

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 12: Tvorba učebních pomůcek, didaktická technologie

Domácí absorpční spektrometrie

Jakub Valoušek
Ústecký kraj

Teplice, 2021

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 12: Tvorba učebních pomůcek, didaktická technologie

Domácí absorpční spektrometrie

Homebuilt absorption spectrometry

Autoři: Jakub Valoušek

Škola: Gymnázium Teplice, Čs. dobrovolců 11, 415 01 Teplice

Kraj: Ústecký kraj

Konzultant: Ing. Bc. Jakub Mráček

Teplice, 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval/a samostatně a použil/a jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupnění této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

V Teplicích dne 29. října 2021

Jakub Valoušek

Poděkování

Děkuji Ing. Jakubu Mráčkovi za veškerý čas, který mi při psaní práce věnoval. Za námět práce, zásobování zdroji a rychlou a bezproblémovou zpětnou vazbu. Bez jeho poznatků a vstřícné spolupráce by tato práce nevznikla. Má můj vděk a údiv, že je při svém časovém vytížení je schopen předávat informace a podněcovat v nás chtíč do prací, jako je tato.

Rád bych poděkoval RNDr. Zdeňku Váchovi za zapůjčení čoček a pomoc s principem a návrhem spektrometru. Závěrem děkuji mojí rodině a všem, kteří mě při psaní práce podporovali.

Závěrem děkuji také Ing. Jiřímu Oravovi, Ph.D., za podnětné poznatky, návrhy a především poskytnutí nového náhledu na mou práci.

Anotace

Cílem práce je vyzkoušení alternativních přístupů k výuce na stavbě funkčního zařízení. Práce shrnuje základní principy a využití spektrometrie včetně přesahů do jiných odvětví. Náplní je popis procesu konstrukce absorpčního spektrometru v domácích podmínkách. Součástí práce je i měření získaných dat a jejich následné porovnání s tabelovanými hodnotami.

Klíčová slova

metodika, spektrometrie; analytická chemie; měření spekter; badatelsky orientovaná výuka; domácí spektrometr

Annotation

The aim of the work is to test alternative approaches to teaching on the construction of a functioning device. The work summarizes basic principles and uses of spectrometry, including overlaps with other industries. The text includes description of the process of construction of the absorption spectrometer in at-home conditions. The work also features measurements of the obtained data and their subsequent comparison with the tabulated values.

Keywords

methodology, spectrometry; analytical chemistry; inquiry-based learning; homebuilt spectrometer

Obsah

1	Teoretický Úvod	6
1.1	Metodický záměr	6
1.2	Úvod do spektrometrie	6
1.3	Historie spektrometrie	6
1.4	Matematicko - fyzikální princip	8
1.5	Využití a dělení spektrometrie	8
2	Praktická část	10
2.1	Úvod k mému spektrometru	10
2.2	Vnějšek spektrometru	11
2.3	Otvory spektrometru	12
2.4	Zdroj světla	13
2.5	Kyvety pro analyt	14
2.6	Čočka	15
2.7	Difrakční mřížka	16
2.8	Ostatní pomůcky	17
3	Měření a analýza dat	18
3.1	Vnější podmínky	18
3.2	Problémy s měřením	19
3.3	Seznámení se softwarem	20
3.4	Prostředí programu	20
3.5	Prvotní plány	20
3.6	Přesnost a princip měření	21
4	Závěr	23
4.1	Rekapitulace	23
4.2	Cíl a jeho naplnění	23
4.3	Metodický přínos práce	23
4.3.1	Aplikované metody	23
4.3.2	Zhodnocení spektrometru pro badatelskou výuku	23
4.3.3	Návrhy na vylepšení stroje a alternativy	24
4.3.4	Shrnutí zkušenosti	24
	Seznam použitých zdrojů:	25
	Seznam obrázků:	28

1 TEORETICKÝ ÚVOD

1.1 Metodický záměr

Je smutným faktem, že formám vzdělávání na základních a středních školách stále dominuje takzvaný frontální způsob výuky. Ten spočívá v tom, že vyučující stojí celou vyučovací hodinu před tabulí a píše zápis, vysvětluje látku a v dobrém případě má připravenou prezentaci.¹ Bylo dokázáno, že efektivita tohoto principu se postupně snižuje a to především vlivem modernizace a nových technologií.²

Cílem mé práce je pokusit se sestavit funkční měřicí zařízení v domácích podmínkách s minimální znalostí o jeho principech. Na základě nabytých zkušeností bych na konci práce rád posoudil, zda a v jaké míře je tento badatelský koncept vhodný jako zpestření klasické výuky. Získávání informací se snažím stavit především na veřejně dostupných zdrojích, jako jsou domény Wikipedie a Youtube, které nabízí snazší pochopení a úvod do problému. V pokročilé fázi práce čerpám i z odborné literatury.

1.2 Úvod do spektrometrie

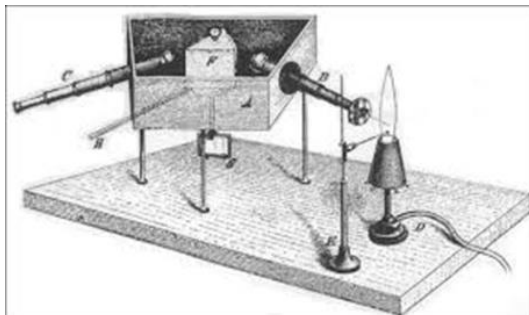
Spektrometrie je fyzikálně - chemický obor zkoumající vztah mezi látkami a elektromagnetickým vlněním. Zabývá se vlnovou délkou a zářením - respektive jeho pohlcováním a vyzařováním.^{3,4,5} Jedná se o základní kámen analytické fyziky i chemie a znalosti tohoto oboru jsou využívány ve spoustě odvětví běžného života, od medicíny přes kriminalistiku.⁶

1.3 Historie spektrometrie

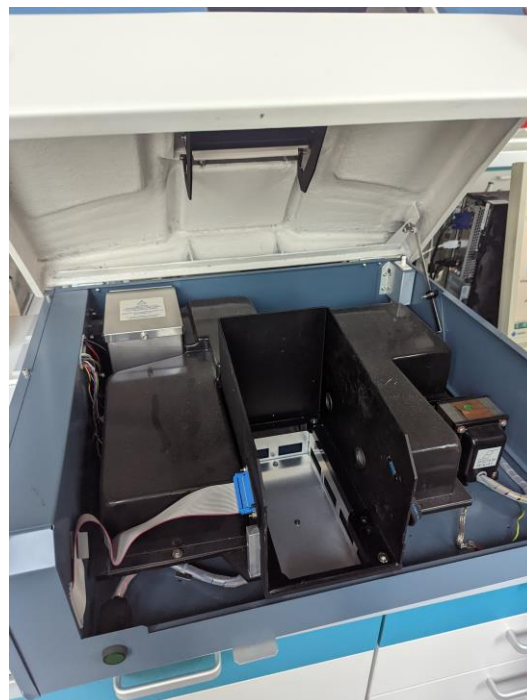
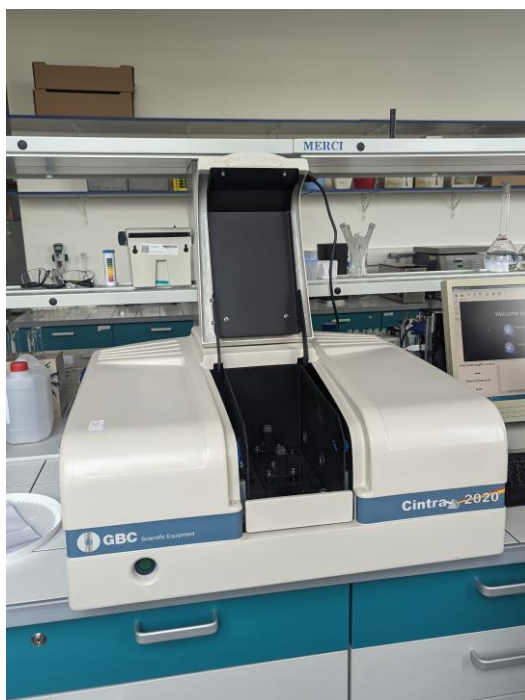
Již na konci 18. století byly poprvé využity principy dnešní spektrometrie. Švédští chemici a mineralogové hojně používali nástroj zvaný dmuchavka⁷ při zkoumání nových kovů a metalurgických procesech, který splňuje kritéria jednoduchého spektrofotometru.⁸ Jednalo se o trubku s náustkem a tryskou, jež poskytovala ostrý plamen. Reakcí rudy na tento plamen (zbarvení plamene, teplota tání, zápach) se poté dalo určit, co daná ruda obsahuje.

