

Oddělení fyzikálních praktik při Kabinetu výuky obecné fyziky MFF UK

Praktikum 3

Úloha č. 2

Název: Měření parametrů zobrazovacích soustav

Pracoval: Mária Šoltéssová stud.sk.: F-14 dne: 18.4.2006

Odevzdal dne:

Hodnocení:

Připomínky:

| kapitola referátu | možný počet bodů | udělený počet bodů |
|---------------------------|------------------|--------------------|
| Teoretická část | 0 - 3 | |
| Výsledky měření | 0 - 10 | |
| Diskuse výsledků | 0 - 4 | |
| Závěr | 0 - 2 | |
| Seznam použité literatury | 0 - 1 | |
| Celkem | max. 20 | |

Posuzoval:.....

dne:

Pracovná úloha:

1. Zmerajte ohniskovú vzdialenosť tenkej ploskovypuklej (plankonvexnej) šošovky jednak Besselovou metódou, jednak metódou dvojakého zväčšenia.
2. Zmerajte guľovú vadu vyšetrovanej ploskovypuklej šošovky v oboch smeroch pre dve vzdialenosti predmetu $a = 30$ cm a $a = 60$ cm. Získané výsledky spracujte do jedného grafu a diskutujte veľkosť guľovej vady v jednotlivých prípadoch.
3. Použitím goniometru určte vzdialenosť hlavných rovín šošovky meranej v bode 1 a hrubej ploskovypuklej šošovky.
4. Na základe výsledkov získaných v bodoch 1 a 3 diskutujte, ktorá z uvedených metód merania ohniskovej vzdialenosti podľa bodu 1 je v uvedenom usporiadaní presnejšia. Porovnajte relatívne chyby merania. Odhadnite systematickú chybu, ktorej sa dopúšťame pri meraní ohniskovej vzdialenosti Besselovou metódou.
5. Zo známej hrúbky hrubej ploskovypuklej šošovky a zmeranej vzdialenosti hlavných rovín určte index lomu skla.

Teoretická časť:

Besselova metóda

Základom pre experimentálne stanovenie ohniskovej vzdialenosti šošovky f je zobrazovacia rovnica šošovky

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{a'}, \quad (1)$$

kde a resp. a' je vzdialenosť predmetu resp. obrazu od hlavnej predmetovej resp. obrazovej roviny. Pre pevný súčet vzdialeností $D = a + a'$ pri splnení podmienky $D > 4f$ má rovnica (1) dve riešenia. Pre pevnú vzdialenosť predmetu a obrazu teda môžeme nájsť dve polohy šošovky, pri ktorých je obraz ostrý. Rozdiel týchto dvoch polôh označíme Δ . Ak uvažujeme tenkú šošovku, platí

$$2a = D - \Delta \quad (2)$$

$$2a' = D + \Delta \quad (3)$$

Dosadením (2) a (3) do (1) dostaneme výraz pre ohniskovú vzdialenosť

$$f = \frac{D^2 - \Delta^2}{4D}. \quad (4)$$

Ak šošovku nemôžeme považovať za tenkú, potrebujeme poznať ešte vzdialenosť hlavných rovín δ . Potom platí $D = d + a + a'$ a vzťah (4) treba upraviť na tvar

$$f_k = \frac{(D - d)^2 - \Delta^2}{4(D - d)}. \quad (5)$$

Metóda dvojakého zväčšenia

Pri metóde dvojakého zväčšenia meriame zmenu priečného zväčšenia pri zmene vzdialenosti predmetu od šošovky. Ak je pri vzdialenosti a_1 predmetu od

šošovky priečne zväčšenie $b_1 = \left(\frac{Y'}{Y}\right)_1$ a pri vzdialenosti a_2 predmetu od šošovky priečne zväčšenie $b_2 = \left(\frac{Y'}{Y}\right)_2$, s využitím zobrazovacej rovnice (1) a skutočnosti, že platí vzťah

$$f \frac{Y'}{Y} = f \frac{a'}{a}, \quad (6)$$

kde Y resp. Y' je veľkosť predmetu resp. obrazu, môžeme ohniskovú vzdialenosť šošovky vyjadriť ako

$$f = \frac{b_1 b_2 |a_1 - a_2|}{|b_2 - b_1|}. \quad (7)$$

Ak meriame priečne zväčšenia pre dve rôzne vzdialenosti obrazu od šošovky a_1' a a_2' , môžeme ohniskovú vzdialenosť určiť ako

