

Ćwiczenie nr 7

Pomiar odległości ogniskowych soczewek

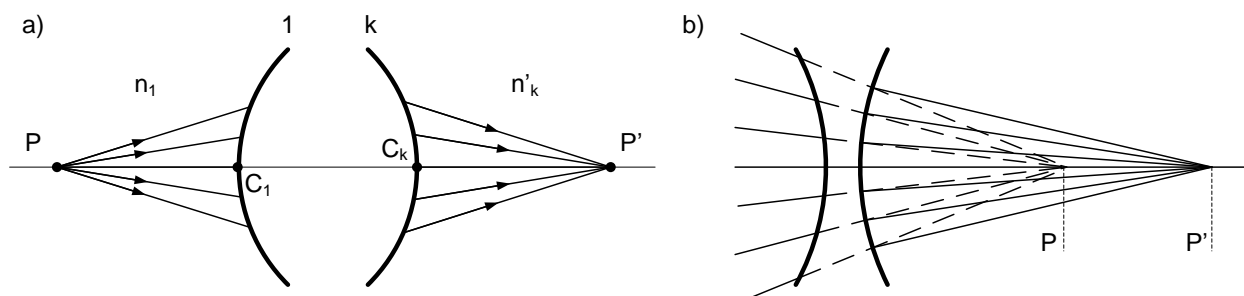
Wstęp teoretyczny:

Wiązką homocentryczną nazywamy wiązkę promieni, posiadających jeden wspólny punkt przecięcia. Taka wiązka może być rozbieżna lub zbieżna. Zadaniem idealnego układu optycznego jest przekształcenie każdej wiązki homocentrycznej w inną wiązkę, również homocentryczną. Będziemy rozpatrywali tylko układy składające się z powierzchni sferycznych. Oś optyczną takiego układu jest prosta, na której znajdują się środki krzywizn tych powierzchni.

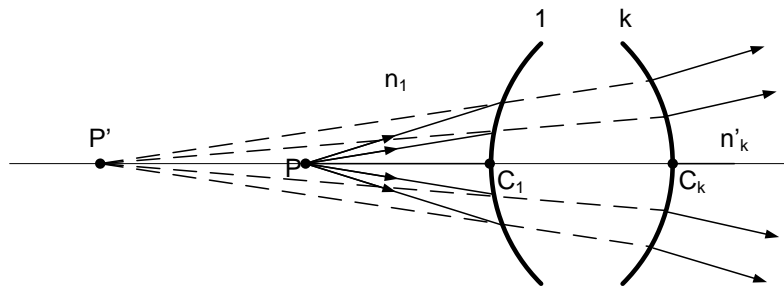
Każdy przedmiot będziemy traktowali jako zbiór punktów wysyłających promieniowanie. Obrazem takiego przedmiotu będzie również zbiór punktów, do których schodzą się homocentryczne wiązki promieni.

Przestrzeń przedmiotową nazywamy zbiór punktów przestrzeni, w której znajdują się przedmioty, a zbiór ich obrazów tworzy *przestrzeń obrazową*.

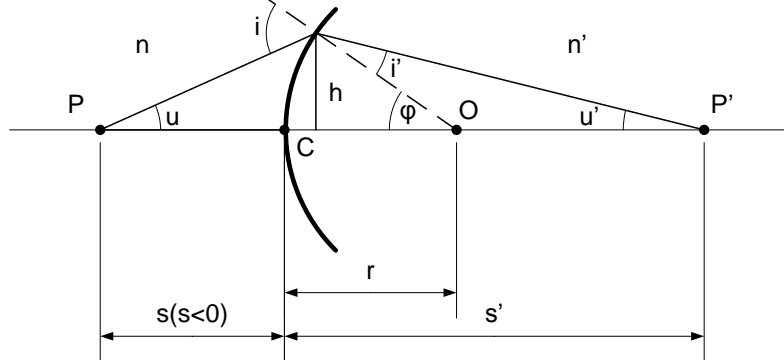
Rozróżniamy przedmioty rzeczywiste i urojone oraz obrazy rzeczywiste i urojone. Z każdego punktu przedmiotu rzeczywistego wysyłana jest wiązka rozbieżna promieni. Takie rozbieżne homocentryczne wiązki promieni padają na rozpatrywany element optyczny (rys. 1a). W przypadku przedmiotu urojonego na element optyczny pada zbieżna wiązka promieni (rys. 1b). Punkt przecięcia się przedłużeń tych promieni wyznacza położenie przedmiotu urojonego. Obraz nazywamy rzeczywistym, jeśli promienie po przejściu przez soczewkę lub układ soczewek zbiegają się do punktu obrazowego. Jeśli po przejściu przez element optyczny promienie tworzą wiązkę rozbieżną, tzn. przecinają się w rzeczywistości ich wsteczne przedłużenia (rys. 2), to wtedy obraz nazywamy urojonym lub pozornym. Punkt C , w którym oś optyczna przecina powierzchnię łamiącą nazywamy wierzchołkiem tej powierzchni. Symbole odnoszące się do przestrzeni obrazowej będziemy oznaczali indeksem „prim”. Kolejne powierzchnie łamiące będą numerowane liczbami (np. 1,2,3,...k).



