

Konstrukcja Układów Optycznych

Projektowanie Obiektywu Mikroskopowego

mgr inż. Arkadiusz Kuś
prof. Tomasz Kozacki

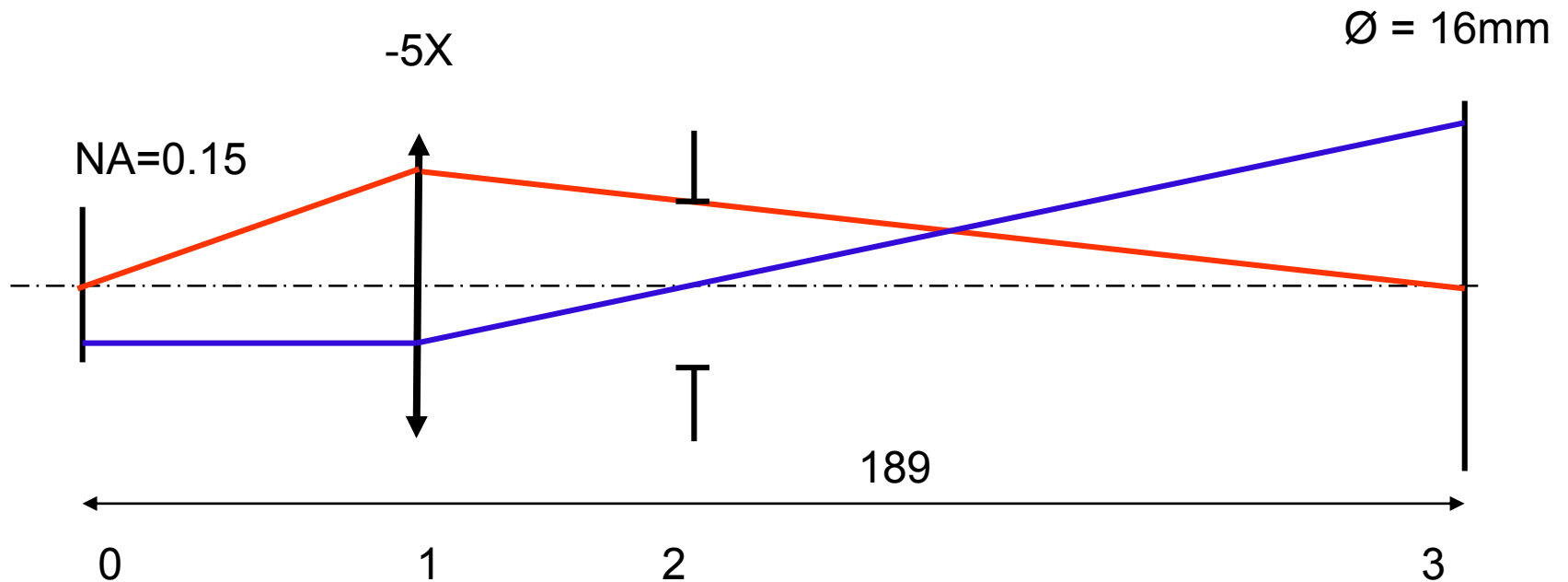
☐ Projektowanie układu optycznego mikroskopu

- Specyfikacje optyczne
- Obliczenia wstępne
- Projektowanie obiektywu: achromatyzacja
- Wybór wstępnych parametrów: promienie, grubości
- OSLO: warunki pracy
- OSLO: ocena jakości
- OSLO: optymalizacja

☐ Specyfikacja:

- powiększenie 5X,
- apertura numeryczna 0.15,
- rozmiar obrazu \varnothing 16 mm,
- wysoka jakość (100 l/mm),
- winietowanie 0.8,
- rodzaj korekcji- aplanat, achromat,
- odległość przedmiot – obraz 189 mm,
- telecentryczność w przestrzeni przedmiotowej

▪ Obliczenia wstępne



Model cienkosoczewkowy obiektywu mikroskopowego - wstępny

Wyniki obliczeń wstępnych z programu GABAR

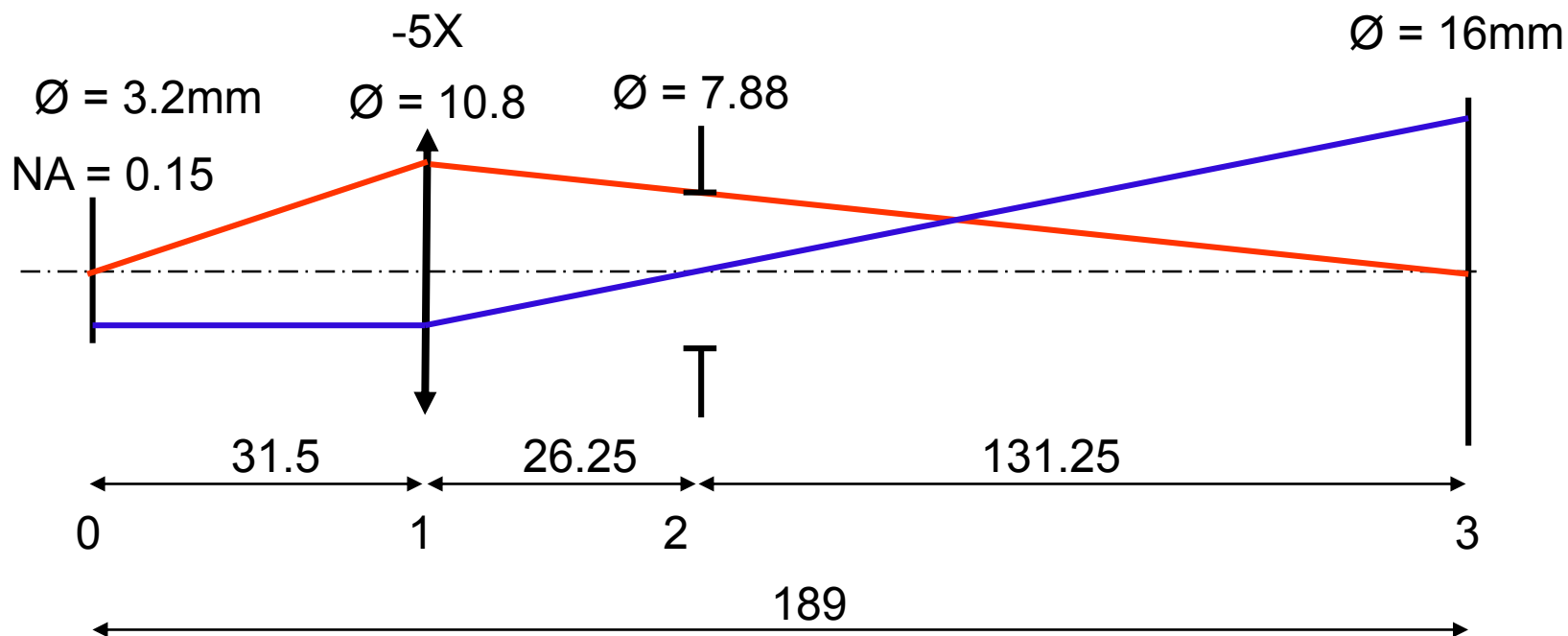
liczba elem.	3
--------------	---

Nr. pow	0	1	2	3
f		26.25	1.00E+20	
d	31.5	26.25	131.25	
H	0	4.725	3.9375	0
Alfa	-0.15	0.03	0.03	
V		-5	1	
L		189	0	
Y	-1.6	-1.6	0	8
Beta	0	-0.06095	-0.060952381	
Q		0	1	
T			0	

