

## LABORATORIUM OPTYKI GEOMETRYCZNEJ I INSTRUMENTALNEJ

## ĆWICZENIE OG-3 POMIAR ABERRACJI SOCZEWEK

### 1 Cele ćwiczenia

Obserwacja i pomiar aberracji w układach optycznych (soczewkach). Poznanie przyczyn powstawania aberracji i możliwości ich kompensacji.

### 2 Zakres wymaganych zagadnień wstępnych

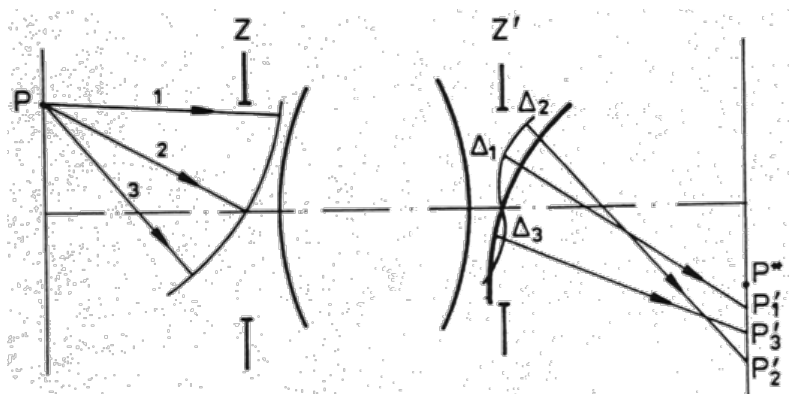
Do poprawnego wykonania ćwiczenia niezbędna jest znajomość poniższych zagadnień, weryfikowanych w trakcie egzaminu wstępnego:

- budowa podstawowych układów optycznych,
- dyspersja chromatyczna,
- klasyfikacja aberracji optycznych – podział na aberracje w ujęciu Seidela i Zernikego,
- bieg promieni światła w układach aberracyjnych,
- astygmatyzm w układach optycznych (definicja, rodzaje).

### 3 Wstęp teoretyczny

Idealny układ optyczny charakteryzuje się stygmatyzmem, co znaczy, że obrazem każdego punktu w przestrzeni przedmiotowej jest także punkt w przestrzeni obrazowej. Rzeczywiste układy optyczne posiadają aberracje, które powodują, że obrazem punktu jest pewien rozkład natężenia, który często można zwizualizować w płaszczyźnie obrazowej jako plamkę tzw. aberracyjną o nieregularnym kształcie, przy czym jej kształt i rozkład natężenia zależy od cech układu.

Można powiedzieć również, że układ optyczny przekształca falę sferyczną (kulistą), pochodzącą z punktowego źródła światła w falę nie-sferyczną, jak pokazano na rys. 1. Trzy przykładowe promienie, oznaczone numerami 1, 2 i 3, wychodzące z punktu P, po przejściu przez układ optyczny nie trafiają w punkt P\*, którego położenie określają reguły optyki geometrycznej, lecz przecinają płaszczyznę obrazu w punktach P'1, P'2 i P'3. Wielkości  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$  i  $\Delta_3$  to odstępstwa frontu faloowego od idealnego frontu sferycznego. Z i Z' to źrenice: wejściowa i wyjściowa układu, odpowiednio.



**Rysunek 1.** Ilustracja przekształcenia sferycznej fali z punktowego źródła światła w falę o froncie zniekształconym przez aberracje.

Aberracje można podzielić na monochromatyczne i chromatyczne. Aberracje monochromatyczne występują nawet, jeśli układ jest oświetlony falą o jednej długości fali, zaś chromatyczne wynikają ze zjawiska dyspersji chromatycznej, które powoduje, że padające światło jest rozszczepiane w wyniku istnienia różnych współczynników załamania dla różnych długości fali.

