

LABORATORIUM OPTYKI GEOMETRYCZNEJ I INSTRUMENTALNEJ

ĆWICZENIE OG-2 POMIAR OGNISKOWYCH SOCZEWEK CIENKICH

1 Cele ćwiczenia

Zapoznanie z techniką pomiaru ogniskowych soczewek cienkich, zarówno skupiających, jak i rozpraszających, różnymi metodami. Poznanie pojęć związanych z przysłonami aperturowymi i połowymi. Nauka opracowywania wyników pomiarów, z uwzględnieniem niepewności pomiarowych, dla wielkości wyznaczanych bezpośrednio i obliczanych.

2 Zakres wymaganych zagadnień wstępnych

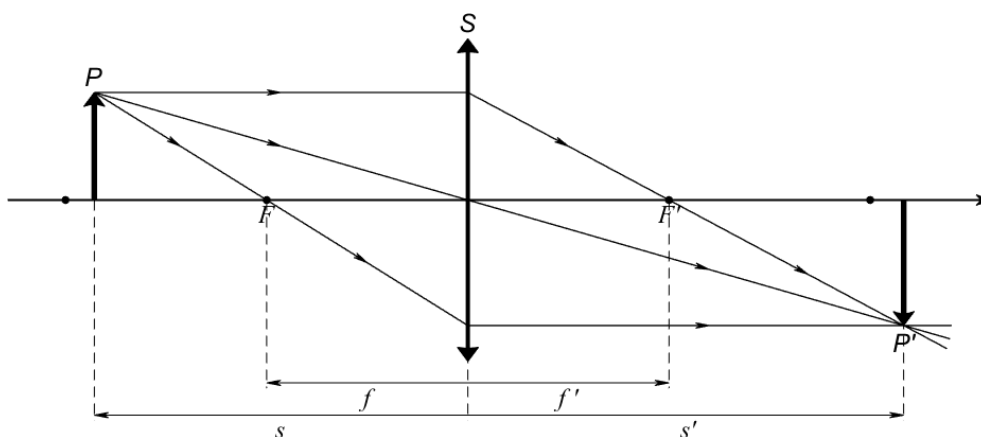
Do poprawnego wykonania ćwiczenia niezbędna jest znajomość poniższych zagadnień, weryfikowanych w trakcie egzaminu wejściowego:

- współczynnik załamania światła,
- prawo Snelliusa,
- bieg promieni przez soczewki cienkie,
- dyspersja chromatyczna,
- droga optyczna.

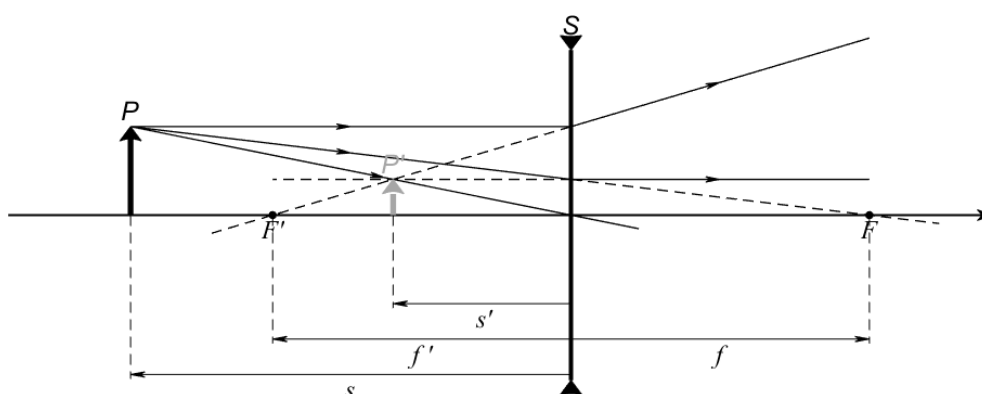
3 Wstęp teoretyczny

Soczewki to najważniejsze elementy układów optycznych, umożliwiające odwzorowanie zadanego w płaszczyźnie przedmiotowej rozkładu natężenia światła w płaszczyźnie obrazowej. Jakość i cechy tego odwzorowania są zależne od parametrów soczewek, w tym od ich ogniskowych. Znajomość ogniskowych soczewek umożliwia ich teoretyczną analizę i praktyczne zastosowanie.

