

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra optiky



Bakalářská práce

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra optiky

**Využití interferometru ke kontrole optických
vlastností astronomických dalekohledů**

Bakalářská práce

Zdeňka Kodytková

Studijní obor: Digitální a přístrojová optika

Forma: Prezenční

Olomouc 2022

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Řehoř, Ph.D.

Abstrakt

Práce je zaměřena na výběr a ověření vhodné metody pro vyhodnocení optických a mechanických vlastností astronomických dalekohledů. Metoda je zvolena tak, aby umožňovala realizaci kontrolního měření bez nutnosti demontáže dalekohledu či jeho skupin. Jádrem práce je určení kvality dalekohledu a zkoumání vlivu mechanických nedokonalostí dalekohledu na výslednou kvalitu obrazu, se zaměřením na mechanickou realizaci fokuséru dalekohledu.

Abstract

The work is focused on the selection and verification of a suitable method for evaluating the optical and mechanical properties of astronomical telescopes. The method is chosen to enable the implementation of control measurements without the need to disassemble the telescope or its groups. The core of the work is to determine the quality of the telescope and to examine the influence of mechanical imperfections of the telescope on the resulting image quality, focusing on the mechanical implementation of the telescope focuser.

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI
Přírodovědecká fakulta
Akademický rok: 2020/2021

Studijní program: Digitální a přístrojová optika
Forma studia: Prezenční
Specializace/kombinace: Digitální a přístrojová optika (DPO)

Podklad pro zadání BAKALÁŘSKÉ práce studenta

Jméno a příjmení: **Zdeňka KODYTKOVÁ**
Osobní číslo: **R19239**
Adresa: **Droždínská 30, Bystrovany, 77900 Olomouc 9, Česká republika**
Téma práce: **Využití interferometru ke kontrole optických vlastností astronomických dalekohledů**
Téma práce anglicky: **Application of an interferometer to control optical features of an astronomical telescopes**
Vedoucí práce: **Ing. Zdeněk Řehoř, Ph.D.**
Katedra optiky

Zásady pro vypracování:

Dalekohledy s většími aperturami, s ohledem na mechanické rozměry, je vhodné testovat osazené v tubusu přístroje současně s ostatními optickými členy tvořícími optickou soustavu, tj. bez demontáže.

Cílem práce je:

- 1. Provést rozbor možných konstrukcí interferometru a vhodných měřících metod.*
- 2. Navrhnout konstrukci interferometru vhodného pro tato měření.*
- 3. Ověřit vybranou měřící metodu.*

Seznam doporučené literatury:

Daniel Malacara, Optical Shop Testing, Third edition (2006)
Zdeněk Řehoř, Praktická astronomická optika (2005)

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Využití interferometru ke kontrole optických vlastností astronomických dalekohledů“ vypracovala samostatně a použila jen prameny uvedené v seznamu literatury.

V Olomouci dne 09.05.2022

.....

Zdeňka Kodytková

Poděkování

Chtěla bych poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Zdeňku Řehořovi, Ph.D. za velmi vstřícný přístup, ochotu a cenné rady, které mi při psaní pomohly.

Obsah

Seznam používaných symbolů a zkratk.....	2
Úvod.....	3
Teoretická část.....	4
1. Obecný úvod do problematiky	4
1.1. Interferenční metody	5
1.1.1. Popis interferenčního obrazce a vyhodnocení vlnoplochy	6
1.1.2. Interferometry	11
1.1.3. Bathův interferometr.....	13
Experimentální část	18
2. Popis měření a jeho vyhodnocení.....	18
2.1. Měřicí sestava.....	18
2.2. Popis měření.....	20
2.3. Měření kvality optického systému	24
2.4. Vliv vyosení fokuséru	27
2.5. Měření vyosení fokuséru.....	32
Závěr.....	37
Citovaná literatura	38
Seznam příloh.....	39

Seznam používaných symbolů a zkratek

OPD	Optical path difference
RMS	Root mean square
SR	Strehl ratio
α	Korekční úhel
d	Vzdálenost osy měřícího a referenčního svazku
D	Průměr apertury testovaného dalekohledu
$\gamma_{12}(\tau)$	Stupeň koherence
δ	Chybový úhel
Δ	Změna optické dráhy
f	Ohnisková vzdálenost
Φ	Fázový rozdíl
I	Intenzita
K	Kontrast
l	Dráhový rozdíl
λ	Vlnová délka
R	Dvojnásobek ohniskové vzdálenosti
u	Délka konstrukční báze fokuséru
Z_n^m	Zernikeho polynomy

Úvod

Dalekohledy patří v astronomii mezi jedny z nejpoužívanějších optických přístrojů. Mezi významné funkce dalekohledů se řadí zvětšení rozlišovací schopnosti oka pozorovatele (častěji CCD kamery) a optický zisk. Výsledná kvalita dalekohledu je ovlivněna optickými aberacemi, způsobujícími zhoršení kvality pozorovaného obrazu oproti jeho ideálnímu obrazu.

Kromě optických aberací má na výsledné kvalitě dalekohledu podíl i jeho mechanické řešení, zejména pak výběr použitých materiálů nebo způsob uložení prvků. Vlivem mechanických nedokonalostí dochází k deformacím mechanické konstrukce, které je obtížné minimalizovat. Příkladem může být průhyb tubusu projevující se převážně u výkonných astronomických dalekohledů, u kterých je z důvodů odlehčení konstrukce často nutné poddimenzování mechanické konstrukce. To má za následek průhyb tubusu zatíženého velkým primárním zrcadlem v objímce a tím i zhoršení kvality výsledného obrazu. Obdobným způsobem se zhoršuje kvalita zorného pole v závislosti na způsobu mechanické realizace fokuséru nebo uložení primárního zrcadla u některých optických konstrukcí dalekohledu (např. Schmidt-Cassegrain).

Cílem práce je ověřit metodu umožňující kontrolu kvality optických systémů a vlastností jejich mechanické konstrukce. Metoda je zvolena tak, aby umožňovala realizaci kontrolního měření bez nutnosti demontáže dalekohledu či jeho skupin.

V první části práce je vybrána vhodná metoda měření a jsou zde zhodnoceny její možnosti. Současně je v této části popsán princip zvolené metody a vybraného interferometru.

Druhá část práce je věnována ověření vybrané experimentální metody. Zaměřuje se na stanovení kvality optické soustavy dalekohledu pomocí, v první části, vybraného interferometru a zkoumání vlivu mechanické realizace fokuséru na výslednou kvalitu obrazu.

Teoretická část

1. Obecný úvod do problematiky

Je obecně platné, že optické přístroje jsou zatíženy optickými a mechanickými vadami. Optické aberace způsobují zhoršení kvality pozorovaného obrazu. Vady zobrazení lze rozdělit na aberace chromatické (barevná vada polohy a velikosti) a aberace monochromatické. Monochromatické aberace vznikají při zobrazování bodu světlem o jedné vlnové délce a rozdělují se na vady osového svazku (sférická aberace) a na vady mimoosového svazku (koma, zklenutí, astigmatismus, zkreslení) [6].

Mezi mechanické nedokonalosti optického přístroje se řadí chyby způsobené špatným usazením komponent či jeho funkčních částí nebo projev chyb při užívání přístroje. Příkladem může být omezená tuhost tubusu dalekohledu, která s ohledem na proměnný náklon tubusu během pozorování, má i úhlově závislé zatížení. Z toho vyplývají proměnné deformace tubusu a tím i růst rizika zhoršení kvality obrazu během pozorování objektů. Mezi další patří např. vznik vůlí při mechanickém upevnění komponent (např. vyosení fokuséru) nebo při pohybu funkčních komponent vůči sobě (např. derotátor zorného pole).

Výslednou kvalitu dalekohledu lze určit pomocí velkého množství metod, které se volí na základě celé řady kritérií (požadavků na přesnost, ekonomických a fyzikálních omezení atd.). Při určování velikostí optických aberací jsou u astronomických dalekohledů výhodné a v praxi často používané metody ze skupiny projekčních testů, kam se řadí Foucaultův test a test na hvězdu, nebo ze skupiny maskových testů, kde se mezi nejznámější řadí Hartmanova maska. Jedná se o masku s řadou otvorů umístěnou v blízkosti vstupní pupily testovaného systému. Nejčastěji používaná maska je složena z obdélníkového pole otvorů s jedním otvorem uprostřed [4]. Zmíněné metody jsou poměrně rychlé a jednoduché pro měření optických aberací, ale naprosto nedostačující pro měření nedokonalostí mechanické konstrukce přístrojů. Pro taková měření je nejvhodnější použít interferometrické metody, pomocí kterých lze snadno vyhodnotit optické i mechanické vady přístroje.

1.1. Interferenční metody

Interference světla je souhrn jevů související se skládáním světla, přesněji řečeno dvou a více vln. Je výsledkem principu superpozice světla a projevem vlnové podstaty světla. K tomu, aby nastala pozorovatelná interference musí být skládající se vlny koherentní o stejné frekvenci. Důsledkem interference vznikají v oblasti překrytí svazků světlé (konstruktivní interference) a tmavé proužky (destruktivní interference). Výslednou intenzitu interferenčních proužků lze vyjádřit dle interferenčního zákona [1]:

$$I(P) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{12}(\tau)| \cos(\Phi_{12}), \quad (1)$$

kde $I(P)$ je hodnota výsledné intenzity, I_1 a I_2 jsou intenzity skládaných svazků, $\gamma_{12}(\tau)$ určuje stupeň koherence (v ideálním případě roven jedné) a Φ_{12} popisuje fázový rozdíl vln. Při použití interferometrů lze tento vztah zjednodušit na tvar:

$$I(P) = 2I \cdot (1 + |\gamma_{12}(\tau)| \cos(\Phi_{12})); \quad (2)$$

při zavedení zjednodušení $I = I_1 = I_2$ použitím děliče svazku paprsků v poměru 1:1. Pokud paprsky neprojdou stejnou dráhou, zavádí se dráhový rozdíl ve tvaru:

$$\Phi_{12} = 2\pi \frac{l}{\lambda}, \quad (3)$$

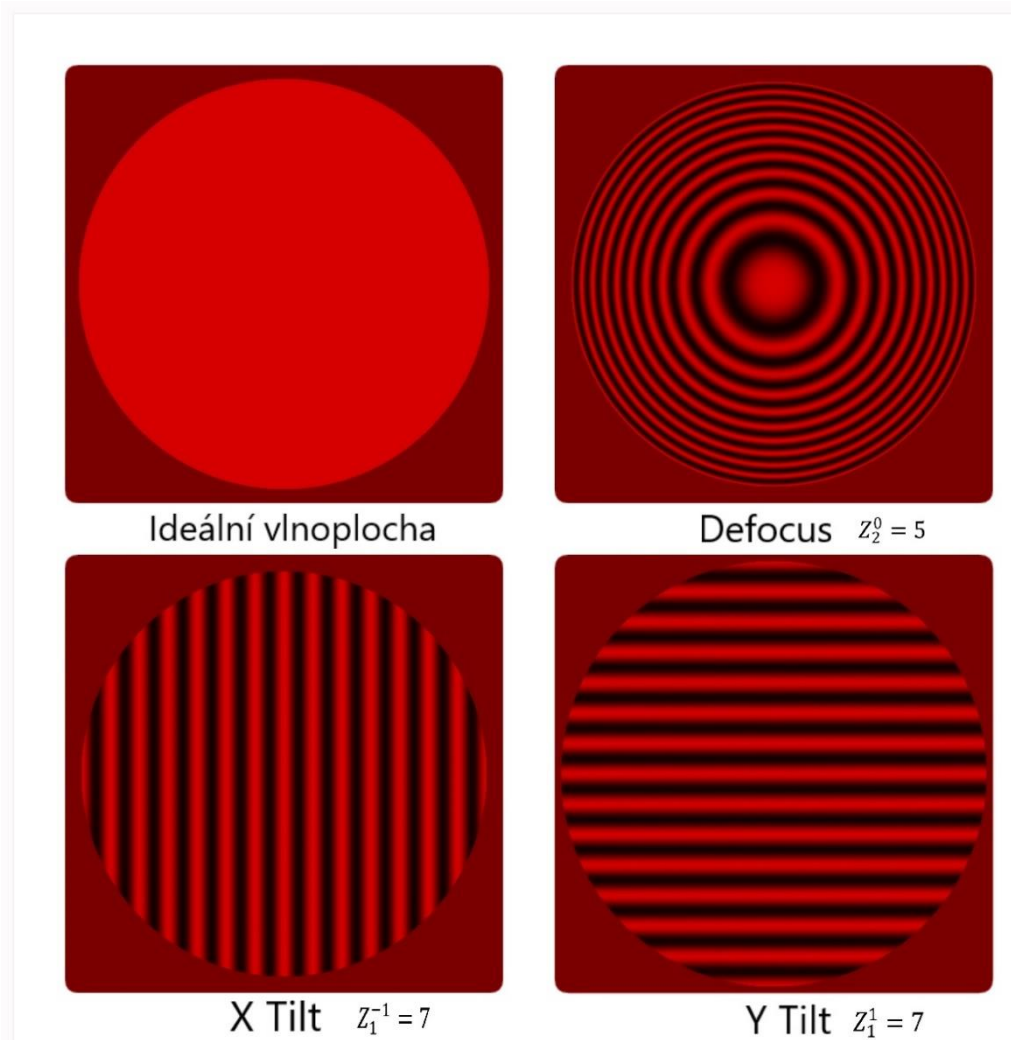
kde λ je vlnová délka světla a l označuje dráhový rozdíl. Pro výpočet kontrastu K interferenčního obrazce (jeho vizibility) se vychází ze vzorce:

$$K = \frac{I_{\text{MAX}} - I_{\text{MIN}}}{I_{\text{MAX}} + I_{\text{MIN}}}, \quad (4)$$

s označením maximální intenzity I_{MAX} a minimální intenzity I_{MIN} .

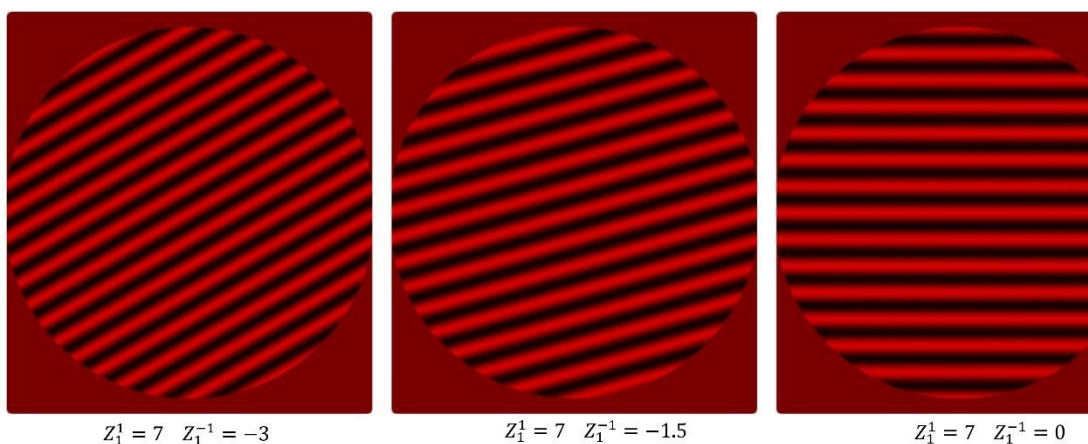
1.1.1. Popis interferenčního obrazce a vyhodnocení vlnoplochy

Vlastnosti vlnoplochy jsou určovány z interferenčního obrazce. Vlnoplocha, do které není zanesena žádná aberace má ideální interferenční obrazec, v němž nepozorujeme žádné deformace (např. rozšíření či zakřivení průběhu proužků). V praxi je tento stav nedosažitelný už jen z důvodu, že nelze vyrobit dokonalou optickou plochu. Na obr. 1 jsou vyobrazené příklady interferogramů pro bezaberační vlnoplochu (ideální vlnoplocha v rovině zobrazení bez tiltu) a vlnoplochy zatížené náklonem optické osy (dále jen tilt) a posunem projekční roviny od roviny zobrazení (dále jen defocus) [4].

