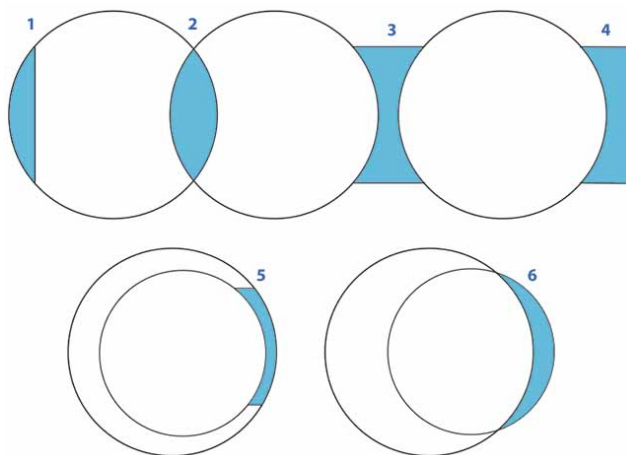


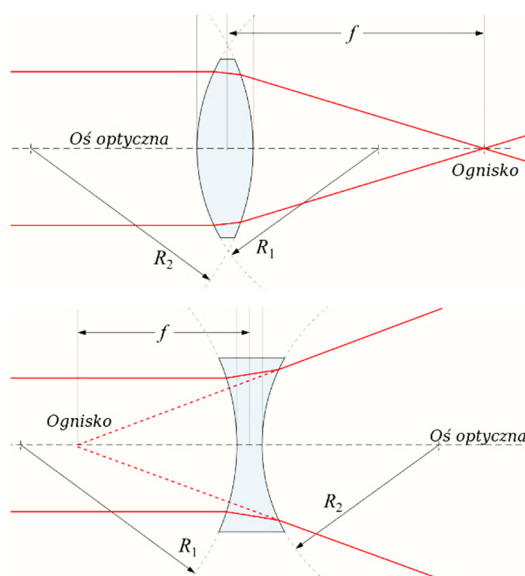
WYZNACZANIE OGNISKOWEJ SOCZEWKI ZA POMOCĄ ŁAWY OPTYCZNEJ

WSTĘP

Soczewką nazywamy ciało przezroczyste ograniczone dwiema powierzchniami kulistymi (wypukłymi lub wklęsłymi) lub jedną powierzchnią kulistą i jedną płaską (Rys. 1.). Promieniami krzywizn soczewki nazywamy promienie kul, których częściami są powierzchnie ograniczające soczewkę, natomiast środki tych kul nazywamy środkami krzywizn soczewki (Rys. 2.). Przy opisie soczewek przyjmujemy, że promienie krzywizny wypukłych powierzchni soczewki są wielkościami dodatnimi, a promienie krzywizny wklęsłych powierzchni soczewki - wielkościami ujemnymi. Powierzchni płaskiej odpowiada nieskończona wartość promienia krzywizny. Główną osią optyczną soczewki nazywamy prostą przechodzącą przez środki jej krzywizn.



Rys. 1. Soczewki o zróżnicowanych powierzchniach rozgraniczających: 1 – płasko-wypukła, 2 – obustronnie wypukła (dzuwypukła), 3 – obustronnie wklęsła (dzuwklęsła), 4 – płasko-wklęsła, 5 – wklęsło-wypukła o cienkich krawędziach, 6 – wklęsło-wypukła o grubych krawędziach.



Rys. 2. Główna oś optyczna, ogniska i ogniskowe (f) oraz promienie krzywizn soczewki (R_1 i R_2) w soczewce skupiającej (*górną*) i rozpraszającej (*dół*).

Soczewkę określamy jako cieką, jeżeli jej grubość jest znacznie mniejsza od każdego z promieni jej krzywizn. Dalsze rozważania dotyczyć będą wyłącznie soczewek cienkich. Dla soczewek cienkich przyjmuje się praktyczne przybliżenie polegające na tym, że położenia punktów przecięcia powierzchni soczewki przez główną oś optyczną traktuje się jako jedno położenie nazywane środkiem soczewki.

Soczewkę nazywamy skupiającą, jeżeli promienie równoległe do głównej osi optycznej po przejściu przez soczewkę odchylają się ku osi, rozpraszającą – jeżeli promienie równoległe do głównej osi optycznej po przejściu przez soczewkę odchylają się od osi. Promienie przyosiowe (padające pod niewielkim kątem na powierzchnię soczewki w pobliżu środka soczewki) biegnące równoległe do głównej osi optycznej, po przejściu przez soczewkę zbierającą skupiają się w jednym punkcie (F) zwanym ogniskiem soczewki (Rys. 2.). Pozorne ognisko soczewki rozpraszającej wyznaczają wsteczne przedłużenia promieni rozproszonych przez soczewkę. Każda soczewka ma dwa ogniska położone w równych odległościach po obu stronach soczewki.