Do ogólnej analizy układu optycznego przyjmuje się często, że grubość soczewek jest zanedbywalnie mała, co pozwala m.in. na prostsze zobrazowanie biegu promieni przez układ. Na rysunkach 1 i 2 zilustrowano tworzenie obrazu rzeczywistego przedmiotu przez soczewkę skupiającą i rozpraszającą, odpowiednio. Przyjęta powszechnie w optyce konwencja znaków wskazuje, że położenia znajdujące się po lewej stronie od analizowanej soczewki są ujemne, a po prawej – dodatnie, zakładając że światło biegnie z lewej strony na prawą.



Rysunek 1. Bieg promieni przez ciekłą soczewkę skupiającą dla przedmiotu rzeczywistego.



Rysunek 2. Bieg promieni przez ciekłą soczewkę rozpraszającą dla przedmiotu rzeczywistego.

4 Opis elementów części pomiarowej ćwiczenia

4.1 Wyznaczanie ogniskowej soczewki skupiającej z użyciem wzoru soczewkowego

Jest to najprostsza metoda, choć obarczona istotną niepewnością pomiarową. Wykorzystuje się w niej układ, który jest przedstawiony na rysunku 1. Przedmiot należy ustawić w położeniu pomiędzy F a $2F$ (wcześniej niż ognisko przedmiotowe), w taki sposób, by zaobserwować ostry obraz przedmiotu na ekranie. Dalej, należy zmierzyć odległość przedmiotu od soczewki (s z odpowiednim znakiem) oraz odległość obrazu od soczewki (s' z odpowiednim znakiem). Odległości można wyznaczyć odczytując położenia przedmiotu, soczewki i obrazu na ławie optycznej. Ogniskową obrazową soczewki można wtedy obliczyć ze wzoru

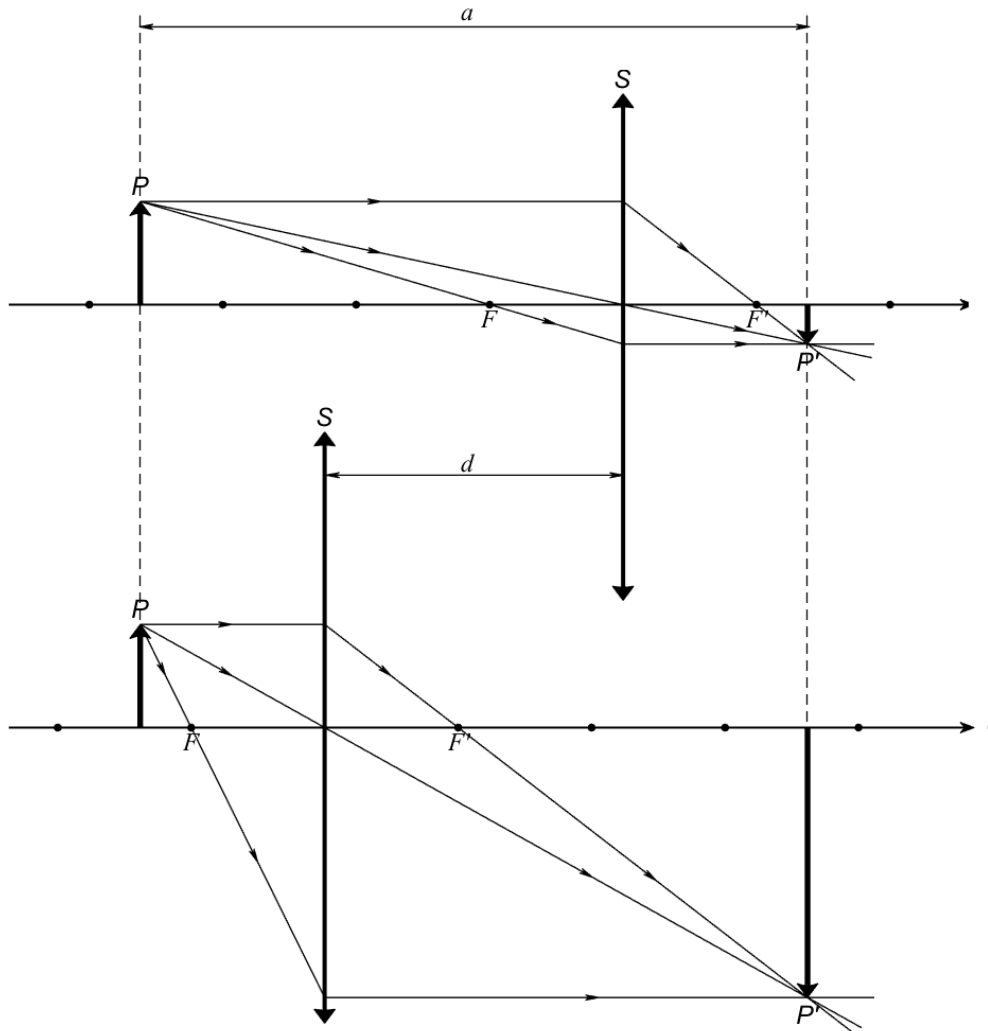
$$f' = \frac{s \cdot s'}{s - s'} \quad (1)$$