$$f = \frac{|a_1' - a_2'|}{|b_2 - b_1|}. \quad (8)$$

Sférická vada

V prípade spojnej šošovky sa pri zobrazení bodu na osi paraxiálne lúče pretínajú ďalej od šošovky ako lúče, ktoré zvierajú s osou väčšie uhly. Tomuto javu hovoríme sférická vada šošovky. Nazývame ňou rozdiel

$$\Delta a' = a_p' - a', \quad (9)$$

kde a_p' je vzdialenosť obrazu bodu P od šošovky pre paraxiálne lúče a a' je poloha obrazu pre lúče prechádzajúce šošovkou vo vzdialenosti h od osi. Zo vzťahu (9) je zrejmé, že $\Delta a'$ je funkciou vzdialenosti h , táto závislosť sa dá v dobrom priblížení vyjadriť kvadratickou závislosťou

$$\Delta a' = Kh^2, \quad (10)$$

kde pre spojku $K > 0$.

V našom prípade sme lúče zvierajúce s osou väčšie uhly vymedzili clonami v tvare medzikružia. Ako veličinu h potom berieme stredný polomer medzikružia ohraničeného polomerami r_1 a r_2

$$h = \frac{r_1 + r_2}{2}. \quad (11)$$

Hlavné roviny

Hlavné a uzlové body šošovky sú totožné, preto na určenie vzdialenosti hlavných rovín postačí určiť vzdialenosť uzlových bodov. K jej určeniu využijeme skutočnosť, že pri otáčaní šošovky okolo predmetového uzlového bodu zachovávajú dopadajúce a vychádzajúce lúče svoj smer. Pre plankonvexnú šošovku sa obecný vzťah pre vzájomnú vzdialenosť hlavných rovín redukuje na tvar

$$d = \frac{n-1}{n} d, \quad (12)$$

čo je vzťah medzi hrúbkou šošovky d , vzdialenosťou hlavných rovín δ a jej indexom lomu n . Vzdialenosť hlavných rovín určíme pomocou goniometru podľa návodu v [2], str. 27.

Výsledky meraní:

Meranie ohniskovej vzdialenosti

Na optickú lavicu vybavenú stupnicou (pásmovým meradlom) sme umiestnili do pevnej polohy tienidlo a clonu s kruhovým otvorom s priemerom

$$Y = 10,0 \text{ mm},$$

ktorá slúžila ako predmet. Vzdialenosť predmetu a obrazu D sme zmerali ako

$$D = (82,2 \pm 0,2) \text{ cm}.$$

Chybu odhadujeme na 0,2 cm vzhľadom k deleniu stupnice a k tomu, že ryska na spodnej časti stojanu nemusí presne zodpovedať skutočnej polohe tienidla resp. clony.

Hľadali sme dve polohy šošovky a_1 a a_2 , pre ktoré je obraz ostrý, urobili sme šesť meraní. Tieto polohy sa líšia oproti vzdialenosti predmetu a obrazu a a a' zo vzťahov (1) – (3) o vzdialenosť clony s otvorom od začiatku stupnice, platí však $a_2 - a_1 = a' - a = \Delta$. Chybu určenia týchto polôh odhadujeme na 0,4 cm vzhľadom k tomu, že ostrosť obrazu bola posudzovaná subjektívne. Chyby rozdielu počítame ako odmocninu zo súčtu kvadrátov jednotlivých chýb.

Výsledná ohnisková vzdialenosť je počítaná podľa vzťahu (4) pre každé meranie zvlášť. Namerané a vypočítané hodnoty sú uvedené v tabuľke 1. Chyba ohniskovej vzdialenosti (v poslednom stĺpci tabuľky 1) je určená prenesením chýb veličín vystupujúcich vo vzťahu (4). Hodnoty f_B sa pre jednotlivé merania v rámci chyby zhodujú, výslednú ohniskovú vzdialenosť sme určili ako ich aritmetický priemer:

$$f_B = (16,4 \pm 0,2) \text{ cm},$$

odchýlka je určená ako odchýlka aritmetického priemeru.

