycházející z relativních atomových hmotností jednotlivých prvků po řadě 8 : 1 za vzniku vody, pro kterou zavádí charakteristický ekvivalent určený ze součtu těchto poměrů čili 9. Jednoduše se pak dalo za pomoci přímé úměry přepočítat charakteristický ekvivalent cínu, který činil 57,9. Závěrem tedy mohl konstatovat, že jak voda, tak chlorid cínatý se rozložili v poměrném množství podle jejich příslušných ekvivalentů, který je pro každou látku typický. Jednalo se o všeobecný fakt, ze kterého se zformuloval druhý Faradayův zákon elektrolýzy. Ten deklaruje, že hmotnosti různých prvků vznikajících při elektrochemickém ději týmž celkovým nábojem jsou v konečném důsledku chemicky ekvivalentní (obr. 3.12.). Na základě dalšího výzkumu postupně zpřesňuje a upravuje vzorce, neboť chápe z praktického hlediska potřebu držet se v rovině nejzákladnější veličiny celé chemie a to látkového množství. Zavádí zcela převratnou Faradayovu konstantu, která elegantně vyjadřuje poměr mezi molární hmotností a elektrochemickým ekvivalentem látky. Její hodnota byla získána jako součin elementárního náboje ($e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C) a Avogadrovy konstanty ($N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ mol⁻¹), což nám dá univerzální hodnotu $F = 96\,485,34$ C·mol⁻¹. Tímto okamžikem je cesta ke kvantitativnímu stanovování látek s využitím elektrochemických procesů zcela volná, a to jen díky výše zmíněným Faradayovým zákonům elektrolýzy, z jejichž podstaty těžíme napříč staletími až do současnosti. [28] [29] [30] [31]

$$A = \frac{M}{F \cdot \nu}$$

M ... molární hmotnost vyloučené látky [kg·mol⁻¹]

F ... Faradayova konstanta [C·mol⁻¹]

A ... elektrochemický ekvivalent látky [kg·C⁻¹]

ν ... počet elementárních nábojů potřebných k vyloučení 1 molekuly

Obrázek 3.12. – výpočetní vztah pro druhý Faradayův zákon elektrolýzy včetně veličin a jednotek

3.7. Nastupující éra galvanických článků

Z historického hlediska by se dalo s určitostí říct, že praotcem prvotní myšlenky důležité pro pochopení principu a následnou konstrukci všech doposud známých galvanických článků byl italský lékař Luigi Galvani. Ten si ve své době sotva dokázal představit, jakou revoluci v tomto odvětví na základě svých pokusů s žabími stehýnkami následně způsobí. Po vynálezu Voltova sloupu někteří vědci napříč všemi státy zejména Evropy zasvětili významnou část svého života objevováním nových elektrochemických zdrojů elektrické energie.

3.7.1. Tajemství Bagdadské baterie

V samotném úvodu této kapitoly, ještě před onou zlatou érou rozvoje galvanických článků, se zastavíme na chvíli v dávné minulosti. Zcela oprávněně vyvstává otázka, zda některá z nám známých starověkých kultur (například Řecko, Čína, Mezopotámie, Egypt aj.) se nesečkala čirou náhodou s využitím nějakého jednoduchého galvanického článku. Odpověď na to nabízí dosti kontroverzní nález z roku 1936 z jedné hrobky odkryté poblíž Bagdádu (konkrétně v oblasti Khujut Rabut). Při podrobném zkoumání vykopávek v iráckém muzeu si totiž rakouský ředitel sekce starožitností Wilhelm König (1906 – 1978) povšimnul několika atypických nádob z neglazované keramiky. Okamžitě to upoutalo jeho pozornost a po důkladné analýze zformuloval teorii o využitelnosti tohoto zařízení z časů mezopotámské civilizace (konkrétní datace 248 př. n. l. – 226 n. l.). Jelikož se uvnitř hliněné nádoby nacházel měděný válec, který byl k jejímu dnu připájen olovem a jehož středem navíc vedl přes zátku z asfaltové hmoty hrot z železného materiálu, oprávněně se začal domnívat, jestli se nejedná o prototyp už tehdejšího galvanického článku (obr. 3.13.). Jeho hypotézu ještě podporoval fakt, že v útrokách nádoby našel vločkovité zbytky materiálu připomínající papyrus, který mohl sloužit k nasáknutí elektrolytu (tehdy v podobě vína či octu). Svou teorii i z části opřel o tamější zlatníky, u nichž zaregistroval, že ve 30. letech 20. století stále používali značně primitivní postup při zlacení šperků.



Obrázek 3.13. – replika Bagdadské baterie (vlevo – příčný řez a vpravo vnější vzhled) ^[33]

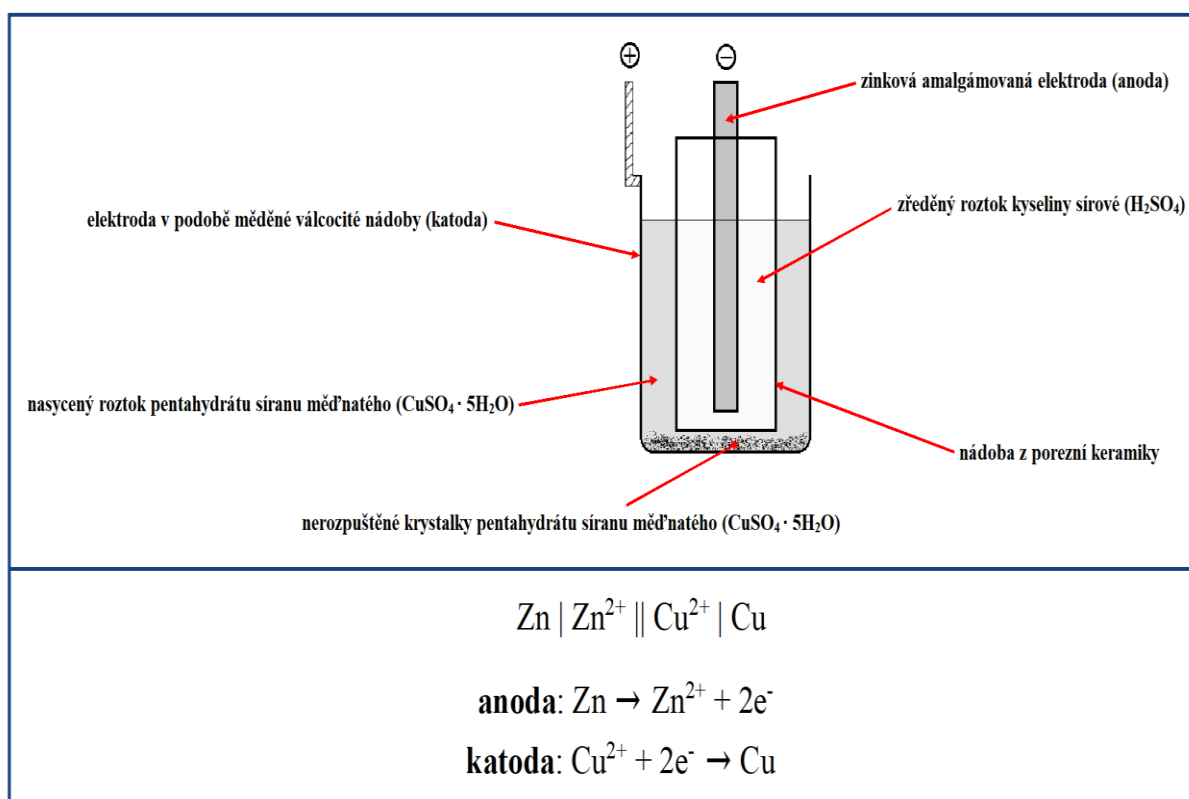
Ve zkratce si vzali dvě nádoby odlišných velikostí, kdy v té menší z keramického porézního materiálu měli obecně nějaký roztok na bázi kyanidu zlata. Tu pak umístili do daleko větší kádě tentokrát s koncertovaným roztokem chloridu sodného – (NaCl). Na dva kovové drátky (zavěšené na tyč) se posléze připevnilo vždy samostatně kousek zinku a předmět, který se měl zlatníkem pozlatit, a ponořily se do příslušných roztoků (zinek do chloridu sodného a předmět do kyanidu zlata). Výsledný galvanický potenciál, který mezi objekty v takto sestaveném systému vznikl, vytvořil dostatečně velké napětí, aby se na povrchu předmětu začala postupně vylučovat souvislá vrstvička zlata. Když se nyní vrátíme zpět ke Königeo teorii o existenci Bagdadské baterie, nesmíme opomenout fakt, že takovéto zařízení by v reálné podobě bylo schopné skutečně generovat napětí čítající cca 0,5 V a vysvětlovalo by tak záhady cenných archeologických nálezů, které z oblasti Khujut Rabut jevíly znaky zcela precizního pokovování zlatem, což z hlediska náročnosti celého procesu nešlo docílit v takového kvalitě s využitím pouhé zručnosti tamějších zlatníků. Na druhé straně jeho teorii jiní specialisté na starodávné nálezy v oboru značně rozporovali, neboť se zase z jejich pohledu jednalo o nádobky s magickým až duchovním účelem. Kovy totiž byly pro ně natolik posvátné, že se nejspíše pohřbívali s těmito speciálními nádobkami s železnými hroty obsahující mimo jiné i unikátně popsaný papyrus. Tak či onak pravý význam tohoto tajemného nálezu už se asi nikdy nedozvíme, ale je do určité míry fascinující uvažovat, že už tehdejší lidé mohly používat galvanické články. ^[32]

3.7.2. Daniellův článek, vedoucí celého konvoje

I když nově objevený Voltův sloup poskytoval stálý zdroj elektrické energie, měl i řadu nevýhod, které nebylo možné ignorovat. Kromě horší možnosti manipulace a přenosnosti celého aparátu (zejména při potřebě vygenerovat vyšší desítky až stovky voltů), či poměrně rychlé degradaci materiálů, ze kterých byl sestaven, koroze elektrod způsobovala po určitém čase pokles celkového napětí. Při použití zředěného roztoku vitriolu (kyselina sírová – H_2SO_4) jako elektrolytu mezi kovovými plíšky totiž docházelo k postupnému uvolňování plynného vodíku. To mohlo hlavně ve větším měřítku v uzavřeném prostoru způsobit problémy, jelikož vodík se vzduchem tvoří silně explozivní směs, kterou paradoxně stačí iniciovat například slabým výbojem z oné baterie. Vodík vznikající na povrchu elektrod mohl navíc vytvářet velmi tenkou souvislou vrstvu bublinek, což způsobovalo snížení hodnoty elektrického napětí Voltova sloupu. Tento jev se obecně označuje jako polarizace a takto utvořená pomyslná „bariéra“ zastavila po určité době tok proudu. Nutno podotknout, že u některých vědců byla nadále snaha tyto překážky postupně odstraňovat, kdy například anglický fyzik William Sturgeon (1783 – 1850) roku 1830 značně prodloužil životnost Voltova sloupu použitím amalgamových zinkových elektrod.

Blízky přítel Michaela Faradaye, britský chemik a meteorolog John Frederick Daniell (1790 – 1845) v roce 1836 zkonstruoval úplně nový typ galvanického článku. Daniell doslova rozebral Voltův sloup a přetvořil ho v zařízení, které již dříve zmíněné nedostatky zcela eliminuje. Oproti Daniellovu článku, který se dnes uvádí skoro v každé učebnici či studijní publikaci věnované elektrochemii, se Daniellův první prototyp lišil zcela zásadně. Vzhledem připomínal duté válcovité zařízení, jehož vnější plášť tvořila čistá měď (kladná elektroda – katoda). Uvnitř se nacházela další dutá nádoba, tentokrát však z porézního keramického materiálů, a do jejího nitra se umístila válcovitá tyč z amalgamovaného zinku (záporná elektroda – anoda). Prostor mezi jednotlivými nádobami vyplňovaly roztoky, kdy mezi měděnou a vnější keramickou stěnou byl nasycený roztok pentahydrátu síranu měďnatého – ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) obohacen ještě o pár nerozpuštěných větších krystalů této soli ulpívajících na dně zařízení. Dutina mezi zinkovou elektrodou a vnitřní stěnou porézní keramiky obsahovala zředěný roztok kyseliny sírové. Jednotlivé elektrody byly opatřeny vázacími šrouby pro snadnější připojení vodičů sloužících k odvodu elektřiny a zapojení ke spotřebiči (obr. 3.14.). Takto sestavený galvanický článek byl vždy po spuštění schopen vygenerovat napětí o velikosti 1,07 V. Porézní keramika zde měla účel membrány (diafragmy), která bránila smíchání jednotlivých roztoků, ale díky své struktuře umožňovala plynulý

průchod elektrického proudu vytvářeného ionty, aniž by byl nějak omezován. Problematicky vznikající vodík byl skrze roztok síranu měďnatého, který byl zde v přímém kontaktu s měděnou katodou, zachycován a nemohl tak vlivem polarizace už nijak negativně narušit hodnotu vytvářeného efektivního elektromotorického napětí. Avšak i zde bylo zapotřebí po ukončení odběru elektrického proudu zbavit člunek elektrolytů, které by jinak i nadále naleptávaly kovové elektrody.



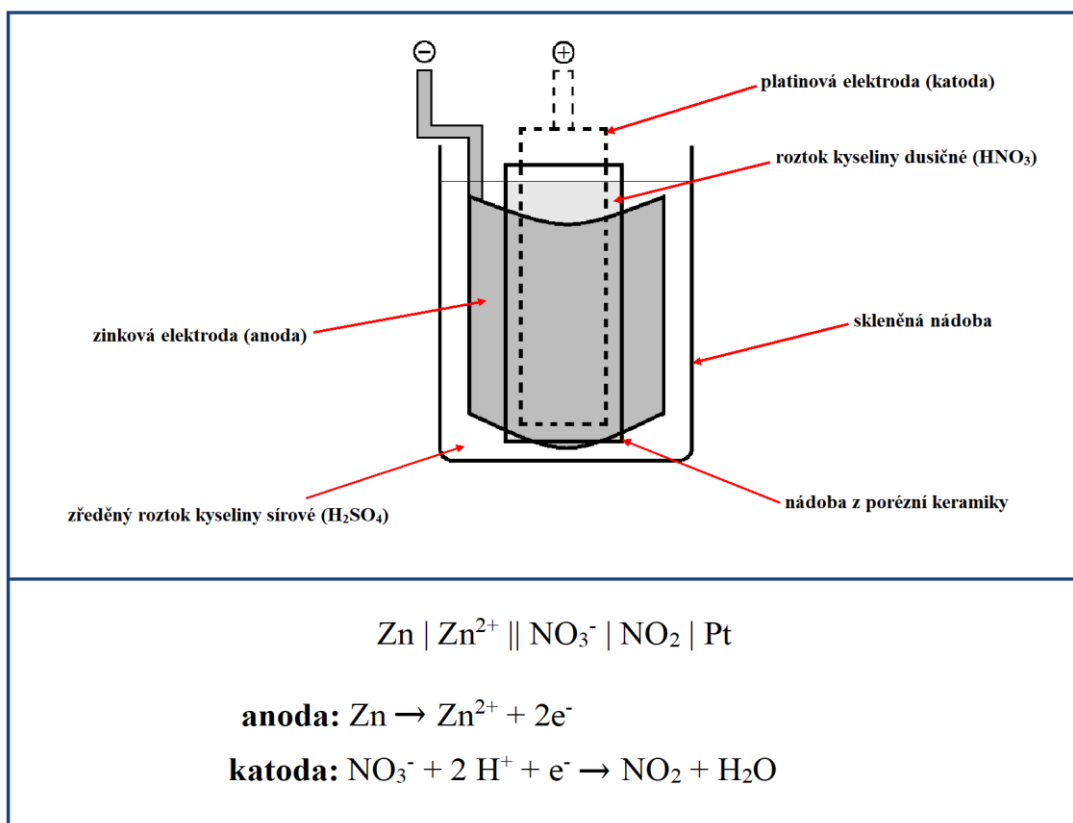
Obrázek 3.14. – obecné schéma prvního Daniellova článku včetně chemických reakcí probíhajících na elektrodách

V průběhu 19. a 20. století se těšil Daniellův galvanický člunek mezi badateli, chemiky a fyziky veliké oblibě. Vznikaly však stále nové vylepšené alternativy, kdy stěžejní bylo nahrazení zředěného roztoku kyseliny sírové síranem zinečnatým – (ZnSO_4). Porézní přepážku je možné zaměnit za solný můstek obsahující například nasycený roztok chloridu draselného – (KCl), jehož opačné konce byly dány vždy do jedné ze skleněných nádob opatřených buď zinkovou či měděnou elektrodou. Ty byly z větší části ponořené do nasyceného roztoku jejich příslušných odpovídajících solí (v takové podobě jej známe i dnes). Není divu, že toto zařízení přispělo později k definici jednotky elektrického napětí – 1 V, neboť téměř takovou hodnotu bylo na základě měření schopné vygenerovat. Ve Smithsonianě institutu v USA je navíc dodnes možné spatřit šest Daniellových článků zapojených do série, které tvoří první

provizorní 6 V baterii na světě. Za zmínku určitě také stojí říct, že toto zařízení včetně jeho dalších typů nesmazatelně přispělo k rozvoji v té době nastupující telegrafické komunikace, kterou bylo potřeba ze začátku zejména ve velmi odlehlých a těžko přístupných místech před objevením efektivnějšího zdroje nějakým způsobem napájet. [34] [35] [36]