Odległość (f) ogniska od środka soczewki nazywamy ogniskową soczewki. Wartość ogniskowej soczewki określona jest wzorem:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_s}{n_o} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (1)$$

w którym: R_1, R_2 – promienie krzywizn soczewki,
 n_s – współczynnik załamania materiału soczewki,
 n_o – współczynnik załamania otaczającego ośrodka.

Jak wynika z (1) o znaku wartości ogniskowej f , („+” dla soczewek skupiających lub „-” dla rozpraszających, $f < 0$) i jej rodzaju (skupiająca $f > 0$, rozpraszająca $f < 0$) decyduje zarówno geometria soczewki, jak też rodzaj materiału (n_s), z którego ją wykonano oraz optyczne właściwości ośrodka (n_o), w którym jest umieszczona.

Każda soczewka posiada właściwości skupiania lub rozpraszania wychodzących z niej promieni światła. Zdolność skupiającą D soczewki podajemy w dioptriach i obliczamy ją następująco:

$$D = \frac{1}{f} \quad \left[\frac{1}{m} = 1D \right] \quad (2)$$

W praktyce często stosuje się układy optyczne złożone z wielu soczewek. Można wykazać, że zdolność skupiająca układu D_u (o ogniskowej f_u) złożonego z blisko umieszczonych względem siebie soczewek cienkich o ogniskowych f_i równa jest sumie algebraicznej ich zdolności skupiających D_i :

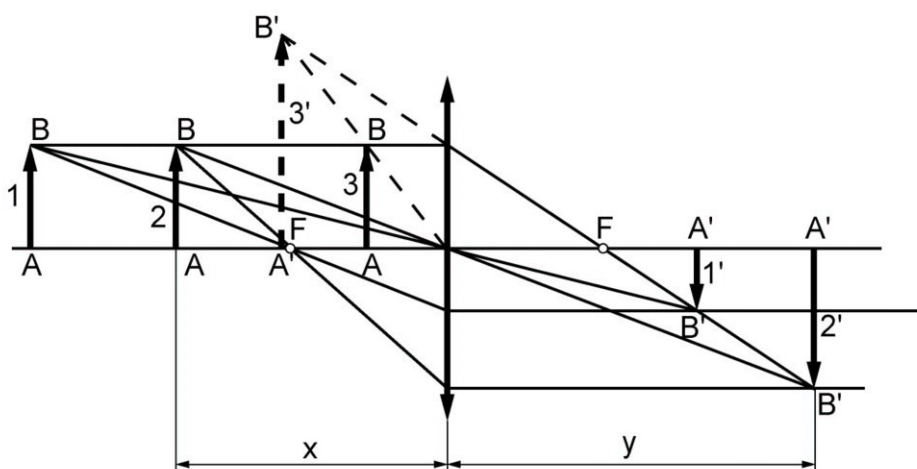
$$D_u = \sum D_i$$

$$\frac{1}{f_u} = \sum \frac{1}{f_i} \quad (3)$$

Do konstrukcji (Rys. 3.) obrazu przedmiotu tworzonego przez soczewkę wystarczy narysować dwa z trzech biegnących w stronę soczewki promieni charakterystycznych przechodzących przez jeden dowolny punkt przedmiotu:

- 1 promień przechodzący przez środek optyczny soczewki nie ulega załamaniu (pomijamy nieznaczne równoległe przesunięcie w soczewce cienkiej),
- 2 promień równoległy do głównej osi optycznej, który po załamaniu w soczewce przechodzi przez ognisko F ,
- 3 promień przechodzący przez ognisko F , który po załamaniu w soczewce biegnie równoległe do osi optycznej.

Soczewki skupiające mogą tworzyć obrazy rzeczywiste - powstające w wyniku przecięcia promieni, lub obrazy pozorne (urojone) – kiedy powstają w wyniku przecięcia przedłużeń promieni (Rys. 3.). Soczewki rozpraszające tworzą tylko obrazy pozorne. W stosunku do przedmiotu tworzony przez soczewkę obraz może być odwrócony lub prosty (nieodwrócony).



Rys. 3. Bieg promieni charakterystycznych i zasada konstrukcji obrazu $A'B'$ przedmiotu AB tworzonego przez soczewkę skupiającą. Konstrukcję wykonano dla trzech różnych odległości x przedmiotu od soczewki. Obraz przedmiotu powstaje w odległości y od soczewki.

