

# PAPRSKOVÁ OPTIKA

## Obecná část

Optika je jednou z nejstarších disciplín fyziky a významně přispěla k technologickému rozvoji (rozmanité měřicí přístroje), k vědeckému poznání přírody a ovlivnila celou společnost (vojenství, kartografie, přenos informací, astronomie). Paprsková (též nazývaná *geometrická*) optika je přibližný model (aproximace) pro rozměry optických součástek mnohem větší než je vlnová délka použitého světla. Základem je tvrzení, že světlo se šíří po přímkách – tzv. *paprscích*. Důležitou roli zde hraje lom světla na rozhraní dvou průhledných prostředí s rozdílnou rychlostí šíření světla (např. vzduch-sklo). Lom světla popisuje *Snellův zákon*:

$$\sin \alpha = n \cdot \sin \beta , \quad (1)$$

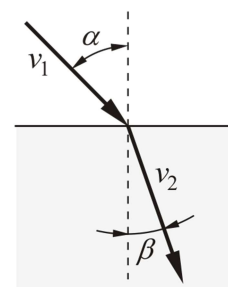
kde index lomu  $n$  je roven poměru rychlostí světla  $v_1/v_2$  v obou prostředích (viz obr. 1). Jev proměřil již Ptolemaios v r. 140 n. l. na rozhraní voda-vzduch a je to jeden z mála případů starověké řecké fyziky, kdy známe výsledky nějakého experimentu. Vztah (1) našel holandský matematik Willebrord Snell až v r. 1621. Aby bylo možno vytvořit obraz předmětu pomocí kusu skla s daným indexem lomu – čočky, je třeba, aby se všechny paprsky vycházející z určitého „svítícího“ bodu (ležícího v *předmětové rovině*) sešly za čočkou opět přesně v jednom bodu ležícím v *obrazové rovině*. Tomu odpovídá poměrně komplikovaný tvar povrchu čočky (křivka 4. stupně), který ovšem nelze snadno vyrobit. V praxi se proto používá kompromis – kulová plocha. Takto vyrobená čočka ovšem poskytuje pouze přibližné výsledky – nejlepší zobrazení je pro paprsky blízké optické ose. Říkáme, že čočka má *sférickou vadu*. Reálné čočky vykazují mnoho různých vad (vady čoček se také nazývají *aberrace*). Podmínka zobrazení bod→bod vede také k tomu, že z bodu v nekonečné vzdálenosti přicházejí paprsky rovnoběžné a ty se musí setkat za čočkou opět v bodu ležícím v ohniskové rovině. Pro paprsky rovnoběžné s osou se tento bod nazývá *ohnisko*.

Při běžných výpočtech předpokládáme čočku s ideálním povrchem, což vede na známou zobrazovací rovnici tenké čočky:

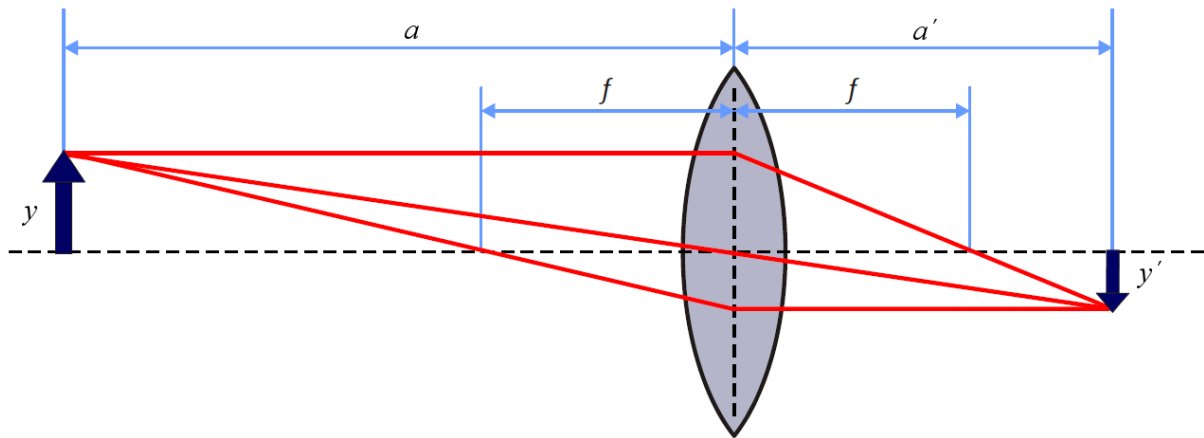
$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f} \quad (2)$$