Niezmiennik L-H	0.24
-----------------	------



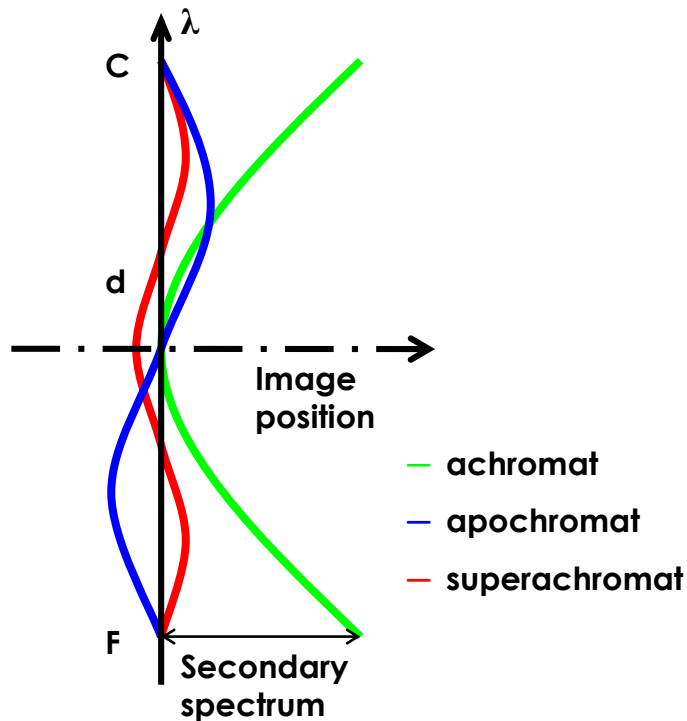
Parametry wejściowe systemu optycznego uwzględniając specyfikację optyczną



Model cienkosoczewkowy obiektywu mikroskopowego - końcowy

■ Projektowanie obiektywu: achromatyzacja

Wymagania dla obiektywu mikroskopu: aberracja chromatyzmu



*Secondary spectrum for various
corrections of chromatic aberrations*

Korekcja podłużnej aberracji chromatycznej dla obszaru przyosiowego

Używamy zależności

$$-\left(\frac{h_p}{h_1}\right)^2 \frac{\Delta s'_p}{s_p'^2} = \sum_{i=1}^p \left(\frac{h_i}{h_1}\right)^2 \frac{D_i}{\nu_i}$$

gdzie:

h – wysokość promienia aperturowego

s' – położenie obrazu

$\Delta s'_p$ – przyosiowa poprzeczna aberracja chromatyczna

D – moc optyczna elementu

ν – dyspersja (liczba Abbego)

$$\nu_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}$$

W tym przypadku aberracja chromatyczna ma być minimalna, $\Delta s'_p = 0$.

Dlatego dla dubletu klejonego dwuelementowego otrzymujemy

$$\frac{D_1}{\nu_1} + \frac{D_2}{\nu_2} = 0$$

Moc dwu cienkich soczewek w tym samym miejscu wyznaczą się z

$$D = D_1 + D_2$$

Układ dwu równań daje rozwiązanie

$$D_1 = \frac{\nu_1}{\nu_1 - \nu_2} \cdot D \qquad D_2 = -\frac{\nu_2}{\nu_1 - \nu_2} \cdot D$$

Dobór szkła

n_d

Współczynnik załamania dla linii d
(żółta linia Helu 587.6 nm)

$$V_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}$$

Liczba Abbego (współczynnik dyspersyjny) gdzie:
 F jest niebieską linią wodoru 486.1 nm,
 C jest czerwoną linią wodoru 656.3 nm

Dwu parametrowy dobór szkieł

Wprowadzając parametr częściowej względnej dyspersji

$$P = \frac{n_F - n_d}{n_F - n_C}$$

i używając liniowy rozkład częściowej dyspersji

$$P = a + bv$$

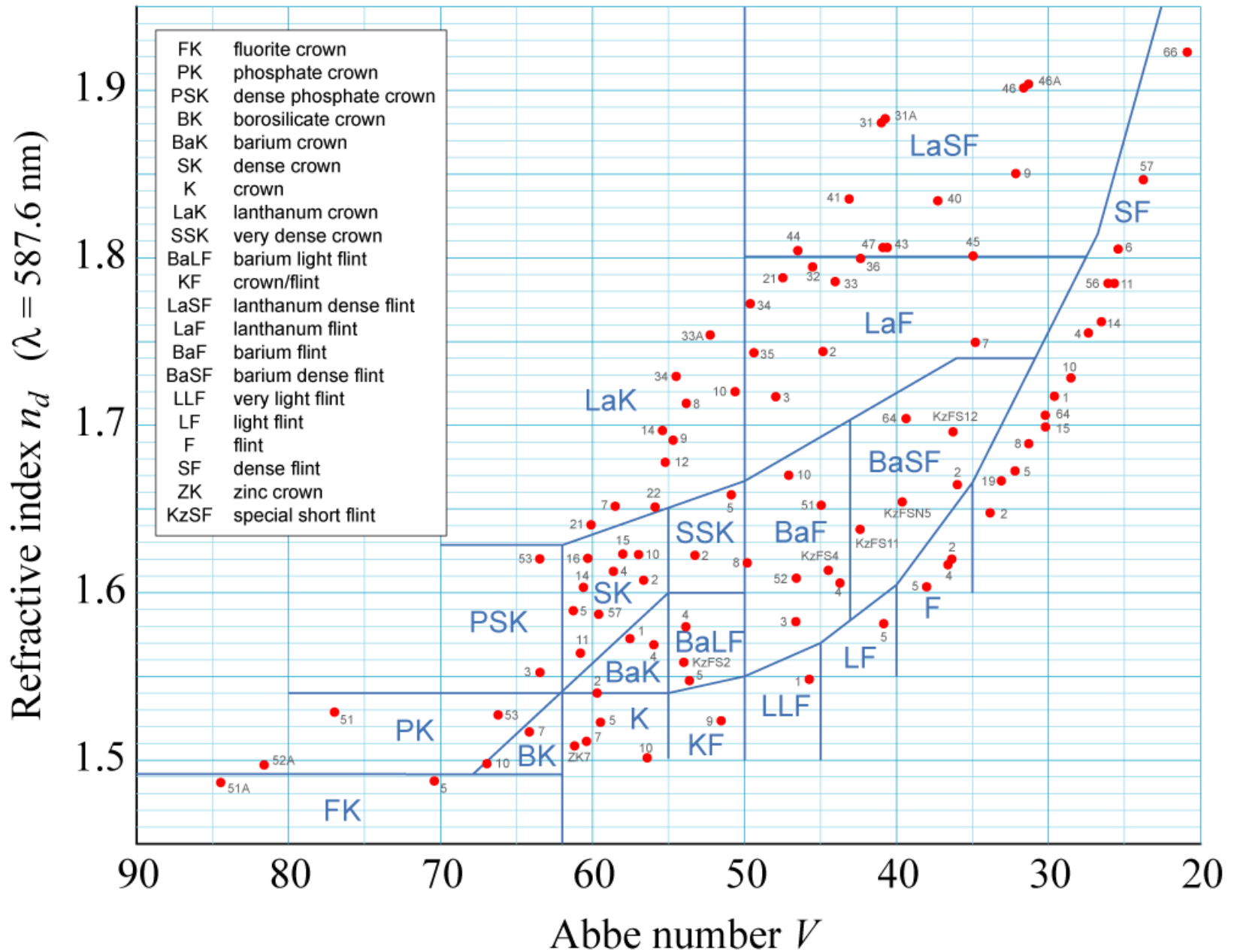
możemy otrzymać parametry dla katalogu Schott'a $a = 0.723$, $b = -.000463$