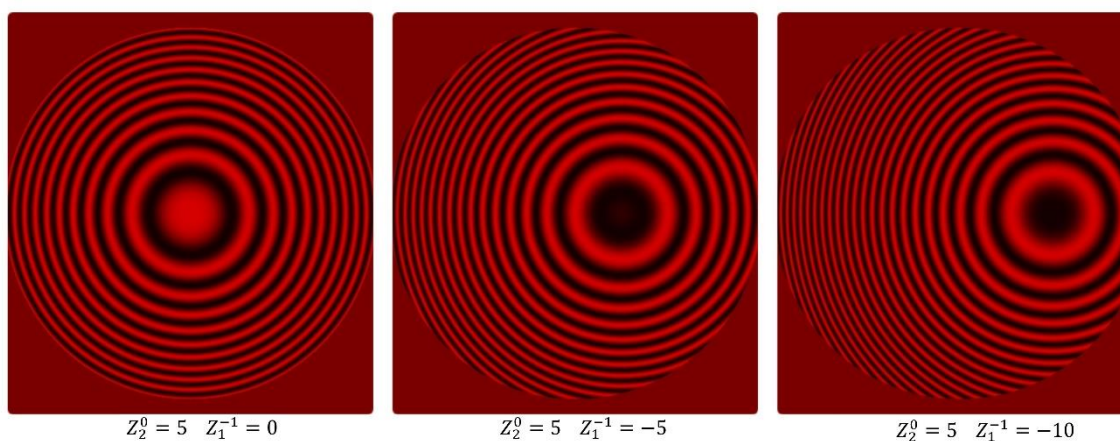


Obr. 1: Simulované interferogramy pro ideální vlnoplochu, defocus a tilt

Při změně hodnoty náklonu (Tilt) pozorujeme na interferenčních obrazcích obr. 2 změnu směru chodu interferenčních proužků. Při pozorování na interferenčních kroužcích obr. 3 je viditelný posun středu kroužků. Směr posunu závisí na hodnotě X a Y Tiltu. V obou případech je hodnota Y Tilt konstantní a mění se hodnota X Tilt. Vyobrazené simulace na obr. 1, obr. 2 a obr. 3 byly prováděny v programu DFTFringe.



Obr. 2: Simulace změny náklonu proužků při změně X Tilt a konstantní Y Tilt



Obr. 3: Simulace posunu středu při změně X Tilt a konstantní hodnotě defocusu

Interferenční obrazec vzhledem k základním aberacím můžeme popsat Kingslakeho funkcí ve tvaru [4]:

$$OPD = A + Bx + Cy + D(x^2 + y^2) + E(x^2 + 3y^2) + Fy(x^2 + y^2) + G(x^2 + y^2)^2, \quad (5)$$

kde koeficienty reprezentují optické aberace:

- A Constant (piston) term
- B Náklon kolem osy y (Y Tilt)
- C Náklon kolem osy x (X Tilt)
- D Rozostření (Defocus)
- E Sagitální astigmatismus podél osy y
- F Sagitální koma podél osy y
- G Sférická aberace

OPD Optical path difference

Tato aproximace prezentuje výslednou vlnoplochu vzhledem k základním aberacím a jedná se, tak o lehkou a intuitivní analýzu interferenčního obrazce. To není vždy dostatečné, a proto je výsledná vlnoplocha popisována pomocí Zernikeho polynomiálního rozvoje v kartézských souřadnicích ve tvaru [4]:

$$\begin{aligned} OPD = & Z_0^0 + Z_1^{-1}x + Z_1^1y + Z_2^0(x^2 + y^2 - 0.5) + Z_2^{-2}xy + Z_2^2(x^2 - y^2) + \\ & Z_3^1y(3x^2 + 3y^2 - 2) + Z_3^{-1}x(3x^2 + 3y^2 - 2) + Z_3^3y(3x^2 - y^2) + \\ & Z_3^{-3}x(x^2 - 3y^2) + Z_4^0[6(x^2 + y^2)^2 + 6(x^2 + y^2) + 1] + Z_4^2(x^2 - y^2)(4x^2 + \\ & 4y^2 - 3) + Z_4^{-2}2xy(4x^2 + 4y^2 - 3) + Z_4^4[(x^2 - y^2)^2 - 8x^2y^2] + \\ & Z_4^{-4}4xy(x^2 - y^2); \end{aligned} \quad (6)$$

kde Z_n^m jsou Zernikeho koeficienty definované v tab. 1. Tento způsob popisu vlnoplochy je vhodný i pro vyjádření vlivu mechanických nedokonalostí na kvalitu výsledného obrazu. V tomto případě nás zajímají zejména hodnoty pro výpočet X a Y Tiltu pomocí Zernikeho polynomu.

Vzorec pro výpočet hodnoty X Tiltu pomocí:

$$Z_1^{-1} = 2 \cdot \rho \cdot \cos \theta , \quad (7)$$

kde Z_1^{-1} značí hodnotu X Tiltu. Vzorec je uveden v polárních souřadnicích ρ a θ . Obdobným způsobem je definován vzorec pro výpočet hodnoty Y Tiltu Z_1^1 :

$$Z_1^1 = 2 \cdot \rho \cdot \sin \theta . \quad (8)$$

Kromě vyhodnocení velikostí samotných optických aberací lze popsat danou vlnoplochu pomocí číselných kritérií např. PV (Peak-to-Valley), RMS (Root-Mean-Square), SR (Strehl-Ratio).

Nejintuitivnější popis kvality vlnoplochy je pomocí SR kritéria, které uvádí míru optické dokonalosti optické soustavy. Ideální optická soustava by měla SR koeficient roven jedné, výtečné optické soustavy mají SR lepší než 0,95. Pro velmi dobré optické soustavy je SR rovno minimálně 0,9 a dobré optické soustavy mají SR minimálně 0,8, což je mez Rayleighho kritéria (soustava je na mezi teoretických možností).

Menší hodnota koeficientu SR než 0,8 je u soustav, ve kterých se již mohou stále výrazněji projevovat optické aberace. Koeficient SR lze snadno určit pomocí interferometrických metod, popřípadě pro velké hodnoty koeficientu SR lze použít vztah (9) za předpokladu normálního rozložení poruch vlnoploch [6].

$$SR = 1 - (2 \cdot \pi \cdot RMS)^2 . \quad (9)$$

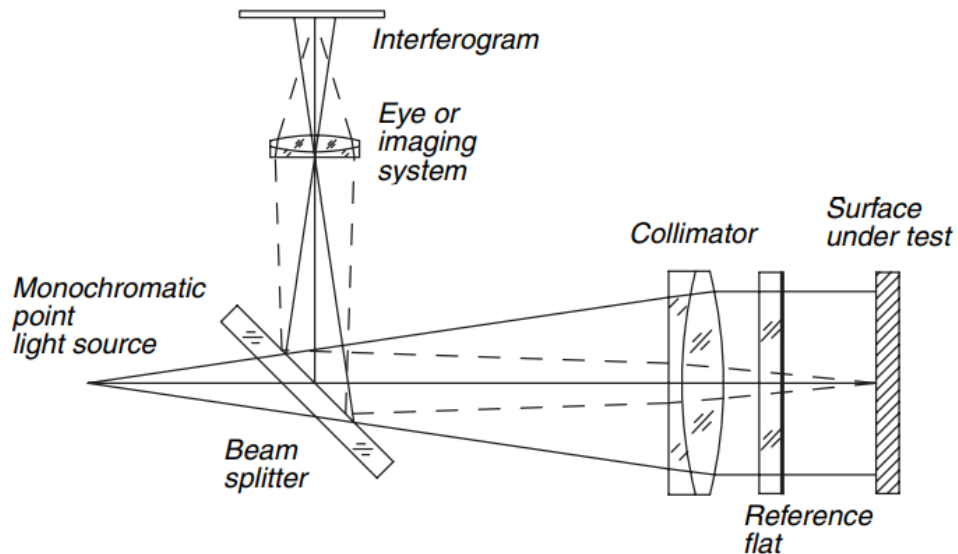
Tab. 1: Zernikeho polynomy [4]

1	0	0	1	Piston
2	1	1	$2\rho \cos \theta$	x tilt
3	1	1	$2\rho \sin \theta$	y tilt
4	2	0	$\sqrt{3}(2\rho^2 - 1)$	Defocus
5	2	2	$\sqrt{6}\rho^2 \sin 2\theta$	Primary astigmatism at 45°
6	2	2	$\sqrt{6}\rho^2 \cos 2\theta$	Primary astigmatism at 0°
7	3	1	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho) \sin \theta$	Primary y coma
8	3	1	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho) \cos \theta$	Primary x coma
9	3	3	$\sqrt{8}\rho^3 \sin 3\theta$	
10	3	3	$\sqrt{8}\rho^3 \cos 3\theta$	
11	4	0	$\sqrt{5}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	Primary spherical
12	4	2	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2) \cos 2\theta$	Secondary astigmatism at 0°
13	4	2	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2) \sin 2\theta$	Secondary astigmatism at 45°
14	4	4	$\sqrt{10}\rho^4 \cos 4\theta$	
15	4	4	$\sqrt{10}\rho^4 \sin 4\theta$	
16	5	1	$\sqrt{12}(10\rho^5 - 12\rho^3 + 3\rho) \cos \theta$	Secondary x coma
17	5	1	$\sqrt{12}(10\rho^5 - 12\rho^3 + 3\rho) \sin \theta$	Secondary y coma
18	5	3	$\sqrt{12}(5\rho^5 - 4\rho^3) \cos 3\theta$	
19	5	3	$\sqrt{12}(5\rho^5 - 4\rho^3) \sin 3\theta$	
20	5	5	$\sqrt{12}\rho^5 \cos 5\theta$	
21	5	5	$\sqrt{12}\rho^5 \sin 5\theta$	
22	6	0	$\sqrt{7}(20\rho^6 - 30\rho^4 + 12\rho^2 - 1)$	Secondary spherical
23	6	2	$\sqrt{14}(15\rho^6 - 20\rho^4 + 6\rho^2) \sin 2\theta$	Tertiary astigmatism at 45°
24	6	2	$\sqrt{14}(15\rho^6 - 20\rho^4 + 6\rho^2) \cos 2\theta$	Tertiary astigmatism at 0°
25	6	4	$\sqrt{14}(6\rho^6 - 5\rho^4) \sin 4\theta$	
26	6	4	$\sqrt{14}(6\rho^6 - 5\rho^4) \cos 4\theta$	
27	6	6	$\sqrt{14}\rho^6 \sin 6\theta$	
28	6	6	$\sqrt{14}\rho^6 \cos 6\theta$	
29	7	1	$4(35\rho^7 - 60\rho^5 + 30\rho^3 - 4\rho) \sin \theta$	Tertiary y coma
30	7	1	$4(35\rho^7 - 60\rho^5 + 30\rho^3 - 4\rho) \cos \theta$	Tertiary x coma
31	7	3	$4(21\rho^7 - 30\rho^5 + 10\rho^3) \sin 3\theta$	
32	7	3	$4(21\rho^7 - 30\rho^5 + 10\rho^3) \cos 3\theta$	
33	7	5	$4(7\rho^7 - 6\rho^5) \sin 5\theta$	
34	7	5	$4(7\rho^7 - 6\rho^5) \cos 5\theta$	
35	7	7	$4\rho^7 \sin 7\theta$	
36	7	7	$4\rho^7 \cos 7\theta$	
37	8	0	$3(70\rho^8 - 140\rho^6 + 90\rho^4 - 20\rho^2 + 1)$	Tertiary spherical

1.1.2. Interferometry

Interferometry jsou optické přístroje vytvářející interferenční obrazec, z něhož se vyhodnocují vlastnosti měřené optické soustavy. Existuje mnoho konstrukcí interferometrů, z nichž většina vychází ze základních uspořádání, mezi které lze zařadit Fizeau interferometr, Mach-Zenderův interferometr a Michelsonův interferometr.

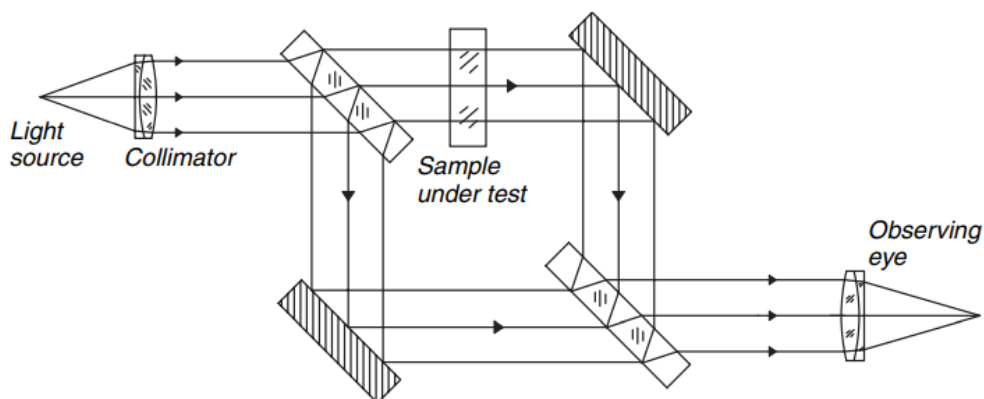
Fizeau interferometr znázorněný na obr. 4 je výchozím uspořádáním pro interferometry Zygo a Ceravolo, které se často používají v testovacích laboratořích pro svou vysokou přesnost (běžně větší než $\lambda/40$). Ta je dána velkou přesností referenční plochy a zdrojem s vysokou koherencí (např. HeNe laser). Řadí se mezi vícecestné interferometry, které se vyznačují různou délkou optické dráhy pro referenční a měřící paprsek. Díky této skutečnosti jsou kladeny vysoké nároky na prvky interferometru zejména na referenční plochu, což dělá interferometr velice nákladným [4].



Obr. 4: Schéma interferometru Fizeau [4]

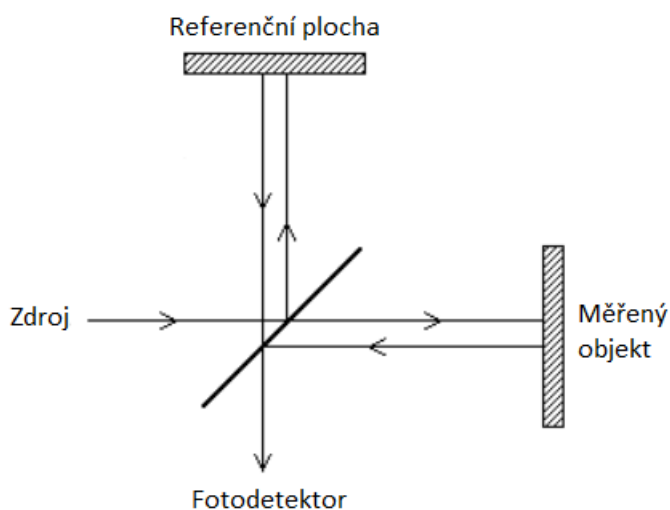
Mach-Zehnderův interferometr znázorněný na obr. 5 je výchozím uspořádáním pro např. interferometr Twyman-Green. Je vhodný pro testování průhledných vzorků, např. pro měření kvality optických filtrů, které se vkládají do jednoho z ramen interferometru.

Principiálně funguje podobně jako Michelsonův interferometr s tím rozdílem, že vlny se v ramenech neodráží zpět, ale postupují k dalšímu děliči, za kterým interferují [1],[4].



Obr. 5: Schéma Mach-Zehnder interferometru [4]

U Michelsonova interferometru (obr. 6) postupují paprsky od světelného zdroje na dělič svazku, kde se rozdělí na paprsky referenční a měřicí. Paprsek referenční se odráží na referenční ploše a paprsek měřicí se odráží na testované ploše a vrací se na dělič, za kterým paprsky interferují [1].