Powiększeniem liniowym P obrazu nazywamy iloraz rozmiarów liniowych obrazu do rozmiarów liniowych przedmiotu. Wykorzystując widoczne na Rys. 3. oznaczenia:

$$P = \frac{A'B'}{AB} = \frac{y}{x} \quad (4)$$

Pomiędzy odległością x przedmiotu od soczewki o ogniskowej f i odległością y obrazu od soczewki istnieje następujący związek, zwany równaniem soczewki:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x} + \frac{1}{y} \quad (5)$$

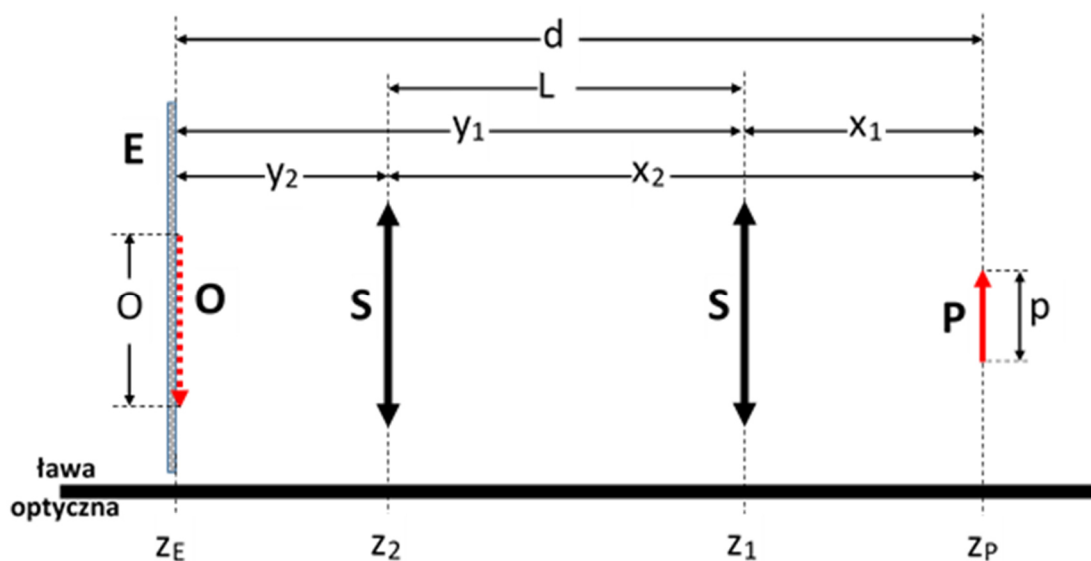
Jeżeli soczewka o ogniskowej f tworzy obraz rzeczywisty, to odległość d przedmiotu od obrazu spełnia warunek:

$$x + y = d \geq 4 \cdot f \quad (6)$$

Równania (4) i (5) wskazują na najprostsze metody wyznaczenia na drodze doświadczalnej wartości ogniskowej soczewki skupiającej. Na ławie optycznej należy umieścić świecący przedmiot w takiej odległości od soczewki, by widoczny na ekranie jego obraz był rzeczywisty. Mierząc odległości x i y lub wysokości przedmiotu i obrazu z użyciem każdego z równań otrzymamy wartość ogniskowej f badanej soczewki.

UKŁAD DOŚWIADCZALNY

Na Rys. 4. w sposób schematyczny przedstawiono stosowany do badań układ doświadczalny. W układzie wchodzi: ława optyczna do której przyczepiony jest liniał z podziałką milimetrową, ekran E służący do obserwacji obrazów, podświetlany przedmiot P mający kształt strzałki oraz zestaw soczewek do badań. Uchwyt ekranu E przytwierdzony jest do ławy optycznej w miejscu, nie wymagającym regulacji i wyposażony jest w metalowy języczek ułatwiający odczyt jego położenia na skali ławy. Przedmiot P w sposób trwały przytwierdzony jest do uchwyty umożliwiającego jego swobodne przemieszczanie wzdłuż ławy optycznej a odczyt jego położenia ułatwia metalowy języczek. Uchwyt soczewki umożliwia pewne osadzenie w nim soczewki i płynny ruch wzdłuż ławy optycznej. Pomocniczy języczek na uchwycie ułatwia odczyt położenia soczewki. Konstrukcja uchwyty pozwala na zamocowanie w nim jednej dowolnej soczewki lub dwóch soczewek tworzących układ.



Rys. 4. Schemat układu pomiarowego do wyznaczenia ogniskowej soczewki. Na schemacie soczewka skupiająca S znajduje się w położeniach z_1 lub z_2 , przy których na ekranie E powstaje obraz O przedmiotu P : powiększony (gdy z_1) lub pomniejszony (gdy z_2).

WYKONANIE ĆWICZENIA

Zestaw będący częścią główną stanowiska do badań pozwala wykonać pomiary, których wartości umożliwiają użyć trzy niezależne metody wyznaczenia wartości ogniskowej soczewek skupiających i jednej metody dla soczewki rozpraszającej (mierzonej w układzie z soczewką skupiającą).

