

Ćwiczenie 2

Interferometr Ronchiego - badanie jakości soczewek. Sensor Shack'a-Hartmann'a badanie frontów sferycznych i porównanie z falą płaską. Interferometr Twyman-Greena. Test ostrza noża.

Część teoretyczna

1. Aberracje soczewek refrakcyjnych

Refrakcyjna soczewka skupiająca jest podstawowym elementem układów obrazujących, np.: aparatów fotograficznych, kamer oraz ludzkiego oka. Idealna soczewka cienka może być wykorzystana do obrazowania w sposób idealny, tj. bez aberracji geometrycznych i chromatycznych. W takim przypadku dowolny punkt przedmiotu jest obrazowany w punkt obrazu, płaszczyzna jest odwzorowywana w idealną płaszczyznę, kształt obrazu jest identyczny z kształtem przedmiotu. Dodatkowo wszystkie te warunki spełnione są dla dowolnej długości fali światła, czyli dla dowolnej barwy. W praktyce idealne soczewki nie istnieją i nawet najdoskonalsze wytworzone elementy obarczone są zestawem aberracji. Aberracja – słowo wywodzące się z greki i łaciny oznaczające odchylenie od normy.

Rodzaje aberracji, czyli wady soczewek zostały opisane matematycznie i sklasyfikowane przez Seidela w 1856 roku. W pierwszym przybliżeniu można podzielić je na:

- Aberracje geometryczne - skutkują deformacją uzyskanego obrazu, pogorszeniu ostrości.
- Aberracje chromatyczne - skutkują niepożądanymi zmianami zabarwienia obrazu, gdyż związane są z różnicami w jakości obrazowania dla różnych kolorów.

W niniejszym ćwiczeniu skupimy się na zaobserwowaniu aberracji geometrycznych w układach obrazujących opartych na testowych skupiających soczewkach refrakcyjnych.

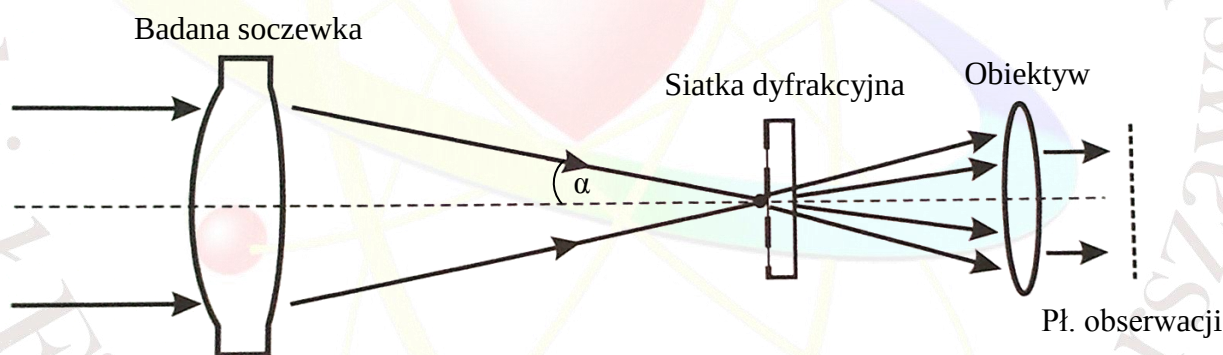
Ludzkie oko stanowi prosty układ obrazujący o zmiennej mocy optycznej soczewki i stałej odległości obrazowej. Zakładając obserwację oddalonych przedmiotów można nawet założyć, że jest to jednosoczewkowy układ stało-ogniskowy o odległości przedmiotowej około 20 mm. Soczewka oka posiada wiele rodzajów silnych aberracji i na siatkówce rzutuje obraz pozostawiający wiele do życzenia zarówno pod względem geometrii jak i odcieni chromatycznych. Tym niemniej mózg szybko uczy się kompensować te niedoskonałości i widzimy z zadowalającą ostrością i rozdzielczością, jeżeli niedoskonałości soczewki nie są zbyt duże. W przypadku fotografii i innych dziedzin techniki bazujących na obrazowaniu (np. widzenie maszynowe, inspekcje taśm produkcyjnych) zdecydowana większość aberracji musi być wyeliminowana lub skompensowana w optyce obrazującej. Z tego powodu od samych początków fotografii obserwuje się postęp w produkowaniu coraz doskonalszych soczewek i opartych na nich obiektów.



