



GDAŃSK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

BADANIE WŁASNOŚCI UKŁADÓW Optycznych

ZACHARIASZ JAŻDŻEWSKI

30.10.2025

Grupa: WTII_GR Lab1
Współautorzy: Iga Kobryń, Vlad Belmach
Numery indeksów: 193648, 198872, 201850
Data wykonania: 03.11.2025
Prowadzący: dr inż Ireneusz Linert

1. Cel doświadczenia

Celem ćwiczenia było zbadanie podstawowych własności układów optycznych poprzez pomiary promieni krzywizny soczewek skupiających i rozpraszających oraz ich ogniskowych, analizę aberracji sferycznej, obserwację aberracji chromatycznej i komatycznej oraz wyznaczenia współczynnika załamania światła dla wody.

W ramach laboratorium przeprowadzono pięć doświadczeń:

1. Wyznaczanie promienia krzywizny soczewki skupiającej w powietrzu
2. Wyznaczanie promienia krzywizny soczewki rozpraszającej w powietrzu
3. Pomiar aberracji sferycznej
4. Obserwacje aberracji chromatycznej i komatycznej
5. Wyznaczenie współczynnika załamania wody

2. Wprowadzenie teoretyczne

Soczewka to bryła wykonana z przezroczystego materiału, ograniczona dwiema powierzchniami sferycznymi, których środki leżą na tzw. osi optycznej soczewki. Każdy promień, który przechodzi przez soczewkę, ulega dwukrotnemu załamaniu na powierzchniach ograniczających ją.

Ze względu na właściwości wynikające z kształtu powierzchni ograniczających soczewki mają właściwość skupiania bądź rozpraszania wiązki świetlnej. Soczewki skupiące to takie, które są grubsze w środku niż na brzegach. Należą do nich soczewki dwuwypukłe, płasko-wypukłe i wklęsło-wypukłe. W odwrotnej sytuacji soczewka rozprasza wiązkę światła. Przykładem takich soczewek są soczewki dwuwklęsłe, płasko-wklęsłe, wypukło-wklęsłe.

Wiązka promieni biegących równolegle do osi optycznej soczewki skupiającej, po przejściu przez nią ulega załamaniu i skupieniu w punkcie zwanym ogniskiem soczewki, F . W przypadku soczewki rozpraszającej, w ognisku przecinają się przedłużenia załamanych promieni wychodzących z soczewki.

Odległość ogniska od powierzchni środkowej (powierzchnia prostopadła do osi optycznej soczewki, przechodząca przez jej środek geometryczny) nazywamy ogniskową soczewki - f , której wartość jest dodatnia w przypadku soczewki skupiającej, a ujemna dla soczewek rozpraszających. Wynika to z tego, że ogniskowe mierzone wzdłuż biegu promieni rzeczywistych przyjmuje się jako dodatnie, a mierzone wzdłuż promieni pozornych jako ujemne.

Każda soczewka ma dwa ogniska znajdujące się po obu jej stronach w jednakowych odległościach od środka soczewki, różnych wartości ogniskowej tej soczewki. Promień biegący pod dowolnym kątem po przejściu przez soczewkę nie ulegnie załamaniu tylko i wyłącznie wtedy, gdy przechodzi przez punkt zwany środkiem optycznym soczewki.

Soczewkę nazywamy cienką, kiedy jej grubość jest zaniedbywalnie mała w porównaniu z promieniem krzywizny. Soczewka gruba to taka, w której promień krzywizny i grubość są porównywalne.

Jeżeli rozważamy soczewkę cienką, to ogniskowa soczewki f_0 zależy od wartości obu promieni krzywizn R_1 i R_2 oraz od współczynnika załamania n materiału, z którego wykonano soczewkę i współczynnika załamania n' otaczającego ośrodku zgodnie z zależnością:

$$\frac{1}{f_0} = \left(\frac{n}{n'} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Natomiast, gdy rozważana soczewka jest soczewką grubą, to jej ogniskową - f , należy obliczyć korzystając z zależności uwzględniającej drogę promieni świetlnych w tej soczewce - d

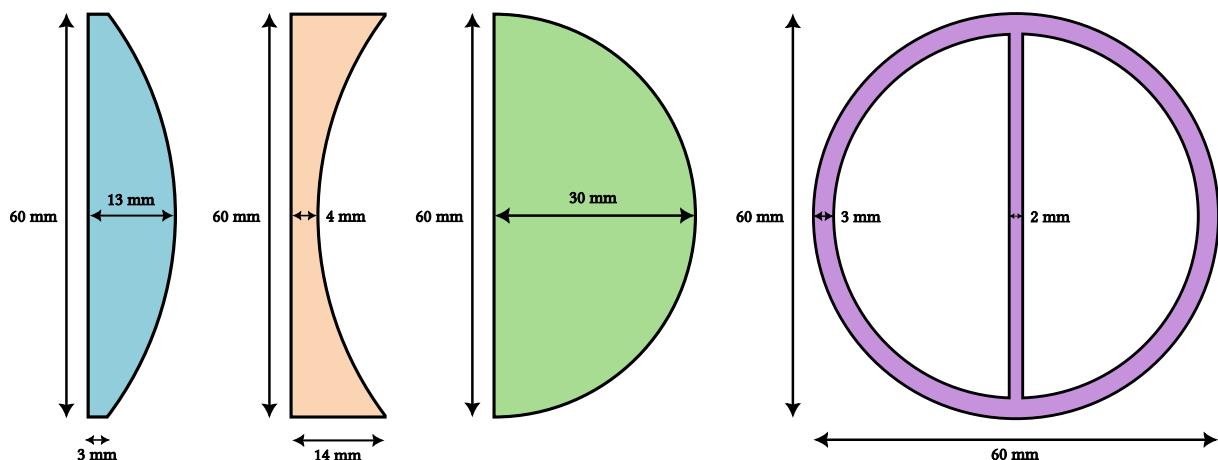
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_0} - \frac{(n - n')^2}{nn'} \cdot \frac{d}{R_1 R_2}$$

Odległość d to odległość pomiędzy płaszczyznami głównymi w soczewce.