Obr. 6: Schéma Michelsonova interferometru

Převzato a upraveno z:

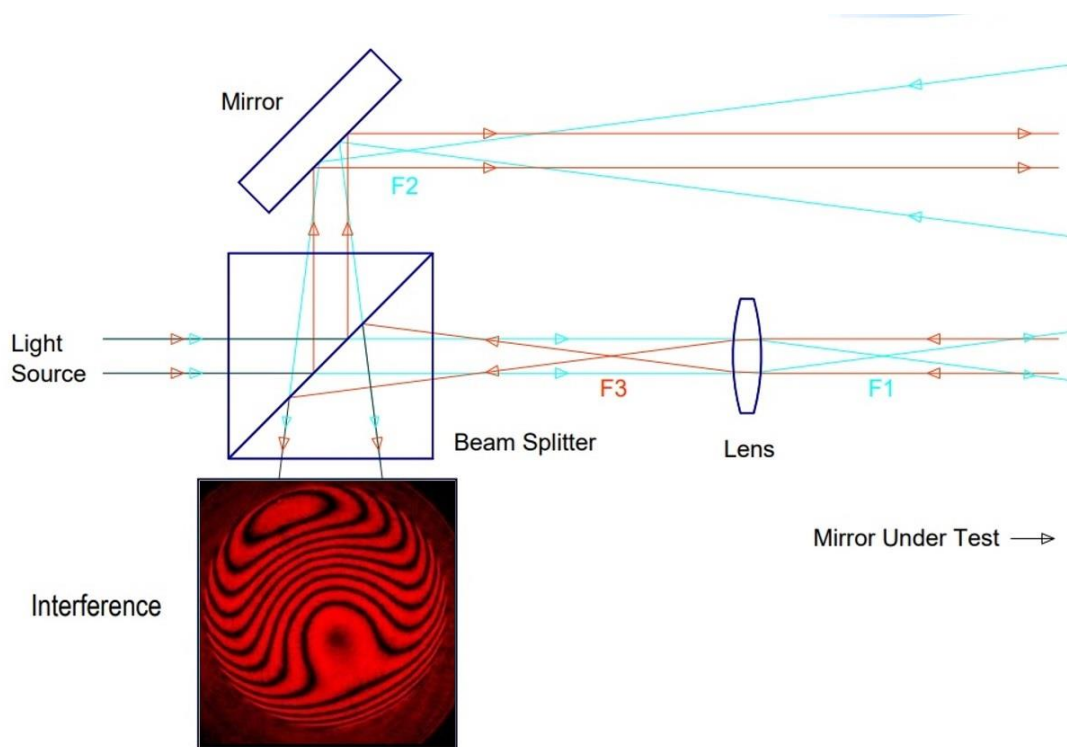
http://myslu.stlawu.edu/~jmil/physics/labs/151_lab/inactive/michelson.shtml

Úpravou uspořádání Michelsonova interferometru lze získat Bathův interferometr, který je vhodný pro naše měření. Tato úprava se realizuje pootočením referenčního zrcadla, takovým směrem, aby od něj odražené paprsky dopadaly na měřenou plochu, ze které se vrací zpátky na dělič a přidáním čočky do sestavy.

1.1.3. Bathův interferometr

Interferometr Bath byl vynalezen roku 1970 odvozením z Gatesova interferometru [5] (který je odvozen z Michelsonova interferometru), od kterého se liší přidáním malé čočky mezi dělič svazku a testovaný předmět. Interferometr byl vybrán z důvodů své nízké hmotnosti, snadné realizace a pro mé měření dostatečné přesnosti ($\lambda/20$) a relativně nízké pořizovací ceny [5].

Jeho schéma je na obr. 7, kde měřící paprsek je znázorněn červenou barvou a modrou barvou je znázorněn paprsek referenční. Interferometr Bath se skládá ze světelného zdroje (laserové diody), děliče svazku (dělicí kostky), zrcadla a čočky. Paprsky ze zdroje dopadají na dělicí kostku, kde jsou rozděleny v poměru 1:1 na paprsky testovací a referenční. Referenční paprsek dále dopadá na zrcadlo, na kterém se odráží na testovaný předmět a odráží se na referenční rovině zpět na dělicí kostku, před kterou je svazek fokusován čočkou. Za dělicí kostkou paprsek interferuje s měřícím paprskem, který prošel stejnou dráhou, pouze v opačném směru.



Obr. 7: Schéma interferometru Bath

Převzato a upraveno:

http://www.alcoat.net/webtele/interferometry/Bath_interferometer/Bath_interferometer_local_copy.htm

Bathův interferometr se řadí mezi stejnocestné interferometry, u nichž referenční a měřící paprsek projde stejnou optickou dráhu (pouze v opačném směru). Díky této skutečnosti, nejsou kladeny vysoké nároky na kvalitu optických prvků a zdroje, a dochází tak ke snížení pořizovací ceny interferometru. Chyby prvků se promítnou do obou paprsků podobným způsobem pouze s opačným znaménkem, takže při skládání těchto vln dochází k částečné kompenzaci zavedených chyb optickými členy interferometru [5],[7].

Protože na testovanou plochu dopadá svazek šikmých paprsků a tyto svazky jsou vůči sobě posunuté, zavádí tento typ interferometru do pozorovaného interferenčního obrazce přídatný astigmatismus. Velikost zavedeného astigmatismu lze vyjádřit vztahem [7]:

$$OPD = \frac{D^2 \cdot d^2}{16 \cdot R^3}, \quad (8)$$

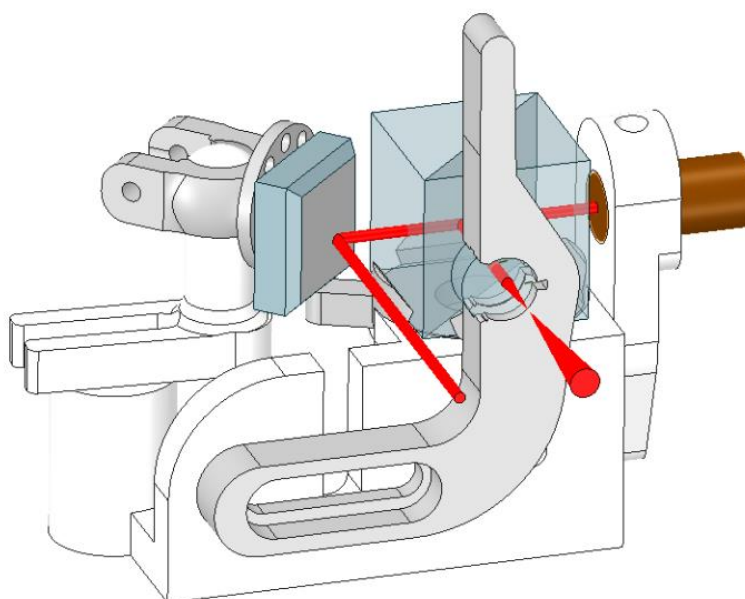
kde D značí průměr apertury testovaného dalekohledu, d je vzdálenost osy měřícího a referenčního svazku a R je dvojnásobek ohniskové vzdálenosti testované optické soustavy.

Velikost astigmatismu nejvíce ovlivňuje hodnota d vzdálenosti svazků viz tab. 2, která udává názorný přehled velikosti zavedeného astigmatismu pro různé hodnoty vzdálenosti d referenčního a měřícího svazku (vztaženo na vlnovou délku 550 nm).

Tab. 2: Změna OPD v závislosti na vzdálenosti svazků d [7]

Separace svazku d	100 mm f/5	150 mm f/6	200 mm f/5
6 mm	0,012	0,016	0,020
8 mm	0,018	0,028	0,036
10 mm	0,036	0,044	0,057

Z tab. 2 je zřejmé, že pro malé vzdálenosti svazků je možné zavedený astigmatismus pro jeho malou hodnotu zanedbat. Popřípadě jej lze při měření vykompenzovat vhodně zvolenou metodou měření a zpracováním výsledků (např. rotace dalekohledu kolem optické osy). Při uvážení daných okolností se přesnost měření pomocí Báthova interferometru pohybuje kolem hodnoty $\lambda/20$, což je dostatečné pro měření, která se budou realizovat.

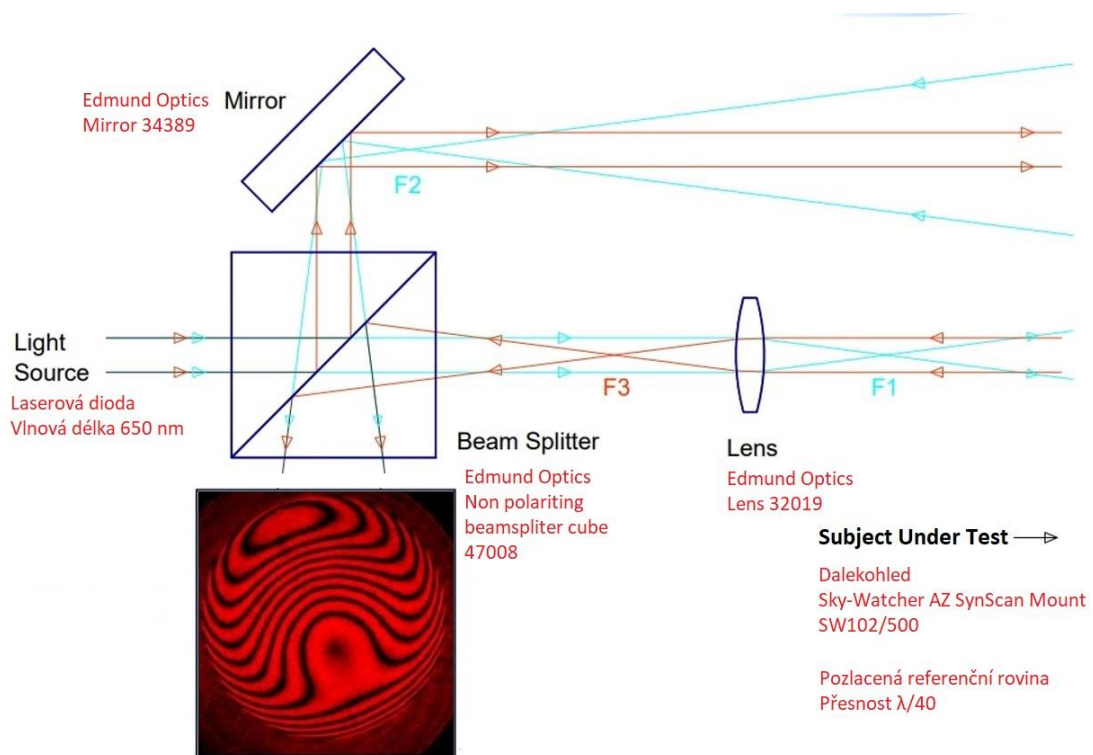


Obr. 8: Model sestaveného interferometru Bath

Převzato z: <https://thegr5store.com/store/index.php/bath-interferometer-kit.html>

Na základě výše uvedeného byl sestaven Bathův interferometr, jehož model je na obr. 8. Pro jeho realizaci byly použity komponenty:

- Laserová dioda o vlnové délce 650 nm
- Nepolarizující dělicí kostka Edmund Optics 47008
- Odrazné zrcadlo Edmund Optics 34389
- Čočka o ohniskové vzdálenosti 9 mm Edmund Optics 32019



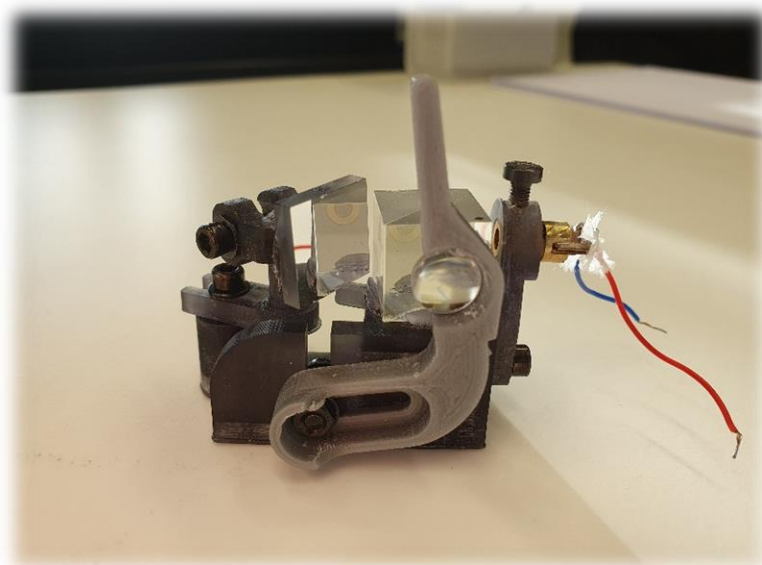
Obr. 9: Schéma umístění součástí pro sestavení interferometru Bath

Převzato a upraveno:

http://www.alcoat.net/webtele/interferometry/Bath_interferometer/Bath_interferometer_local_copy.htm

Na obr. 9 je znázorněno uspořádání komponent interferometru Bath. Po upevnění laserové diody se těsně za ni umístila dělicí kostka. Vzhledem k vlastnostem laserového zdroje (nízké rozbíhavosti svazku), není mezi těmito dvěma komponenty definovaná vzdálenost. Dělicí kostku je doporučeno mírně vyosít (maximálně o 5°) z důvodů odstranění parazitních odrazů z interferenčního obrazce. Do řady, co nejbližší za dělič umístíme zrcadlo, které je mírně předsunuté vůči kostce z důvodů zabránění seříznutí svazku. Umisťuje se, co nejbližší dělicí kostce, aby rozteč měřicího a referenčního paprsku

zavádějící astigmatismus byla co nejmenší. Poslední se umísťuje čočka na pohyblivou komponentu. Sestavený interferometr je na obr. 10.



Obr. 10: Fotografie sestaveného interferometru Bath

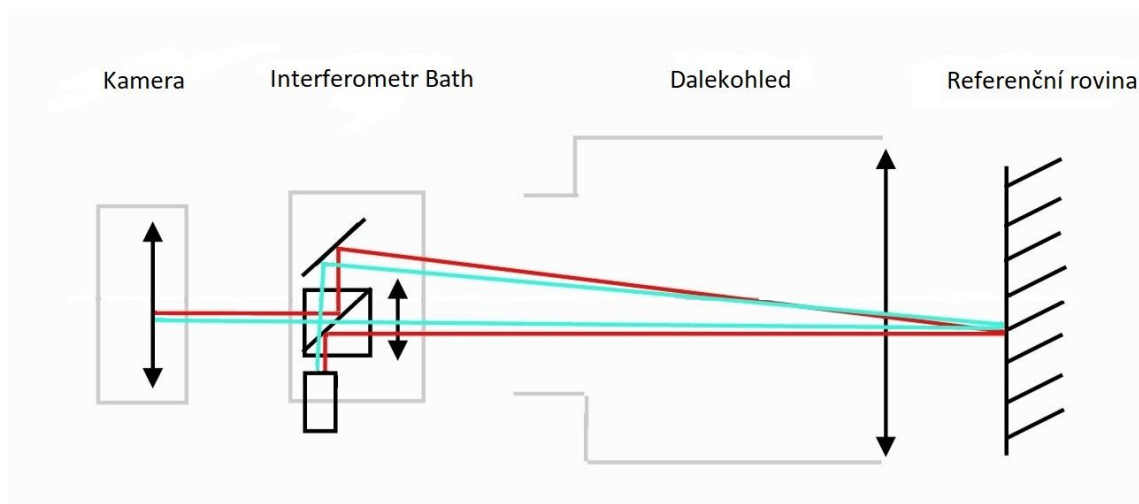
Experimentální část

2. Popis měření a jeho vyhodnocení

V následujících kapitolách se zabývám popisem sestavení experimentu a následným vyhodnocením naměřených výsledků. Měření je zaměřeno na vyhodnocení kvality obrazu měřeného astronomického dalekohledu a následně je zkoumán projev nesouososti osy fokuséru a osy dalekohledu na výsledný obraz. Zvolené měřicí metody zahrnovaly modelování chování kvality obrazu při zvětšujícím se úhlu mezi osami a porovnání s naměřenými výsledky.

2.1. Měřicí sestava

Na základě poznatků uvedených v teoretické části (kapitola 1.1.2 a 1.1.3) bylo navrženo uspořádání měřicí sestavy (obr. 11) skládající se z interferometru, měřeného dalekohledu a referenční roviny. Budou vyhodnocovány vlastnosti dalekohledu Sky-Watcher SW102/500.

