



Přírodovědecká
fakulta
Faculty
of Science

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Bakalářská práce:

MĚŘENÍ PARAMETRŮ OPTICKÝCH PRVKŮ

Vypracoval: Jan Bednář

Školitel: Mgr. Marcel Fuciman Ph.D.

České Budějovice 2014

Bibliografické údaje:

Autor, (*Bednář J.*) 2014: Měření parametrů optických prvků

(Measurement of parameters of optical elements, Bachelor Thesis, in Czech, - 43 p., Faculty of Science, The University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.)

Anotace: This work concerns assembling of the set-up for measuring of optical parameters, such as focal length, diffraction constant etc. Individual measuring methods (eg. Bessel method, Back reflectance method etc.) are tested on particular optical elements (biconvex lenses, transmission and reflective diffraction gratings) and later their pros and cons for use in Femtosecond laboratory in Faculty of Science are discussed.

Abstrakt :-Tato práce se zabývá měřením parametrů optických prvků. Hledání ohniskové vzdálenosti, difrakční konstanty atd. Jednotlivé měřící metody (např. Besslova metoda, metoda zpětného odrazu atd.) jsou poté proměřeny jednotlivé optické elementy (bikonvexní čočky, transmisní a odrazové mřížky)

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích, 24.4.2014

Podpis

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce Mgr. Marcelovi Fucimanovi, Ph.D za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné a užitečné rady při zpracování mé bakalářské práce.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| Úvod..... | 6 |
| 1.0 Proměřované optické elementy..... | 7 |
| 1.1 Optické čočky..... | 7 |
| 1.2 Vlastnosti optických čoček..... | 7 |
| 1.3 Základní druhy optických čoček..... | 8 |
| 1.4 Materiály optických čoček..... | 9 |
| 1.5 Optické vady..... | 10 |
| 1.6 Využití optických čoček..... | 11 |
| 2.0 Metody měření efektivní ohniskové vzdálenosti..... | 11 |
| 2.1 Znaménková konvence..... | 11 |
| 2.2 Měření ohniskové vzdálenosti pomocí přímé metody..... | 12 |
| 2.3 Abbeova metoda měření efektivní ohniskové vzdálenosti optických čoček..... | 13 |
| 2.3.1 Postup při měření ohniskové vzdálenosti pomocí Abbeova metody..... | 16 |
| 2.4 Besselova metoda měření ohniskové vzdálenosti optických čoček..... | 16 |
| 2.4.1 Postup měření ohniskové vzdálenosti pomocí Besselova metody..... | 18 |
| 2.5 Metoda zpětného odrazu..... | 19 |
| 2.5.1 Princip metody měření efektivní ohniskové vzdálenosti zpětným odrazem..... | 20 |
| 2.6 Měření tloušťky optických čoček..... | 22 |
| 2.7 Difrakční mřížka..... | 23 |
| 2.7.1 Disperze..... | 26 |
| 2.7.2 Rozlišovací schopnost..... | 27 |
| 2.8 SPEKTROMETR..... | 27 |
| 2.8.1 Popis spektrometru:..... | 27 |
| 2.8.2 Postup měření spektrometrem..... | 29 |
| 3.0 Experiment..... | 30 |
| 3.1 Měření efektivní ohniskové vzdálenosti Besselova metodou..... | 30 |
| 3.2 Měření efektivní ohniskové vzdálenosti metodou zpětné odrazivosti..... | 32 |
| 4.0 Výsledky..... | 34 |
| 4.1 Měření tloušťky optických čoček..... | 34 |
| 4.2 Měření efektivní ohniskové vzdálenosti Besselova metoda..... | 35 |
| 4.3 Měření ohniskové vzdálenosti metodou zpětného odrazu..... | 37 |
| 4.4 Měření mřížkové konstanty..... | 38 |

| | |
|--|-----------|
| 4.5 Měření odrazné difrakční mřížky..... | 40 |
| 5.0 Diskuze | 41 |
| 6.0 Závěr..... | 42 |
| 7.0 Literatura..... | 42 |

Úvod

Cílem práce bylo připravit a ověřit metody měření parametrů optických prvků, potřebné například pro reklamace, rozpoznání neoznačených optických elementů, atd.

Motivace

- Při nákupu optického materiálu se spoléháme na data, které nám poskytne výrobce. Tyto data je potřeba ověřit, např. kvůli reklamacím
- Při používání optických prvků různými osobami dochází na pracovišti k nedbalostem (např. nepopsaný držák tj. zapomene se která čočka je v držáku atd.) uklízení optického elementu do špatné přihrádky apod.
- Identifikace parametrů optických elementů ze starých přístrojů.
- Parametry optických prvků jsou udávány jen pro určité podmínky (např. pro danou vlnovou délku atd.)

K zjištění potřebných parametrů nám napomůže věda známá jako Optika. Optika je vědní obor, který se zabývá světlem, jeho vznikem a šířením v různých prostředích, vzájemné působení světla a látky. Světlo je ta část elektromagnetického vlnění, která je vnímatelná lidským okem. Geometrická optika je z optiky historicky nejstarší vědní obor, zavádí pojem paprsků, které položily základy pro optické zobrazování, například pomocí čoček či zrcadel. Geometrická optika je disciplína postavená na třech nejdůležitějších zákonech: zákonu přímočarého šíření světla, zákonu odrazu světla a zákonu lomu světla. Světlo je zde popsáno pomocí paprsků, které se šíří v různých optických prostředích podle geometrických pravidel. Náplň geometrické optiky je určení polohy a směru optických paprsků. Proto je využita při studiu zobrazování. Předmět, který z každého svého bodu vysílá svazek paprsků, který je následně vychýlen optickým prvkem do odpovídajícího bodu obrazu. Ideální optický prvek nebo ideální optická soustava neexistuje. Proto optický přenos obrazu není nikdy přesnou kopií předmětu. Každý reálný optický prvek vykazuje nepřesnosti a vady při přenášení světla z předmětové roviny do obrazové roviny. Tyto nepřesnosti a vady můžeme maximálně zmírnit, ale ne se jich úplně zbavit. Mezi vady zobrazování můžeme zařadit zvětšení obrazu oproti předmětu, rozmazání obrazu způsobené nedokonalým zaostřením a také difrakcí optických vln. Optické vady a zkreslení vyskytující se v reálné optické soustavě negativně ovlivňují kvalitu přeneseného obrazu. Proto je zapotřebí soustředit se na minimalizaci těchto negativních vad přenosu a zobrazování obrazu.

1.0 Proměřované optické elementy

Pro tuto práci mi byly k charakterizování dány následující optické elementy. Čočky, mřížky transmisní a odrazné.

1.1 Optické čočky

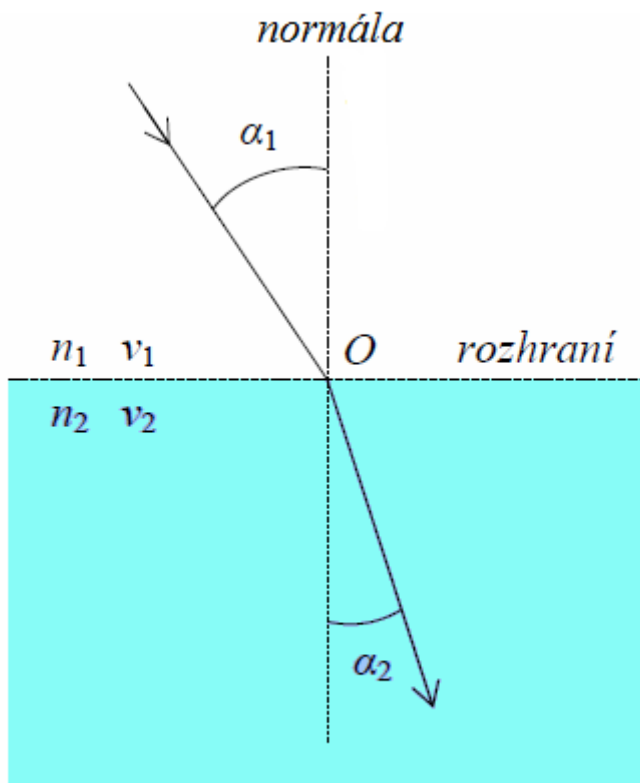
Čočka je transparentní těleso se dvěma lámavými plochami, nejčastěji kulových, popřípadě jedné kulové a jedné rovinné plochy. Účelem čočky je ovlivnění šíření viditelného světla, ale také infračerveného a ultrafialového záření. Hlavním z parametrů optické čočky je index lomu, který ovšem závisí na materiálu, ze kterého je čočka vyrobena. Index lomu je vždy větší než 1. Další z parametrů, které se uvádí je koeficient absorpce, který se blíží 0 a poloměry obou povrchů čoček. Pro popis jak se šíří paprsky optickou čočkou slouží geometrická optika. Kromě geometrické optiky známe i svazkovou optiku, fotometrii, radiometrii, vlnovou optiku, kvantovou optiku, koherenční optiku. Převzato[1][2]

1.2 Vlastnosti optických čoček

Paprsek, který dopadá na libovolné místo povrchu čočky se uvnitř čočky a na protilehlém povrchu čočky láme. Malá část paprsku cca 4% se odráží zpět. Pro zmenšení odrazivosti se používají antireflexní vrstvy, které jsou závislé na vlnové délce světla. Lom paprsku na rozhraní dvou optických prostředí určuje Snellův zákon lomu [1][2]

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}, \quad (1.1)$$

Kde n_1 a n_2 jsou indexy lomu těchto dvou prostředí, α_1 a α_2 zastupují úhly dopadajícího a lomeného paprsku. v_1 a v_2 zastupují rychlosti šíření vlnění v daném prostředí. Lom paprsku na rovinném rozhraní dvou optických prostředí je znázorněn na (obr. 1.1)



Obr. 1.1 Paprsek lámající se z prostředí s indexem lomu n_1 do prostředí s indexem lomu n_2 [2]

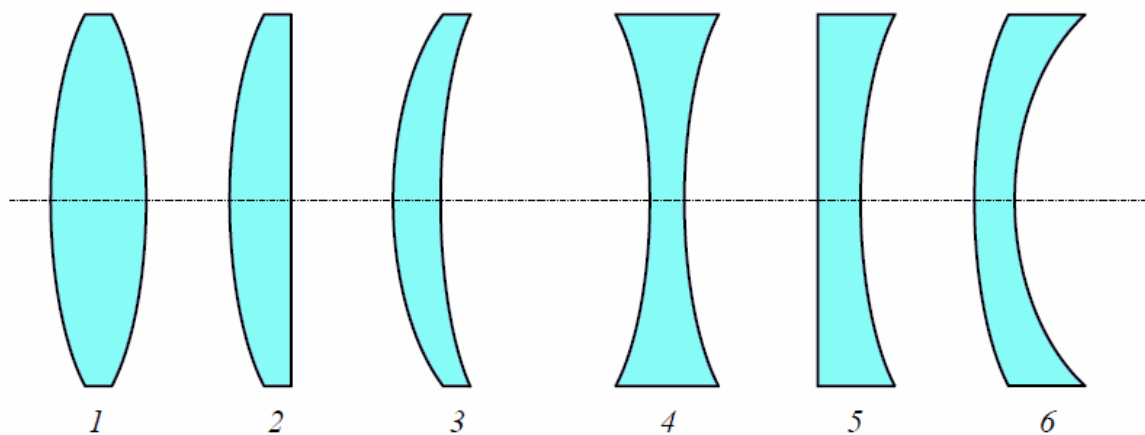
Ze Snellova zákona vyplývá, že při šíření světla z prostředí opticky řidšího do prostředí opticky hustšího ($n_1 < n_2$) se paprsky lámou směrem k normále. Při opačné situaci, kdy paprsek prochází z hustšího do řidšího optického prostředí ($n_1 > n_2$) se paprsky lámou směrem od normály.

Popis principu čočky.

1.3 Základní druhy optických čoček

Spojné čočky (konvergentní) – způsobují změnu rovnoběžného optického svazku na sbíhavý, což znamená, že paprsky se za čočkami protínají v jednom bodě.[2]

Rozptylné čočky (divergentní) – mění optický paprsek na rozbíhavý, který nám zdánlivě vychází z ohniska před čočkou. Tzn.vytvářejí nám zdánlivý obraz. [2]



Obr 1.2 Nejvíce používané (základní) druhy optických čoček (1 –bikonvexní, 2 –plankonvexní, 3 –konkávkonvexní, 4 – bikonkávni, 5 – plankonkávni, 6 – konvexkonkávni). Spojné čočky s označením 1-3 a rozptylné čočky s označením 4-6. Převzato a upraveno[2]