Tabuľka 1: Besselova metóda

| a_1 [cm] | a_2 [cm] | Δ [cm] | D [cm] | f_B [cm] |
|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|
| $32,0 \pm 0,4$ | $69,1 \pm 0,4$ | $37,1 \pm 0,6$ | $82,2 \pm 0,2$ | $16,36 \pm 0,14$ |
| $32,3 \pm 0,4$ | $69,6 \pm 0,4$ | $37,3 \pm 0,6$ | $82,2 \pm 0,2$ | $16,32 \pm 0,14$ |
| $32,2 \pm 0,4$ | $69,3 \pm 0,4$ | $37,1 \pm 0,6$ | $82,2 \pm 0,2$ | $16,36 \pm 0,14$ |
| $32,1 \pm 0,4$ | $69,3 \pm 0,4$ | $37,2 \pm 0,6$ | $82,2 \pm 0,2$ | $16,34 \pm 0,14$ |
| $32,2 \pm 0,4$ | $69,4 \pm 0,4$ | $37,2 \pm 0,6$ | $82,2 \pm 0,2$ | $16,34 \pm 0,14$ |
| $32,2 \pm 0,4$ | $69,2 \pm 0,4$ | $37,0 \pm 0,6$ | $82,2 \pm 0,2$ | $16,39 \pm 0,14$ |

Zároveň sme pre obidve polohy a_1 a a_2 merali na posuvnej stupnici tienidla veľkosti obrazu na tienidle Y_1' a Y_2' , potrebné na určenie ohniskovej vzdialenosti metódou dvojitého zväčšenia. Chybu tejto vzdialenosti odhadujeme na 0,6 mm vzhľadom k tomu, že je počítaná ako rozdiel dvoch hodnôt odčítaných zo stupnice na oboch krajoch obrazu (s chybou 0,4 mm) a k tomu, že nebolo jednoduché nastaviť rysku presne na okraj obrazu. Tento raz platí, že rozdiel $|a_1' - a_2'|$ zo vzťahu (8) je rovný rozdielu $a_2 - a_1$. Výslednú ohniskovú vzdialenosť sme pre každé meranie zvlášť počítali podľa vzťahu (8), pretože výsledná hodnota je zaťažená menšou štatistickou chybou ako hodnota vypočítaná podľa vzťahu (7). Namerané a vypočítané hodnoty sú uvedené v tabuľke 2. Chyba ohniskovej vzdialenosti (v poslednom stĺpci tabuľky 2) je určená prenesením chýb veličín vystupujúcich vo vzťahu (8). Hodnoty f_Z sa v rámci chyby zhodujú, výsledná ohnisková vzdialenosť f_Z je určená ako aritmetický priemer hodnôt pre jednotlivé merania:

$$f_z = (17,3 \pm 0,7) \text{ cm},$$

odchýlka je určená ako chyba aritmetického priemeru.

Tabuľka 2: Metóda dvojakého zväčšenia

| Y_1' [mm] | Y_2' [mm] | $(Y'/Y)_1$ | $(Y'/Y)_2$ | $a_2 - a_1$ [cm] | f_z [cm] |
|----------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
| $25,2 \pm 0,6$ | $3,6 \pm 0,6$ | $2,52 \pm 0,06$ | $0,36 \pm 0,06$ | $37,1 \pm 0,6$ | $17,18 \pm 0,72$ |
| $24,8 \pm 0,6$ | $3,5 \pm 0,6$ | $2,48 \pm 0,06$ | $0,35 \pm 0,06$ | $37,3 \pm 0,6$ | $17,51 \pm 0,75$ |
| $25,0 \pm 0,6$ | $3,7 \pm 0,6$ | $2,50 \pm 0,06$ | $0,37 \pm 0,06$ | $37,1 \pm 0,6$ | $17,42 \pm 0,74$ |
| $25,4 \pm 0,6$ | $3,6 \pm 0,6$ | $2,54 \pm 0,06$ | $0,36 \pm 0,06$ | $37,2 \pm 0,6$ | $17,06 \pm 0,71$ |
| $25,0 \pm 0,6$ | $3,6 \pm 0,6$ | $2,50 \pm 0,06$ | $0,36 \pm 0,06$ | $37,2 \pm 0,6$ | $17,38 \pm 0,74$ |
| $25,1 \pm 0,6$ | $3,7 \pm 0,6$ | $2,51 \pm 0,06$ | $0,37 \pm 0,06$ | $37,0 \pm 0,6$ | $17,29 \pm 0,73$ |