$$n_d = n_d ,$$

$$n_F = n_d + \frac{n_d - 1}{v_d} P = (1 + b)n + \frac{(n_d - 1)a}{v_d} - b$$

$$n_C = n_d - \frac{n_d - 1}{v} (1 - P) = (1 + b)n_d - \frac{(n_d - 1)(1 - a)}{v_d} - b$$

Abbe Diagram for visible light



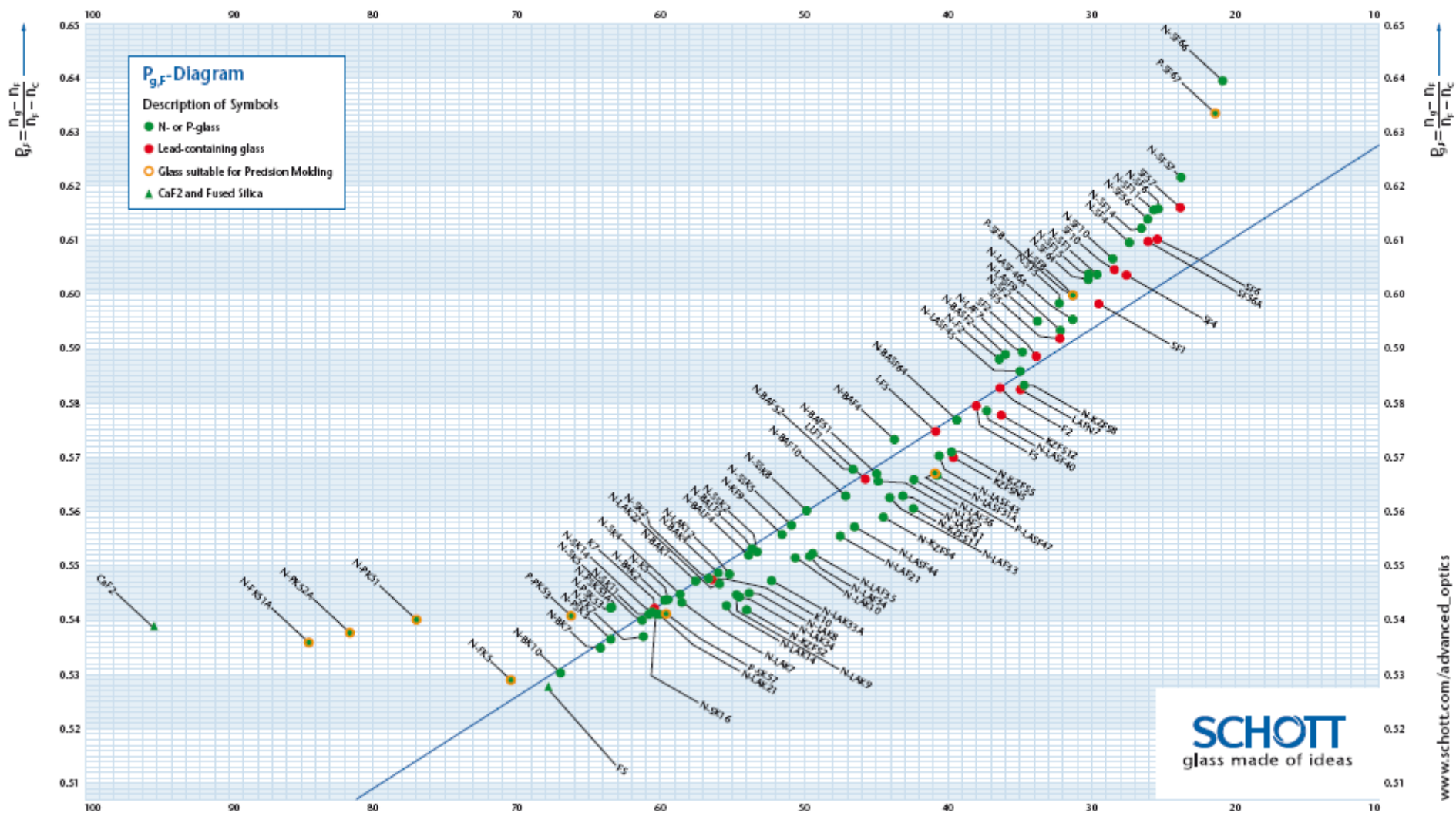


Diagram częściowej dyspersji dla światła widzialnego

$$P = a + bv \quad (a = 0.723, b = -0.000463)$$

Z wykresu Abbego wybieramy szkła BK7 i F2

BK7 $n = 1.5168$ $v = 64.2$

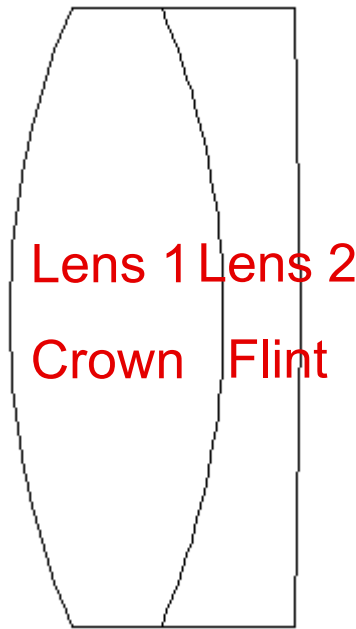
F2 $n = 1.62004$ $v = 36.4$

Dla uzyskania małej mocy soczewek (mniejsze aberracje monochromatyczne) wybieramy szkła rozseparowane na wykresie Abbego (możliwie różne wartości liczby Abbego)

$$D_1 = \frac{v_1}{(v_1 - v_2)f'} = \frac{64.2}{(64.2 - 36.4) \cdot 26.25} = 0.088$$

$$D_2 = -\frac{v_2}{(v_1 - v_2)f'} = -\frac{36.4}{(64.2 - 36.4) \cdot 26.25} = -0.05$$