Do Prowadzącego zajęcia należy decyzja o wyborze liczby i typu soczewek do badań oraz metod wyznaczenia ogniskowych soczewek. Przed przystąpieniem do pomiarów należy to uzgodnić.

TABELA STAŁYCH UKŁADU POMIAROWEGO

położenie ekranu	wysokość przedmiotu
[mm]	[mm]
$z_E =$	$P =$
$\Delta_e(z_E) =$	$\Delta_d(P) =$

TABELA POMIARÓW

	położenie przedmiotu	położenie soczewki (obraz powiększony)		położenie soczewki (obraz pomniejszony)		wysokość obrazu (tylko obraz powiększony)	
	z_P	z_1	$\Delta_e(z_1)$	z_2	$\Delta_e(z_2)$	O	$\Delta_e(O)$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
soczewka skupiająca							
układ soczewek							

$$\Delta_d(z) = \Delta_d(z_E) = \Delta_d(z_1) = \Delta_d(z_2) =$$

$$\Delta_d(O) = =$$

W dalszej części omówione zostaną wszystkie metody z instrukcjami wykonania wymaganych pomiarów wraz ze stosownymi tabelami pomiarów.

WYKONANIE POMIARÓW

1. Włączyć do sieci kabel zasilający podświetlać przedmiotu.
2. Odczytać i zapisać w Tabeli Pomiarów wartość położenia z_E ekranu na skali ławy optycznej. Pod Tabelą pomiarów zapisać wartość niepewności wzorcowania pomiaru położenia na skali ławy optycznej oraz wartość oszacowania niepewności eksperymentatora.
3. Suwmiarką zmierzyć wysokość świecącej części przedmiotu i zapisać wynik w Tabeli Pomiarów. Zanotować wartość niepewności wzorcowania pomiaru suwmiarką.
4. Między ekranem a przedmiotem ustawić na ławie optycznej uchwycie z wybraną do badań soczewką skupiającą. Możliwie najdalej odsunąć od ekranu przedmiot.
5. Odczytać położenie przedmiotu na skali i zanotować wynik w Tabeli Pomiarów.
6. Zbliżyć soczewkę do przedmiotu, a następnie zacząć powoli ją odsuwać obserwując na ekranie proces tworzenia powiększonego obrazu przedmiotu. Gdy obraz stanie się wyraźny i „ostry”, odczytać położenie z_1 soczewki i zapisać jego wartość w Tabeli Pomiarów. *Uwaga: jakość wrażenia dostatecznie „ostrego” obrazu może być porównywalna w pewnym zakresie niewiele różniących się położeniach z_1 soczewki, po przekroczeniu których obraz traci ostrość. Nieznacznie odsuwając i dosuwając soczewkę do ekranu, oszacować w przybliżeniu szerokość tego zakresu,. Przyjąć połowę wartości tego zakresu jako niepewność eksperymentatora $\Delta_e(z_1)$.*

7. Przykładając do ekranu liniał z podziałką milimetrową zmierzyć wysokość O obrazu oraz oszacować wartość niepewności eksperymentatora $\Delta_e(O)$. Wyniki zapisać w Tabeli Pomiarów.
8. Powoli w sposób ciągły zbliżać soczewkę do ekranu jednocześnie obserwując (tym razem) proces tworzenia obrazu pomniejszonego. Gdy obraz stanie się wyraźny i „ostry” zapisać w Tabeli Pomiarów położenie z_2 soczewki oraz niepewność eksperymentatora $\Delta_e(z_2)$ dla tego pomiaru.
9. Przesunąć o kilka centymetrów przedmiot w stronę ekranu. Wykonać pomiary dla 5 różnych położzeń przedmiotu zgodnie z pkt. 5-8. Zbyt duże zbliżenie przedmiotu do ekranu skutkuje niemożliwością uzyskania pomniejszonego obrazu przedmiotu. Dlatego po każdorazowym zmniejszeniu odległości przedmiot-ekran sprawdzić, czy możliwa jest obserwacja pomniejszonego obrazu przedmiotu.
10. Dołączyć do zamocowanej w uchwycie soczewki skupiającej soczewkę rozpraszającą.
11. Wykonać zgodnie z pkt. 5-9 serię pomiarów z układem soczewek. Uwaga: położenie na skali ławy optycznej układu soczewek odczytywać w połowie odległości między „języczkami” uchwytu.