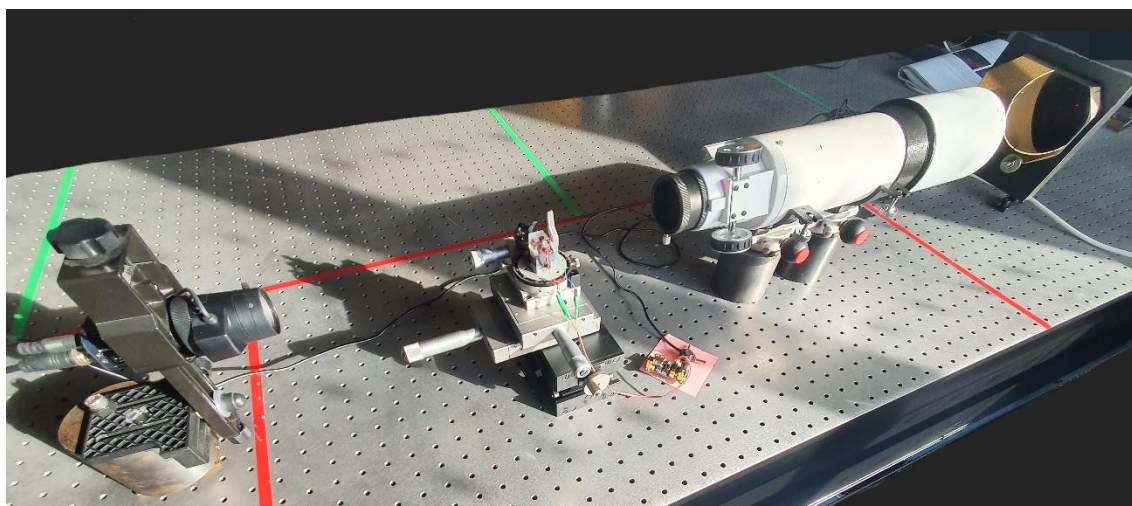


Obr. 11: Schéma uspořádání sestavy experimentu

Základní měřicí sestava je složena z testovaného dalekohledu, za kterým je umístěn Bathův interferometr se snímací kamerou. V předmětovém prostoru objektivu je

umístěna referenční rovina. Vzájemná vzdálenost roviny a dalekohledu se volí menší pro omezení vlivu atmosféry. Přesnost referenční roviny musí být větší než přesnost měření, použitá rovina je pozlacená o přesnosti $\lambda/40$.

Interferometr se umístí na posuvný stolek do ohniska objektivu souladu s uspořádáním na obr. 9. Stolek se ustanoví v takové výšce, aby oba rovnoběžné svazky procházeli středem dalekohledu a nedocházelo k jejich seříznutí. Do cesty měřícího paprsku se přidá čočka interferometru. Nastaví se náklon referenční roviny tak, aby paprsky od ní odražené a paprsky vycházející z interferometru byly vzájemně překryté. Posledním krokem je ustanovení snímací kamery za interferometr. Na obr. 12 je fotografie připravené soustavy pro měření.



Obr. 12: Fotografie poskládané soustavy pro realizaci experimentu

Popis chodu paprsků Báthova interferometru je znázorněný na obr. 7 a obr. 9. Kolimovaný světelný zdroj je rozdělen děličem svazku na referenční paprsek (modrý) a měřící paprsek (červený) v poměru intenzit 1:1. Referenční paprsek se odrazí od zrcadla a dopadne na testované zrcadlo, od kterého se odrazí, projde přes spojku interferometru, kterou je fokusován do F3. Naopak měřící paprsek je spojkou rozšířen na sférickou vlnu, která je fokusována do bodu F1. Dále se rozpínající měřící svazek osvětluje testované zrcadlo a vrací se zpět k zaostření do F2. Oba rozpínající se svazky procházejí zpět děličem svazku a interferují na detektoru. Protože F2 neleží na shodné ose jako F1 a čočka, je s tímto typem interferometru spojen sekundární astigmatismus (viz kapitola 1.1.3).

Záznamy interferenčního obrazce byly pořizovány kamerou Watec 902H2 ULTIMATE za využití programu SharpCap 4.0 (64 bit). Vždy byla pořízena série minimálně pěti snímků, pro 5 různých měření stejného bodu. Výsledky byly vyhodnocovány v programu DFTFringe za využití vzorců (6), (7), (8), (9) a vzorců pro Zernikeho polynomy uvedených v tab. 1. A následně zpracovány v programu GNU Octave (GUI), za využití vlastních skriptů (viz příloha P3 a P4). Výsledky jsou prezentovány v hodnotě Strehlova kritéria (SR), jelikož se zaměřuji na zkoumání změny kvality obrazu.

2.2. Popis měření

Pro splnění cílů bakalářské práce bylo řešení rozděleno do tří úloh. Prvním cílem (měření kvality optického systému) je ověřit měřící metodu jako takovou a sestrojený interferometr. Druhým cílem (měření vlivu vyosení) je vytvořit modelovou situaci popisující míru poklesu kvality obrazu v závislosti na změně velikosti úhlu mezi osou dalekohledu a osou fokuséru. Poslední, třetí, úloha je věnována reálné situaci – měření sousostí fokuséru s optickou osou systému.

V této kapitole je uveden stručný popis měření jednotlivých úloh. Vlastní výsledky měření jsou uvedeny v následujících kapitolách (2.3, 2.4, 2.5).

Měření kvality optického systému

Sestavený interferometr i ustavenou měřící sestavu je nutné nejprve ověřit na „vzorku“ známých vlastností. Pro tento účel byl využit dalekohled SW 102/500, jehož vlastnosti jsou známy (viz měřící protokol P2). Porovnáním určených a známých hodnot kvality optického systému pak lze usoudit na korektnost postupu i měřící sestavy.

Ustaví se měřící sestava popsaná v kapitole 2.1 (viz obr. 11, obr. 12). Dílčí měření se skládá ze série snímků pořízených pro různou orientaci dalekohledu. Kvůli kompenzaci interferometrem zavlečených vad (viz popis Báthova interferometru 1.1.3, vztah pro velikost zavedeného astigmatismu (8)). Jednotlivé série snímků jsou pořízeny pro různé poziční úhly dalekohledu (rotace po 90° ve směru chodu hodinových ručiček). Pro každou pozici dalekohledu je pořízena série 5 snímků. Doporučený počet

pozorovaných interferenčních proužků je mezi 20-40 proužky na interferogram, proužky by měly být co nejméně zakřivené a rovnoměrně rozmístěné [4].

Zpracování výsledků se provádí v programu DFTFringe, kde je využito vtaů (6), (7), (8), (9) a vztahů uvedených v tab. 1. Z pořízených interferogramů je určována hodnota SR, RMS a velikosti aberací, které se postupně průměrují. Výsledkem je popis vlnoplochy, který je následně srovnán s výsledky uváděnými výrobcem (viz příloha P2).

Vliv vyosení fokuséru

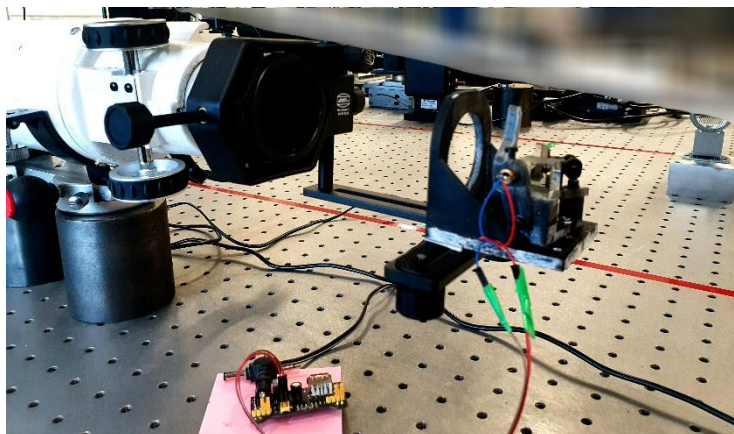
Cílem měření bylo sestrojít graf modelové situace, vyjadřující míru poklesu kvality obrazu v závislosti na změně velikosti úhlu mezi osou dalekohledu a osou fokuséru. Změna velikosti úhlu mezi osou fokuséru a osou dalekohledu byla realizována natočením Báthova interferometru ve vodorovné rovině. Měření probíhalo s krokem $0^{\circ}10'$ o celkovém posunu 1° na každou stranu po pěti sériích. Bylo realizováno měření jak na interferenčních proužcích (obr. 2), tak na interferenčních kroužcích (obr. 3).

Následně byly vyhodnoceny interferogramy v programu DFTFringe, za využití vtaů (6), (7), (8), (9) a vztahů uvedených v tab. 1. Hodnoty SR byly pro dané změny úhlů zaneseny do grafů a porovnány. Pro lepší představu změny náklonu byly vykresleny grafy změny hodnot X a Y Tilt, kde hodnoty vypočtené v programu DFTFringe jsou uvedeny v násobkách vlnové délky použité pro měření. Pro jejich převod na délkové jednotky, bylo třeba hodnoty X a Y Tiltu vynásobit použitou vlnovou délkou (650 nm).

Měření vyosení fokuséru

Cílem měření bylo zjistit, zda je osa fokuséru ztotožněná s osou dalekohledu, popřípadě jaká je velikost potřebné korekce pro jejich sesouhlasení.

Došlo ke změně v sestavě pro měření z kapitoly 2.1, Bathův interferometr je pevně spojen s fokusérem dalekohledu způsobem znázorněným na obr. 13. Garantovaný průhyb držáku (BP MZV-02) interferometru je 100 nm na 1 kg. S ohledem na výrazně nižší hmotnost interferometru (cca 60 g) jej lze považovat pro naše účely za dostatečně robustní.



Obr. 13: Fotografie upevnění interferometru k fokuséru dalekohledu

S ohledem na poznatky z kapitoly 2.4 bylo měření realizováno na interferenčních kroužcích a výchozí poloha byla pro plně vysunutý fokusér. Měření se provádělo s krokem 5 mm do vzdálenosti celkového posunu 40 mm. V každé poloze se pořídila série 5 snímků, měření se opakovalo pětkrát. Na základě toho lze sestavit graf závislosti SR na posunu fokuséru a stanovit míru zhoršení kvality obrazu, popř. míru vyosení fokuséru.

Výpočet potřebné korekce pro ztotožnění osy dalekohledu a osy fokuséru byl realizován přes metodu „Tilt“. Tato metoda vychází ze znalosti hodnot X a Y Tiltu v předchozí úloze (měření kvality optické soustavy). Z těchto hodnot je určen posun fokuséru v rovině kolmé na optickou osu (dále označován jako „Shift“), což je průmět do obrazové roviny objektivu. Situaci lze popsat vztahem:

$$\tan \delta = \frac{\text{Tilt} \cdot \lambda}{f}, \quad (10)$$

kde δ je chybový úhel vyjadřující odchylku ideální polohy optické osy od skutečnosti (např. při deformaci tubusu), f je ohnisková vzdálenost objektivu (502 mm) a Tilt je určen z naměřených hodnot X nebo Y Tiltu.

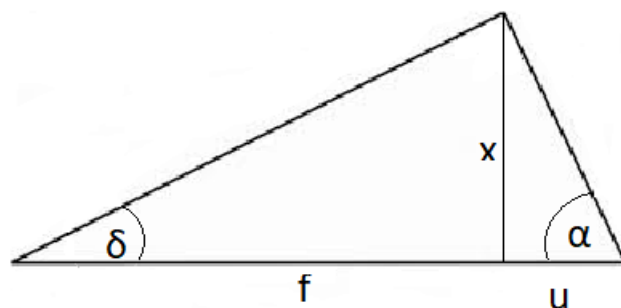
Hodnota chybového úhlu byla následně ověřena postupem běžně využívaným v interferometrických měřeních délky [2],[3]. Interferenční obrazec vzniklý skládáním dvou vln lze popsat ve shodě se skutečnostmi popsány v kapitole 1.1.1. Změna

parametrů mechanického uspořádání optické soustavy (např. deformace tubusu) se projeví vznikem fázového rozdílu mezi těmito skládanými svazky (vztah (3)). Tento vztah lze snadno upravit na vyjádření dráhového rozdílu mezi svazky:

$$\Delta = n \cdot \frac{\lambda}{2}. \quad (11)$$

Za předpokladu, že změna optické dráhy o hodnotu Δ je vyvolána mnou uvažovanými mechanickými nedokonalostmi (např. vlivem odklonu fokuséru), lze pak přímo ze změny interferenčního obrazce určit, s využitím vztahu (10), hledanou hodnotu posunu a tím i následně chybového úhlu. Podrobný popis metody je uveden v [2], [3].

Z takto stanoveného chybového úhlu již lze přímo stanovit odklon fokuséru od optické osy (jeho nesouosost). Situace je znázorněna na obr. 14. Korekce je počítána přes poměr trojúhelníků na obr. 14 dle vztahu (12).



Obr. 14: Schéma pro výpočet korekce fokuséru

$$\alpha = \delta \cdot \frac{f}{u} \quad (12)$$

δ je chybový úhel, u je konstrukční báze fokuséru (75 mm) a α je hledaný korekční úhel. Posledním spíše praktickým krokem může být přepočítání velikosti korekce na mechanický pohyb justážních členů (např. na počet potřebných otoček stavěcího šroubku fokuséru).

2.3. Měření kvality optického systému

Cílem úvodního měření je ověřit funkčnost měřicí sestavy a změřeni kvality optické soustavy testovaného dalekohledu. Postupem popsáním v kapitole 2.2 byla určena vlnoplocha optické soustavy měřeného dalekohledu a následně z ní určeny koeficienty SR, RMS, dále velikosti základních aberací a zjištění průběhu vlnoplochy. Kompletní měřicí protokol je uveden v příloze P1.

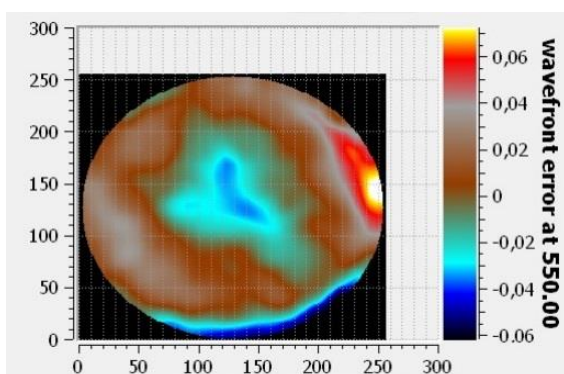
Níže je uvedené srovnání výsledků měření a hodnot uváděných v protokolu dalekohledu od výrobce (uveden v příloze P2). Mé měření se provádělo laserovou diodou vlnové délky 650 nm a k měření výrobce byl použit světelný zdroj vlnové délky 653 nm.

Výsledkem měření bylo určení hodnoty koeficientu SR rovnému 0,980. V porovnání s hodnotami uváděnými výrobcem, SR rovno 0,982, považuji dané měření za velice přesné, jelikož k odlišnostem dochází až na třetím desetinném místě pro SR kritérium a pro velikosti aberací uvedenými v tab. 3 na druhém desetinném místě. Jak bylo popsáno v kapitole 1.1.1, hodnota Strehlova kritéria 0,980 řadí měřený dalekohled mezi výtečné optické soustavy.

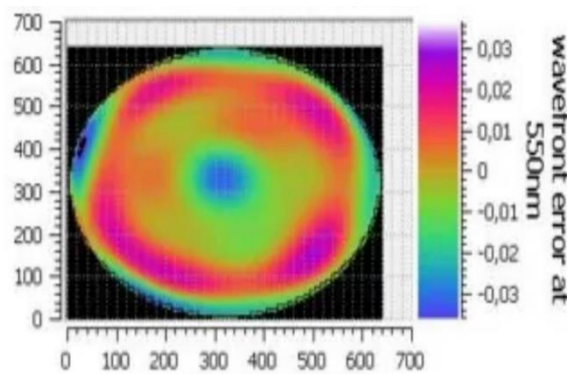
Tab. 3: Srovnání velikostí aberací z mého měření a z údajů od výrobce

	X Astig	Y Astig	X Coma	Y Coma	Spherical
Mé měření	0,023	0,008	-0,079	-0,084	-0,043
Údaje od výrobce	0,008	0,004	-0,034	-0,035	-0,023

Na obr. 15 a obr. 16 je porovnání tvaru vlnoploch z měření a z protokolu od výrobce. Je vidět, že plochy jsou si velice podobné a odlišnosti jsou viditelné pouze na krajích. To potvrzuje korektnost měření.