4.2 Wyznaczanie ogniskowej soczewki skupiającej metodą Bessela

W tej metodzie wykorzystuje się fakt, że jeśli odległość pomiędzy przedmiotem a obrazem jest większa niż 4 długości ogniskowych, to istnieją dwa (symetryczne względem środka układu) położenia soczewki, dla których zachodzi obrazowanie – uzyskujemy ostry obraz przedmiotu na ekranie. W jednym położeniu obraz jest powiększony, zaś w drugim pomniejszony. Układ pomiarowy należy zestawić według rysunku 3, szukając tych dwóch położen soczewki. Odległość pomiędzy położeniami soczewki jest dodatnia i oznaczona jako d .

Dalej, mając zmierzoną odległość pomiędzy przedmiotem a ekranem, oznaczoną a , możemy obliczyć długość ogniskowej soczewki się wzorem (2)

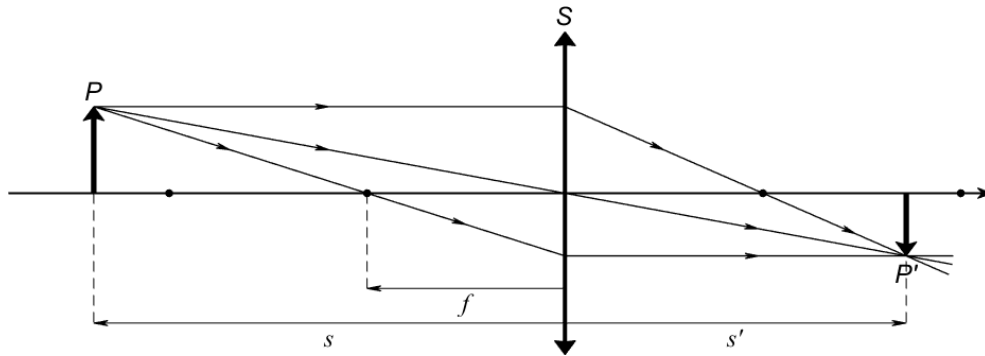
$$f' = \frac{a^2 - d^2}{4a}. \quad (2)$$



Rysunek 3. Schemat ustawienia elementów układu optycznego w metodzie Bessela.

4.3 Wyznaczanie ogniskowej soczewki skupiającej za pomocą wykresu

W tej metodzie, dla kilku położeń przedmiotu w zakresie $s < 2f$, znajduje się położenia (pomniejszonego) obrazu przedmiotu, jak pokazano na rysunku 4.



Rysunek 4. Schemat ustawienia elementów układu optycznego w metodzie z wykresem.

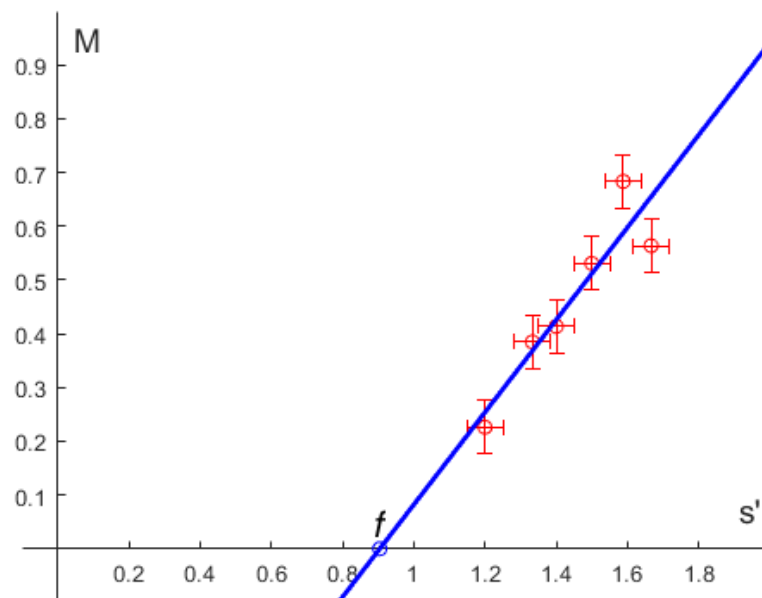
Przekształcając równanie soczewkowe dla ciennej soczewki otrzymujemy równanie