WSTĘPNE OPRACOWANIE WYNIKÓW POMIARÓW

12. Wykonać przykład oszacowania rozszerzonej ($k = 2$) całkowitej niepewności pomiaru położenia $U(z_E)$:

$$U(z_E) = k \cdot u(z_E) = k \cdot \sqrt{\frac{(\Delta_d(z_E))^2 + (\Delta_e(z_E))^2}{3}} \quad (7)$$

13. Obliczyć rozszerzone całkowite niepewności dla pozostałych pomiarów bezpośrednich według poniższych wzorów:

$$U(z_P) = k \cdot \sqrt{\frac{(\Delta_d(z_P))^2 + (\Delta_e(z_P))^2}{3}} \quad (8)$$

$$U(z_1) = k \cdot \sqrt{\frac{(\Delta_d(z_1))^2 + (\Delta_e(z_1))^2}{3}} \quad (9)$$

$$U(z_2) = k \cdot \sqrt{\frac{(\Delta_d(z_2))^2 + (\Delta_e(z_2))^2}{3}} \quad (10)$$

$$U(O) = k \cdot \sqrt{\frac{(\Delta_d(O))^2 + (\Delta_e(O))^2}{3}} \quad (11)$$

$$U(P) = k \cdot \sqrt{\frac{(\Delta_d(P))^2}{3}} = \frac{k}{\sqrt{3}} \cdot \Delta_d(P) \quad (12)$$

14. Wynikami obliczeń uzupełnić Tabele Wyników:

TABELA WYNIKÓW

	z_P	$U(z_P)$	z_1	$U(z_1)$	z_2	$U(z_2)$	O	$U(O)$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
soczewka skupiająca								
układ soczewek								

TABELA STAŁYCH UKŁADU POMIAROWEGO

z_E	$U(z_E)$	P	$U(P)$	h	$u(h)$
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]

Otrzymane dane zamieszczone w powyższych Tabelach Wyników należy wykorzystać do obliczeń ogniskowych soczewek stosownie do poniższych metod.

METODA 1.: WYZNACZANIE OGNISKOWEJ SOCZEWKI NA PODSTAWIE POMIARU ODLEGŁOŚCI PRZEDMIOTU I OBRAZU OD SOCZEWKI

Wyznaczenie wartości ogniskowej soczewki wykonuje się w oparciu o równanie soczewki (5):

$$f = \frac{x \cdot y}{x + y} \tag{13}$$

1.1. Wykonać przykład obliczenia odległości x_1 soczewki od przedmiotu:

$$x_1 = z_P - z_1 \tag{14}$$

1.2. Oszacować wartość niepewności $u(x_1)$:

$$u(x_1) = \sqrt{\left(\frac{\partial x_1}{\partial z_P} \cdot U(z_P)\right)^2 + \left(\frac{\partial x_1}{\partial z_1} \cdot U(z_1)\right)^2} = \sqrt{(1 \cdot U(z_P))^2 + (-1 \cdot U(z_1))^2} = \sqrt{(U(z_P))^2 + (U(z_1))^2} \tag{15}$$

1.3. Wykonać przykład obliczenia odległości y_1 soczewki od ekranu:

$$y_1 = z_1 - z_E \tag{16}$$

1.4. Oszacować wartość niepewności $u(y_1)$:

$$u(y_1) = \sqrt{\left(\frac{\partial y_1}{\partial z_1} \cdot U(z_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial y_1}{\partial z_E} \cdot U(z_E)\right)^2} = \sqrt{(U(z_1))^2 + (U(z_E))^2} \tag{17}$$

1.5. Wykonać przykład obliczenia ogniskowej f soczewki:

$$f = \frac{x_1 \cdot y_1}{x_1 + y_1} \tag{18}$$

1.6. Oszacować wartość niepewności $u(f)$:

$$u(f) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot u(x_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y_1} \cdot u(y_1)\right)^2} = \frac{f}{x_1 + y_1} \sqrt{\left(y_1 \cdot \frac{u(x_1)}{x_1}\right)^2 + \left(x_1 \cdot \frac{u(y_1)}{y_1}\right)^2} \tag{19}$$

1.7. Wykonać pozostałe obliczenia a otrzymane wyniki wpisać do Tabeli Wyników. Uzupełniając tabelę zwrócić uwagę na rozróżnienie indeksów przy „x” oraz „y” stosownie do wyników pomiarów otrzymanych dla powiększonego lub pomniejszonego obrazu przedmiotu.

TABELA WYNIKÓW

	x	u(x)	y	u(y)	f	u(f)
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
obraz powiększony						
obraz pomniejszony						

1.8. Na podstawie wyników otrzymanych w pkt. 1.7 wykonać dla przypadku obrazu powiększonego przykład obliczenia średniej wartości f_{sr} ogniskowej soczewki:

$$f_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^5 f_i}{5} \quad (20)$$

1.9. Wykonać przykład oszacowania niepewności $u(f_{sr})$ z uwzględnieniem metody typu A i metody typu B:

$$u(f_{sr}) = \sqrt{(u_A(f_{sr}))^2 + (u_B(f_{sr}))^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (f_{sr} - f_i)^2}{5 \cdot (5-1)} + \frac{\sum_{i=1}^5 (u(f_i))^2}{5}} \quad (21)$$

1.10. Wykonać pozostałe obliczenia. Otrzymane wartości zapisać w Tabeli Wyników:

TABELA WYNIKÓW

	f_{sr}	$u(f_{sr})$
	[mm]	[mm]
obraz powiększony		
obraz pomniejszony		

1.11. Dokonać oceny porównawczej zbieżności wartości wyników otrzymanych w pkt.1.10., uwzględniając wartości ich niepewności.

