



LABORATORIUM OPTYKI GEOMETRYCZNEJ

POMIAR OGNISKOWYCH SOCZEWEK CIENKICH

1. Cel ćwiczenia

Zapoznanie z niektórymi metodami badania ogniskowych soczewek cienkich.

2. Zakres wymaganych zagadnień:

- Prawa odbicia i załamania światła
- bieg promieni przez soczewki
- powstawanie obrazów
- równanie soczewki
- rodzaje soczewek
- ognisko i ogniskowa soczewki
- graficzna metoda konstrukcji obrazów w soczewce
- współczynnik załamania światła

2. Wprowadzenie

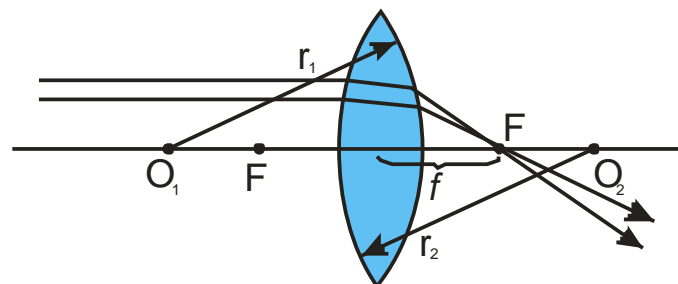
Soczewką nazywamy ciało przezroczyste ograniczone dwiema powierzchniami zakrzywionymi lub jedną powierzchnią płaską i jedną zakrzywioną. Najczęściej powierzchnie soczewek są powierzchniami kulistymi.

Przyjmując kształt soczewki jako kryterium klasyfikacji, dzielimy je na dwuwypukłe, dwuwklęsłe, płaskowklęsłe, płaskowypukłe, wypukłowlęsłe. Soczewkę nazywamy cienką, kiedy odległość powierzchni ograniczających ją jest bardzo mała w porównaniu z promieniem krzywizny tych powierzchni.

Promieniem krzywizny nazywamy promień kuli, której wycinkiem jest powierzchnia ograniczająca soczewkę. Środek tej kuli jest środkiem krzywizny. Soczewka posiada dwa środki krzywizny O_1 i O_2 . Linię łączącą środki krzywizny nazywamy główną osią optyczną soczewki.

Środkiem optycznym soczewki nazywamy punkt położony na jej osi optycznej i mający tę własność, że promienie przechodzące przez niego mają ten sam kierunek przed wejściem do soczewki i po wyjściu z niej. Środek optyczny soczewki cienkiej leży w przybliżeniu w środku geometrycznym soczewki.

Ogniskiem głównym nazywamy punkt, w którym soczewka skupia promienie równoległe do głównej osi optycznej biegnące ku niej. Dwa ogniska główne F znajdują się w równych odległościach po obu stronach soczewki.

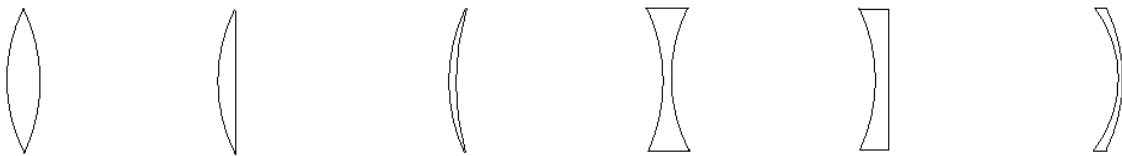


Rys. 1 Bieg promieni równoległych do głównej osi soczewki, promienie krzywizn r_1 r_2 , środki krzywizn O_1 i O_2 , ogniska soczewki F , ogniskowa f .



Ogniskową f soczewki nazywamy odległość od ogniska do środka optycznego soczewki.