Istnieją dwa najpopularniejsze opisy aberracji monochromatycznych: Seidela i Zernikego. Opis Seidela polega na rozwinięciu funkcji sinus, występującej w analizie załamania promienia światła na powierzchni sferycznej, w szereg Taylora w przybliżeniu trzeciego rzędu. W wyniku, uzyskuje się wyrażenia na kilka znanych aberracji, które można łatwo zaobserwować w układach optycznych. Są to: *aberracja sferyczna, koma, astygmatyzm i krzywizna pola (związane ze sobą), oraz dystorsja*. W ujęciu Zernikego, z kolei, dokonuje się rozwinięcia opisu frontu falowego na wielomiany Zernikego, które opisują nieskończenie wiele aberracji coraz wyższych rzędów. Kilka aberracji niższych rzędów odpowiada aberracjom w opisie Seidela.

Aberracje chromatyczne pojawiają się, gdy układ optyczny jest oświetlony przez światło nie-monochromatyczne. Powoduje, że powstający obraz jest w innym miejscu oraz innej wielkości, dla każdej długości fali.

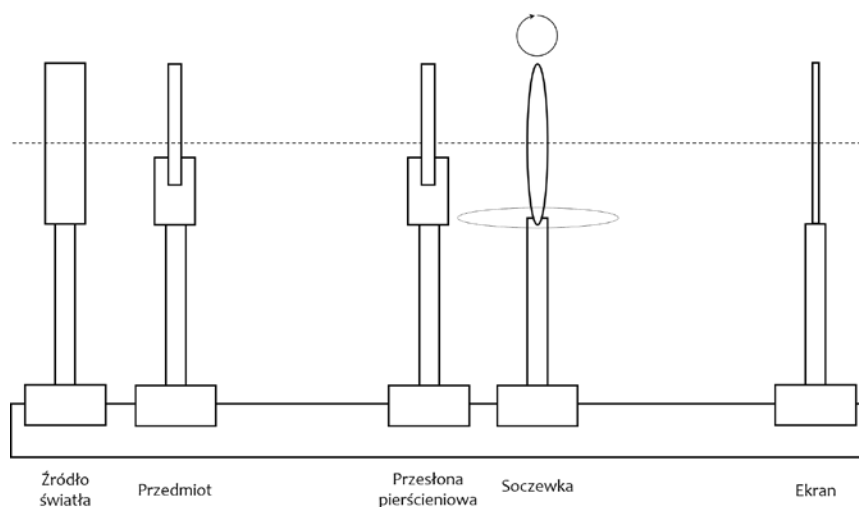
Aberracje układów optycznych są z reguły niepożądane i konstruktorzy stosują zespoły soczewek, często asferycznych, w celu minimalizacji aberracji i uzyskania jak najlepszego obrazu. Na przykład achromatyczne układy soczewek są w stanie zniwelować aberrację chromatyczną dla kilku długości fali i znacznie zmniejszyć dla pozostałych. Istnieje wiele konstrukcji zespołów soczewek minimalizujących aberracje, które są rozwijane niemal od początku historii optyki.

W przypadku układu optycznego oka pomiar aberracji pozwala m.in. na określenie najlepszego sposobu korekcji, stanu powierzchni oka, czy obiektywne (przedmiotowe) wyznaczenie osi astygmatyzmu. W szczególności, analiza współczynników wielomianów Zernikego frontu falowego przechodzącego przez układ optyczny oka i powracającego po odbiciu od dna oka, pozwala na szczegółową analizę aberracji, także w ujęciu epidemiologicznym.