▪ Wybór wstępnych parametrów: promienie, grubości



Typowy element optyczny
(dublet klejony)

W naszym przypadku startujemy dubletu klejonego:

Soczewka 1: dodatnia symetryczna soczewka o równych promieniach

Soczewka 2: ujemna soczewka płasko wklęsła

Z zależności dla soczewki cienkiej

$$D = (n - 1) \cdot \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \right)$$

Dla soczewki 1 symetrycznej otrzymujemy:

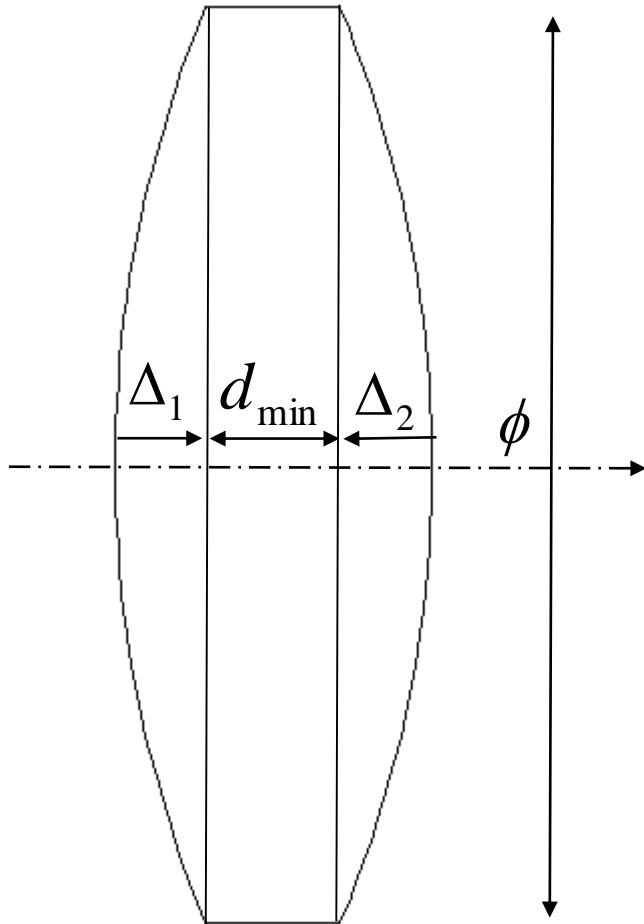
$$r_1 = \frac{2(n_1 - 1)}{D_1} = \frac{2 \cdot 0.5168}{0.088} = 11.75$$

$$r_2 = -11.75$$

Dla soczewki 2 (promień 1 soczewki 2 wynosi -11.75):

$$r_3 = \frac{n_2 - 1}{\frac{n_2 - 1}{r_2} - D_2} = -214.2$$

Dobór grubości



$$\Delta = r - \sqrt{r^2 - \frac{\Phi^2}{4}}$$

Δ - sag

d_{min} – minimalna grubość dla soczewki dodatniej

$$\Delta_1 = 11.75 - \sqrt{11.75^2 - \frac{10.8^2}{4}} = 1.31$$

$$\Delta_2 = -1.31 \quad \Delta_3 = -0.07$$

Dla soczewki dodatniej jej minimalna grubość na brzegu d_{min} - wymaganie technologiczne, dobieramy wg tabeli

Dla ujemnej soczewki grubość osiowa – d_{min} jest również konieczna

<i>Diameter ϕ [mm]</i>		<i>Nominal value of d_{min}</i>
-	10	$d_{min} \geq 0.1 \phi + 0.5$
10	50	$d_{min} \geq 0.05 \phi + 0.5$
50	100	$d_{min} \geq 0.05 \phi$
100	-	$d_{min} \geq (0.05 \div 0.1) \phi$

Grubość soczewki 1:

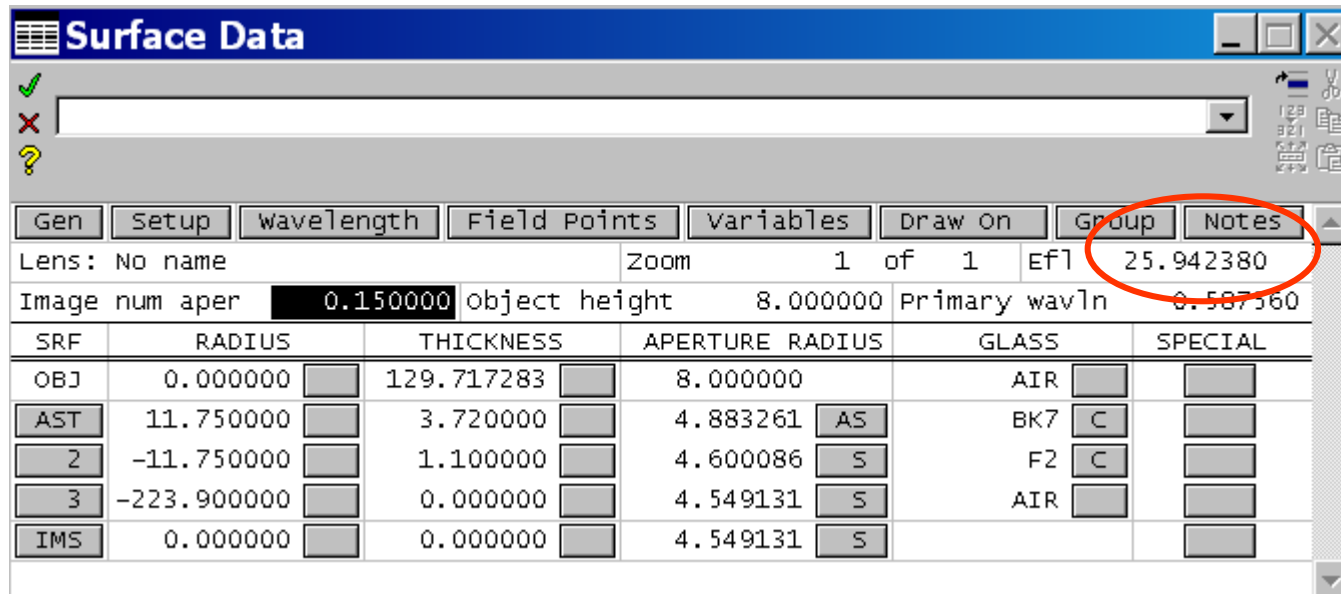
Dla soczewki 1 $\phi = 10.8 \text{ mm}$, minimalna wartość grubości $d_{min} \geq 1.04$, stosujemy $d_{min} = 1.1 \text{ mm}$

grubość 1 = $1.31 + 1.1 + 1.31 = 3.72 \text{ mm}$

Grubość soczewki 2:

Grubość 2 = **1.1**

■ OSLO: warunki pracy



Thin lens value
26.25

Otrzymane w OSLO: krzywizny, grubości, szkła

Uwaga:

- skalujemy soczewkę dla zachowania parafokalności mikroskopu
- używamy układ optyczny pracujący w odwróconej konfiguracji
- dodajemy dodatkową aperturę dla otrzymania telecentrycznego biegu promienia polowego w przestrzeni obrazu (położenie apertury – przedmiot w ogniskowej)