Za otce spektrometrie jako takové jsou považováni Jan Marek Marci a po něm sir Isaac Newton. Jejich bádání směřovalo k objevu monochromatického světla a faktu, že sluneční světlo se skládá z jednotlivých barev duhy, ale ve výsledku se lidskému oku jeví jako bílé.⁴ O rozvoj tohoto oboru se počátkem 19. století výrazně zasloužil německý fyzik Joseph von Fraunhofer. Vylepšil základní disperzní spektrometry a věnoval se pozorování solárních spekter, čímž přispěl k vyzdvižení spektrometrie na precizní analytickou techniku. S příchodem prvního praktického laboratorního spektrometru od Bunsena a Kirchhoffa (Obr. 1) v roce 1860 nastal výrazně větší zájem o tento obor a postupně byly jednoduché spektrometry na bázi difrakční mřížky a detektoru přepracovány do dnešních komplexních a precizních přístrojů^{9,10} (Obr. 2).

Po zdokonalení této analytické metody umožnily spektrometry mnohé. Rád bych ale vypíchl jednu z jejich nejvýznamnějších rolí, a sice objev prvků. Dalším důležitým zjištěním byl objev izotopů a analýza aminokyselin.¹¹



Obr. 1: Návrh prvního spektrometru¹²



Obrázek 2: Moderní absorpční spektrometr. Vlastní fotografie, pořízeno na Fakultě životního prostředí Univerzity Jana Evangelisty Purkyně.

1.4 Matematicko - fyzikální princip

Jak jsem již dříve zmínil - spektrometrie zkoumá spektra a jejich následné vlastnosti. Různé typy spektrometrie a spektrometry k nim přiřazené fungují na bázi odlišných principů, které se nedají v rámci pár řádků vysvětlit. Rád bych tedy nasvětlil princip alespoň mého spektrometru, který spadá do odvětví absorpční spektrometrie. Vzhledem k omezenosti v domácích podmínkách a lepší názornosti je zaměřen pouze na oblast viditelného světla.

Vycházím ze základního poznatku optiky, že látky jsou schopné pohlcovat či vyzařovat různé typy záření. Nechám tedy paprsek světla projít skrze vzorek a poté rozložit na jednotlivá barevná spektra pomocí difrakční mřížky. Pokud tento princip funguje, měly by být viditelné proměny na výsledném vyobrazeném spektru v závislosti na vzorku, jímž světlo prochází, jelikož vzorek část viditelného světla, respektive spektra, pohltí. Často k tomu ale nestačí pouze lidské oko, nýbrž program, který dokáže rozeznat intenzitu spekter podrobněji a předat přesnější informace.

Faktory, na kterých schopnost absorbovat spektra závisí, popisuje Lambert-Beerův zákon¹³ (rov. 1), jež dává do závislosti absorbanci (A), absorpční koeficient (ε), tloušťku květy (l) a koncentraci roztoku (c). Ze zákona tedy vyplývá, že i použitá květa a koncentrace roztoku mohou ovlivnit výsledky měření.

Pro většinu látek existují databáze naměřených výsledků, podle kterých lze určit, o kterou látku se jedná. Profesionální zařízení obsahují součástky jako ionizátory a přesně vyrobené optické součástky, jež umožňují přesná měření i mimo viditelnou oblast světla.

Rovnice 1: Lambert-Beerův zákon

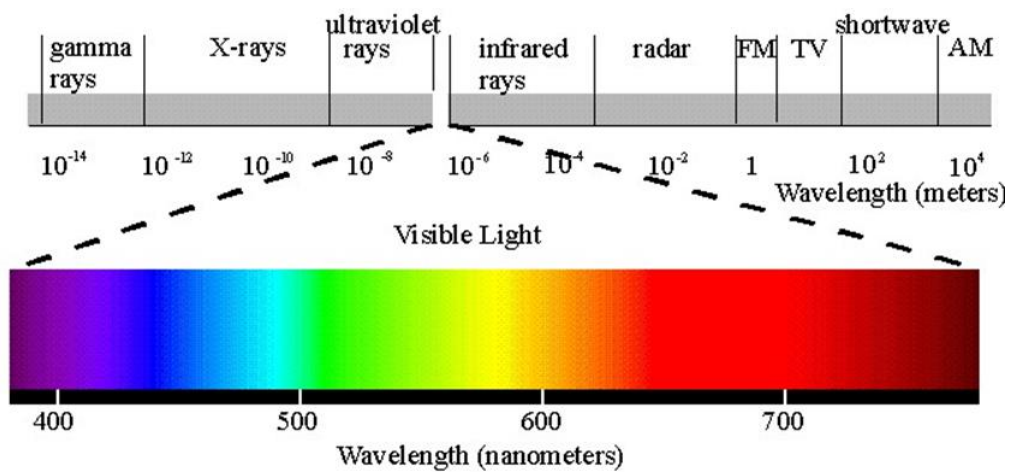
$$A = \varepsilon \times l \times c$$

1.5 Využití a dělení spektrometrie

Jak bylo již dříve zmíněno, spektrometrie má opravdu široký rozsah využití, což je podmíněno i velkým větvením oborů spektrometrie. Ty můžeme rozdělit podle typu spekter (Obr. 3), které zkoumáme a použitých principů.

Prvním je Ramanova spektrometrie, která měří změny energie během interakce se vzorkem. Používá se při ověřování pravosti a stáří dokumentů, v geologii, ale především ve forenzní chemii při analýze drog a léčiv.¹⁴ Velice významným oborem je spektrometrie s infračerveného spektra, jež nachází užití při identifikaci mikroplastů ve vodě.¹⁵ Ultrafialová a rentgenová spektroskopie jsou odvětví zkoumající spektra v délkách referujících o jejich názvech. Uplatnění nachází především ve forenzní chemii, stejně jako atomová absorpční spektrometrie, fungující na principu interakce fotonů s ionizovanými částicemi analytu.¹⁶ Posledním typem v našem výčtu je spektroskopie nukleární magnetické rezonance. Spočívá

ve vzájemné interakci atomových jader s elektromagnetickým polem. Díky této metodě jsme schopni určit přesné složení a strukturu zkoumané látky, včetně jeho množství.^{17,18}

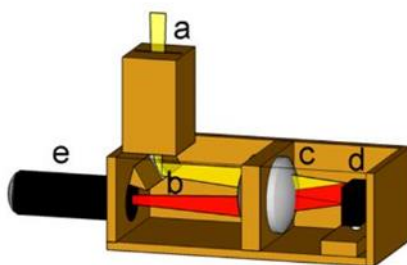


Obr. 3: Druhy elektromagnetického vlnění podle vlnové délky.¹⁹

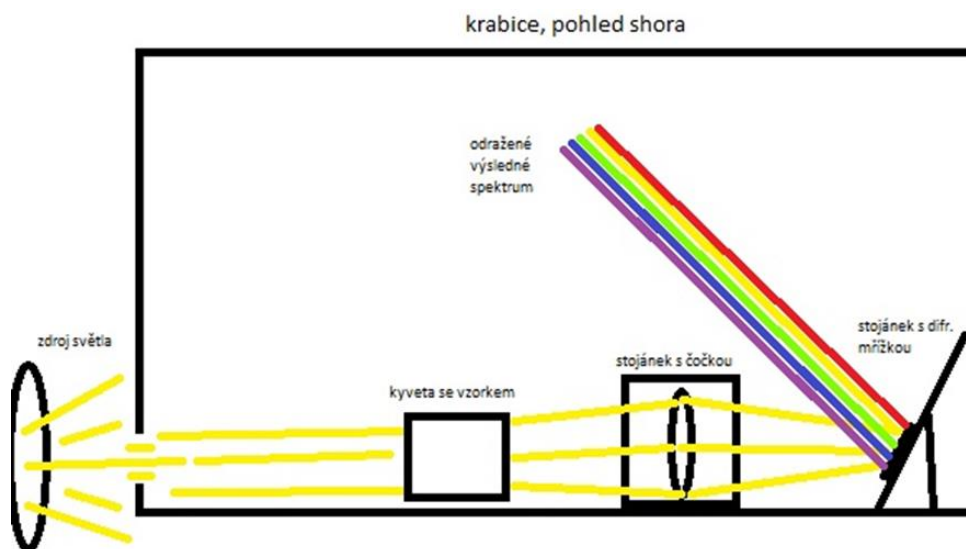
2 PRAKTICKÁ ČÁST

2.1 Úvod k mému spektrometru

Pro můj spektrometr jsem musel být ale se součástkami skromnější. Vycházím z prototypu kanadských autorů, kteří se pokoušeli v podobných podmínkách sestavit spektrometr Littrowova typu (Obr. 4).²⁰ Jistou inspirací mi při konstruování byla také návodná videa jiných ať už amatérských, či profesionálních kutilů.^{21,22,23,24,25,26,27,28}