$$\frac{s'}{s} = 1 - \frac{s'}{f}. \quad (3)$$

Wielkość $|s'/s|$ jest powiększeniem soczewki (ozn. M). Ostatecznie otrzymujemy

$$M = \left| 1 - \frac{s'}{f} \right|. \quad (4)$$

Jeśli powyższe wyrażenie zobrazujemy na wykresie, na osi pionowej umieszczając powiększenie soczewki M , a na osi poziomej odległość obrazu od soczewki, otrzymane punkty będą się układały wzdłuż prostej o nachyleniu $1/f$. Rysunek 5 przedstawia przykładowy wykres. Ogniskowa f to taka wartość zmiennej s' , dla której prosta po przedłużeniu będzie się przecinać z osią x .



Rysunek 5. Schemat wykresu, pokazującego zależność powiększenia M od położenia obrazu, pozwalającego na wyznaczenie długości ogniskowej.

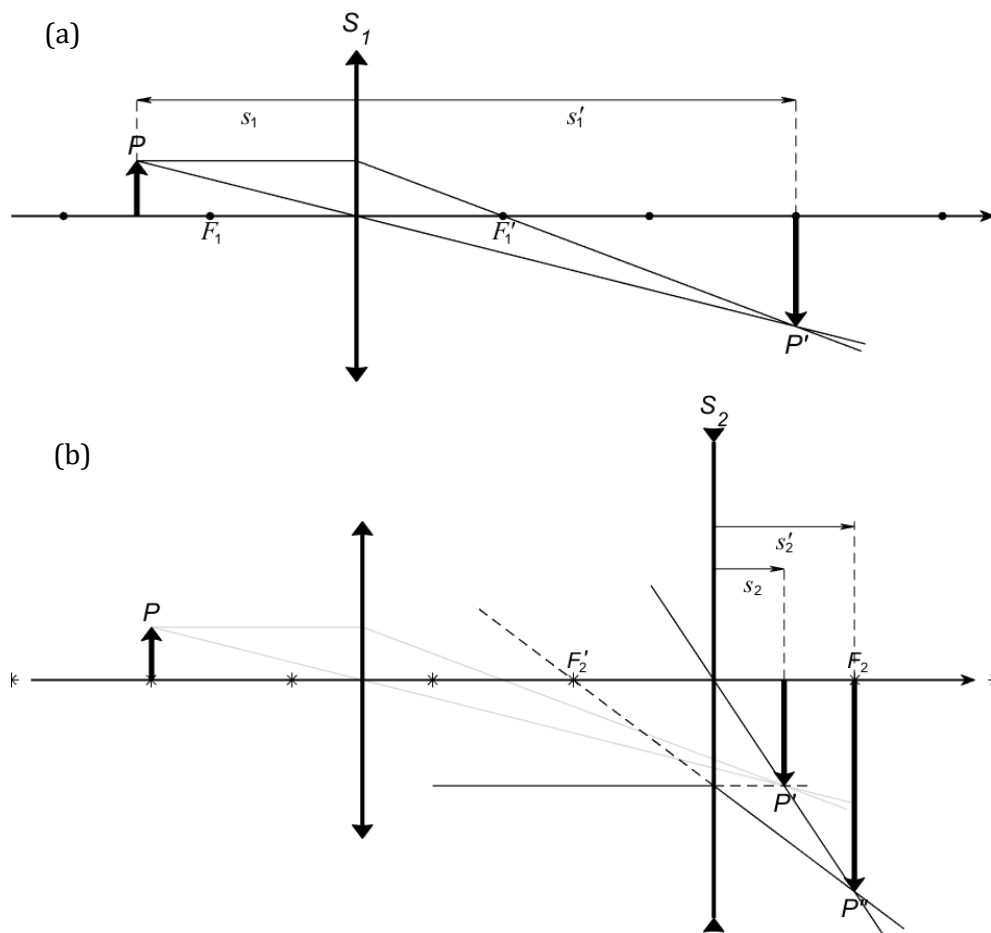
4.4 Wyznaczanie ogniskowej soczewki rozpraszającej

Soczewka rozpraszająca pozwala na uzyskanie pozornego obrazu rzeczywistego przedmiotu (jak na rysunku 2). Wyznaczenie ogniskowej takiej soczewki jest możliwe z wykorzystaniem układu dwóch soczewek: skupiającej o znanej ogniskowej oraz badanej – rozpraszającej.