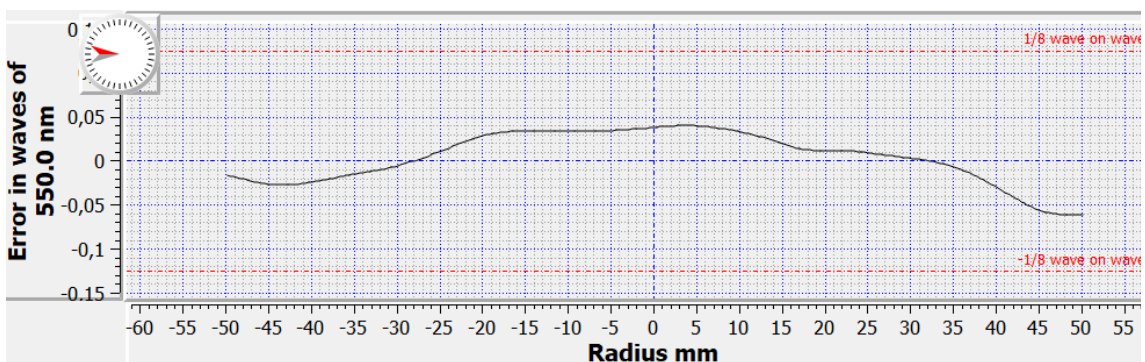


Obr. 15: Tvar vlnoplochy z měření

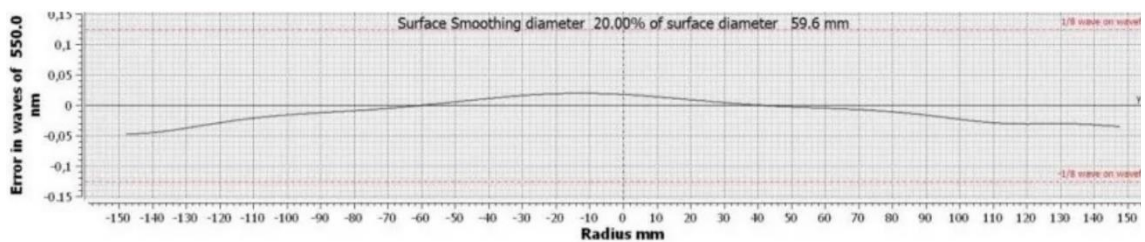


Obr. 16: Tvar vlnoplochy od výrobce viz příloha P2

Pro lepší porovnání průběhů vlnoploch, jsou na obr. 17 a obr. 18 srovnány jejich průřezy procházející středem vlnoplochy a rovinou X. Řez vlnoplochou na obr. 18 byl výrobcem částečně vyhlazen a invertován. Pro lepší srovnání jsem také invertovala řez vlnoplochy z mého měření na obr. 17, proto minimum na obr. 15 odpovídá maximu na obr. 17.

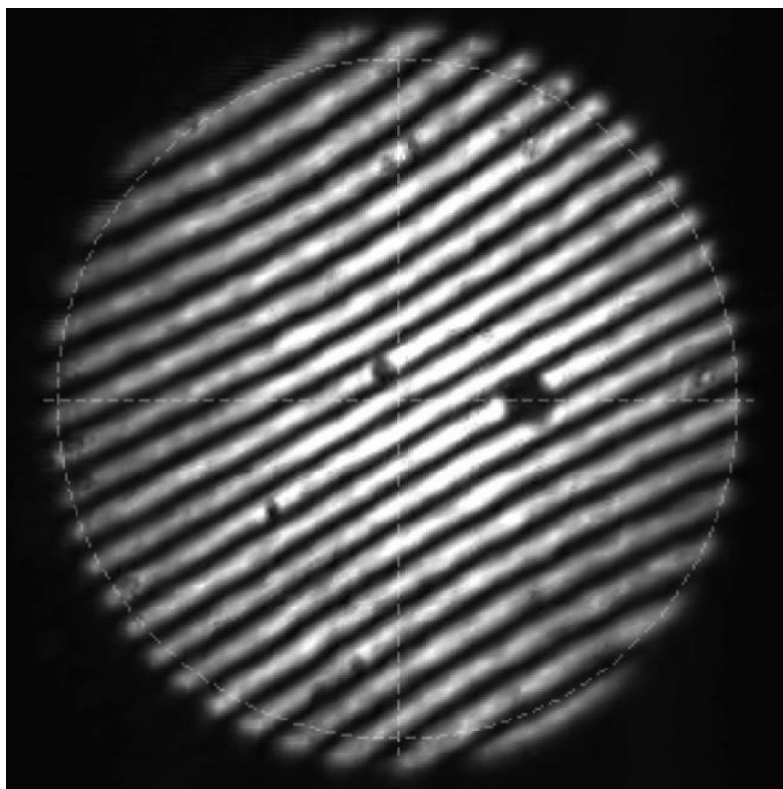


Obr. 17: Řez vlnoplochou z mého měření



Obr. 18: Řez vlnoplochou změřenou výrobcem, viz příloha P2

Níže na obr. 19 je znázorněn typický vzhled interferogramů, prostřednictvím nichž se měření provádělo. Dle výše uvedených podmínek obsahuje cca 40 interferenčních proužků, které jsou zároveň rovnoběžné a stejnoměrně rozmístěné.



Obr. 19: Typický interferogram pro danou vlnoplochu

Dílčí shrnutí:

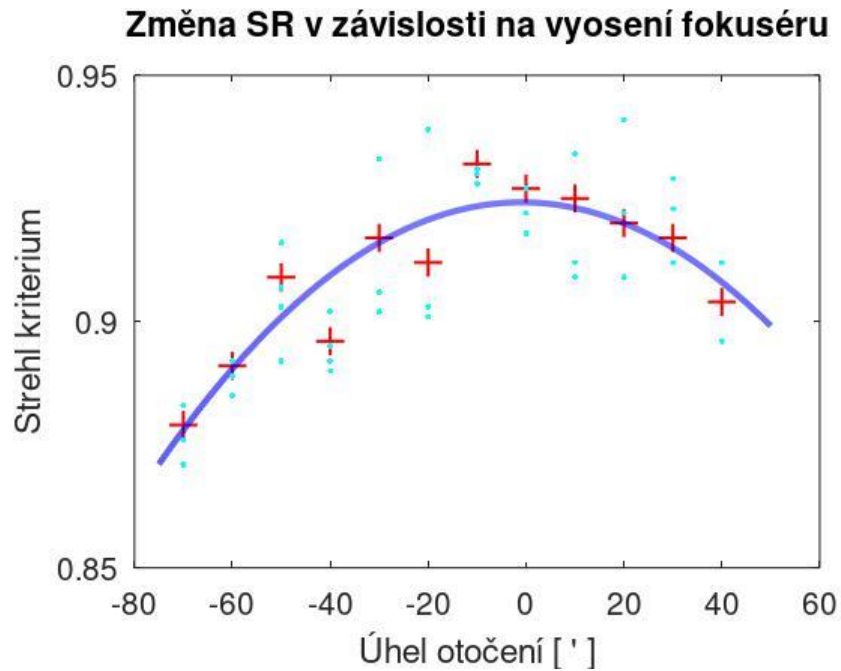
Podářilo se ověřit funkčnost zvolené měřicí sestavy a změřit základní vlastnosti dalekohledu. Naměřené výsledky si jsou velice podobné s výsledky uvedenými výrobcem, tedy lze měření považovat za velice přesné. Hodnota koeficientu SR je rovna 0,980, čímž se dalekohled zařazuje mezi výtečné optické soustavy. Hodnota RMS odpovídá 0,022 vlnové délky.

2.4. Vliv vyosení fokuséru

Výsledná kvalita obrazu není ovlivněna pouze optickými aberacemi, ale také mechanickými nedokonalostmi dalekohledu, mezi které lze zařadit např. průhyb tubusu nebo vyosení fokuséru. V obou situacích, není osa daného prvku souosá s optickou osou dalekohledu a dochází k posunu bodu nejlepšího zobrazení, který se ideálně nachází ve středu zorného pole, směrem k jeho okraji. Výsledkem je zhoršení kvality výsledného obrazu.

Nesouosost fokuséru bývá nejčastěji způsobena jeho špatným uložením (není korektně seřízen k optické ose přístroje) nebo např. opotřebovaným nebo špatně seřízeným posuvným mechanismem tubusu fokuséru. Pro všechny možnosti je výsledkem pokles kvality obrazu projevující se poklesem hodnoty SR. Měření bylo realizováno dle postupu uvedeném v kapitole 2.2.

Na obr. 20 je znázorněn graf změny hodnoty SR v závislosti na změně úhlu mezi osami. Za předpokladu, že nejvyšší hodnoty Strehlova kritéria bylo dosaženo při nulovém rozosení os, zbývající hodnoty se zvětšujícím se úhlem klesaly. Data v obr. 20 byla naměřena na interferenčních kroužcích. Odchylka zhruba 5 % v maximální hodnotě SR (0,932) byla pravděpodobně způsobena nenulovým tiltem v druhé ose.



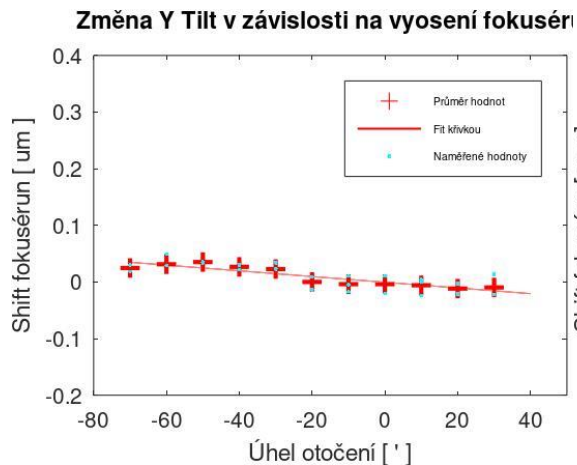
Obr. 20: Změna hodnoty SR v závislosti na změně úhlu, interferenční kroužky

Legenda: Červené křížky: průměr dat,

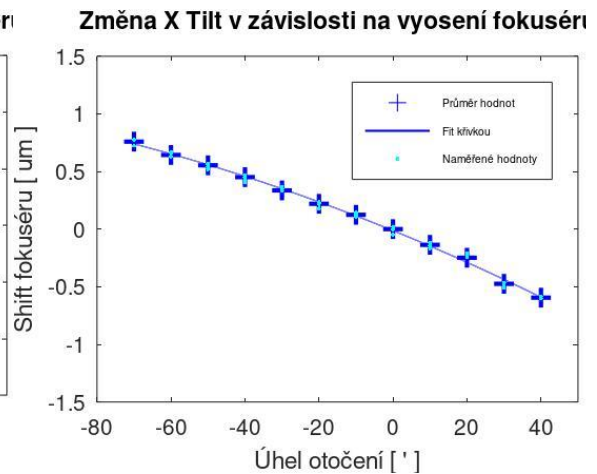
modrá křivka: fit,

modré tečky: naměřená data

Na obr. 21 a obr. 22 jsou zobrazeny určené hodnoty tiltu v příslušných osách. Tato data byla následně s velmi dobrou shodou aproximována. K simulovanému natočení docházelo ve vodorovné rovině. To je zjevné z obr. 22, kde je posun znázorněn v přepočtu na hodnoty Shiftu fokuséru [μm]. Ve srovnání s grafem na obr. 20 je vidět, že při téměř nulovém náklonu je dosaženo maximální hodnoty SR. Průměrné hodnoty Y Tiltu na obr. 21 jsou téměř konstantní, jelikož ve směru osy y nedocházelo k náklonu.

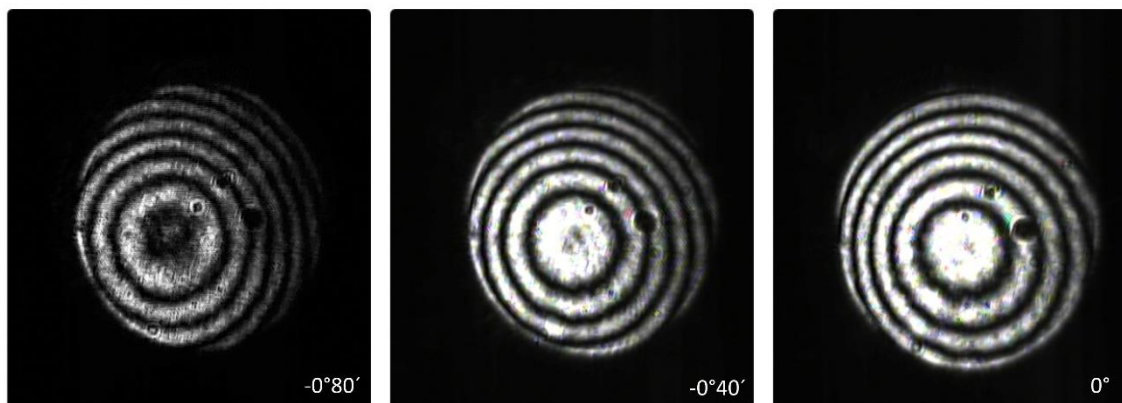


Obr. 21: Shift fokuséru v ose Y v závislosti na úhlu vyosení



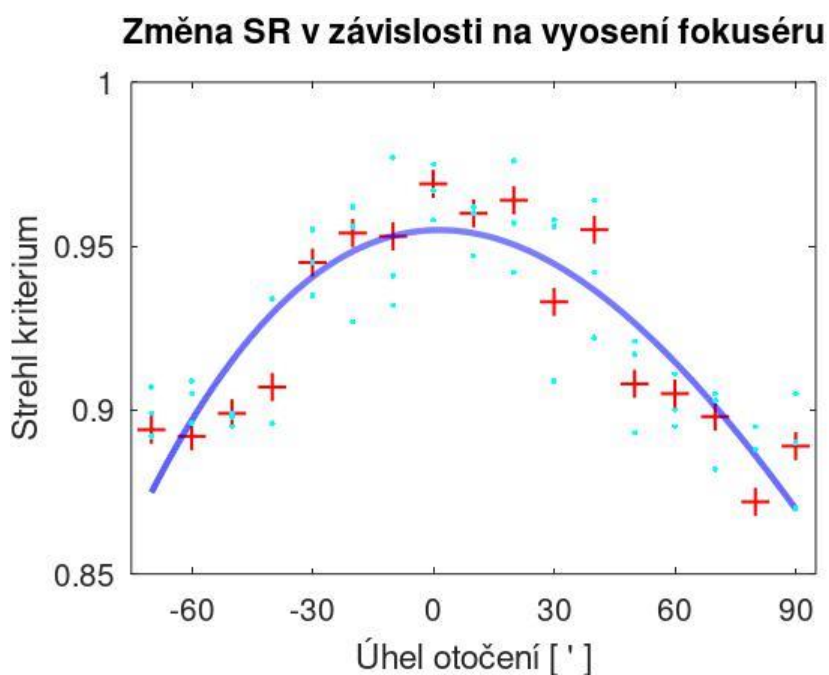
Obr. 22: Shift fokuséru v ose X v závislosti na úhlu vyosení

Změna interferenčního obrazce v závislosti na změně úhlu posunu je znázorněna na obr. 23. Ve výchozí poloze je střed interferenčních kroužků ztotožněn se středem celého obrazu a při zvětšujícím se úhlu odklonu se střed interferenčních kroužků vzdaluje od středu obrazce. Zjištěné průběhy velmi dobře korespondují se simulacemi v kapitole 1.1.1 na obr. 3 pro změny hodnoty X Tilt.



Obr. 23: Změna interferenčního obrazce v závislosti na úhlu posunu

Pro srovnání bylo realizováno druhé měření závislosti velikosti koeficientu SR na změně úhlu, které bylo měřeno pomocí interferenčních proužků a je vyhodnoceno postupem uvedeném v kapitole 2.2 a výsledek je na obr. 24. Maximální naměřená hodnota SR 0,969 je podobná hodnotě 0,980 naměřené v kapitole 2.3. V grafu na obr. 24 je opět viditelný pokles hodnoty SR při zvětšení úhlu rozosení.