3. Aparatura

Element aparatury	Opis i parametry
Źródło światła	Lampa halogenowa
Papier milimetrowy	Siatka 270 mm × 180 mm
Soczewka płasko-wypukła (cienka) ×2	Zmierzona długość: 60 mm Zmierzona szerokość w najgrubszym punkcie: 13 mm Zmierzona szerokość w najcięszym punkcie: 3 mm
Soczewka płasko-wypukła (gruba)	Połowa cylindra o promieniu 30 mm
Soczewka płasko-wkłębła	Zmierzona długość: 60 mm Zmierzona szerokość w najgrubszym punkcie: 14 mm Zmierzona szerokość w najcięszym punkcie: 4 mm
Zbiornik optyczny na ciecz z dwoma komorami	Pusty cylinder o grubości ściany 3 mm, z przedziałką o grubości 2 mm dzielącą zbiornik na dwie komory na ciecz
Przesłona z 1/2 szparami	Przesłona o wymiarach 50 mm × 64 mm z jedną szparą u góry, dwoma szparami na dole. Szpary o grubości 1 mm
Przesłona z 3/5 szparami	Przesłona o wymiarach 50 mm × 64 mm z trzema szparami u góry, pięcioma szparami na dole. Szpary o grubości 1 mm

Tabela 1: Wykaz użytej aparatury wraz z opisem



Rysunek 1: Schemat soczewek i zbiornika na ciecz wraz z wymiarami (widok z góry)

4. Przebieg laboratorium i wyniki

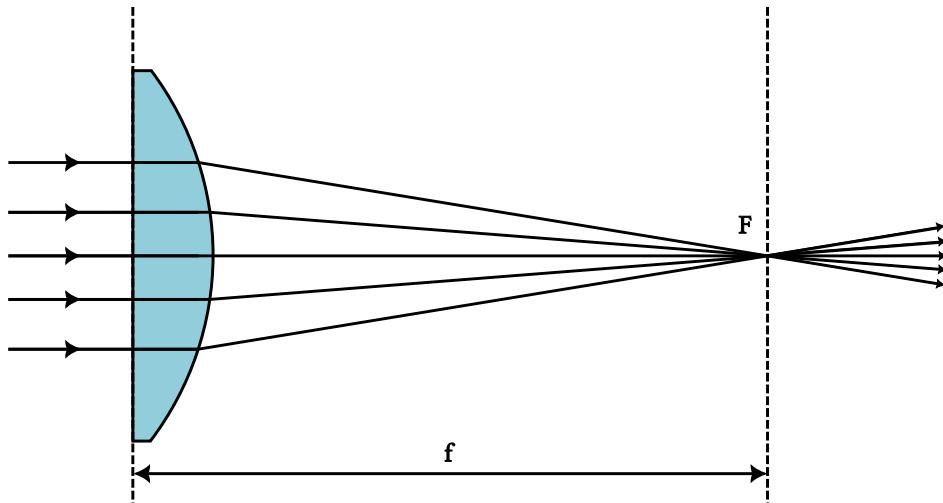
4.1. Wyznaczanie promienia krzywizny soczewki skupiającej w powietrzu

Cel ćwiczenia:

Wyznaczenie promienia krzywizny soczewki skupiającej płasko-wypukłej wykonanej z plexi o współczynniku załamania $n = 1.491$, na podstawie pomiaru ogniskowej w powietrzu oraz na podstawie jej wymiarów.

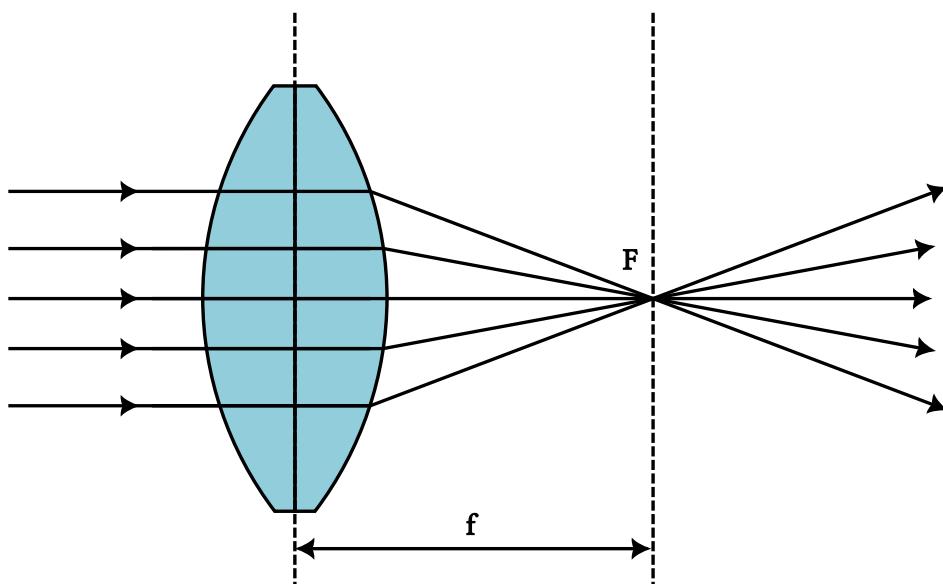
Opis układu:

1. Na źródle światła umieszczono przeslonę z pięcioma szczelinami, a soczewkę skupiającą ustawiono płaską stroną do źródła światła. Ogniskową odczytano z papieru milimetrowego.