Na początku należy zestawić układ z soczewką skupiającą, według rysunku 6a. Następnie, należy dostawić soczewkę rozpraszającą pomiędzy soczewką skupiającą a ekran, nie zmieniając położenia przedmiotu i soczewki skupiającej, jak na rysunku 6b. Obraz rzeczywisty, powstały za soczewką skupiającą, staje się przedmiotem pozornym dla soczewki rozpraszającej, co powoduje powstanie kolejnego obrazu (rzeczywistego) dalej od soczewki. Na podstawie różnicy odległości między jednym a drugim obrazem można obliczyć ogniskową soczewki rozpraszającej, zgodnie ze wzorem

$$f_2 = \frac{(s'_1 - d)s'_2}{s'_1 - s'_2 - d}, \quad (5)$$

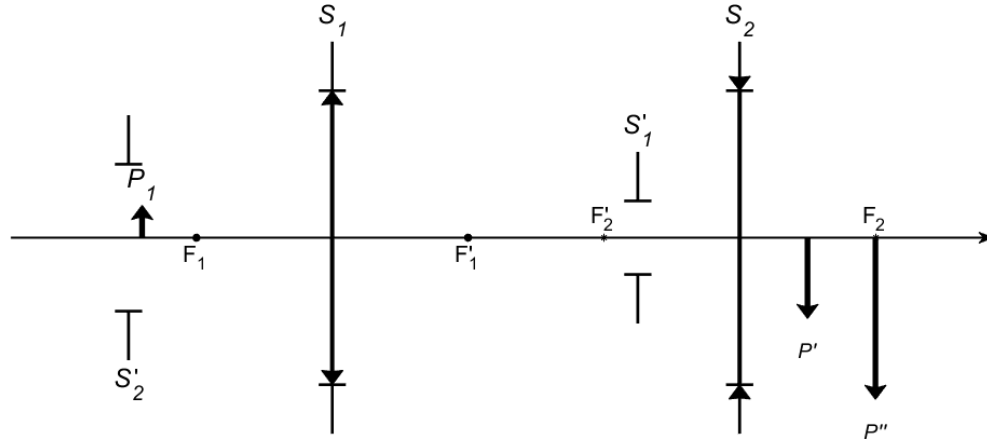
gdzie d – odległość między soczewkami, s'_1 – położenie ekranu względem soczewki skupiającej w pierwszym układzie (dodatnia), s'_2 – położenie ekranu względem soczewki rozpraszającej w drugim układzie (dodatnia).



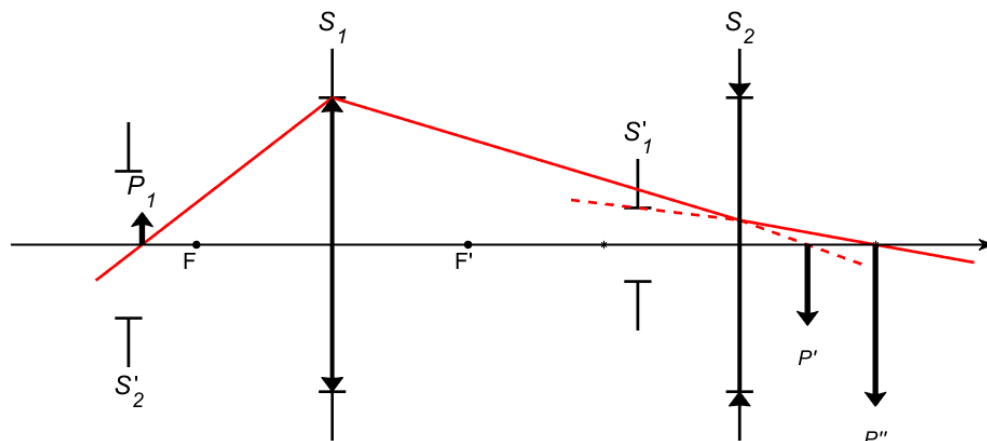
Rysunek 6. Powstawanie rzeczywistego obrazu (a) z użyciem soczewki skupiającej, (b) z użyciem soczewki skupiającej i dodatkowej soczewki rozpraszającej.