Sférická vada

Určovali sme sférickú vadu ploskodutej šošovky pre dve vzdialenosti predmetu od šošovky $a_1 = 30$ cm a $a_2 = 60$ cm a pre obidva smery prechodu lúčov šošovkou. V každom prípade sme merali vzdialenosť obrazu pre paraxiálne lúče x_p' a pre lúče prechádzajúce medzikružiami x' v rôznych vzdialenostiach h od osi (určených podľa vzťahu (11)). Vzdialenosti x_p' a x' sa líšia od vzdialeností a_p' a a' zo vzťahu (9) o vzdialenosť predmetu od začiatku stupnice, platí však $\Delta a' = a_p' - a' = x_p' - x'$. Chybu merania odhadujeme na 0,1 mm. Namerané hodnoty sú uvedené v tabuľke 4. Smer 1 zodpovedá orientácii šošovky plochou stranou k predmetu, smer 2 zodpovedá orientácii vypuklou stranou k predmetu. Indexy 1, 2, 3 zodpovedajú rôznym použitým clonám a teda rôznym vzdialenostiam h podľa tabuľky 3, index p zodpovedá paraxiálnym lúčom. D_1 resp. D_2 označuje vnútorný resp. vonkajší polomer medzikružia.

Tabuľka 3: Vzdialenosti h

| index | D_1 [mm] | D_2 [mm] | h [mm] |
|-------|------------|------------|----------|
| p | 0 | 5 | 2,5 |
| 1 | 10 | 20 | 15 |
| 2 | 20 | 30 | 25 |
| 3 | 30 | 40 | 35 |

Tabuľka 4: Namerané hodnoty pre guľovú vadu šošovky

| Vzdialenosť predmetu $a_1 = 30$ cm | | | | | | | |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| smer 1 | | | | smer 2 | | | |
| x_p' [cm] | x_1' [cm] | x_2' [cm] | x_3' [cm] | x_p' [cm] | x_1' [cm] | x_2' [cm] | x_3' [cm] |
| 76,8 | 76,0 | 75,4 | 74,3 | 75,9 | 75,7 | 74,8 | 74,4 |
| 76,8 | 75,9 | 75,4 | 74,5 | 75,6 | 75,3 | 75,2 | 74,5 |
| 76,3 | 75,8 | 75,3 | 74,4 | 75,6 | 75,5 | 75,2 | 75,0 |
| 76,2 | 75,8 | 75,4 | 74,6 | 75,7 | 75,5 | 75,4 | 74,7 |
| 76,2 | 75,7 | 75,3 | 74,8 | 75,6 | 75,5 | 75,3 | 74,8 |
| Vzdialenosť predmetu $a_2 = 60$ cm | | | | | | | |
| smer 1 | | | | smer 2 | | | |
| x_p' [cm] | x_1' [cm] | x_2' [cm] | x_3' [cm] | x_p' [cm] | x_1' [cm] | x_2' [cm] | x_3' [cm] |
| 92,6 | 92,5 | 92,1 | 92,0 | 92,4 | 92,1 | 92,1 | 91,8 |
| 92,7 | 92,5 | 92,3 | 91,8 | 92,3 | 92,2 | 92,1 | 91,7 |
| 92,6 | 92,5 | 92,3 | 91,6 | 92,3 | 92,3 | 92,2 | 91,9 |
| 92,6 | 92,4 | 92,3 | 91,6 | 92,3 | 92,3 | 92,1 | 91,9 |
| 92,7 | 92,4 | 92,1 | 91,7 | 92,3 | 92,2 | 92,1 | 91,8 |

Pre jednotlivé namerané hodnoty sme spočítali rozdiel $\Delta a' = x_p' - x'$, chyba je pre všetky hodnoty 0,1 mm, určená prenesením chyby merania. Výslednú hodnotu sme určili ako aritmetický priemer hodnôt pre jednotlivé merania, chyba je určená ako chyba aritmetického priemeru. Vypočítané hodnoty sú uvedené v tabuľke 5.