#### 4 Opis elementów części pomiarowej ćwiczenia

##### Układ pomiarowy

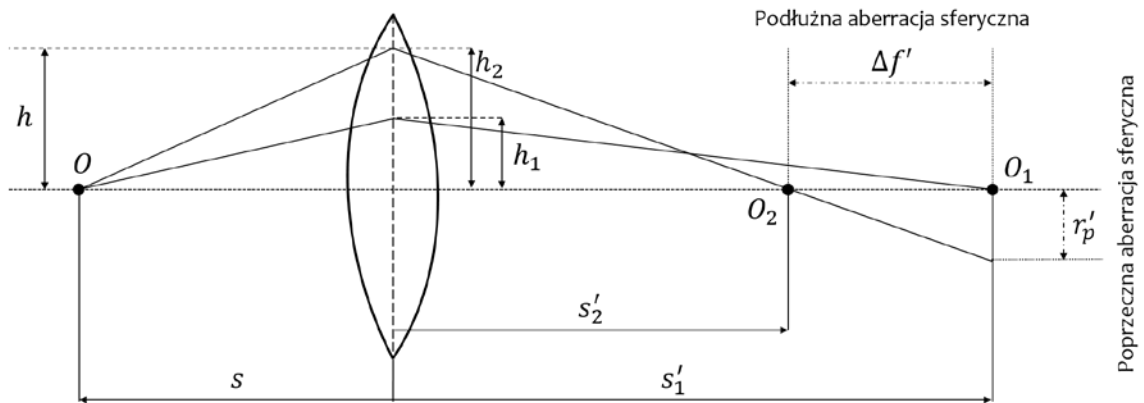
Układ pomiarowy oraz rozmieszczenie poszczególnych jego elementów przedstawiono na rysunku 2. Poniżej zebrano wskazówki ułatwiające zestawienie układu do pomiaru poszczególnych aberracji.



**Rysunek 2.** Układ do pomiaru aberracji sferycznej, chromatycznej i astygmatyzmu.

**Aberracja sferyczna (rys. 3)**

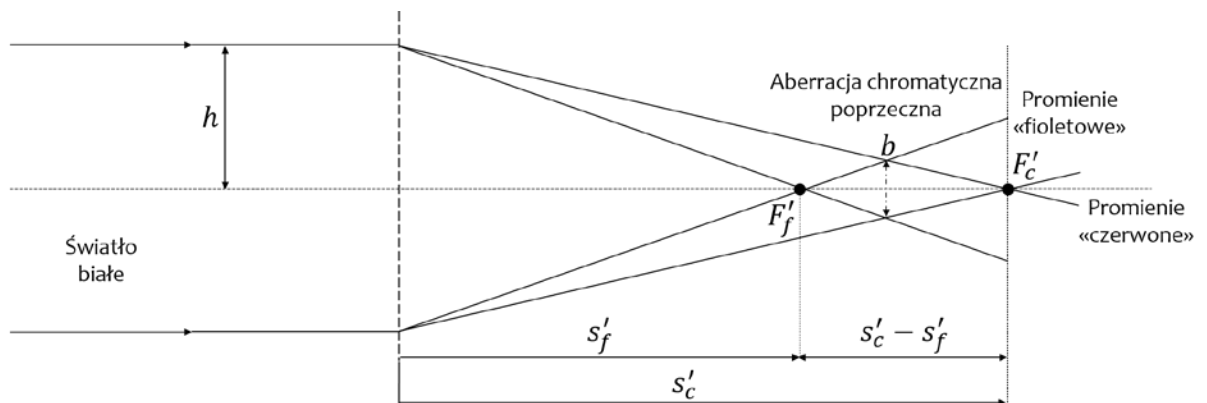
- barwa światła niebieska lub czerwona
- przedmiot – przysłona z wyciętym krzyżem
- 5 przyston pierścieniowych o różnych rozmiarach
- soczewka skupiająca
- ekran



Rysunek 3. Bieg promieni w przypadku aberracji sferycznej.