METODA 2.: WYZNACZANIE OGNISKOWEJ SOCZEWKI Z POMIARÓW DLA POWIĘKSZONEGO OBRAZU

Z porównania wzorów (4) i (5) otrzymujemy zależność:

$$f = \frac{y \cdot P}{O + P} \quad (22)$$

stanowiącą podstawę metody wyznaczania ogniskowej.

2.1. Uzpełnić danymi Tabelę Wyników. Jeżeli do opracowania nie wybrano Metody 1., należy wykonać czynności z pkt. 1.3. i 1.4.

TABELA WYNIKÓW

y_1	$u(y_1)$	O	U(O)
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]

2.2. Wykonać przykład obliczenia wartości ogniskowej soczewki f według wzoru (22):

$$f = \frac{y_1 \cdot P}{O + P} \quad (22)$$

2.3. Oszacować wartość niepewności $u(f)$:

$$u(f) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial y_1} \cdot U(y_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial O} \cdot U(O)\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial P} \cdot U(P)\right)^2} = f \cdot \sqrt{\left(\frac{U(y_1)}{y_1}\right)^2 + \frac{P}{O+P} \cdot \left(\left(\frac{U(O)}{O}\right)^2 + \left(\frac{U(P)}{P}\right)^2\right)} \quad (23)$$

2.4. Wykonać pozostałe obliczenia a otrzymane wyniki wpisać do Tabeli Wyników:

TABELA WYNIKÓW

f	$u(f)$
[mm]	[mm]

--	--

- 2.5. Wykonać przykład obliczenia średniej wartości f_{sr} :
 2.6. Wykonać przykład oszacowania całkowitej niepewności $u(f_{sr})$ z uwzględnieniem metody typu A i metody typu B:

$$u(f_{sr}) = \sqrt{(u_A(f_{sr}))^2 + (u_B(f_{sr}))^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (f_{sr} - f_i)^2}{5 \cdot (5-1)} + \frac{\sum_{i=1}^5 (u(f_i))^2}{5}} \quad (24)$$

- 2.7. Zapisać otrzymane wartości w Tabeli Wyników:

TABELA WYNIKÓW

f_{sr}	$u(f_{sr})$
<i>[mm]</i>	<i>[mm]</i>

METODA 3.: WYZNACZANIE OGNISKOWEJ SOCZEWKI METODĄ BESSELA

W celu obliczenia wartości ogniskowej f soczewki skupiającej korzystamy ze wzoru Bessela (25) (wyprowadzenie wzoru zamieszczono w Dodatku):

$$f = \frac{d^2 - L^2}{4 \cdot d} \quad (25)$$

Według pokazanych na Rys. 4. oznaczeń występujące w powyższym wzorze wielkości d i L oblicza się następująco:

$$d = z_P - z_E \quad (26)$$

$$L = z_1 - z_2 \quad (27)$$

- 3.1. Wykonać przykład obliczenia d według wzoru (26).

- 3.2. Oszacować wartość niepewności $u(d)$:

$$u(d) = \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial z_P} \cdot U(z_P)\right)^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial z_E} \cdot U(z_E)\right)^2} = \sqrt{(1 \cdot U(z_P))^2 + (-1 \cdot U(z_E))^2} = \sqrt{(U(z_P))^2 + (U(z_E))^2} \quad (28)$$

- 3.3. Wykonać przykład obliczenia L według wzoru (27).

- 3.4. Wykonać przykład oszacowania wartości niepewności $u(L)$:

$$u(L) = \sqrt{\left(\frac{\partial L}{\partial z_1} \cdot U(z_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial z_2} \cdot U(z_2)\right)^2} = \sqrt{(1 \cdot U(z_1))^2 + (-1 \cdot U(z_2))^2} = \sqrt{(U(z_1))^2 + (U(z_2))^2} \quad (29)$$

- 3.5. Wykonać przykład obliczenia f według wzoru (26).