Rysunek 2: Schemat układu 1.1

2. Połączono dwie soczewki płasko-wypukłe tak, aby powstała gruba soczewka dwuwypukła. Ogniskową odczytano z papieru milimetrowego.



Rysunek 3: Schemat układu 1.2

Pomiary:

Nr pomiaru	Położenie środka soczewki	Położenie ogniska F	Ogniskowa f [mm]
1	(0, 90)	(102, 90)	102
2	(0, 90)	(50, 90)	50

Obliczenia:

Dla układu 1.1 mamy dane:

- $n = 1.491$
- $n' = 1$
- $R_2 = \infty \Rightarrow \frac{1}{R_2} = 0$
- $d = 13$
- $f = 102$

Przekształcając wzór

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n}{n'} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) - \frac{(n - n')^2}{nn'} \cdot \frac{d}{R_1 R_2}$$

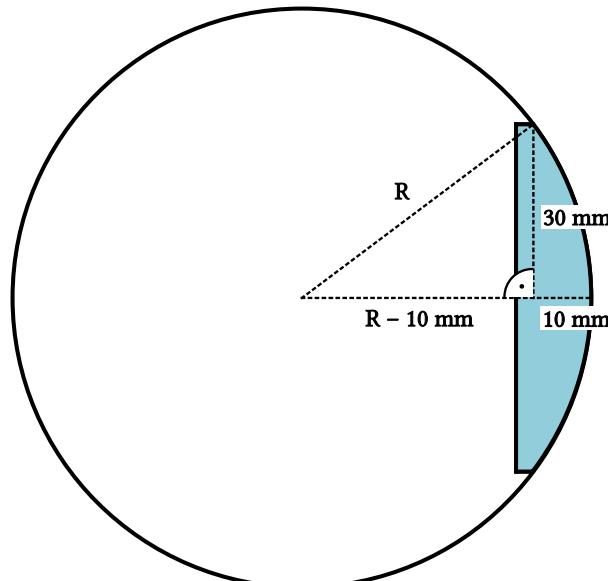
$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n}{n'} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} \right)$$

$$R_1 = \frac{f(n - n')}{n'}$$

$$R_1 = \frac{102(1.491 - 1)}{1} = 50.082$$

Otrzymaliśmy promień krzywizny soczewki $R_1 = 50.082$ mm. Sprawdźmy, czy zgadza się to z wyznaczeniem promienia za pomocą matematyki na podstawie wymiarów soczewki.

Znając wymiary naszej soczewki, możemy sporządzić taki rysunek:



Rysunek 4: Soczewka płasko-wypukła wpisana w okrąg

Wyznaczmy zatem R :

$$(R - 10)^2 + 30^2 = R^2$$

$$R^2 - 20R + 100 + 900 - R^2 = 0$$

$$1000 - 20R = 0$$

$$50 - R = 0$$

$$R = 50 \text{ [mm]}$$

Widzimy więc, że promień krzywizny, który wyliczyliśmy z wcześniejszego wzoru na podstawie pomiaru ogniskowej jest bardzo bliski faktycznemu promieniowi wyliczonemu na podstawie wymiarów soczewki.

Analogiczne obliczenia możemy zrobić dla schematu z dwoma soczewkami złączonymi, tworzącymi soczewkę dwuwypukłą. Dla układu 1.2 mamy dane:

- $n = 1.491$
- $n' = 1$
- $R_1 = -R_2$
- $d = 26$
- $f = 50$

Zatem skorzystajmy ze wzoru:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n}{n'} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) - \frac{(n - n')^2}{nn'} \cdot \frac{d}{R_1 R_2}$$

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n}{n'} - 1 \right) \left(\frac{2}{R_1} \right) + \frac{(n - n')^2}{nn'} \cdot \frac{d}{(R_1)^2}$$

$$(R_1)^2 - 2f(n-1)R - \frac{1}{n}df(n-1)^2 = 0$$

$$(R_1)^2 - 2 \cdot 50(1.491 - 1)R - \frac{1}{1.491} \cdot 26 \cdot 50(1.491 - 1)^2 = 0$$

$$(R_1)^2 - 49.1R - 210.198055 = 0$$

$$\therefore R_1 = 53.061411 \approx 53.06 \text{ [mm]}$$

Widzimy, że promień nadal jest w miarę bliski poprzednim wyliczeniom.