**Aberracja chromatyczna (rys. 4)**

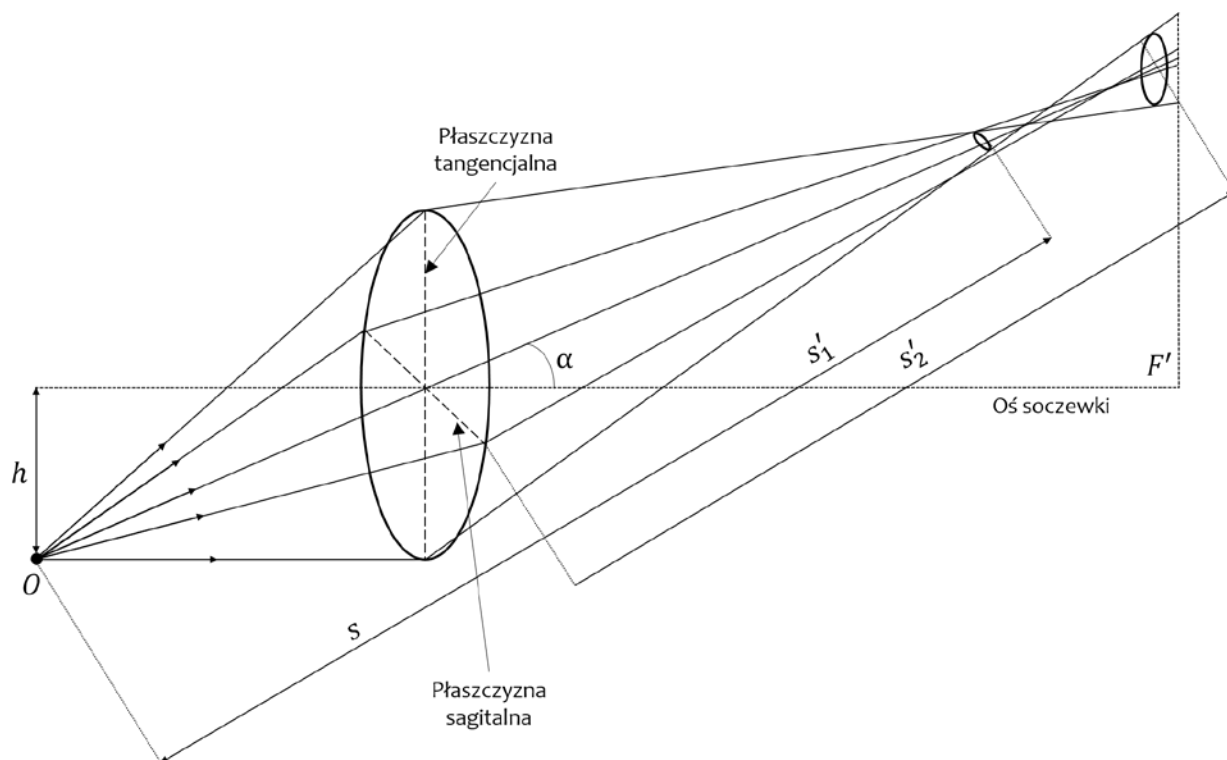
- barwa światła niebieska i czerwona
- przedmiot – przysłona z wyciętym krzyżem
- przysłony pierścieniowe o różnych rozmiarach
- soczewka skupiająca
- ekran



Rysunek 4. Bieg promieni w przypadku aberracji chromatycznej.

**Astygmatyzm (rys. 5)**

- barwa światła niebieska lub czerwona
- przedmiot – przysłona z wyciętym krzyżem
- soczewka skupiająca z podziałką, umożliwiającą odczyt kąta pod jakim jest ustawiona soczewka względem osi optycznej
- ekran



**Rysunek 5.** Bieg promieni w przypadku astygmatyzmu wiązki skośnej.

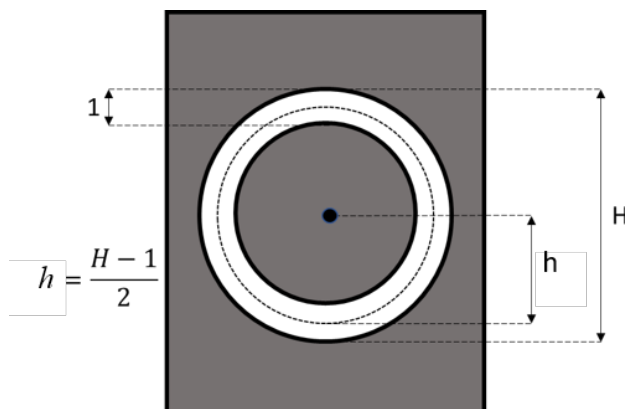
**Dystorsja**

- barwa światła niebieska lub czerwona
- przedmiot – przysłona z wyciętą siatką kwadratową
- soczewka skupiająca
- ekran