Obr. 4: Schéma spektrometru Littrowova typu.²⁹



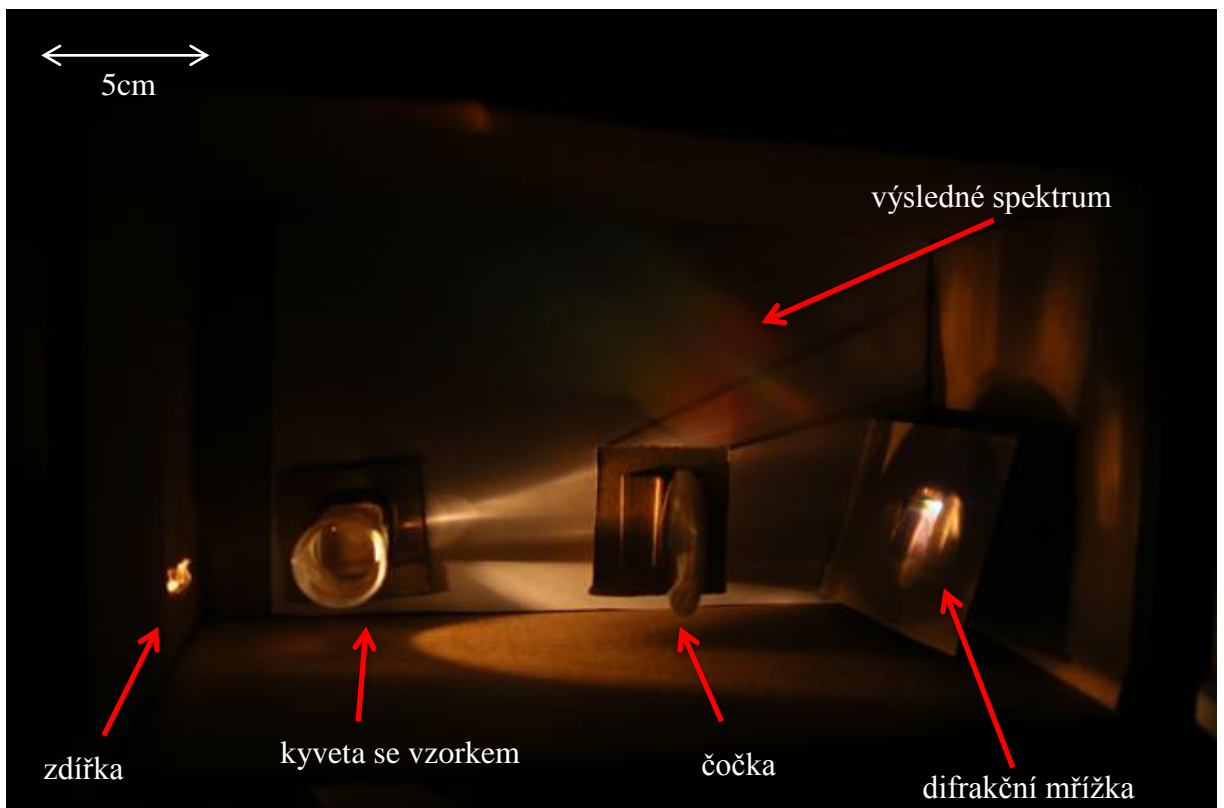
Obr. 5: Grafický návrh mého spektrometru.

2.2 Vnějšek spektrometru

Spektrometr se skládá z kartonové krabice, do které byly vyříznuty otvory a naskládány součástky. Zde můžete vidět torso spektrometru zvenku, návrh a následný pohled shora.



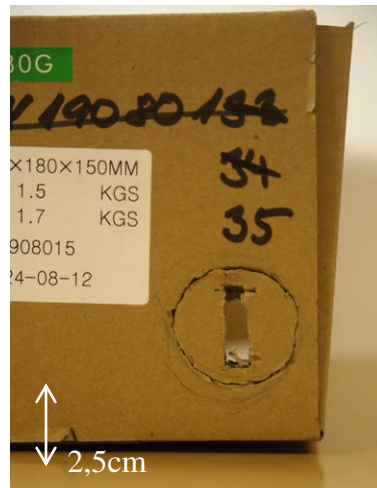
Obr. 6: Pohled zvenku.



Obr. 7: Pohled shora se všemi součástkami.

2.3 Otvory spektrometru

Prvním zásahem do struktury krabice jsou dvě štěrbin. Jedna slouží jako vstupní zdiřka (Obr. 8), druhá pro pořizování fotek vnitřku spektrometru mobilním telefonem za denního světla ($d = 1,5\text{cm}$), kdy je třeba celý spektrometr shora uzavřít (Obr. 9). Otvor pro přívod světla musí být zúžený, aby byl proud světla přesně vedený, výsledné spektrum ostré a aby nebylo uvnitř krabice příliš světla, které by mohlo narušovat pozdější měření.



Obr. 8: Vstupní zdiřka



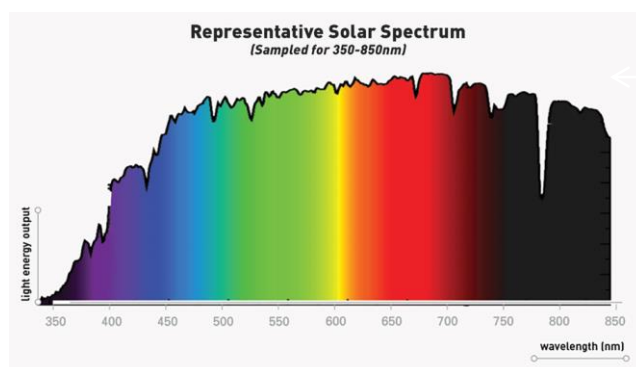
Obr. 9: Otvor pro fotoaparát mobilního telefonu

2.4 Zdroj světla

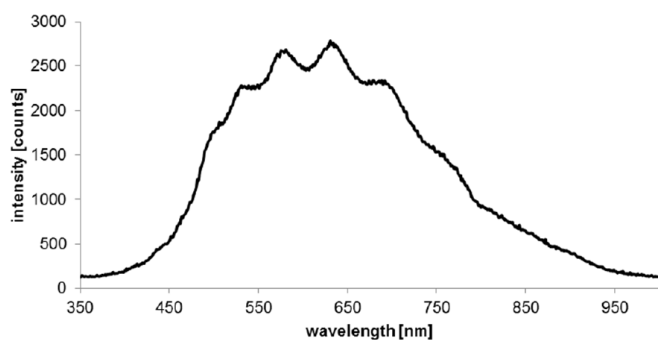
Nejprve potřebujeme zdroj světla. Nejlépe takového, které obsahuje všechny složky viditelné oblasti světla a je dostatečně silné. Dobrým příkladem je stará svítilna s wolframovým vláknem, kterou jsem použil i já. Naopak nevhodné by bylo použít například LED diodu. Její bílé světlo je sice složené z několika barev spektra, které dává světlu určité výhodné vlastnosti, ale na druhou stranu mohou určité složky světla již od začátku chybět. Pro lepší představu jsou níže zobrazeny tři spektra. Sluneční světlo obsahuje všechny vlnové délky v silném zastoupení (Obr. 11), žárovka z wolframového vlákna zaostává, ale valnou většinu vlnových délek obsahuje v dostatečně silné intenzitě (Obr. 12), naopak u spektra bílé LED diody vidíme jasně vynechané vlnové délky (Obr. 13).