3.7.3. Palivový článek soudce Grovea

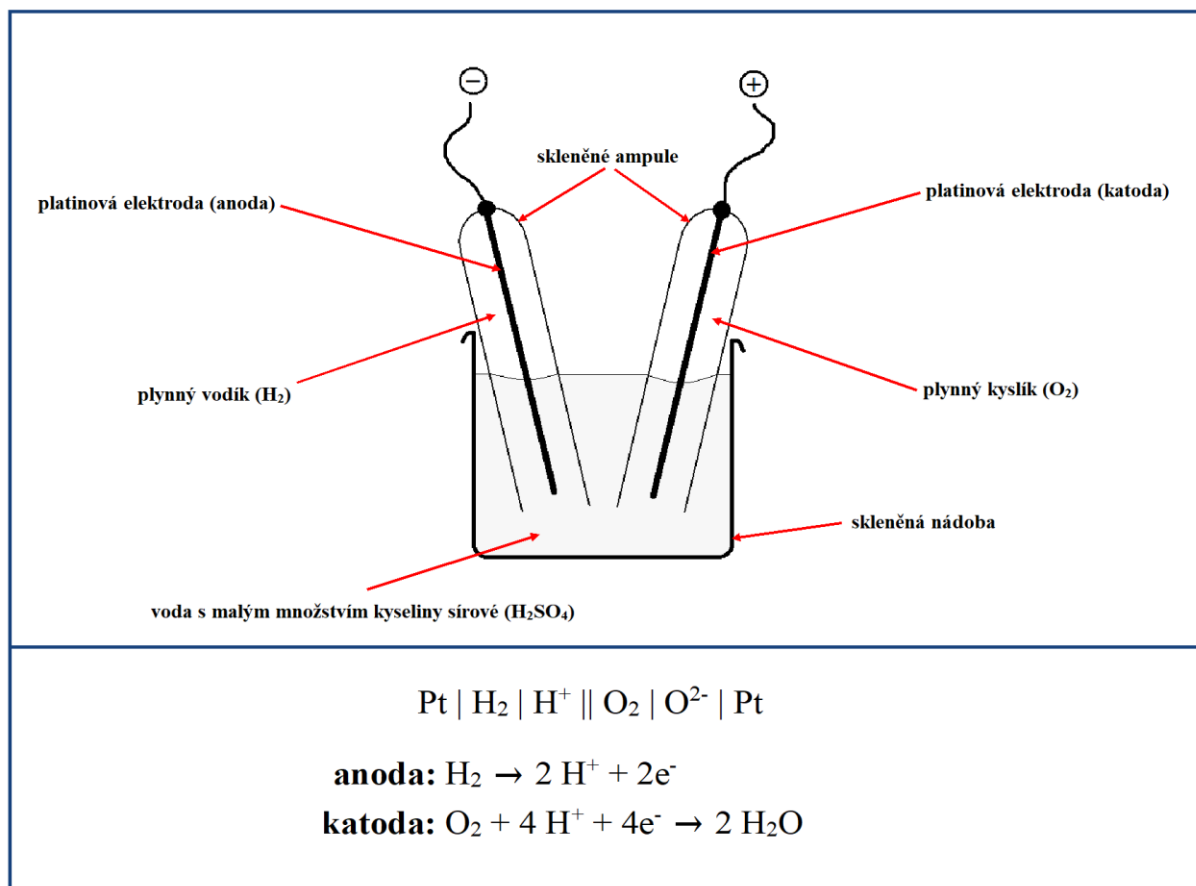
Nadaný mladý soudce sir William Robert Grove (1811 – 1896) ve volném čase neúnavně pracoval na zcela ojedinělém typu galvanického článku. Není pochyb o tom, že ačkoliv zpočátku kariérně dominoval spíše v judikatuře, jeho zájem a fascinace vědou postupně převážily. Nejvíce ho za jeho života zaujala oblast konstruování a výzkum využitelnosti galvanických článků jako zdroje elektrické energie do takové míry, až v roce 1837 publikuje svůj vlastní návrh zcela nové, dosud neznáme alternativy. Ta se sestávala ze skleněné nádoby, v níž byl nejprve umístěn ve zředěném roztoku kyseliny sírové tenký plát zinku jako anoda, který byl zároveň šikovně dán do těsné blízkosti hranatého keramické separátoru. V jeho útrokách se pak nacházel tentokrát platinový plát zastávající funkci katodové elektrody ponořený do roztoku kyseliny dusičné – (HNO_3) (obr. 3.15.). Takovéto zařízení bylo schopné vyprodukovat napětí o velikosti 1,9 V, což nám dává oproti Daniellovu článku téměř dvojnásobnou hodnotu, a navíc dovoľoval proudový odběr až několik jednotek ampérů. Na rozdíl od Voltova sloupu – měkký zdroj (tzv. generuje velmi nízké hodnoty proudu v jednotkách setin až desetin ampér) se tedy postupně dostáváme ke zdrojům naopak tvrdým. Grove se zároveň snažil o započítí revoluce v této sféře, neboť si uvědomoval, že pokud mají mít galvanické články jistou budoucnost, musí být schopné dodávat vyšší elektrický proud, ale zároveň musí být také daleko menší a skladnější. Jeho prvotní prototyp baterie našel ihned využití, kdy například německo – ruský inženýr Moritz Hermann von Jacobi (1801 – 1874) použil několik Groveových článků zapojených do série k napájení pohonu člunu na řece ve městě Petrohradě nedlouho poté. Mimo to i v již dříve zmíněném telegrafickém odvětví zaznamenal aspoň na krátkou dobu rovněž uplatnitelnost, ale po čase se ukázalo, že při spuštění tohoto galvanického článku jako vedlejší nežádoucí produkt postupně emituje do svého okolí větší množství jedovatého plynného oxidu dusičitého – (NO_2), který tak představoval nemalé zdravotní riziko. Další nevýhodou byla také jeho vysoká tendence se brzy vyčerpat, což ho značně limitovalo v jeho praktičnosti.



Obrázek 3.15. – obecné schéma Groveova kapalinového článku včetně chemických reakcí probíhajících na elektrodách

Grove se však nevzdal a po letech pokusů přišel na zcela průlomový objev, o kterém pojednává v dopise z roku 1842 (adresovaný Michaelu Faradayovi). Opřel se především o výzkum elektrolytického rozkladu vody Carlislem a Nicholsonem, kdy vlivem elektřiny vznikal plynný vodík a kyslík. On se však rozhodl tento proces spustit obráceně (takzvaně slučovat ve vhodně sestaveném galvanickém článku tyto dva plyny zpět ve vodu), kde platina působí jako katalyzátor celé chemické reakce. Zbývala tedy vyřešit otázka technického provedení. Brilantně to ošetřil tak, že jeden článek vždy obsahoval větší skleněnou nádobu s vodu okyselenou malým množstvím kyseliny sírové. V ní byly vždy z části ponořené dvě oddělené platinové elektrody uzavřené z jedné strany v oválném skleněném pouzdře, neboť suchá část elektrod byla buď v jednom případě v přímém kontaktu s plynným kyslíkem (katoda) či vodíkem (anoda). Vrchní konce elektrod byly ještě opatřeny vodiči, které procházely přes skleněnou vrstvu, tudíž bylo potřeba dbát na dokonalé utěsnění tohoto kritického místa, aby plyny nemohly uniknout. Potom už se dalo zapojit do série libovolný počet takto připravených van a připravit si tížené napětí (jeden článek vyprodukuje cca 1,8 V). Díky Williamu Robertu Groveovi tedy spatřil roku 1842 první palivový článek světlo světa (obr. 3.16.). K jeho užitku princip, na kterém jeho vynález fungoval, podporovaly jím dříve definované obrysy teorie o korelaci některých fyzikálních sil

popisující vzájemnou podobnost (například elektřina může produkovat teplo a naopak). Ta byla do jisté míry předzvěstí dnešního moderního pojetí zákona zachování energie, kterou ke konci 19. století významně obohatil německý lékař a nadaný matematik Hermann von Helmholtz (1821 – 1894). [37] [38] [39]

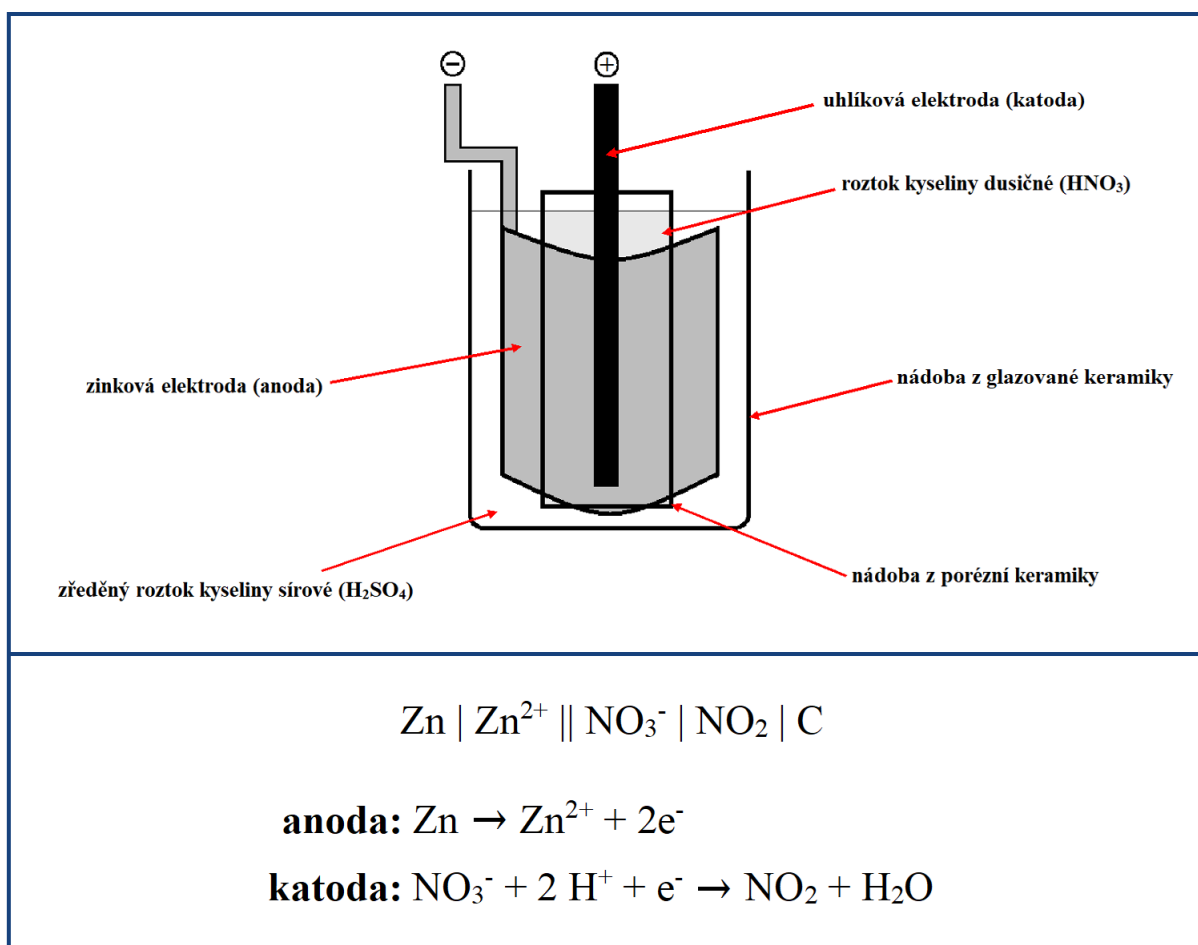


Obrázek 3.16. – obecné schéma Groveova palivového článku včetně chemických reakcí probíhajících na elektrodách

3.7.4. Bunsenův článek s uhlíkovou modifikací

Groveův kapalinový článek z roku 1837 nabízel zcela jedinečné možnosti všude tam, kde bylo potřeba dodat rychle menší řády elektrického proudu, a zařadil se tak bezpochyby mezi prozatímni univerzální tvrdé zdroje. Vystala však další značná překážka, kdy hlavním materiálem pro jeho správné fungování byla již dříve zmíněná elektroda (katoda) z platiny, která už tehdy byla velmi finančně nákladným a těžko dostupným materiálem. Řešení tohoto úskalí nabídnul samotný německý vědecký velikán Robert Wilhelm Bunsen (1811 – 1899), s jehož proslulými vynálezy se v podobě třeba Bunsenova kahanu setkáváme zejména v laboratořích dennodenně. V roce 1843 Bunsen zkonstruoval galvanický článek, který vycházel z Groveova článku s tím rozdílem, že platinovou elektrodu nahradil daleko levnější,

komerčně dostupnější uhlíkovou elektrodou. Zbytek Groveova schématu zcela zachoval s ještě nepatrným rozdílem, kdy tentokrátě válcovitou keramickou porézni nádobu, v níž byla umístěná silná grafitová tyč, obklopil dokola zahnutým tenčím plátem zinku (později nalezneme i záznamy o variantě, kdy zinek byl zase naopak přidáván litím v silných vrstvách) tak, že kopíroval přibližný tvar keramického separátoru. Vnější obal celé baterie namísto skla tvořila glazovaná keramika (obr. 3.17.). Nutno ještě podotknout, že zhruba ve stejné době nezávisle na Bunsenovi ve Spojených státech amerických, profesor chemie na univerzitě Yale, Benjamin Silliman Jr. (1816 – 1885) zkonstruoval podobný článek. [38]

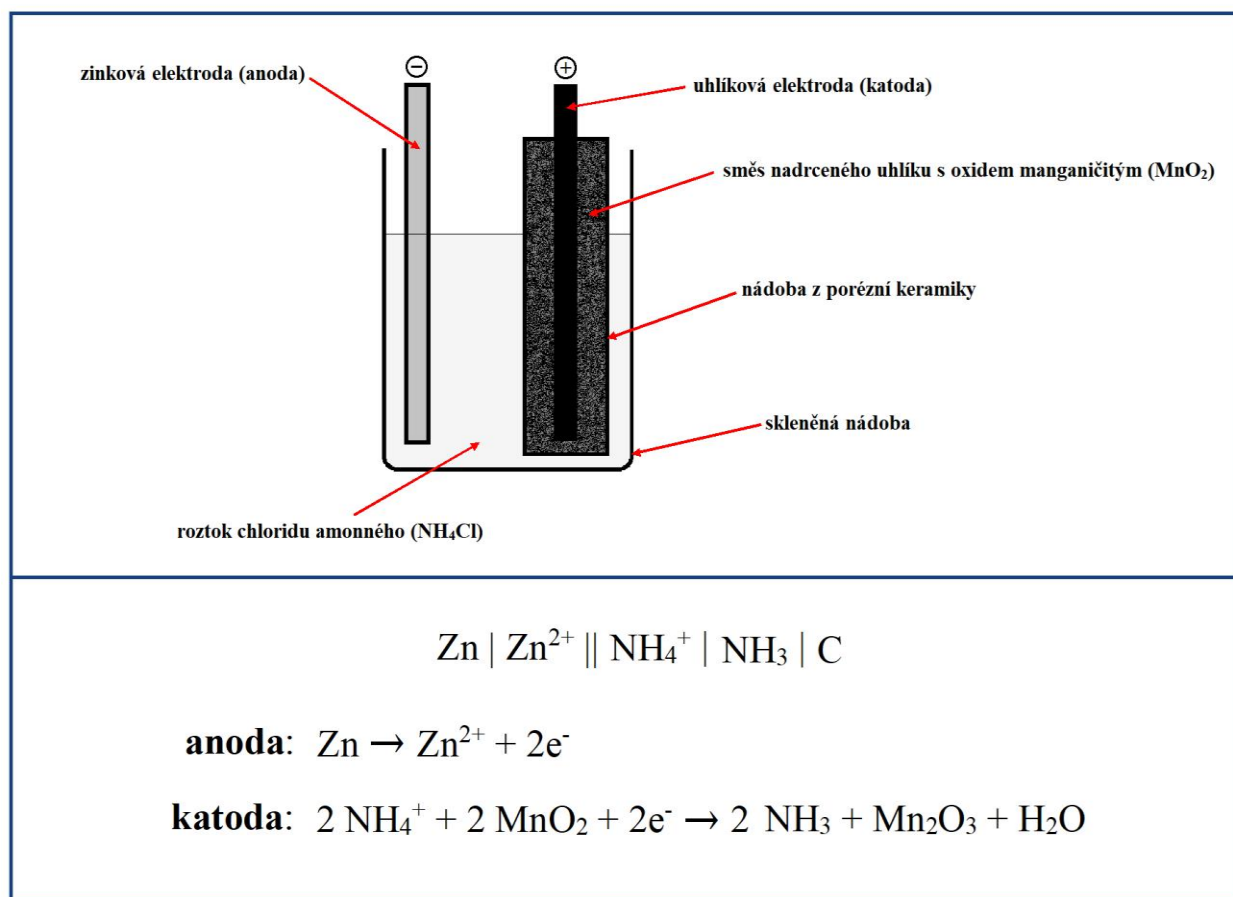


Obrázek 3.17. – obecné schéma Bunsenova článku včetně chemických reakcí probíhajících na elektrodách

3.7.5. Leclancheův článek, předchůdce tužkové baterie

Na závěr této kapitoly nesmíme opomenout asi ten nejvíce využitelný galvanický článek 19. století, který kdy byl vyvinut. Celý konvoj doposud zmíněných prototypů uzavírá vynález francouzského inženýra a elektrotechnika Georgese Leclanchého (1839 – 1882) z roku 1866. Ten využil známé poznatky z dřívějšího výzkumu ostatních badatelů v této oblasti, na jejichž

základě zkonstruoval zařízení, z jehož lehce obměněnou a minimalizovanou variantou se můžeme setkat i ve 21. století. Vnější obal článku tvořilo sklo, do nějž byla dána keramická nádoba o menším průměru. Tu opatřil Leclanche silnější uhlíkovou tyčí (katoda) a prostor mezi vnější keramickou stěnou a ní zcela vyplnil jemně nadrcenou směsí uhlíku s oxidem manganičitým – (MnO₂). Anodu tvořila naopak zinková elektroda připevněná lehce vzdáleně od vnější strany keramického separátoru, kterou bylo potřeba ponořit do připraveného roztoku chloridu amonného – (NH₄Cl), kterým měl funkci elektrolytu. Takovýto systém dokázal po určité době během zapojení do obvodu nepřetržitě generovat napětí cca 1,5 V (obr. 3.18.).