Vztah můžeme odvodit pomocí tzv. *význačných paprsků* – to jsou takové paprsky, u kterých lze snadno určit jejich směr po průchodu čočkou (obr. 2). Jsou to:

- paprsek jdoucí rovnoběžně s optickou osou (u spojky pak po průchodu prochází ohniskem)
- paprsek procházející optickým středem čočky (prochází po přímce)
- paprsek procházející předmětovým ohniskem (za čočkou pokračuje rovnoběžně s osou)



Obr. 1 Lom světla



Obr. 2 Zobrazovací rovnice tenké čočky

Pomocí spojně čočky můžeme vytvořit zvětšený nebo zmenšený obraz. Zvětšení  $Z$  je definováno jako poměr velikosti obrazu  $y'$  a velikosti předmětu  $y$ . S předmětovou vzdáleností  $a$  a obrazovou vzdáleností  $a'$  je spojeno vztahem:

$$Z = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a}. \quad (3)$$

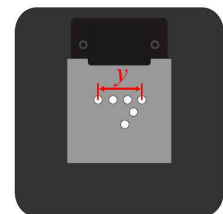
Předmětová a obrazová vzdálenost nemohou být voleny nezávisle – jsou svázány rovnicí (2).

### **Měření**

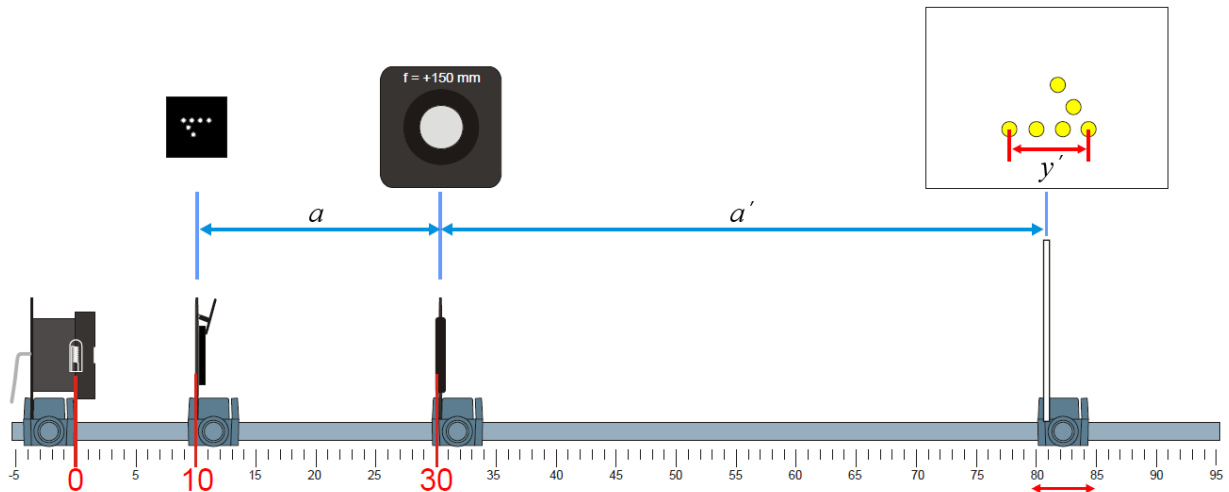
Měření budeme provádět na optickém systému Kröncke. Jednotlivé optické prvky jsou upevněny v destičkách  $10 \times 10$  cm, které se zasunou do drážky držáku. Držák se pak nasadí na optickou lavici a pomocí šroubu zafixuje. Sada také obsahuje dvě destičky s otvorem a svěrkou, která slouží k upevnění rámečků s různými optickými prvky (štěrbiny, otvory) nebo barevného filtru.