Aby określić aberrację występującą w danym układzie optycznym należy opisać zmiany kształtu frontu falowego wychodzącego ze źrenicy wyjściowej. Formalizm opisu aberracji geometrycznych, który jest obecnie używany, wyróżnia następujące aberracje: sferyczną, komatyczną, astygmatyzm, krzywiznę pola i dystorsję. W celu wykrycia rodzaju i wielkości aberracji w optyce instrumentalnej stosuje się wiele różnego rodzaju testów. Tutaj skupimy się na testach zakładających oświetlenie wiązką światła koherentnego (laserowego) i wykorzystujących interferencję frontu falowego zdeformowanego przez soczewkę.

2. Interferometr Ronchiego

Popularnym i prostym testem jakości soczewek (w ogólności układów obrazujących) jest test Ronchiego, zaproponowany w 1920 roku przez Vasco Ronchiego. Monochromatyczna wiązka światła w postaci wycinka fali płaskiej oświetla badany układ optyczny (w naszym ćwiczeniu soczewkę lub obiektyw). Światło skupiane jest w ognisku. W pobliżu ogniska umieszczamy siatkę dyfrakcyjną, która rozszczepia padające światło na kilka frontów falowych, związanych z różnymi rzędami ugięcia (rząd 0, +1, -1 itp.). W wyniku odpowiedniego doboru okresu (gęstości) siatki, wspomniane fronty falowe interferują ze sobą tworząc obrazy interferencyjne, które możemy zarejestrować jako interferogramy. Kształt i orientacja prążków interferencyjnych determinuje rodzaj aberracji badanego układu. Na Rys. 1 przedstawiono schemat ideowy układu do przeprowadzenia testu Ronchiego.



Rys 1. Schemat eksperymentu testu Ronchiego

Jako „Obiektyw” może posłużyć ludzkie oko (obserwacja bezpośrednia) lub obiektyw aparatu cyfrowego. Można wykonać też obserwację interferogramu z pominięciem elementu „Obiektyw”. Wszystko zależy od relacji pomiędzy okresem siatki dyfrakcyjnej a aperturą i ogniskową badanego elementu optycznego. Okres siatki dyfrakcyjnej powinien być mniejszy bądź równy:

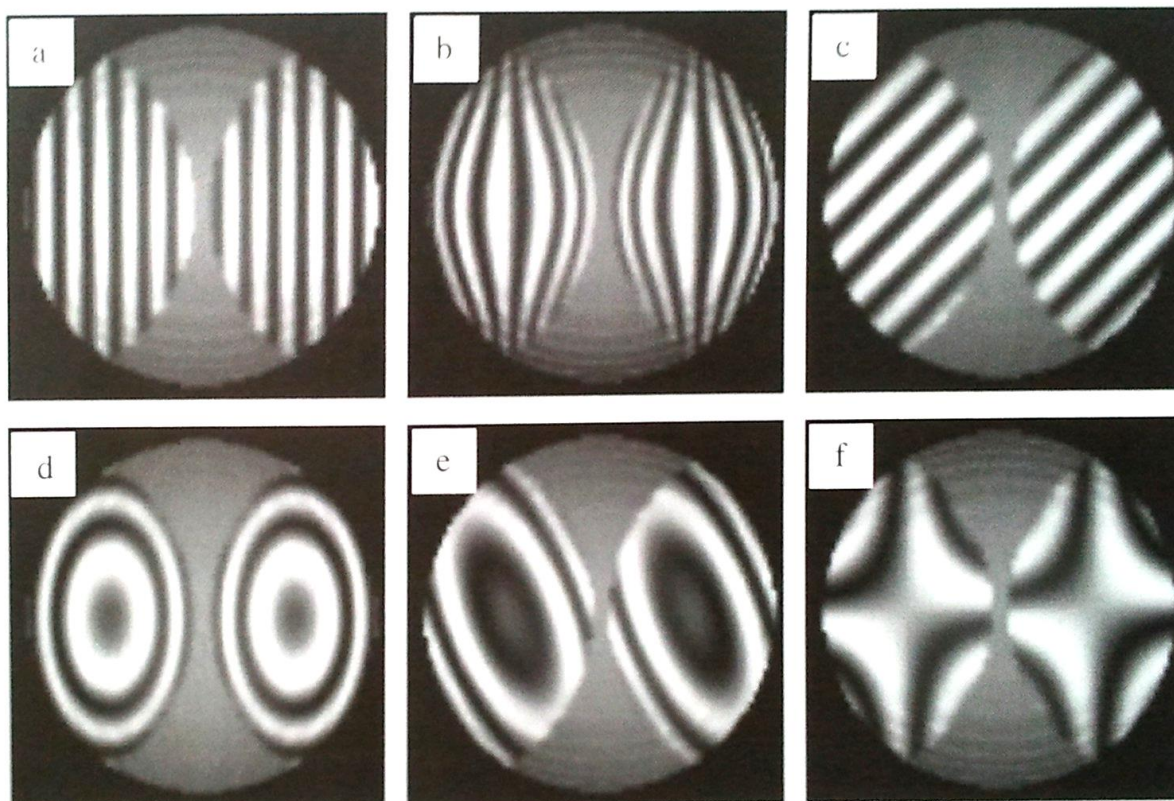
$$P \leq \frac{\lambda}{NA},$$

Gdzie NA (apertura numeryczna) to sinus półkąta stożka świetlnego formowanego przez badaną soczewkę:

$$NA = \sin(\alpha).$$

Kąt α został zaznaczony na Rys. 1.

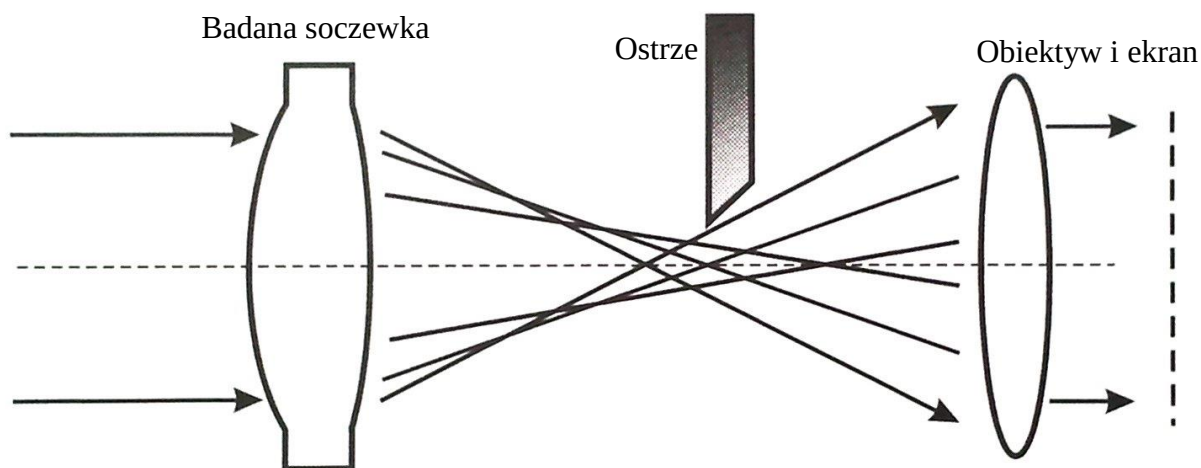
Interferogramy uzyskane z testu Ronchiego można interpretować na podstawie przykładowych, charakterystycznych wzorów widocznych na poniższym rysunku.



Rys. 2. Przykładowe interferogramy testu Ronchiego soczewek o następujących aberracjach: a) rozogniskowanie; b) aberracja sferyczna; c) astygmatyzm pod kątem 45° ; d) koma pod kątem 0° ; e) koma pod kątem 45° ; f) koma pod kątem 90° .