Warunki Pracy:

Otrzymanie telecentrycznego promienia polowego w przestrzeni obrazu poprzez wprowadzenie apertury (apertura wejściowa)

Z ‘*paraxial setup*’ otrzymujemy:

- informację o pozycji PP1:

Srf 1 to prin. pt. 1: -0.336954

odległość przysłony aperturowej od pierwszej powierzchni jest

0.336954 + 26.25 = 26.59

- **Total track length: 188.5**

Oczekiwana wartość 189 mm

Kolejne kroki:

1. Ustawiamy warunki pracy: powiększenie -0.2, NA 0.15,
Wysokość przedmiotu 8
2. Wprowadzenie przysłony aperturowej
3. Przeskalowanie układu przez stałą

$$\frac{189}{188.5}$$

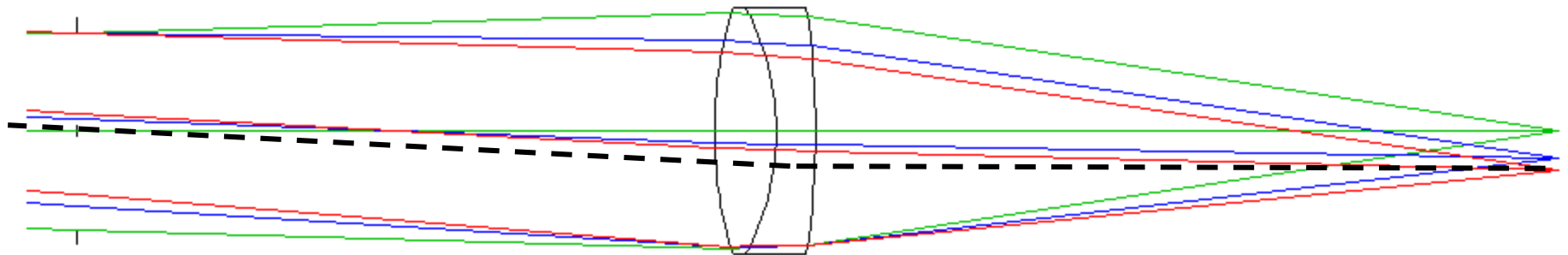
Otrzymujemy system zachowujący parafokalność mikroskopu

Wartość 188.5 uzyskujemy z 'paraxial setup' -> 'Total track length:'

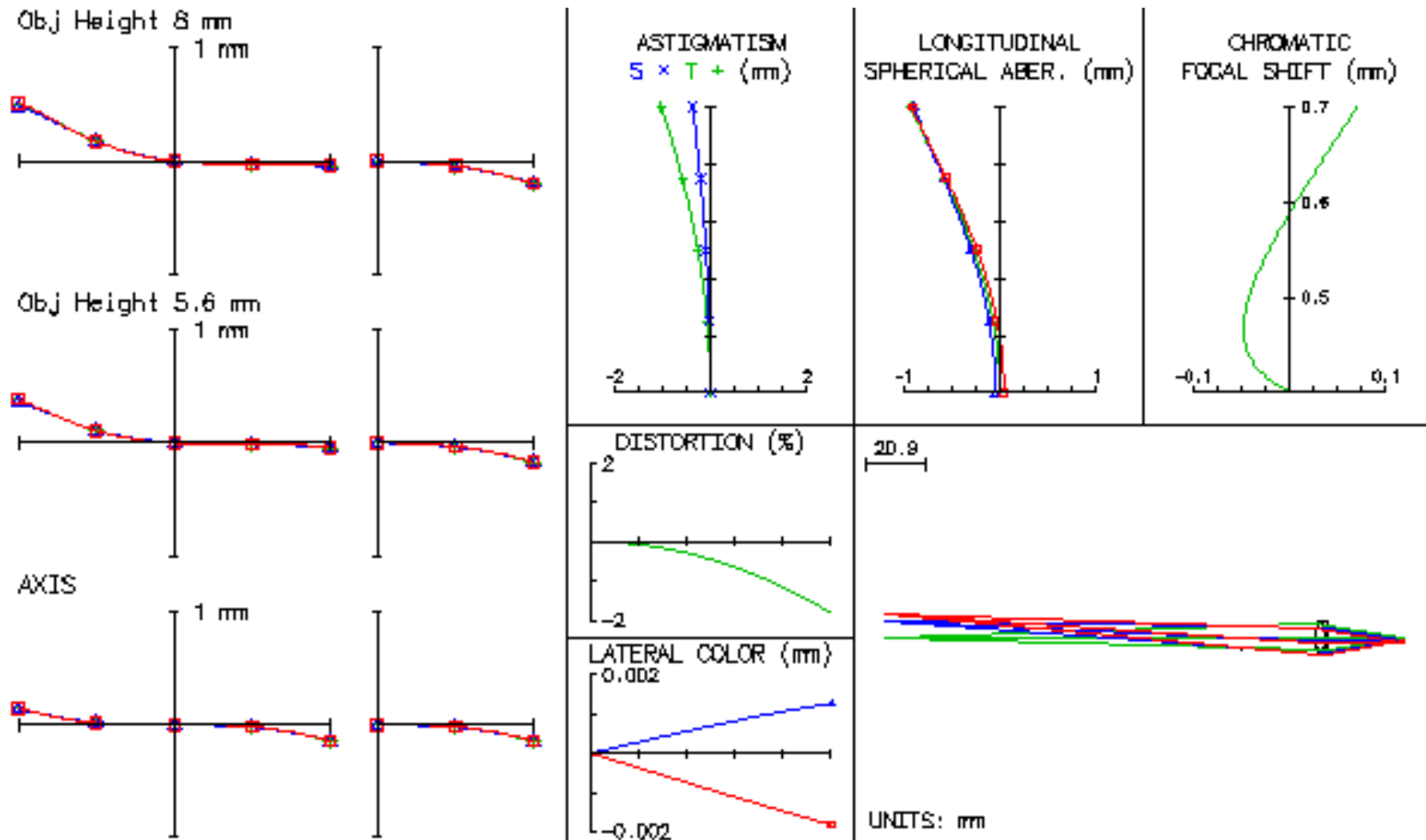
Uzyskany układ optyczny

Lens: No name				Zoom		1 of 1	Efl	25.942380
Image num aper		0.150000	Object height		8.000000	Primary wavln		0.587560
SRF	RADIUS		THICKNESS		APERTURE RADIUS		GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000		129.717283		8.000000		AIR	
AST	0.000000		26.270000		3.893271	AS	AIR	
2	11.750000		3.720000		5.400000		BK7	C
3	-11.750000		1.100000		5.400000	P	F2	C
4	-223.900000		27.695785		5.400000	P	AIR	
IMS	0.000000		0.000000		1.600000	S		