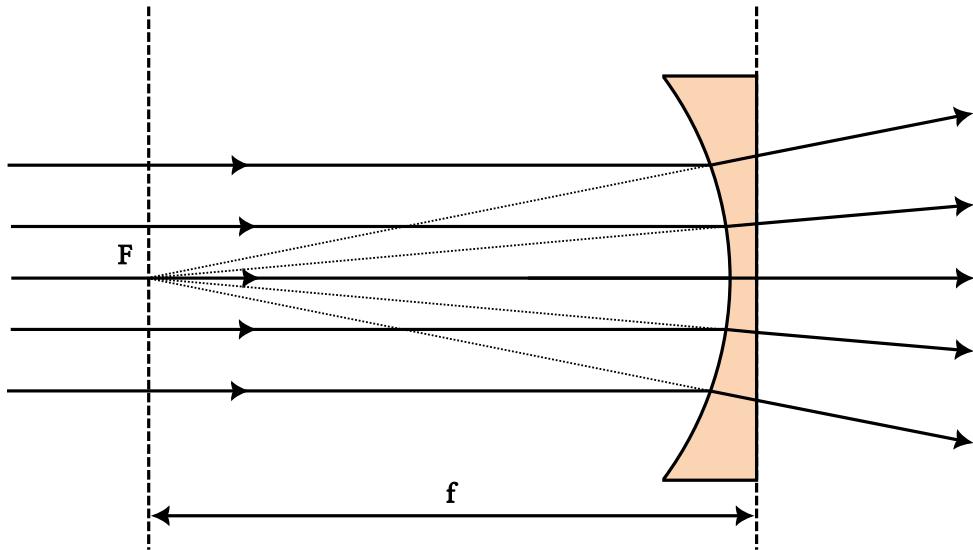
4.2. Wyznaczanie promienia krzywizny soczewki rozpraszającej w powietrzu

Cel ćwiczenia:

Wyznaczenie promienia krzywizny soczewki rozpraszającej płasko-wklęszej wykonanej z plexi o współczynniku załamania $n = 1.491$, na podstawie pomiaru ogniskowej w powietrzu oraz na podstawie jej wymiarów.

Opis układu:

Na źródle światła umieszczone przesłonę z pięcioma szczelinami, a soczewkę skupiającą ustawiono płaską stroną do źródła światła. Ogniskową odczytano po przedłużeniu rozproszonych promieni ze zdjęcia układu za pomocą papieru milimetrowego.



Rysunek 5: Schemat układu 2.1

Pomiary:

Nr pomiaru	Położenie środka soczewki	Położenie ogniska F	Ogniskowa f [mm]
1	(140, 90)	(43, 90)	-97

Obliczenia:

Dla układu 2.1 mamy dane:

- $n = 1.491$
- $n' = 1$
- $R_2 = \infty \Rightarrow \frac{1}{R_2} = 0$
- $d = 4$
- $f = -97$

Przekształcając wzór

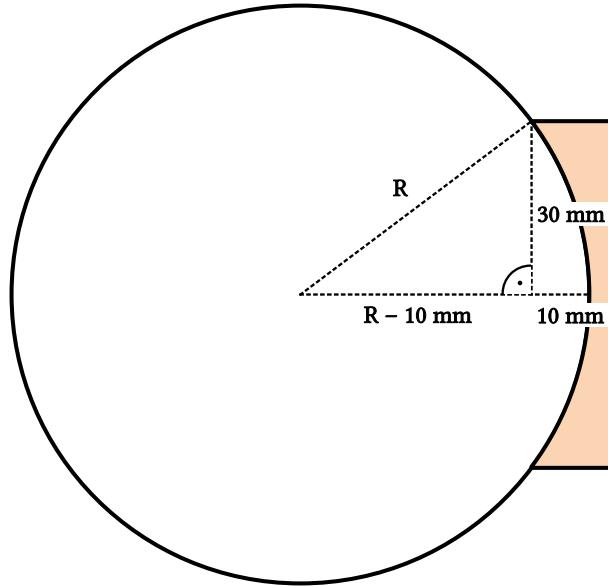
$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n}{n'} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) - \frac{(n - n')^2}{nn'} \cdot \frac{d}{R_1 R_2}$$

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n}{n'} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} \right)$$

$$R_1 = \frac{f(n - n')}{n'}$$

$$R_1 = \frac{-97(1.491 - 1)}{1} = 47.627 \approx 47.63 \text{ [mm]}$$

Identycznie jak w przypadku z soczewką płasko-wypukłą, możemy zweryfikować ten wynik.



Rysunek 6: Soczewka płasko-wklęsła wraz z okręgiem

Dokładnie tak samo jak poprzednio, wychodzi $R = 50 \text{ mm}$.

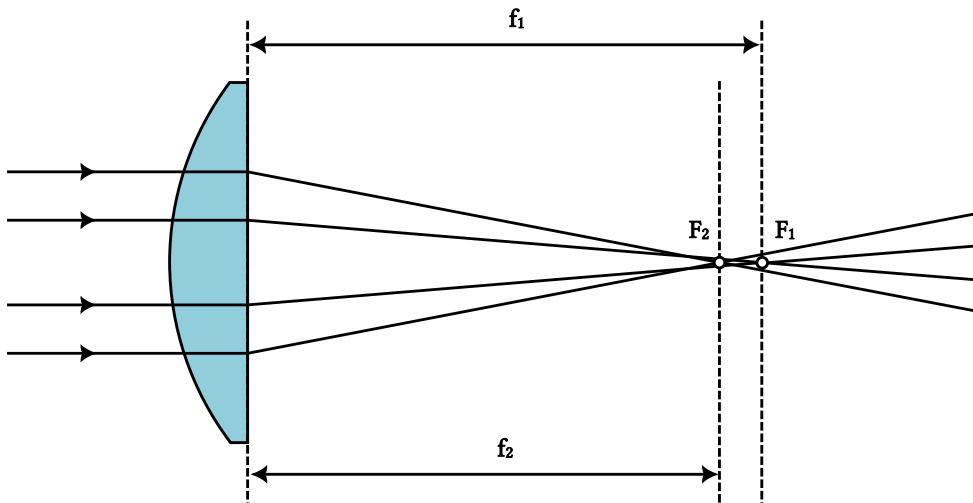
4.3. Pomiar aberracji sferycznej

Cel ćwiczenia:

Wyznaczenie miary aberracji sferycznej na podstawie trzech położen soczewki.