#### **A. Měření ohniskové vzdálenosti pomocí zobrazovací rovnice**

Do destičky se svěrkou vložte předmět – číslici „1“ složenou ze skleněných kuliček (naležato). Předtím si změřte pravítkem její výšku (obr.3). Připravte experiment podle obr. 4. Umístěte na optickou lavici osvětlovací lampu, měřenou čočku a na konec lavice bílé neprůhledné stínítko. Zapněte lampu zasunutím 12 V adaptéru do sítě, nastavte žádanou předmětovou vzdálenost, posouváním stínítka zaostřete obraz a změřte obrazovou vzdálenost a velikost obrazu (pravítkem). Chyba měření obrazové vzdálenosti závisí hodně na experimentátorovi – ten rozhoduje, kdy je obraz „správně“ zaostřen (vyzkoušejte si zaostřování oba z dvojice a své výsledky porovnejte – odtud můžete odhadnout chybu). Ze zobrazovací rovnice pak lze vypočítat ohniskovou vzdálenost. Měření proveďte pro více různých obrazových vzdáleností a jako výsledek pak vezměte průměr.



Obr. 3



Obr. 4 Experimentální uspořádání pro měření ohniskové vzdálenosti

### Pracovní úkol

- 1) Změřte velikost obrazu (výška číslice „1“).
- 2) Proved'te dle pokynu vyučujícího měření čočky  **$f=+150\text{mm}$**  (nebo  **$f=+100\text{mm}$** ).  
Předmětovou vzdálenost nastavujte od 200 až 600 mm s krokem 50 mm (resp. 160 až 480 mm s krokem 40 mm).
- 3) Odhadněte chybu v určení předmětové (je dána použitým měřidlem) a obrazové vzdálenosti (dána kombinací chyby měřidla a experimentátora).
- 4) Vypočtete (doma) pro každé měření poměry  $a'/a$ ,  $y'/y$  a ze zobrazovací rovnice ohniskovou vzdálenost  $f$ . Naměřené a vypočtené hodnoty uveďte do tabulky:

Tabulka 1: Naměřené hodnoty pro čočku  $f=+150\text{mm}$ ,  $y = \dots\dots\text{mm}$

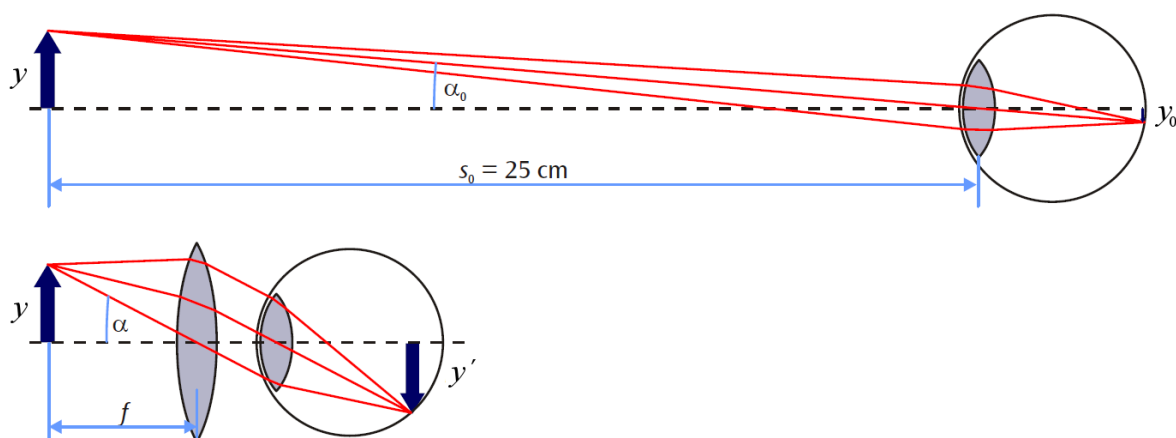
$a$ [mm]	$a'$ [mm]	$y'$ [mm]	$a'/a$	$y'/y$	$f$ [mm]
200	536	64,0	2,78	2,71	146
250	...	...	...	...	...

- 5) Jako výslednou ohniskovou vzdálenost vezměte aritmetický průměr. Stanovte též jeho směrodatnou chybu.
- 6) Stanovte chybu ohniskové vzdálenosti pro jeden vybraný řádek tabulky pomocí věty o přenosu chyby (str. 17 a 18 skript).