Tabuľka 5: Vypočítané hodnoty guľovej vady šošovky

| Vzdialenosť predmetu $a_1 = 30$ cm | | | | | |
|------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| smer 1 | | | smer 2 | | |
| $\Delta a_1'$ [cm] | $\Delta a_2'$ [cm] | $\Delta a_3'$ [cm] | $\Delta a_1'$ [cm] | $\Delta a_2'$ [cm] | $\Delta a_3'$ [cm] |
| 0,8 | 1,4 | 2,5 | 0,2 | 1,1 | 1,5 |
| 0,9 | 1,4 | 2,3 | 0,3 | 0,4 | 1,1 |
| 0,5 | 1,0 | 1,9 | 0,1 | 0,4 | 0,6 |
| 0,4 | 0,8 | 1,6 | 0,2 | 0,3 | 1,0 |
| 0,5 | 0,9 | 1,4 | 0,1 | 0,3 | 0,8 |
| priemer | | | | | |
| 0,6 ± 0,1 | 1,1 ± 0,1 | 1,9 ± 0,1 | 0,2 ± 0,1 | 0,5 ± 0,1 | 1,0 ± 0,1 |
| Vzdialenosť predmetu $a_2 = 60$ cm | | | | | |
| smer 1 | | | smer 2 | | |
| $\Delta a_1'$ [cm] | $\Delta a_2'$ [cm] | $\Delta a_3'$ [cm] | $\Delta a_1'$ [cm] | $\Delta a_2'$ [cm] | $\Delta a_3'$ [cm] |
| 0,1 | 0,5 | 0,6 | 0,3 | 0,3 | 0,6 |
| 0,2 | 0,4 | 0,9 | 0,1 | 0,2 | 0,6 |
| 0,1 | 0,3 | 1,0 | 0,0 | 0,1 | 0,4 |
| 0,2 | 0,3 | 1,0 | 0,0 | 0,2 | 0,4 |
| 0,3 | 0,6 | 1,0 | 0,1 | 0,2 | 0,5 |
| priemer | | | | | |
| 0,2 ± 0,1 | 0,4 ± 0,1 | 0,9 ± 0,1 | 0,1 ± 0,1 | 0,2 ± 0,1 | 0,5 ± 0,1 |

Závislosť $\Delta a'$ na druhej mocnine h podľa vzťahu (10) je vynesená v grafe 1. Chybové úsečky znázorňujú chybu podľa tabuľky 5. Namerané hodnoty sú preložené lineárnymi závislosťami prechádzajúcimi počiatkom. Smernice závislosti K pre jednotlivé vzdialenosti predmetu a orientácie šošovky sme určili ako

$$K_{a1,1} = (16 \pm 1) \text{ m}^{-1}$$

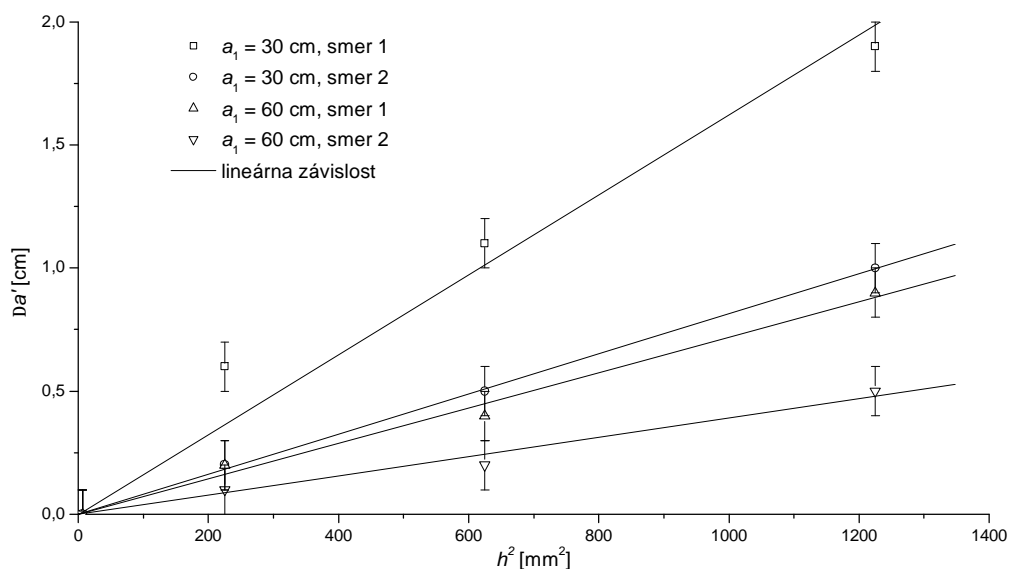
$$K_{a1,2} = (8,15 \pm 0,08) \text{ m}^{-1}$$

$$K_{a2,1} = (7,2 \pm 0,3) \text{ m}^{-1}$$

$$K_{a2,2} = (3,9 \pm 0,2) \text{ m}^{-1},$$

odchýlky sú určené ako chyby lineárnej regresie.