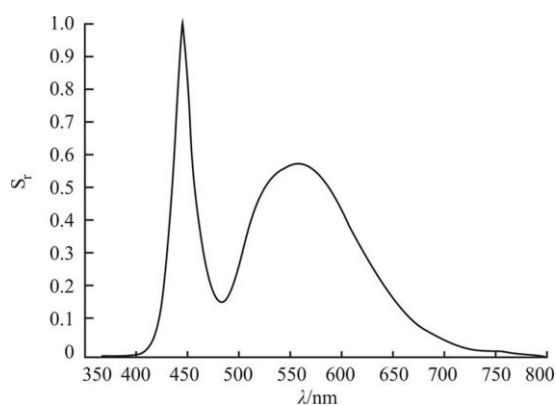
Obr. 10: Použitá svítilna s wolframovým vláknem.



Obr. 11: Spektrum slunečního záření.³⁰



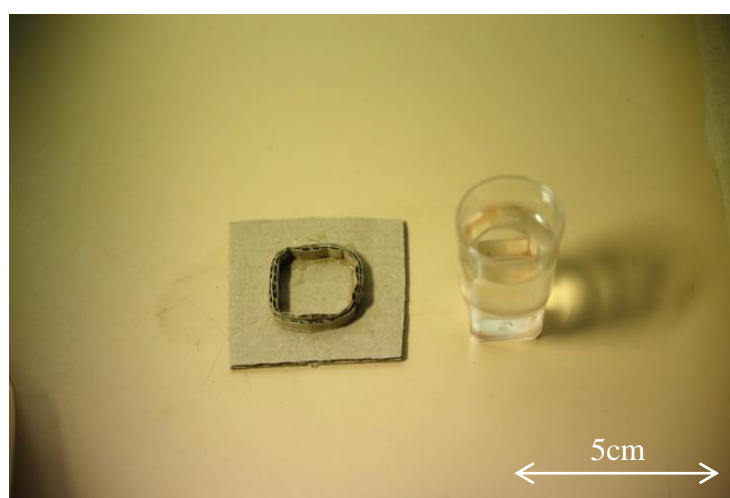
Obr. 12: Spektrum wolframové žárovky.³¹



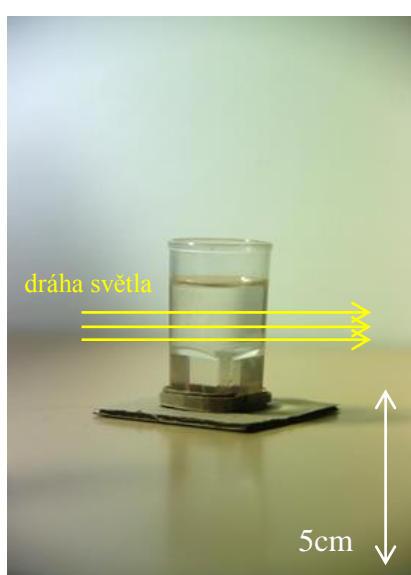
Obr. 13: Spektrum LED diody.³²

2.5 Kyvety pro analyt

Světlo procházející zdičkou narazí nejprve na kyvetu se vzorkem. Kyveta má čtvercové dno a v horní části tvar válce. Jelikož byly paprsky světla ze svítilny vyvýšené, neprocházely čtvercovým dnem, které je tvarově i funkčně pro spektrometrii vhodnější (má dvě stěny čtvercového dna zdrsňené, aby bokem kyvety neunikalo světlo), nýbrž horní zaoblenou částí (Obr. 14). Tento fakt také mohl přispět k nepřesnosti zařízení. Materiál kyvety je plast, konkrétně polypropylen. Stojánek na kyvetu je z kartonu, slouží k lehčímu umístění kyvety do spektrometru, obzvláště když chceme dvě různé kyvety umístit na stejné místo (Obr. 15). Pro porovnání přikládám fotografii spektroskopické křemenné kyvety z laboratoří UJEP zasazenou do začerněného stojanu (Obr. 16).



Obr. 14: Kyveta a stojan samostatně.



Obr. 15: Kyveta zasazená ve stojanu.



Obr. 16: Profesionální laboratorní kyveta. Vlastní fotografie, FŽP UJEP

2.6 Čočka

Jak jsme si již vysvětlili, nyní je část světla pohlcena vzorkem a část prochází dál. Jelikož má světlo tendenci se rozpínat, je třeba do systému přidat čočku, přesněji spojku. Jejím cílem je centralizovat rozpínající se světlo do difrakční mřížky. Tím bude výsledný obraz spekter jasnější a ostřejší a zároveň nedojde k světelným ztrátám. Aby byla čočka v ideální výšce (tj. aby paprsky procházely středem čočky), bylo třeba pro ni zhotovit stojánek z kartonu a zápalek (Obr. 18, 19). Jednak čočku vyzdvihne do požadované výšky a jednak do něj můžeme zasadit čočku tak, aby nepadala. Čočka má poloměr křivosti 30cm.



Obrázek 17: Čočka



Obr. 18: Stojan na čočku

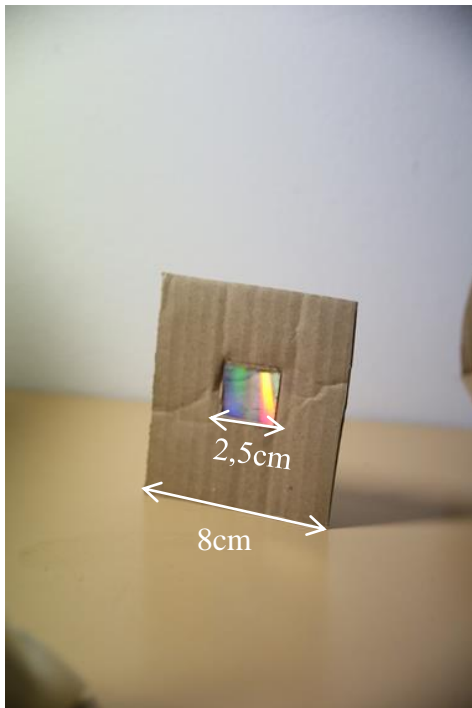


Obr. 19: Čočka ve stojanu

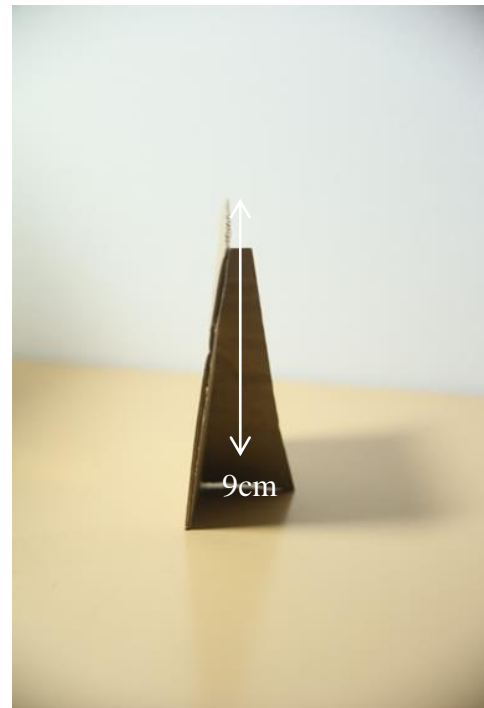
2.7 Difrakční mřížka

Posledním a nejsložitějším elementem je difrakční mřížka. Jejím účelem je rozkládat světlo na jednotlivá spektra. Důsledek tohoto jevu je výsledná “duha”, kterou můžeme poté analyzovat. Tuto schopnost má například DVD disk (Obr. 22). Jedna z jeho vrstev se totiž skládá z malých vrypů na polykarbonovém substrátu, které ohýbají dopadající vlnění, což je podstatou difrakce světla. Tyto vrypy vytváří střídání vyvýšených a nevyvýšených částí, tzv. systém groove and lands (obr. 23).

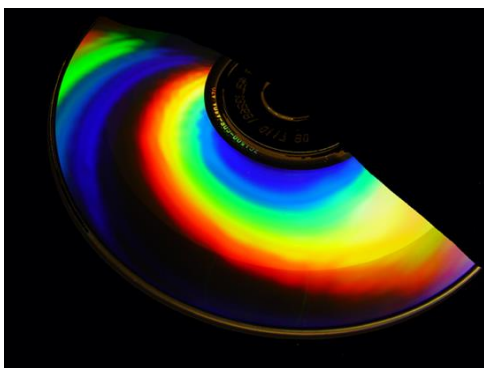
Difrakční mřížky lze rozdělit na propustné, které spektrum dále propustí, a odrazové, které ho dále odrazí. DVD disk je druhým případem, proto se z něho spektrum odrazí a následně je třeba tento odraz zpracovat. Difrakční mřížku z DVD disku jsem získal tak, že jsem disk mechanicky rozdělil na jednotlivé vrstvy, našel průhlednou, modře zbarvenou (tzv. “reflexní”³³) vrstvu a z ní vystříhl požadovaný tvar. Difrakční mřížka může mít různé tvary a velikosti, já se rozhodl pro čtverec, který jsem poté zasadil do stojanu s nožičkou (Obr. 20, 21). Výhodou stojanu je, že vyzdvihne mřížku na úroveň, kam čočka směřuje světlo a zároveň mohou pohybovat s robustnějším stojanem a nikoliv se samotnou mřížkou, což je mnohem pohodlnější.