Obrázek 3.18. – obecné schéma Leclancheova článku včetně chemických dějů probíhajících na elektrodách

Princip fungování celého systému byl velmi důmyslný a promyšlený do detailu, aby se co nejvíce eliminovaly případné nedostatky dřívějších galvanických článků. Ve zkratce se nejprve atomy čistého zinku na anodě vlivem roztoku chloridu amonného oxidují na zinečnaté kationty. Ty následně jsou anodou s přebytkem takto vznikajících elektronů na jejím povrchu odpuzovány (tzv. první fáze). Po připojení Leclancheova „mokrého“ článku ke spotřebiči se naruší rovnováha a elektrony se skrze vodič dopraví až na uhlíkovou katodu, kde přivedeny do

práškovité směsi oxidu manganičitého (smáčeného skrze pórovitou keramickou vrstvu onoho separátoru) způsobí jeho postupnou redukci přeměnu na oxid manganitý – (Mn_2O_3) a simultánní vznik hydroxidového aniontu z molekul vody v roztoku (tzv. druhá fáze). Zároveň je celý cyklus chemické reakce vytvářející elektrický proud doprovázen sekundární reakcí, kdy hydroxidové anionty reagují s disociovanými amonnými kationty v elektrolytu, což má za následek utváření molekul amoniaku – (NH_3) a vody. Musíme rovněž podotknout, že tento děj neprobíhá donekonečna, neboť je limitován množstvím katodového materiálu. Jakmile se tedy vyčerpá (tzv. kompletně podle reakce) stává se článek laicky řečenou „mrtvým“. Poté by měl být článek ihned rozebrán, neboť i po ukončení jeho životnosti by elektrolyt i nadále aktivně naleptával jeho stěny a stával se tak do jisté míry pro běžného uživatele nebezpečným, protože by zde bylo nemalé riziko rozbití či vytečení celého tekutého obsahu.

Ruku v ruce s nezadržitelným technickým pokrokem se osud tohoto článku ubíral takovým směrem, že až postupně vznikl nápad dalšími inovátory, jako byl například německý lékař a vědec Carl Gassner (1855 – 1942), k jeho kompletnímu zapouzdření a nahrazení kapalného elektrolytu bezpečnější variantou napuštěného navrstveného savého papíru roztokem chloridu amonného navíc ještě obohaceného o chlorid zinečnatý – ($ZnCl_2$). Jak sám ve svých poznámkách Gassner uvádí, viskozitou to připomínalo spíše tužší pastu. Roku 1886 se tak zrodil úplně první „suchý“ článek, který i nadále postupně evolučně upravovaný a zdokonalovaný používáme dodnes (běžně dostupný na trhu) ve formě takzvaných tužkových baterií, které se takto nazývají pro jejich typický válcovitý tvar. ^{[40] [41] [42]}

3.8. Hliník jako generál průmyslové revoluce

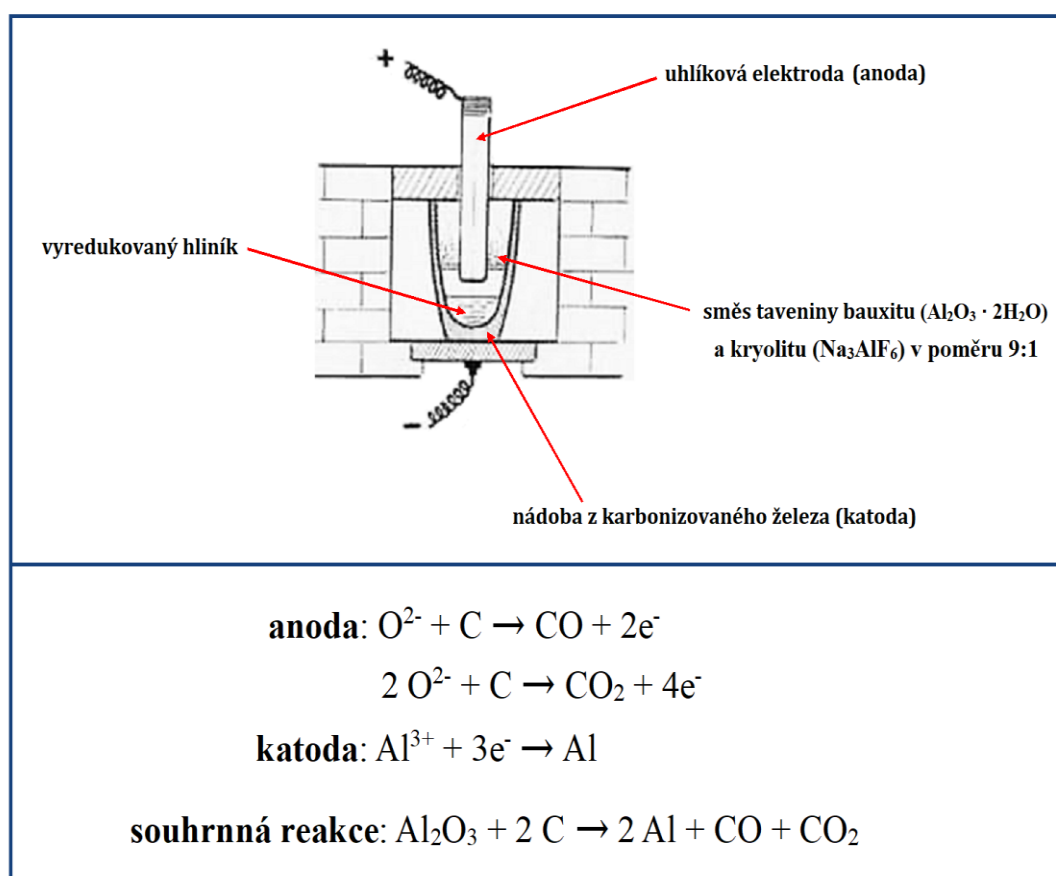
S vynálezem a postupným zdokonalováním procesu elektrolýzy se zejména v průmyslovém sektoru otevírají neomezené možnosti. To, co nastupující průmyslová revoluce potřebovala především, byly různé druhy surových kovů. Hlavními požadavky byly jejich nepřetržitá výroba z dostupných výchozích surovin v masivním měřítku, co nejefektivnější proces s minimálním procentem ztrát a odpadů, ale především nejmenší možné finanční náklady s ohledem na dlouhodobou udržitelnost celého procesu. Jedním z nejdůležitějších kovů pro technický pokrok se stal hliník, i když se začátku byl kvůli své velké afinitě ke kyslíku takřka nedostupný v čisté podobě. Hliník má nízkou hustotu, dostatečně vysokou pevnost a dobrou tepelnou i elektrickou vodivost, což ho předurčuje pro využití jako konstrukčního materiálu. Na druhé straně je nutno zmínit i jeho negativa jako jsou vyšší křehkost oproti jiným kovům a značná tepelná roztažnost. Tyto jeho nedostatky byly eliminovány v kombinaci

s jinými prvky, čímž vznikly zcela nové technické slitiny. Pro příklad si uveďme třeba dural (obsahuje 93,5 % hliníku, 5 % mědi, 1 % manganu a 0,5 % hořčíku), který oproti chemicky čistému hliníku je až pětkrát pevnější při namáhání v tahu.

O přípravu hliníku se pokusil už Humphry Davy mezi lety 1807 až 1808, kdy se snažil z oxidu hlinitého – (Al_2O_3) (resp. z bauxitu) elektrolytickým rozkladem jej získat, avšak zejména kvůli použitým železným elektrodám ho izoloval značně znečištěný (nikoli v tížené ryzí podobě). O pár let později roku 1825 dánský vědec Hans Christian Ørsted (1777 – 1851) použil jako výchozí látku bezvodý chlorid hlinitý – (AlCl_3), kdy jej zahřál s draselným amalgámem, čímž připravil redukcí menší množství hliníku. Rtuť oddestiloval a získal tak hliník z části znečištěn draslíkem. Dva roky na to se (v roce 1827) německý chemik Friedrich Wöhler se svou syntézou v konečném důsledku přiblížil k zdárnému cíli asi nejbliže, když nechal zreagovat těkavé páry chloridu hlinitého se surovým draslíkem. I podle prohlášení švédského chemika Jöns Jacob Berzelia (1779 – 1848) by se měly podle dosažených výsledků přiznat zásluhy za objev nového prvku hliníku právě Wöhlerovi. Co je však velmi důležité zdůraznit, že všechny výše zmíněné reakce připravují tento kov ve velmi malém množství a u některých i s nežádoucími nečistotami. Následující dekády byl paradoxně surový hliník několikanásobně cennější než třeba takové zlato. Dáno to bylo tím, že jeho příprava se řadila k těm ekonomicky velmi náročným a vesměs ho bylo velký nedostatek, proto plnil zprvu funkci především okrasnou. Pro názornost si uveďme jeden historický příklad. Hliník se stává neodmyslitelným symbolem průmyslové revoluce. V polovině 19. století v Americe na počest jejich 1. prezidenta George Washingtona (1732 – 1799) vzniká celosvětově známá stavba „Washingtonův monument“, který je vysoký přibližně 169 m. Americká vláda žádá zakázku na jeho typickou špičku ve tvaru pyramidy u tehdejšího největšího, ale hlavně jediného výrobce hliníku v zemi Williama Frishmutha (1830 – 1893). Podle záznamů se cena za hotový vršek vyšplhala na tehdejších úctyhodných 225 dolarů, což když přepočítáme na současnou hodnotu americké měny, jsme na částce cca 7 900 dolarů. Zdá se to zcela neuvěřitelné, když si uvědomíme, že dnešní cena hliníku je asi 2 dolary za 1 kilogram.

Vše se změnilo v roce 1886, kdy nezávisle na sobě dva mladí doktorandi Francouz Paul Louis Toussaint Heroult (1863 – 1914) a Američan Charles Martin Hall (1863 – 1914) přišli na zcela unikátní proces průmyslové výroby hliníku. Podle jejich postupu se hliník připravuje elektrolýzou taveniny směsi bauxitu – ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) a kryolitu – (Na_3AlF_6) v poměru 9 : 1. Tato směs má teplotu tání cca 950 °C, což je méně než polovina teploty tání samotného oxidu hlinitého ($t_f = 2\,072$ °C). Genialita celé myšlenky tkví v tom, že jako katoda je zároveň použit v elektrolytické vaně pro svou schopnost výborné elektrické vodivosti právě vyredukovaný

hliník a anoda je vyrobena z vysoce kvalitního uhlíku. Při následném průchodu elektrického proudu se hlinité kationty postupně redukuje na katodě a na uhlíkové anodě zase uvolňující se kyslík z elektrolytu reaguje ihned s ní za vzniku oxidu uhelnatého – (CO) a oxid uhličitý – (CO₂). Z toho je jasné, že po nějaké době se musí anoda vyměnit opět za novou. Nakonec se vyredukovaný hliník hromadí u dna celého zařízení, dokud není odsán s využitím vakuovaného prostředí pro další použití. Hall – Heroultův proces, jak se mu někdy příznačně říká, umožnil v nadcházející budoucnosti významný posun celého průmyslu a strojírenství, neboť poprvé se konstrukční materiál jako byl hliník dal připravit relativně chemicky čistý v tak enormním množství (obr. 3.19.).



Obrázek 3.19. – původní schéma Hall–Heroultova procesu výroby hliníku včetně reakcí probíhající dějů při $t = 950\text{ °C}$ [54]

Kvalita připraveného hliníku byla pro jeho průmyslové využití klíčová, načež se někteří chemici zaměřili na vstupní surovinu a to oxid hlinitý – (Al₂O₃). V roce 1887 rakouský chemik Karl Josef Bayer (1847 – 1904) objevil nový inovativní způsob extrakce oxidu hlinitého z bauxitu, přičemž výsledný produkt má daleko vyšší čistotu. Díky tomu se výrazně zvýšila účinnost celého elektrolytického procesu, a tudíž i výtěžnost hliníku. Obecně se v přírodě tížený

oxid nachází v minerálu bauxitu (mimořádně jeho triviální název byl odvozen od jména Karla Josefa Bayera) složeného z hydrargylitu a gibbsitu (hydroxid hlinitý – Al(OH)_3 a γ – Al(OH)_3) dále z böhmitu (γ – AlO(OH)) a ve stopové míře také z jeho modifikace alfa, případně různých oxidů na bázi železa, titanu a křemíku. Tento minerál je velmi dobře rozpustný v kyselině sírové, ale kvůli tomu že hydroxid hlinitý, který posléze vysrážen z takového roztoku, má vždy gelovitou viskozitu s velmi špatnou možností filtrace a zbavování se nečistot, se touto cestou dále ubírat nedalo.

Bayerova metoda, toho času vyvinuta v laboratořích chemické továrny v ruském Petrohradě, vycházela z toho, že se nejprve vytěžený bauxit selektivně loužil v roztocích hydroxidu sodného – (NaOH) za vysoké teploty a tlaku v autoklávech. Z roztoku se dále vysrážel čistý krystalický hydroxid hlinitý – (Al(OH)_3) jednoduše vpravením několika krystalizačních center ve formě segmentů onoho hydroxidu. Pro promytí a filtraci se nakonec oxid hlinitý z něj připravil pouhou metodou kalcinace (vysokoteplotní proces oddělující pevnou složku hmoty od plynné).^{[43] [44] [45] [61]}

3.9. Izolace problematického fluoru

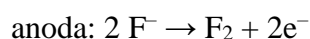
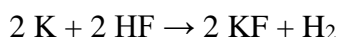
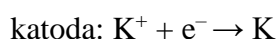
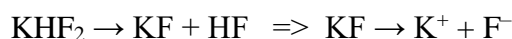
Pokusy o izolaci fluoru byly kvůli jeho vysoké elektronegativitě dlouhá léta nemožná. Této problematice se dosti během svého života věnoval francouzský chemik Ferdinand Frédéric Henri Moissan (1852 – 1907), který za její zdárné vyřešení a publikování podrobného návodu, jak tíženého výsledku docílit, obdržel roku 1906 Nobelovu cenu za chemii.

Z počátku se o izolování elementárního plynného fluoru pokoušel již v roce 1884 rovněž národností Francouz, chemik Edmond Frémy (1814 – 1894), který elektrolýzou tavenin fluoridů různých kovových prvků za použití platinových elektrod byl schopný pouze připravit neznámou plynnou látku s tak vysokou chemickou afinitou k elektrodám, že jí nebylo možné následně po vyloučení nijak efektivně shromáždit. Moissan si uvědomil, že tato cesta nikam nevede, a tak se nejprve zaměřil na prvek ze stejné skupiny halogenů totiž chlor. Ten byl touto dobou už natolik probádaný, že byly známé desítky sloučenin, které ho ve své struktuře obsahovaly, i bylo už jasné, jak ho chemickou cestou (například rozkladem za zvýšené teploty) z nich vypudit. Uvažoval tedy, že kdyby nic z toho nebylo o chloru známé, na jaké typy sloučenin by se měl tudíž prioritně zaměřit, aby ho z nich dokázal nejsnadněji získat. Odpověď byla velmi jednoduchá, neboť se stačilo věnovat cíleně sloučeninám kombinující ve své struktuře chlor s fosforem či některým z kovů. U fluoru to bylo však prozatím dosti problematické, protože takové sloučeniny nebyly veřejně známé nebo objeveny do tohoto

okamžiku téměř žádné. O izolaci fluoru se pokoušel i Humphry Davy, který provedl experiment, kdy fluorid kovu zahříval v trubici z kovového materiálu společně s fosforem. Po čase vznikal hořlavý plyn, který při kontaktu se vzduchem tvořil mohutné oblaka dýmu. Davy se domníval, že by se mohl připravit čistý fluor následným spálením onoho plynu v atmosféře tvořené pouze kyslíkem v nádobce vyhotovené z krystalu křivce. Toto provedení však sám nikdy blíže nerealizoval i kvůli jeho značné nepraktičnosti. Moissan se tudíž v první části svého bádání zaměřil na syntézu fluoridu fosforitého – (PF₃) a fluoridu fosforečného – (PF₅), což se mu zdárně podařilo připravit kupříkladu jednoduchou reakcí fluoridu olovnatého – (PbF₂) s fosfidem mědi – (Cu₃P) za aktivního zahřívání. Překvapením bylo, že oba nově vytvořené fluoridy byly plynného skupenství, neboť se dříve předpokládalo, že se teoreticky bude jednat o kapaliny. Ihned je podrobil podrobnému výzkumu jejich chemických a fyzikálních vlastností, načež největší pozornost věnoval případům, kdy by se mohl z nich teoreticky vytěsnit tížený fluor. Použití třeba tepelného rozkladu na fluorid fosforitý – (PF₃) mělo za výsledek pouhé sloučení kyslíku v ovzduší s látkou za vzniku fluoridu fosforylu – (POF₃). Nutno podotknout, že tento obsáhlý výzkum z jeho strany přinesl chemii doslova pestrou škálu zcela ojedinělých a nových sloučenin s fluorem, avšak problém jeho separace nebyl stále vyřešen.