1.4 Materiály optických čoček

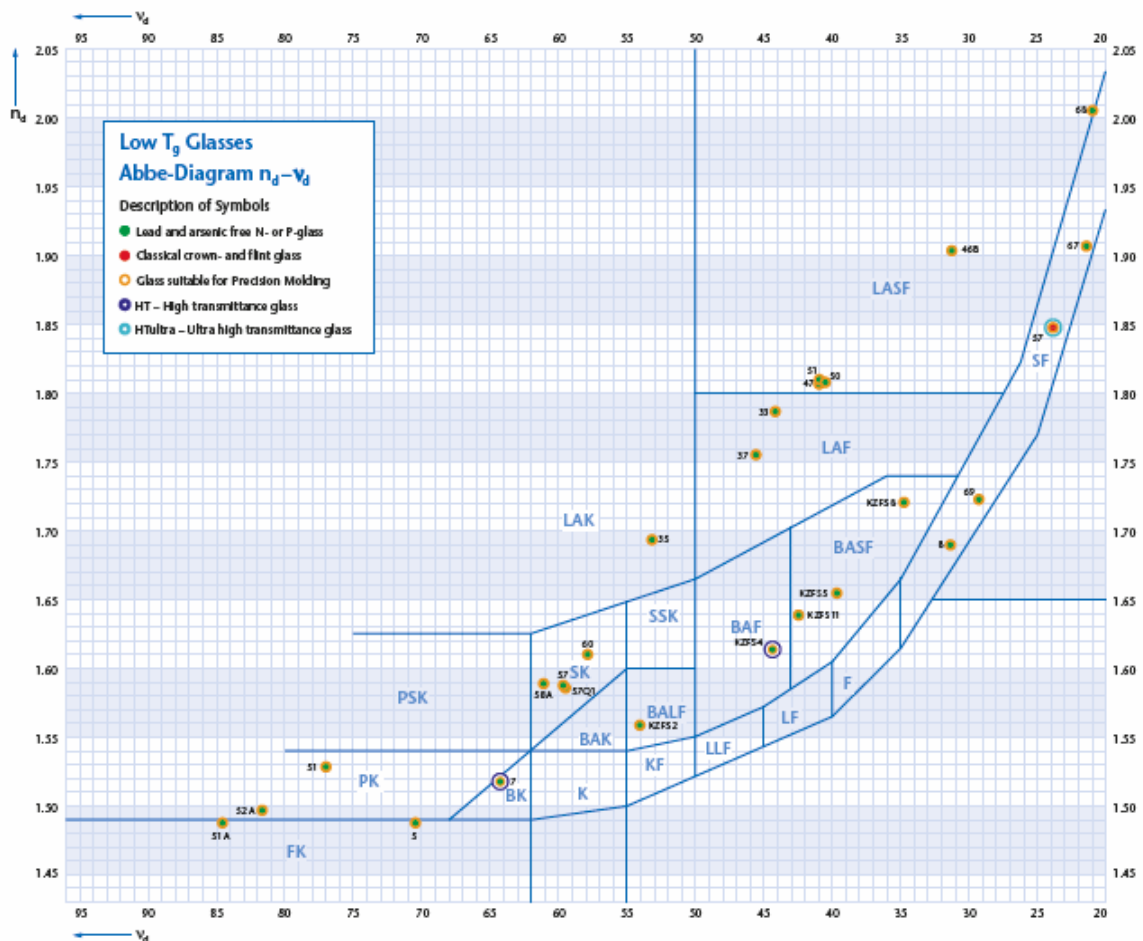
Materiály optických čoček dělíme na

- Organické
- Minerální

Minerální materiál

V této skupině jsou čočky vyrobené z přírodních materiálů – ze skla. Sklo můžeme charakterizovat jako tvrdý, křehký a špatně vodivý materiál. Pokud je tento materiál vystaven prudkým teplotním výkyvům (zejména chlazení), tak praská. Sklo nemá pevný bod tání, pouze se zahříváním plynule snižuje jeho viskozita. Sklo dělíme na **korunové** – draselnovápenaté – nízkoindexové (Abbelovo číslo > 55) a **flintové** sklo – draselnoolovnaté –vysokoindexové (Abbelovo číslo < 55)

Optické sklo vzniká protavením anorganických složek. Optické sklo není teda krystalické a zcela homogenní. Na optické sklo jsou kladeny vysoké požadavky. Musí být naprosto čisté, průhledné a izotropní s co nejmenší disperzí. Aby na optickém skle bylo dosaženo požadovaných optických vlastností, musí být suroviny určené k výrobě skla zcela čisté, přesně navážené a ve správném poměru. Skla a jiné optické materiály vykazují *disperzi* (tj. *barevný rozptyl indexu lomu*) to znamená změny indexu lomu světla v závislosti na vlnové délce procházejícího světla. Se stoupající vlnovou délkou λ (od fialové části spektra k červené části spektra) index lomu klesá. Funkce $n(\lambda)$ je specifická pro daný druh skla.[4]



Obrázek 1.2 Na grafu jsou zobrazeny druhy optických skel. Námi měřené optické prvky nesou označení skla BK-7 .[3]

1.5 Optické vady

(neexistuje čočka, která by zobrazovala ideálně – při zobrazování předmětů vznikají různé vady a deformace)[1]

Otvorová vada - tato optická vada vzniká, když sférickou čočkou prochází široký svazek paprsků, přičemž paraxiální paprsky se za čočkou setkají v jiném bodě než okrajové paprsky svazku, které procházejí okrajem čočky. Vada má za následek, že obrazem bodu není bod, ale rozmazaná kruhová ploška.

Koma – je optická vada čočky, při níž dopadá na čočku široký svazek paprsků, který není rovnoběžný s optickou osou. Paprskový svazek po průchodu čočkou nabývá nesouměrného tvaru, při kterém je obrazem bodu ploška protáhlá jediným směrem s nerovnoměrným rozdělením intenzity světla. (tzv. kometa)

Astigmatismus – tato vada vzniká na sférických čočkách, protože mají rozdílné ohniskové vzdálenosti, pro paprsky v různých rovinách.

Zkreslení obrazu – o zkreslení obrazu můžeme mluvit tehdy, pokud je zvětšení vnějších částí předmětu odlišné od zvětšení vnitřních částí. Jestliže jsou vnější části předmětu zvětšeny více jedná se o poduškovité zkreslení

Barevná vada – ohnisková vzdálenost čočky je závislá na indexu lomu a ten je různý podle barvy použitého světla (vlnové délky), tj. na disperzi. Bílé světlo je však složeno z celého spektra různých barev (tj. různých vlnových délek) a tudíž se při průchodu čočkou láme trochu jinak.[4][1][5]

1.6 Využití optických čoček

Jako první využití našli optické čočky v obroučkách dioptrických brýlí nebo jako lupy na čtení. Dále našli uplatnění v mikroskopech, lupách a dalekohledech. Teleskopy, mikroskopy a dalekohledy dokonce obsahují dvě optické čočky (objektiv a okulár) které jsou v tubusu umístěny za sebou. Významnou úlohu optické čočky mají i v oblasti laserů. Laser jakožto zdroj koherentního a monochromatického světla fokusovaného a vyzařováno v podobě úzkého svazku našel využití v mnoha oblastech. V průmyslu se využívá schopnosti laseru jakožto řezného nástroje, navádění, měření atd. V elektronice pro komunikaci (např. optické kabely) a zapisování pomocí optické mechaniky na cd, dvd, blu-ray, tisk na laserových tiskárnách. V lékařství pro oční operace, vyšetřování, atp.

2.0 Metody měření efektivní ohniskové vzdálenosti

2.1 Znaménková konvence

- 1- Optickou soustavu kreslíme vždy tak, že paprsky procházejí touto soustavou z leva do prava.
- 2- předmětová vzdálenost a je kladná za předpokladu, že předmět leží vlevo od rozhraní, v opačném případě je záporná.
- 3- obrazová vzdálenost má znaménko kladné, je-li ve směru paprsků procházejících čočkou (tj. obraz vzniká „za“ čočkou), jestliže obraz vzniká ve stejné části prostoru jako leží předmět, pak má obrazová vzdálenost znaménko záporné.
- 4- Výška předmětu i obrazu mají znaménka kladná za podmínky, že leží nad optickou osou. V opačném případě jsou znaménka záporná. Jestliže jsou obě znaménka stejná, jedná se, o

obraz vzpřímený. Pokud jsou znaménka opačná, jedná se o obraz převrácený.

2.2 Měření ohniskové vzdálenosti pomocí přímé metody.

Měření ohniskové vzdálenosti přímou metodou vychází ze zobrazovací rovnice, jejíž tvar je

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'} \quad (2.2.1)$$

Kde a' reprezentuje obrazovou vzdálenost, a značí předmětovou vzdálenost, f' značí obrazovou ohniskovou vzdálenost.

U spojných čoček platí $f' > 0$, a u rozptylných čoček $f' < 0$.

U rovnice (1) je použita znaménková konvence. Poloha čočky je brána jako nulový bod a tak všechny naměřené vzdálenosti nalevo od čočky píšeme se záporným znaménkem.

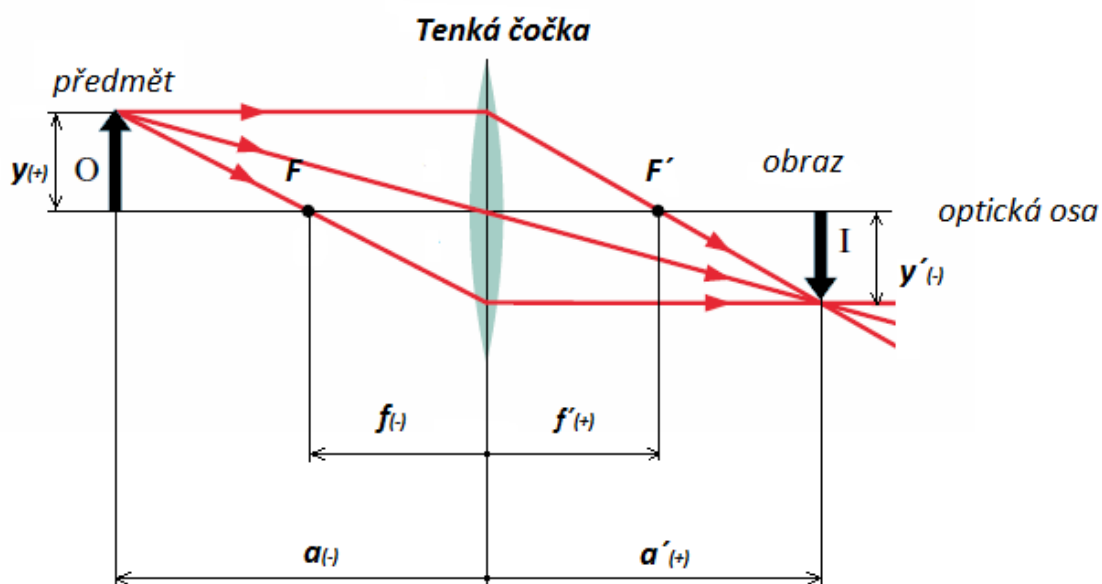
Z rovnice (rovnice1) lze upravami odvodit vztah

$$f' = \frac{a \cdot a'}{a - a'} \quad (2.2.2)$$

Jenž platí jak pro ohniskovou vzdálenost spojky i rozptylky. Rovnice však platí jen pro ideální čočku. U skutečné (reálné) čočky se vyskytuje celá řada vad, který způsobují odchylky od ideálního stavu.

Průchod paprsků tenkou čočkou (Obr. 2.2.1)

Převzato a upraveno [2]



Obr. 2.2.1 - Průchod paprsků tenkou čočkou. (y – velikost předmětu, y' - velikost obrazu, a –

předmětová vzdálenost, a' - obrazová vzdálenost, F – předmětové ohnisko, F' - obrazové ohnisko, f – předmětová ohnisková vzdálenost, f' - obrazová ohnisková vzdálenost.

Měření pomocí přímé metody se provádí na optické lavici. Kde jako předmět můžeme použít například vlákno žárovky nebo čočku laseru. Jako obraz použijeme stínítko. Po-té hledáme takovou polohu čočky na optické lavici aby nám na stínítku vznikl ostrý obraz předmětu. Tímto získáme předmětovou vzdálenost značenou (a) a rovněž i obrazovou vzdálenost značenou (a'). Pokud tyto změřené hodnoty dosadíme do rovnice (2.2.2) můžeme vypočítat obrazovou ohniskovou vzdálenost f , která je velikostí totožná jako předmětová ohnisková vzdálenost f . Přesnější změření vzdálenosti a a a' je v případě měření tlusté čočky značně nepřesné. Proto je přímá metoda měření ohniskové vzdálenosti vhodná pouze pro relativně tenké čočky.[2]

2.3 Abbeova metoda měření efektivní ohniskové vzdálenosti optických čoček

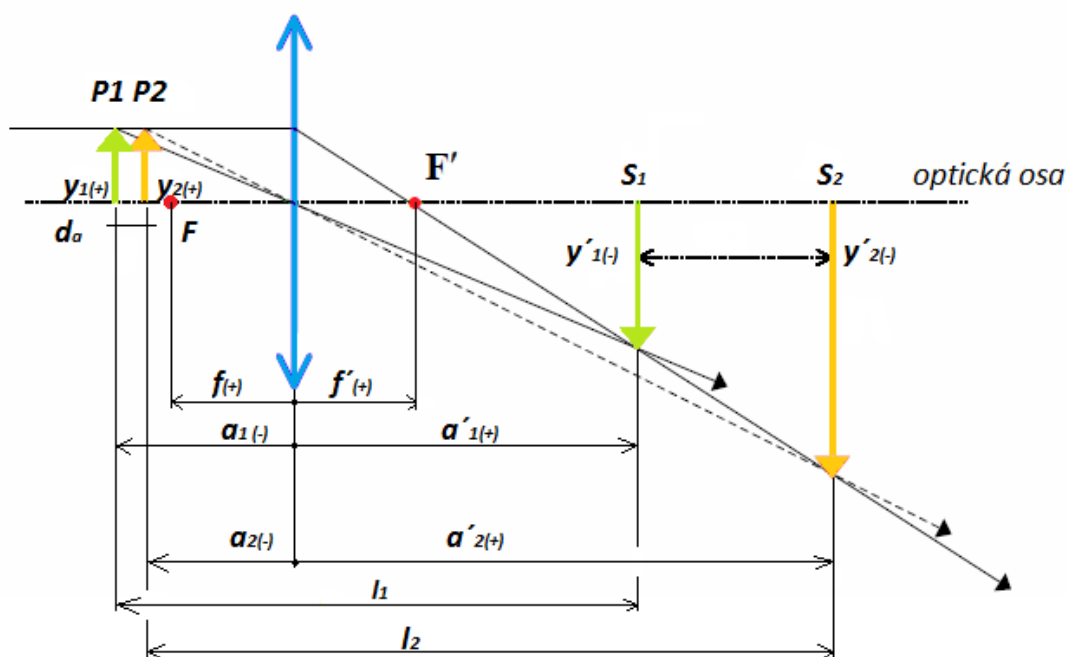
Abbeova metoda je založena na měření příčného zvětšení. Na rozdíl od metody přímé nevyžaduje měření předmětové (obrazové) vzdálenosti a a a' jež je u čoček s krátkou ohniskovou vzdáleností z pravidla jen přibližné. (neznáme přesnou polohu hlavních rovin – měření je jen přibližné od středu čočky)[6]

Princip měření pomocí Abbeova metody ohniskové vzdálenosti je ukázán na (Obr. 2.3.1) Použita je znaménková konvence z části (2.1).

Pro danou polohu předmětu P_1 a stínítka S_1 existuje při splnění podmínky $l > 4f$ konkrétní poloha čočky, při níž vznikne na stínítku ostrý zvětšený a převrácený obraz předmětu (l_1 je vzdálenost předmětu v poloze P_1 od stínítka, f je ohnisková vzdálenost měřené čočky).