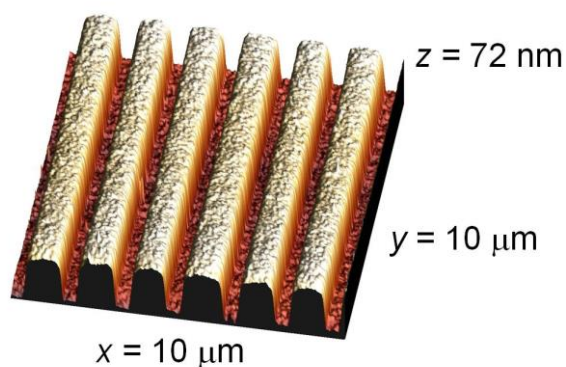
Obr. 20: Stojánek s difrakční mřížkou.



Obr. 21: Pohled na stojánek z boku.



Obr. 22: Rozklad světla na DVD disku.³⁴



Obr. 23: Systém groove and lands na CD disku. Vygenerováno pomocí mikroskopie atomárních sil, Ing. Jiří Orava, Ph.D; UJEP

2.8 Ostatní pomůcky

Během výroby jednotlivých součástek a sestavování spektrometru bylo samozřejmě použito spoustu dalšího nářadí a náčiní. Neobešel bych se např. bez odlamovacího nože, nůžek či vteřinového lepidla. Esenciální byly také kartonové krabice a chemikálie, ze kterých jsem mohl později vytvářet vzorky pro analýzu.



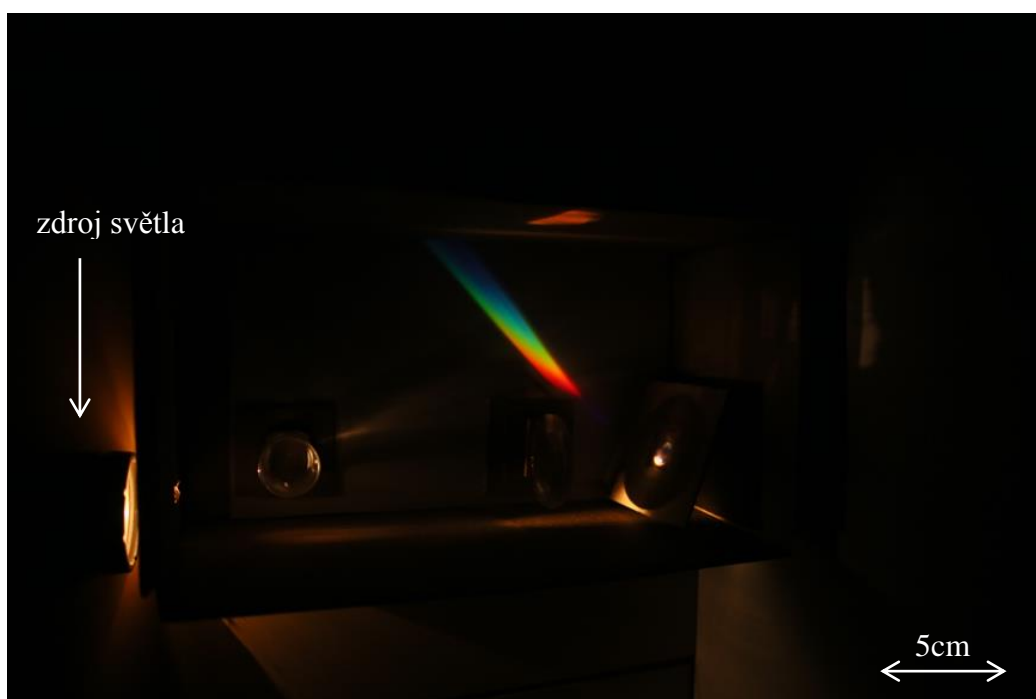
Obr. 24: Ostatní pomůcky

3 MĚŘENÍ A ANALÝZA DAT

3.1 Vnější podmínky

Po rozložení světla na jednotlivé barevné složky můžeme tento výsledný obraz analyzovat. K tomu je třeba dosáhnout absolutní tmy v spektrometru. Světlo navíc by jednak zkreslovalo výsledné spektrum a také bychom na něj tak dobře neviděli. Můžeme ho tedy nechat otevřený za předpokladu, že je kolem úplná tma, nebo ho zavřít a fotografie spektra pořizovat skrze otvor pro fotoaparát mobilního telefonu.

Pro pořizování fotografií by posloužil i digitální fotoaparát (zrcadlovka). Ten sice obsahuje ochranný filtr pro infračervené záření, ale jelikož se pohybujeme v oblasti viditelného světla, na výslednou analýzu nebude mít filtr žádný vliv. Z praktických důvodů jsem se ale uchýlil ke kompaktnější variantě mobilního telefonu.



Obr. 25: Komponenty spektrometru s výsledným spektrem. (foceno shora za úplné tmy)

3.2 Problémy s měřením

Nejdříve jsem při analýze výsledků narážel na výrazné nuance a výsledky nebyly konzistentní. Později jsem odhalil, že je to způsobeno pořizováním fotografií z lehce lišících se úhlů a fotky byly také například různě exponované. Ohlídal jsem si, aby snímky byly pořizovány vždy ze stejného místa (vzdálenosti, úhlu) a se stejnou expozicí, což nakonec u mobilního telefonu nepředstavovalo značný problém. Na výsledcích se podepsalo také kartonové dno spektrometru. Díky jeho zvroubenému povrchu a barvě by tedy mohly být výsledky z části zkreslené. Vyzkoušel jsem tedy dát na toto dno černý papír. Problémy spojené se zrněním se odstranily, ale po barevné stránce se nakonec osvědčil lépe bílý papír.



Obr. 26: Spektrum na kartonovém dně.

(na spektru jsou výrazné přechody, které by ovlivnily výsledek)



Obr. 27: Spektrum na dně vystlaném bílým papírem.

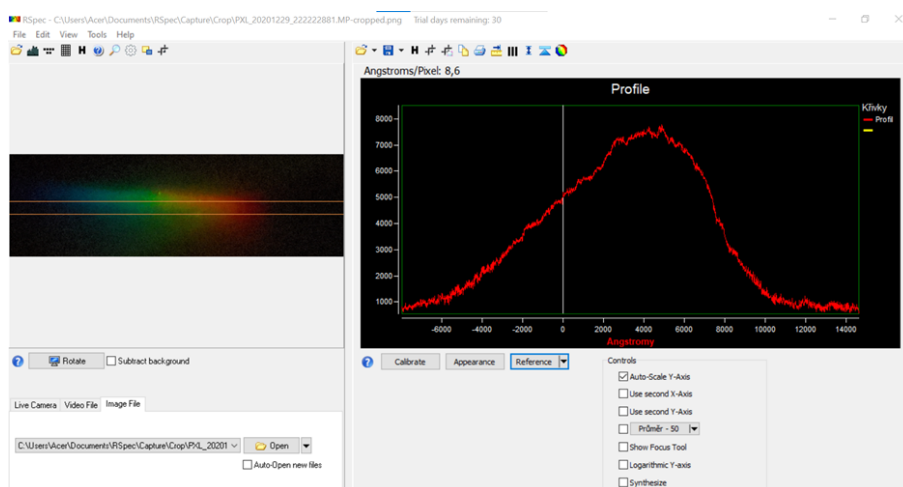
(spektrum je jemné a nepřerušované)

3.3 Seznámení se softwarem

Na samotnou analýzu výsledného spektra jsem použil program RSpec³⁵. Jedná se o software používaný pro analýzu spekter vyzařovaných hvězdami, ale dá se použít i v mnoha dalších oborech. Tento program bylo třeba ještě zkalibrovat, což se provedlo podle návodu na internetu.³⁶ Po barevné kalibraci bylo třeba importovat obrázek do programu. Nejdříve jsem spektra před importováním upravoval v dalších programech, později jsem se ale naučil obrázky ořezávat v samotném RSpecu, což mi značně ulehčilo práci.