Henri Moissan se tedy pokusil fluor izolovat pomocí elektrolýzy. Nejprve experimentuje s kapalným fluoridem arsenitým – (AsF₃) při laboratorní teplotě, kdy jako elektrolytickou vanu použil platinový kalíšek, který zároveň připojil k zápornému pólu zdroje, čímž z něj učinil katodu. Naopak kladný pól zapojil k platinovému drátku umístěného uvnitř nádoby, což nyní byla pro toto schéma zase anoda. Dále stačilo celý aparát obohatit o elektrolyt ve formě již zmíněného kapalného fluoridu arsenitého s přídavkem menšího množství fluoridu draselného – (KF), který zde sloužil k výraznému zesílení elektrické vodivosti elektrolytické lázně. Po spuštění celého procesu se začaly na dně kalíšku usazovat tmavé stříbrně lesklé krystalky arsenu a kolem platinové drátu se vyvíjelo velké množství plynu v podobě zpěněného elektrolytu, který již měl k arsenu viditelně nízkou afinitu, čímž se zpětně netvořil už žádný fluorid arsenitý. Pro jeho nebezpečné a zdraví škodlivé účinky brzy od prováděním pokusů s ním na této úrovni opustil a zkoušel provést podobný proces i s jinými fluoridy kovů. Nakonec konečně dospěl k tomu správnému elektrolytu, který tvořil konkrétně bezvodý fluorovodík – (HF). Ten si připravil ve zkapalněné formě v U – trubici z platiny ponořené do vroucího roztoku vhodně zvoleného chladicího média (chlormethan – CH₃Cl při teplotě – 24 °C). Opět bylo potřebné k němu přidat do elektrolytické vany určité množství fluoridu draselného, který byl pro rozběhnutí elektrolýzy zcela klíčový. Co však bylo důležité byla jeho domněnka vycházející ze závěrů jeho dříve prováděných pokusů, že teoreticky možný

vznikající fluor bude mít natolik vysokou afinitu ke křemíku, že by se s ním za silných exotermických dějů měl začít při bezprostředním kontaktu slučovat. A opravdu se tak stalo 26. června 1886, když opatrně přiblížil krystal křemíku k epicentru vývoje plynné látky na anodě. Ohromen tím, že právě po tolika letech neúspěšných pokusů jiných vědců a jeho samotného poprvé právě on dokázal průkazně izolovat chemicky čistý elementární fluor, okamžitě o svém fenomenálním objevu informuje Francouzskou akademii věd. Kuriozitou však byla situace, když se k Moissanovi dostavila o několik dní později vědecká komise ve složení Pierre Eugène Marcellin Berthelot (1827 – 1907), Jules Henri Debray (1827 – 1888) a Edmond Frémy. Nedokázal totiž před nimi provést onen experiment znovu a demonstrovat výsledky své práce, neboť se během elektrolýzy nevyvíjel na platinové anodě vůbec žádný plyn. Výbor tedy odjel značně zklamaný, avšak Henri Moissan brzy odhalil příčinu selhání. Při sestavování aparátu nepřidal do kapalného fluorovodíku dostatečné množství fluoridu draselného, čímž se elektrolyt stal takřka v té chvíli nevodivým. Svůj omyl obratem napravil a vědecké sympóziu bylo konečně svědkem toho, že kromě spalování za oslnivého žáru křemíku při kontaktu s fluorem svoje pojetí ještě povýšil na vyšší úroveň tím, že použil pro předvedení jeho chemických účinků záměnou za krystal například železo, mangan, antimon nebo arsen. Později dokázal určit experimentálně chemické a fyzikální vlastnosti tohoto prvku, a navíc připravit širokou škálu jeho anorganických sloučenin. ^{[46] [47]}



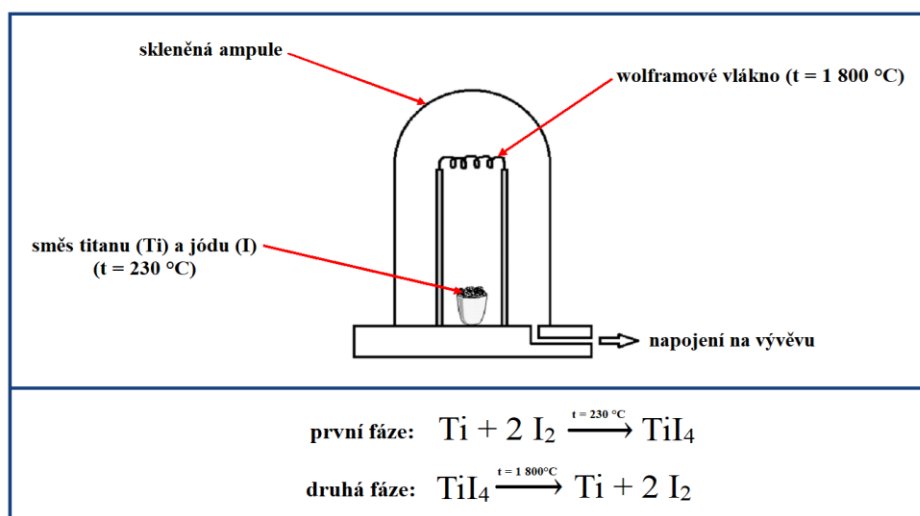
3.10. Metoda Van Arkel – de Boer, komerční příprava vysoce čistých kovů

Na úplný závěr celé teoretické části diplomové práce se ještě nakrátko zastavíme u velmi důležité a důmyslné metody, která byla vyvinuta v první čtvrtině 20. století. Pracovali na ni společně dva kolegové, holandští chemikové Anton Eduard Van Arkel (1893 – 1976) a Jan Hendrik de Boer (1899 – 1971). Roku 1925 publikovali doposud neznámý postup, který umožňoval izolovat různé druhy kovů o téměř stoprocentní chemické čistotě ($w = 0,9999$). Postupně totiž vycházelo najevo, že i když byly kovy nově připravovány elektrolýzou zejména vlivem rozmachu průmyslové revoluce, stále byly do jisté míry znečištěny (tzv. intersticiální

nečistoty ve formě oxidů – kyslík, nitridů – dusík a karbidů – uhlík) a nešlo tak o chemicky dokonale čisté látky, který byly pro začínající elektrotechnické odvětví zcela žádoucí a klíčové.

Toto úskalí řešila právě metoda Van Arkel – de Boera, kdy se nejprve sestrojilo zařízení (první prototyp) sestávající se z ampule vyrobené z velmi odolného skla umístěné na masivním podstavci. Ten byl opatřen vývodem s ventilem pro evakuaci vzduchu vývěvou, čímž se dalo vytvářet prostředí s charakteristikou částečného vakua (drasticky se snížil tlak a z prostředí se odstranily nežádoucí plyny v ovzduší – dusík, kyslík, vodní pára, ...). Uvnitř se na dně nacházela nádobka určená k primárnímu vložení kovu pro přečištění (např. titan, zirkonium, hafnium aj.) s vhodně zvoleným halogenem, kdy nejčastěji se používal pevný jód. Po spuštění došlo k zahřívání směsi v misce na teplotu cca 230 °C, čímž postupně začal vznikat jodid titaničitý – (TiI₄), který je obecně jako všechny halogenidy těkavý a jeho páry tak postupně začaly zaplňovat dříve evakuovaný prostor ve skleněné ampuli. Nad nádobkou bylo připevněno pružinově svinuté wolframové vlákno, do kterého přes vodiče byl přiváděn elektrický proud tak, aby se vlákno postupně žhavilo. Teplota rozžhaveného wolframu se tedy mohla vyšplhat na neuvěřitelných 1 800 °C, což mělo za následek reverzibilního rozkladu plynného jodidu titaničitého (obr. 3.20.). Na vlákně se postupem času vylučoval tížený, dokonale chemicky čistý titan. Nutno podotknout, že vylučováním kovu rostla postupně elektrická vodivost vlákna, tudíž bylo potřeba hlídat správnou hodnotu procházejícího elektrického proudu, aby se teplota potřebná pro vylučování dalšího množství kovu udržela na dané hodnotě. Na začátku procesu byl elektrický proud protékající wolframovým vláknem na úrovni desetin ampéru a ke konci procesu vzrostl na několik desítek až stovek ampérů.

Metoda Van Arkel – de Boera je obecně využitelná i pro jiné prvky jako jsou například zirkonium, hafnium, vanad, thorium či protaktinium. [48] [49]



Obrázek 3.20. – schéma prvního zařízení Van Arkel – de Boera (konkrétně pro titan) včetně probíhajících chemických dějů

4. PRAKTICKÁ ČÁST

Do praktické části diplomové práce byly zahrnuty některé účelově vybrané experimenty, které při svých bádáních přímo dle dochovaných pramenů dělali Alessandro Volta, Humphry Davy či Michael Faraday. Bylo provedeno co nejvíce možné autentické sestavení plně funkční repliky Voltova sloupu, dále byly vykonány pokusy o izolaci draslíku nebo sodíku pomocí elektrolýzy na základě Davyho pokusů a jeden z Faradayových experimentů zaměřený na vodivost prostředí. Hlavním cílem bylo ověřit možnost reprodukovatelnosti uvedených pokusů v laboratorních podmínkách a případně je přizpůsobit tak, aby je bylo možné prezentovat studentům základních a středních škol v rámci popularizace historie chemie spojené s interdisciplinárním tématem elektřina. Jako příloha k diplomové práci byly vytvořeny výukové materiály a dokumenty. V rámci praktické části práce byla vytvořena prezentace, která obsahuje stručný přehled historie objevování podstaty a možností využití elektřiny v chemii od počátků věků až do první poloviny 20. století. Dále byl vytvořen pracovní list pro žáky včetně detailního metodického listu pro pedagogy zahrnující řešení a vyhodnocovací klíč. Provedení všech pokusů bylo fotograficky zdokumentováno. Některé další použité obrázky byly vytvořeny pomocí programu Malování či ChemSketch. Výuková prezentace s pracovní listem a metodickým listem (s klíčem řešení) jsou nahrány na CD ve formě příloh k diplomové práci.

4.1. Použité chemikálie a materiály

Během všech prováděných experimentů byly použity komerčně snadno dostupné chemikálie a popřípadě i poměrně lehce obstaratelné materiály a pomůcky (kurkuma, bavlněný či jutový provázek, dubové dřevo, olejová glazura, vodiče, digitální multimetr, železné kalíšky, wolframová elektroda aj.). Všechny použité materiály a pomůcky byly zakoupeny v hobby obchodech, specializovaných kamenných prodejnách a případně i na internetu. Komerční chemikálie byly zakoupeny od firmy LachNer a byly použity bez dalších úprav.

4.2. Aplikované analytické metody a měřicí přístroje

Pro měření elektrického napětí byl použit digitální multimetr značky UNI-T UT131D s rozsahem 0 – 600 V. UV-VIS spektrum vodného roztoku železnanu draselného bylo měřeno pomocí UV-VIS spektrometru Cintra 3030 (GBC Scientific Instruments) v rozsahu vlnových

délek 350-800 nm s použitím plastové kyvety s hloubkou 1 cm. Práškový difrakční záznam $\text{Ag}_7\text{O}_8(\text{NO}_3)$ byl měřen pomocí práškového RTG difraktometru MiniFlex600 (Rigaku) s použitím záření s vlnovou délkou $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$

4.3. Praktické úkoly

4.3.1. Úkol číslo 1: Sestavení funkční repliky Voltova sloupu

Pomůcky: větší deska z masivního dřeva (nejlépe dubové) – cca 40 mm tloušťka, kružítko, pravítko, tužka, elektrická případně ruční lupenková pila, elektrický vrták, 3x dřevěná tyč – 10 mm v průměru, brusný papír různé hrubosti, olejová lazura na dřevo, lepidlo na dřevo, noviny nebo letáky, kruhová raznice na kov – průměr 57 mm, elektrické případně ruční nůžky na plech, pilka, vodiče, pěnová houbička, vatové odličovací tampony – standartní průměr 57 mm, kádinky, odměrný válec, lžička, hodinové sklo, předvážky, skleněná tyčinka, digitální multimetr, nůžky, kladivo

Chemikálie: chlorid sodný (ve formě kuchyňské soli), ocet kvasný lihový ($w = 0,08$), citrónka ($w = 0,14$), plech z mědi (tloušťka 0,8 mm), plech z hliníku (tloušťka 0,75 mm), pozinkovaný plech (Fe – Zn o tloušťce 0,8 mm), destilovaná voda

Cíl pokusu: Sestavení plně funkční repliky Voltova sloupu a proměření jím generovaného elektrického napětí za použití různých dvojic kovů a elektrolytů.

Pracovní postup: První fáze byla věnována vyhotovení dřevěné repliky Voltova sloupu inspirované dochovanými nákresey a historickými prameny. Nejprve byly za pomoci kružítka narýsovány na desku z dubového dřeva o tloušťce cca 40 mm dvě kružnice o průměrech 130 mm a 100 mm. Následně byly elektrickou lupenkovou pilkou oba díly vyříznuty. Pro správné rozmístění nosných tyčí do tvaru rovnostranné trojúhelníku, tak aby mezi nimi vznikl prostor pro vkládání plíšků z kovů a vatových tampónů o potřebném průměru 57 mm, byly na oba vyřezané dřevěné kruhy vytvořeny soustředné kružnice o průměru tentokrát 60 mm opět kružítkem. Pro správné rozvrhnutí umístění děr pro tyče byl využit vzorec pro poloměr kružnice vepsané v rovnostranném trojúhelníku ($\rho = \frac{a}{\sqrt{3}} \Rightarrow a = \rho \cdot \sqrt{3} = 30 \cdot \sqrt{3} = 52 \text{ mm}$). Vypočtená vzdálenost byla díky kružítku rovnoměrně nanesa na obě dřívě narýsované kružnice, čímž se vytvořily tři symetricky rozmístěné značky. Posléze se obtáhl tužkou průměr nachystané tyče

na vyznačených místech tak, aby se vzniklé miniaturní kružnice z vnějšku dotýkaly velké kružnice v jediném bodě. Právítek byla provedena kontrola, jestli rozteč středů vždy dvou sousedících kružnic o průměru tyče 10 mm byla 60 mm. Dále byly elektrickým vrtákem o průměru 10 mm vyvrtány na již dříve nakreslených značkách do hloubky cca 12 mm jednotlivé díry na obou vyhotovených dílech. Nyní byly hrany vrchní části menšího z dřevěných dílů hrubším brusným papírem zbrušeny do takové míry, aby se docílilo vzhledu mírně zaoblené kupole. Případné nedostatky byly na obou částech zbrušeny dodatečně jemným brusným papírem. Posléze byly na rozložených novinách a letáčích pěnovou houbičku natřeny ze všech stran, jak podstava, tak stříška Voltova sloupu olejovou silnovrstvou lazurou v odstínu mahagonu, čímž bylo docíleno staršího vzhledu dřeva a zároveň byl vytvořen na povrchu tenký film ochraňující dřevěné součástky před případným potřísněním elektrolytem. Naneseny byly celkem 3 vrstvy a vše muselo minimálně po dobu 24 hodin zaschnout. Nakonec byly pomocí pilky nařezány tři stejně dlouhé tyčky o délce 250 mm, jejichž dolní část byla pomocí lepidla na dřevo permanentně zafixována v podstavě Voltova sloupu do již předvrtaných otvorů (schnutí po dobu minimálně 12 hodin). Jeho stříška byla pouze na volno nasazena, aby se dala kdykoliv oddělat pro vrstvení vnitřní části.

Ve druhé fázi byly nejprve ze zakoupených plechů z mědi, pozinkovaného plechu a hliníku skrze kruhovou raznici na kovy o průměru 57 mm a následně elektrickými nůžkami na plech vyhotoveny plíšky tak, že jich bylo nejméně 20 od každého druhu.

Samotné sestavení Voltova sloupu se uskutečnilo ve třetí fázi, kde již byly všechny díly připraveny. Jako elektrolyt byl použitý roztok kuchyňské soli (20 g ve 100 ml destilované vody), kvasný lihový ocet (12,5 ml octu ve 100 ml destilované vody) a citrónky (10 ml ve 100 ml destilované vody). Po nachystání všech dílčích komponentů byl sestaven Voltův sloup postupným ukládáním pozinkovaného plechu, vatového tamponu namočeného v elektrolytu a měděného plechu. Toto trojvrství tvořilo jeden článek. Elektrické napětí generované sloupem různých výšek (1 článek, 2 články, 5 článků, 10 článků, 15 článků a 20 článků) s použitím různých kombinací kovů (pozinkovaný plech – měď nebo hliník – měď) a i respektive odlišných elektrolytů (solanka, kvasný lihový ocet, citrónka) bylo měřeno digitálním multimetrem. Postupovalo se vždy stejně tak, že nejprve se na dno umístil vodič, tak aby jeho část alespoň lehce vyčnívala pro možné připojení jednoho z kontaktů digitálního multimetru. Při sestavování sloupu sestávajícího se z vícero článků bylo nutné vatové tampony zvlhčené elektrolytem zbavit přebytečného roztoku a jeho okraj nůžkami následně po obvodu zmenšit alespoň o 2 až 4 mm v průměru, aby se předešlo zkratování a snížení hodnoty napětí. Dále bylo potřeba dbát na to, aby vrstva s elektrolytem byla mezi plíšky silnější a předešlo se tak případnému

vyzkratování nežádoucím dotknutím 2 kovů svírajících mezi sebou tampon s elektrolytem, což mohlo nastat hlavně při vyšších Voltových sloupech. Dalo se tomu předejít tak, že se vložily dva vatové tampony na sebe. Při kompletování bylo potřeba plíšky lehce přimáčknout, aby se elektrolyt dostal do rovnoměrného kontaktu s celou plochou jednotlivých kovů. Po sestavení dané výšky bylo digitálním multimetrem do ustálení naměřeno celkem 6 hodnot pro danou variantu a obměněných variant bylo rovněž 6 (tzv. celkem 36 měření).