Jako předmět budeme brát čočku uvnitř laseru. Čočku, kterou chceme podrobit měření umístíme do takové polohy, abychom na stínítku dostali ostrý obraz předmětu (ostrý obraz čočky uvnitř laseru). Velikost našeho předmětu y_1 je v tomto případě šířka svazku laseru, kterou následně změříme posuvným měřidlem. Velikost obrazu y'_1 určíme tak, že na stínítku změříme (pravítkem, posuvným měřidlem) šířku dopadajícího svazku, která je zvětšena měřenou čočkou. Po změření daných hodnot předmětu y_1 a jeho obrazu y'_1 můžeme následně určit příčné zvětšení. [6]

$$m_1 = \frac{y'_1}{y_1} \quad (2.3.1)$$



(Obr. 2.3.1) Popis Abbeova metody měření ohniskové vzdálenosti (P_1, P_2 poloha předmětu S_1, S_2 poloha měřeného obrazu, y'_1 a y'_2 velikost měřeného obrazu, y_1 a y_2 velikost předmětu, a_1 a a_2 předmětová vzdálenost, a'_1, a'_2 -obrazová vzdálenost, F - ohnisko předmětu, F' - ohnisko obrazu, f - ohnisková vzdálenost předmětu, f' - ohnisková vzdálenost obrazu, l_1 – vzdálenost předmětu v poloze P_1 od stínítka, l_2 – vzdálenost v poloze P_2 od stínítka, d_a – vzdálenost mezi polohou předmětu P_1 a polohou předmětu P_2 , d'_a – vzdálenost mezi polohou obrazu S_1 a polohou obrazu S_2 . [6]

Nejprve posuneme laser (předmět) do polohy P_2 . Poloha P_2 je vzdálenost která je přesně změřená.

$$d_a = a_2 - a_1 \quad (2.3.2)$$

Čočku kterou měříme ovšem ponecháme v nezměněné poloze a hledáme takovou polohu stínítka S_2 , při které se nám ukáže na stínítku ostrý zvětšený obraz předmětu. Velikost obrazu y'_2 stejně jako velikost obrazu y'_1 změříme měřidlem. Po změření velikosti obrazu y'_2 určíme zvětšení.

$$m_2 = \frac{y'_2}{y_2} \quad (2.3.3)$$

Dále můžeme zjistit vzdálenost d'_a kde platí vztah

$$d'_a = a'_2 - a'_1 \quad (2.3.4)$$

Ohnisková vzdálenost se spočítá ze vztahů

$$f' = \frac{a'_1}{1 - m_1} \quad (2.3.5)$$

$$f' = \frac{a'_2}{1 - m_2} \quad (2.3.6)$$

$$f' = \frac{m_1 \cdot a_1}{1 - m_1} \quad (2.3.7)$$

$$f' = \frac{m_2 \cdot a_2}{1 - m_2} \quad (2.3.8)$$

Po úpravách rovnic (2.3.5) a (2.3.6) a následný dosazení do rovnice (2.3.4) dojdeme ke vztahu

$$d'_a = a'_2 - a'_1 = f'(1 - m_2) - f'(1 - m_1) = f'(m_1 - m_2) \quad (2.3.9)$$

Dále budeme pokračovat v úpravách vztahů (2.27) a (2.28) a následně je dosadíme do vztahu

$$d_a = a_2 - a_1 \quad (2.3.2)$$

a získáváme vztah

$$d_a = a_2 - a_1 = f' \left(\frac{1}{m_2} - 1 \right) - f' \left(\frac{1}{m_1} - 1 \right) = f' \left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_1} \right) \quad (2.3.10)$$

Konečný hledaný vztah pro výpočet ohniskové vzdálenosti f' získáme úpravami ze vztahu (2.3.9) a (2.3.10), tedy

$$f' = \frac{d'_a}{m_1 - m_2} \quad (2.3.11)$$

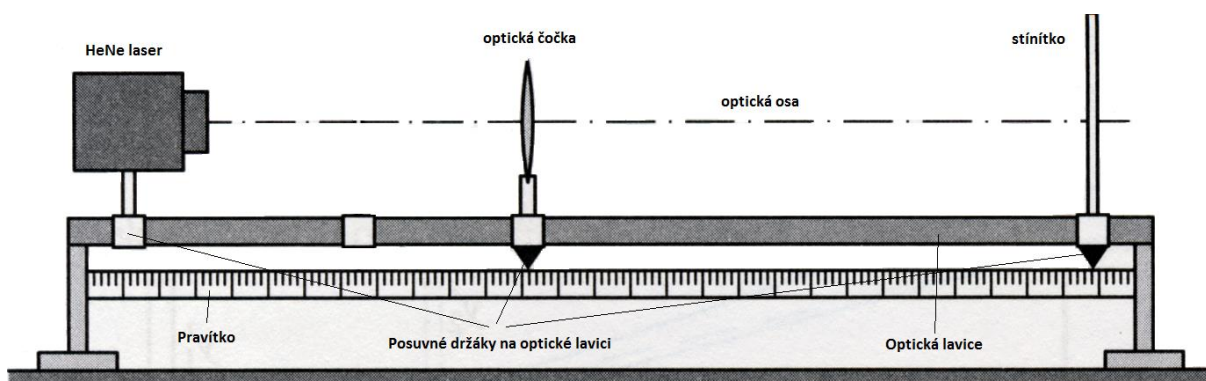
Respektive ze vztahu

$$f' = \frac{d_a}{\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_1}} \quad (2.3.12)$$

d_a značí vzdálenost mezi polohou předmětu P_1 a polohou předmětu P_2 , hodnoty m_1 a m_2 zastupují příčná zvětšení, d'_a reprezentuje vzdálenost mezi polohou obrazu S_1 polohou předmětu S_2 .

2.3.1 Postup při měření ohniskové vzdálenosti pomocí Abbeova metody

Měření pomocí Abbeovy metody provádíme na optické lavici. Optická lavice je vybavena posuvnými držákama na kterých je umístěn HeNe laser o vlnové délce $632,8 \text{ nm}$, měřená čočka a stínítko. Laserový svazek, jenž je rovnoběžný s optickou osou, prochází skrz měřenou optickou čočku. Obraz předmětu, který tvoří čočka uvnitř laseru vytvořený měřenou optickou čočkou je zobrazen na stínítku. Pomocí měřidla na optické lavici zjistíme vzdálenost mezi předmětem, měřenou čočkou a obrazem na stínítku.



(obr 2.3.1) Pracoviště pro měření ohniskové vzdálenosti Abbeovou metodou. Převzato a upraveno[7]

Abbeova metoda je vhodná i pro měření silnějších optických čoček, jelikož lze pro měření dostatečně přesně změřit vzdálenost mezi d_a , a d'_a .

Nevýhoda v Abbeově metodě tkví v měření velikosti předmětu, respektive v měření obrazu což se ukazuje při měření laserového svazku jako značně nepřesné. Tato metoda je vhodnější pro měření vlákna žárovky které zaostříme na stínítku. Vlákno žárovky díky své velikosti lze mnohem lépe změřit než laserový svazek. Proto volíme při použití laseru metodu Besselovu, která při měření nevyžaduje měřit velikost předmětu a velikost obrazu.

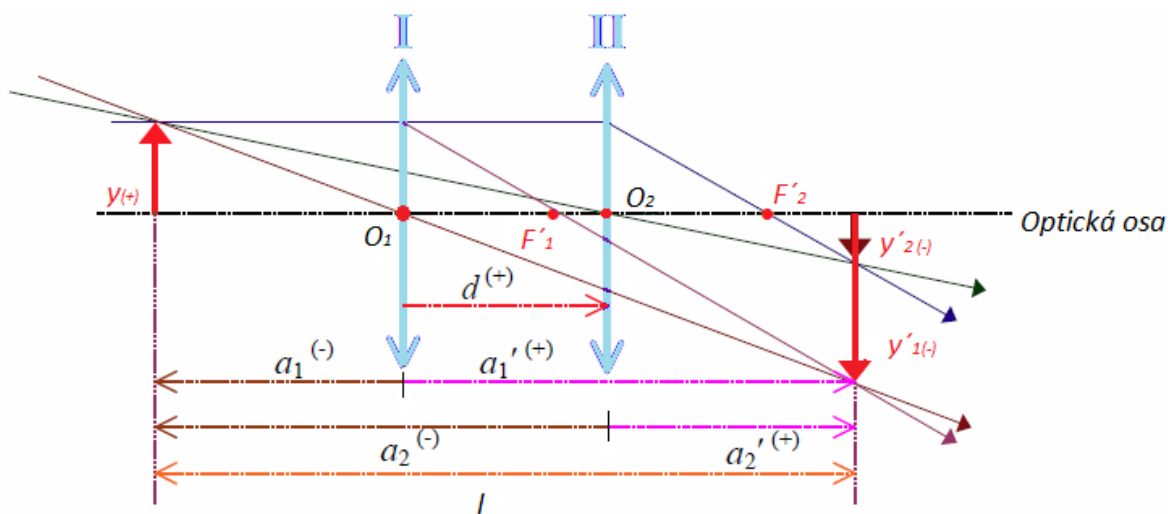
2.4 Besselova metoda měření ohniskové vzdálenosti optických čoček

Besselova metoda vychází ze zobrazovací rovnice jež má tvar

$$\frac{1}{\acute{a}} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'} \quad (2.4..1)$$

Princip měření ohniskové vzdálenosti Besselovou metodou je zobrazen na (obr. 2.4.1). V této metodě je použita znaménková konvence z části (2.1). Znaménka jsou uvedena u vzdáleností v závorkách. Metoda je založena na skutečnosti, že pro jistou pevnou vzdálenost (l) předmětu od stínítka existují dvě polohy čočky (poloha I .) a (poloha II .) při kterých vzniká skutečný ostrý obraz na stínítku. K dosažení toho musíme splnit podmínku ($l > 4f$) kde písmeno f zastupuje ohniskovou vzdálenost čočky. Jestliže by nebyla splněna tato podmínka a vzdálenost ($l = 4f$) vznikl by na stínítku jen jeden stejně velký, ale obrácený obraz. Pokud by nastala situace ($l < 4f$) potom by obraz na stínítku vůbec nevznikl.

Na obrázku (Obr. 2.31) je vidět že v (poloze I) je obraz předmětu zvětšený a v (poloze II) je obraz naopak zmenšený. Polohy čočky I . a II . jsou symetricky položeny vzhledem ke středu vzdálenosti l mezi předmětem a stínítkem. Předměťová vzdálenost a_1 v první poloze čočky je rovna záporně vzaté obrazové vzdálenosti a_2 v druhé poloze čočky a naopak. To vyplývá z tak zvané záměnnosti chodů paprsků, podle které lze na optické se spojné čočky navzájem vyměnit polohy předmětu a obrazu a s tím i symetricky polohu čočky samé.[6]



(Obr. 2.4.1) poloha čočky I, II , y - velikost předmětu, y'_1 - velikost obrazu v poloze (I)
 y'_2 - velikost obrazu v poloze (II .) a_1, a_2 – předmětová vzdálenost v poloze čočky (I . a II .)
 a'_1, a'_2 – obrazová vzdálenost v poloze čočky (I . a II .) F'_1, F'_2 – obrazové ohnisko v poloze
 čočky (I . a II .) l - vzdálenost předmětu od stínítka d - vzdálenost mezi polohou čočky (I . a II .)
 O_1 a O_2 – poloha na optické ose v které vzniká ostrý obraz na stínítku
 Převzato a upraveno [6]

Z (obr. 2.4.1) Pro vzdálenost předmětu od stínítka (l) lze odvodit vztah

$$l = a'_1 - a_1 \quad (2.4.2)$$

Pro výpočet vzdálenosti (d) mezi dvěma polohami čočky ($I.$ a $II.$) platí vztah

$$d_b = a'_1 - a'_2 = a'_1 + a_1 \quad (2.4.3)$$

Pro výpočet předmětové vzdálenosti platí vztah

$$a_1 = \frac{d_b - l}{2} \quad (2.4.4)$$

vztah pro obrazovou vzdálenost

$$a'_1 = \frac{l + d_b}{2} \quad (2.4.5)$$

Po dosazení vztahů pro výpočet předmětové vzdálenosti a obrazové vzdálenosti do zobrazovací rovnice dostaneme vztah pro ohniskovou vzdálenost f' a ten je

$$f' = \frac{a \cdot a'}{a - a'} = \frac{(l + d_b) \cdot (l - d_b)}{4 \cdot l} \quad (2.4.6)$$

Patříčnou úpravou zobrazovací rovnice (2.4.1) získáme hledaný vztah pro výpočet ohniskové vzdálenosti čočky

$$f' = \frac{l^2 - d_b^2}{4 \cdot l} \quad (2.4.7)$$

l značí polohu předmětu od stínítka. d_b značíme vzdálenost mezi oběma polohami čočky (poloha $I.$ a $II.$).

2.4.1 Postup měření ohniskové vzdálenosti pomocí Besselova metody

Měření ohniskové vzdálenosti, pomocí Besselova metody, provádíme na optické lavici.

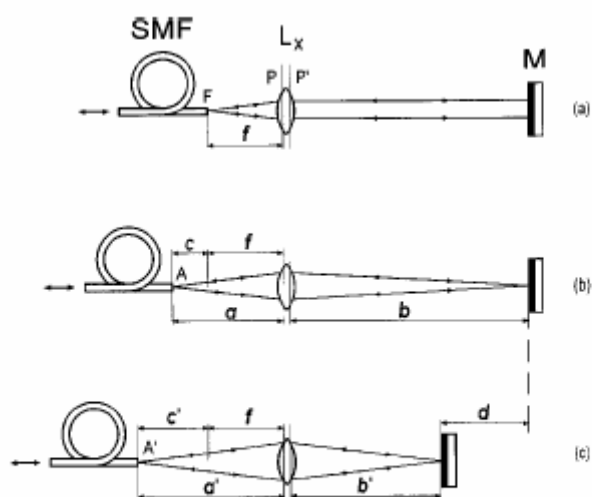
Optická lavice je osazena HeNe laserem o vlnové délce $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ dále je na optické lavici měřená optická čočka a stínítka, na kterém vzniká obraz. Jako předmět budeme brát čočku uvnitř laseru. Postupovat při měření budeme tak, že zvolíme takovou vzdálenost l mezi laserem a stínítkem abychom splnili podmínku (minimálně čtyřnásobek ohniskové vzdálenosti měřené čočky). Námí zvolenou vzdálenost (l) si poznačíme a dale ji již nebudeme upravovat. Poté čočku umístíme do polohy $I.$ tak, abychom na stínítku dostali

ostrý obraz předmětu. Poté si polohu čočky poznačíme. Následně polohu čočky přesuneme do polohy *II.* tak, aby jsme na stínítku opět dostali ostrý obraz předmětu. Tuto polohu čočky si opět poznačíme. Po změření vzdálenosti mezi polohou *I.* a polohou *II.* dostaneme hledanou vzdálenost d_b , kterou následně použijeme pro výpočet ohniskové vzdálenosti měřené čočky. Námi naměřené hodnoty d_b a l dosadíme do vztahu (2.4.7) a vypočteme ohniskovou vzdálenost (f') měřené čočky.