3.4 Prostředí programu

Jakmile bylo spektrum oříznuté a připravené, nastavil jsem v programu zkoumanou oblast tam, kde bylo oříznuté výsledné spektrum (oblast mezi dvěma žlutými čarami, Obr. 28). Bylo třeba si uhlídat, zejména u porovnávání dvou vzorků, aby rozměry zkoumané části byly stejné. Mělo by to totiž dopad na získaná data. Poté, co jsem byl spokojený s nastavením, jsem se mohl přesunout na výsledný graf. Na x -ové ose je vlnová délka v Angströmech ($10\text{\AA} = 1\text{ nm}$), doplněná barevnou výplní pro lepší orientaci (Obr. 29 a dále). Na ypsilonové ose byla znázorněná bezrozměrně intenzita jednotlivých vlnových délek - zjednodušeně řečeno, jak moc jsou jednotlivé barvy spektra jasné.



Obr. 28: Uživatelské prostředí RSpecu

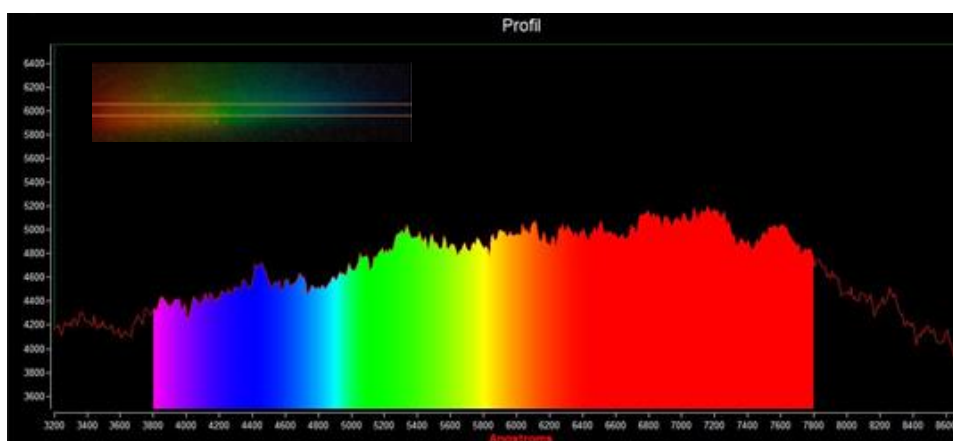
(vlevo obrázek spektra, mezi žlutými rovnoběžkami zkoumaná část, vpravo poté výsledný graf)

3.5 Prvotní plány

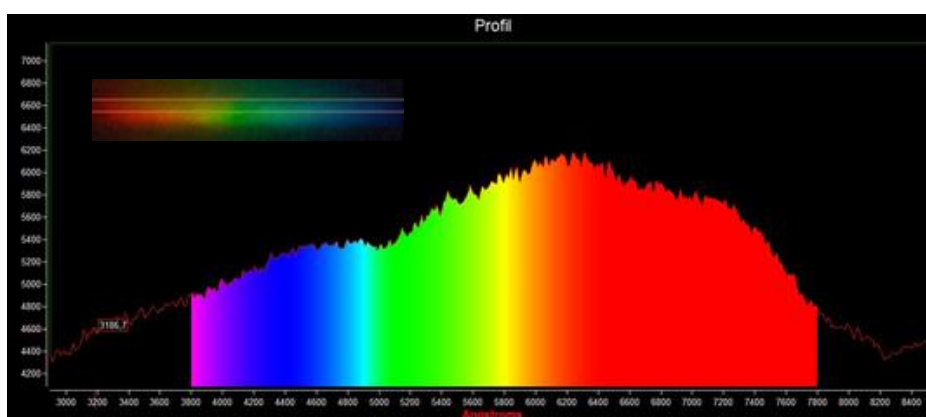
Do této práce jsem přicházel s ambicemi, že můj spektrometr bude schopný identifikovat přesně prvky a sloučeniny pole zveřejněných knihoven spekter. Opak je ale bohužel pravdou. Dalo spoustu času najít správnou krabici, sehnat, vyrobit a upevnit všechny součástky a celkově dát spektrometr do chodu. Naučení se s programem a osvojení spektrometrické terminologie a principů mě také v práci brzdilo.

3.6 Přesnost a princip měření

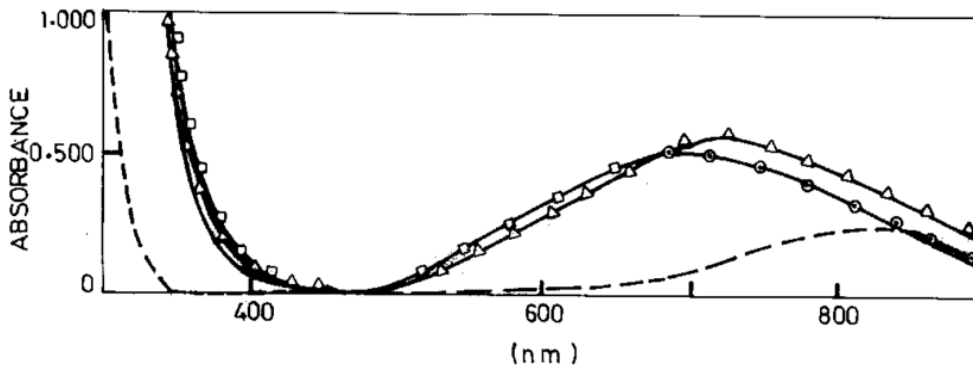
První měření byly opravdu náhodné a nedaly se s reálnými daty srovnávat. V tu chvíli jsem si začal uvědomovat, že můj spektrometr se profesionálním zařízením ani zdaleka nevyrovná a že mým úkolem bude spíše ověřit, jestli principiálně vůbec funguje. I to se ale zpočátku nedařilo. Bylo to způsobené světelnými podmínkami, ve kterých jsem fotografie pořizoval. Musel jsem tedy optimalizovat druh vstupního světla, upevnit součástky do stojanů, fotit spektrum vždy ze stejného místa, podložit dno papírem apod. Po vyřešení všech těchto dílčích problémů došlo ke zlepšení kvality přístroje. Na následujících obrázcích jsou dvě spektra stejného vzorku modré skalice (pentahydrát síranu měďnatého – $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; $c = 0,1\text{M}$). Jedno je focené před a druhé po optimalizaci (Obr. 29, 30). U druhého spektra nacházíme podobnost s profesionálně změřeným spektrem modré skalice (Obr. 31).



Obr. 294: Spektrum modré skalice před optimalizací podmínek.



Obr. 305: Spektrum modré skalice po optimalizaci světelných podmínek.