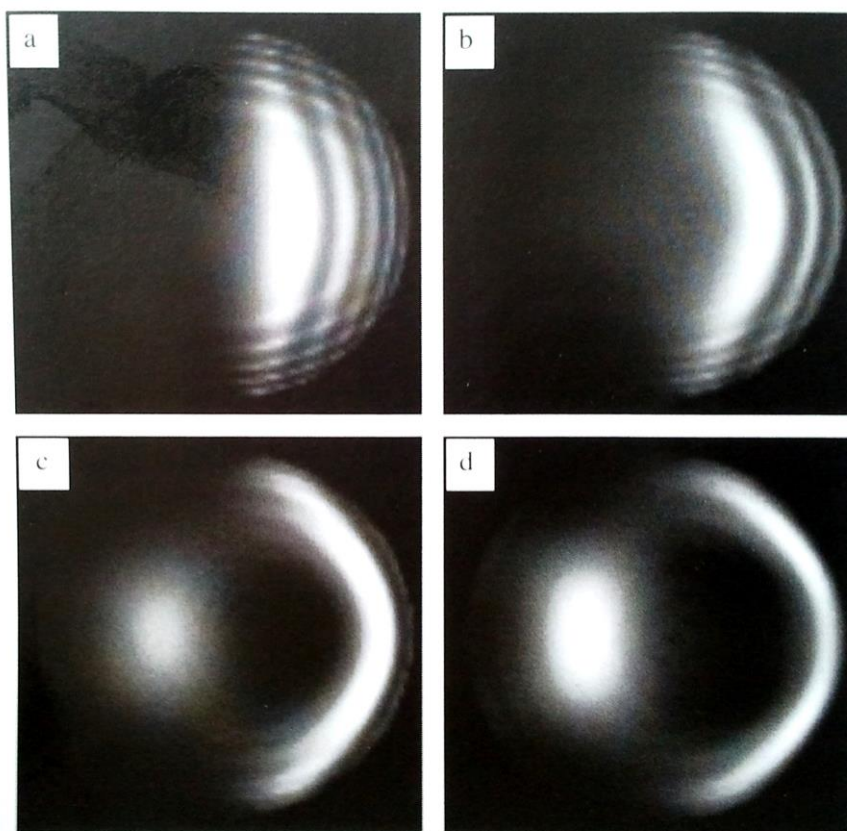
3. Test ostrza (ang. knife edge)

W teście Ronchiego w płaszczyźnie bliskiej ogniskowej badanego elementu następowało wysyłanie światła periodyczną siatką dyfrakcyjną. W prostszej wersji można dokonać tego tylko jedną przesłoną umieszczoną w osi optycznej w pobliżu ogniska, tak jak pokazuje to Rys. 3. Jest to test ostrza (ang. knife edge test).



Rys. 3. Geometria testu ostrza.

Przesuwając ostrze wzdłuż osi optycznej wysłania się grupy promieni, przez uzyskuje się na ekranie obrazy interferencyjne podobne do tych z testu Ronchiego. W przypadku soczewki idealnej obraz interferencyjny powinien składać się z równoległych prążków, opisanych przez teoretyczną dyfrakcję na krawędzi prostej. W praktyce spotyka się bardziej skomplikowane wzory prążków. Rys. 4. przedstawia interferogramy dla soczewki obarczonej aberracją sferyczną.

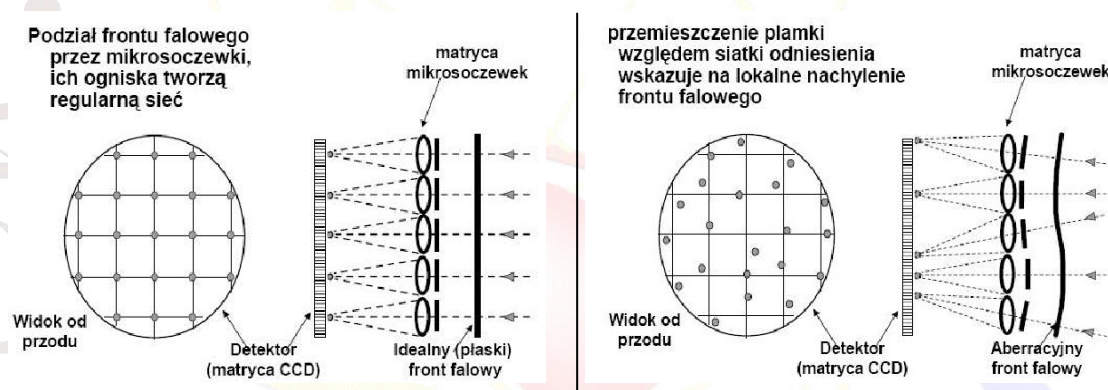


Rys. 4. Przykładowe interferogramy testu ostrza dla soczewki o aberracji sferycznej; $NA=0,5$; $f=6000\lambda$ dla odległości ostrza od ogniska: a) -15λ ; b) 0; c) $+15\lambda$; d) $+20\lambda$.