Z rovnice (2.4.7) je jasné, že pro výpočet ohniskové vzdálenosti pomocí Besslova metody nám postačí jen dvě hodnoty (l – vzdálenost předmětu od stínítka a d_b vzdálenost mezi polohou I_1 čočky. a polohou I_2 čočky.)

Besselova metoda je vhodná jak pro klasický zdroj světla (vlákno žárovky) tak i pro měření pomocí laseru, kde zaostřujeme na čočku laseru. Metoda měření je vhodná jak pro tenké čočky tak pro tlusté čočky.[4]

2.5 Metoda zpětného odrazu



(Obr. 2.5.1a)

Zachycuje nastavení systému. Na kterém zavádíme zpětný odraz paprsku od zrcadla přes měřenou čočku (L_x) do výchozího zdroje optického vlákna.[8]

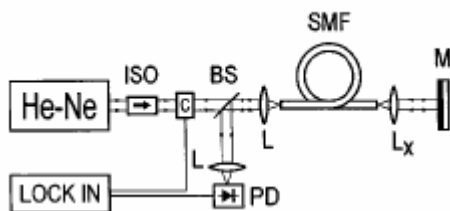
(Obr. 2.5.1b)

Na obrázku hledáme polohu (a) - vzdálenost čočky od konce optického vlákna, a polohu (b) – vzdálenost zrcadla od čočky, při které nám na zrcadle vznikne bod předmětu.[8]

(Obr. 2.5.1c)

Na obrázku změňíme polohu zrcadla (M) o libovolnou vzdálenost (d). Poté hledáme takovou

polohu měřené čočky (c') při které vznikne na zrcadle obraz předmětu v podobě bodu. A odráží se zpět do konce optického vlákna.[8]



Obr. 2.5.2 :Schéma zpětné odrazivosti s pomocí sing-modového optického vlákna. He-Ne laser $\lambda = 632,8$ nm, *ISO* - izolátor, *C* – optický chopper, *BS* – dělič paprsku, *L* – určená optická čočka, *SMF* – (single – mode optical fiber) optické vlákno umožňující přenos pouze jednoho paprsku. L_x – měřená optická čočka, *M* – zrcadlo, *LOCK-IN* - zesilovač, *PD* – fotodioda.[8]

Metoda zpětného odrazu s použitím optického vlákna (single –mode optical fiber) slouží pro nepřímé stanovení efektivní ohniskové vzdálenosti optických prvků.

Princip fungování a optické zařízení metody je uvedeno na (obr. 2.5.1) Metoda je založena na přesném prostorovém umístění ohniska F (obr 2.5.1a) a předmětových bodů A a A' zobrazených na (obr. 2.5.1b) a (obr. 2.5.1c) pro testování optického prvku. Optické vlákno se používá z několika důvodů:

- 1 - slouží jako bodový zdroj světla z laserového zařízení (He-Ne laser).
- 2 - konec optického vlákna slouží jako bod pro zobrazení předmětu.
- 3 - slouží jako bodový přijímač, který je vysoce citlivý na umístění a prostorové posuny zaostřeného zpětného odrazu obrazu z bodu objektu od zrcadla (M)

Pomocí axiálních posunů zajišťujeme relativně snadné hledání předmětu a obrazu na hlavní ose.

2.5.1 Princip metody měření efektivní ohniskové vzdálenosti zpětným odrazem

Ohniskový bod F (obr. 2.5.1a) nalezneme tak, že zavedeme laserový paprsek do konce optického vlákna. Dále tím, že posunujeme konec optického vlákna podél hlavní osy s měřenou

čočkou, dokud nenaleznu maximum intenzity odraženého paprsku a zároveň musí být svazek za čočkou rovnoběžný. Zrcadlo zůstává beze změny polohy.

Objektový bod A (obr. 2.5.1b) je nalezneme tak, že po nalezení ohniska F pohybujeme vláknem od čočky, dokud se odražený paprsek opět nesfokusuje na výstup optického vlákna. V této poloze je konec optického vlákna, jako předmět zobrazen na povrch zrcadla a zpětným odrazem zobrazen zpět na konec optického vlákna.

Zde můžeme použít Gaussovu rovnici

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \quad (2.5.1)$$

$$b = \frac{fa}{(a-f)} \quad (2.5.2)$$

Rovnice (2.5.1) a (2.5.2) spojují neznámou efektivní ohnisková vzdálenost (f) a vzdálenost od předmětu od měřené čočky (a) a vzdálenost obrazu od měřené čočky.

V tomto případě, kdy vzdálenosti jsou měřeny od hlavních rovin P a P' platí rovnice (2.5.1) a rovnice (2.5.2) jak pro tenkou, tak pro tlustou čočku. Vyhneme se tímto lokalizaci hlavní roviny, ale musí být provedena další měření. Zrcadlo M je posunuto do vzdálenosti d (obr. 2.5.1c) ze své původní polohy, která je znázorněna na (obr. 2.5.1a), a (obr. 2.5.1b) Těto nové pozici předmětu bodu A' odpovídají nové vzdálenosti a' a b' (obr. 2.4.1c), které zjistíme dalším axiálním posunutím optického vlákna. Pak po dosažení předmětový vzdáleností z rovnice (2.5.2) do vztahu

$$d = (b - b') \quad (2.5.3)$$

dostáváme:

$$d = f \left[\frac{a}{(a-f)} - \frac{a'}{(a'-f)} \right] \quad (2.5.4)$$

Vezmeme-li v úvahu (obr.2.5.1b) a (obr.2.5.1c)

$$a = (f + c) \quad (2.5.5)$$

a současně platí

$$a' = (f + c') \quad (2.5.6)$$

kde $c = AF$ (obr. 2.5.1b) a $c' = A'F$ (obr. 2.5.1c). Tyto vzdálenosti se nachází mezi předmětovými body A a A' a ohniskovým bodem F . Použitím rovnice (2.5.4) pro efektivní ohniskovou vzdálenost f lze nalézt

$$f = \left(\frac{d c c'}{c' - c} \right)^{1/2} \quad (2.5.7)$$

Tato rovnice může být napsána ještě jiným způsobem. Pokud naměřené vzdálenosti c a c' jsou zastoupené

$$c = (N_1 - N_0) \quad (2.5.8)$$

$$c' = (N_2 - N_0) \quad (2.5.9)$$

Kde hodnoty N_0 , N_1 a N_2 jsou na mikrometru měřené hodnoty axiálního posuvu optického vlákna, kdy body F , A , A' se nacházejí v tomto pořadí, pak by z rovnic (2.5.7), (2.5.8) a (2.5.9) vyšel tvar

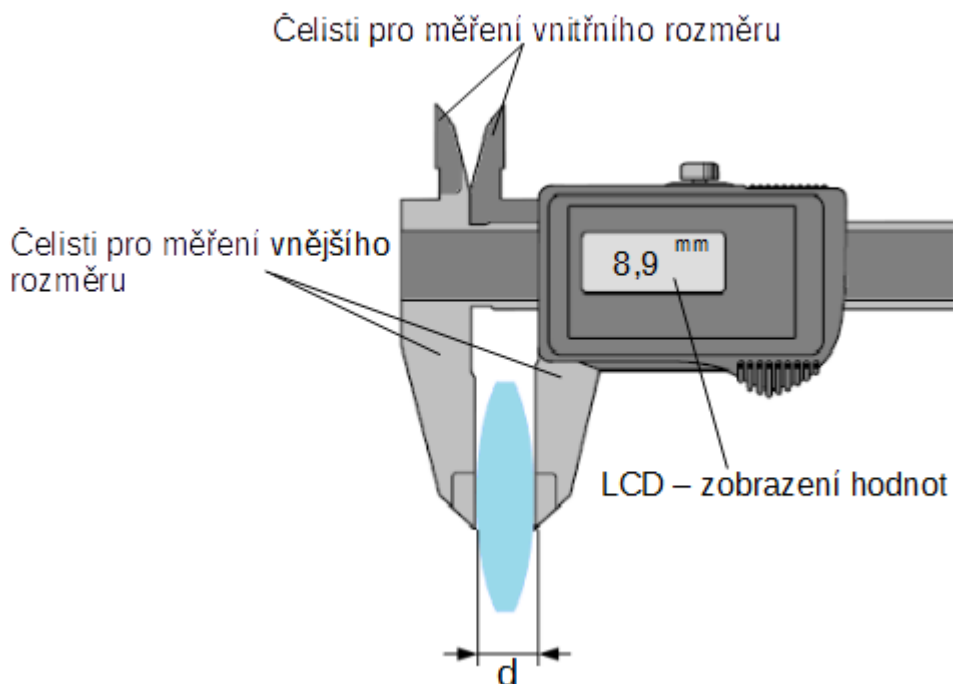
$$f = \left[\frac{d(N_1 - N_0)(N_2 - N_0)}{(N_2 - N_1)} \right]^{1/2} \quad (2.5.10)$$

Metoda zpětného odrazu nám tedy umožňuje nepřímo určit efektivní ohniskovou vzdálenost optických prvků, aniž bychom museli znát přesné hodnoty poloh ohniska, předmětů a odrazů. To znamená, že rozhodující je v hledání efektivní ohniskové vzdálenosti najít tři polohy N_0 , N_1 a N_2 na mikrometrickém posuvu tj. určení dvou vzdáleností c a c' z rovnice (2.5.7) odpovídající nalezení bodů F , A , a A' v daném pořadí a dosazením hodnot do rovnice (2.5.10).

2.6 Měření tloušťky optických čoček

Měření tloušťky (d) spojných optických čoček zjistíme měřením pomocí posuvného měřidla, jak je znázorněno na (obr. 2.6.1). Měření je vhodné provést opakovaně a poté vypočít průměrnou hodnotu změřených výsledků z důvodu snížení možné nepřesnosti měření. Při měření musíme postupovat maximálně obezřetně, aby nedošlo k poškrábání měřených čoček

posuvným měřidlem.



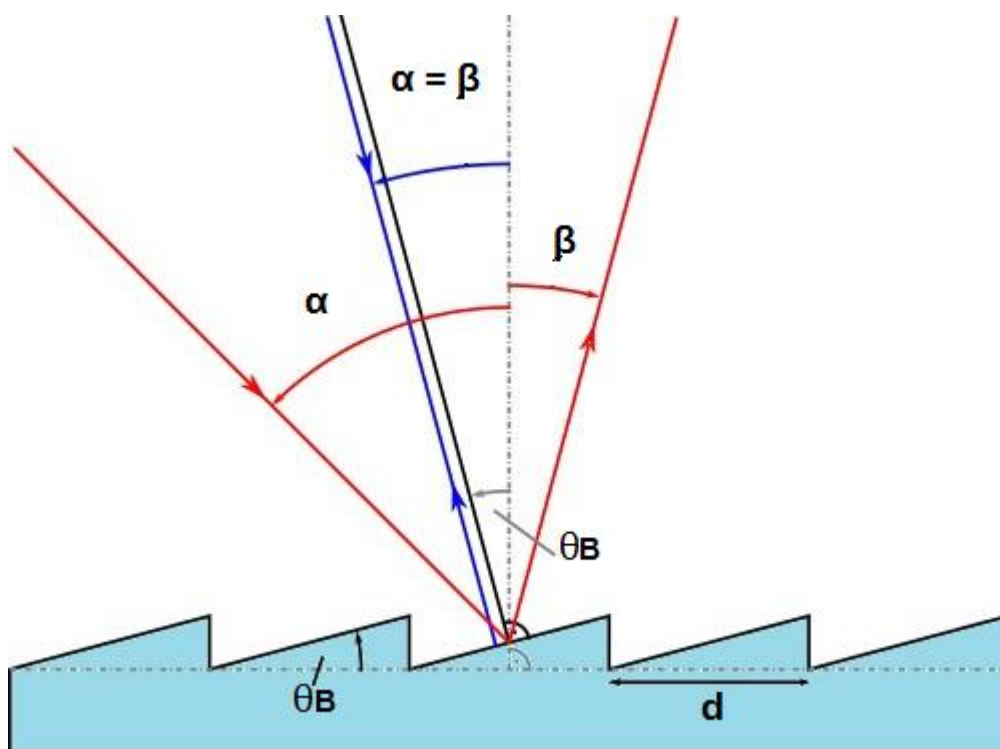
Obr. 2.6.1

Princip měření tloušťky optických čoček pomocí posuvného měřidla.

2.7 Difrakční mřížka

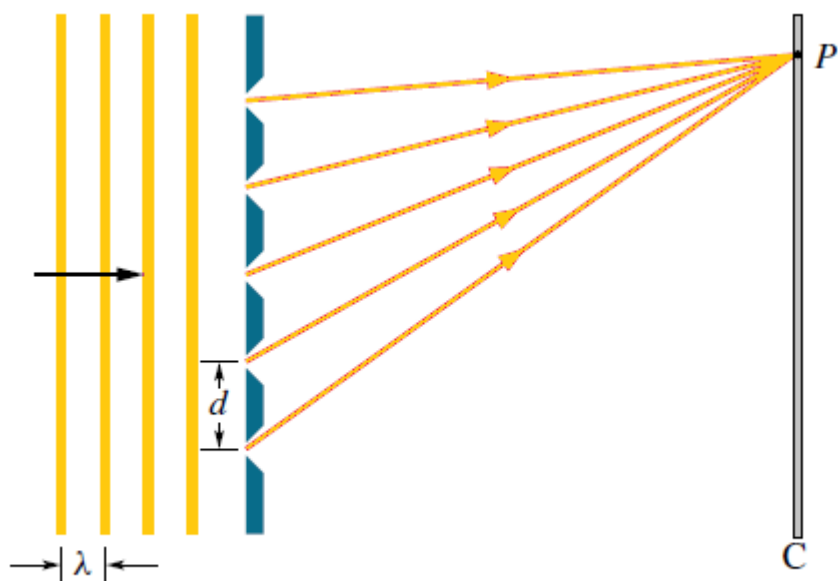
Difrakční mřížka je optický prvek, který je charakterizován pravidelnou řadou rovnoběžných štěrbin nebo vrypů. Difrakční mřížky se vyrábějí buď holograficky, nebo rytím do skleněné podložky, či do kovového filmu napařeného na skleněnou podložku. Ryje se speciálním diamantovým hrotem na speciálních rycích strojích, které dovolují výrobu optických mřížek s hustotou až několik tisíc vrypů na 1 mm.