Wierzchołkami soczewki nazywamy punkty przecięcia powierzchni łamiących soczewki z jej osią optyczną. Promienie padające pod niewielkimi kątami (prawie prostopadle) na powierzchnię soczewki w pobliżu soczewki nazywamy **promieniami przyosiowymi**. Z wyjątkiem promieni biegnących wzdłuż głównej osi optycznej, każdy promień przechodzący przez soczewkę ulega dwukrotnie załamaniu na obu powierzchniach soczewki. Bieg dowolnego promienia możemy wykreślić korzystając z prawa załamania światła. Jeżeli promienie równoległe do głównej osi optycznej po przejściu przez soczewkę odchylają się ku osi, soczewka nosi nazwę skupiającej; jeśli odchylają się od osi, soczewka nosi nazwę rozpraszającej. Gdy względny współczynnik załamania n_{12} jest większy od jedności, to soczewki dwuwypukłe, płaskowypukłe i wklęsłowypukłe (ogólnie te których środek jest grubszy od brzegów) są soczewkami skupiającymi, a soczewki dwuwklęsłe, płaskowklęsłe, wypukłowlęsłe soczewkami rozpraszającymi. Gdy współczynnik n_{12} jest mniejszy od jedności sytuacja jest odwrotna.



Rys.2 Różne rodzaje soczewek

Względny współczynnik załamania n_{12} jest to współczynnik załamania materiału 1 soczewki względem otaczającego ją ośrodka 2:

$$n_{12} = \frac{n_1}{n_2}$$

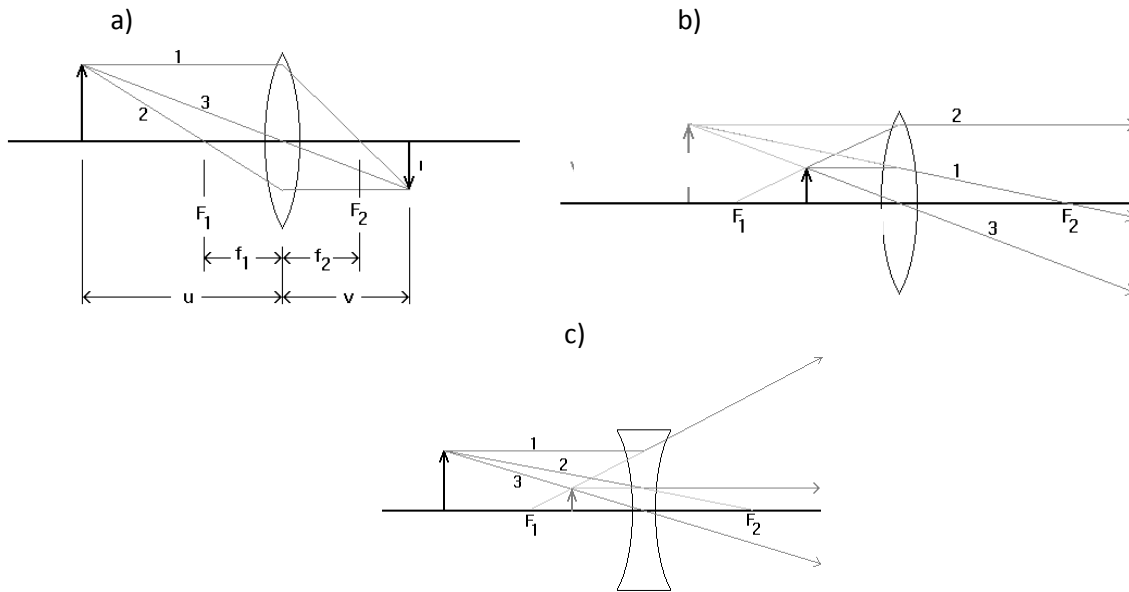
gdzie n_1 - bezwzględny współczynnik załamania materiału soczewki względem próżni, n_2 – bezwzględny współczynnik załamania otaczającego ośrodka względem próżni.

Odległość x przedmiotu od soczewki, odległość y obrazu od soczewki oraz ogniskowa f są związane równaniem soczewkowym:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x} + \frac{1}{y}$$

Jak już wspomniano wyżej dla soczewek skupiających promienie równoległe do głównej osi optycznej skupiają się po przejściu przez soczewkę w jej ognisku. Soczewka skupiająca wytwarza rzeczywiste obrazy przedmiotów położonych w odległości $x > f$ na głównej osi optycznej i pozorne obrazy przedmiotów położonych w odległości $x < f$.