### B. Zvětšovací lupa

Lupa je spojná čočka s krátkou ohniskovou vzdáleností  $f$ , pomocí níž můžeme vidět předmět velikosti  $y$  okem, které je zcela relaxované. Relaxované zdravé oko je schopné vidět ostře objekty ležící ve vzdálenosti  $> 25\text{ cm}$ . Pokud sledujeme předmět pouhým okem v nejbližší možné vzdálenosti  $s_0 = 25\text{ cm}$ , je velikost obrazu na sítnici úměrná zornému úhlu  $\alpha_0$ , který je pro malé úhly v radiánech (viz obr. 5) přibližně:

$$\alpha_0 \cong \frac{y}{s_0} \quad (4)$$



Obr. 5 Chod paprsků při pozorování předmětu pouhým okem a pomocí zvětšovací lupy

Použijeme-li lupu těsně před okem, zvětšíme zorný úhel na hodnotu  $\alpha$ :

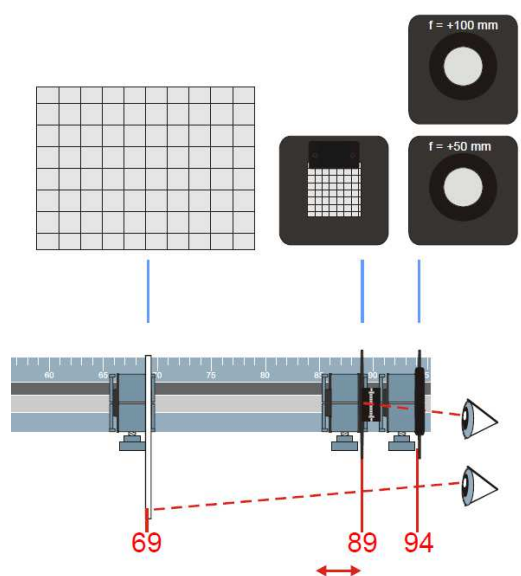
$$\alpha \cong \frac{y}{f} \quad (5)$$

(opět platí pro relativně malé úhly, kdy  $\text{tg} \alpha \cong \alpha$ ). Zvětšení pak můžeme vyjádřit jako poměr zorných úhlů s lupou a bez lupy:

$$Z \cong \frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{s_0}{f} \quad (6)$$

Postup měření:

- upevníte milimetrový papír o rozměrech  $60 \times 60$  mm do desky se svěrkou a umístíte ji na souřadnici 89 cm optické lavice (viz obr. 6)
- připevníte list milimetrového papíru lepicí páskou na stínítko a to umístíte na souřadnici 69 cm
- na souřadnici 94 cm umístíte měřenou čočku
- jedním okem pozorujete skrze měřenou čočku mm papír na desce, kterou posuňte tak, aby byl obraz zaostřený
- druhým okem pozorujete přímo mm papír na stínítku
- porovnejte čočkou zvětšený obraz s obrazem na stínítku a odhadněte zvětšení



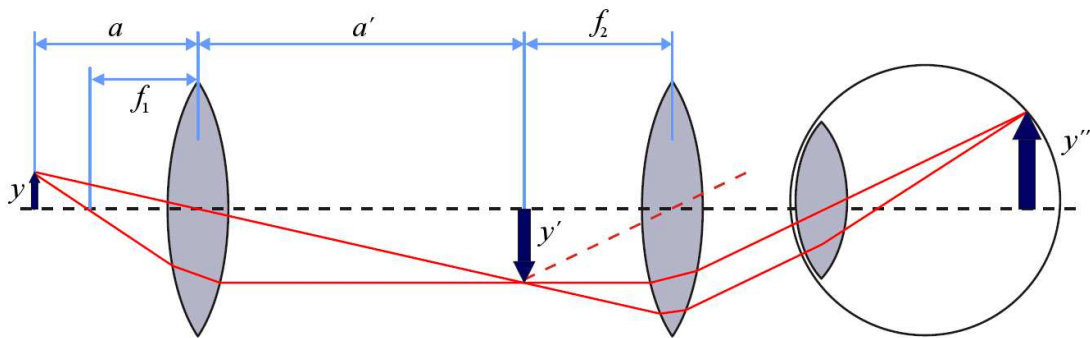
Obr. 6 Měření zvětšovací lupy, pohled shora

### Pracovní úkol

- 7) Změřte zvětšení lupy vytvořené z čoček  $f=+100\text{mm}$  a  $f=+50\text{mm}$ .
- 8) Vypočtete teoreticky dosažitelná zvětšení a porovnejte s naměřenými.