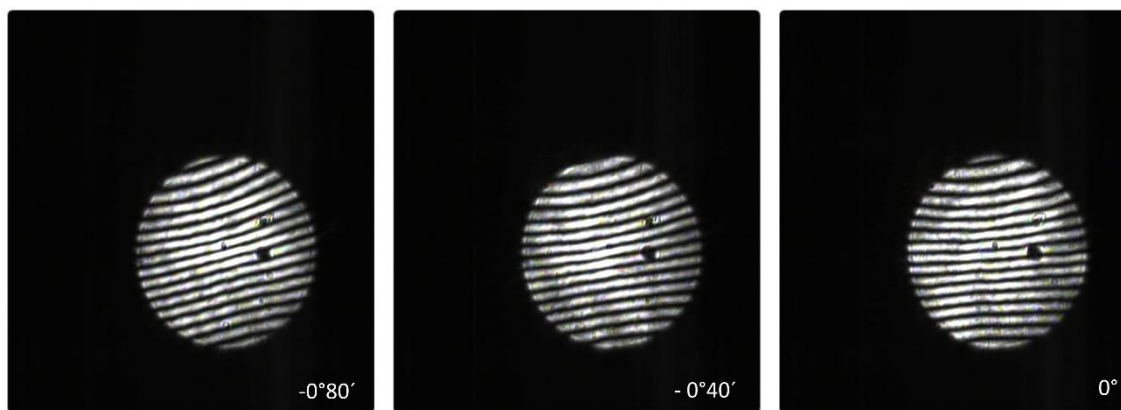
Obr. 24: Změna hodnoty SR v závislosti na změně úhlu, interferenční proužky

Legenda: Červené křížky: průměr dat,

modrá křivka: fit,

modré tečky: naměřená data

Na obr. 25 jsou záznamy interferogramů pro různé úhly natočení. Na změně náklonu interferenčních proužků se projevuje změna hodnoty X Tilt stejně, jak tomu bylo v předchozím případě. Obr. 25 je velmi podobný simulacím na obr. 2 z kapitoly 1.1.1.



Obr. 25: Změna interferenčního obrazce v závislosti na změně úhlu posunu

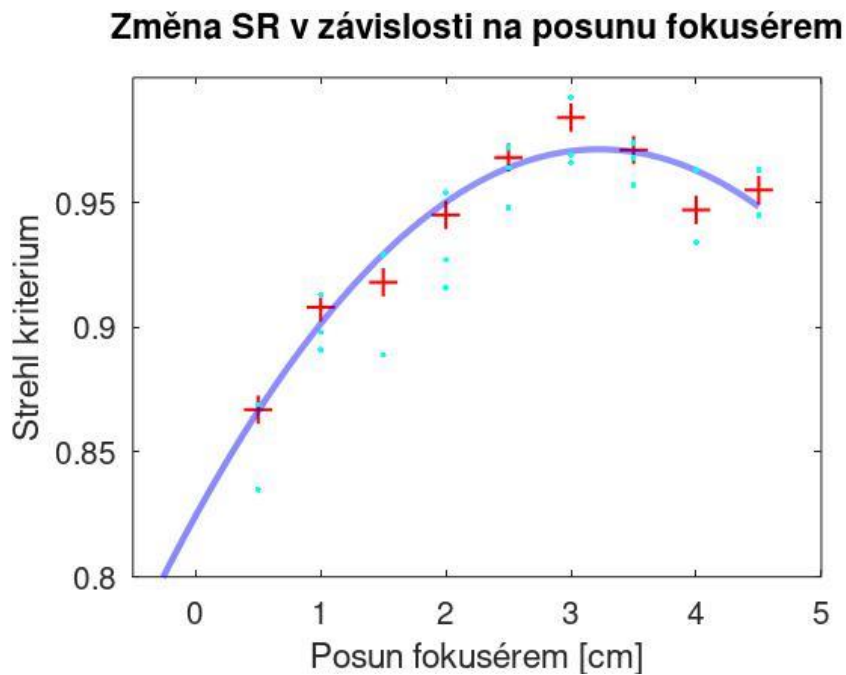
Dílčí shrnutí:

Podářilo se ověřit předpoklad závislosti hodnoty koeficientu SR na úhlu mezi osou dalekohledu a osou fokuséru. To nejlépe dokládají grafy na obr. 20 a obr. 24 znázorňující tentýž jev. Závislost poklesu hodnoty Strehlova kritéria se projevuje při zvětšení úhlu mezi osou fokuséru a osou dalekohledu, což se projeví snížením kvality pozorovaného obrazu. Na (obr. 23, obr. 25) byly vyobrazeny odlišné projevy, v interferenčním obrazci, změny hodnoty X Tilt, které byly následně srovnány s teoretickým podkladem (obr. 3, obr. 2).

2.5. Měření vyosení fokuséru

Cílem měření bylo zjistit, zda je osa fokuséru ztotožněná s osou dalekohledu, popřípadě jaká je velikost potřebné korekce pro jejich souosost.

K měření byl použit postup uvedený v kapitole 2.2. Změřená a vyhodnocená data jsou na obr. 26, je z nich patrná změna hodnoty koeficientu SR v závislosti na pozici fokuséru. V místě, kde osa fokuséru protíná optickou osu dalekohledu, dosahuje koeficient SR maximální hodnoty 0,984 velmi blízké hodnotě zjištěné v kapitole 2.3 (SR je rovno 0,980). Pro hodnoty mimo tuto pozici velikost koeficientu SR klesá ve shodě s modelovým měřením (viz předchozí kapitola).



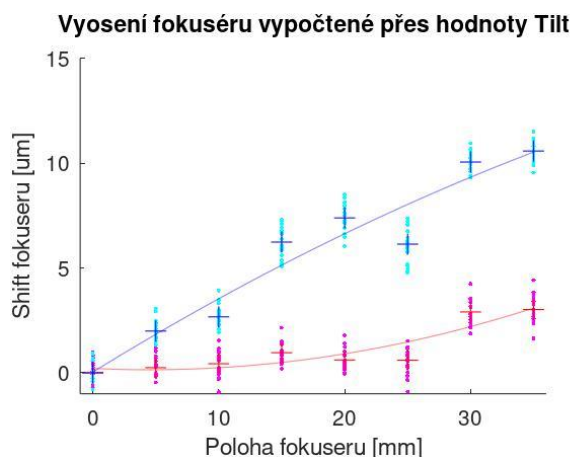
Obr. 26: Změna hodnoty SR v závislosti na posunu fokusérem

Legenda: Červené křížky: průměr dat,

modrá křivka: fit,

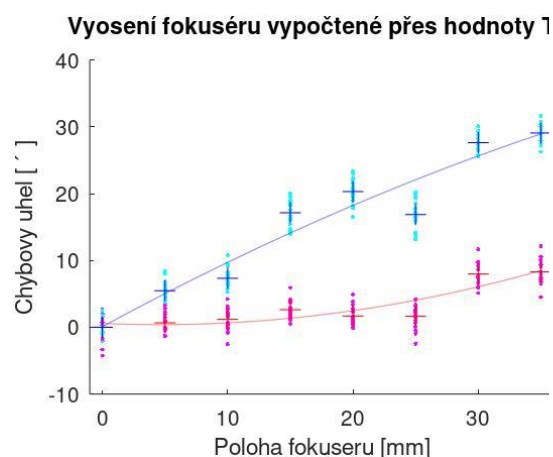
modré tečky: naměřená data

Z obr. 27 je patrné, že osa fokuséru je vyosená více v rovině osy x a méně v rovině osy y. Graf na obr. 27 znázorňuje naměřené hodnoty X Tilt (modře) a Y Tilt (červeně), tedy hodnotu příčného posunu optické osy vůči středu fokuséru. Změřené hodnoty byly aproximovány polynomem 2. stupně. Odchytky mezi proloženou křivkou a změřenými body jsou s největší pravděpodobností způsobeny vymešováním mechanických vřlí při pohybu fokuséru. Graf na obr. 28 znázorňující hodnotu chybového úhlu mezi optickou osou a osou fokuséru určenou ze zjištěných hodnot tiltu. Za využití vzorců (7), (8) a metody Tilt popsané v kapitole 2.2 byl určen hledaný korekční úhel, v rovině x na hodnotu $\alpha = 0^{\circ}10'12'' \pm 30''$ a v rovině y $\alpha = 0^{\circ}3'48'' \pm 30''$. Vyosení fokuséru je tedy velice malé.



Obr. 27: Úhyb fokuséru vyhodnocený přes hodnoty Tilt

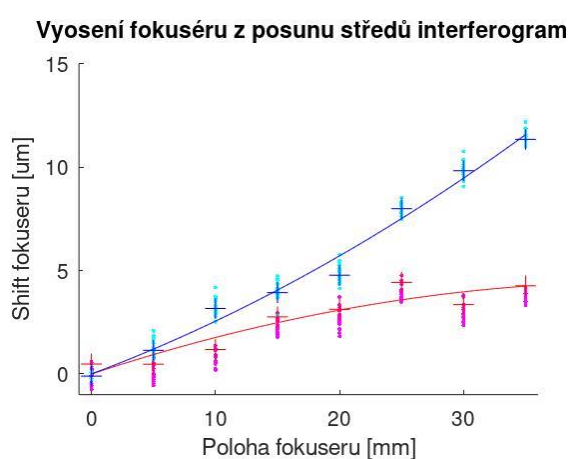
Legenda: Červená (Y Tilt)
 Křížky: průměrovaná data
 Tečky: naměřená data
 Křivka: fit polynomu naměřenými daty



Obr. 28: Chybový úhel měření

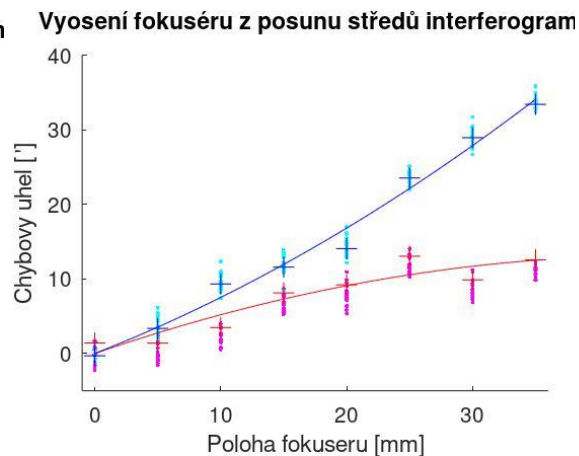
Legenda: Modrá (X Tilt)
 Křížky: průměrovaná data
 Tečky: naměřená data
 Křivka: fit polynomu naměřenými daty

Pro srovnání výsledků byla korekce počítána projekční metodou, postupem klasického vyhodnocení interferenčního obrazce dle postupu v kapitole 2.2 . Na obr. 29 a obr. 30 jsou znázorněny výsledky vyhodnocené tímto způsobem. Obr. 29 zachycuje hodnotu příčného posunu optické osy vůči středu fokuséru a obr. 30 chybový úhel mezi optickou osou soustavy a osy fokuséru. Hledaný korekční úhel je $0^{\circ}9'24'' \pm 24''$ v rovině x a v rovině y $0^{\circ}4'30'' \pm 24''$.



Obr. 29: Úhyb fokuséru vyhodnocený přes úhyb středů interferenčních kroužků

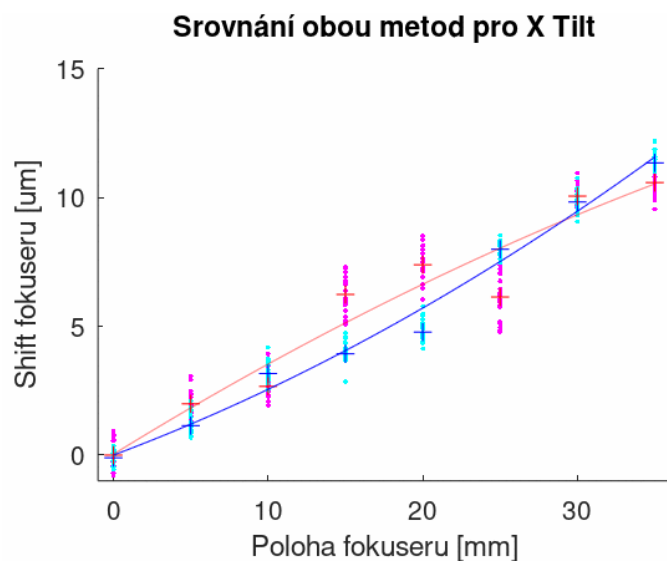
Legenda: Červená (Y Tilt)
 Křížky: průměrovaná data
 Tečky: naměřená data
 Křivka: fit polynomu naměřenými daty



Obr. 30: Chybový úhel měření

Legenda: Modrá (X Tilt)
 Křížky: průměrovaná data
 Tečky: naměřená data
 Křivka: fit polynomu naměřenými daty

Na obr. 31 je srovnání naměřených výsledků oběma metodami pro posun v rovině x. Červenou křivkou je označena metoda vyhodnocení za využití Tiltu a modrou je metoda vyhodnocení přímo z interferenčního obrazce. Z výsledků a z grafu je vidět, že je patrná velmi dobrá shoda mezi oběma měřícími metodami. Maximální odchylka mezi nimi je menší než 15 %.

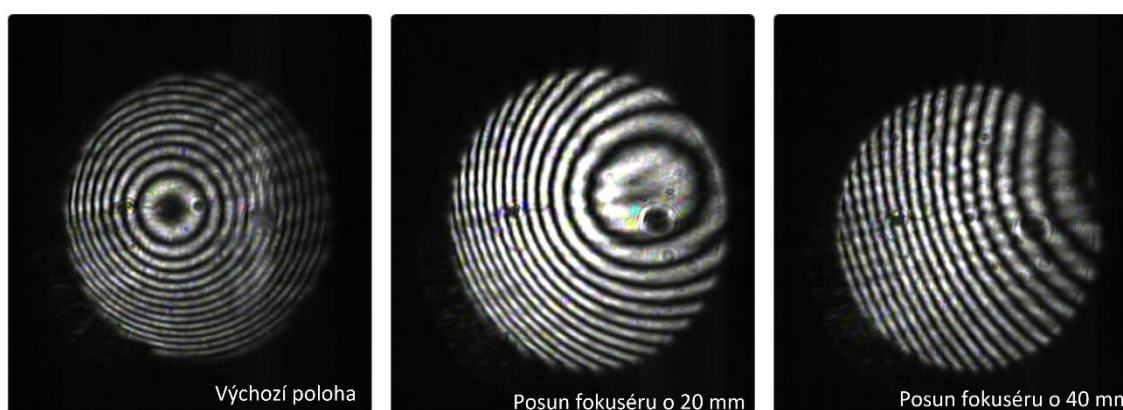


Obr. 31: Srovnání vyhodnocení přes Tilt a úhyb interferenčního obrazce

Legenda: Červená křivka: X Tilt,

Modrá křivka: interferenční obrazce

Typický průběh změn interferenčního obrazce během měření ilustruje obr. 32. Ve výchozí poloze byl střed interferenčních kroužků blízko středu interferogramu. Posouváním fokuséru docházelo k postupné změně interferenčního obrazce (jeho střed se na obr. 32 posouvá směrem doprava a mírně nahoru), což je způsobeno změnou projekce do obrazové roviny. Porovnáním změn tvaru reálně změřeného obrazce s teoretickými simulacemi na obr. 2 a obr. 3 v kapitole 1.1.1 je patrná velmi dobrá shoda.



Obr. 32: Záznamy interferogramů z měření

Dílčí shrnutí:

Měřením kvality obrazu v různých polohách fokuséru se zjistilo, že osa fokuséru a osa dalekohledu nejsou souosé a dvěma metodami jsem určila velikosti korekčních úhlů, o které je třeba posunout osu fokuséru, aby se ztotožnily. Výsledné hodnoty pro posun v rovině osy x si jsou velice podobné tj. $0^{\circ}10'12'' \pm 30''$ (výpočet metodou Tilt) a $0^{\circ}9'24'' \pm 24''$ (vyhodnocení z interferenčního obrazce). Výsledky pro odklon v rovině osy y jsou $0^{\circ}3'48'' \pm 30''$ (výpočet metodou Tilt) a $0^{\circ}4'30'' \pm 24''$ (vyhodnocení z interferenčního obrazce). Z obr. 26 je viditelné, že dochází k poklesu hodnoty SR i přes malý odklon os.

Závěr

Práce se zabývala ověřením metody, která umožňuje určení kvality optických soustav včetně jejich mechanických komponent bez jejich demontáže. Konkrétně jsem se zaměřila na vyhodnocení kvality dalekohledu a na zkoumání vlivu rozosení osy fokuséru a osy optické soustavy.