- 3.6. Wykonać przykład oszacowania wartości niepewności $u(f)$:

$$u(f) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial d} \cdot u(d)\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial L} \cdot U(L)\right)^2} = \frac{1}{2 \cdot d} \cdot \sqrt{((d - 2 \cdot f) \cdot u(d))^2 + (L \cdot u(L))^2} \quad (30)$$

- 3.7. Wykonać pozostałe obliczenia a otrzymane wartości wpisać do Tabeli Wyników:

TABELA WYNIKÓW

d	u(d)	L	u(L)	f	u(f)
<i>[mm]</i>	<i>[mm]</i>	<i>[mm]</i>	<i>[mm]</i>	<i>[mm]</i>	<i>[mm]</i>

- 3.8. Na podstawie wyników otrzymanych w pkt. 1.7 wykonać dla przypadku obrazu powiększonego przykład obliczenia średniej wartości f ogniskowej soczewki:

$$f_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^5 f_i}{5} \quad (31)$$

3.9. Wykonać przykład oszacowania całkowitej niepewności $u(f_{sr})$ z uwzględnieniem metody typu A i metody typu B:

$$u(f_{sr}) = \sqrt{(u_A(f_{sr}))^2 + (u_B(f_{sr}))^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (f_{sr} - f_i)^2}{5 \cdot (5-1)} + \frac{\sum_{i=1}^5 (u(f_i))^2}{5}} \quad (32)$$

3.10. Otrzymane wartości zapisać w Tabeli Wyników:

TABELA WYNIKÓW	
f_{sr}	$u(f_{sr})$
[mm]	[mm]

METODA 4.: WYZNACZANIE OGNISKOWEJ SOCZEWKI ROZPRASZAJĄCEJ

Bezpośredni pomiar ogniskowej soczewki rozpraszającej nie jest możliwy z użyciem układu doświadczalnego, którego schemat w przedstawiono na Rys. 4., ponieważ soczewka rozpraszająca tworzy jedynie pozorne obrazy przedmiotów. Zestawienie soczewki rozpraszającej o (ujemnej) ogniskowej f_R z soczewką skupiającą o znanej (dodatniej) ogniskowej f i przy zachowaniu warunku $|f_R| > |f|$, pozwala otrzymać układ U o wypadkowej dodatniej ogniskowej f_u , zdolny skupiać promienie światła oraz tworzyć rzeczywiste obrazy przedmiotów.

Zestawiony na wspólnej osi optycznej układ U cienkich soczewek ma zdolność skupiającą (3) wyrażoną wzorem:

$$\frac{1}{f_u} = \frac{1}{f} + \frac{1}{f_R} \quad (33)$$

Skończone rozmiary soczewek nie pozwalają na zbliżenie ich do siebie na odległość nieskończenie małą. Przyjmując, że po zbliżeniu soczewek odległość między ich środkami wynosi h , wprowadzamy związaną z tym poprawkę do wzoru (33), który przyjmuje nową postać:

$$\frac{1}{f_u} = \frac{1}{f} + \frac{1}{f_R} - \frac{h}{f \cdot f_R} \quad (34)$$

W powyższych wzorach: f_u – jest ogniskową układu U soczewek,
 f_R – jest ogniskową soczewki rozpraszającej,
 f - jest ogniskową soczewki skupiającej,
 h – jest odległością między środkami soczewek.

Przekształcając wzór (34), ogniskową f_R soczewki rozpraszającej wyrażamy następująco:

$$f_R = \frac{f_u \cdot (f - h)}{f - f_u} \quad (35)$$

W układach tworzonych przez stykające się bardzo cienkie soczewki lub gdy mamy pewność spełnienia relacji $h \ll f$, we wzorze (35) można zastosować przybliżenie: $f - h \approx f$.

- 4.1. Do obliczeń ogniskowej układu soczewek wybrać taką metodę, której użycie umożliwiło wyznaczyć wartość średniej ogniskowej f_{sr} soczewki skupiającej z najmniejszą niepewnością $u(f_{sr})$.
- 4.2. Zgodnie z procedurą obliczeniową wybranej metody wyznaczyć wartości ogniskowej f_u z użyciem danych otrzymanych z pomiaru układu soczewek. Otrzymane wyniki wpisać do Tabeli Wyników, wykonanej w oparciu o jeden z szablonów zaproponowanych w pkt. 1.7. lub pkt. 2.4, lub pkt. 3.7.
- 4.3. Obliczyć średnią wartość ogniskowej układu soczewek $f_{u, sr}$:

$$f_{u, sr} = \frac{\sum_{i=1}^5 f_{u_i}}{5} \quad (36)$$

4.4. Oszacować wartość całkowitej niepewności $u(f_{u,śr})$ z uwzględnieniem metody typu A i metody typu B:

$$u(f_{u,śr}) = \sqrt{(u_A(f_{u,śr}))^2 + (u_B(f_{u,śr}))^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (f_{u,śr} - (f_u)_i)^2}{5 \cdot (5-1)} + \frac{\sum_{i=1}^5 (u((f_u)_i))^2}{5}} \quad (37)$$