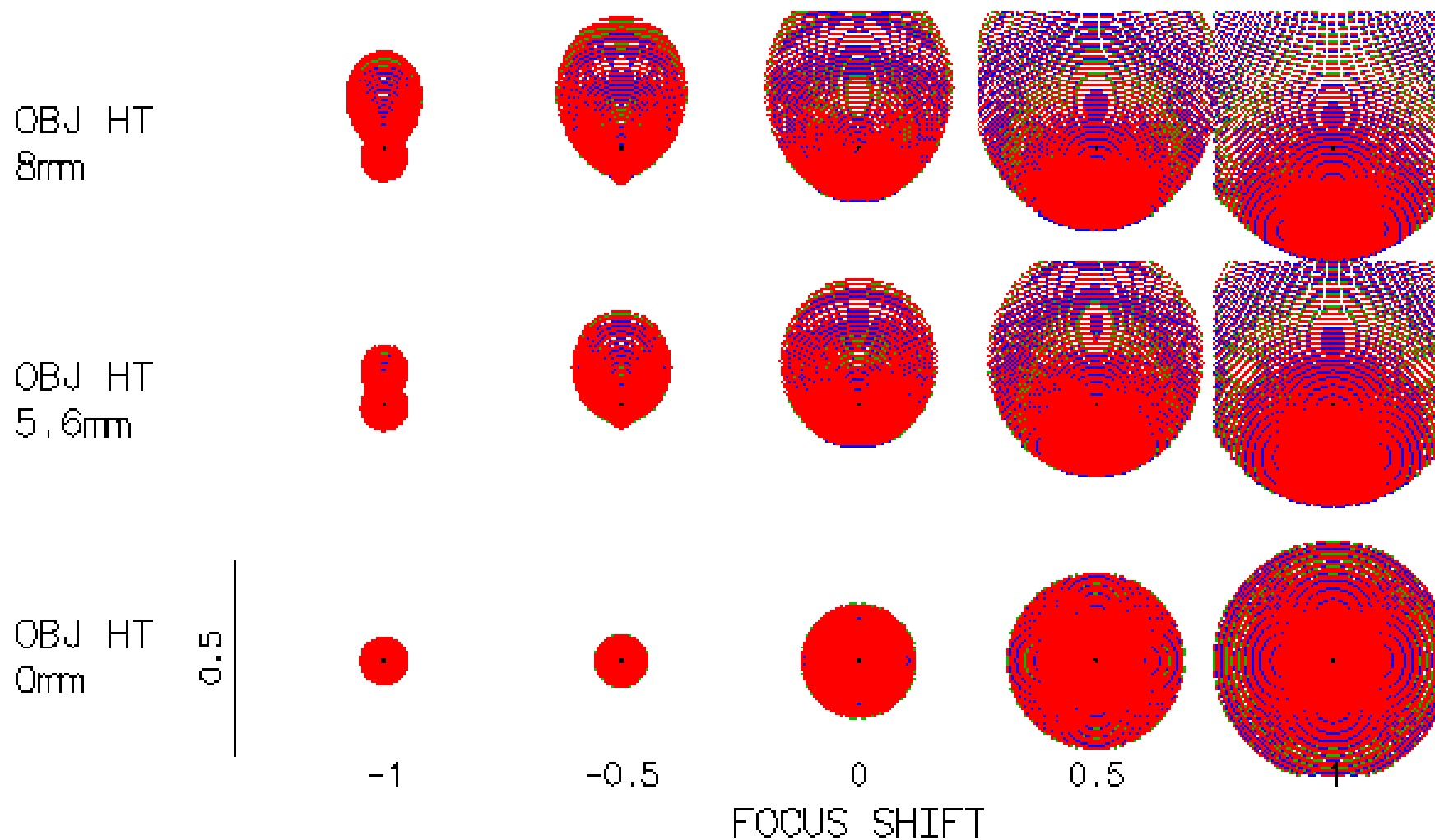
Telecentryczny bieg promienia: promień polowy – – – równoległy do osi optycznej