Rys.1. Rzeczywisty obraz P' przedmiotu punktowego P : a) rzeczywistego, b) urojonego.



Rys. 2. Obraz urojony P' punktu P .



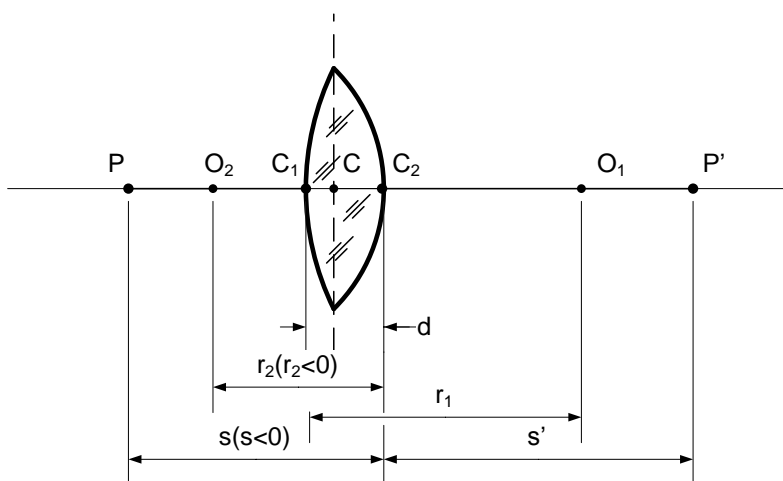
Rys. 3. Reguła znaków dla odcinków i kątów $s, u, i, i' < 0$.

Z reguły do opisu położenia obrazów i przedmiotów przyjmuje się następująca **konwencję znaków**: Wszystkie odległości mierzymy od środka powierzchni załamującej (punkt C , rys. 3). Środek powierzchni możemy umownie uważać za początek układu współrzędnych. Wszystkie odległości mierzone od punktu C zgodnie z kierunkiem biegu promieni świetlnych mają znak dodatni (rys. 3). Odległości mierzone od punktu C w kierunku przeciwnym do biegu promieni świetlnych mają znak ujemny. Odległości w kierunku prostopadłym do osi optycznej mierzone ku górze są dodatnie, ku dołowi ujemne. Kąty są mierzone w stosunku do osi optycznej lub od normalnej do powierzchni załamującej (rys. 3) do promienia światła. Jeśli ten kąt ma kierunek zgodny z ruchem wskazówek zegara przypisujemy mu znak dodatni, gdy kąt ten ma kierunek przeciwny do ruchu wskazówek zegara, przypisujemy mu znak ujemny (rys. 3). Promień krzywizny powierzchni łamiącej jest dodatni, gdy promienie świetlne padają na stronę wypukłą.

1. Definicje

Soczewką nazywamy bryłę z materiału przezroczystego ograniczoną z dwóch stron powierzchniami sferycznymi (jedna z nich może być płaska). Środkami krzywizny O_1, O_2 soczewki nazywamy środki kul, których częściami są powierzchnie łamiące soczewki, a promieniami krzywizn r_1, r_2 soczewki – promienie tych kul (rys. 4).

Oś optyczną nazywamy prostą przechodzącą przez środki krzywizn obu powierzchni soczewki. Odległość między wierzchołkami powierzchni kul jest jej grubością d (rys. 4).



Rys. 4. Soczewka skupiająca.