4.3.2. **Úkol číslo 2:** Pokus o elektrolytickou izolaci draslíku a sodíku modifikovaným postupem Humphry Davyho

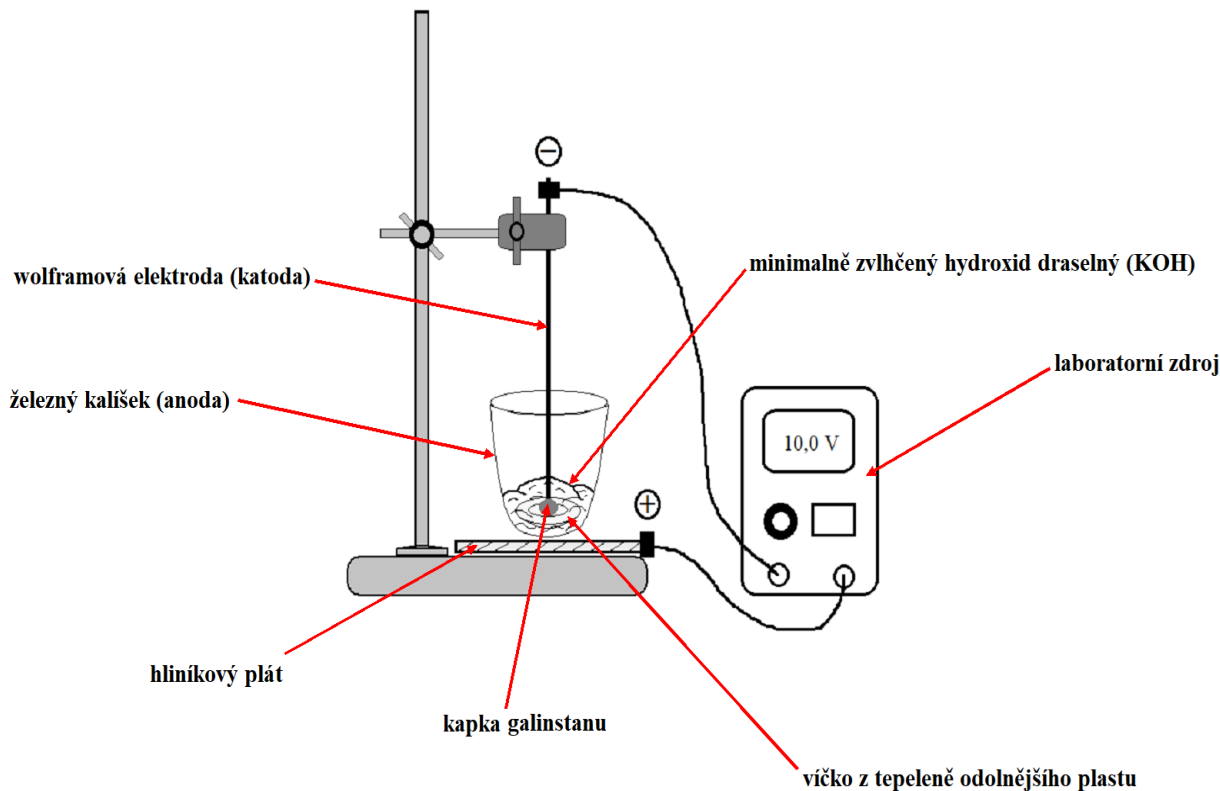
Pomůcky: stojan, svorka, lapák, wolframová elektroda, železný kelímek, menší plastové víčko (například z vialky), izolované elektrické vodiče, kádinky, plastová Pasteurova pipeta, kousek gumové hadičky, lžička, vialka, hliníkový plech, laboratorní zdroj, lakmusové pH papírky, skleněná tyčinka

Chemikálie: galinstan (Ga – 68,5 %, In – 21,5 %, Sn – 10 %), hydroxid sodný (perličky), hydroxid draselný (šupinky), kyselina octová ($w = 0,99$), destilovaná voda

Cíl pokusu: Provedení průkazné izolace draslíku / sodíku dle postupu Humphry Davyho s určitou bezpečnější modifikací

Pracovní postup: Nejprve byla sestavena aparatura (viz obr. 4.21.) tak, že wolframová elektroda byla uchycena za pomoci svorky a lapáku ke stojanu, kde kousek gumové hadičky nasunutý na vrchní část elektrody sloužil především k izolaci elektrody od ostatních kovových částí tak, aby nedošlo k případnému zkratu. Dále byl na podstavu stojanu umístěn rovný hliníkový plát. Vše se následně propojilo vodiči s krokosvorkami k laboratornímu zdroji tak, že kladnou elektrodu (anodu) tvořil plech z hliníku (tím pádem i železný kelímek, který na něj později byl dán) a naopak zápornou elektrodu (katodu) zase wolframová tyč. Mezitím byl připraven k samotné elektrolýze obsah železného kalíšku. První krok zahrnoval navlhčení kapátkem jeho dna několika kapkami destilované vody, na které následně přišlo položit zhruba do středu plastové víčko od vialky (prohlubní nahoru). Posléze se s použitím lžičky obsypala důkladně vzniklá mezera (mezi kalíškem a víčkem) příslušným hydroxidem (pro izolaci draslíku – hydroxid draselný nebo pro izolaci sodíku – hydroxid sodný + dále byla z čistě experimentálního hlediska provedena elektrolýza i pro lithium – monohydrát hydroxidu

lithného, cesium – hydroxid cesný a baryum – oktahydrát hydroxidu barnatého) a ještě se navrstvila slabší souvislá vrstva (cca 3 – 4 mm nad úroveň onoho plastového víčka). Potom bylo ještě důležité udělat jedním koncem skleněné tyčinky v prohlubni víčka od vialky menší jamku (v nasypáném hydroxidu) pro budoucí kapku galinstanu. Nakonec se i vrchní část přidaného hydroxidu provlhčila několika kapkami destilované vody a nechala ještě stát na vzdušné vlhkosti cca dalších 5 – 10 minut, dokud se viditelně nezačalo skupenství pevných hydroxidů měnit a připomínat tak postupně tužší kaši. Takto připravený železný kelímek se pak umístil na hliníkový plát tak, aby wolframová elektroda byla upevněna v centru oné dříve vytvořené jamky. Pro další postup bylo potřeba kápnout Pasteurovou pipetou několik kapek kapalného galinstanu ($t_f = -19\text{ °C}$) k wolframové tyči do prohlubně tak, aby špička elektrody byla celá v galinstanu ponořená a nejlépe byla ve středu kapky. Při elektrolýze byl jako zdroj elektrického proudu použit laboratorní zdroj ($U = 10,0\text{ V}$). Po 8 až 10 minutách elektrolýzy bylo pomocí plastové Pasteurovy pipety nebo kovové lžičky odebráno ze železného kelímku menší množství (pár kapek) galinstanu, které byly následně dány do destilované vody okyselené několika kapkami kyseliny octové. Celý průběh elektrolýzy a její závěry byly zdokumentovány a také vyhodnoceny.



Obrázek 4.21. – obecné schéma aparatury pro pokus o izolaci draslíku dle metody Humphry Davyho

4.3.3. Úkol číslo 3: Replikace Faradayova pokusu zaměřeného na vodivost prostředí

Pomůcky: plochá baterie – 4,5 V, izolované elektrické vodiče, Petriho misky, jutový či bavlněný provázek, pravítko, kádinky, lžička, lakmusové pH papírky, filtrační papír, nůžky, stojan, nálevka, filtrační kruh, vialka, lžička, předvážky, hodinové sklo, skleněná tyčinka, pinzeta

Chemikálie: síran sodný, jodid draselný, mletá kurkuma (koření), ethanol (96%), destilovaná voda

Cíl pokusu: Ověření vodivosti prostředí různě sestavených soustav podle provedení Michaela Faradaye s použitím různých elektrolytů

Pracovní postup: Nejprve bylo potřeba si připravit kurkumový indikační papírek, kdy se v kádince ve přibližně 50 ml ethanolu důkladně rozmíchala skleněnou tyčinkou jedna větší lžička mleté kurkumy (koření) a nechala se následně po dobu 20 – 30 minut macerovat. Vzniklá směs byla posléze filtrována a získaným oranžovým roztokem byl napuštěn filtrační papír, který se nechal volně vyschnout. Mezitím byly nachystány roztoky později používaných elektrolytů. První roztok byl připraven ze síranu sodného (3 g ve 100 ml destilované vody) a druhý roztok zase obsahoval jodid draselný (3,4 g ve 100 ml destilované vody).

Nyní bylo přistoupeno k samotnému provedení Faradayova pokusu dle jeho poznámek v několika různých variantách. V prvním nejzákladnějším provedení byly s pomocí pinzety důkladně namočeny do již připraveného roztoku síranu sodného jak lakmusový, tak kurkumový papírek a následně byly umístěny do větší Petriho misky tak, aby se na jednom svém konci cca 1 cm překrývaly. Posléze za pomoci zdroje (baterie – 4,5 V) a vodičů byl kladný pól propojen s lakmusovým koncem papírku a záporný pól naopak s kurkumovým. Ve druhé verzi byly už však, jak lakmusový, tak kurkumový papírek (opět navlhčené v roztoku síranu sodného) dány tentokrát odděleně od sebe na dnem vzhůru obrácené Petriho misky. Jedny z jejich konců byly propojeny pomocí jutového či bavlněného provázku řádně namočeného rovněž v roztoku síranu sodného, tak aby se nijak nedotýkal země. Nutno podotknout že pro toto uspořádání pokusu byly použity celkem dva provázky různé délky (5 a 10 cm). Jako zdroj elektrického proudu byla opět při této verzi experimentu použita plochá 4,5 V baterie a také kladný pól byl připojen k elektrodě dotýkající se lakmusového papírku a záporný pól k elektrodě dotýkajícího se

kurkumového papírku. Všechny tři verze pokusu byly opakovány i s roztokem jodidu draselného namísto síranu sodného.

4.3.4. **Úkol číslo 4:** Vytvoření učebních materiálů v rámci popularizace vědy pro žáky SŠ

V závěrečné fázi praktické části méj diplomové práce bylo mým předním cílem vytvořit co do obsahu přehlednou a stručnější PowerPointovou prezentaci opírající se o ty z mého pohledu nejzásadnější objevy a inovace v oblasti vývoje a využitelnosti elektrického proudu v chemie od počátku věků do první poloviny 20. století. Tu by mohli případně pedagogové či lektori aktivně využívat hlavně na SŠ (případně i ZŠ) při svých hodinách chemie v rámci popularizace vědy nebo případně osvěty ve sféře v dnešní době tolik opomíjené historie chemie. Mnou sestavená prezentace obohacená o názorné obrázky a závěrečný opakovací miniaturní kvíz je k diplomové práci přiložena ve formě elektronické přílohy na CD.

Dále jsem rovněž sestavil obsahově rozsáhlejší pracovní list s prvky badatelsky orientované výuky, který do jisté míry slouží k prověření, jak úspěšně se žáci s daným tématem seznámili a jestli mu dostatečně porozuměli. Pestrá škála originálně vytvořených úloh se s důrazem na hravou formu zadání a následného plnění jednotlivých úkolů zaobírá teoretickou i praktickou tematikou. Zároveň je doporučeno, aby pracovní list učitelé zadali nejlépe metodou skupinové práce například v rámci laboratorního cvičení, kde je časová dotace obvykle 2 vyučovací hodiny (celkem tedy 90 minut), čímž si zajistí i prostor pro případnou adekvátní zpětnou vazbu k jednotlivým zadaným úkolům. Mimo to byl k pracovnímu listu vytvořen i podrobný metodický list pro pedagogy s klíčem odpovědí a bodovací škálou. Oba dokumenty jsou ve formátu pdf rovněž nahrány formou elektronické přílohy na CD přiloženého k diplomové práci.

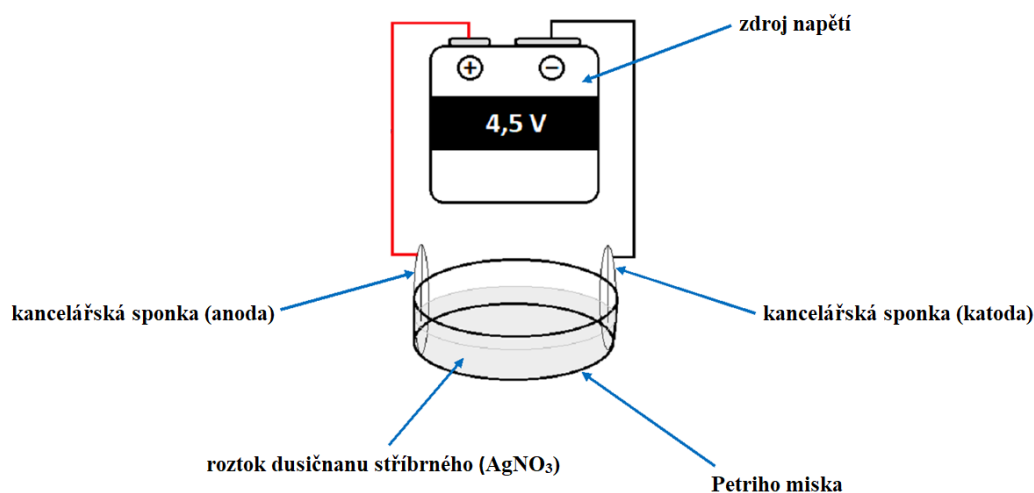
Dodatkový úkol k úkolu číslo 4: Elektrolytické redukce kovů z roztoků jejich solí na katodě a možný simultánní vznik nových sloučenin vlivem anodické oxidace

Pomůcky: plochá baterie – 4,5 V, izolované elektrické vodiče, Petriho miska (menší průměr), 2x kancelářská sponka, lžička, kádinka, odměrný válec, předvážky, skleněná tyčinka, stopky

Chemikálie: dusičnan stříbrný (příp. i dihydrát chloridu cínatého), destilovaná voda

Cíl pokusu: Průkazně pomocí elektrolýzy vyredukovat kov z roztoku jeho soli na katodě a zároveň ověřit možnost přípravy nových látek za pomoci anodické oxidace

Pracovní postup: Nejprve byl připraven do menší kádinky roztok dusičnanu stříbrného o molární koncentraci 1,00 mol/l o objemu 10 ml z předem vypočítané navážky. Následně byla sestavena jednoduchá aparatura, kde jako tzv. elektrolytická vana posloužila menší Petriho miska. K jejím okrajům se na opačných stranách přichytily dvě kovové kancelářské sponky tak, aby uvnitř vždy hrot drátu vyčníval pod úroveň jejího okraje. Tudíž po nalití elektrolytu by byly ponořené do onoho roztoku a tvořily tak elektrody celého systému. Dále pomocí elektricky izolovaných vodičů byly vyčnívající konce kancelářských sponek propojeny přes krokosvorku s plochou 4,5 V baterií, která zde měla účel zdroje (kladný pól – anoda a záporný pól – katoda). Nakonec byl do Petriho misky přidán připravený roztok dusičnanu stříbrného ($c = 1,00 \text{ mol/l}$) (celý náčrt aparatury viz obr. 4.22.). Pomocí stopek byl kontrolován čas probíhání elektrolýzy po zapojení obvodu tak, aby nepřesáhl 10 minut.



Obrázek 4.22. – obecné schéma aparatury pro elektrolýzu roztoku dusičnanu stříbrného (AgNO₃)

Výpočty:

- určení navážky dusičnanu stříbrného pro přípravu 10 ml roztoku o molární koncentraci 1,00 mol/l.

$$V = 10 \text{ ml} = 0,01 \text{ l}$$

$$c = 1,00 \text{ mol/l}$$

$$M_{(\text{AgNO}_3)} = 169,87 \text{ g/mol}$$

$$m_{(\text{AgNO}_3)} = ? \text{ [g]}$$

$$n_{(AgNO_3)} = n_{(AgNO_3)}$$

$$\frac{m_{(AgNO_3)}}{M_{(AgNO_3)}} = c \cdot V$$

$$m_{(AgNO_3)} = M_{(AgNO_3)} \cdot c \cdot V$$

$$m_{(AgNO_3)} = 169,87 \text{ g/mol} \cdot 1,00 \text{ mol/l} \cdot 0,01 \text{ l} \doteq \mathbf{1,70 \text{ g}}$$

Na přípravu 10 ml roztoku $AgNO_3$ o molární koncentraci 1,00 mol/l je potřeba navážka 1,70 g dané soli.

5. VÝSLEDKY A DISKUZE

5.1. Dokumentace a vyhodnocení prováděných úloh

V praktické části diplomové práce byly provedeny rekonstrukce některých historických experimentů, které dle dochovaných zápisů prováděli již dříve zmínění přední vědci a chemikové (Alessandro Volta, Humphry Davy či Michael Faraday). Ti se za svého života svým výzkumem nenávratně podíleli na objevu a postupném zdokonalování oboru elektrochemie, z něhož těží společnost dodnes. Skupinu experimentů tvořilo sestavení funkční repliky Voltova sloupu, pokus o elektrolytickou izolaci draslíku / sodíku modifikovanou metodou Humphry Davyho a v neposlední řadě Faradayův pokus zaměřený na vodivost prostředí. Stěžejní bylo ověřit reprodukovatelnost zvolených pokusů s případnou bezpečnější modifikací tak, aby se v závěru dalo konstatovat stanovisko k jejich možnému využití ve formě především demonstračních nebo případně i žákovských experimentů u žáků a studentů SŠ (případně i ZŠ). S ohledem na tuto skutečnost byly veškeré postupy provedeny s běžně dostupným laboratorním vybavením, chemikáliemi a se snadno dostupnými surovinami nebo pomůckami ve specializovaných kamenných prodejnách nebo na internetu.

5.1.1. Sestavení funkční repliky Voltova sloupu

Už od samotného počátku provedení tohoto úkolu byl kladen dominantní důraz na držení se co největší možné autenticity přibližně vycházející ze souhrnné dokumentace vědecké práce Alessandra Volty. S ohledem na to, že konkrétní rozměry a vzhled úplně prvního Voltova sloupu nebyly přímo nikde dohledatelné, byla zvolena nakonec, i s přihlédnutím k některým dochovaným náčrtkům a poznámkám z tehdejší doby, kruhová podstava i stříška vyrobená z masivního dřeva (v našem případě dub). Prostor mezi nimi vyplňovaly 3 nosné tyče (rovněž dřevěné) o délce cca 230 mm, rozmístěné do vrcholů rovnostranného trojúhelníku tak, aby vznikl mezi nimi prostor na vkládání plíšků o průměru cca 57 mm. Za zmínku stojí i to, že pozdější dobové varianty měly i 4 nosné tyče rozmístěné do vrcholů tentokrát čtverce a vrchní část byla navíc opatřena utahovacím šroubem, který sloužil k případnému mírnějšímu stlačení a lepší fixaci sloupce složeného z kovových plíšků a látky napuštěné elektrolytem. My se však drželi toho nejzákladnějšího a nejjednoduššího modelu i s přihlédnutím k tomu, že v této podobě si ho můžou dle podrobného návodu sami žáci pod odborným dohledem vyhotovit například ve školních dílnách v rámci pracovních činností, čímž dojde i k jistému propojení

předmětů. Nakonec byl povrch napuštěn lazurou na bázi oleje (v našem případě odstín mahagon), která měla hlavně docílit staršího vzhledu a také ochránit dřevo před případným potřísněním chemikáliemi. Výsledkem byla velmi stabilní a skladná vnější kostra Voltova sloupu, která v této podobě vydrží uživateli dekády a může se opakovaně používat při výuce v rámci demonstračních ukázek (viz obr. 5.23.).