Opis układu:

Na źródle światła umieszczono przeslonę z dwoma szczelinami, a soczewkę skupiającą ustawiono zakrzywioną stroną do źródła światła. Ogniskową odczytano z papieru milimetrowego. Następnie nie zmieniając położenia soczewki, wymieniono przeslonę na przeslonę z pięcioma szczelinami, zasłaniając trzy środkowe, w ten sposób odczytano ogniskową promień bliżej brzegów soczewki.



Rysunek 7: Schemat układu 3.1

Soczewkę przesunięto o 2 cm dalej od źródła światła i powtórzono pomiary, następnie soczewkę przesunięto o 2 cm bliżej w stronę źródła względem oryginalnej pozycji i również powtórzono pomiary.

Pomiary:

Wprowadźmy następujące oznaczenia:

- x_0 - położenie środka soczewki
- F_1 - położenie ogniska promieni bliżej centrum soczewki
- F_2 - położenie ogniska promieni bliżej brzegu soczewki
- f_1 - ogniskowa promień bliżej centrum soczewki
- f_2 - ogniskowa promień bliżej brzegu soczewki
- Δf - miara aberracji sferycznej

Nr pomiaru	x_0	F_1	F_2	f_1 [mm]	f_2 [mm]
1	(40, 90)	(135, 90)	(138, 90)	95	98
2	(60, 90)	(147, 90)	(150, 90)	87	90
3	(20, 90)	(111, 90)	(108, 90)	91	87

Obliczenia:

Dla każdego pomiaru obliczamy miarę aberracji sferycznej

$$\Delta f = f_2 - f_1$$

Otrzymujemy

Nr pomiaru	f_1 [mm]	f_2 [mm]	Δf [mm]
1	95	98	3
2	87	90	3
3	91	87	-3

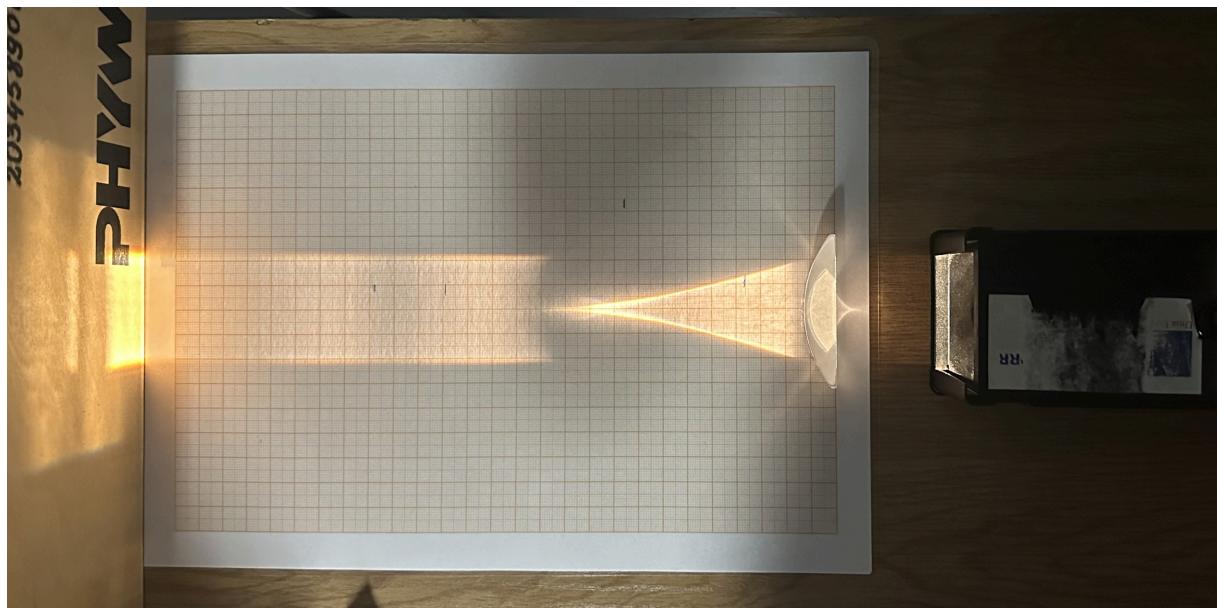
Widzimy więc, że odległość między oboma ogniskami jest taka sama we wszystkich pomiarach, jednak w trzecim, tym w którym soczewkę przysunęliśmy o 20 cm w stronę źródła światła, ogniska zamieniają kolejność, stąd zmiana znaku.