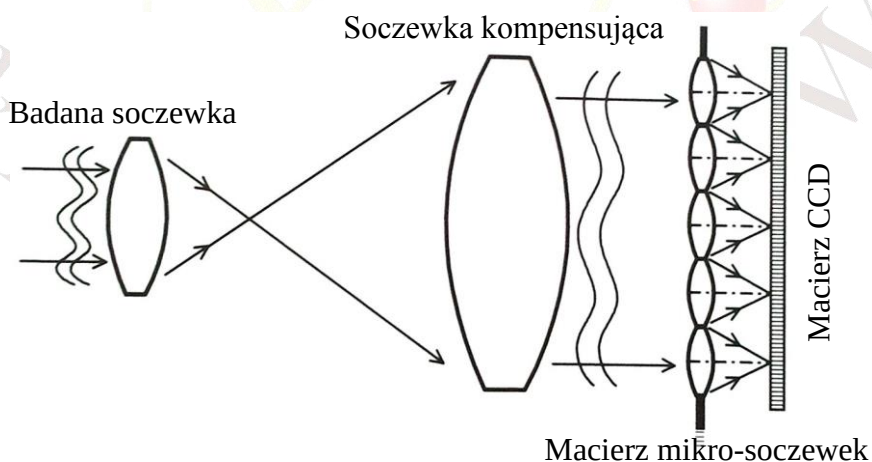
4. Test Shacka-Hartmanna

Najbardziej rozpowszechniony w świecie sposób testowania płaskości frontu falowego to sensor Shacka-Hartmanna. Jest to bardzo precyzyjne urządzenie wykrywające niewielkie odchylenia badanego frontu falowego od płaskości. Kluczowym elementem testu S-H jest macierz mikrosoczewek, która ogniskuje mały fragment padającego pola świetlnego na niewielkim obszarze macierzy CCD.

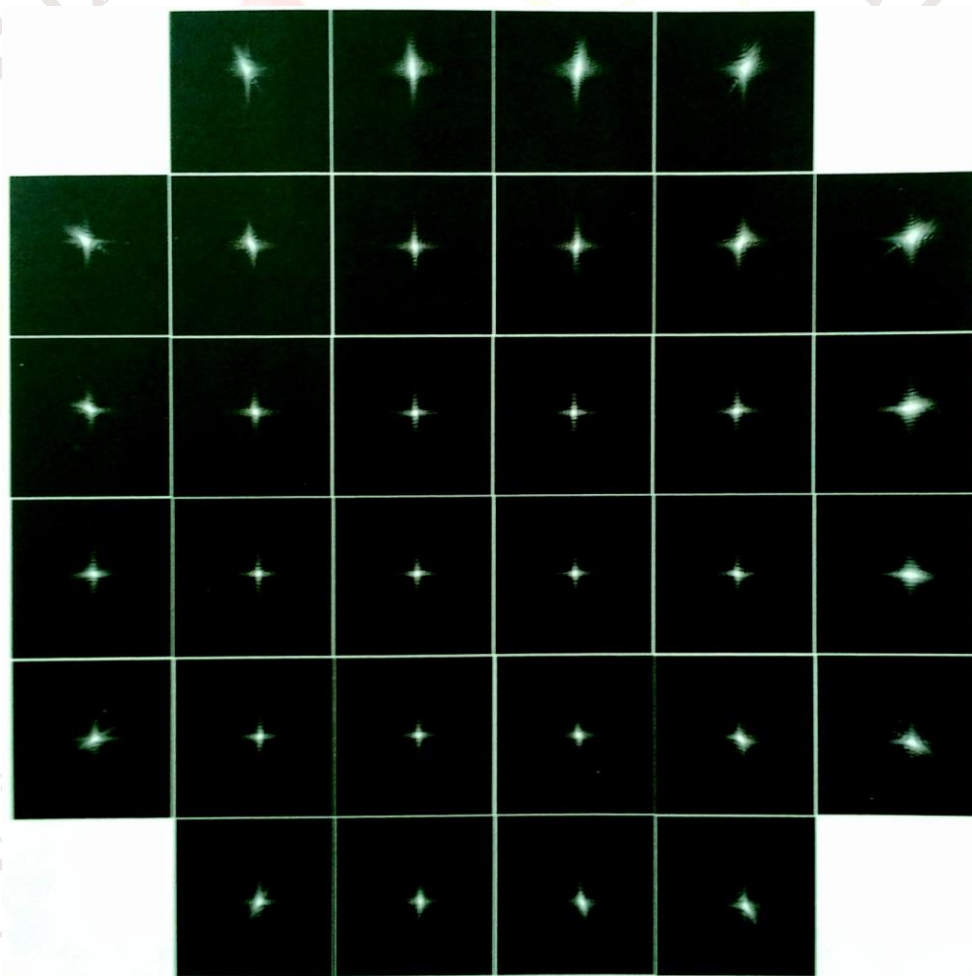
W przypadku padania na urządzenie pomiarowe idealnej fali płaskiej, na macierzy światłoczułej formowana jest regularna siatka punktów. W przypadku padania fali o pewnej deformacji, położenia punktów są nieznacznie zmienione:



Na podstawie stopnia i kierunku przemieszczeń punktów oblicza się współczynniki aberracji Seidla. Zwykle dokonuje tego oprogramowanie wewnętrzne urządzeń. Zaletą tego sposobu jest brak wiązki referencyjnej (brak interferencji), przez co komercyjnie dostępne urządzenia realizujące wspomniany test są proste i kompaktowe. Wadą testu S-H jest konieczność stosowania wysokiej jakości macierzy mikro-soczewek, macierzy CCD wysokiej rozdzielczości oraz złożonego algorytmu obliczania deformacji na podstawie położenia punktów ogniskowych.



Najprostszym sposobem oszacowania aberracji w warunkach laboratoryjnych jest uzyskanie zdjęcia macierzy punktów przy założeniu oświetleniu najlepszą możliwą do sformowania falą płaską. W drugiej kolejności w wiązkę oświetlającą wstawia się badaną soczewkę wraz z drugą soczewką, której zadaniem jest skompensowanie krzywizny frontu falowego. Tak uzyskany quasi-płaski front oświetla sensor Shacka-Hartmanna. Rozsuniecie punktów ogniskowych na macierzy CCD determinuje rodzaj zniekształcenia wprowadzonego przez badaną soczewkę. Przykładowy rozkład punktów ogniskowych dla frontu falowego o złożonej aberracji przedstawia Rys. 6.

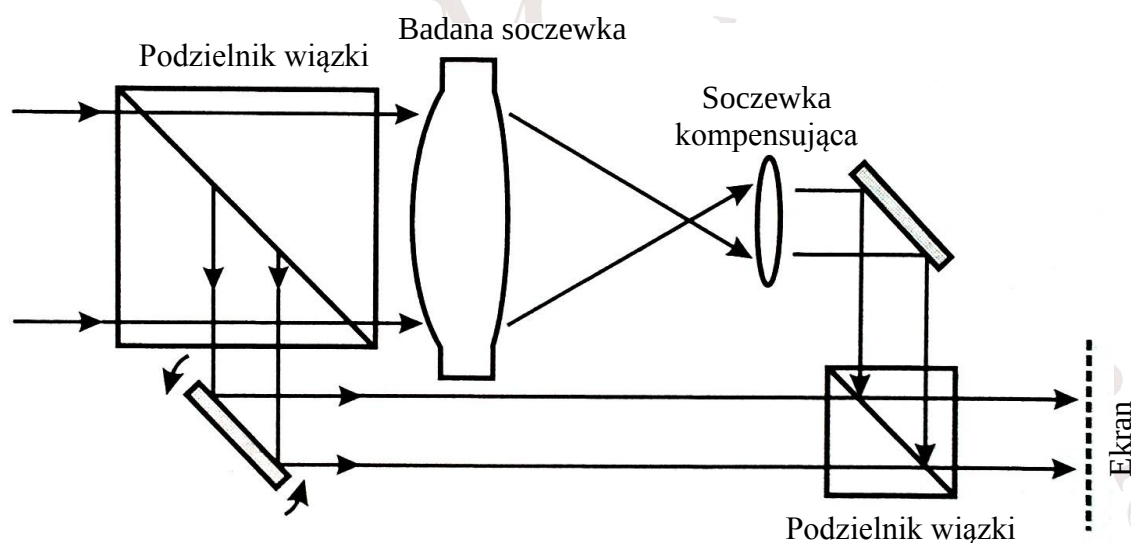


Rys. 6. Punkty ogniskowe testu Shacka-Hartmanna dla złożonej aberracji.