Graf 1: Závislosť $\Delta a'$ na h^2



Hlavné roviny

Pomocou goniometru sme merali vzdialenosť uzlových bodov tenkej a hrubej ploskovypuklej šošovky, ktorá sa pre šošovky rovná vzdialenosti hlavných rovín. Pre obidve orientácie šošovky sme na stupnici odčítali vzdialenosti x_1 a x_2 , pri ktorých sa obraz v ďalekohľade pri otáčaní šošovkou nepohyboval. Urobili sme päť meraní polohy šošovky pre obe orientácie a obe šošovky. Výslednú hodnotu vzdialenosti hlavných rovín δ určíme ako rozdiel polôh šošovky x_2 a x_1 .

Namerané polohy x_1 a x_2 a vypočítané hodnoty δ sú pre obe šošovky uvedené v tabuľke 3. Chybu určenia tejto polohy odhadujeme na 0,5 mm vzhľadom k tomu, že určenie, či sa obraz pohybuje, bolo subjektívne. Výsledné hodnoty vzdialeností hlavných rovín δ sme určili ako aritmetický priemer hodnôt pre jednotlivé merania:

$$d_t = (3,7 \pm 0,8) \text{ mm}$$

$$d_h = (12,4 \pm 0,6) \text{ mm},$$

výslednú chybu sme určili spojením chyby merania so štatistickou chybou.

Tabuľka 3: Vzdialenosti hlavných rovín

| č. mer. | tenká šošovka | | | hrubá šošovka | | |
|-------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|-----------------|
| | x_{1t} [mm] | x_{2t} [mm] | δ_t [mm] | x_{1h} [mm] | x_{2h} [mm] | δ_h [mm] |
| 1 | 16,6 | 20,5 | 3,9 | 15,2 | 27,9 | 12,7 |
| 2 | 16,8 | 20,3 | 3,5 | 15,2 | 27,2 | 12,0 |
| 3 | 16,5 | 20,2 | 3,7 | 14,9 | 27,2 | 12,3 |
| 4 | 18,2 | 21,1 | 2,9 | 14,6 | 27,0 | 12,4 |
| 5 | 16,7 | 21,3 | 4,6 | 14,4 | 26,9 | 12,5 |
| priemer | | | 3,7 | | | 12,4 |
| výsl. chyba | | | 0,8 | | | 0,6 |

Hrúbka hrubej šošovky je podľa [2] $d = 38$ mm. Jej chyba nie je explicitne zadaná, preto predpokladáme, že neprevyšuje polovicu posledného zadaného platného miesta, teda 0,5 mm. Podľa vzťahu (12) môžeme zo známej vzdialenosti hlavných

rovín a zo známej hrúbky šošovky určiť index lomu skla, z ktorého je šošovka vyrobená, ako

$$n = 1,48 \pm 0,03,$$

odchýlka je určená prenesením chýb veličín, ktoré vystupujú vo vzťahu (12).

Ak poznáme vzdialenosť hlavných rovín šošovky premeriavanej v úlohe 1, môžeme podľa vzťahu (5) urobiť korekciu ohniskovej vzdialenosti určenej Besselovou metódou. Dostaneme

$$f_k = 16,2 \pm 0,2 \text{ cm.}$$

Diskusia:

Na chybe určenia ohniskovej vzdialenosti pomocou Besselovej metódy sa podieľajú hlavne chyby určenia polôh šošovky, v ktorých bol obraz ostrý. Aj pri použití lupy nebolo totiž jednoduché posúdiť ostrosť obrazu. Chyba určenia vzdialenosti predmetu a obrazu je oproti tomu menšia. Relatívna chyba určenia ohniskovej vzdialenosti Besselovou metódou je $\eta_B = 1,2 \%$.