Na příkladu reálně měřeného dalekohledu bylo ověřeno chování vybrané metody měření kvality optické soustavy. Naměřená hodnota Strehlova kritéria o velikosti 0,980 je velice podobná hodnotě Strehlova kritéria 0,982 uváděné výrobcem. Dalekohled se tak řadí mezi výtečné optické soustavy. Těžištěm práce byl popis chování fokuséru a vliv nesouososti jeho osy s osou optické soustavy na výslednou kvalitu obrazu. Tato situace byla modelována a následně ověřena na rozoseném fokuséru dalekohledu. Byl vybrán způsob pro určení korekce potřebné k ztotožnění os a ověřen nezávislou metodou. Obdržené výsledky si byly poměrně blízké a maximální odchylka mezi nimi byla menší než 15 %.

Vlivů, které mají vliv na výslednou kvalitu obrazu je samozřejmě více. Do měření by bylo vhodné zahrnout chování průhybu tubusu a jeho vliv na výslednou kvalitu obrazu dalekohledu, popřípadě měření v terénu na ustanovených astronomických dalekohledech pro ověření univerzálnosti zvolené měřící metody. Na to bych se ráda v budoucnu zaměřila.

Citovaná literatura

1. **Bajer, Jiří.** *Optika 2.* Univerzita Palackého Olomouc : Vladimír Chlup, 2018. ISBN: 978-80-907098-0-5.
2. **Hariharan, P.** *Basic od Interferometry.* 2nd edition. New York : Academic Press, 2007. ISBN: 978-0-12-373589-8.
3. **Langenbeck, P.** *Interferometry for Precision Measurment.* 1st edition. Washington : SPIE. Press, 2014. ISBN 978-0819491404.
4. **Malacara, Daniel.** *Optical shop testing.* 3th edition. Hoboken : Wiley, 2006. ISBN: 978-0-471-48404-2.
5. **Malacara, Daniel.** *Physical Opticas and Light Measurment.* New York : Academic Press Inc., 1988. ISBN: 0-12-475971-8.
6. **Řehoř, Zdeněk.** *Praktická astronomická optika.* Olomouc : Univerzita Palackého, 2015. ISBN: 978-80-244-4643-1.
7. **Steel, W.H.** Common path Interferometer Analysis. *Optica Acta: International Journal of Optics.* 1970, ISSN: 0030-3909.

Seznam příloh

P1	Protokol z měření kvality optického systému	I
P2	Protokol měření od výrobce	VII
P3	Skript výpočtu korekce fokuséru metodou „Tilt“.....	IX
P4	Skript výpočtu korekce ověřovací metodou „Projekce“.....	XI

Příloha P1: Protokol z měření kvality optického systému

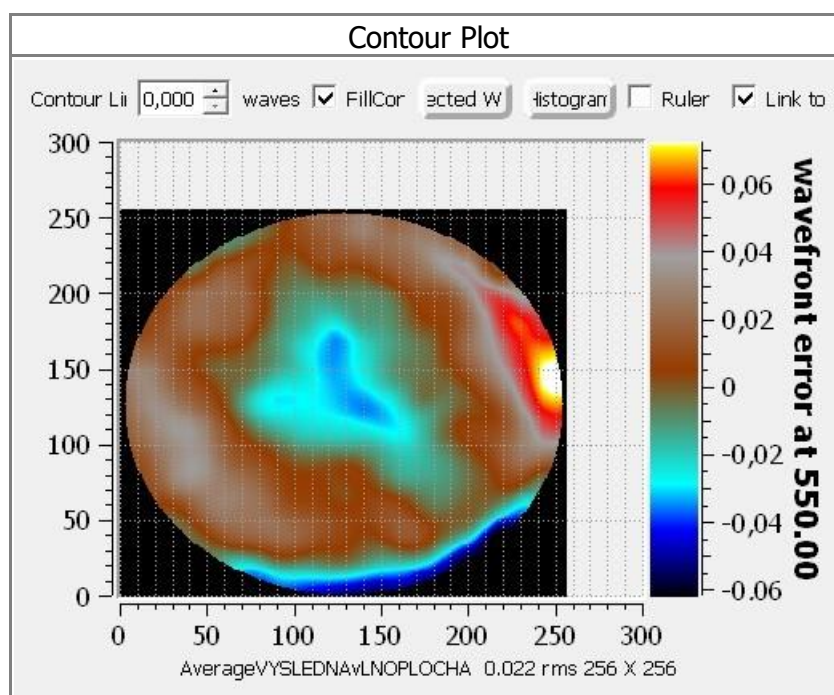
Interferometry Report for default st bře 2 2022 09:13:01DFTFringe

Diameter: 102.0 mm	ROC: 1000.0 mm	Fnumber: 4.9
RMS: 0.022 waves at 550.0 nm	Strehl: 0.980	Best Fit CC: -0.100
Desired Conic: 0	SANull: 0.0000	Waves per fringe: 1 Interferogram Wave length: 650nm

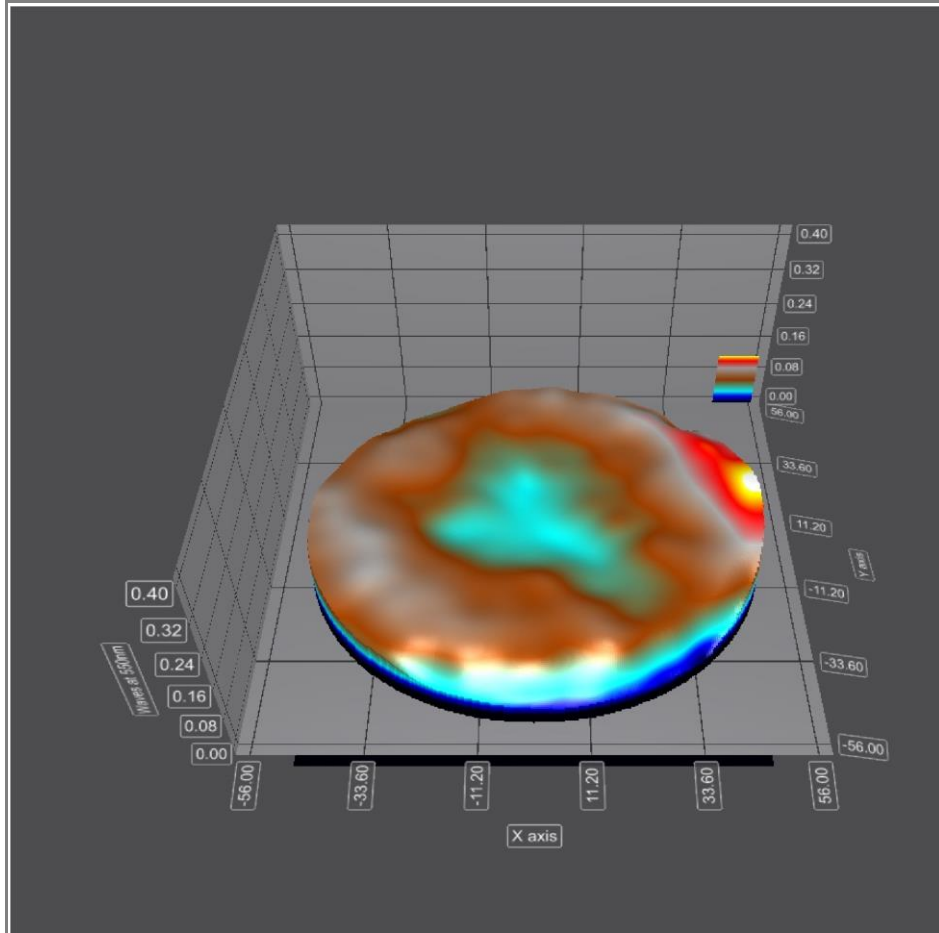
Zernike Values at interferogram wavelength

Term	Wyant	RMS		Term	Wyant	RMS	
Defocus	0.113	0.065	Disabled	26	0.013	0.004	
X Astig	0.023	0.010		27	0.028	0.008	
Y Astig	0.008	0.003		28	-0.002	-0.000	
astig Polar	0.025	9.594 Deg.		29	0.010	0.003	
X Coma	-0.079	-0.028	Disabled	30	-0.013	-0.003	
Y Coma	-0.089	-0.032	Disabled	31	0.003	0.001	
Spherical	-0.043	-0.019		32	-0.019	-0.004	
X Trefoi	0.010	0.003		33	-0.021	-0.005	
Y Trefoil	-0.008	-0.003		34	-0.040	-0.009	
X 2nd Astig	0.012	0.004		4th Spherical	-0.034	-0.010	
Y 2nd Astig	-0.014	-0.004		36	0.001	0.000	
X 2nd Coma	-0.009	-0.002		37	0.000	0.000	
Y 2nd Coma	-0.026	-0.008		38	-0.003	-0.001	
2nd Spherical	-0.038	-0.014		39	0.013	0.003	
X Tetrafoi	0.023	0.007		40	0.026	0.006	
Y Tetrafoi	0.005	0.002		41	0.004	0.001	

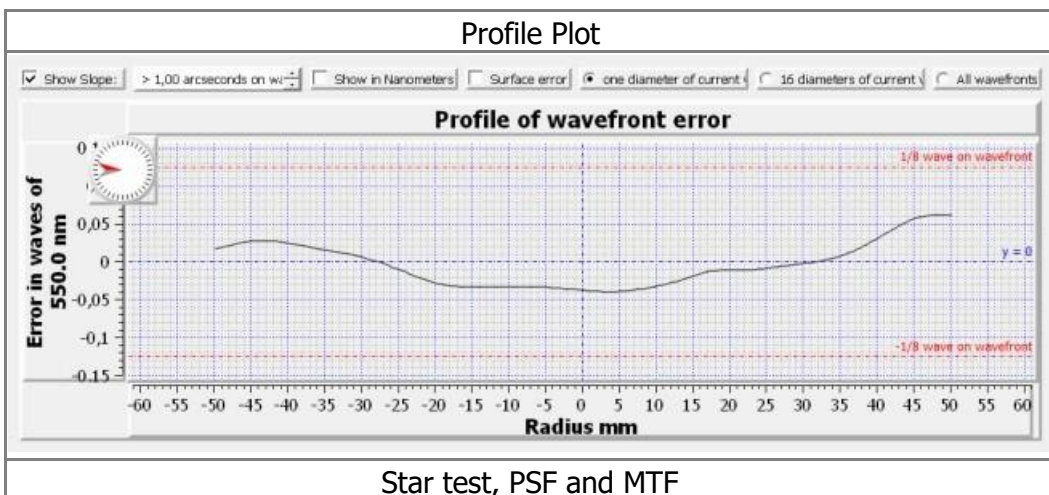
2nd X Trefoi	0.006	0.002		42	0.006	0.001	
2nd Y Trefoi	-0.018	-0.005		43	-0.021	-0.005	
3rd X Astig	0.003	0.001		44	-0.001	-0.000	
3rd Y Astig	-0.014	-0.004		45	-0.014	-0.003	
3rd X Coma	-0.023	-0.006		46	-0.015	-0.003	
3rd Y Coma	-0.037	-0.009		47	-0.035	-0.007	
3rd Spherical	-0.041	-0.014					
25	0.004	0.001					