4.5 Wyznaczanie źrenic i luk w układzie 2-soczewkowym (materiał dodatkowy)

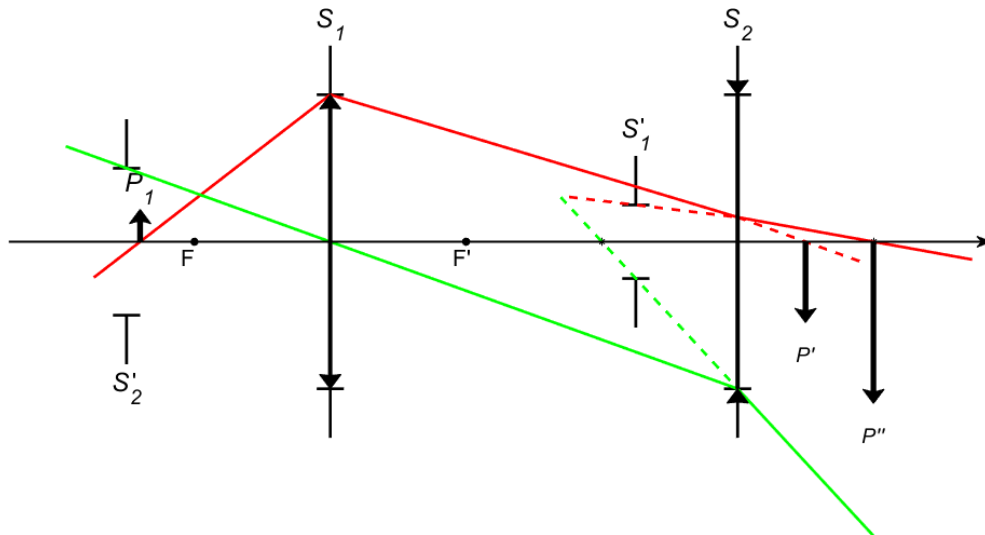
Ostatnia część ćwiczenia polega na przygotowaniu schematu układu z dwiema soczewkami, na którym zaznaczone będą źrenice i luki wejściowe i wyjściowe elementów układu, z wykorzystaniem konstrukcji promieni połowych i aperturowych w układzie. Schematycznie układy z zaznaczonymi soczewkami i promieniami przedstawiono na rysunkach 7-10.



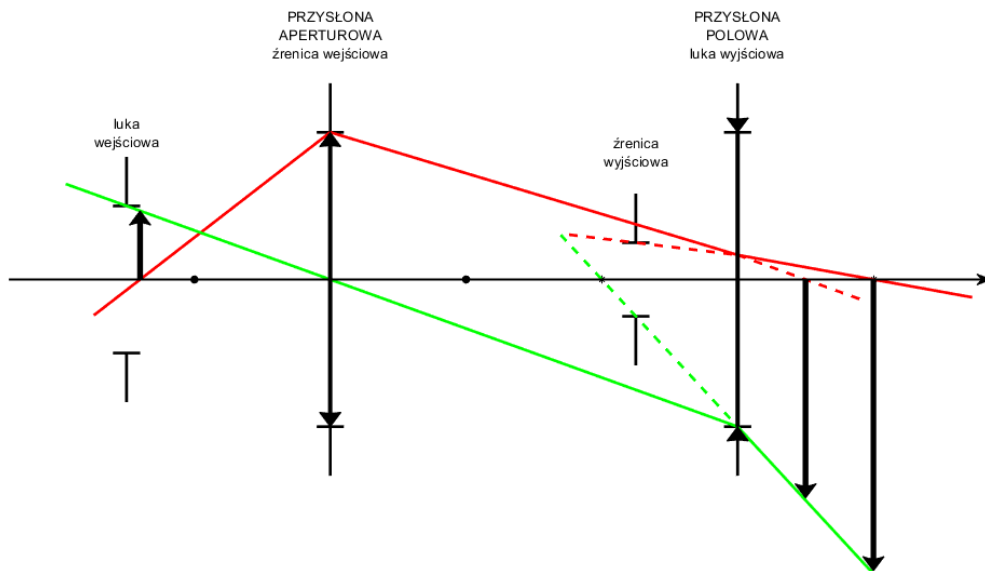
Rysunek 7. Przykład wyznaczania położenia obrazów oraz położenia i wielkości przyston w układzie dwóch soczewek.