### C. Model mikroskopu

Mikroskop obvykle sestává ze dvou spojných čoček, objektivu a okuláru (obr. 7). Vzdálenost pozorovaného předmětu od objektivu  $a$  musí ležet mezi ohniskovou

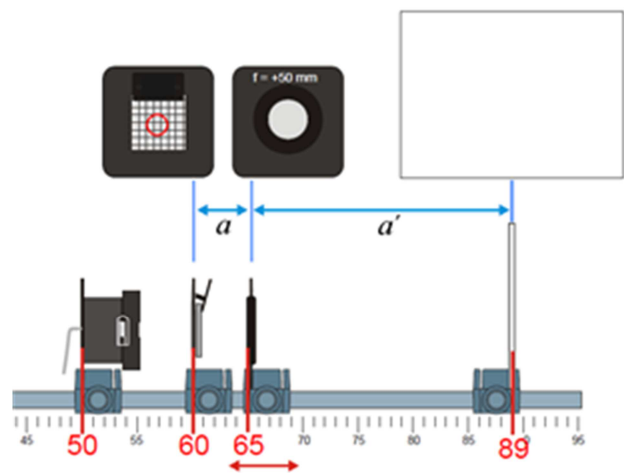


Obr. 7 Chod paprsků v mikroskopu

vzdáleností objektivu  $f_1$  a  $2f_1$ . Na druhé straně objektivu se zformuje převrácený zvětšený meziobraz  $y'$ . Ten musí ležet v ohniskové rovině okuláru, jenž působí jako zvětšovací lupa a umožní vidět pozorovateli zvětšený obraz předmětu relaxovaným okem. Výsledné zvětšení mikroskopu je pak dáno součinem zvětšení objektivu a okuláru.

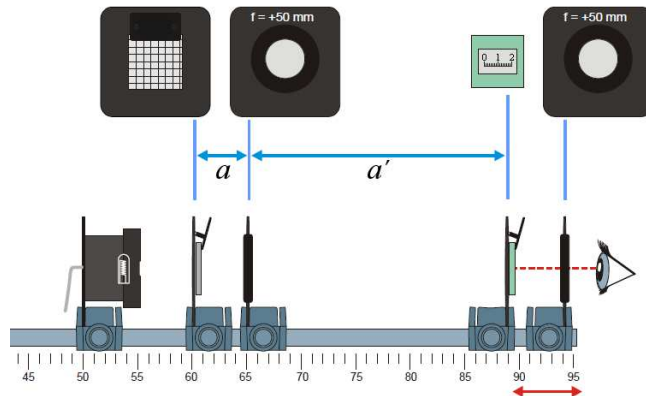
Postup měření:

- na milimetrový papír o rozměrech  $60 \times 60$  mm nakreslete červeným fixem do středu kroužek o průměru asi 4 mm a upevněte papír do desky se svěrkou tak, aby byl kroužek uprostřed otvoru
- umístěte lampu, desku s mm papírem, čočku  $f=+50\text{mm}$  (bude sloužit jako objektiv) a průhledné stínítko na optickou lavici podle obr. 8 (zafixujte vše kromě objektivu šrouby)
- zapněte lampu
- posouváním objektivu zaostřete na stínítku meziobraz kroužku
- na konec optické lavice umístěte další čočku  $f=+50\text{mm}$  (okulár)
- pozorujte obraz kroužku skrze okulár. Oko musí být v takové vzdálenosti, aby bylo zorné pole maximální. Posouváním okuláru obraz zaostřete a zafixujte šroubem.



Obr. 8

- odstraňte stínítko a **objektivem** doostřete obraz
- upevněte do jiné desky se svěrkou rámeček s 15 mm stupnicí (vodorovně) a umístěte ji na místo kde bylo původně stínítko (viz obr. 9)
- za stálého sledování obrazu kroužku posouvejte stupnici tak, aby byla také zaostřena (pak bude přesně v rovině meziobrazu)
- pomocí stupnice (je dělena po 0,1 mm) pak změřte na meziobrazu vzdálenost dvou sousedních linek milimetrového papíru
- změřte vzdálenost předmětu a objektivu  $a$  (předmětová vzdálenost)
- změřte vzdálenost objektivu a držáku s 15 mm stupnicí  $a'$  (obrazová vzdálenost)