Soczewkę nazywamy *cieńką*, jeśli grubość soczewki d można zaniedbać w porównaniu z promieniami krzywizny powierzchni ograniczających soczewkę. Dla soczewek cienkich można przyjąć, że punkty C_1 i C_2 pokrywają się ze środkiem geometrycznym soczewki C , od którego należy liczyć odległości (rys. 4). Punkt C nazywa się *środkiem optycznym soczewki*.

Wzór wiążący odległości przedmiotu s oraz obrazu s' od soczewki cienkiej ma postać:

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \left(\frac{n}{n'} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \quad (1)$$

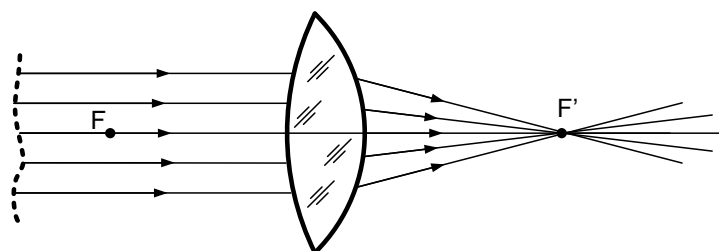
gdzie: r_1 , r_2 – promienie krzywizny pierwszej i drugiej powierzchni łamiącej soczewki, n – współczynnik załamania materiału soczewki, n' – współczynnik załamania ośrodka, w którym znajduje się soczewka.

Ze wzoru (1) wynika, że jeśli $s = \infty$, to $s' = f'$ jest odległością ogniskową obrazową soczewki:

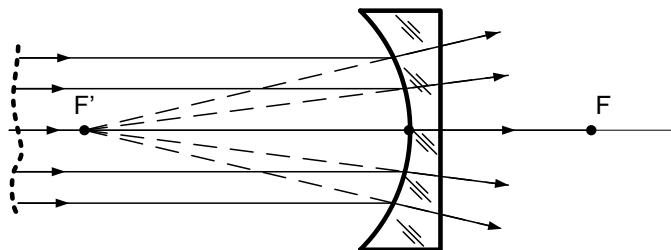
$$\frac{1}{f'} = \left(\frac{n}{n'} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (2)$$

Jeśli natomiast, $s' = \infty$, to $s = f$ jest odległością ogniskową przedmiotową soczewki:

$$\frac{1}{f} = - \left(\frac{n}{n'} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (3)$$



Rys. 5. Przejście wiązki równoległej przez soczewkę skupiającą: F , F' - ogniska odpowiednio przedmiotowe i obrazowe soczewki.



Rys. 6. Przejście wiązki równoległej przez soczewkę rozpraszającą: F, F' – ogniska odpowiednio przedmiotowe i obrazowe soczewki.

Ogniskiem obrazowym F' soczewki nazywamy punkt, w którym skupiają się promienie przyosiowe równoległe do osi optycznej soczewki po przejściu przez nią lub wsteczne przedłużenia tych promieni (rys. 5 i rys. 6)

Podobnie ogniskiem przedmiotowym F soczewki jest punkt, którego obraz znajduje się w nieskończoności. Jak wynika ze wzorów (2) i (3):

$$f' = -f, \quad (4)$$

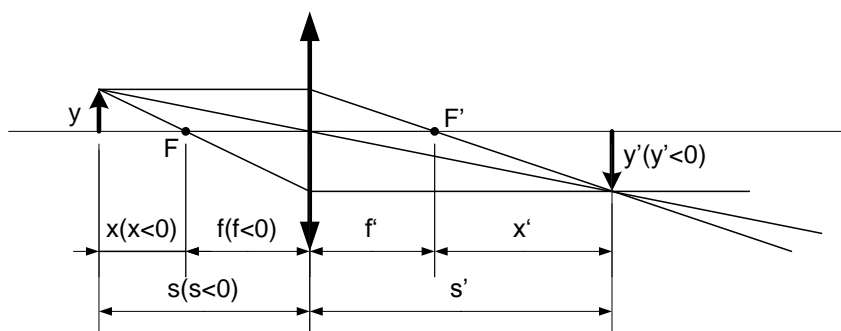
jeśli po obu stronach soczewki znajduje się ten sam ośrodek n' . Wprowadzając pojęcie odległości ogniskowej obrazowej soczewki f' do wzoru (1) otrzymujemy **równanie soczewek cienkich** w postaci:

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'} \quad (5)$$

Istnieje również inna postać równania soczewki cienkiej, znana jako wzór Newtona. We wzorze Newtona odległości przedmiotu mierzone są od ogniska przedmiotowego (x); natomiast obrazu – od ogniska obrazowego (x') (rys. 7). Wzór Newtona ma następującą postać:

$$xx' = ff' = -f'^2 = -f^2 \quad (6)$$

Soczewki zgodnie z ich działaniem dzielimy na dwie grupy: skupiające (dodatnie) oraz rozpraszające (ujemne).