4.4. Obserwacje aberracji chromatycznej i komatycznej

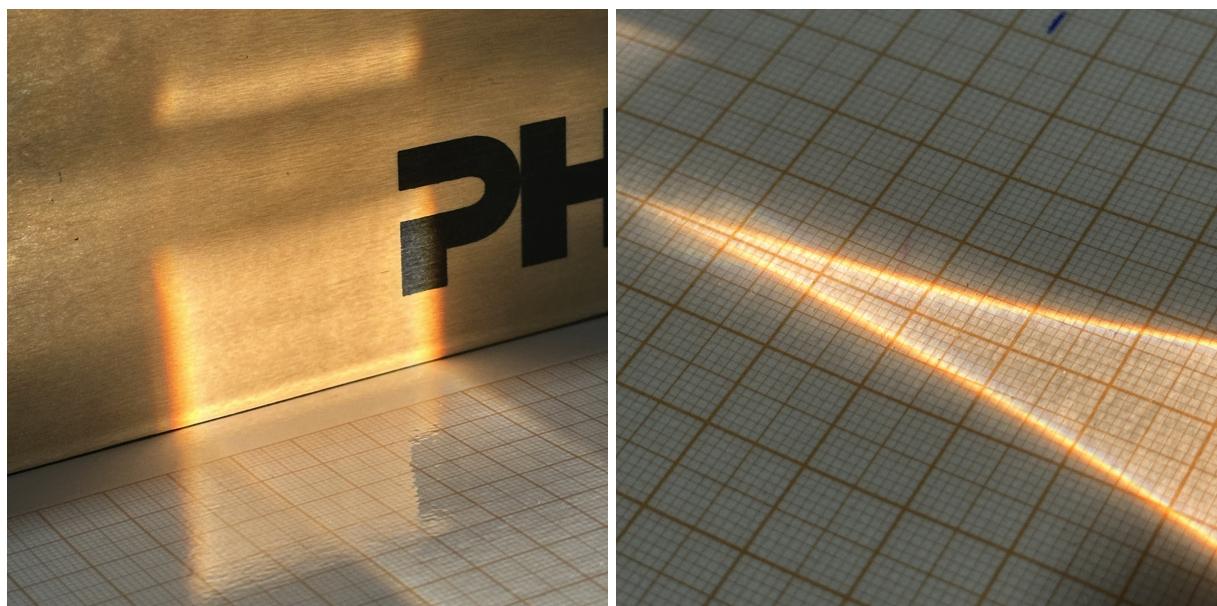
Cel ćwiczenia:

Zaobserwowanie aberracji chromatycznej i komatycznej przy użyciu soczewki płasko-wypukłej.

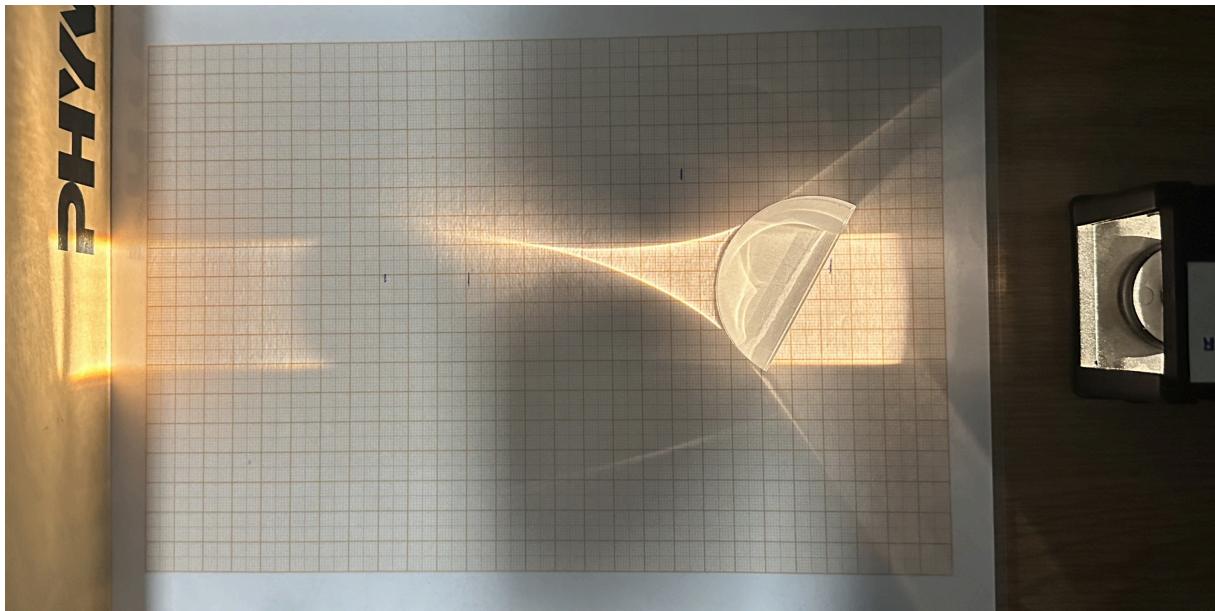
Zdjęcia układów:



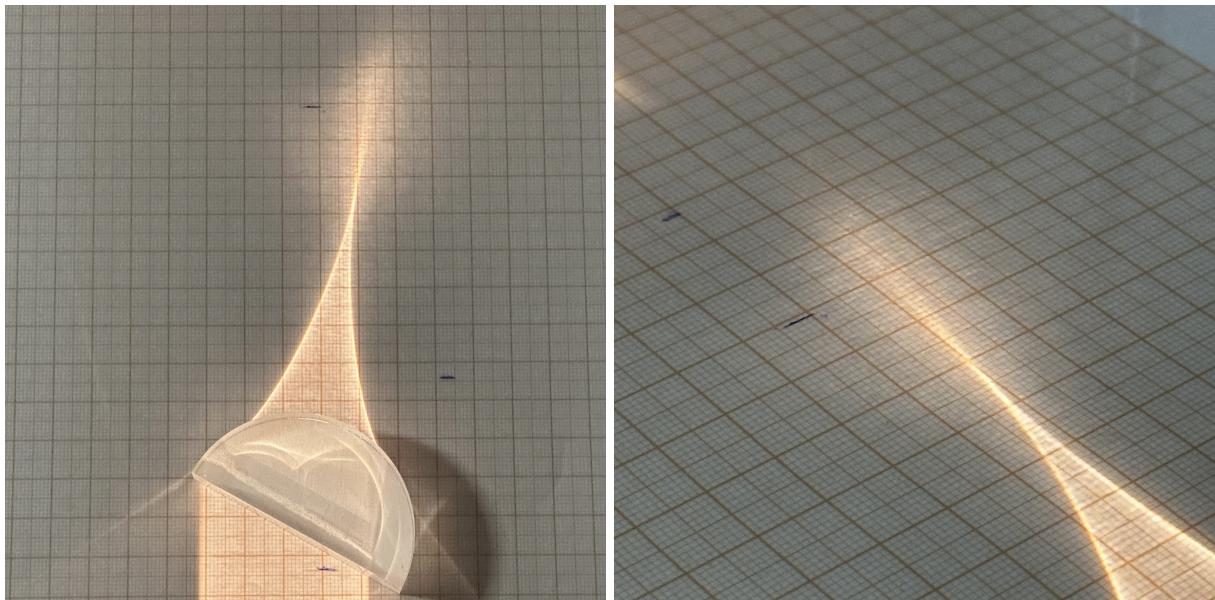
Rysunek 8: Zdjęcie układu 4.1 do obserwacji aberracji chromatycznej



Rysunek 9: Zdjęcia rozszczepienia barw z bliska



Rysunek 10: Zdjęcie układu 4.2 do obserwacji aberracji komatycznej



Rysunek 11: Zdjęcia zaobserwowanej komy

Obserwacje:

- Na zdjęciach z rysunku 9 możemy zaobserwować rozszczepienie barw na brzegach promieni światła, czyli aberrację chromatyczną.
- Na zdjęciach z rysunku 11 możemy zaobserwować lunę światła, która przypomina swoim kształtem kometę, jest to wynik aberracji komatycznej.

4.5. Wyznaczenie współczynnika załamania wody

Cel ćwiczenia:

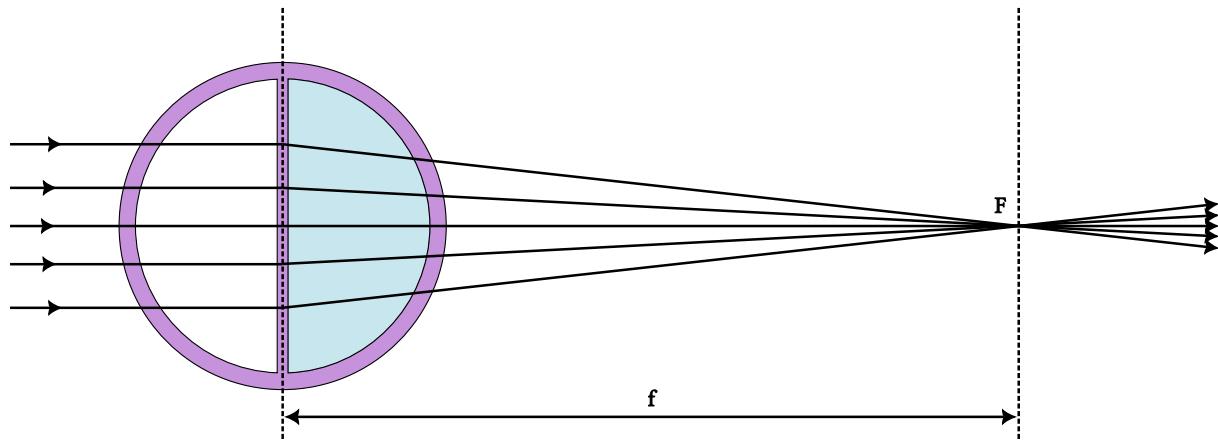
Wyznaczenie współczynnika załamania wody na podstawie zmian ogniskowej dla pojemnika pozwalającego na stworzenie "soczewki wodnej".

Opis układu:

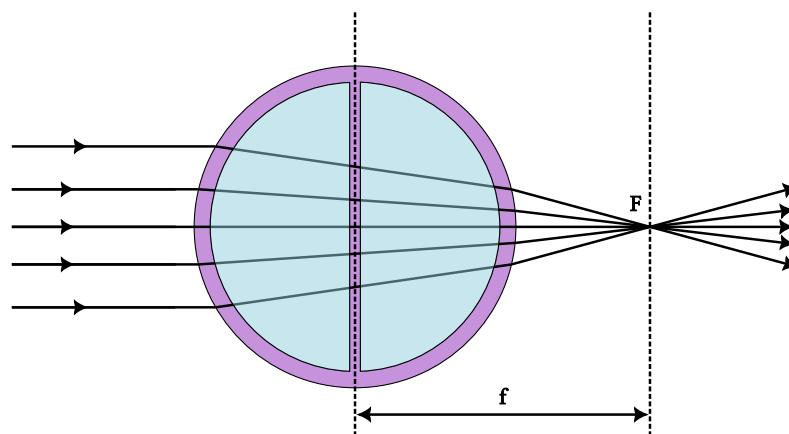
Na źródle światła umieszczono przeslonę z pięcioma szczelinami, umieszczono zbiornik optyczny i zaobserwowano, że promienie są niemal równoległe, jednak lekko rozproszone.