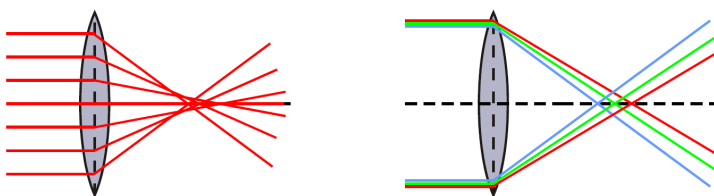
Obr. 9 Měření velikosti meziobrazu

### Pracovní úkol

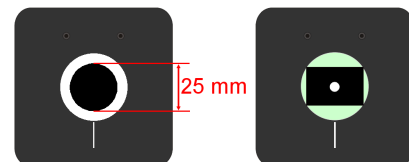
- 9) Sestavte model mikroskopu a změřte veličiny podle výše uvedeného postupu.
- 10) Vypočtete skutečné zvětšení objektivu ze změřené velikosti meziobrazu.
- 11) Vypočtete teoretické zvětšení objektivu z předmětové a obrazové vzdálenosti a porovnejte s naměřeným zvětšením.
- 12) Ze změřených hodnot vypočtete celkové zvětšení mikroskopu. Pro zvětšení okuláru použijte teoretickou hodnotu z úkolu B.

### D. Měření sférické vady a pozorování chromatické vady

Sférická (též kulová nebo otvorová) vada způsobuje, že paprsky rovnoběžné s optickou osou se po průchodu čočkou neprotnou ve stejném bodě. Poloha ohniska mírně závisí na vzdálenosti paprsků od osy (obr. 10). Chromatická (též barevná) vada je způsobena závislostí indexu lomu na vlnové délce světla, takže poloha ohniska mírně závisí také na barvě.



Obr. 10 Sférická a chromatická vada

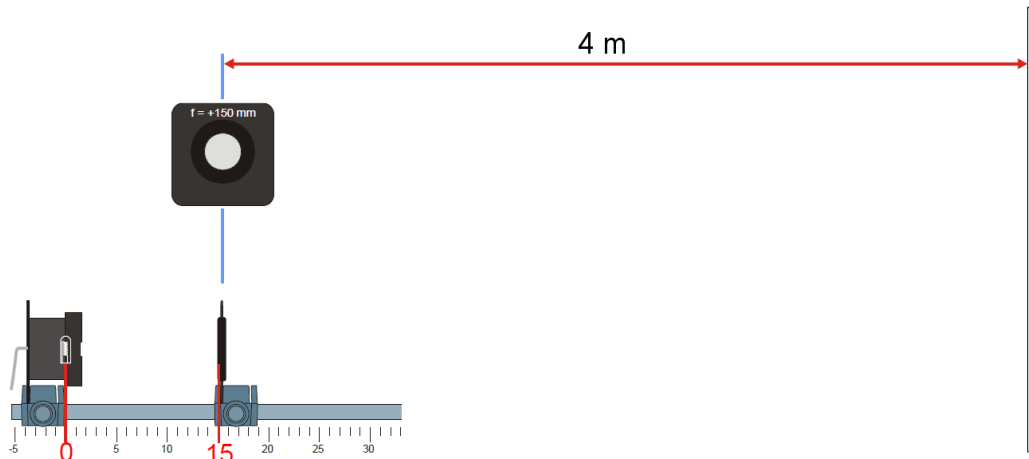


Obr. 11

Sférickou vadu budete zjišťovat pomocí experimentálního uspořádání na obr. 13. Pro zaclonění osových paprsků si připravte destičku se svěrkou, do jejíhož otvoru

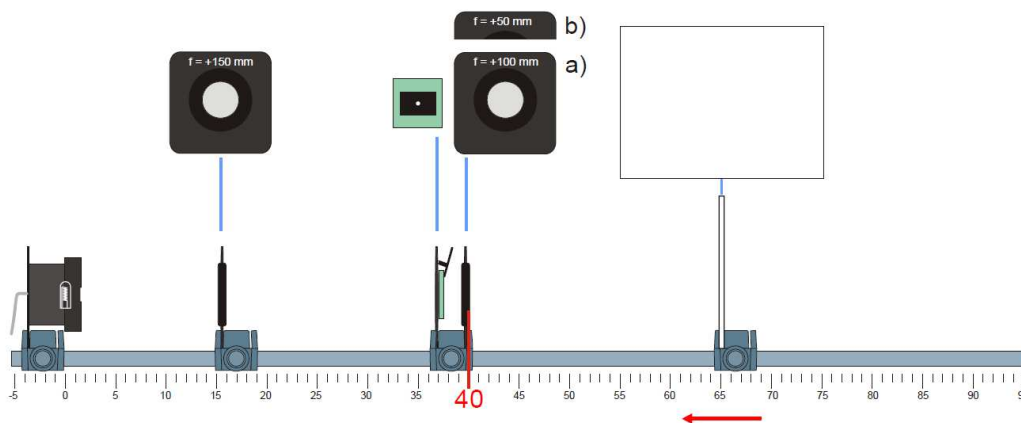
pomocí průhledné lepicí pásky upevněte symetricky kruhovou clonku o průměru 25 mm (obr. 11). Do druhé destičky upevněte rámeček s otvorem o průměru 6 mm. Otvor propustí pouze paprsky blízké ose. Pak připravte osvětlovací soustavu následujícím způsobem (obr. 12):