W soczewce rozpraszającej promienie równoległe do głównej osi optycznej odchylają się po przejściu przez soczewkę tak, że ich przedłużenia przecinają się w ognisku pozornym - punkcie położonym na głównej osi optycznej przed soczewką. Ogniskowej f soczewki rozpraszającej przypisujemy umowną wartość ujemną, ujemna jest również wartość odległości y obrazu od soczewki. Soczewka rozpraszająca wytwarza obraz pozorny przedmiotów na głównej osi optycznej. Odległość przedmiotu x oraz obrazu y od soczewki spełnia również równanie soczewkowe.



Rys. 3 Konstrukcja obrazów w soczewkach: **a)** soczewka skupiająca, obraz rzeczywisty pomniejszony;
b) soczewka skupiająca, obraz pozorny, powiększony;
c) soczewka rozpraszająca, obraz pozorny, pomniejszony.

Powiększenie liniowe obrazu definiujemy jako stosunek rozmiarów liniowych obrazu do rozmiarów liniowych przedmiotu:

$$M = \frac{h_o}{h_p}$$

Wysokości przedmiotu h_p i obrazu h_o , mierzone prostopadłe do osi optycznej są zawsze dodatnie, więc i wartość powiększenia M jest zawsze dodatnia (tak dla obrazów prostych jak i dla obrazów odwróconych).

Ogniskowa układu optycznego złożonego z dwu soczewek cienkich o ogniskowych f_1 i f_2 wynosi:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{l}{f_1 f_2}$$

gdzie l oznacza odległość wzajemną tych soczewek.

Jeżeli dwie soczewki położone są bardzo blisko siebie, tzn. gdy $l \approx 0$, równanie to przyjmie postać:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

Odwrotność ogniskowej nosi nazwę zdolności skupiającej soczewki i oznaczamy ją przez Φ . Zdolność skupiającą soczewki mierzymy w dioptriach (oznaczamy skrótem D). Wymiarem dioptrii jest m^{-1} . Zdolność skupiająca układu soczewek jest równa sumie zdolności skupiających poszczególnych soczewek układu:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$$



3. Metody pomiarowe

- **Wyznaczanie ogniskowej soczewki metodą wzoru soczewkowego (A)**

Mierzymy odległość przedmiotu od soczewki a i obrazu od soczewki b . Ogniskową obliczamy ze wzoru:

$$f = \frac{ab}{a+b}$$

- **Wyznaczanie ogniskowej soczewki metodą Bessella (B)**

Wyznaczamy dwa położenia soczewki a_1 i a_2 , dla których na ekranie obserwuje się dwa ostre obrazy przedmiotu (powiększony i pomniejszony). Ogniskową obliczamy ze wzoru:

$$f = \frac{d^2 - a^2}{4d}$$

gdzie d jest odległością ekranu od przedmiotu, $a = a_1 - a_2$.

- **Wyznaczanie ogniskowej soczewki za pomocą wykresu zależności między powiększeniem a odległością obrazu od soczewki (C)**

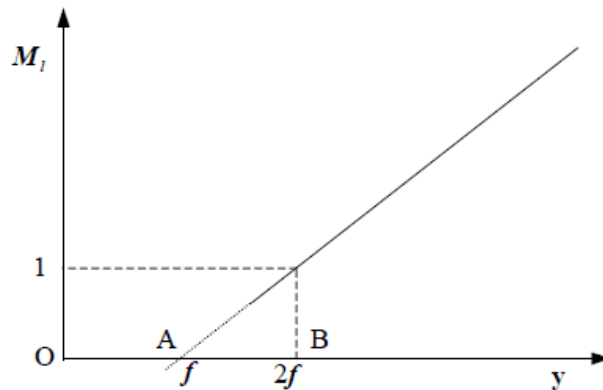
Z równania soczewkowego otrzymujemy:

$$\frac{y}{x} = \frac{y}{f} - 1$$

Wielkość y/x nazywamy powiększeniem soczewki M . Ostatecznie uzyskujemy wyrażenie:

$$M = \left| \frac{y}{f} - 1 \right|$$

Dla obrazów rzeczywistych i dla $y > f$, równanie to przedstawia prostą o nachyleniu $1/f$, przecinającą oś Oy w punkcie $y=f$. Wartość f można wyznaczyć przez ekstrapolację do przecięcia wykresu z osią Oy .