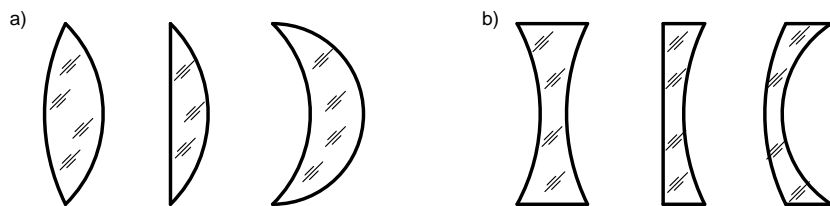


Rys. 7. Ilustracja do wzoru Newtona.

Soczewkę nazywamy *skupiającą*, jeśli jej ogniska F' i F są rzeczywiste, tzn. jeśli wiązki promieni równoległych do osi optycznej po załamaniu w soczewce zostają w nich skupione. Dla soczewek skupiających $f' > 0$.

Soczewkę nazywamy *rozpraszającą*, jeśli jej ogniska F' i F są urojone (pozorne), tzn. jeśli promienie równoległe do osi optycznej po załamaniu w soczewce stają się rozbieżne, a przecinają się tylko ich wsteczne przedłużenia. Dla soczewek rozpraszających $f' < 0$.

Analizując wzór soczewkowy (2) widzimy, że soczewki wykonane z materiału o współczynniku załamania większym niż współczynnik załamania otaczającego soczewkę ośrodka (n') są skupiające, gdy są grubsze w środku niż na brzegu (rys. 8a). Analogicznie soczewki są rozpraszające, gdy są cieńsze w środku niż na brzegu (rys. 8b).



Rys. 8. Typy soczewek: a) dwuwypukłe, płasko–wypukłe oraz wklęsło–wypukłe, b) dwuwklęsłe, płasko–wklęsłe oraz wypukło–wklęsłe.

Zdolnością skupiającą soczewki (Z) nazywamy odwrotność odległości ogniskowej obrazowej f' :

$$Z = \frac{1}{f'}. \quad (7)$$

Jeśli f' jest wyrażona w metrach, to Z otrzymujemy w dioptriach [$D=1/m$].

Soczewki jako samodzielne elementy optyczne są często wykorzystywane w optyce, niemniej jednak równie często pracuje się z układami złożonymi z wielu soczewek. Wyrażenie pozwalające wyznaczyć ogniskową układu dwóch soczewek ma postać:

$$\frac{1}{f'_{1,2}} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2}, \quad (8)$$

gdzie f'_1 – odległość ogniskowa obrazowa soczewki skupiającej, f'_2 – odległość ogniskowa obrazowa soczewki rozpraszającej, $f'_{1,2}$ – odległość ogniskowa obrazowa układu soczewek.

Przebieg pomiarów

2. Szacowanie odległości ogniskowych soczewek skupiających

Do przeprowadzenia ćwiczenia należy wybrać soczewkę skupiającą i rozpraszającą tak, aby układ obu soczewek był układem **skupiającym (dodatnim)**. W celu oszacowania ogniskowych f'_{sz} wybranej soczewki skupiającej i układu skupiającego umieścić soczewkę (układ soczewek) w takiej odległości od źródła światła (a dokładnie od oświetlanego przedmiotu – płytka z nacięciami) aby na ekranie umieszczonym w dużej odległości znaleźć na ekranie ostry rzeczywisty obraz tego przedmiotu. Odległość od soczewki (układu soczewek) do przedmiotu będzie w przybliżeniu równa odległości ogniskowej badanej soczewki (lub układu soczewek).