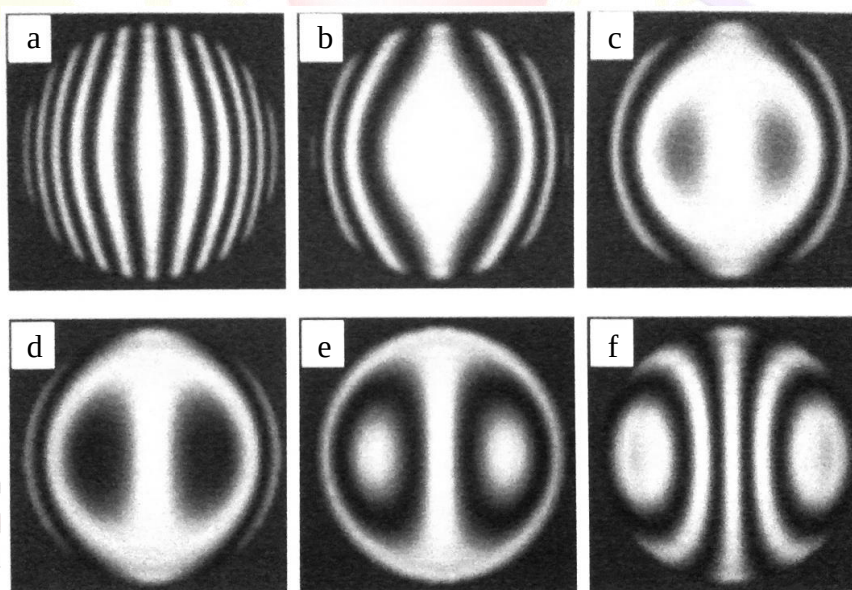
5. Interferometr Macha-Zehndera

Konfiguracją umożliwiającą bezpośrednią obserwację krzywizny frontu falowego jest konfiguracja Macha-Zehndera. Charakteryzuje się dołączoną wiązką odniesienia, przez co zaburzony front falowy interferuje z referencyjnym frontem płaskim. Kształt i gęstość

prążków w bezpośredni sposób obrazuje charakter, orientację i natężenie aberracji. Geometrię pomiaru pokazuje poniższy Rys. 7.



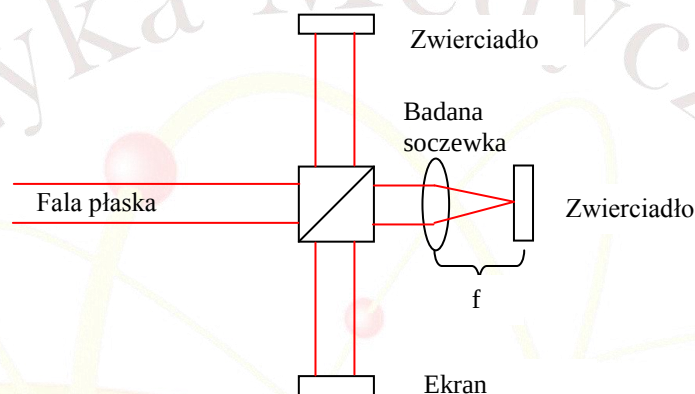
Rys. 7. Geometria pomiaru aberracji soczewki z wykorzystaniem interferometru Macha-Zehndera.



Rys. 8. Interferogramy soczewki z aberracją komatyczną uzyskane w interferometrze Macha-Zehndera dla zwiększającego się kąta padania wiązki odniesienia: a) $-0,1^\circ$; b) 0° ; c) $0,05^\circ$; d) $0,07^\circ$; e) $0,1^\circ$; f) $0,18^\circ$.

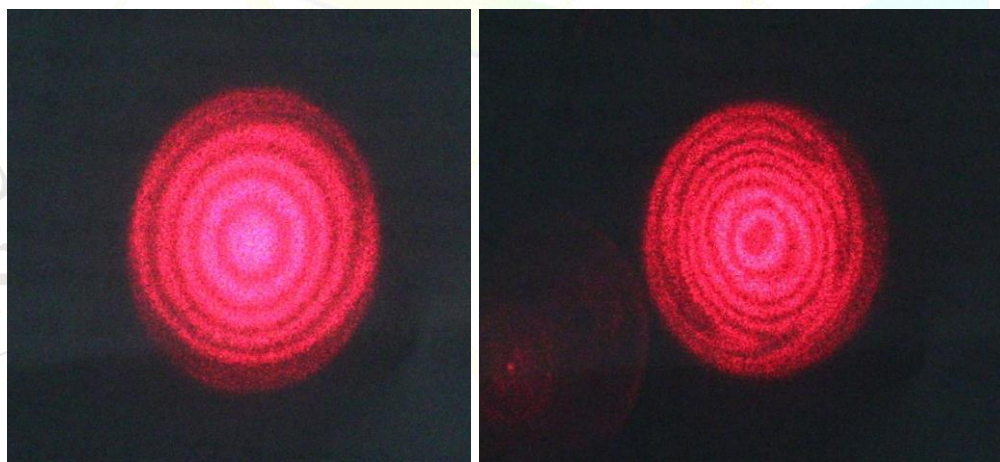
6. Interferometr Twymana-Greena

Narzędziem umożliwiającym obserwację asymetrii kształtu soczewek skupiających jest interferometr Twymana-Greena z wstawionym elementem testowanym. Schemat urządzenia pokazuje Rys. 9.