■ OSLO: ocena jakości dla płaszczyzny Gaussa

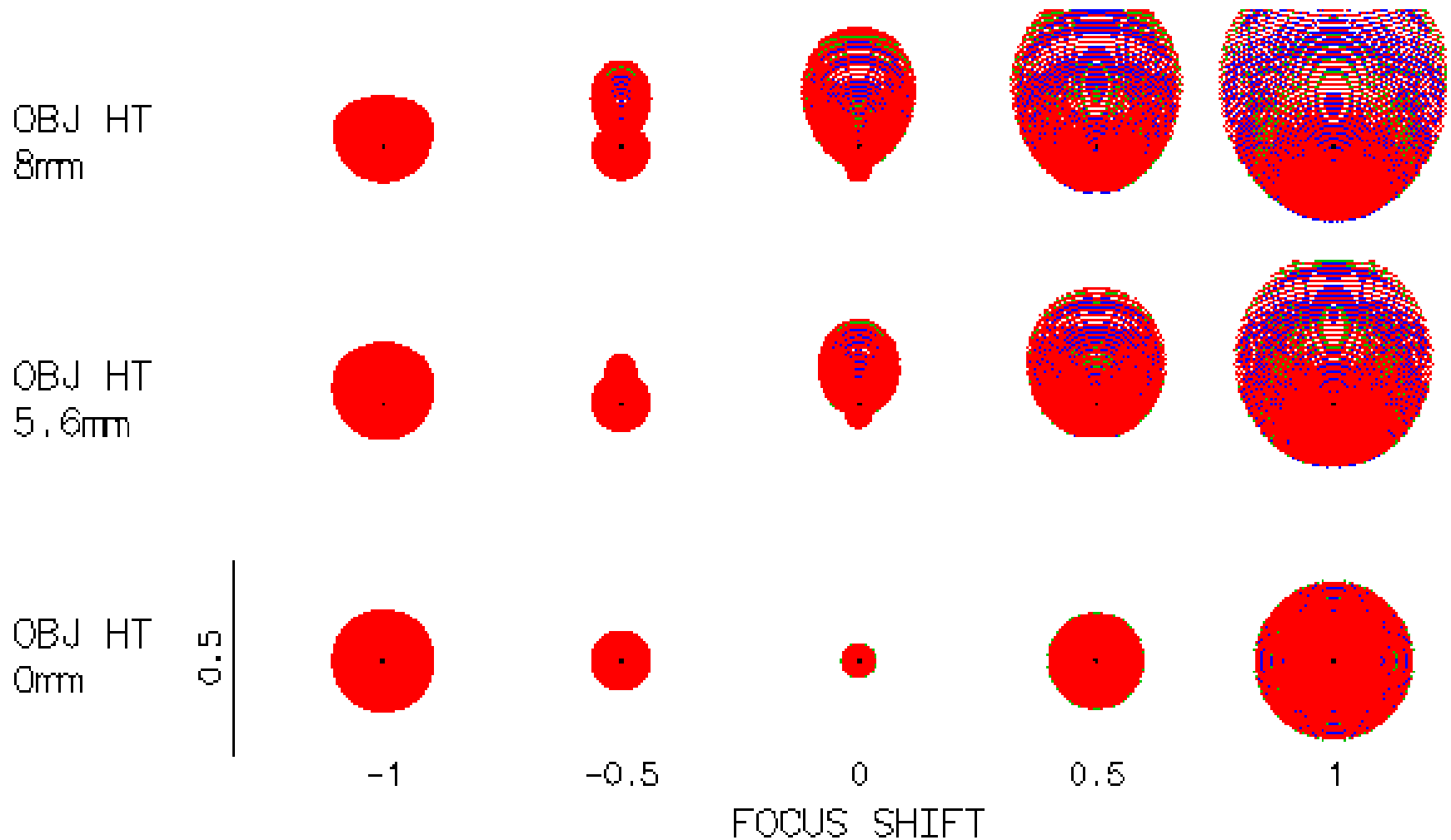


Ray intercept curves Analysis for paraxial focus



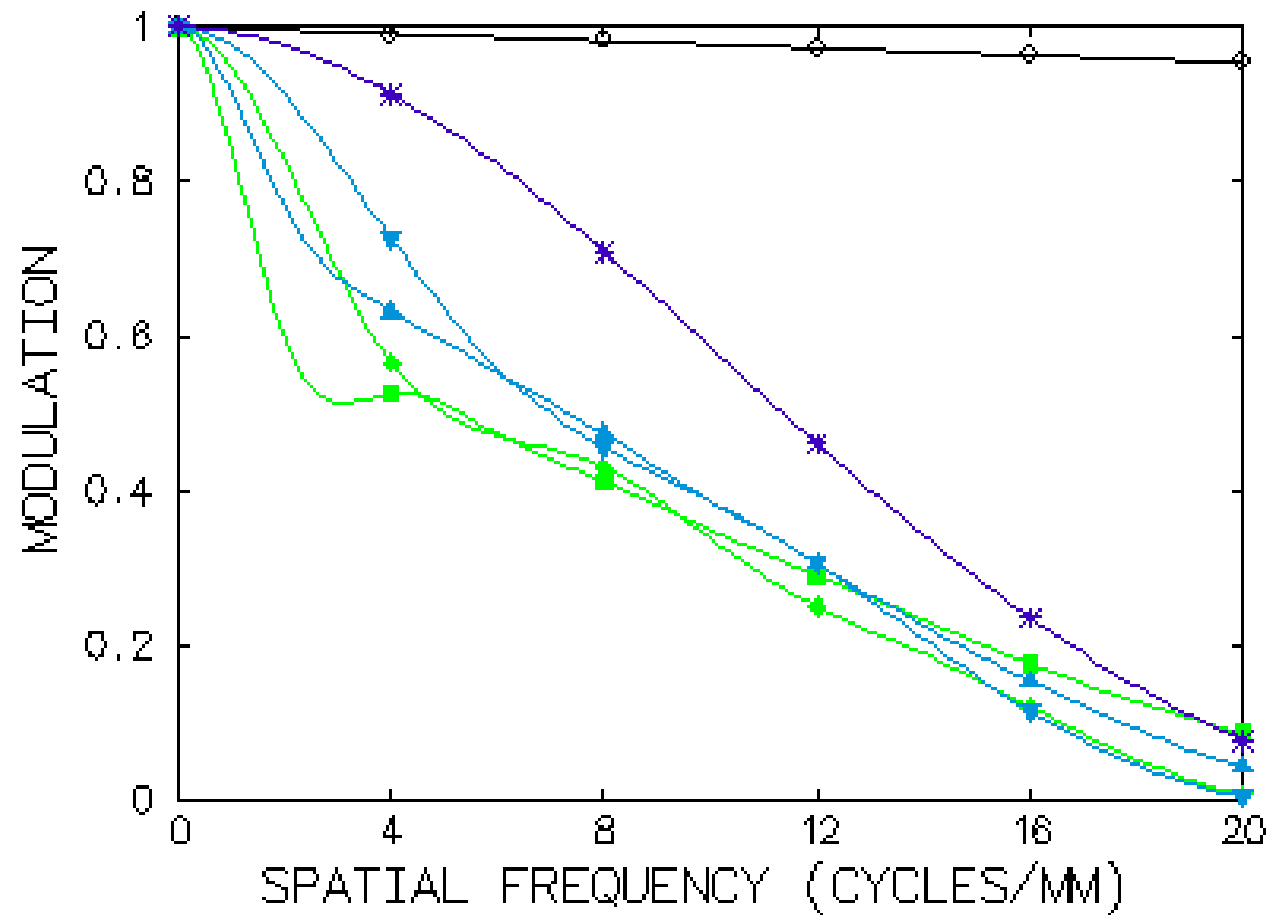
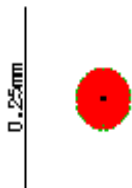
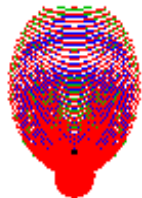
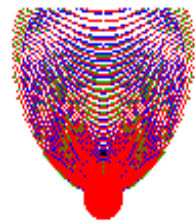
Spot Diagram dla płaszczyzny Gaussa

■ OSLO: optimization



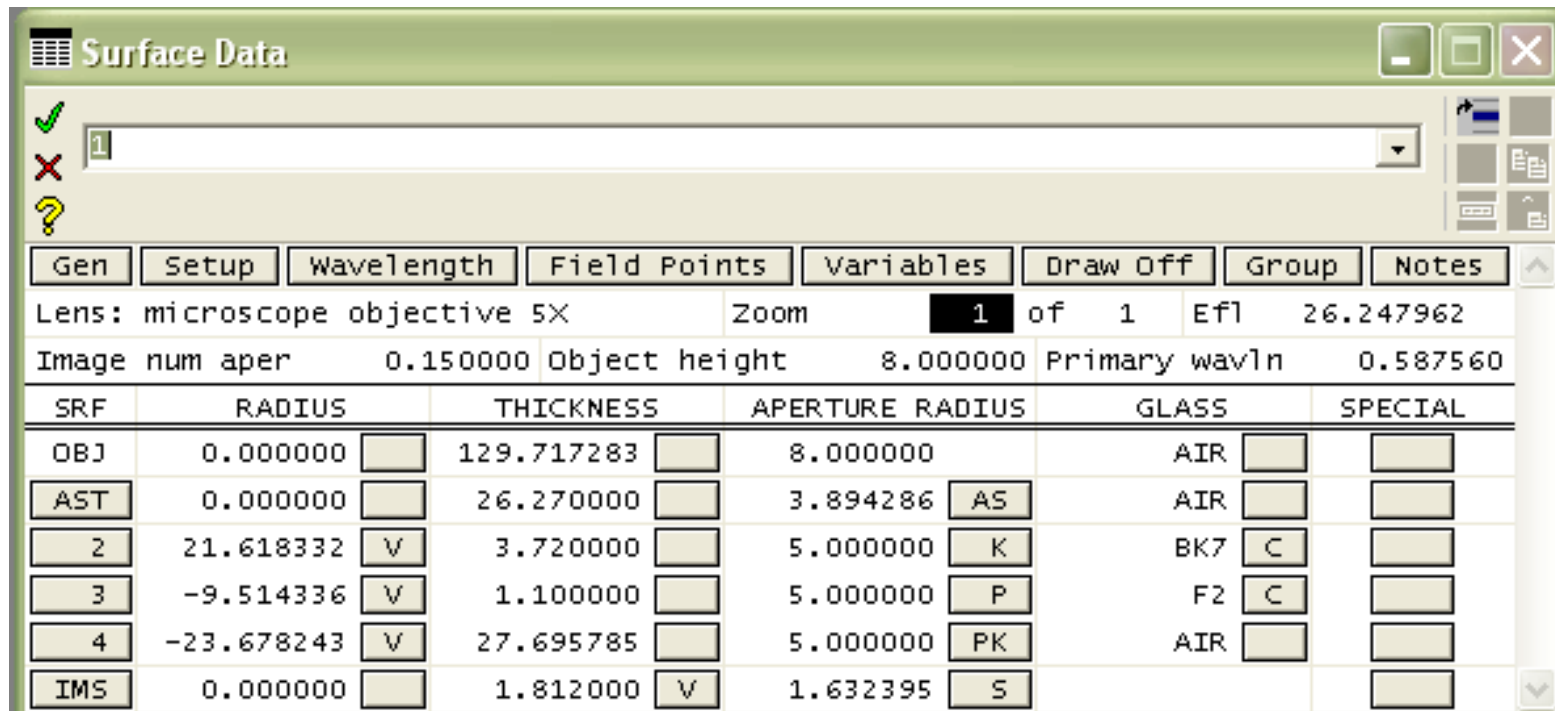
Spot diagramy dla optymalnego defocusu -0.652
(minimum on-axis spot size (polychromatic))