Odrasné - Pokud jsou vrypy nastaveny tak, že se dopadající světlo zrcadlově odráží ve směru difrakce vlnové délky, pro kterou chceme mřížku optimalizovat (z pravidla v prvním řádu) mluvíme o tzv. *blazeované mřížce* neboli mřížce s pilovým profilem.[9] Viz (Obr. 2.7.1)



Obr. 2.7.1 *blejzovaná* mřížka α – úhel dopadu, β – úhel odrazu, d – mřížková konstanta [9]

Prochází-li štěrbinami mřížky monochromatické světlo, vznikají úzké interferenční proužky, podle kterých lze stanovit vlnové délky světla. Difrakční mřížky jsou nejčastěji použity k určení vlnových délek nejrůznějších světelných zdrojů (např. lamp, hvězd, atd)

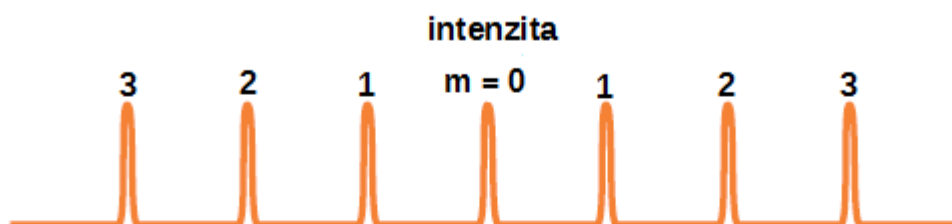


(Obr. 2.7.2) Idealizovaná difrakční mřížka, která má pouze pěti štěrbin. Na vzdáleném stínítku C vzniká interferenční obrazec. λ – vlnová délka světelného svazku, d – vzdálenost mezi sousedními vrypy. Šipky nám znázorňují směr světelného záření.[2]

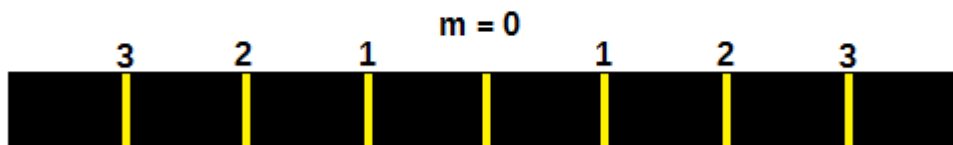
V místě P je světlá čára tehdy, když dráhový rozdíl několika sousedních paprsků je celistvý násobek vlnové délky tj. když

$$d \sin\theta = m\lambda \quad (2.7.1)$$

Kde m značíme čísla řádů a každé celé číslo představuje určitou čáru centrální čára $m = 0$. Čára prvního řádu $m = 1$ atd. $\lambda =$ vlnová délka světla [2]



(Obr. 2.7.3) Rozložení intenzity vytvořené difrakční mřížkou s velkým počtem štěrbin má tvar úzkých píků. Na obrázku jsou značeny číslem (m), které udává řád píku.[2]



(Obr. 2.7.4) Odpovídající světlé proužky, které pozorujeme na stínítku, se nazývají čáry. Jsou rovněž označeny číslem (m). Obrázek ukazuje nultý, první, druhý a třetí řád.[2]

Vzdálenost mezi dvěma štěrbinami se nazývá (d) mřížková konstanta.

Zaujímá-li N štěrbin šířku w , je

$$d = \frac{w}{(N-1)} \quad (2.7.2)$$

2.7.1 Disperze

Pokud nám má mřížka posloužit k rozlišení vlnových délek, které mohou být blízké, musí mřížka dostatečně roztáhnout difrakční obrazec, aby byli difrakční čáry příslušných vlnových délek odděleny. Roztažení (disperze) je definováno vztahem

$$D = \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \quad (2.7.3)$$

Kde je $\Delta\theta$ – úhlová vzdálenost dvou čar, $\Delta\lambda$ – odlišná vlnová délka dvou čar

Čím vyšších hodnot nabývá D tím větší je emisní vzdálenost dvou sousedních čar, jejíž vlnové délky se liší o $\Delta\lambda$. Dále disperze mřížky závisí také na úhlu θ a je dána vztahem

$$D = \frac{m}{d \cos\theta} \quad (2.7.4)$$

Pokud chceme mít vysokou disperzi, musíme používat mřížky s malou mřížkovou konstantou (d) a pracovat ve vysokém řádu (m).[2]

2.7.2 Rozlišovací schopnost

Abychom mohli rozlišit spektrální čáry blízkých vlnových délek, musí být čáry co možná nejužší. Tj. mřížka musí mít vysokou rozlišovací schopnost R . Čím je hodnota R vyšší tím blíže mohou být emisní čáry u sebe. (Tak aby se dali ještě rozlišit)

Rozlišovací schopnost mřížky je dána vztahem

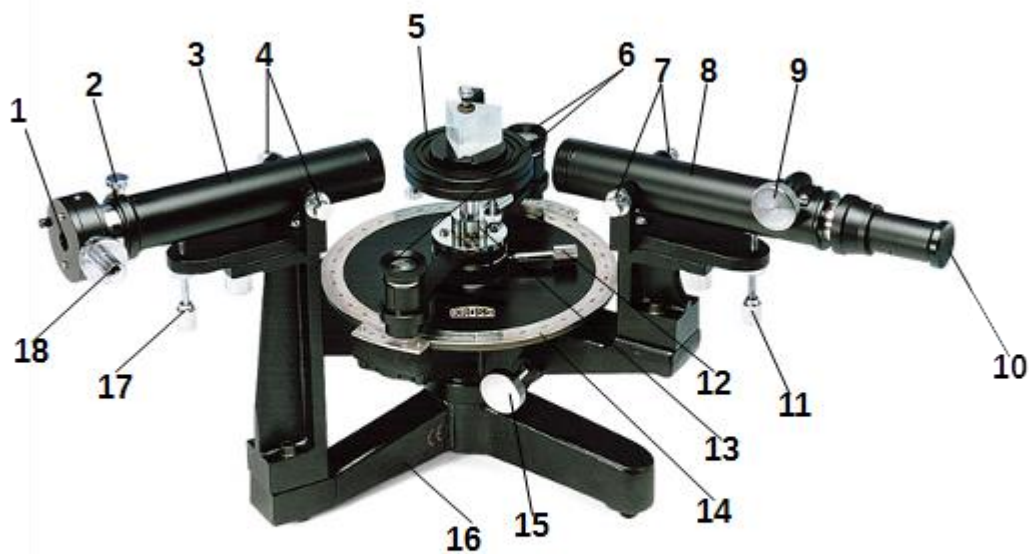
$$R = N m \quad (2.7.5)$$

Abychom dosáhli co možná nejvyšší rozlišovací schopnosti mřížky, musí mít mřížka mnoho vrypů.

2.8 SPEKTROMETR

2.8.1 Popis spektrometru:

Spektrometr je složen s těchto částí: kolimátoru, okuláru, stolku pro uchycení optického prvku, disku se stupnicí. Kolimátor je upevněn ke stojanu, otočná stupnice, stolek, okulár mohou rotovat nezávisle kolem osy stojanu.



Obr. 2.8.1 Spektrometr [10]

- 1 - štěrba s uzávěrkou
- 2 – šroub jemné adjustace kolimátoru
- 3 – trubice kolimátoru
- 4 – opěry kolimátoru
- 5 – stůl na uchycení optického prvku
- 6 – zvětšovací sklo
- 7 – opěry okuláru
- 8 – trubice okuláru
- 9 – adjustační šroub okuláru
- 10 – okulár s vestavěným nitkovým křížem
- 11 – adjustační šroub výškového nastavení okuláru
- 12 – zajišťovací šroub nóniusové stupnice
- 13 – nivelační šroubky stolku
- 14 – otočný disk se stupnicí
- 15 – zajišťovací šroub nonia a okuláru
- 16 – stojan
- 17 – adjustační šroub výškového nastavení kolimátoru
- 18 – adjustační šroub štěrby

Trubice kolimátoru má štěrbinu na vnějším konci (směřuje do prostoru). Štěrbina je proti prachu kryta uzávěrkou, která se musí před měřením odstranit. Šířku a výšku štěrbinu lze nastavit adjustačním šroubem (18) a posuvnou částí spektrometru. Při uvolnění adjustačního šroubu kolimátoru (2) můžeme štěrbinu posouvat a měnit tak délku kolimátoru.

Čočka je umístěna v kolimátorové trubici na druhé straně než je umístěna štěrbinu. Stolek pro uchycení měřeného optického prvku může být horizontálně vyrovnán nivelačními šroubky (13). Optický prvek lze umístit na stolek. Stolek je možné v žádané pozici zajistit adjustačním šroubem. Okulárová trubice je připevněna k rameni otočnému kolem osy stojanu a můžeme ji zajistit v námi požadované pozici adjustačním šroubem, umístěným po straně. Na konci trubice (směrem ke stolku) se nachází čočka a na volném konci je nastavitelný okulár (10). Pokud již máme okulár zajištěn, můžeme pokračovat jemnou adjustací pomocí šroubu (15). Nonius, zkonstruovaný pro precizní čtení úhlu otočné stupnice na minuty, je upevněn k trubici okuláru (6). Čtení provádíme přes zvětšovací sklo. Otočná stupnice (14) v rozmezí 0° do 360° s kterou, lze otáčet podél osy stojanu, kde jí můžeme v libovolné poloze zajistit šroubem (12)[11][12]

2.8.2 Postup měření spektrometrem

Jako zdroj světla, při našem měření použijeme sodíkovou výbojku, která emituje světlo žluté barvy se známou vlnovou délkou (λ). Sodíkovou výbojku postavíme těsně ke štěrbině kolimátoru. Do měřícího stolečku upevníme optickou mřížku tak, aby vrypy na mřížce byly svisle a rovina mřížky byla kolmá na osu kolimátoru.

Po té nastavíme dalekohled proti kolimátoru tak, abychom viděli přímý obraz štěrbinu. Pomocí okuláru na dalekohledu zaostříme obraz štěrbinu. Následně nastavíme šířku štěrbinu co nejužší, ale zároveň musíme dát pozor na průchod dostatku světla pro pozorování maxim prvního, druhého až n-tého řádu. Pro docílení maximálního jasu je nutno zdroj světla umístit do optimální polohy. Mikrometrickým šroubem doladíme polohu tak, aby se nitkový kříž kryl se středem štěrbinu. Po uvolnění fixačního šroubu můžeme otáčením zaměřovat jednotlivá maxima prvního druhého a následně až n-tého řádu. Když v dalekohledu uvidíme v zákrytu vlákno kříže splývající s maximem nultého řádu pak nastavíme na noniusech nulový úhel. Poté přistupujeme k měření prvního, druhého až n-tého řádu tím, že

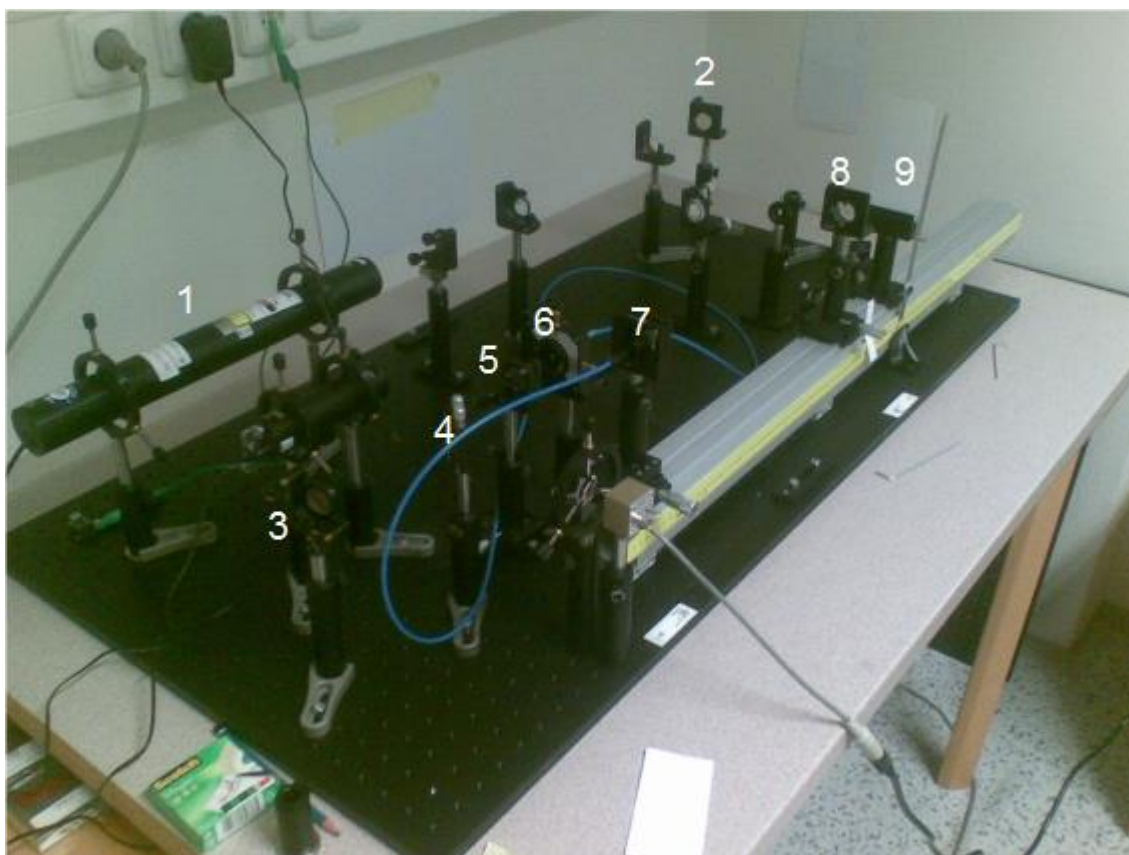
dalekohledem otáčíme směrem vpravo do takové polohy, aby vlákno kříže splývalo s maximem prvního řádu (první ohybový odraz). Zjištěné úhly α'_{11} a α'_{12} na noniusech odečteme a zapíšeme do předem připravené tabulky. Následně otáčíme dalekohledem přes nulovou polohu do opačného směru – vlevo. I zde musí splývat nitkový kříž s maximem prvního řádu a opět odečteme z noniusů hodnoty úhlů β_{11} a β_{12} a zapíšeme do tabulky. Totéž budeme provádět i pro měření druhého až n-tého řádu. Při měření v pravé části stupnice můžeme hodnoty odečíst přímo – α'_{11} , α'_{12} , ..., α'_n . Změna nastane, pokud měříme v levé části stupnice. Tj. úhly β_{11} , β_{12} , ..., β_n . Úhel od přímého paprsku získáme jako

$$A_n = 360^\circ - \beta_n \text{ (doplněk do } 360^\circ\text{)} [11][12]$$

uhel $\Delta = \alpha - 2\varepsilon$ získáme z prostého odrazu

3.0 Experiment

3.1 Měření efektivní ohniskové vzdálenosti Besselova metodou



Obr. 3.1.1 Optická lavice pro měření ohniskové vzdálenosti Besselova metodou

1 - He-Ne laser , 2 – zrcátko, 3- zrcátko, 4 - fázová destička, 5 – okulár, 6 – vstup do optického vlákna, 7- výstup z optického vlákna, 8 – měřená optická čočka, 9 - stínítko