- **Wyznaczanie ogniskowej soczewki rozpraszającej (D)**

Wykorzystujemy relację daną wzorem:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{1}{l}$$

gdzie l jest wzajemną odległością między soczewkami, f jest ogniskową układu dwu soczewek, f_1 jest ogniskową soczewki skupiającej a f_2 ogniskową soczewki rozpraszającej.

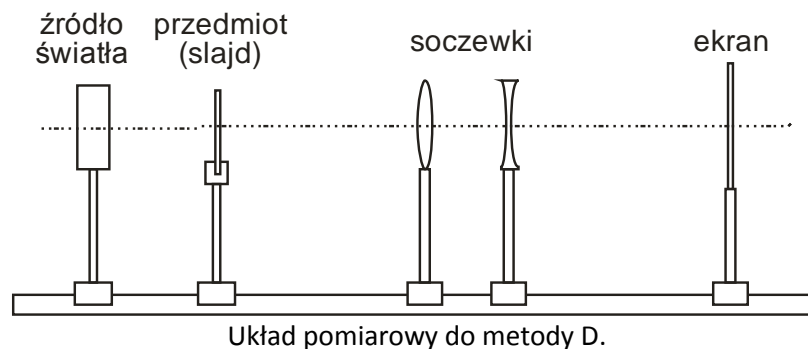
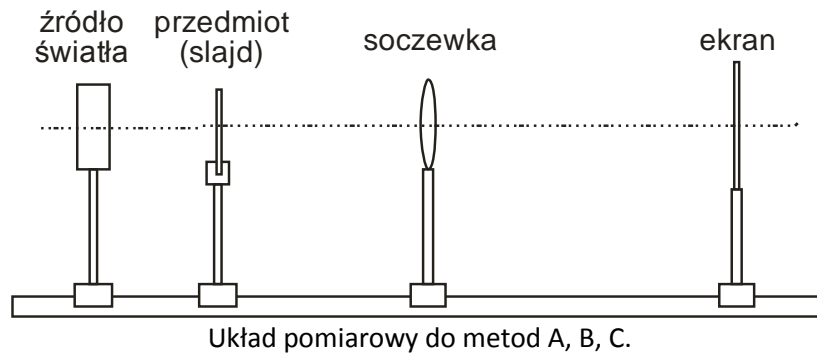


Wykorzystując zmierzoną ogniskową soczewki skupiającej f_1 , którą z wcześniejszych metod (A, B, C) wyznaczamy ogniskową soczewki rozpraszającej f_2 .

$$f_2 = \frac{f f_1}{f_1 - f}$$

Należy zwrócić uwagę, że musi być spełniony warunek: $f_1 < |f_2|$.

4. Układy pomiarowe



5. Wykonanie zadania

- Wyznaczanie ogniskowej soczewki metodą wzoru soczewkowego

1. Ustaw przedmiot i ekran w odległości rzędu jednego metra.
2. Między ekranem i przedmiotem świecącym ustaw soczewkę. Przesuń ją w położenie, w którym obraz na ekranie jest ostry. Odczytaj położenie przedmiotu l_p , soczewki l_s oraz ekranu l_e . Wyniki wpisz do tabeli.

Lp	l_p [cm]	l_s [cm]	l_e [cm]	a [cm]	b [cm]
1.					
2.					
..					
5.					

3. Wyznacz odległości między przedmiotem a soczewką a oraz między soczewką a ekranem b . Wyniki wpisz do tabeli.
4. Zmieniając kilkakrotnie położenie ekranu o 10 cm powtórz punkt 2.
5. Policz średnią z uzyskanych wyników.
6. Rachunek błędów - oblicz błąd średniokwadratowy wyznaczenia f .