Rysunek 8. Konstrukcja promienia aperturowego w układzie dwóch soczewek.



Rysunek 9. Konstrukcja promienia połowego w układzie dwóch soczewek.



Rysunek 10. Układ dwóch soczewek z zaznaczonymi przysłonami, źrenicami i lukami.

5 Obliczenia wartości ogniskowej i rachunek niepewności

- 1) Końcową wartość ogniskowej na podstawie metod A, B oraz D należy obliczyć jako średnią ze znalezionych wartości dla poszczególnych położen ekranu według wzoru

$$\bar{f}_c = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{f}_i}{N}. \quad (6)$$

Wykonanie ćwiczenia zakłada liczbę położen ekranu $N = 5$.

- 2) Rachunek błędów

W metodach A i B oraz D – w przypadku obu soczewek z osobna – niepewność wyznaczenia ogniskowej należy obliczyć jako tzw. błąd statystyczny, ze wzoru

$$\Delta \bar{f}_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{f}_c - \bar{f}_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (7)$$

Niepewność wyznaczenia ogniskowej soczewki rozpraszającej w metodzie D należy obliczyć jako niepewność złożoną, na którą składają się niepewności pochodzące od wszystkich wielkości występujących we wzorze (5) według następującego wzoru na tzw. propagację małych błędów

$$\Delta f_r = \sqrt{\left(\left|\frac{\partial f_2}{\partial s'_1}\right| \cdot \Delta s'_1\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial f_2}{\partial s'_2}\right| \cdot \Delta s'_2\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial f_2}{\partial d}\right| \cdot \Delta d\right)^2}. \quad (8)$$

6 Wykonanie ćwiczenia i opracowanie wyników

A. Wyznaczanie ogniskowej soczewki skupiającej metodą wzoru soczewkowego

1. Zestawić układ według schematu z rysunku 1 w ten sposób, że źródło znajduje się na jednym, a ekran na drugim końcu ławy optycznej. Przedmiot powinien znajdować się ok. 15 cm od źródła światła. Zapisać położenia przedmiotu i ekranu w odpowiednich komórkach tabeli 1.
2. Wstawić soczewkę w takim miejscu, aby uzyskać na ekranie ostry powiększony obraz. Zapisać znalezione położenie soczewki. Aby zminimalizować niedokładności ustawienia soczewki, należy powtórzyć procedurę jej wstawienia łącznie 4 razy.
3. Znaleźć położenie ekranu, dla którego obraz przedmiotu jest wielkości samego przedmiotu.
4. Następnie ustawić ekran w trzech pośrednich położeniach, w równych odstępach.
5. Łącznie należy znaleźć wartości położenia dla 5 różnych ustawień elementów. Łączna liczba pomiarów to 20 (tabela 1).
6. Obliczyć wartości ogniskowej, średniej wartości ogniskowej oraz niepewności wyznaczonej ogniskowej odpowiednio ze wzorów (1), (6) i (7).

B. Wyznaczanie ogniskowej soczewki skupiającej metodą Bessela

1. Zestawić układ według schematu z rysunku 3.
2. Wstawić soczewkę w takim miejscu, aby uzyskać na ekranie ostry powiększony obraz. Ekran ustawiać w położeniach pomiędzy położeniami z metody A.
3. Dla tej samej odległości ekranu znaleźć położenie soczewki, przy którym uzyskany obraz będzie ostry i pomniejszony.
4. Powtórzyć procedurę łącznie dla 5 położenia ekranu i w każdym przypadku dla 4 powtórzeń wstawienia soczewki. Znalezione wartości wpisać do tabeli 2.
5. Obliczyć wartości ogniskowej, średniej wartości ogniskowej oraz niepewności wyznaczonej ogniskowej ze wzorów (2), (6) i (7).

C. Wyznaczanie ogniskowej soczewki skupiającej za pomocą wykresu

1. Zestawić układ według schematu z rysunku 4.
2. Wstawić soczewkę w takim miejscu, aby uzyskać na ekranie ostry pomniejszony obraz. Ekran ustawiać w innych położeniach niż w dwóch poprzednich metodach.
3. Zapisać w tabeli 3 położenia elementów układu i powtórzyć procedurę łącznie dla 5 położenia ekranu, po 4 ustawienia soczewki przy każdym.
4. Obliczyć wartość powiększenia poprzecznego soczewki i sporządzić wykres powiększenia od odległości soczewki od ekranu $M = M(s')$, jak na rysunku 5.