Měření provádíme na optické lavici. Jako zdroj světla použijeme He-Ne laser s vlnovou délkou $\lambda=632.8 \text{ nm}$. Paprsek laseru je zaveden do optického vlákna. Konec optického vlákna nám poslouží jako bodový zdroj světla. Optická lavice je osazena zdrojem bodového světla (v našem případě konec optického vlákna) měřenou optickou čočkou a stínítkem. Laserový svazek nastavíme tak aby procházel středem měřené optické čočky a dopadal na stínítko. Besselova metoda je založena na principu že pro jistou vzdálenost d čočky existují 2 polohy čočky d_1 a d_2 , při které vzniká na stínítku ostrý skutečný obraz. Při měření postupujeme tak, že příslušné dvě polohy optické čočky d_1 a d_2 při které nám na stínítku vznikne ostrý skutečný obraz nalezneme a příslušné hodnoty zapíšeme do předem připravené tabulky. Při měření měníme jak polohu měřené optické čočky tak polohu stínítka. Beze změny zůstává pouze konec optického vlákna. Stejný postup pak při jednotlivém měření praktikujeme 10x pro stejnou čočku a výsledné vzdálenosti takto získané vyhodnotíme v v tabulce.

čočka C_1

spojná čočka výška čočky $25,2 \text{ mm}$ síla čočky cca $8,8 \text{ mm}$

čočka C_2

spojná čočka výška čočky $25,2 \text{ mm}$ síla čočky cca $3,8 \text{ mm}$

čočka C_3

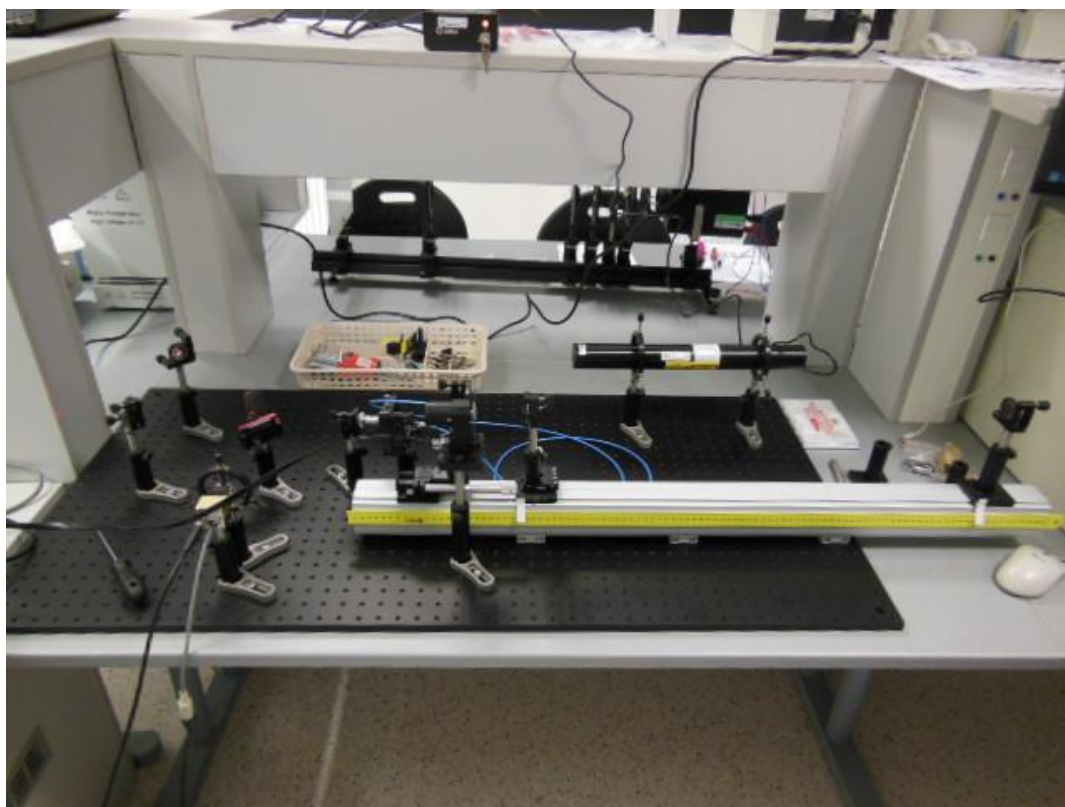
spojná čočka výška čočky $25,2 \text{ mm}$ síla čočky cca $7,3 \text{ mm}$

Čočka C_1 spojná čočka nelze změřit pomocí Besselovi metody z důvodu nezobrazení obrazu na stínítku (držák optické čočky a držák stínítka zamezují svojí konstrukcí námi potřebného přiblížení)

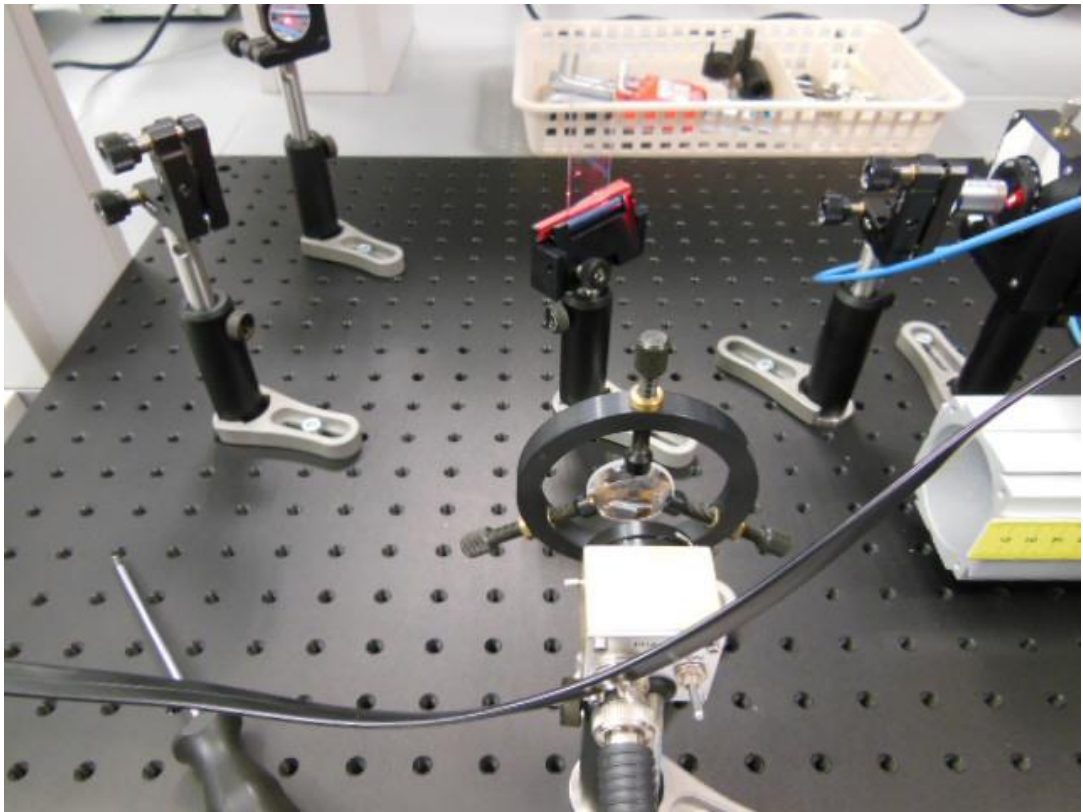
Čočka C_2 spojná čočka. Jako jediná čočka nám lze změřit Besselovou metodou.

Čočka C_3 spojná čočka nelze změřit pomocí Besselovi metody z důvodu nezobrazení obrazu na stínítku (držák optické čočky a konce optického vlákna nám nedovoluje námi potřebné přiblížení)

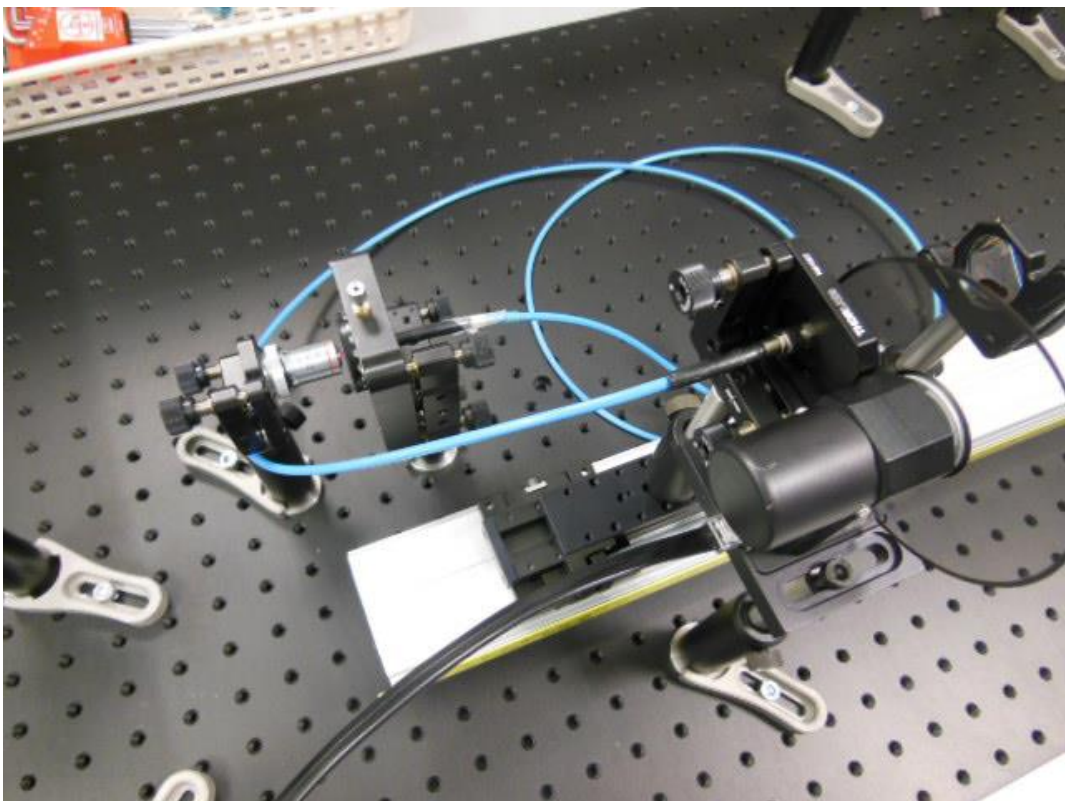
3.2 Měření efektivní ohniskové vzdálenosti metodou zpětné odrazivosti



Obr. 3.2.1 Pracoviště pro měření ohniskové vzdálenosti metodou zpětného odrazu.



Obr. 3.2.2 Odraz a fokusace HeNe paprsku od fázové destičky přes spojnou čočku do fotocitlivé diody.



Obr. 3.2.3 Detail navázání paprsku do optického vlákna pomocí okuláru.

4.0 Výsledky

4.1 Měření tloušťky optických čoček

Měření tloušťky optických čoček měříme posuvným měřidlem. Viz. (Obr. 2.6.1)

Kvůli eliminaci rutiny vzniklé při opakovaném měření bylo postupováno následujícím způsobem: Nejprve jsme naměřili 5 hodnot z každé měřené čočky a následně dalších 5 hodnot z každé měřené čočky.

Pomůcky použité při měření:

Posuvné měřidlo: KOH-I-NOOR HARDMUTH 22 C, Chyba měření: $\pm 0,2/100$ [mm]

Měřená optická čočka C_1 – spojná optická čočka

Měřená optická čočka C_2 – spojná optická čočka

Měřená optická čočka C_3 – spojná optická čočka

| <i>č.m</i> | <i>C₁ [mm]</i> | <i>C₂ [mm]</i> | <i>C₃ [mm]</i> |
|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 9,00 | 3,80 | 7,20 |
| 2 | 8,90 | 3,80 | 7,30 |
| 3 | 8,90 | 3,70 | 7,30 |
| 4 | 8,80 | 3,80 | 7,30 |
| 5 | 8,80 | 3,80 | 7,20 |
| 6 | 8,80 | 3,80 | 7,20 |
| 7 | 8,80 | 3,80 | 7,20 |
| 8 | 8,90 | 3,70 | 7,20 |
| 9 | 8,90 | 3,80 | 7,30 |
| 10 | 8,80 | 3,80 | 7,20 |
| Průměr[mm] | 8,86 | 3,78 | 7,24 |
| Sm.odchylka | 0,07 | 0,04 | 0,05 |

Tab. 4.1.1 Výsledková tabulka pro měření tloušťky optických čoček.