THE[IMS] = -0.652



Spot Diagram Analysis and MTF at optimal defocusing plane -0.652
(minimum on-axis spot size (polychromatic))

■ OSLO: optimization



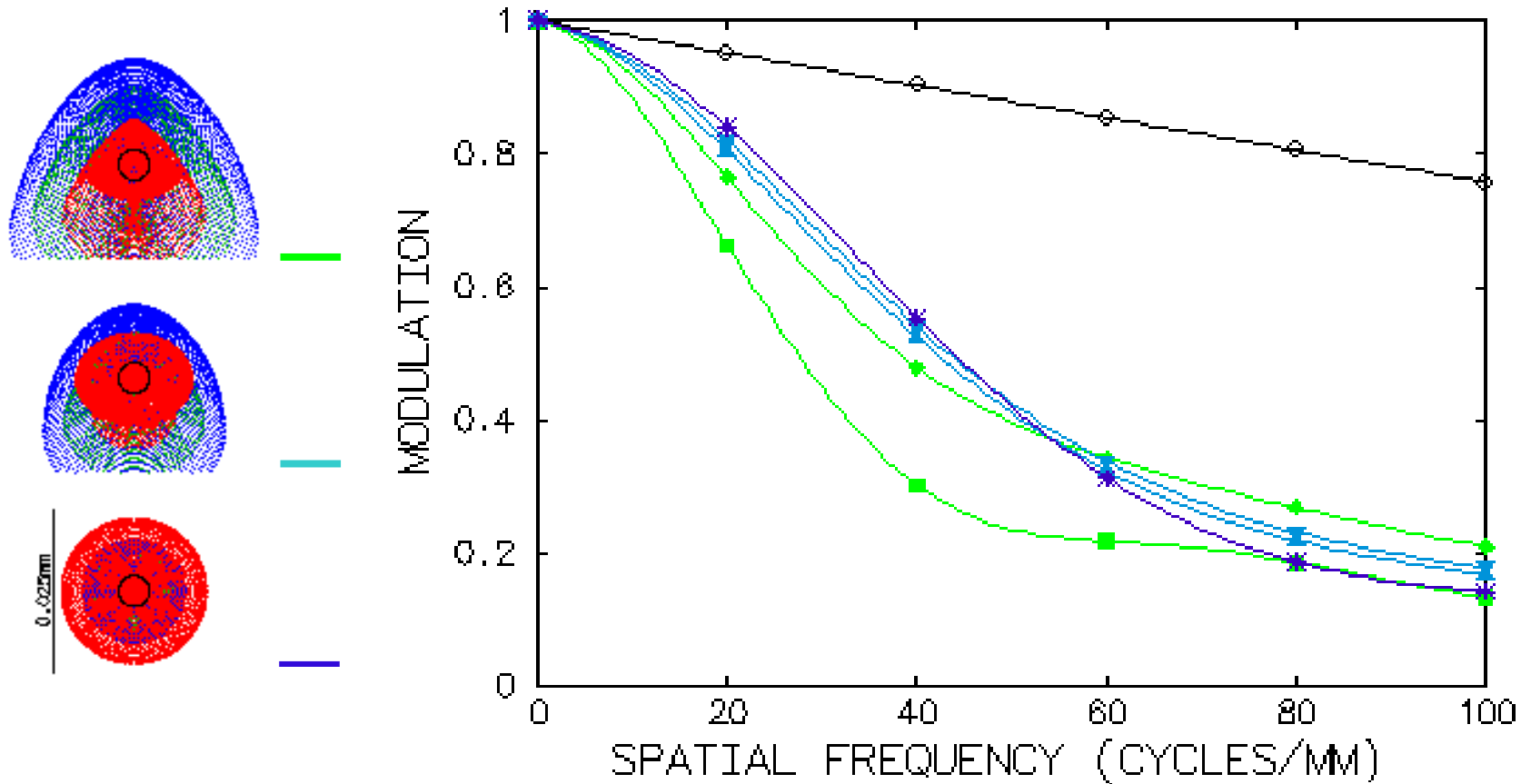
The screenshot shows the 'Surface Data' window in OSLO. At the top, there are icons for a green checkmark, a red X, and a yellow question mark. Below these is a search bar containing the number '1'. To the right of the search bar are icons for a blue square, a red square, and a document icon. Below the search bar is a row of tabs: 'Gen', 'Setup', 'Wavelength', 'Field Points', 'Variables', 'Draw Off', 'Group', and 'Notes'. The 'Gen' tab is selected. Below the tabs, the following parameters are displayed: 'Lens: microscope objective 5X', 'Zoom 1 of 1', 'Efl 26.247962', 'Image num aper 0.150000', 'Object height 8.000000', and 'Primary wavln 0.587560'. Below these parameters is a table with the following columns: 'SRF', 'RADIUS', 'THICKNESS', 'APERTURE RADIUS', 'GLASS', and 'SPECIAL'. The table contains the following data:

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	129.717283	8.000000	AIR	
AST	0.000000	26.270000	3.894286	AIR	AS
2	21.618332	3.720000	5.000000	BK7	K
3	-9.514336	1.100000	5.000000	F2	P
4	-23.678243	27.695785	5.000000	AIR	PK
IMS	0.000000	1.812000	1.632395		S

We apply typical OSLO optimization method:

'Optimize->Generate Error Function->OSLO Spot Size/Wave Front' with addition of operand controlling EFL

$$\text{THEIMS} = 1.81$$



Spot Diagram i MTF po optymalizacji

Końcowy efekt achromatyzacji obiektywu
mikroskopowego 5x. Czarny okrąg oznacza plamkę Airy