Następnie do komory dalej od źródła światła nalano wodę i odczytano powstałe ognisko z papieru milimetrowego.

W końcu do komory bliżej do źródła światła również nalano wodę i odczytano powstałe ognisko z papieru milimetrowego.



Rysunek 12: Schemat układu 5.1 z jedną komorą wypełnioną wodą (soczewka płasko-wypukła)



Rysunek 13: Schemat układu 5.2 z dwoma komorami wypełnionymi wodą (soczewka dwuwypukła)

Pomiary:

Nr pomiaru	Stan zbiornika	Położenie soczewki	Położenie ogniska F	Ogniskowa f [mm]
1	Pusty	-	-	-
2	Pełna 1. komora	(30, 90)	(162, 90)	132
3	Pełne 2. komory	(30, 90)	(85, 90)	55

Obliczenia:

Niestety dla tego zadania musimy zrobić kilka upraszczających założeń, inaczej obliczenia byłyby bardzo żmudne i lepiej użyć przy tym komputera.

Zatem zakładamy, że zbiornik z plexi ma taki sam współczynnik załamania co powietrze, czyli traktujemy go tak, jakby go nie było.

Ponadto zakładamy parę konwencji:

- R_1 (ze znakiem) jest promieniem krzywizny powierzchni bliżej źródła światła
- R_2 (ze znakiem) jest promieniem krzywizny powierzchni dalej od źródła światła
- $R > 0$ - środek krzywizny powierzchni znajduje się dalej od źródła światła
- $R < 0$ - środek krzywizny powierzchni znajduje się po stronie źródła światła (czyli promienie docierając do powierzchni minęły już środek krzywizny)
- Dla płaskich powierzchni przyjmujemy $R = \infty$

Dla układu z jedną komorą pełną mamy zatem dane:

- $R_1 = \infty$
- $R_2 = -27$ [mm] - promień wewnętrzny zbiornika, czyli promień krzywizny "soczewki wodnej"
- $d = 26$ [mm] - grubość "soczewki wodnej" (po uwzględnieniu grubości przedziałki)
- $f = 132$ [mm]

Szukamy współczynnika załamania wody n .

Korzystając ze wzoru otrzymujemy

$$\frac{1}{132} = (n-1) \left(\frac{1}{\infty} - \frac{1}{-27} \right) - \frac{(n-1)^2}{n} \cdot \frac{26}{\infty \cdot (-27)}$$

$$\frac{1}{132} = (n-1) \cdot \frac{1}{27}$$

$$n = \frac{27}{132} + 1 = 1.204545 \approx 1.20$$

Analogicznie, dla układu z dwoma komorami pełnymi mamy dane:

- $R_1 = 27$ [mm] - promień wewnętrzny zbiornika, czyli promień krzywizny "soczewki wodnej"
- $R_2 = -27$ [mm] - promień wewnętrzny zbiornika, czyli promień krzywizny "soczewki wodnej"
- $d = 52$ [mm] - grubość "soczewki wodnej" (po uwzględnieniu grubości przedziałki)
- $f = 55$ [mm]

Mamy więc

$$\frac{1}{55} = (n-1) \left(\frac{1}{27} - \frac{1}{-27} \right) - \frac{(n-1)^2}{n} \cdot \frac{52}{27 \cdot (-27)}$$

$$\frac{1}{55} = (n-1) \cdot \frac{2}{27} + \frac{52}{729} \cdot \frac{(n-1)^2}{n}$$

$$n = \frac{9419}{11660} + \frac{27}{116600} \sqrt{30209} = 1.210274 \approx 1.21$$

Uśredniając wyniki otrzymujemy współczynnik załamania wody $n = 1.21$.

Faktyczny współczynnik załamania wody wynosi 1.33, zatem wyznaczony przez nas jest błędny, różni się o 0.12, co wynika z błędów pomiarowych oraz nieprawdziwych założeń.

Z ciekawości autor sprawdził jaki wyszedłby współczynnik uwzględniając prawdziwą geometrię zbiornika oraz jej konsekwencje za pomocą symulacji komputerowej napisanej w języku Python.

Najlepiej policzony współczynnik załamania wody wyszedł dla naszej geometrii 1.262, który jest bliżej stanu faktycznego, ale nadal błędny.

Ponadto z ciekawości obliczono jakie powinny wyjść symulowane ogniskowe tylko na podstawie geometrii i faktycznych wskaźników załamania.

Otrzymano wartości -439.11 mm dla pustego pojemnika, 145.69 mm dla półpełnego pojemnika, 48.53 dla pełnego pojemnika.

5. Wnioski

1. Wyznaczone promienie krzywizny soczewek są zgodne z wartościami nominalnymi (ok. 50 mm).
2. Zaobserwowano zjawisko aberracji sferycznej, chromatycznej i komatycznej.
3. Współczynnik załamania wody został poprawnie oszacowany na poziomie $n \approx 1.33$.