4.5. Obliczyć wartość ogniskowej soczewki rozpraszającej:

$$f_R = \frac{f_{u,śr} \cdot (f-h)}{f - f_{u,śr}} \quad (38)$$

4.6. Oszacować wartość niepewności $u(f_R)$:

$$u(f_R) = \sqrt{\left(\frac{\partial f_R}{\partial f_{u,śr}} \cdot u(f_{u,śr})\right)^2 + \left(\frac{\partial f_R}{\partial f} \cdot u(f)\right)^2 + \left(\frac{\partial f_R}{\partial h} \cdot u(h)\right)^2} = \frac{1}{f - f_{u,śr}} \cdot \sqrt{[(f_R + f - h) \cdot u(f_{u,śr})]^2 + \left[f_R \cdot \frac{f_{u,śr} - h}{f - h} \cdot u(f)\right]^2 + [f_{u,śr} \cdot u(h)]^2} \quad (39)$$

4.7. Uzupelnic Tabelę Wyników otrzymanymi wartościami:

$f_{u,śr}$	$u(f_{u,śr})$	f_R	$u(f_R)$
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]

PODSUMOWANIE

Uzupelnic Tabelę Wyników Końcowych średnimi wartościami ogniskowych badanych soczewek i układu soczewek wraz z ich niepewnościami.

TABELA WYNIKÓW KOŃCOWYCH

METODA	uwagi	f	u(f)
		[mm]	[mm]
1	<i>obraz powiększony</i>		
	<i>obraz pomniejszony</i>		
2			
3			
4	<i>układ soczewek</i>		
	<i>soczewka rozpraszająca</i>		

Dokonać krytycznej oceny jakości otrzymanych wyników w zależności od użytej metody i pod kątem wzajemnych rozbieżności wartości ogniskowej soczewki skupiającej. Wskazać metodę, która umożliwiła otrzymać wartość ogniskowej obciążonej najmniejszą niepewnością.

LITERATURA

- [1] SKORKO M.: Fizyka, PWN, Warszawa 1978.
- [2] SZCZENIOWSKI S.: Fizyka doświadczalna, cz. IV, Optyka, PWN, Warszawa 1967.
- [3] SZYDŁOWSKI H.: Pracownia fizyczna, PWN, Warszawa 1994.
- [4] DRYŃSKI T.: Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki, PWN Warszawa 1970.
- [5] Ćwiczenia Laboratoryjne z Fizyki (praca zbiorowa), Skrypt Nr 279, Politechnika Opolska 2007.

DODATEK

Wyprowadzenie wzoru Bessela.

Ustawiając na ławie optycznej przedmiot, ekran i soczewkę w sposób pokazany na Rys. 4. oznaczmy symbolem d odległość przedmiotu P od ekranu E. Zgodnie z przyjętym oznaczeniem równanie (5) możemy zapisać następująco:

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{d-x} = \frac{1}{f}$$

które po przekształceniu przybiera postać:

$$x^2 - d \cdot x + d \cdot f = 0$$

Otrzymane równanie kwadratowe rozwiązujemy względem x , otrzymując dwa pierwiastki rozwiązania:

$$x_1 = \frac{d - \sqrt{d^2 - 4 \cdot d \cdot f}}{2}$$
$$x_2 = \frac{d + \sqrt{d^2 - 4 \cdot d \cdot f}}{2}$$

Z powyższych rozwiązań płynnie wniosek, że są dwie odległości x_1 i x_2 soczewki od ekranu, odpowiadające położeniom z_1 i z_2 , przy których powstaną ostre obrazy przedmiotu. Dla jednej wartości odległości obraz przedmiotu będzie powiększony, dla drugiej - pomniejszony. Aby obrazy przedmiotu były widoczne na ekranie muszą być rzeczywiste, co oznacza, że wartości x_1 i x_2 muszą być dodatnimi liczbami rzeczywistymi. Wobec tego podpierwiastkowe wyrażenie obecne w rozwiązaniach równania musi spełniać relację:

$$d^2 - 4 \cdot d \cdot f > 0$$

czyli:

$$d > 4 \cdot f$$

W szczególnych warunkach, gdy $d = 4f$, tylko dla jednego położenia soczewki powstanie ostry obraz przedmiotu: $x = y = 2f$.

Różnica odległości $x_1 - x_2$ równa różnicy położeń $z_1 - z_2$ zgodnie z oznaczeniem na Rys. 4. wynosi L :

$$L = x_1 - x_2 = z_1 - z_2$$

Podstawiając do powyższego równania rozwiązania równania kwadratowego otrzymujemy wyrażenie:

$$L = \sqrt{d^2 - 4 \cdot d \cdot f}$$

które po przekształceniu kończy wyprowadzenie wzoru Bessela:

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