Obrázek 5.23. – sestavená vnější kostra Voltova sloupu

Ve druhé fázi bylo klíčové vyhotovení plíšků daného rozměru. Po provedení několika variant se nejvíce osvědčilo využití raznice, díky které se vytlačil na plát (o minimální tloušťce 0,5 mm) příslušného kovu kruhový tvar požadovaného průměru. Posléze pouze stačilo za pomoci elektrických nůžek na plech je vyřezat. I s ohledem na potřebný počet nejméně 20 kusů od každého druhu zvoleného kovu by tato metoda nejschůdnější a mohla by být realizovatelná na technických typech středních škol, neboť zde by bylo nutné strojové vybavení. Daleko časově náročnější varianta je také proveditelná s využitím obyčejného kružítka a manuálních nůžek na plech, avšak na úkor nižší kvality vznikajících plíšků. Mimo to se v krajním případě dá využít i běžně dostupných věcí z domácnosti (např. pozinkované těsnicí podložky, poměděné mince, hliníková folie v podobě alobalu aj.). Ty však jsou limitované svou velikostí a případným vzhledem, tudíž si musí experimentátor nějak šikovně při sestavování poradit.

Samotné zvolení kovů a elektrolytů přinášelo do jisté míry rovněž úskalí. Na základě získaných informací z dochovaných pramenů jsme se rozhodli u repliky Voltova sloupu použít základní dvojici prvků mědi a zinku, kdy v Evropě zcela nedostupný čistý zinkový plech jsme nahradili snadno získatelným pozinkovaným plechem. Druhá dvojice kovů měla podle

poznámek obsahovat například stříbro místo zinku, avšak po jisté úvaze jsme se uchýlili pro daleko levnější a komerčně šetrnější variantu v podobě hliníku.

Zbývala zodpovědět otázka, jaký druh elektrolytu nejlépe zvolit. S přihlédnutím na kontaktní manipulaci při vrstvení jednotlivých segmentů na sebe jsme vybrali ty nejvíce bezpečné látky pro žáky a studenty. První vybraný roztok kuchyňské soli se přímo nabízel, neboť ho Volta sám při svých úvodních experimentech používal. Avšak tolik zmiňovaný roztok kyseliny sírové (vitriolu) jsme nahradili kyselými roztoky v domácnosti běžně dostupných a zdravotně nezávadných látek ve formě buď kyseliny octové v lihově kvasném octu nebo kyseliny citrónové v dochucovadle citrónka. Pro samotné nasátí elektrolytu jsme místo vyčíněné kůže či hrubší látky použili lépe dostupné a opracovatelné odličovací vatové tampony.

Pro vybrané dvojice kovů byly pak za využití všech tří elektrolytů změřeny s pomocí digitálního multimetru hodnoty generujících se elektrických napětí a přehledně zaznamenány do příslušných tabulek.

Tabulka č. 1 – Hodnoty elektrického napětí naměřeny pro různé vysoké Voltovy sloupy s použitím dvojice kovů Cu – Zn a různých elektrolytů

Cu – Zn	1 článěk [V]	2 články [V]	5 článků [V]	10 článků [V]	15 článků [V]	20 článků [V]
chlorid sodný	0,775	1,532	3,760	7,450	11,480	15,270
kyselina octová	1,014	2,020	5,050	10,060	14,950	20,010
kyselina citrónová	1,026	2,050	5,080	10,070	15,020	20,030

Tabulka č. 2 – Hodnoty elektrického napětí naměřeny pro různé vysoké Voltovy sloupy s použitím dvojice kovů Cu – Al a různých elektrolytů

Cu – Al	1 článěk [V]	2 články [V]	5 článků [V]	10 článků [V]	15 článků [V]	20 článků [V]
chlorid sodný	0,538	1,072	2,680	5,760	8,390	10,720
kyselina octová	0,609	1,247	3,120	6,180	9,160	12,170
kyselina citrónová	0,558	1,131	2,800	5,780	8,410	11,120

Ze získaných dat a průběhu měření jasně vyplývá, že nejpřesnějších výsledků limitně se blížících k tabulkovým hodnotám pro jeden článěk z dvojic kovů (Cu – Zn = 1,104 V a Cu – Al = 2,004 V) vykazuje kombinace mědi se zinkem s použitím elektrolytu v podobě roztoku kyseliny citrónové. Při použití roztoku chloridu sodného jako elektrolytu se při měření elektrického napětí jeho hodnoty poměrně dlouho ustalovaly a skokovitě kolísaly. Zároveň byla naměřená elektrická napětí oproti ostatním použitým elektrolytům jednoznačně nejmenší.

Zajímavé rovněž bylo zjištění, že kombinace mědi a hliníku ve Voltově sloupu oproti v literatuře uváděné tabulkové hodnotě tvořila napětí pouze cca čtvrtinové. Na tak nízké hodnoty mohlo mít vliv vícero vlivů, kdy například hliník, jak víme, se na vzduchu aktivně pokrývá velmi tenkou vrstvičkou (tzv. autopasivace) ve vodě nerozpustného oxidu hlinitého, jehož účinky zabraňují dalšímu jeho případnému podléhání oxidaci. Nutno podotknout, že zinek vystavený vzduchu se rovněž po čase pokrývá vrstvičkou oxidu zinečnatého, ale ten se zřejmě vlivem působení elektrolytů snadněji rozpouští a nebrání tak elektrochemickým procesům v takové měřítku jako u hliníku. Mimo to zde mohl hrát do jisté míry i efekt dříve zmíněné polarizace, která souvisí se vznikem takzvané bariéry na povrchu elektrod, když během elektrochemický procesů vznikají jemné bublinky plynného vodíku. Společným působením všech těchto faktorů (případně dalších) mělo evidentně za následek razantního snížení tvořícího se napětí.

Závěrem by bylo žádoucí zmínit několik technických úskalí, na které se během samotné konstrukce a proměřování napětí narazilo, a jak případné nedostatky eliminovat nebo jim předejít. Předně bylo velmi důležité vatové odličovací tampony zbavovat jemným vymačkáním viditelně přebytečné tekutiny, která by mohla po vnitřní části Voltova sloupu stékat a některé články zkratovat, čímž by se hodnota elektrického napětí snížila. Rovněž bylo důležité, aby navlhčené okraje vatových koleček nepřesahovaly a nedotýkaly se tak jiných vrstev z venčí. Proto bylo nutné je vždy případně zastříhnout dokola nůžkami a zmenšit tak jejich poloměr, jinak by totiž docházelo opět ke značným ztrátám. V neposlední řadě zejména u velikostně vyšších sloupců se postupně spodní články s rostoucí tíhou (a s tím spojeným tlakem) začaly mírně prohýbat až deformovat. To mohlo mít za následek přímého kontaktu jednotlivých kovů a vést tak opět ke zkresleným výsledkům. Řešení bylo nasnadě, kdy stačilo mezi ně vkládat silnější vatovou vrstvu tak, že místo jednoho odličovacího tamponu se použily dva položené na sebe, čímž se výše popsanému negativnímu jevu snadno předešlo.

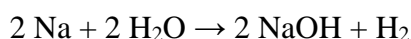
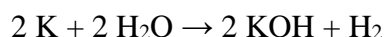
5.1.2. Pokus o elektrolytickou izolaci draslíku a sodíku modifikovaným postupem Humphry Davyho

Po sestavení kompletní aparatury a zapojení k laboratornímu zdroji, kde byla nastavena hodnota napětí 10,0 V (viz obr. 5.24.), se začaly, jak na kapce galinstanu vytvářet drobné bublinky plynu, tak i na stěnách železného kelímku. Zpočátku elektrolyzy jsme evidovali, že systémem prochází pouze velmi nízké hodnoty proudu (10 mA – 20 mA). Pokud neprocházel žádný, bylo nutné ještě za pomoci kapátka vpravit několik menších kapek destilované vody do

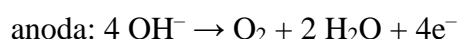
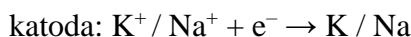
systému, a tím použitý hydroxid lépe navlhčit, aby mohl procházet elektrický proud. Musí se však dbát na to, aby vody nebylo zbytečně moc, neboť reakcí s vodou by došlo k eliminaci vzniklého draslíku či sodíku (viz rovnice).



Obrázek 5.24. – sestavená a zapojená aparatura pro pokus o izolaci draslíku / sodíku dle Humphry Davyho



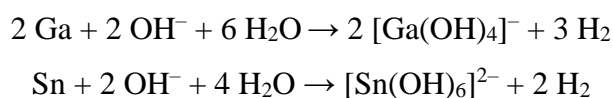
Postupem času se začala směs hydroxidu měnit (konzistencí připomínala hustější kaši / vosk) a začala i narůstat její teplota ($t = 65 \text{ }^\circ\text{C}$). Po přibližně třech až čtyřech minutách se hodnota proudu na nastaveném zdroji ustálila na mezních 850 mA. Nutno podotknout, že jsme experimentovaly i s daleko vyššími hodnotami proudů (až do 3,2 A), ale při těchto hodnotách už docházelo k nekontrolovatelnému ohřevu směsi, jejímu vzkypění, deformaci plastové podložky na dně kelímku a uvolňování dráždivých výparů. Jelikož nám šlo o možnou bezpečnou reprodukovatelnost tohoto experimentu na školách, neměly proto takovéto hodnoty pro další práci smysl. Během elektrolýzy se okolí a povrch kuličky galinstanu postupně začali pokrývat našedlou až místy černou vrstvou.



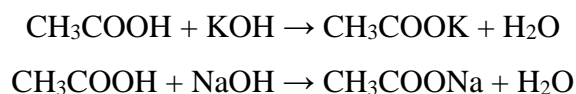
Po cca 10 minutách došlo odpojením od zdroje k ukončení procesu elektrolýzy a po vyjmutí železného kelímku se pak špachtlí odstranila obezřetně našedlá krusta z části tvořená nezreagovaným hydroxidem. Na dně plastového víčka od vialky se nacházely kromě centrální kapky galinstanu i jeho drobné tužší oddělené segmenty (rovněž pokryté šedočernou vrstvou).

Jejím opatrným nabráním na ocelovou laboratorní lžičku a následným vhozením do kádinky s již připravenou okyselenou destilovanou vodou (slabý roztok kyseliny octové – CH₃COOH), se dal po krátké době pozorovat zvláštní úkaz v podobě koncentrovaného proudu bublinek z jednotlivých kapiček galinstanu.

Při reakci galinstanu po elektrolýze s vodou je zásadní problém v tom, zdali unikající vodík pochází opravdu z reakce vyredukovaného draslíku či sodíku s vodou nebo je produktem při rozpouštění galinstanu (případně některé jeho složky) se zbytky hydroxidu z elektrolytické směsi (viz rovnice).



Přídavek kyseliny octové do destilované vody měl své opodstatnění v tom, že měl neutralizovat přebytečný hydroxid. Proto bylo velmi nutné kontrolovat stále pH lakmusovým papírkem, a zajistit tak, že se pořád pohybujeme v kyselé oblasti (viz rovnice).

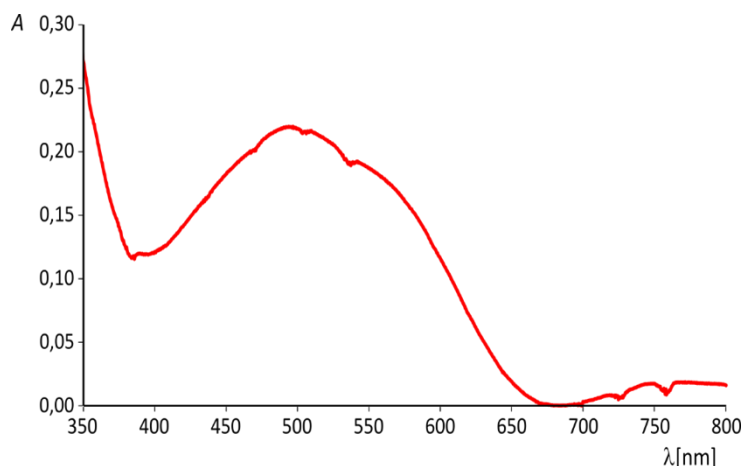


Průkaznost možného vyredukování alkalického kovu v našem uspořádání na rozdíl od Davyho metody, který použil původně toxickou rtuť a prokazatelně se tak tvořil amalgám, je poměrně sporná. K podrobnější analýze produktu elektrolýzy s použitím galinstanu by bylo za potřebí dalšího podrobného zkoumání. My však s ohledem na didaktické hledisko nemůžeme konstatovat, že se jedná o experiment s prokazatelnými výsledky. Avšak i zde jsme narazili na zajímavý fenomén, kdy se během elektrolýzy začala v těsné blízkosti anody vytvářet souvislá fialová až vínově červená vrstva (viz obr. 5.25.). Porovnáním UV/VIS spektra (viz. obr. 5.26.) s údaji v literatuře byla tato látka identifikována jako železan (draselný případně sodný).^{[50][51]} Železanový anion má v UV-VIS spektru charakteristický absorpční pás kolem 500 nm. Zajímavostí je, že jsme nenalezli v dochovaných dokumentech, ze kterých jsme čerpali, o experimentální práci Humphry Davyho na toto téma žádné konkrétní zmínky, ačkoliv byl velmi pozorným experimentátorem, který si mimo jiné při svých experimentech všimnul modrého zbarvení na povrchu alkalických kovů při kontaktu se suchým plynným amoniakem. Toto pozorování učinil roku 1808 a byl tedy prvním, kdo zanechal záznamy o pozorování solvatovaného elektronu. V roce 1908, několik let po objevení elektronu, byla publikována

práce předpokládající existenci solvatovaného elektronu. Ale až v roce 1962, tedy o sto padesát let později, se podařilo potvrdit existenci solvatovaného elektronu a vysvětlit tak podstatu zbarvení, které Davy pozoroval. [56] [57] [58] [59]



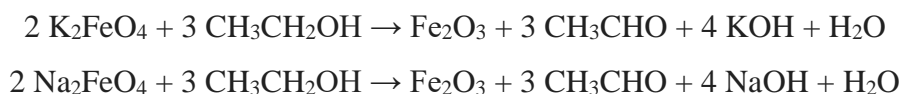
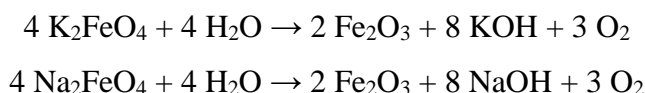
Obrázek 5.25. – čerstvý roztok elektrolyticky připraveného železnanu draselného (K_2FeO_4) (vlevo) a stejný roztok po samovolném rozkladu (vpravo)



Obrázek 5.26. – UV-VIS spektrum získaného železnanu draselného (K_2FeO_4).

Jedná se o v současnosti velmi zkoumané a zejména v průmyslu alternativně využitelné extrémně silné oxidační činidlo. Jeho oxidační účinky jsou násobně vyšší než třeba u typického zástupce oxidačních činidel manganistanu draselného – ($KMnO_4$). Dříve našel například uplatnění v čistíčkách odpadních vod, kde se využíval jako odstraňovač organických polutantů. Výhodou je, že výsledné produkty v podobě oxidu železitého nebo železa jsou netoxické a snadno odfiltrovatelné látky. Laboratorně se dá připravit nejčastěji syntézou přes oxidaci alkalické hydratované železité soli s koncentrovanými roztoky bělidel (obvykle na bázi chloru), což je však velmi náročný a nebezpečný proces. V současnosti probíhají další studie jeho využitelnosti zejména v oblasti environmentálních technologií a odvětví průmyslové výroby

organických látek. ^{[52] [53] [62]} Toto však troskotá na případném uchovávání a transportu tohoto prekursoru, neboť obecně železan je v silně alkalickém prostředí stabilní, ale při snížení pH, přítomnosti redukčních činidel či případně vhodného substrátu (např. ethanol) dochází k jeho rozkladu na hydratovaný oxid železitý. Samovolný rozklad železanu draselného ve vodném roztoku demonstruje obr. 5.25.

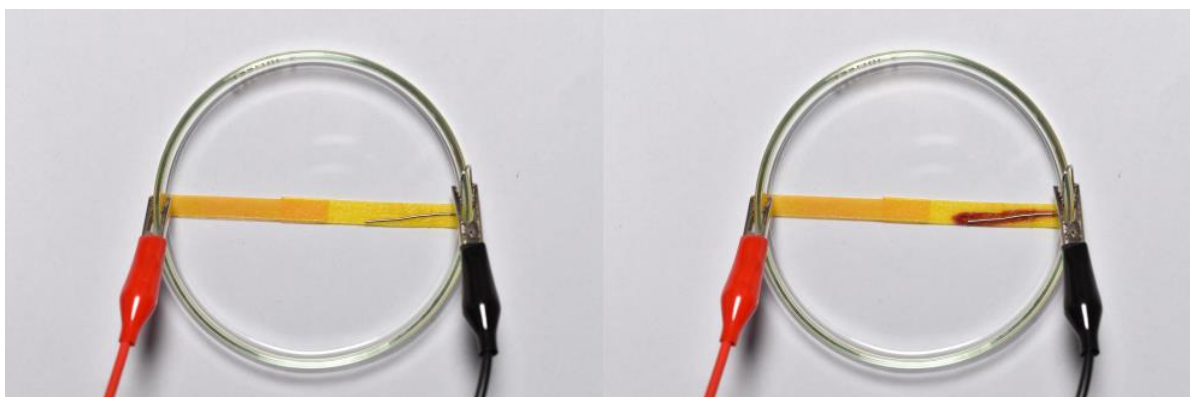


Nutno podotknout, že během pokusů o replikaci Davyho pokusu přípravy alkalických kovů byly zkoumány různé varianty tohoto experimentu. Vedle galinstanu byla také použita elektroda z čistého gallia ($t_f = 29,8 \text{ }^\circ\text{C}$), Fieldova kovu (Bi – 32,5 %, In – 51%, Sn – 16,5 %) ($t_f = 62,0 \text{ }^\circ\text{C}$) anebo také samotná wolframová elektroda pro srovnání. Výsledky ve všech případech byly negativní. Zároveň byly elektrolýzou ve stejném uspořádání prozkoušeny i jiné hydroxidy (monohydrát hydroxidu lithného – $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$, oktahydrát hydroxidu barnatého – $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$ a hydroxid cesný – CsOH). Opět však bez prokazatelných výsledků. Dá se tedy konstatovat, že ačkoliv úloha nedává průkazné výsledky k původnímu záměru izolovat draslík či sodík v surově podobě jako Humphry Davy modifikovanou bezpečnější formou, je zde alespoň hledisko možného demonstračního potenciálu zejména pro pedagogy ve výuce chemie. Ti mohou provedením experimentu poukázat na princip jakým pokus realizoval Davy sám před staletími. Dále je blíže seznámí v této době zejména při výuce na SŠ z mého pohledu se stále nedoceneným galliem v podobě jeho slitiny galinstanu a může rovněž demonstrovat oxidační účinky čerstvě připraveného železanu.