- do vzdálenosti 15 cm od světelného zdroje postavte čočku  **$f=+150\text{mm}$**
- zapněte lampu



Obr. 12 Příprava osvětlovací soustavy

- posouváním čočky vytvořte ostrý obraz vlákna žárovky na zdi (nebo papíru) vzdálené minimálně 4 m. Obraz je tvořen prakticky rovnoběžnými paprsky, neboť se nachází (vzhledem k ohniskové vzdálenosti čočky) v téměř „nekonečné“ vzdálenosti.
- do držáku umístěte měřenou čočku a před ní do téhož držáku zasuňte desku s clonou s otvorem 6 mm (viz obr. 13). Držák umístěte na optickou lavici tak, aby se čočka nacházela na souřadnici 40 cm

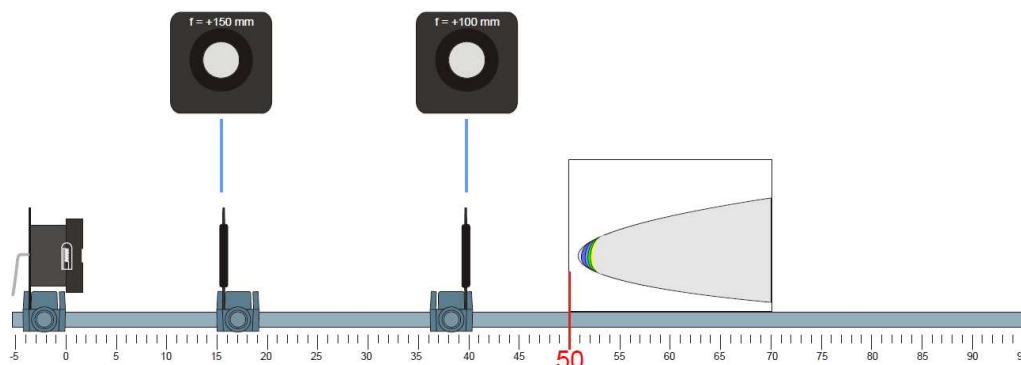


Obr. 13 Měření sférické vady pro osové paprsky

- nakonec posouváním stínítka zaostřete pečlivě obraz vlákna žárovky (je vhodné použít lupu a optimálně zaostřit např. přívodní drátek spirály – ten tolik nezáří)
- Stínítka se nyní nachází v bodě, kde se protínají osové rovnoběžné paprsky poté co prošly měřenou čočkou. Je to ohnisková vzdálenost pro osové paprsky.

- měření zopakujte s kruhovou clonkou 25 mm a získáte tak ohniskovou vzdálenost pro paprsky nejvíce vzdálené od optické osy. Již při měření si můžete povšimnout, že obraz vlákna tvořený krajními paprsky je mnohem méně kvalitní.

Pozorování chromatické vady provedete na stejném uspořádání jako u sférické vady. Testovanou čočku ponechte bez clony. Stínítko držte na optické lavici šikmo tak, aby po něm světlo „sklouzlo“ (viz obr. 14). Měli byste vidět část elipsy a v ohniskové oblasti barevné proužky jako důsledek nesterjné polohy ohniska pro různé barvy.



Obr. 14 Pozorování chromatické vady

### ***Pracovní úkol***

- 13) Změřte polohy ohnisek pro osové a okrajové paprsky u čočky  **$f=+100\text{mm}$** .
- 14) Popište důvod použití clon, diskutujte výsledky.
- 15) Pozorujte chromatickou vadu u čočky  **$f=+100\text{mm}$** .
- 16) Vysvětlete tvar osvětleného prostoru na šikmo umístěném stínítku a příčinu výskytu barevných pruhů v jeho špičce.