5. Dopasować prostą do punktów na wykresie i wyznaczyć szukaną ogniskową soczewki. Jeśli dopasowanie wykonywano przy pomocy programu komputerowego, obliczyć niepewność wyznaczonej ogniskowej.

D. Wyznaczanie ogniskowej soczewki rozpraszającej

1. Zestawić układ według schematu z rysunku 6a.
2. Wykorzystując metodę ze wzoru soczewkowego (A), wyznaczyć ogniskową soczewki skupiającej (na podstawie wartości dla 5 położzeń ekranu, bez powtórzeń wstawiania soczewki).
3. Wstawić soczewkę rozpraszającą uzyskując układu według schematu z rysunku 6b.
4. Dla identycznych położzeń soczewki skupiającej jak w punkcie 2. znajdować i zapisywać w tabeli 4 położenie obrazu na ekranie po wstawieniu soczewki rozpraszającej.
5. Obliczyć wartości ogniskowej soczewki rozpraszającej, średniej wartości ogniskowej oraz niepewności odpowiednio ze wzorów (5), (6) i (8).
6. Sporządzić histogram wszystkich wyznaczonych różnymi metodami wartości ogniskowej soczewki skupiającej. Histogram powinien zawierać 11 przedziałów o jednakowej szerokości.

E. Wyznaczanie źrenic i luk w układzie dwóch soczewek

1. Zmierzyć średnice obu soczewek wykorzystywanych w układzie z punktu D ćwiczenia.
2. Narysować w skali rzeczywistej schemat układu z zaznaczeniem biegu odpowiednich promieni. Na podstawie biegu promieni wyznaczyć luki i źrenice układu, a następnie zaznaczyć je na rysunku i podpisać.
Obliczyć maksymalną wielkość przedmiotu, który może być jeszcze zobrazowany przez ten układ.

Literatura:

1. H. Szydłowski, „Pracownia fizyczna”
2. T. Hanc, „Pomiary optyczne”
3. F. Ratajczyk, „Instrumenty optyczne”
4. P. G. Hewitt, „Fizyka wokół nas”, rozdz. 6.
5. E. Boeker, R. van Grondelle, „Fizyka środowiska”, rozdz. 2. i 7.
6. *Encyklopedia Fizyki PWN*, hasła: spektrometr, monochromator

Tabela 1. Wyniki pomiarów do wyznaczania ogniskowej soczewki metodą ze wzoru soczewkowego (A). Do każdej komórki tabeli powinna zostać wpisana jedna wartość.

		l_p	$l_{p'}$	l_s	s	s'	f	\bar{f}			
1.	1.										
	2.										
	3.										
	4.										
2.	1.										
	2.										
	3.										
	4.										
3.	1.										
	2.										
	3.										
	4.										
4.	1.										
	2.										
	3.										
	4.										
5.	1.										
	2.										
	3.										
	4.										

Tabela 2. Wyniki pomiarów do wyznaczenia ogniskowej soczewki metodą Bessela (B).

		l_P	$l_{P'}$	l_{S1}	l_{S2}	$a = l_{P'} - l_P $	$d = l_{S1} - l_{S2} $	f	\bar{f}			
1.	1.											
	2.											
	3.											
	4.											
2.	1.											
	2.											
	3.											
	4.											
3.	1.											
	2.											
	3.											
	4.											
4.	1.											
	2.											
	3.											
	4.											
5.	1.											
	2.											
	3.											
	4.											

Tabela 3. Wyniki pomiarów do wyznaczania ogniskowej soczewki metodą wykresu (C).

		l_p	l_p'	l_s	s	s'	M
1.	1.						
	2.						
	3.						
	4.						
2.	1.						
	2.						
	3.						
	4.						
3.	1.						
	2.						
	3.						
	4.						
4.	1.						
	2.						
	3.						
	4.						
5.	1.						
	2.						
	3.						
	4.						

Tabela 4. Wyniki pomiarów do wyznaczania ogniskowej soczewki rozpraszającej (D).

	l_p	l_p'	ls_1	ls_2	s_1'	s_2'	d	f_2
1.								
2.								
3.								
4.								
5.								