• **Wyznaczanie ogniskowej soczewki za pomocą metody Bessella**

1. Ustaw przedmiot i ekran w odległości rzędu jednego metra. Wyznacz tę odległość d , odczytując położenia l_e i l_p ekranu i przedmiotu ($d = l_e - l_p$).
2. Między ekranem i przedmiotem świecącym ustaw soczewkę. Przesuń ją w położenie, w którym obraz na ekranie jest powiększony i najwyraźniejszy. Wyznacz położenie l_{s1} soczewki na ławie optycznej cztery razy. Wszystkie wyniki zapisz w tabeli pomiarów.
3. Przesuń soczewkę w położenie, w którym otrzymany na ekranie obraz zmniejszony jest najwyraźniejszy. Wyznacz położenie l_{s2} soczewki na ławie optycznej cztery razy. Wszystkie wyniki zapisz w tabeli pomiarów.
4. Pomiarzy z punktów 2 - 3 wykonaj dla kilku np. pięciu różnych odległości d .

Lp	l_p [cm]	l_e [cm]	$d = l_e - l_p$ [cm]	l_{s1} [cm]	l_{s2} [cm]	$a = l_{s2} - l_{s1}$ [cm]	\bar{a}
1.							
2.							
...							
5.							

5. Dla każdego z pomiarów d , \bar{a} policz ogniskową soczewki. Wyznacz średnią z uzyskanych wyników.
6. Rachunek błędów - oblicz błąd średniokwadratowy wyznaczenia \bar{a} oraz f .

• **Wyznaczanie ogniskowej soczewki za pomocą wykresu zależności między powiększeniem a odległością obrazu od soczewki**

1. Ustaw na ławie optycznej przedmiot świecący w odległości ok. 100 cm od ekranu.
2. Między przedmiotem świecącym i ekranem umieść soczewkę.
3. Ustaw soczewkę tak, aby obraz na ekranie był ostry i pomniejszony. Zanotuj w tabeli pomiarów położenia wskaźników przedmiotu, soczewki i ekranu na podziałce ławy optycznej. Przykład tabeli pomiarów poniżej (l_p - położenie przedmiotu, l_s - położenie soczewki, l_e - położenie ekranu).

Lp	l_p [cm]	l_s [cm]	l_e [cm]	$x = l_s - l_p$ [cm]	$y = l_e - l_s$ [cm]	$M = y/x$
1.						
2.						
...						
5.						

4. Przesuń soczewkę o 10 cm w stronę przedmiotu a następnie przesuwając ekran uzyskaj ostry obraz świecącej strzałki. Wyniki zapisz w tabeli.
5. Zmieniając położenie soczewki powtórz kilkakrotnie (np. 5 razy) punkt 4.
6. Oblicz poszczególne wartości powiększeń M .
7. Narysuj wykres zależności $M(y)$.



8. Zrób regresję liniową (korzystając z komputera) lub odczytaj dane z wykresu dla uzyskanych wyników.
9. Podaj wyliczoną wartość f i jej błąd.

- **Wyznaczanie ogniskowej soczewki rozpraszającej**

1. Wykorzystaj wcześniej obliczoną ogniskową f_1 soczewki skupiającej.
2. Ustaw na ławie optycznej układ złożony z soczewki skupiającej o ogniskowej f_1 i soczewki rozpraszającej o ogniskowej f_2 .
3. Wyznacz ogniskową f tego układu soczewek korzystając z metod A i C (jeden zbiór danych pomiarowych). Przyjmij, że położenie soczewki równoważnej dwóm soczewkom wykorzystanych w eksperymencie położone jest po środku między nimi.
4. Na podstawie wzoru na ogniskową układu 2 soczewek wyprowadź wzór na ogniskową soczewki rozpraszającej.
5. Przeprowadź rachunek błędów dotyczący wyznaczenia ogniskowej soczewki rozpraszającej korzystając z wyprowadzonego w punkcie 4 wzoru i różniczek:

$$\partial_f(\) = \frac{l + f_1}{f - f_1} - \frac{f(l + f_1)}{(f - f_1)^2}$$

$$\partial_{f_1}(\) = \frac{f}{f - f_1} + \frac{f(l + f_1)}{(f - f_1)^2}$$

$$\partial_l(\) = \frac{f}{f - f_1}$$

6. Literatura

1. H. Szydłowski, „Pracownia fizyczna”
2. P. G. Hewitt, „Fizyka wokół nas”, rozdz. 6.
3. J. R. Mayer-Arendt, „Wstęp do optyki”
4. A. Sojecki, „Optyka”
5. J. Nowak, M. Zając, „Optyka kurs elementarny”