**5 Przebieg pomiarów****5.1 Aberracja sferyczna – podłużna i poprzeczna**

1. Umieścić na ławie optycznej źródło światła oraz przysłonę z wyciętym krzyżem (przedmiot). Aby uzyskać głębię ostrości przedmiot powinien znajdować się ok.15–20 cm od źródła światła.
2. Ustawić soczewkę między ekranem a przedmiotem i przysłonić ją przysłoną z małym otworem kołowym.
3. Po znalezieniu ostrego obrazu na ekranie określić odległości: świecącego przedmiotu i ekranu od środka optycznego soczewki, odpowiednio  $s$  i  $s'$  (w przybliżeniu wszystkie pomiary wykonywać od brzegu koników na ławie optycznej).

4. Pomiary opisane w punkcie 3 wykonać dla czterech różnych wartości  $s$  i  $s'$  (po 2 pomiary na osobę).
5. Wyznaczyć ogniskową soczewki  $f'_0$ .
6. W sposób opisany w punktach 2, 3, 4, wyznaczyć ogniskowe dla innych stref soczewki  $f'_1, f'_2, f'_3, f'_4$  używając przysłon pierścieniowych o rosnącym promieniu pierścienia.
7. Przysłonę o najmniejszym promieniu należy potraktować jako punkt tzn. przyjąć wartość promienia  $h = 0$ . W przypadku pozostałych wyznaczyć przy pomocy suwmiarki promienie stref soczewki  $h_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ), przez które przechodzi światło (tj. określić wartość promieni kolejnych przysłon pierścieniowych). Podpowieź:



**Rysunek 6.** Metoda pomiaru promienia przysłony.

8. Obliczyć wartość podłużnej aberracji sferycznej  $\Delta f'_i$  dla różnych stref soczewki i sporządzić wykresy:

a)  $\Delta f'$  w funkcji  $h$ ,  $\frac{\Delta f'}{f'_0}$  w funkcji  $\frac{h}{f'_0}$

b)  $\frac{\Delta f'}{f'_0}$  i  $\frac{h}{f'_0}$  wyrazić w procentach.

9. Obliczyć wartość poprzecznej aberracji sferycznej dla  $h_{max} = h_4$  ze wzoru

$$r_p = \frac{h_4}{f'_4} \Delta f'.$$

10. Wszystkie wyniki umieścić w tabeli 1.
11. Przeprowadź rachunek błędów wyznaczenia aberracji poprzecznej.

## 5.2 Aberracja chromatyczna – podłużna i poprzeczna

Z powodu braku możliwości wyznaczenia wartości ogniskowych obrazowych  $f'_c$  i  $f'_f$  dla odpowiednich linii Fraunhofera, należy wyznaczyć aberrację chromatyczną dla światła czerwonego i niebieskiego.

1. Umieścić na ławie optycznej źródło światła o barwie czerwonej oraz przysłonę z wyciętym krzyżem (przedmiot).
2. Między ekranem a przedmiotem wstawić soczewkę oraz przysłonę pierścieniową o promieniu  $h_3$ .
3. Wyznaczyć pięciokrotnie wartość ogniskowej  $f'_c$ .
4. Powtórzyć pomiary dla światła niebieskiego i wyznaczyć wartość ogniskowej  $f'_f$ .
5. Obliczyć wartość podłużnej aberracji chromatycznej  $\Delta f' = f'_c - f'_f$  i wyrazić ją w procentach względem „średniej” wartości ogniskowej  $f' = (f'_c + f'_f)/2$ , tj.