Optická spojná čočka C_1 je tlustá $8,86 \pm 0,07$ [mm]

Optická spojná čočka C_2 je tlustá $3,78 \pm 0,04$ [mm]

Optická spojná čočka C_3 je tlustá $7,24 \pm 0,05$ [mm]

4.2 Měření efektivní ohniskové vzdálenosti Besselova metoda

Pomůcky použité při měření:

Měřená optická čočka C_2

He-Ne laser $\lambda = 633$ nm Lasos, LGK 7628, 5mW, S.N 3343

He-Ne laser $\lambda = 785$ nm Laser Diode Module, LDM785

Optické vlákno- Thorlabs, PM-FC-2, S.N: PM 103832

Měřidlo- Thorlabs délka 1m. Chyba měření ± 1 mm

Popis tabulek:

$\check{c}.m$ – číslo měření

d_1 - poloha čočky

d_2 – po stínítka

d'_{ov} - poloha konce optického vlákna

d'_{st} – poloha stínítka

$\Delta d' - \Delta d'_{st} + \Delta d'_{ov}$

$\Delta d - d_2 - d_1$

f - ohnisková vzdálenost

Měření č.1

čočka C_2

| $\check{c}.m$ | $d_2[mm]$ | $d_1[mm]$ | $d'_{st}[mm]$ | $d'_{ov}[mm]$ | $\Delta d'[mm]$ | $\Delta d[mm]$ | $f[mm]$ |
|---------------|-----------|-----------|---------------|---------------|-----------------|----------------|--------------|
| 1 | 770,0 | 221,0 | 784,0 | 62,0 | 846,0 | 549,0 | 99,89 |
| 2 | 771,0 | 222,0 | 784,0 | 62,0 | 846,0 | 549,0 | 99,89 |
| 3 | 772,0 | 220,5 | 784,0 | 62,0 | 846,0 | 551,5 | 99,01 |
| 4 | 772,0 | 221,5 | 784,0 | 62,0 | 846,0 | 550,5 | 99,36 |
| 5 | 775,0 | 222,0 | 784,0 | 62,0 | 846,0 | 553,0 | 98,48 |
| 6 | 775,5 | 221,0 | 784,0 | 62,0 | 846,0 | 554,5 | 97,95 |
| 7 | 774,0 | 221,5 | 784,0 | 62,0 | 846,0 | 552,5 | 98,66 |
| 8 | 775,0 | 221,5 | 784,0 | 62,0 | 846,0 | 553,5 | 98,31 |
| 9 | 774,0 | 221,0 | 784,0 | 62,0 | 846,0 | 553,0 | 98,48 |
| 10 | 775,0 | 221,0 | 784,0 | 62,0 | 846,0 | 554,0 | 98,13 |
| průměr | | | | | | | 98,82 |
| s.odchylka | | | | | | | 0,66 |

Tab. 4.2.1 Výpočet ohniskové vzdálenosti. Bez změny polohy stínítka a konce optického vlákna.

Měření č.2

čočka C_2

| <i>č.m</i> | $d_1[mm]$ | $d_2[mm]$ | $d'_{st}[mm]$ | $d'_{ov}[mm]$ | $\Delta d'[mm]$ | $\Delta d[mm]$ | $f[mm]$ |
|------------|-----------|-----------|---------------|---------------|-----------------|----------------|----------------|
| 1 | 231 | 560 | 644 | 62 | 582 | 329 | 99,00473 |
| 2 | 240 | 494 | 585 | 62 | 523 | 254 | 99,91061 |
| 3 | 238 | 508 | 595 | 62 | 533 | 270 | 99,05675 |
| 4 | 226 | 625 | 707 | 62 | 645 | 399 | 99,54419 |
| 5 | 221 | 777 | 847 | 62 | 785 | 556 | 97,79904 |
| 6 | 252,5 | 415 | 520 | 62 | 458 | 162,5 | 100,0861 |
| 7 | 262,5 | 392 | 497 | 62 | 435 | 129,5 | 99,11193 |
| 8 | 268,5 | 372 | 486 | 62 | 424 | 103,5 | 99,68381 |
| 9 | 218 | 893 | 965 | 62 | 903 | 675 | 99,60797 |
| 10 | 226 | 645 | 724 | 62 | 662 | 419 | 99,20053 |
| | | | | | | průměr | 99,3006 |
| | | | | | | s.odchyl | 0,61132 |

Tab. 4.2.2 Výpočet ohniskové vzdálenosti. Konec optického vlákna bez změny polohy. Změna polohy u stínítka pro každé měření.

Měření č.3

čočka C_2

| <i>č.m</i> | $d_1[mm]$ | $d_2[mm]$ | $d'_{st}[mm]$ | $d'_{ov}[mm]$ | $\Delta d'[mm]$ | $\Delta d[mm]$ | $f[mm]$ |
|------------|-----------|-----------|---------------|---------------|-----------------|----------------|---------------|
| 1 | 237,0 | 545,0 | 631,0 | 62,0 | 569,0 | 308,0 | 100,57 |
| 2 | 237,0 | 543,0 | 631,0 | 62,0 | 569,0 | 306,0 | 101,11 |
| 3 | 237,0 | 544,5 | 631,0 | 62,0 | 569,0 | 307,5 | 100,71 |
| 4 | 236,0 | 543,0 | 631,0 | 62,0 | 569,0 | 307,0 | 100,84 |
| 5 | 237,0 | 545,0 | 631,0 | 62,0 | 569,0 | 308,0 | 100,57 |
| 6 | 237,0 | 547,0 | 631,0 | 62,0 | 569,0 | 310,0 | 100,03 |
| 7 | 238,0 | 546,0 | 631,0 | 62,0 | 569,0 | 308,0 | 100,57 |
| 8 | 238,0 | 544,5 | 631,0 | 62,0 | 569,0 | 306,5 | 100,97 |
| 9 | 238,0 | 545,0 | 631,0 | 62,0 | 569,0 | 307,0 | 100,84 |
| 10 | 236,0 | 545,0 | 631,0 | 62,0 | 569,0 | 309,0 | 100,30 |
| | | | | | | průměr | 100,65 |
| | | | | | | s.odchyl | 0,30 |

Tab. 4.2.3 Výpočet ohniskové vzdálenosti. Konec optického vlákna a stínítka bez změny polohy.

Měření č.4

Měřeno HeNe laserem s vlnovou délkou $\lambda = 800$ [nm]
 čočka C_2

| č.m | d_1 [mm] | d_2 [mm] | $d'st$ [mm] | $d'ov$ [mm] | $\Delta d'$ [mm] | Δd [mm] | f [mm] |
|----------|------------|------------|-------------|-------------|------------------|-----------------|---------------|
| 1 | 223 | 900 | 972 | 62 | 910 | 677 | 101,59 |
| 2 | 222 | 872 | 945 | 62 | 883 | 650 | 101,13 |
| 3 | 223 | 845 | 913 | 62 | 851 | 622 | 99,09 |
| 4 | 224 | 796 | 870 | 62 | 808 | 572 | 100,77 |
| 5 | 226 | 760 | 832 | 62 | 770 | 534 | 99,92 |
| 6 | 228 | 715 | 790 | 62 | 728 | 487 | 100,55 |
| 7 | 230 | 673 | 749 | 62 | 687 | 443 | 100,33 |
| 8 | 233 | 617 | 698 | 62 | 636 | 384 | 101,04 |
| 9 | 237 | 558 | 643 | 62 | 581 | 321 | 100,91 |
| 10 | 245 | 492 | 584 | 62 | 522 | 247 | 101,28 |
| průměr | | | | | | | 100,66 |
| s.odchyl | | | | | | | 0,69 |

Tab. 4.2.4 Výpočet ohniskové vzdálenosti. Konec optického vlákna bez změny polohy.
 Změna polohy u stínítka.

4.3 Měření ohniskové vzdálenosti metodou zpětného odrazu

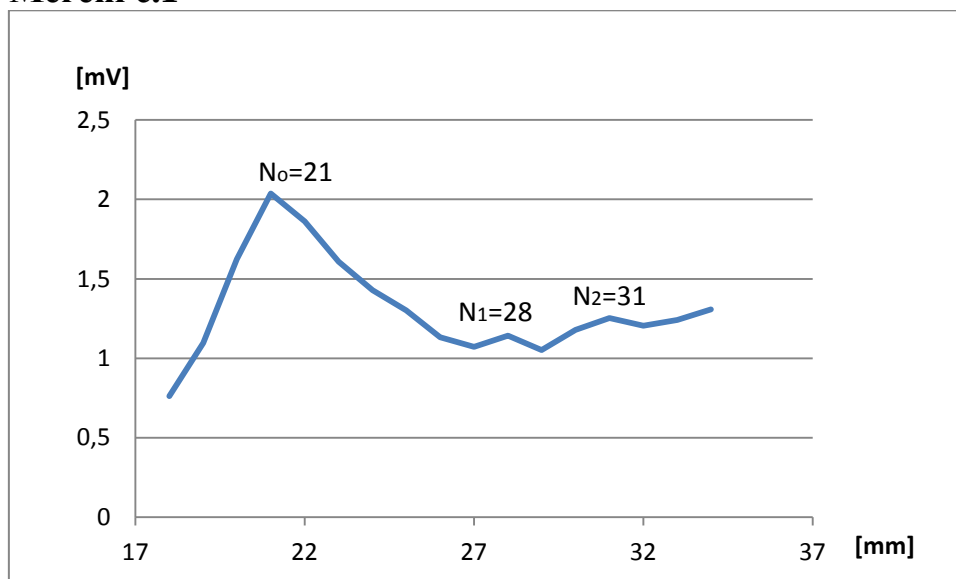
Popis grafů:

N_0 – první maximum intenzity

N_1 – druhé maximum intenzity

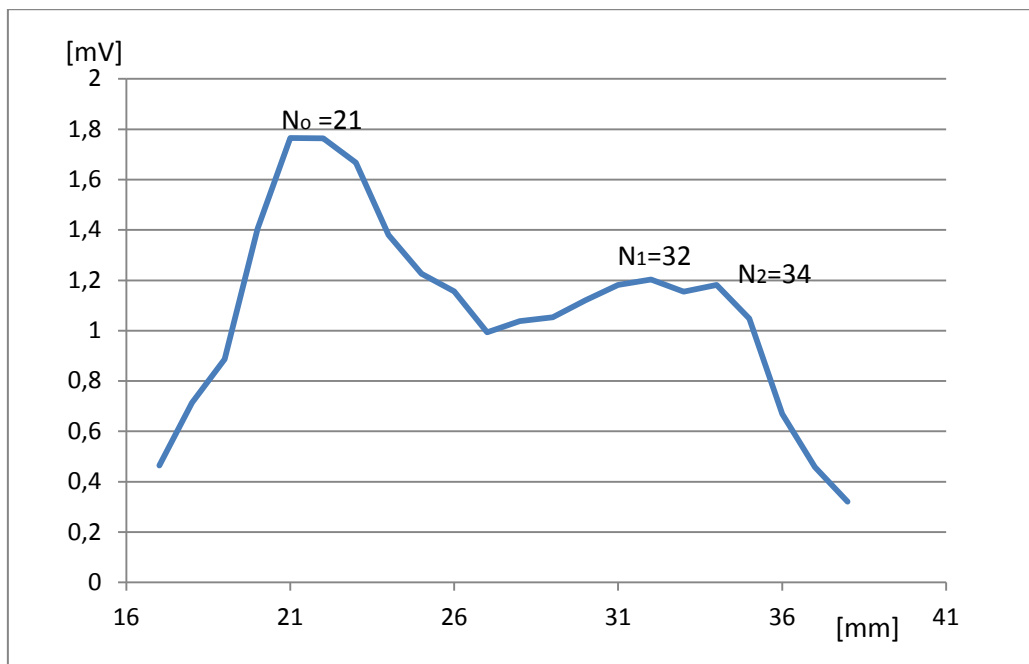
N_2 – třetí maximum intenzity

Měření č.1



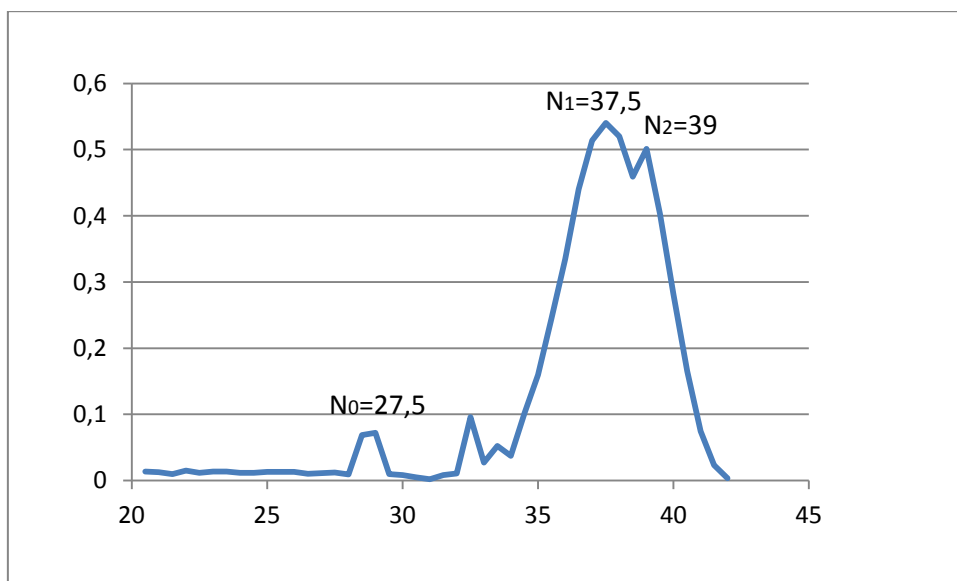
Obr 4.3.1 Graf měření ohniskové vzdálenosti metodou zpětného odrazu

Měření č.2



Obr. 4.3.2 Graf měření ohniskové vzdálenosti metodou zpětného odrazu

Měření č.3



Obr. 4.3.3 Graf měření ohniskové vzdálenosti metodou zpětného odrazu

4.4 Měření mřížkové konstanty

Popis tabulek:

λ – vlnová délka sodíkové lampy

m – difrakční řád

b – vzdálenost vrypů

n – počet vrypů na 1 mm

Měření č.1

Mřížka M_1

| $\lambda[m]$ | m | α | $\alpha[^\circ]$ | $\alpha[rad]$ | $\sin \alpha$ | $b[m]$ | $n[mm^{-1}]$ |
|-------------------|-----------|----------|------------------|---------------|---------------|-------------|----------------|
| 5,898E-07 | 1 | 3°19' | 3,32 | 0,057886 | 0,057853 | 1,01948E-05 | 98,0896 |
| 5,898E-07 | 2 | 6°42' | 6,70 | 0,116937 | 0,116671 | 1,01105E-05 | 98,907 |
| 5,898E-07 | 3 | 10°07' | 10,12 | 0,176568 | 0,175652 | 1,00733E-05 | 99,272 |
| 5,898E-07 | 4 | 13°35' | 13,58 | 0,237073 | 0,234859 | 1,00452E-05 | 99,5502 |
| 5,898E-07 | 5 | 17°50' | 17,83 | 0,311245 | 0,306244 | 9,62959E-06 | 103,847 |
| 5,898E-07 | 6 | 20°39' | 20,65 | 0,36041 | 0,352658 | 1,00346E-05 | 99,6548 |
| 5,898E-07 | 7 | 24°16' | 24,27 | 0,423522 | 0,410973 | 1,00459E-05 | 99,5431 |
| 5,898E-07 | 8 | 28°30' | 28,50 | 0,497419 | 0,477159 | 9,88853E-06 | 101,127 |
| 5,898E-07 | 9 | 31°56' | 31,93 | 0,557341 | 0,528932 | 1,00357E-05 | 99,6443 |
| 5,898E-07 | 10 | 36°02' | 36,33 | 0,63413 | 0,592477 | 9,95481E-06 | 100,454 |
| 5,898E-07 | 11 | 40°17' | 40,28 | 0,703076 | 0,646567 | 1,00342E-05 | 99,659 |
| 5,898E-07 | 12 | 44°51' | 44,85 | 0,78278 | 0,705253 | 1,00355E-05 | 99,6458 |
| 5,898E-07 | 13 | 49°50' | 49,83 | 0,869755 | 0,764171 | 1,00336E-05 | 99,6649 |
| 5,898E-07 | 14 | 61°47' | 61,78 | 1,078323 | 0,881166 | 9,37077E-06 | 106,715 |
| průměr | | | | | | | 100,4 |
| s.odchylka | | | | | | | 2,2 |

Tab. 4.4.1 Měření mřížkové konstanty. Pomocí sodíkové lampy.

Měření č.2

Mřížka M_1

| $\lambda[m]$ | m | $\alpha[^\circ]$ | $\alpha[rad]$ | $\sin \alpha$ | $b[m]$ | $n[mm^{-1}]$ |
|-------------------|-----|------------------|---------------|---------------|-------------|----------------|
| 5,889950E-07 | 4 | 13,63 | 0,237941 | 0,235702 | 9,99559E-06 | 100,044 |
| 5,895920E-07 | 4 | 13,67 | 0,238517 | 0,236262 | 9,98202E-06 | 100,180 |
| 5,889950E-07 | 5 | 17,13 | 0,298975 | 0,294541 | 9,99853E-06 | 100,015 |
| 5,895920E-07 | 5 | 17,17 | 0,299603 | 0,295141 | 9,98831E-06 | 100,117 |
| 5,889950E-07 | 6 | 20,70 | 0,361283 | 0,353475 | 9,9978E-06 | 100,022 |
| 5,895920E-07 | 6 | 20,75 | 0,362156 | 0,354291 | 9,98488E-06 | 100,151 |
| 5,889950E-07 | 7 | 24,37 | 0,425267 | 0,412564 | 9,99352E-06 | 100,065 |
| 5,895920E-07 | 7 | 24,40 | 0,425860 | 0,413104 | 9,99056E-06 | 100,095 |
| 5,889950E-07 | 8 | 28,13 | 0,490961 | 0,471474 | 9,99411E-06 | 100,059 |
| 5,895920E-07 | 8 | 28,17 | 0,491589 | 0,472028 | 9,9925E-06 | 100,075 |
| 5,889950E-07 | 9 | 32,67 | 0,570129 | 0,539741 | 9,8213E-06 | 101,820 |
| 5,895920E-07 | 9 | 32,10 | 0,560251 | 0,531399 | 9,98559E-06 | 100,144 |
| 5,889950E-07 | 10 | 36,12 | 0,630343 | 0,589422 | 9,99276E-06 | 100,072 |
| 5,895920E-07 | 10 | 36,15 | 0,630937 | 0,589901 | 9,99476E-06 | 100,052 |
| průměr | | | | | | 100,2 |
| s.odchylka | | | | | | 0,4 |

Tab. 4.4.2 Měření mřížkové konstanty. Pomocí sodíkové lampy.

Měření č.3

Mřížka M_2

| $\lambda[m]$ | m | α° | α° | $a[rad]$ | $\sin \alpha$ | $b[m]$ | $n[mm^{-1}]$ |
|-------------------|-----|----------------|----------------|----------|---------------|-------------|--------------|
| 5,892935E-07 | 1 | 20,58 | 20,73 | 0,36172 | 0,353888 | 1,6652E-06 | 600,53 |
| 5,889950E-07 | 2 | 44,62 | 44,76 | 0,78118 | 0,704121 | 1,67299E-06 | 597,73 |
| 5,895920E-07 | 2 | 44,67 | 44,81 | 0,78205 | 0,704733 | 1,67323E-06 | 597,64 |
| 5,892935E-07 | -1 | 20,87 | -20,72 | -0,3617 | -0,353876 | 1,66525E-06 | 600,51 |
| průměr | | | | | | | 599,1 |
| s.odchylka | | | | | | | 1,4 |

Tab. 4.4.3 Měření mřížkové konstanty. Pomocí sodíkové lampy.

Mřížka M_1 [$n = 100,3 \pm 1,3$] M_2 [$n = 599,1 \pm 1,4$] vrypů na mm

4.5 Měření odrazné difrakční mřížky

Popis tabulek:

m - difrakční řád

Δ - odchylka úhlooměru od 0° .

ε - natočení odrazné mřížky vůči dopadajícímu paprsku

λ - vlnová délka sodíkové lampy

d - vzdálenost mezi vrypů

m -difrakční řád

n - počet vrypů na 1mm

β - naměřená hodnota

Měření č. 1

Mřížka M_3

| $\varepsilon[^\circ]$ | $\alpha[^\circ]$ | Δ |
|-----------------------|------------------|----------|
| -20 | 122 25 | 162,417 |
| -40 | 82 22 | 162,367 |
| 30 | 222 16 | 162,267 |
| 50 | 262 13 | 162,217 |
| -67 | 28 20 | 162,333 |
| | | 162,32 |
| | | 0,07 |

Tab. 4.5.1 Určení odchylky stupnice úhlooměru od dopadajícího paprsku pomocí prostého odrazu.

Měření č. 2

Mřížka M_3

| $\alpha[\text{rad}]$ | m | $\lambda[\text{m}]$ | $\beta[^\circ']$ | $\beta[^\circ]$ | $\theta[\text{rad}]$ | $d[\text{m}]$ | $n[\text{mm}]$ |
|----------------------|-----|---------------------|------------------|-----------------|----------------------|---------------|----------------|
| 0 | -1 | 5,889950E-07 | 116 55 | -45,403 | -0,792438 | 8,2716E-07 | 1208,952 |
| 0 | -1 | 5,895920E-07 | 116 48 | -45,52 | -0,794474 | 8,2634E-07 | 1210,151 |
| 0 | 1 | 5,889950E-07 | 206 55 | 44,5967 | 0,7783587 | 8,3889E-07 | 1192,050 |
| 0 | 1 | 5,895920E-07 | 207 1 | 44,6967 | 0,780104 | 8,3826E-07 | 1192,949 |
| 0,00436 | 1 | 5,889950E-07 | 206 18 | 43,98 | 0,7675958 | 8,429E-07 | 1186,378 |
| 0,00436 | 1 | 5,895920E-07 | 206 21 | 44,03 | 0,7684685 | 8,43E-07 | 1186,241 |
| 0,00436 | -1 | 5,889950E-07 | 116 17 | -46,037 | -0,803491 | 8,2328E-07 | 1214,647 |
| 0,00436 | -1 | 5,895920E-07 | 116 13 | -46,103 | -0,804655 | 8,2319E-07 | 1214,786 |
| 0,00873 | -1 | 5,895920E-07 | 115 35 | -46,737 | -0,815709 | 8,1946E-07 | 1220,310 |
| 0,00873 | -1 | 5,889950E-07 | 115 41 | -46,637 | -0,813963 | 8,2E-07 | 1219,514 |
| 0,00873 | 1 | 5,889950E-07 | 205 41 | 43,3633 | 0,7568329 | 8,4705E-07 | 1180,568 |
| 0,00873 | 1 | 5,895920E-07 | 205 47 | 43,4633 | 0,7585783 | 8,4636E-07 | 1181,523 |
| -0,0044 | -1 | 5,895920E-07 | 117 24 | -44,92 | -0,784002 | 8,2985E-07 | 1205,040 |
| -0,0044 | -1 | 5,889950E-07 | 117 30 | -44,82 | -0,782257 | 8,3045E-07 | 1204,162 |
| -0,0044 | 1 | 5,889950E-07 | 207 30 | 45,18 | 0,7885398 | 8,355E-07 | 1196,889 |
| -0,0044 | 1 | 5,895920E-07 | 207 34 | 45,2467 | 0,7897033 | 8,3538E-07 | 1197,067 |
| | | | | | průměr | 8,33E-07 | 1201 |
| | | | | | s.odchylka | 9,0E-09 | 13 |

Tab. 4.5.2 Určení mřížkové konstanty odrazné difrakční mřížky.

Mřížka M_3 [$n= 1201 \pm 13$] vrypů na mm

5.0 Diskuze

Při sestavování metody zpětného odrazu nebylo možné použít singlmodového optického vlákna na kterém je tato metoda postavena. Z důvodu slabého navázání paprsku tj. slabé intenzity procházejícího paprsku. Z tohoto důvodu bylo pro měření použito multimodové optické vlákno. Avšak multimodové optické vlákno nám při metodě zpětného odrazu vykazovalo určité zkreslení výstupních hodnot na Lock –in zesilovači. Díky této výstupní chybě se metoda stala značně nepřesná. Ve srovnání námi použitých metod pro měření efektivní ohniskové vzdálenosti optických čoček vychází metoda zpětného odrazu jako obtížněji měřitelná, komplikovanější z pohledu potřebného vybavení, technicky náročnější stavba měřicí aparatury oproti Besselově metodě. Besselova metoda měření efektivní ohniskové vzdálenosti vykazovala při našem měření velikost chyby $\pm 0,5\%$. Metoda zpětného odrazu vykazovala velikost chyby měření větší než 1%. Z tohoto pohledu vychází lépe metoda Besselova.

6.0 Závěr

Cílem první části práce bylo seznámit se teoreticky s různými metodami měření parametrů optických prvků. Obsažen je zde stručný přehled druhů optických čoček a jejich vlastností. Dále je zde pojednáváno o materiálech používaných k výrobě optických čoček. Konec první části patří vadám (aberacím).

V druhé části práce byla postavena aparatura pro měření ohniskové vzdálenosti pomocí Besselova metody, metody zpětného odrazu, měření mřížkové konstanty transmisní i odrazné difrakční mřížky. Na těchto sestavených aparaturách bylo provedeno měření pro tři optické spojné čočky a tři druhy optických mřížek. Výpočty parametrů z naměřených hodnot jsou uvedeny v tabulkách ve výsledkové části práce.

7.0 Literatura

- [1] Wikipedie otevřená encyklopedie, čočka (optika) [online].[2014][cit.2014-04-23]Dostupný z WWW < [http://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%8Co%C4%8Dka_\(optika\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%8Co%C4%8Dka_(optika)) >
- [2] D. Halliday – R. Resnick – J. Walker, Fyzika část 4, 1 vyd. Elektromagnetické vlny – Optika- Relativita, Brno VUTIUM, Praha PROMETHEUS, 2006, ISBN 80-214-1868-0, ISBN 81-7196-213-9
- [3] SCHOTT AG, Výrobky a aplikace, [online].[2014][cit.2014-04-23. Dostupný z WWW: < http://www.schott.com/advanced_optics/english/download/index.html?so=czechia&lang=czech >.
- [4] Gottfried Schröder, Technická optika, [přeložil RNDr. Zdeněk Berger]1 vyd, Praha SNTL, 1981, 160s, Typ č. L11-B3-IV-33f/11 827
- [5] Ing. Jaroslav Bumbálek, Základy technické optiky, 3 vyd, Praha :ČVUT, 1995. 227 s. ISBN 880-01-01352-9
- [6] WebFyzika, Určení geometrických a fyzikálních parametrů čočky, [online].[2014][cit. 2014-04-23]. Dostupný z WWW : < <http://webfyzika.fsv.cvut.cz/PDF/navody/fyzika3/NavodC.pdf> >
- [7] Gymnázium Praha 10, Voděradská 2, Měření ohniskové vzdálenosti cocky Abbeovou metodou, [online][2013][cit. 2014-04-23]. Dostupný z WWW < www.gymvod.cz/soubor/1641 >
- [8] I. Ilev, D. Uttamchandani, B. Culshaw, Fiber-optic backreflectance method for determining the effective focal lengths of optical elements, Applied optics, Vol. 35, No. 4, 1 February 1996, Optical Society of America.
- [9] Wikipedia – The Free Encyklopedie, Blazed grating,[online][2014][cit. 2014-04-23]. Dostupný z WWW : < http://en.wikipedia.org/wiki/Blazed_grating >
- [10] HELAGO-CZ s.r.o., Product- Spektrometr – goniometr, [online][2012][cit. 2014-04-23]. Dostupný z WWW : < <http://www.helago-cz.cz/product/spektrometr-goniometr> />

- [11] Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Měření jednoduchých spekter difrakčním spektrometrem, [online][2010][cit. 2014-04-23]. Dostupný z WWW : < <https://vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/uhrovah/docs/Uloha%20c.19-Spektrometr.pdf> >
- [12] Západočeská univerzita v Plzni- Fakulta aplikovaných věd- Katedra Fyziky, Ohyb a interference světla optickou mřížkou,[online][2013][cit. 2014-04-23]. Dostupný z WWW : < http://www.kfy.zcu.cz/dokumenty/FP2/UF142_6.pdf >