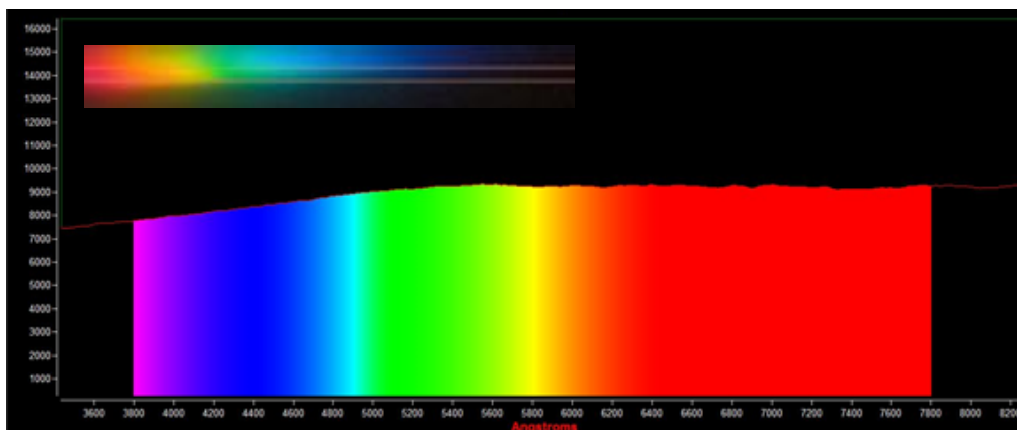


Obr. 31: Profesionálně naměřené spektrum modré skalice.³⁷

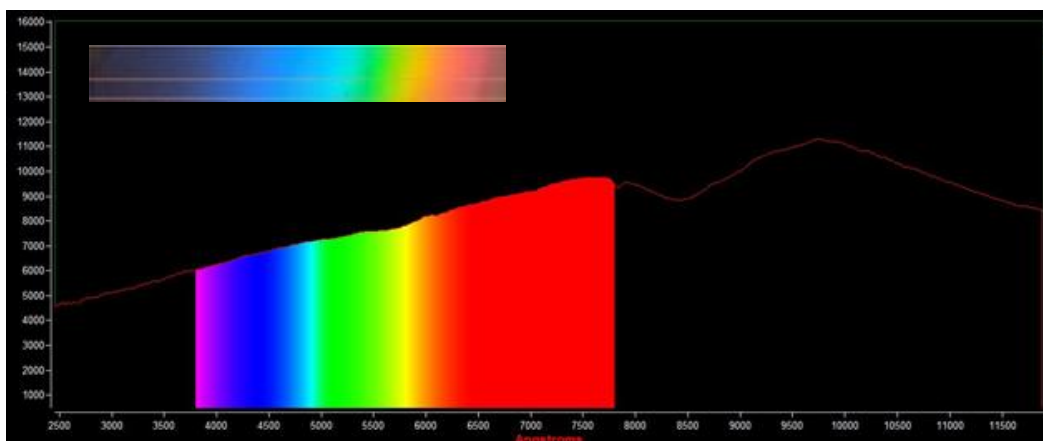


Obr. 32: Analyzovaný 0,1 M roztok $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

Úspěšně si mi také povedlo proměřit salmiak (chlorid amonný – NH_4Cl ; $c = 0,1\text{M}$) a borax (tetraboritan sodný – $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$; $c=0,1\text{M}$).



Obr. 33: Spektrum salmiaku



Obr. 34: Spektrum boraxu

4 ZÁVĚR

4.1 Rekapitulace

V prvních kapitolách jsem krátce shrnul teoretický základ spektrometru, od jeho historie přes využití až po princip. V praktické části jsem řešil měření, analýzu a zpracování dat ze spektrometru získaných. V závěru bych rád dodal pár slov k úspěšnosti mého snažení a udělal reflexi metodického záměru.

4.2 Cíl a jeho naplnění

Cílem mojí práce bylo zhotovit funkční spektrometr v domácích podmínkách. Má původní vize byla sestrojít takový spektrometr, pomocí kterého by se daly srovnáním s naměřenými hodnotami určovat jednotlivé sloučeniny a prvky. Jak jsem se již přesvědčil, s takovou přesností se v domácích podmínkách bohužel počítat nedá. Pro jednoduchou demonstraci principů spektrometrie bohatě postačí. Konkluzí je tedy fakt, že fungující spektrometr si podomácku zhotovit dokážeme, ale na takovou exaktnost jako u profesionálních přístrojů se spoléhat nelze.

4.3 Metodický přínos práce

4.3.1 Aplikované metody

Mým cílem bylo ověřit efektivitu badatelsky orientované výuky³⁸ na stavbě spektrometru. Tato forma výuky spočívá v tom, že každý žák má možnost přijít na princip zkoumaného jevu sám pomocí pokusů a experimentů. Jedná se o moderní metodu povzbuzující konstruktivismus a kreativitu žáků, která ovšem naráží i na problémy. Rád bych také vypíchl efektivnost reverzního inženýrství³⁹, konkrétně principu „top down“.⁴⁰ Ten je postavený na tom, že z celku (spektrometru) musím zjistit, jak jeho jednotlivé části fungují a jak se navzájem ovlivňují.

4.3.2 Zhodnocení spektrometru pro badatelskou výuku

Do této práce jsem vstupoval s nulovými znalostmi o spektrometrii. Ustavičné bádání a hledání informací mi rozšířilo obzory daleko za oblast spektrometrie, například do oblasti optiky i analytické chemie. Stavba přístroje může pro žáky představovat problém například kvůli špatné dostupnosti součástí či technické náročnosti analýzy dat. Na druhou stranu tento projekt považuji za ideální pro skupinové práce. Mohlo by se jednat o nový přístup k laboratorním cvičením, kdy by skupinám studentů byly zadány tyto náročnější projekty na delší dobu. Stavba spektrometru je nejen vhodným interdisciplinárním spojením fyziky a chemie, ale nabízí možnost prosazení kreativních studentů excelujících i ve vzdálenějších oborech. Například nadšenci pro informatiku by mohli zkusit některé fáze procesu zautomatizovat či naprogramovat software, který by z telefonu dokázal exportovat výsledné

spektrum. Věřím, že i statistici by si na projektu mohli vyzkoušet sběr různých dat. Napadají mě samozřejmě i jiné projekty podobného rázu, například kladkové systémy pro žáky druhého stupně základní školy.

4.3.3 Návrhy na vylepšení stroje a alternativy

Na samotném stroji jsem dohromady objevil několik nedostatků, které by se v budoucnu daly vylepšit. Mezi ně patří například začernění součástí a celého prostoru krabice pro ještě lepší světelné podmínky uvnitř spektrometru. To by podpořil i nový stojánek na kyvetu, který by byl také ze stran natřený černou barvou, aby paprsky procházející bočními stěnami zbytečně neosvětlovaly vnitřek krabice. Stojánek by také měl kyvetu vyzdvihnout do takové výšky, aby paprsky procházely čtvercovou částí kyvety. Za případný příplatek by se dal dokoupit modul umožňující měření infračerveného záření pro telefony - poté by se dal spektrometr používat i v rámci dalšího spektrometrického podboru. Kvalitu analýzy by jistě zlepšilo přidání ještě jedné spojné čočky mezi zdroj světla a kyvetu. Tím bychom zajistili minimální rozpínání světla a jeho přesnější vedení v rámci spektrometru.

Učitelé mohou studenty podněcovat k alternování různých částí spektrometru a pozorování změn, které s sebou tyto alternativy přináší. Mezi ně patří například zkoušení různě silných kyvet a různých koncentrací roztoků – a tím ověření platnosti Lambert-Beerova zákona. Jistě bychom také narazili na rozdíly při použití různých mobilních telefonů při snímání. V poslední řadě by se také dala použít mřížka s jinou periodou – třeba mnou použitý DVD disk nahradit CD nebo Blu-ray diskem. Věřím, že badaví studenti by ve výsledku přišli na ještě více možností, jak by se dala stavba spektrometru zpestřit.

4.3.4 Shrnutí zkušenosti

Pro zobecnění mé práce bych vyjmenoval důležité aspekty badatelsky-orientovaného projektu podobného rázu. Těmi jsou jednoduchost principu zkoumaného jevu, adekvátní materiálová i časová náročnost a také zvolení atraktivního tématu. Ze své zkušenosti vím, že problémy, jež jsem byl schopen opravit sám, si vybavuji doteď. Jednalo se především o kvalitu pořízených fotografií, podomácku zhotovené stojánky apod. Byly to problémy, jejichž řešení záviselo čistě na mně a těžko bych si je dohledal. Proto je důležité, aby žáci byli odkázáni opravdu pouze na sebe a objevili toho co nejvíce na vlastní pěst.