Na chybe určenia ohniskovej vzdialenosti pomocou metódy dvojakého zväčšenia sa okrem vyššie spomínanej chyby podieľali aj chyby určenia veľkosti obrazu. Veľkosť obrazu sme dostali ako rozdiel dvoch hodnôt polohy okrajov obrazu, z toho dôvodu je pre malé rozmery obrazu jej relatívna chyba pomerne veľká. Takisto nebolo jednoduché nastaviť rýsku presne na okraj obrazu. To sa odrazilo na relatívnej chybe určenia ohniskovej vzdialenosti, ktorá je $\eta_Z = 4 \%$.

Ohniskové vzdialenosti určené Besselovou metódou a metódou dvojakého zväčšenia sa v rámci chyby merania zhodujú.

Meranie mohlo byť tiež zaťažené systematickými chybami, napríklad ryska na stojane šošovky, tienidla a clony nemusela presne zodpovedať stredu týchto prvkov, ďalšie chyby mohli vzniknúť tým, že sme zväzok lúčov považovali za paraxiálny a šošovku za tenkú. Posledná spomínaná chyba sa dá korigovať, ak poznáme vzdialenosti hlavných rovín šošovky. Korekcia ohniskovej vzdialenosti je rovnakého rádu chyba jej určenia, to znamená, že túto systematickú chybu môžeme odhadnúť na 1,2 %. Šošovku teda môžeme považovať za tenkú.

Meranie guľovej vady šošovky $\Delta a'$ je zaťažené veľkou relatívnou chybou spôsobenou tým, že odčítame od seba dve blízke hodnoty. Navyše pri tomto meraní bolo takisto zložité určiť ostrosť obrazu.

Z grafu 1 vidíme, že namerané hodnoty zodpovedajú lineárnej závislosti podľa vzťahu (10). Akurát hodnoty pre vzdialenosť predmetu 30 cm a smer 1 nezodpovedajú lineárnej závislosti prechádzajúcej počiatkom celkom presne, keby sme však body preložili krivkou neprechádzajúcou počiatkom, splňovali by ju lepšie. Môže to byť spôsobené tým, že sme nulovú guľovú vadu sme predpokladali pre lúče, ktoré prechádzajú kruhovým otvorom s priemerom 10 mm, a teda v nenulovej vzdialenosti h od osi.

Podľa teoretických predpokladov by väčšia guľová vada mala byť pri orientácii šošovky rovinným rozhraním k predmetu (v protokole označenej ako smer 1) pre veľmi vzdialený predmet, pre predmet bližšie ako obraz je guľová vada väčšia v prípade otočenia šošovky guľovým rozhraním k predmetu (smer 2). Pre vzdialenosť $a_2 = 60$ cm sa tento predpoklad nepotvrdil, aj keď rozdiely sú menej výrazné a niektoré namerané hodnoty sa v rámci chyby prekrývajú. Meraním sa nám predpoklady podarilo potvrdiť len pre vzdialenosť predmetu $a_1 = 30$ cm. Vplyv na tento fakt môže mať napríklad umiestnenie clony, ktorá bola pri meraniach v smere 1

umiestnená za šošovkou a v smere 2 pred šošovkou, čo ovplyvní význam vzdialenosti h v jednotlivých prípadoch.

Na nepresnosti merania vzdialenosti uzlových bodov sa prejavila skutočnosť, že určenie, kedy sa predmet ešte pohybuje a kedy už nie nebolo jednoduché. Tento fakt sa prejavil na rozptyle nameraných hodnôt a následne na pomerne veľkej štatistickej chybe.

Záver:

Zmerali sme ohniskovú vzdialenosť šošovky Besselovou metódou ako

$$f_B = (16,4 \pm 0,2) \text{ cm}$$

a metódou dvojitého zväčšenia ako

$$f_Z = (17,3 \pm 0,7) \text{ cm.}$$

Zmerali sme guľovú vadu ploskovypuklej šošovky, namerané hodnoty sú uvedené v tabuľkách 3 – 5 a vynesené v grafe 1. Zmerali sme vzdialenosť hlavných rovín hrubej a tenkej šošovky ako

$$d_t = (3,7 \pm 0,8) \text{ mm}$$

$$d_h = (12,4 \pm 0,6) \text{ mm,}$$

zo známej hrúbky hrubej šošovky sme určili index lomu skla šošovky ako

$$n = 1,48 \pm 0,03 .$$

Literatúra:

[1] Študijný text k úlohe č. 2, <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp>

[2] I. Pelant, J. Fiala, J. Pospíšil, J. Fährnich: Fyzikální praktikum III. optika, Karolinum, Praha 1993