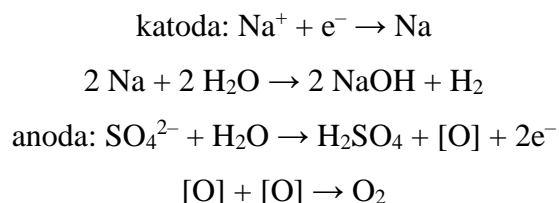
5.1.3. Replikace Faradayova pokusu zaměřeného na vodivost prostředí

Při provádění úlohy byl z praktického hlediska použit zdroj ve formě běžně dostupné ploché 4,5 V baterie, která svou velikostí, stabilitou a možným elegantním propojením s vodiči představovala z pohledu didaktiky nejideálnější variantu. Pokus byl proveden v několika verzích s použitím různých elektrolytů (síranem sodným – Na_2SO_4 a jodidem draselným – KI). Během experimentu v důsledku elektrolýzy na katodě vznikají obecně hydroxidy, které

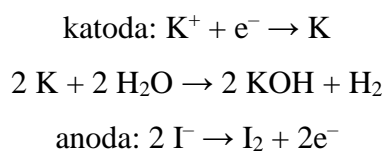
způsobují intenzivní zbarvení kurkumového papírku. K této barevné změně dochází okamžitě po zapojení obvodu zejména v oblasti spoje vodič – kurkumový papírek (intenzivní vínově červené zbarvení). Lakmusový papírek oproti tomu nevykazoval natolik průkaznou viditelnou změnu, neboť v oblasti kyselého pH = 3 má stejnou barvu jako po navlhčení (obr. 5.27., 5.28. a 5.29.).

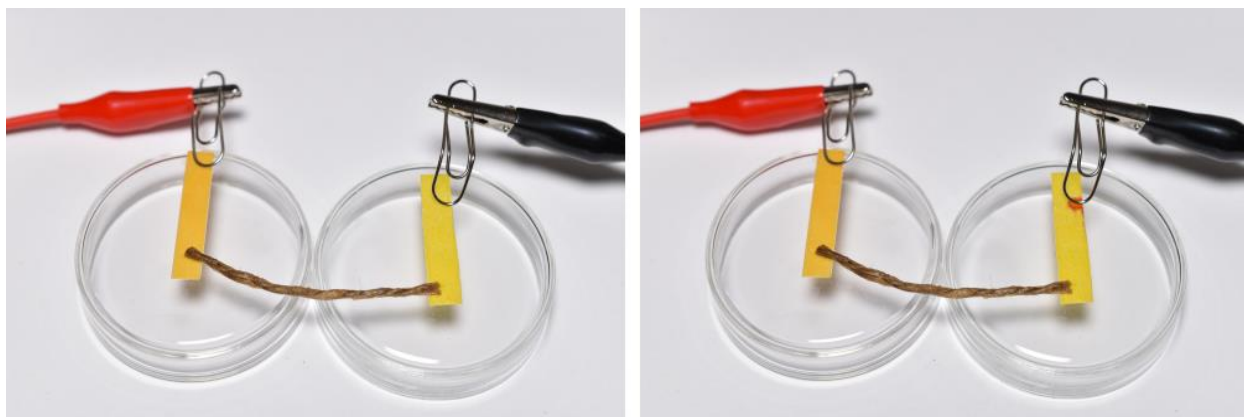


Obrázek 5.27. – Faradayův pokus zaměřený na vodivost prostředí (verze 1.) s použitím roztoku jodidu draselného (KI) (vlevo před zapojením a vpravo po zapojení ke zdroji)

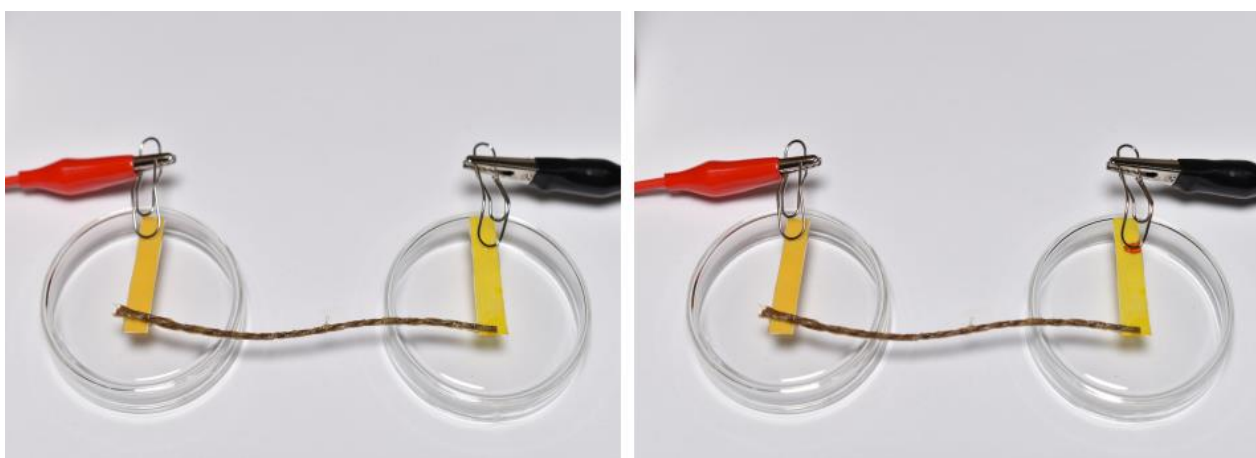


V případě použití jodidu draselného se může po delším průběhu objevit na lakmusovém papírku (anoda) po odstranění vodiče viditelná lehce nafialovělá stopa způsobená vzniklým jodem.





Obrázek 5.28. – Faradayův pokus zaměřený na vodivost prostředí (verze 2.) s použitím roztoku jodidu draselného (KI) (vlevo před zapojením a vpravo po zapojení ke zdroji)



Obrázek 5.29. – Faradayův pokus zaměřený na vodivost prostředí (verze 3.) s použitím roztoku jodidu draselného (KI) (vlevo před zapojením a vpravo po zapojení ke zdroji)

Obecně je důležité při tomto experimentu dbát na dostatečné provlhčení elektrolytem všech komponentů (tzv. jak papírku s indikátorem, tak jutového / bavlněného provázku). Nutné je také dávat pozor na to, aby provázek se nijak vodivě nespojoval se zemí. Pokus je velmi jednoduchý na přípravu a také efektní. Žáci zároveň mohou otestovat i daleko delší libovolně zvolené míry provázků.

Samostatnou kapitolu tvoří Faradayem v té době zvolený kurkumový papírek obsahující přírodní indikátor curcumin (též známý jako kurkumová žluť). Ten má z didaktického hlediska dvě hlavní přednosti. Při vystavení UV záření jeho roztok vykazuje překrásnou žlutozelenou fluorescenci a také vlivem zvýšeného pH vykazuje výrazný barevný přechod (v kyselé oblasti typicky sytě žlutý a od pH v rozmezí 7,8 – 9,2 je vínově červený). Učitel se tak může díky tomuto pokusu ověřující vodivost prostředí při elektrolýze určitou provázaností dostat i

k přírodním indikátorům či určování pH a tematické celky tak propojit, aby si žáci všímali souvislostí, které jim chemie nabízí. [60]

5.1.4. Vytvoření učebních materiálů v rámci popularizace vědy pro žáky SŠ

Na základě průřezových témat zahrnutých v teoretické části diplomové práce byla vytvořena přehledná prezentace (s použitím programu PowerPoint) shrnující významné objevy a vynálezy v oblasti elektrického proudu v chemii předních vědců a myslitelů. Navíc je doplněna o zajímavosti a obrázky, které žákům mohou usnadnit a dokreslit ucelenější představu o tom, jaká byla historie objevování a pochopení elektrické energie od svého zrodu do první poloviny 20. století a jakým způsobem ovlivnila chemii. Dále je na konci obohacena o krátký kvíz čítající celkem 8 otázek s volbou vždy jedné správné odpovědi, tak aby si pedagog mohl zábavnou formou ověřit, do jaké míry studenti věnovali tématu pozornost. Mimo to byl při tvorbě kladen důraz na to, aby přednáška byla realizovatelná v jedné vyučovací hodině chemie (tedy maximální délka na 45 minut).

V druhé části byl sestaven velmi detailní pracovní list s názvem „*Elektrochemie napříč staletími*“ s prvky badatelsky orientované výuky především v praktických úlohách věnovaných velmi zjednodušené miniaturní verzi Voltova sloupu a také elektrochemické redukci kovů z roztoků jejich solí (pro dusičnan stříbrný – AgNO_3 a dihydrát chloridu cínatého – $\text{SnCl}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) odkazující na Faradayovy zákony elektrolýzy a schopnost kovů vytvářet vizuálně jedinečné krystalické struktury. Zároveň svým obsahem plynně navazuje na prezentaci a formou zábavně koncipovaných úkolů dané téma elektrického proudu v chemii rozvádí do ještě větší hloubky. Teoretická část byla sestavena s použitím základních ale i atypických typů úloh jako jsou:

- s volbou 1 správné odpovědi
- dichotomické (ANO / NE)
- doplňovací (např. v křížovce)
- přiřazovací
- chemické výpočty
- s širokou možností odpovědi
- jiné (např. ve formě šifry)

K pracovnímu listu byl rovněž zpracován metodický list pro zadavatele s podrobným řešením a bodovací škálou k jednotlivým úkolům. Navíc zahrnuje i fotodokumentaci praktických úloh včetně poznámek, seznamu pomůcek a rad, kterými mohou pedagogové zamezit případným problémům při provádění daných úkonů žáky. Vše je sestaveno tak, aby práce byla realizovatelná předně skupinovou formou například v rámci laboratoří na středních školách, kde je časová dotace většinou na to vyhraněná (cca 90 minut).

Dodatkový úkol k úkolu číslo 4: Elektrolytické redukce kovů z roztoků jejich solí na katodě a možný simultánní vznik nových sloučenin vlivem anodické oxidace

Po nalití předpřipraveného elektrolytu (roztok dusičnanu stříbrného o molární koncentraci 1,00 mol/l) do Petriho misky a propojení obvodu se ihned začaly na katodě vylučovat stříbrné krystalky kovu (konkrétně stříbra), které s postupem času rostly a větvyly se. Zároveň však po cca 1 minutě probíhající elektrolýzy se nečekaně na anodě začaly tvořit lesklé černé krystalky neznámé látky, které rovněž s ubíhajícím časem rostly a všemožně se v Petriho misce větvyly (viz obr. 5.30.). Během průběhu elektrolýzy byl pomocí digitálního multimetru proměřen elektrický proud, který systémem procházel ($I = 1,35 \text{ A}$). Po přibližně 10 minutách byla elektrolýza ukončena a vzorek neznámé látky vyloučené na anodě byl odebrán pro další analýzu.

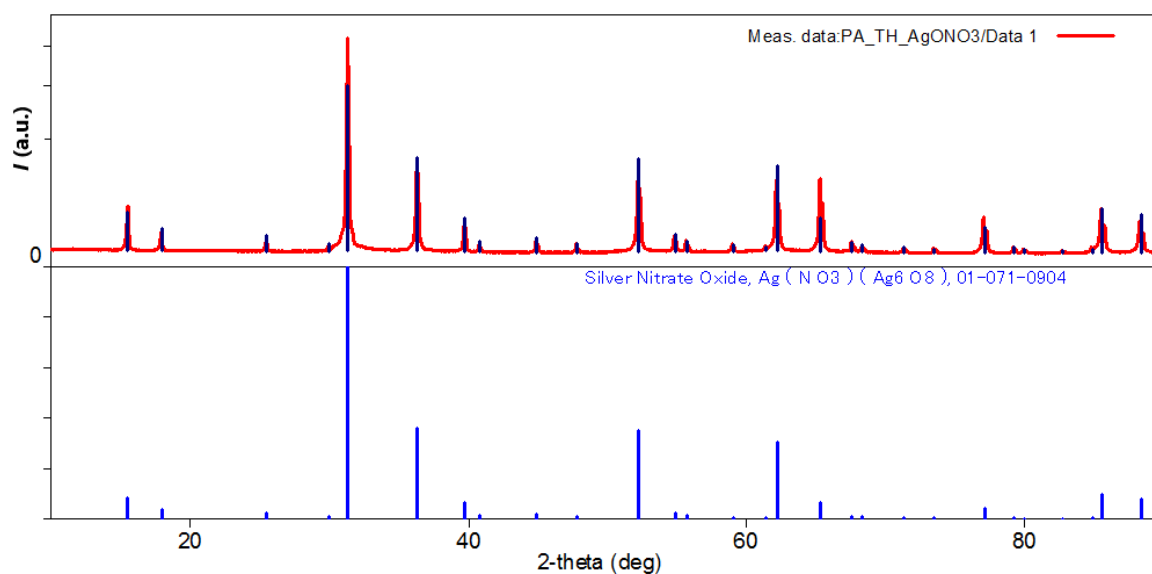
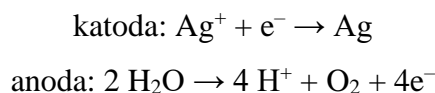
Obdobnou verzi pokusu lze provést i například pro roztok ($c = 1,00 \text{ mol/l}$) dihydrátu chloridu cínatého – ($\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Ten však velmi snadno podléhá hydrolyze, což se projevuje mléčně bílým zákalem v roztoku (po přidání několika kapek koncentrované kyseliny chlorovodíkové se roztok vyčeří).



Obrázek 5.30. – finální výsledek pokusu po ukončení elektrolýzy dusičnanu stříbrného (AgNO_3) (vpravo katoda s vyredukovaným stříbrem a vlevo anoda s vyloučenou neznámou látkou)

Následně byla neznámá krystalická látka vzniklá na anodě podrobena měření pomocí práškového RTG analýzy. Porovnáním získaného difrakčního záznamu (obr. 5.31.) s údaji z literatury byl produkt identifikován jako dusičnan-oxid stříbrnato-stříbřitý – ($\text{Ag}_7\text{O}_8(\text{NO}_3)$).

Z didaktického hlediska můžeme konstatovat, že zejména pro zvědavější žáky je takovéto provedení pokusu velmi přínosné, neboť poukazuje na možnost využití anodické oxidace pro přípravu sloučenin obsahující prvky ve vyšších nebo i neobvykle vysokých oxidačních stavech. Navíc právě elektrochemickou přípravu stříbra někteří pedagogové ukazují jako klasický příklad redukce kovů na katodě. Obecně bychom totiž při elektrolýze dusičnanu stříbrného čekali klasický průběh, kdy se na katodě vylučuje stříbro a na anodě plynný kyslík.



Obrázek 5.31. – porovnání práškových difrakčních záznamů produktu anodické oxidace a $\text{Ag}_7\text{O}_8(\text{NO}_3)$ z databáze

Uvedený pokus byl realizován i s roztokem chloridu cínatého resp. chloridu měďnatého. V případě použití chloridu cínatého byly získány rozvětvené jehlicovité krystaly (obr. 5.32.). Elektrolýza vodného roztoku chloridu měďnatého při použití stejného zdroje (4,5 V plochá baterie) vedla k vyloučení houbovitě mědi.



Obrázek 5.32 – finální výsledek pokusu po ukončení elektrolyzy dihydrátu chloridu cínatého ($\text{SnCl}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$), kde černý vodič (vpravo) představuje katodu s vyloučeným cínem v podobě stříbrných jehlicovitých krystalů

6. ZÁVĚR

Předložená diplomová práce se věnuje tématu elektřiny v chemii. Jedná se o multidisciplinární téma, které svým obsahem zasahuje nejen do chemie, ale také do fyziky. Přesto, že se jedná o velmi obsáhlý tematický blok, tak v rámci výuky chemie na základních a středních školách je mu věnováno kvůli nízké hodinové dotaci oproti jiným předmětům jen velmi málo prostoru, a tudíž je zmíněn spíše jenom okrajově. Studenti si v rámci probraného učiva osvojují především základní pojmy (např. iont, kation, anion, elektrolyt, elektrolýza, galvanické články aj.) a Faradayovy zákony elektrolýzy. Motivací pro vypracování diplomové práce na toto téma byla právě snaha přiblížit historii objevování elektřiny, jevů s ní souvisejících a její využití v chemii a to nejen studentům, ale také všem zájemcům o tuto problematiku.