3. Wyznaczanie odległości ogniskowych metodą wzoru soczewkowego

3.1. Na jednym końcu ławy ustawić źródło światła i przedmiot. Na drugim końcu ustawić ekran, a między nimi badaną soczewkę. Jeśli zachodzi taka potrzeba użyć przysłony. Przedmiot, soczewkę i ekran należy ustawić tak, aby ich środki leżały na prostej pokrywającej się z główną osią optyczną soczewki, a płaszczyzny przedmiotu i ekranu były do niej prostopadłe. Soczewkę ustawić w odległości s od przedmiotu ($f'_{sz} < s < 2f'_{sz}$). Przesuwając ekran wzdłuż ławy optycznej wyznaczyć takie jego położenie s' względem soczewki, dla którego na ekranie powstaje ostry obraz przedmiotu. Nie zmieniając odległości s przedmiotu od soczewki odczytać trzykrotnie odległość s' ekranu od soczewki. Ponieważ badane soczewki nie są idealnie cienkie należy soczewkę wyjąć z oprawy, ustawić ją drugą powierzchnią łamiącą w stronę źródła światła i powtórzyć trzykrotnie pomiary odległości s' .

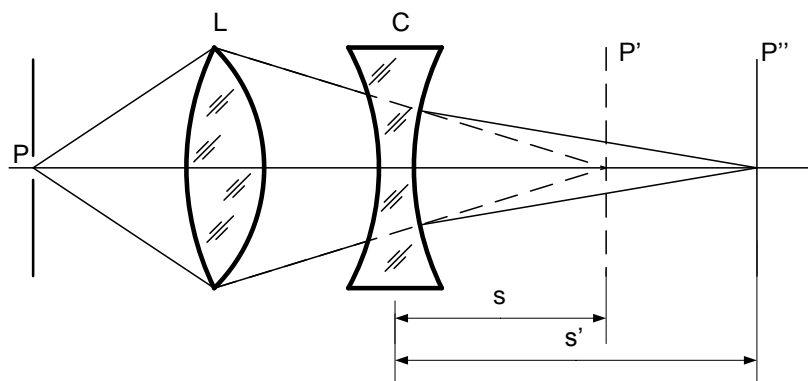
3.2. Pomiar odległości s' powtórzyć dla innych odległości s przedmiotu od soczewki np. dla $s > 2f'$, $s = 2f'$, skonsultować wybór tych odległości z prowadzącym ćwiczenia.

3.3. Pomiary z punktu 3.1 i 3.2 przeprowadzić również dla skupiającego układu soczewek.

3.4. Obliczyć ogniskowe soczewki i układu soczewek ze wzoru soczewkowego (5) dla różnych odległości s przedmiotu od soczewki.

4. Wyznaczanie odległości ogniskowej soczewki rozpraszającej metodą pozornego przedmiotu

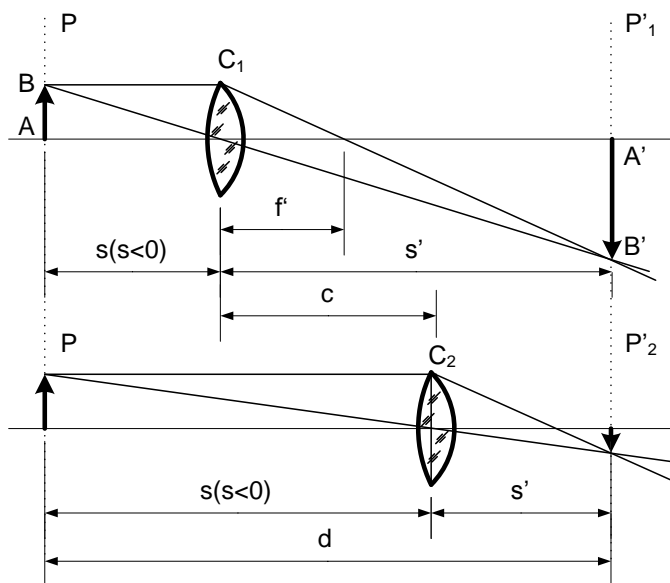
Soczewki rozpraszające nie dają rzeczywistych obrazów dla przedmiotów rzeczywistych ($s < 0$) natomiast, dają obrazy rzeczywiste ($s' > 0$) dla przedmiotów urojonych umieszczonych między soczewką rozpraszającą a jej ogniskiem przedmiotowym ($0 < s < f$). Przedmiot pozorny dla soczewki rozpraszającej uzyskujemy umieszczając, między przedmiotem rzeczywistym P i soczewką rozpraszającą C , soczewkę skupiającą L w ten sposób, aby na soczewkę rozpraszającą padała zbieżna wiązka promieni świetlnych. Przedmiotem pozornym P' dla soczewki rozpraszającej będzie obraz przedmiotu P dany przez soczewkę skupiającą. Soczewka rozpraszająca wytworzy obraz rzeczywisty tego przedmiotu pozornego. Mierząc odległości s i s' i wykorzystując wzór soczewkowy (5) obliczamy ogniskową obrazową soczewki rozpraszającej.