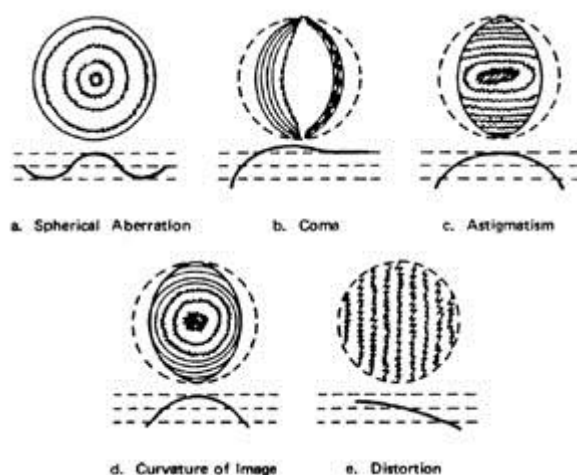
Rys. 9. Interferometr Twymana-Greena.

Precyzyjne ustawianie układu wymaga dokładnego justowania z jednoczesną obserwacją prążków interferencyjnych. Jeżeli uzyskane na ekranie pole jest z pewnym przybliżeniem stałe, oznacza to, że justowanie powiodło się. Po nieznacznym rozogniskowaniu położenia elementu testowanego względem zwierciadła, można obserwować prążki koncentryczne wizualizujące asymetrię kształtu soczewki lub rozkładu jej współczynnika załamania. Przykładowe interferogramy przedstawia Rys. 10.



Rys. 10 Interferogram obiektywu wysokiej jakości (z lewej) i soczewki sferycznej (z prawej). Widoczna asymetria kształtu soczewki sferycznej.

Po nieznacznym skręceniu kąta jednego z ramion interferometru prążki uzyskują charakter pionowy i prawie równoległy, przy czym odstępstwo od równoległości można wiązać z aberracjami, którymi obarczona jest badana soczewka, wg Rys. 11.



Rys. 11. Charakterystyczne kształty prążków interferencyjnych w interferometrze Twymana-Greena.

Przebieg ćwiczenia

1. Obserwacja i rejestracja interferogramów soczewek i obiektywów testowych w układzie interferometru Ronchiego.
2. Zestawienie układu testu ostrza (knife edge) przy użyciu ostrza żyletki i zarejestrowanie obrazów dyfrakcyjnych w 3 charakterystycznych miejscach.
3. Zestawienie układu Shacka-Hartmanna. Zarejestrowanie zdjęcia rozkładu punktów ogniskowych dla fali płaskiej. Wstawienie soczewki badanej i soczewki kompensującej. Wyrównanie frontu falowego przy pomocy etalonu. Zdjęcie punktów ogniskowych. Porównanie zdjęć poprzez wypoźycjonowanie i odjęcie w programie graficznym.
4. Zestawienie układu interferometru Twymana-Green'a. Obserwacja i rejestracja interferogramów soczewek i obiektywów testowych.
5. Zestawienie układu interferometru Macha-Zehndera. Obserwacja i rejestracja interferogramów soczewek i obiektywów testowych.
6. Interpretacja wyników badania tych samych soczewek czterema metodami. Sformułowanie wniosków na temat zgodności rezultatów.

Literatura i źródła internetowe

1. Masud Mansuripur, „Classical Optics and its Applications”, Cambridge University Press (2009).
2. P. Hariharan, "Optical interferometry," Academic Press (2003).
3. Sidney F. Ray, "Applied photographic optics," Focal Press (2002).
4. Ł. Wróblewski, „Zaprojektowanie, wykonanie i zbadanie dyfrakcyjnego sensora frontu falowego typu Shacka-Harmanna”. Praca inżynierska na Wydziale Fizyki PW (2010).
5. http://agamemnon.cord.org/cm/leot/course10_Mod06/Module10-6.htm
6. Malacara D., Optical shop testing, John Wiley & Sons, NY 1992
7. Mahajan, V. E., Aberration theory made simple, SPIE, Washington, 1991
8. E. Heht, A. Zajac, "Optics" Addison-Wesley Publishing Company 2003
9. Briers J. D. Optical testing, Optics and Laser in Engineering, vol. 32, p.111,1999