Teoretická část předložené diplomové práce obsahuje detailnější literární rešerši poskytující všeobecný přehled těch nejdůležitějších objevů a vynálezů od počátků lidské civilizace až do první poloviny 20. století z kapitoly zabývající se elektrickým proudem a také jeho využitelností a provázaností s chemií. Kromě detailního pohledu na badatelskou činnost světoznámých vědců (jako jsou například Luigi Galvani, Alessandro Volta, Humphry Davy, Michael Faraday aj.) zahrnuje také do jisté míry vnímání elektřiny společností napříč jednotlivými staletími. S ohledem na to, že se jedná o velmi obsáhlou tematiku, byly zde zmíněny pouze ty nejvýznamnější milníky z historie chemie, které se danou problematikou zabývají.

V praktické části je věnován značný prostor pokusům o reprodukci některých historických experimentů spojených s elektrickým proudem v oblasti chemie. S ohledem na dnešní snadnou dostupnost moderních technologií a různých materiálů byl primárně kladen důraz na co největší autentičnost, aby získaná data měla relevantní vypovídací hodnotu. Zároveň však bylo dbáno také na bezpečnost, tudíž jsme se nevyhnuli případným modifikacím jednotlivých postupů, aby mohly být použitelné při výuce na základních či středních školách. V praktické části je popis zhotovení funkční repliky Voltova sloupu, reprodukce Faradayových pokusů ověřujících vodivost různých prostředí a modifikovaný Davyho pokus o přípravu alkalických kovů. Z hlediska realizace s ohledem na zachování co nejvyšší míry autentičnosti a zároveň s dbáním na aspekt bezpečnosti byl nejnáročnější právě Davyho pokus o přípravu alkalických kovů. Oproti původnímu postupu byla rtuťová katoda nahrazena katodou tvořenou galliem nebo slitinou s nízkým bodem tání (galinstan, Fieldův kov) a bylo použito výrazně nižší elektrické napětí. Ačkoliv u tohoto experimentu byly získané výsledky nedostačující

z hlediska cílů, tedy bezpečně připravit alkalické kovy a názorně jejich přítomnost demonstrovat, je použitá sestava vhodná pro demonstraci elektrochemické přípravy železanů. Navíc byly sestaveny výukové materiály (přednáška ve formě prezentace, pracovní list), sloužící zejména studentům středních škol (případně i základních) k bližšímu seznámení s tímto informačně pestrým tematickým celkem. Pracovní list pro studenty obsahuje kromě teoreticky zaměřených úkolů (šifra, křížovka, tajenka aj.) i prakticky orientované úlohy, v rámci kterých si studenti sestaví zjednodušenou repliku Voltova sloupu nebo názorně demonstují potenciál elektrolyzy z hlediska přípravy látek. Všechny experimenty jsou nenáročné na samotné provedení, ale z didaktického hlediska názornosti je jejich přínos značný.

Na závěr je nutné podotknout, že se jedná vzhledem k omezenému rozsahu tohoto typu práce a s ohledem na obsáhlost tematiky o stručnou rešerši. Tím pádem poskytuje čtenáři pouze obecnější přehled a v případě vyššího zájmu z jeho strany se může inspirovat například přiloženým seznamem použité literatury. Mimo to diplomová práce nabízí do budoucna možnost navázání na další objevy v oblasti elektrického proudu v chemii zasahujících až do současnosti.

7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] Kellaway P., THE PART PLAYED BY ELECTRIC FISH IN THE EARLY HISTORY OF BIOELECTRICITY AND ELECTROTHERAPY [online]. *Bulletin of the History of Medicine*, **1946**, *20*, 112

[2] cathfish.com, Pasumcovití (električtí sumci) – MALAPTERURIDAE (Electric catfishes) [online]. **2000-2006**, [cit. 2022-07-18], Dostupné na: <<http://www.catfish.cz/popisy/malap/malap.htm>>

[3] nationalgeographic.co.uk [online]. [cit. 2022-07-18], Dostupné na: <<https://www.nationalgeographic.co.uk/history-and-civilisation/2022/02/egypts-first-pharaohs-loved-catfish-and-worshipped-them>>

[4] philosophybasics.com, THE BASICS OF PHILOSOPHY (Thales of Miletus) [online]. **2008**, [cit. 2022-07-22], Dostupné na: <https://www.philosophybasics.com/philosophers_thales.html>

[5] peace.saumag.edu, Thales (624-546 BCE) [online]. **2010**, [cit. 2022-07-22], Dostupné na: <<http://peace.saumag.edu/faculty/kardas/courses/HP/Lectures/Thales.html>>

[6] hp-gramatke.net, History of Electrostatic Generators [online]. **2003**, [cit. 2022-07-23], Dostupné na: <<http://www.hp-gramatke.net/history/english/page4000.htm>>

[7] Bertucci P., Sparks in the dark: the attraction of electricity in the eighteenth century [online]. **2007**, [cit. 2022-07-25], Dostupné na: <<https://hshm.yale.edu/sites/default/files/files/Bertucci%20Endeavour.pdf>>

[8] Ashworth W. B. Jr., SCIENTIST OF THE DAY – FRANCIS HAUKS BEE [online]. **2021**, [cit. 2022-07-28], Dostupné na: <<https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/francis-hauksbee>>

[9] sciencephotogallery.com [online]. [cit. 2023-04-08], Dostupné na: <<https://sciencephotogallery.com/featured/hauksbee-electrostatic-generator-science-photo-library.html>>

[10] limex-technik.cz, Triboelektrická řada a příčiny vzniku statického náboje [online]. **2018**, [cit. 2022-07-30], Dostupné na: <<http://www.limex-technik.cz/blog/154-triboelektricka-rada-a-priciny-vzniku-statickeho-naboje>>

[11] Robinson F. N. H., Kashy E., electromagnetism (physics) [online]. *Encyclopedia Britannica*, **2022**, [cit. 2022-08-04], Dostupné na: <<https://www.britannica.com/science/electromagnetism>>

[12] Ashworth W. B. Jr., SCIENTIST OF THE DAY – PIETER VAN MUSSCHENBROEK [online]. **2022**, [cit. 2023-03-29], Dostupné na: <<https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/pieter-van-musschenbroek>>

- [13] etc.usf.edu [online]. [cit. 2023-04-08], Dostupné na: <https://etc.usf.edu/clipart/35600/35643/leyden_35643.htm>
- [14] Dibner B., Luigi Galvani (Italian physician and physicist) [online]. Encyclopedia Britannica, 2022, [cit. 2023-01-11], Dostupné na: <<https://www.britannica.com/biography/Luigi-Galvani>>
- [15] Piccolino M., Bresadola M., *Shocking Frogs (Galvani, Volta, and the electric origins of neuroscience)*, 2013, Oxford University Press, 1 – 291
- [16] museumzeitraum.blogspot.com [online]. [cit. 2023-01-13], Dostupné na: <<http://museumzeitraum.blogspot.com/2006/09/wednesday-archive-03-galvanis.html>>
- [17] Kuiper K., Mary Wollstonecraft Shelley (British author) [online]. Encyclopedia Britannica, 2022, [cit. 2023-01-13], Dostupné na: <<https://www.britannica.com/biography/Mary-Wollstonecraft-Shelley>>
- [18] The Editors of Encyclopaedia Britannica, Alessandro Volta (Italian scientist) [online]. Encyclopedia Britannica, 2023, [cit. 2023-01-15], Dostupné na: <<https://www.britannica.com/biography/Alessandro-Volta>>
- [19] catalogue.museogalileo.it, In-depth Methane [online]. 2010-2015, [cit. 2023-01-15], Dostupné na: <<https://catalogue.museogalileo.it/indepth/Methane.html>>
- [20] Devons S., VOLTA AND GALVANI: NEW ELECTRICITY FROM OLD (Experiment No. 22) [online]. 1976, [cit. 2023-01-20], Dostupné na: <<https://stwww1.weizmann.ac.il/wp-content/uploads/2016/08/Volta-and-Galvani-%E2%80%93-New-Electricity-from-Old.pdf>>
- [21] carnotcycle.wordpress.com, Carlisle, Nicholson and the discovery of electrolysis [online]. 2017, [cit. 2023-01-28], Dostupné na: <<https://carnotcycle.wordpress.com/2017/02/01/carlisle-nicholson-and-the-discovery-of-electrolysis/>>
- [22] Katz E., Electrochemical contributions: William Nicholson (1753-1815) [online]. 2021, [cit. 2023-01-29], Dostupné na: <https://www.researchgate.net/publication/349647419_Electrochemical_contributions_William_Nicholson_1753-1815>
- [23] Gibbs F. W., Sir Humphry Davy (British chemist) [online]. Encyclopedia Britannica, 2022, [cit. 2023-02-06], Dostupné na: <<https://www.britannica.com/biography/Sir-Humphry-Davy-Baronet>>
- [24] Morris J., Morris R., "Here Here Sir Humphry E. Davy playing with your chemistry set again? Boom de Boom!", Potassium? Sodium? [online]. 2013, [cit. 2023-02-10], Dostupné na: <<http://www.scitechantiques.com/Davy-potassium/>>
- [25] Tietz T., Humphry Davy and the Wonders of Electrolysis [online]. 2019, [cit. 2023-02-12], Dostupné na: <<https://scihi.org/humphry-davy-electrolysis/>>
- [26] Stewart D., Discovery of Potassium [online]. 2023, [cit. 2023-02-14], Dostupné na: <<https://www.chemicool.com/elements/potassium.html>>

- [27] scihi.org [online]. [cit. 2023-04-17], Dostupné na: <<http://scihi.org/humphry-davy-electrolysis/>>
- [28] Williams L. P., Michael Faraday (British physicist and chemist) [online]. Encyclopedia Britannica, **2023**, [cit. 2023-02-20], Dostupné na: <<https://www.britannica.com/biography/Michael-Faraday>>
- [29] Faraday M., Experimental Researches in Electricity, Volume 1 [online]. The Project Gutenberg eBook, **2005**, [cit. 2023-02-22], Dostupné na: <<https://www.gutenberg.org/files/14986/14986-h/14986-h.htm>>
- [30] Oesper R. E., Speter M., The Faraday-Whewell Correspondence Concerning Electro-Chemical Terms [online]. *The Scientific Monthly*, **1937**, [cit. 2023-02-18], Dostupné na: <<https://www.jstor.org/stable/16304?seq=11>>
- [31] fyzika007.cz, ELEKTRICKÝ PROUD V KAPALINÁCH (Faradayovy zákony elektrolýzy) [online]. **2013-2023**, [cit. 2023-02-23], Dostupné na: <<https://www.fyzika007.cz/elekt%C5%99ina-amagnetismus/el-proud-v-kapalin%C3%A1ch-plynech-a-ve-vakuu/faradayovy-z%C3%A1kony-elektrol%C3%BDzy>>
- [32] Von Handorf D. E., The Baghdad Battery – Myth or Reality ? [online]. **2002**, [cit. 2023-03-29], Dostupné na: <<https://www.nmfr.org/pdf/psf2002/050284.pdf>>
- [33] elektrikport.com [online]. [cit. 2023-04-17], Dostupné na: <<https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/bagdat-pili-pillerin-tarihsel-gelisimi-1-bolum/23131#ad-image-0>>
- [34] The Editors of Encyclopaedia Britannica, John Frederic Daniell (British chemist) [online]. Encyclopedia Britannica, **2023**, [cit. 2023-04-03], Dostupné na: <<https://www.britannica.com/biography/John-Frederic-Daniell>>
- [35] Ashworth W. B. Jr., SCIENTIST OF THE DAY – JOHN FREDERIC DANIELL [online]. **2019**, [cit. 2023-04-04], Dostupné na: <<https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/john-frederic-daniell>>
- [36] corrosion-doctors.org, John Frederic Daniel (1790-1845) [online]. **2023**, [cit. 2023-04-04], Dostupné na: <<https://corrosion-doctors.org/Biographies/DaniellBio.htm>>
- [37] The Editors of Encyclopaedia Britannica, Sir William Robert Grove (British physicist) [online]. Encyclopedia Britannica, **2022**, [cit. 2023-04-05], Dostupné na: <<https://www.britannica.com/biography/William-Robert-Grove>>
- [38] Jensen W. B., The Grove and Bunsen Cells [online]. **2013**, [cit. 2023-04-05], Dostupné na: <<https://drc.libraries.uc.edu/server/api/core/bitstreams/fd6d0d8f-9283-4dc7-9f92-12f4265ab6fe/content>>
- [39] Poffenberger L., October 1842: William Grove's letter to Faraday Describing a Fuel Cell [online]. **2019**, [cit. 2023-04-06], Dostupné na: <<https://www.aps.org/publications/apsnews/201909/history.cfm>>

- [40] canov.jergym.cz, Georges Leclanché [online]. **2022**, [cit. 2023-04-07], Dostupné na: <<https://canov.jergym.cz/objevite/objev4/leca.htm>>
- [41] Zehra H. A., ZINC-CARBON BATTERIES (Leclanché and Zinc Chloride Cell Systems) [online]. **2013**, [cit. 2023-04-07], Dostupné na: <https://www.uobabylon.edu.iq/eprints/paper_4_22488_736.pdf>
- [42] worldofchemicals.com, Carl Gassner – inventor of dry cell battery [online]. **2023**, [cit. 2023-04-07], Dostupné na: <<https://www.worldofchemicals.com/32/chemistry-articles/carl-gassner-inventor-of-dry-cell-battery.html>>
- [43] Habashi F., 2002 History of Aluminium Alloys [online]. **2002**, [cit. 2023-03-17], Dostupné na: <https://www.academia.edu/33343116/2002_History_of_Aluminum_Alloys_pdf>
- [44] Binczewski G. J., The Point of a Monument: A History of the Aluminium Cap of the Washington Monument [online]. **1995**, [cit. 2023-03-17], Dostupné na: <<https://www.tms.org/pubs/journals/jom/9511/binczewski-9511.html>>
- [45] canov.jergym.cz, Paul-Louis-Toussaint Hérault [online]. **2005**, [cit. 2023-03-18], Dostupné na: <<https://canov.jergym.cz/objevite/objev4/hero.htm>>
- [46] Toon R., The discovery of fluorine [online]. **2011**, [cit. 2023-04-10], Dostupné na: <<https://edu.rsc.org/feature/the-discovery-of-fluorine/2020249.article>>
- [47] Wisniak J., Henri Moissan – The Discoverer of Fluorine [online]. **2002**, [cit. 2023-04-11], Dostupné na: <https://www.researchgate.net/publication/236235468_Henri_Moissan_-_The_Discoverer_of_Fluorine>
- [48] Agray S., VAN ARKEL Method [online]. **2012**, [cit. 2023-04-12], Dostupné na: <<https://chemistry-desk.blogspot.com/2012/08/van-arkel-method.html>>
- [49] interestinzfacts.com, VAN – ARKEL – DE BOER PROCESS OR CRYSTAL BAR PROCESS [online]. **2021**, [cit. 2023-04-12], Dostupné na: <<https://www.interestinzfacts.com/2021/09/van-arkel-de-boer-process-or-crystal.html>>
- [50] S. Barişçi, F. Ulu, H. Särkkä, A. Dimoglo, M. Sillanpää, Electrosynthesis of Ferrate(VI) ion Using High Purity Iron Electrodes: Optimization of Influencing Parameters on the Process and Investigating Its Stability, *Int. J. Electrochem. Sci.* **2014**, 9, 3099_3117
- [51] Y.-L. Wei, Y.-S. Wang, C.-H. Liu, Preparation of Potassium Ferrate from Spent Steel Pickling Liquid, *Metals* **2015**, 5, 1770-1787
- [52] D. Majid, I.-K. Kim, F. B. Laksono, A. R. Prabowo, Oxidative Degradation of Hazardous Benzene Derivatives by Ferrate(VI): Effect of Initial pH, Molar Ratio and Temperature, *Toxics* **2021**, 9, 327.
- [53] W. Zhaohui, F. Wu, W. Lingli, Abiotic oxidation of arsenite in natural and engineering systems: Mechanisms and related controversies over the last two decades (1990-2020), *J. Hazard. Mat.* **2021**, 414, 125488.

- [54] patentplaques-blog.com [online]. [cit. 2023-04-15], Dostupné na: <<http://patentplaques-blog.com/hall-heroult-aluminum-process/>>
- [55] Koryta J., Michael Faraday, ORBIS, Praha, **1972**.
- [56] W. Weyl, Ann. Phys. Leipzig, **1864**, 197, 601.
- [57] J.J.Thompson, Phiulos. Mag. **1897**, 44, 293.
- [58] C.A: Kraus, J. Am. Chem. **1908**, 30, 1323
- [59] E.J. Hert, J.W: Boag, J. Am. Chem. **1962**, 84, 4090
- [60] p-lab.cz, KURKUMIN [online]. **2023**, [cit. 2023-04-17], Dostupné na: <<https://www.p-lab.cz/kurkumin>>
- [61] Kvande H., Two hundred years of aluminum ... or is it aluminium ? [online]. **2008**, [cit. 2023-03-18], Dostupné na: <https://www.researchgate.net/publication/240357067_Two_hundred_years_of_aluminum_or_is_it_aluminium>
- [62] nanoiron.cz, ENVIFER: práškové železo ve vysokých oxidačních stavech [online]. **2008 – 2010**, [cit. 2023-04-15], Dostupné na: <<https://nanoiron.cz/cz/produkty/zelezany>>
- [63] Vaughan K., History of Electricity: Volta's Electrophorus [online]. **2021**, [cit. 2023-01-18], Dostupné na: <<https://www.leverageresearch.org/research-voltas-electrophorus>>
- [64] uni-flensburg.de, Condensator Straw Electroscope [online]. **2023**, [cit. 2023-03-22], Dostupné na: <<https://www.uni-flensburg.de/en/working-group-physics/histolab/thematical-subsections/electricity/condensator-straw-electroscope>>

8. PŘÍLOHY

- Příloha č. 1 – Prezentace (ELEKTRICKÝ PROUD V CHEMII)
- Příloha č. 2 – Pracovní list (ELEKTROCHEMIE NAPŘÍČ STALETÍMI)
- Příloha č. 3 – Metodický list (ELEKTROCHEMIE NAPŘÍČ STALETÍMI)