Z této práce si odnáším cenné poznatky z oblasti metodiky, moderních vyučovacích metod a spektrometrie. Už vím, co je základem pro úspěšný badatelský projekt a jak se vypořádat s chybami během procesu. Závěrem konstatuji, že stavba domácího spektrometru by skutečně mohla představovat atraktivní a podnětné zadání skupinové práce v hodinách chemie i fyziky.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ:

- (1) STARÁ, Věra, GOŠOVÁ, Věra, ed. Frontální výuka [online]. [cit. 2021-10-31]. Dostupné z: https://wiki.rvp.cz/Knihovna/1.Pedagogick%c3%bd_lexikon/F/Frontalni_vyuka
- (2) PAVLÍKOVÁ, Vendula. *Porovnání efektivity frontální a projektové organizační formy výuky*. Olomouc, 2015. Dostupné také z: https://theses.cz/id/7bldqg/diplomov_prce_-_Bc._Vendula_Pavlkov.pdf. Diplomová práce. UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI
- (3) ATA SCIENTIFIC. Spectrometry And Spectroscopy: WHAT'S THE DIFFERENCE? [online]. [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.atascientific.com.au/spectrometry/>
- (4) Spektroskopie. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Wikimedia Foundation [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Spektroskopie>
- (5) Spektroskopy. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Wikimedia Foundation [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Spectroscopy>
- (6) THERMO FISCHER SCIENTIFIC. Mass Spectrometry Applications Areas [online]. [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://www.thermofisher.com/cz/en/home/industrial/mass-spectrometry/mass-spectrometry-learning-center/mass-spectrometry-applications-area.html>
- (7) Dmuchavka. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Wikimedia Foundation [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Dmuchavka>
- (8) ALDERSEY-WILLIAMS. Periodic Tales: A Cultural History of the Elements, from Arsenic to Zinc [online]. 2011. New York: Ecco Press [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <http://xn--webducaton-dbb.com/wp-content/uploads/2019/01/Hugh-Aldersey-Williams-Periodic-Tales-Penguin-Books-Ltd-2012.pdf>
- (9) VOTAVA, Ondřej. Úvod do spektroskopických metod [online]. [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <http://www.njh.cz/seminare/13569847/1270589>
- (10) GRIFFITHS, Jennifer. A Brief History of Mass Spectrometry [online]. 2008 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ac8013065>
- (11) Hmotnostní spektrometrie. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Wikimedia Foundation [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Hmotnostn%C3%AD_spektrometrie
- (12) KIRCHHOFF a BUNSEN. Annalen der Physik und Chemie [online]. In: . 1860 [cit. 2021-04-03]
- (13) Lambertův–Beerův zákon [online]. Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Lambert%C5%AFv%E2%80%93Beer%C5%AFv_z%C3%A1kon

- (14) Raman spectroscopy. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Wikimedia Foundation [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Raman_spectroscopy
- (15) Fourier-transform infrared spectroscopy. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Wikimedia Foundation [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Fourier-transform_infrared_spectroscopy
- (16) Atomic absorption spectroscopy. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Wikimedia Foundation [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_absorption_spectroscopy
- (17) Spektroskopie nukleární magnetické rezonance. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Wikimedia Foundation, [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Spektroskopie_nukleární_magnetické_rezonance
- (18) Nuclear magnetic resonance spectroscopy. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Wikimedia Foundation [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_magnetic_resonance_spectroscopy
- (19) DM Technologies. *Lighting* [online]. 2017 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <http://dmtgrow.com/lighting>
- (20) ELIÁŠKOVÁ, Iveta a Jaromír LITERÁK. JEDNODUCHÉ DEMONSTRACE INSTRUMENTÁLNÍCH METOD [online]. In: . 2017 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/66/66>
- (21) COLORADO STATE UNIVERSITY ONLINE. How to build a spectrometer - CSU Online [online]. In: . 2016 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=oulJg0kiiWA>
- (22) ELECTRICAL PROJECTS. How to Make DIY Spectrometer [online]. In: . 2018 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=MgogwcXUIoc&t=140s>
- (23) CHEMISTRY 4ALL. How to make a High Resolution Spectrometer [online]. In: . 2018 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=DXkHjGL9CaA>
- (24) VANDERVELDEN, Kent. Spectrometer Introduction, Tear-down, and Data Analysis [online]. In: . 2017 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=xuwHsSJ5RZ0>
- (25) THE THOUGHT EMPORIUM. Building a Nanodrop Style UV/Vis Spectrometer [online]. In: . 2019 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=pIk8I10ZmYY>
- (26) CHEMISTRY 4ALL. Homemade Raman Spectroscopy [online]. In: . 2017 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=Rjk55FZBPKk&t=141s>

- (27) EXPLORATORIUM TEACHER INSTITUTE. How to build your own: CD Spectroscope [online]. In: . 2015 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=1iWdTbXvHx0>
- (28) CHRIS WESLEY. DIY Light Spectrometer [online]. In: . 2016 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=m6zpNSoQTV8&t=590s>
- (29) VANDERVEEN, Jesse, Brian MARTIN a Kristopher OOMS. Developing Tools for Undergraduate Spectroscopy: An Inexpensive Visible Light Spectrometer [online]. In: . 2013 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ed300396x>
- (30) Solar Spectrum Graph. In: Lumigrow.com [online]. 2020 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.lumigrow.com/learning-center/blogs/full-spectrum-led-grow-lights/solar-spectrum-graph/>
- (31) THOMS, Lars-Jochen. Measured spectrum of a tungsten lamp. In: *Researchgate.com* [online]. 2013 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Measured-spectrum-of-a-tungsten-halogen-lamp_fig2_273454510
- (32) White LED spectrum [online]. In: . [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/White-LED-spectrum-From-the-results-it-can-be-found-that-as-the-number-of-white-LEDs_fig1_342920979
- (33) TIŠŇOVSKÝ, Pavel. Následovníci kompaktních disků: DVD [online]. In: . 2008 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/nasledovnici-kompaktnich-disku-dvd/>
- (34) MAŠEK, Radek. Rozklad světla [online]. In: . 2004 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://www.fotoaparát.cz/fotogalerie/fotografie/13910/>
- (35) RSPEC REAL-TIME SPECTROSCOPY. Downloads [online]. In: . 2021 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://www.rspec-astro.com/setupdownload/>
- (36) RSPEC REAL-TIME SPECTROSCOPY. Use our Videos to get started [online]. In: . 2021 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://www.rspec-astro.com/more-videos/>
- (37) ARAVINDA, MAYANNA a MURALIDHARAN. Electrochemical behaviour of alkaline copper complexes [online]. In: . Researchgate, 2012 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/UV-Vis-spectra-of-copper-and-its-complexes-copper-sulphate---copper-sulphate-TEA_fig3_225706672
- (38) Teorie badatelsky orientované výuky [online]. Univerzita Palackého v Olomouci [cit. 2021-10-31]. Dostupné z: <http://bov.upol.cz/teorie-bov/>
- (39) Reverzní inženýrství. Wikipedie [online]. [cit. 2021-10-31]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Reverzn%C3%AD_in%C5%BEen%C3%BDrstv%C3%AD
- (40) EDMENTUM. Top-Down vs. Bottom-Up Education [online]. 2016 [cit. 2021-10-31]. Dostupné z: <https://blog.edmentum.com/sxswedu-2016-top-down-vs-bottom-education>

SEZNAM OBRÁZKŮ:

Obrázek 1: Návrh prvního spektrometru.....	7
Obrázek 2: Moderní spektrometr.....	7
Obrázek 3: Druhy elektromagnetického vlnění podle vlnové délky.....	9
Obrázek 4: Schéma spektrometru Littrowova typu.....	10
Obrázek 5: Grafický návrh mého spektrometru.....	10
Obrázek 6: Pohled zvenku.....	11
Obrázek 7: Pohled shora se všemi součástkami.....	11
Obrázek 8: Vstupní zdírka.....	12
Obrázek 9: Otvor pro fotoaparát mobilního telefonu.....	12
Obrázek 10: Použitá svítilna.....	13
Obrázek 11: Spektrum slunečního záření.....	13
Obrázek 12: Spektrum wolframové žárovky.....	13
Obrázek 13: Spektrum LED diody.....	13
Obrázek 14: Kyveta a stojan samostatně.....	14
Obrázek 15: Kyveta ve stojanu.....	14
Obrázek 16: Profesionální laboratorní kyveta.....	14
Obrázek 17: Čočka.....	15
Obrázek 18: Stojan na čočku.....	15
Obrázek 19: Čočka ve stojanu.....	15
Obrázek 20: Stojánek s difrakční mřížkou.....	16
Obrázek 21: Stojan s mřížkou z boku.....	16
Obrázek 22: Rozklad světla na DVD disku.....	17
Obrázek 23: Systém groove and lands na CD disku.....	17
Obrázek 24: Ostatní pomůcky.....	17
Obrázek 25: Obsah spektrometru s výsledným spektrem.....	18
Obrázek 26: Spektrum na kartonovém dně.....	19
Obrázek 27: Spektrum na dně vystlaném bílým papírem.....	19
Obrázek 28: Uživatelské prostředí RSpecu.....	20
Obrázek 29: Spektrum modré skalice před optimalizací.....	21
Obrázek 30: Spektrum modré skalice po optimalizaci světelných podmínek.....	21
Obrázek 31: Profesionálně naměřené spektrum modré skalice.....	22
Obrázek 32: Analyzovaný 0,1 M roztok $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	22
Obrázek 33: Spektrum salmiaku.....	22
Obrázek 33: Spektrum boraxu.....	22