$$\frac{\Delta f'}{f'} = 2 \frac{f'_c - f'_f}{f'_c + f'_f}$$

6. Obliczyć wartość poprzecznej aberracji chromatycznej na podstawie pomiarów wg. wzoru:

$$b = 2 \frac{f'_c - f'_f}{f'_c + f'_f} h_3$$

7. Wszystkie wyniki umieścić w tabeli 2.

### 5.3 Astygmatyzm

1. Umieścić na ławie optycznej dowolne źródło światła oraz przysłonę z wyciętym krzyżem.
2. Ustawić na ławie optycznej soczewkę w takim położeniu, aby obraz świecącego krzyża znajdował się na osi optycznej soczewki (przy kącie skręcenia soczewki  $\alpha = 0$ ) – na ekranie powinien powstać ostry obraz krzyża, leżący również na osi optycznej soczewki.
3. Skręcić soczewkę o kąt  $\alpha_1 = 10^\circ$  (promień główny wychodzący z przedmiotu jest wówczas nachylony pod kątem  $\alpha_1$  względem osi soczewki).
4. Przesuwając ekran, znaleźć takie jego położenia, przy których powstają obrazy liniowe: pionowy i poziomy oraz wyznaczyć odległość między tymi dwoma położeniami ekranu korzystając ze wzoru:

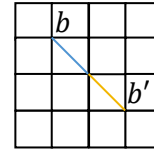
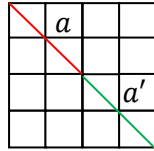
$$a = a^+ - a^-.$$

5. Powtórzyć pomiary opisane w punkcie 4 dla kątów skręcenia soczewki  $\alpha = 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ .
6. Pomiary z punktów 4 i 5 powtórzyć skręcając soczewkę w przeciwną stronę.
7. Wszystkie wyniki umieścić w tabeli 3.
8. Sporządzić wykres  $a(\alpha)$ .

**UWAGA:** przed przystąpieniem do pomiarów należy sprawdzić, czy soczewka daje symetryczne obrazy przy skręceniu w prawo i w lewo.

### 5.4 Dystorsja

1. Umieścić na ławie optycznej dowolne źródło światła oraz przysłonę z wyciętą siatką kwadratową.
2. Ustawić na ławie optycznej soczewkę skupiającą.
3. Ustawić ekran w takiej odległości od soczewki, aby uzyskać na nim ostry obraz przedmiotu.
4. Dokonać pomiaru stopnia dystorsji przez porównanie długości przekątnej siatki kwadratowej oraz jej obrazu – wykonać pomiar odcinków  $a, a', b, b'$  utworzonego obrazu (rys. 7) oraz przekątnej siatki na przysłonie.
5. Wyniki pomiaru nanieść na wykres, gdzie na jednej osi jest zaznaczona długość przekątnej na przysłonie, a na drugiej długość przekątnej na ekranie (odpowiednio umieścić wyniki pomiarów poszczególnych odcinków).



Rysunek 7. Pomiar stopnia dystorsji.

### 5.5 Obserwacja komy

1. Umieścić na ławie optycznej dowolne źródło światła oraz przysłonę z małymi otworami.
2. Ustawić na ławie optycznej soczewkę skupiającą.
3. Ustawić ekran w takiej odległości od soczewki, aby uzyskać na nim obraz obiektu.
4. Wykonać zdjęcie, które stanowić będzie załącznik do sprawozdania.

## 6 Literatura

1. Nowak J., Zajac M., *Wstęp do optyki*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1995.
2. Ratajczyk F.: *Instrumenty optyczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.
3. Błaszczak U.J., Rafałowski M.: *Podstawy Optyki – materiały pomocnicze do ćwiczeń rachunkowych i laboratoryjnych*, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, 2004 .
4. Józwicki R., *Optyka instrumentalna*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa, 1970.

**Tabela 1.** Wyniki pomiarów do wyznaczania aberracji sferycznej

$h$	pozycja przedmiotu	pozycja soczewki	pozycja ekranu	$s$	$s'$	$f'$	$\bar{f}'$	$r_i$	$\Delta f'$
0									X
1									
2									
3									
4									



**Tabela 2.** Wyniki pomiarów do wyznaczania aberracji chromatycznej

typ źródła światła	pozycja przedmiotu	pozycja soczewki	pozycja ekranu	$s$	$s'$	$f'$	$\bar{f}'$
czerwone							
niebieskie							

**Tabela 3.** Wyniki pomiarów do wyznaczenia astygmatyzmu

$\alpha$	pozycja ekranu	
	obraz tangencjalny ( $a^+$ )	obraz sagitalny ( $a^-$ )
-30°		
-25°		
-20°		
-15°		
-10°		
0°		
10°		
15°		
20°		
25°		
30°		