Rys. 11. Układ do wyznaczania odległości ogniskowej soczewki rozpraszającej C : P – źródło światła z przedmiotem, P' – obraz dawany przez soczewkę skupiającą L , P'' – obraz przedmiotu pozornego P' tworzony przez soczewkę rozpraszającą C .

5. Wyznaczanie odległości ogniskowej soczewek skupiających metodą Bessela

5.1. Jak wynika ze wzoru soczewkowego (5) wielkości s i s' wchodzą do wzoru symetrycznie. Zatem dla tej samej odległości przedmiotu i ekranu ($d \geq 4f'$) można znaleźć dwa położenia soczewki, dla których otrzymujemy na ekranie ostry obraz – raz pomniejszony, drugi raz powiększony. Oba położenia soczewki są symetryczne względem środka odcinka łączącego ekran i przedmiot (rys. 12). Jeśli odległość przedmiotu od ekranu oznaczmy przez d , zaś odległość między obu położeniami soczewek przez c , to jak wynika z rys. 12: $d = -s + s'$, $c = |-s - s'|$ lub $c = |s' + s|$.



Rys. 12. Układy do wyznaczania odległości ogniskowej soczewki skupiającej metodą Bessela: AB – przedmiot, $A'B'$ – obraz, f' – ogniskowa obrazowa soczewki, C_1 i C_2 – pierwsze i drugie położenie soczewki, c – odległość między tymi położeniami, d – odległość między przedmiotem a ekranem.

Po podstawieniu wartości s i s' do wzoru soczewkowego (2) otrzymujemy:

$$f' = \frac{1}{4} \left(d - \frac{c^2}{d} \right) \quad (9)$$

5.2. Ponieważ $c^2 = d^2 - 4df' = d(d - 4f') \geq 0$ metoda Bessela daje się zastosować tylko wtedy, gdy $d \geq 4f'$. **Należy zatem przeprowadzić pomiary dla różnych odległości d , przy czym wybór tych odległości należy uzgodnić z prowadzącym.**

5.3. Metodę Bessela można również zastosować do wyznaczenia odległości ogniskowej soczewek rozpraszających. W tym celu badaną soczewkę należy złożyć razem z soczewką skupiającą o znanej ogniskowej obrazowej f'_1 tak dobranej, aby otrzymany układ soczewek był skupiający (dodatni), a jego ogniskowa $4f'_{1,2} < d$. Znając ogniskową soczewki dodatniej oraz układu soczewek z wyrażenia (8) wyznaczymy ogniskową soczewki rozpraszającej.

Zadania do wykonania

1. Wyznaczyć średnią odległość ogniskową soczewki dodatniej metodą wzoru soczewkowego dla wielu odległości s oraz obliczyć zdolność skupiającą soczewki $Z = \frac{1}{f'}$, gdzie f' wyrażone jest w metrach.
2. Wyznaczyć średnią odległość ogniskową soczewki dodatniej metodą Bessela dla różnych odległości d .
3. Obliczenia z punktów 1 i 2 wykonać analogicznie dla układu soczewek.
4. Wyznaczyć średnią odległość ogniskową soczewki rozpraszającej metodą pozornego przedmiotu
5. Wyznaczyć średnią odległość ogniskową soczewki rozpraszającej metodą Bessela.
6. Przeprowadzić rachunek niepewności wyznaczanych wielkości fizycznych soczewki dodatniej, soczewki ujemnej oraz układu soczewek dla każdej z metod.
7. Na podstawie rachunku niepewności średnich wartości odległości ogniskowych stwierdzić, która z metod jest najdokładniejsza.

LITERATURA:

- [1] J. Nowak, M. Zająć; „Optyka kurs elementarny”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998
[2] Praca zbiorowa, „Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki: Część IV Optyka”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1997