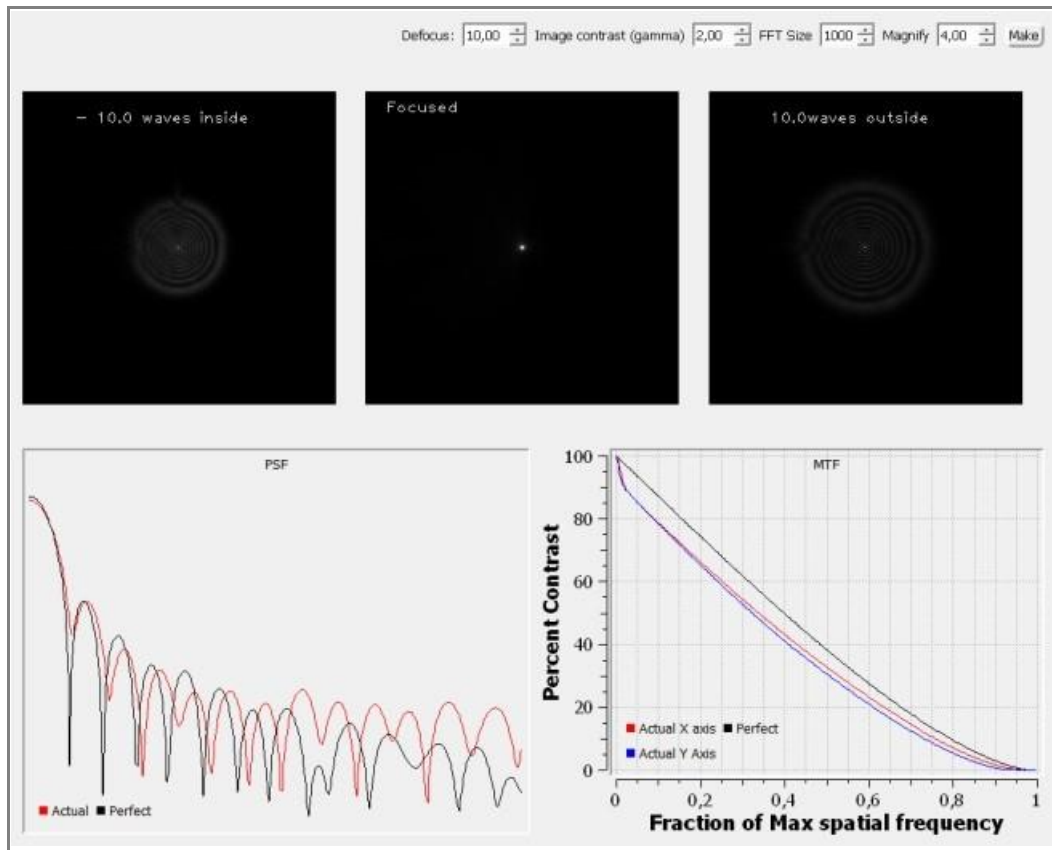


3D Surface Plot

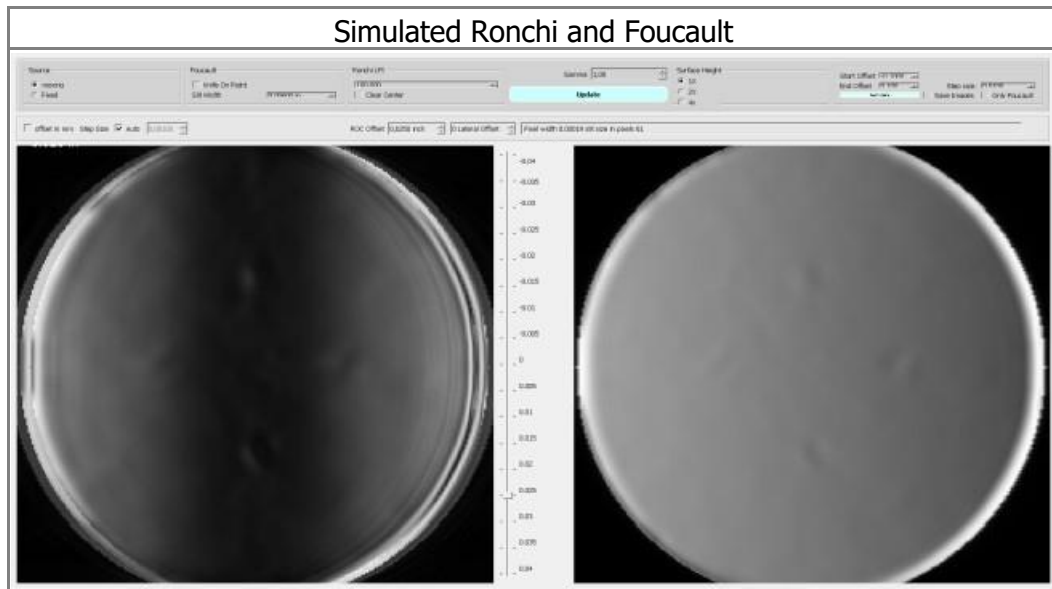


Profile Plot

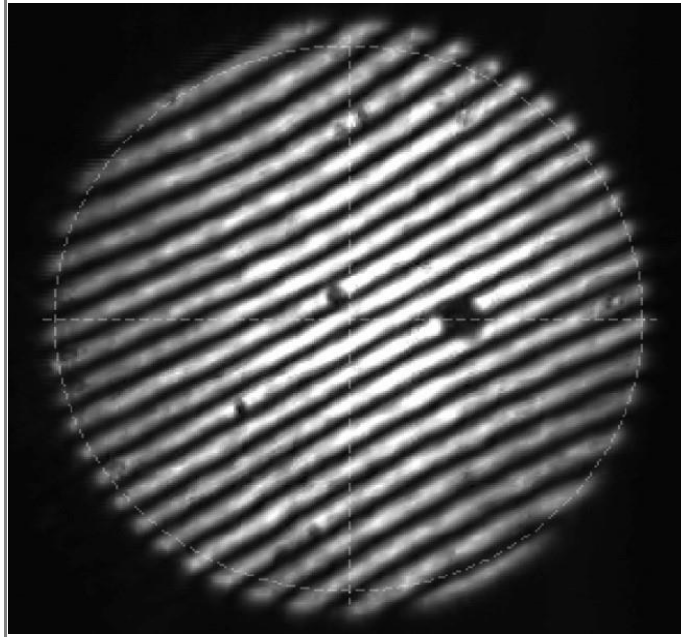




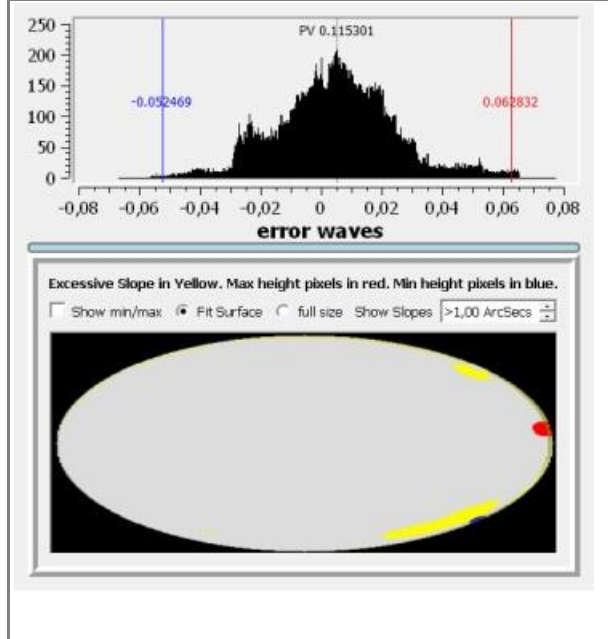
Simulated Ronchi and Foucault



typical interferogram



Pixel Histogram and Slope error



Příloha P2: Protokol měření od výrobce

Sky Warcher US



Arizona Page, 808 Coppermine Rd. (928)645-4340

Measurement protokol No: 1527/697-2010

category: CQ

Units: [] imperial [x] SI

Test wavelength 653.8 nm

Instrument: AD-102/500 Achromatic doublet

Serial: 012789-2010

Basic parameters

Focal length: 501.3 mm Lens Diameter: 102 mm

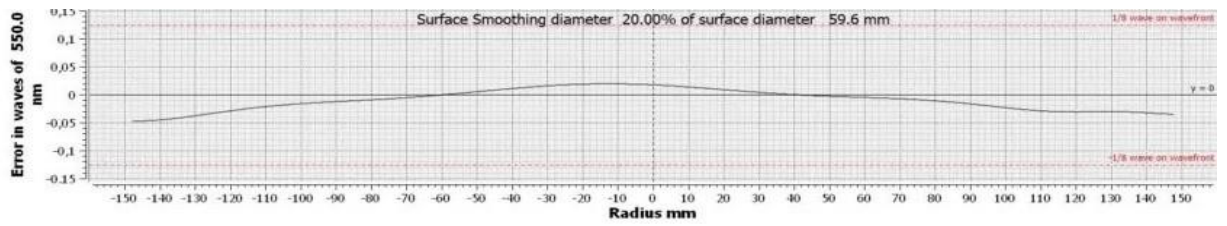
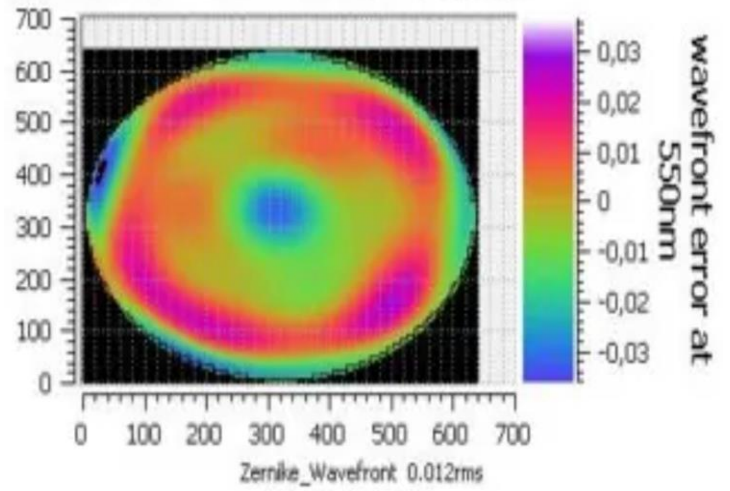
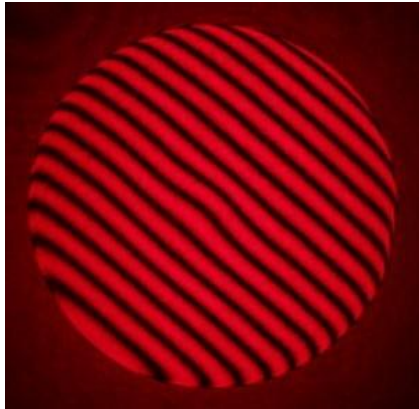
RESULTS

SR coefficient 0.982

RMS: 0.185 At 653.8 nm

ZERNIKE (RMS) X,Y tils: compens. Defocus: compens.

X Astig	0.008	X Astig, 2nd	0.015	X Astig, 3rd	0.028
Y Astig	0.004	Y Astig, 2nd	-0.010	Y Astig, 3rd	-0.005
X Coma	-0.034	X Coma, 2nd	-0.011	X Coma, 3rd	-0.020
Y Coma	-0.035	Y Coma, 2nd	-0.030	Y Coma, 3rd	-0.033
Spherical	-0.023	Spherical, 2nd	-0.035	Spherical, 3rd	-0.038



Measurement date: 21-01-2010

Protocol ID: 527/697-2010

Optical lab: 697-US-01



SKY-WATCH

Příloha P3: Skript výpočtu korekce fokuséru metodou „Tilt“

```
% ***** Obecné nastavení *****
%clear all;
format long %pro zobrazení že ty čísla se liší
lambda= 0.65; %vlnová délka [um]
rad = 2; %Rad polynomu
focal = 500; %Ohniskova vzdalenost objektivu [mm]
D = 102; % prumer objektivu [mm]
Pocet=8; %Pocet kroku v posuvu

% ***** FOKUSER *****
Vychazi=0; %Vychazi pozice fokusery
Shift = 5; %Posun fokusery mezi krokama [mm]
DelkaF=75; %delka fokusery

% ***** Zmereny X a Y TILT * vzorek *****
##ty = [-2.434 -2.173 -1.561 -1.048 -1.293 -1.394 2.004 2.504 3.075];
##tx = [-8.544 -5.740 -4.620 0.632 2.756 0.662 6.703 7.503 9.530];

%Nacist zmerena data
v=[0:1:Pocet-1];
mY=csvread('YTilt.csv'); %Tilt pro osu Y, zmereny
mX=csvread('XTilt.csv'); %Tilt pro osu x, zmereny
Mereni = size(mY, 1);
v=[Vychazi:Shift:Shift*(Pocet-1)];

for i = 1:Pocet, %Spocitat prumernou hodnotu jednotlivych kroku
    ty(i) = mean(mY(:, i));
    tx(i) = mean(mX(:, i));
end;

% ***** Prepocet do obrazove roviny *****
w = min(ty);
ty = ty - w; %kartezske souradnice - kompenzace ss
mY = mY -w;
w = min(tx);
tx = tx - w;
mX = mX -w;
ro = sqrt(ty.^2+tx.^2); %Polarni souradnice v rovine objektivu
FiY=asind(ty./2)./ro; % uhel v ose y
FiX=acosd(tx./2)./ro; % uhel v ose x
tx = tx.*lambda; % prepocet z nasobku lambda na [um]
ty = ty.*lambda;
mX = mX.*lambda;
mY = mY.*lambda;

% ***** Naklon fokusery *****
uhely = 3600*atand(ty/1000./DelkaF); %Uhel vertikální ["] - prumerne
uhelx = 3600*atand(tx/1000./DelkaF); %Uhel horizontální ["]

umY = 3600*atand(mY./1000./DelkaF); %Uhel vertikální ["] - zmerena data
umX = 3600*atand(mX./1000./DelkaF); %Uhel horizontální ["]

% ***** Aproximace dat *****
ti=[v(1):0.01:v(max(size(v)))];
Py=polyfit(v, ty, rad); %Vyska/sirka
Px=polyfit(v, tx, rad);
uPy=polyfit(v, uhely, rad); %Uhel
uPx=polyfit(v, uhelx, rad);

yi=polyval(Py, ti);
xi=polyval(Px, ti);
uyi=polyval(uPy, ti);
uxi=polyval(uPx, ti);

%Pro regulerni porovnaní je nutná kompenzace ss složky
##w=min(yi); yi = yi -w;
##%ty = ty-w;
##w=min(xi); xi = xi -w;
## %tx = tx-w;
##w=min(uxi); uxi = uxi - w; %uhelx=uhelx-w;
##w=min(uyi); uyi = uyi - w; %uhely=uhely-w;
```

```

% ***** Vykreslovani *****
figure(1)          %Projekce
hold on
zz=[0:0.01:8];
z=0;
%plot(v,z,'g') %vykreslení nuly
%xlim([-0.5,8.5])

for i = 1:Mereni,
    plot(v, mY(i,1:Pocet),'m. ');
    plot(v, mX(i,1:Pocet),'c. ');
end;

plot(v,ty,'r+', 'markersize',10)
plot(v,tx,'b+', 'markersize',10)

plot(ti,yi,'r')
plot(ti,xi,'b')
xlabel ("Poloha fokuseru [mm]")
ylabel ("Shift fokuseru [um]");
title ("Vyosení fokuséru vypočtené přes hodnoty Tilt");
ylim([-1,15])
xlim([-1,36])
hold off;

%close(2);

figure(2)          % Uhel
hold on
zz=[0:0.01:8];
z=0;

##plot(v,z,'g') %vykreslení nuly
##%xlim([-0.5,8.5])

for i = 1:Mereni,
    plot(v, umY(i,1:Pocet),'m. ');
    plot(v, umX(i,1:Pocet),'c. ');
end;

plot(v,uhely,'r+', 'markersize',10)
plot(v,uhelx,'b+', 'markersize',10)
plot(ti,uyi,'r')
plot(ti,uxi,'b')
xlabel ("Poloha fokuseru [mm]")
ylabel (["Chybovy uhel [ ' ' ]"]);
title ("Vyosení fokuséru vypočtené přes hodnoty Tilt");
hold off;
%ylim([-1,15])
xlim([-1,36])

% VÝPOČET KOREKCE
meanx = mean(tx); %pro korekci postacuje stredni hodnota chyboveho uhlu
meany = mean(ty);
opravax = 3600*tand(meanx/(max(v)-min(v)))
opravay = 3600*tand(meany/(max(v)-min(v)))

odchylkax=std(mX); %střední odchylka
odchylkay=std(mY);

rozptylx=sum(odchylkax)/max(size(odchylkax)) %rozptyl
rozptyly=sum(odchylkay)/max(size(odchylkay))

```

Příloha P4: Skript výpočtu korekce ověřovací metodou „Projekce“

```
%clear all;
%close('all');
%*****Obecne *****
focal = 500; %Ohniskova vzdalenost objektivu
Diam = 102; %Prumer objektivu
Pocet=8; % POcet zaznamu
lambda=0.650; % vlnova delka laseru[um]
N = 1; %Nasobek vlnove delky
    % vzdalenost mezi 2 maximy je d = lambda.N/2
rad = 2; % rad aproximacniho polynomu

% ***** FOKUSER *****
Vychozi=0; %Vychozi pozice fokuseru
Shift = 5; %Posun fokusery mezi krokama [mm]
DelkaF = 70; %Delka vedeni fiokuseru

%***** Kalibrace snimku *****
PPL = 13; %kalibrace - pocet pixelu na 1 periodu IF ve stredu obrazku
if (exist('Kalibr.csv')>0), %Pokud jiz bylo zkalibrovana, existuje zaznam
    PPL = csvread('Kalibr.csv');
else Kalibrace;
end;
mX = csvread('poziceX.csv');
mY = csvread('poziceY.csv');
Mereni = size(mY, 1);
v=[Vychozi:Shift:Shift*(Pocet-1)];

for i = 1:Pocet, %Spocitat prumernou hodnotu jednotlivych kroku
    y(i) = mean(mY(:, i));
    x(i) = mean(mX(:, i));
end;

% Kalibrace mereni
w = min(x); x = x-w; mX = mX-w;
x = x./PPL.*lambda;
mX = mX./PPL.*lambda;

y=-y; mY=-mY; %Y souradnice je cislovana v imshow z LH rohu !
w = min(y);
y = y-w; mY=mY-w;
y = y./PPL.*lambda;
mY = mY./PPL.*lambda;
```

```

% ***** Naklon fokuseru *****
uhely = 3600*atand(y/1000./DelkaF); %Uhel vertikální ["]
uhelx = 3600*atand(x/1000./DelkaF); %Uhel horizontální ["]
muhely = 3600*atand(mY/1000./DelkaF); %Uhel vertikální ["]
muhelx = 3600*atand(mX/1000./DelkaF); %Uhel horizontální ["]

% proložení křivkou pomocí metody nejmenších čtverců
vi=[v(1):0.1:v(Pocet)];

Py=polyfit(v,y,rad);
Px=polyfit(v,x,rad);
Puy=polyfit(v,uhely,rad);
Pux=polyfit(v,uhelx,rad);

yi=polyval(Py,vi);
xi=polyval(Px,vi);
uyi=polyval(Puy,vi);
uxi=polyval(Pux,vi);

%Pro regulerní porovnání je nutná kompenzace ss složky
w=min(yi); yi = yi -w; y = y-w;
w=min(xi); xi = xi -w; x = x-w;
w=min(uxi); uxi = uxi - w; uhelx=uhelx-w;
w=min(uyi); uyi = uyi - w; uhely=uhely-w;

% ***** Vykreslování *****

%Vychozí horizontální osa je v! x a y pak jsou pohyby vertikální a horizontální
figure(1)
hold on;
for i = 1:Mereni,
    plot(v, mY(i,1:Pocet),'m. ');
    plot(v, mX(i,1:Pocet),'c. ');
end;

plot(v,y,'r+', 'markersize',10);
plot(v,x,'b+', 'markersize',10);
plot(vi,yi,'r');
plot(vi,xi,'b');
xlabel ("Poloha fokuseru [mm]");
ylabel ("Shift fokuseru [um]");
title ("Vyosení fokuseru z posunu středů interferogramů");
ylim([-1,15])
xlim([-1,36])
hold off;

```



```

figure(2)
hold on;
for i = 1:Mereni,
    plot(v, muhely(i,1:Pocet),'m. ');
    plot(v, muhelx(i,1:Pocet),'c. ');
end;

plot(v, uhely, 'r+', 'markersize', 10);
plot(v, uhelx, 'b+', 'markersize', 10);
plot(vi, uyi, 'r');
plot(vi, uxi, 'b');
xlabel ("Poloha fokuseru [mm]");
ylabel (["Chybovy uhel [", "'", "]" ]);
title ("Vyosení fokuséru z posunu středů interferogramů");
ylim([-5, 40])
xlim([-1, 36])
hold off;

%Vypocet korekce pro fokuser -kolik uhyba vlastni fokuser
meanx = mean(x); %pro korekci postacuje stredni hodnota chyboveho uhlu
meany = mean(y);
opravax = 3600*tand(meanx/(max(v)-min(v)))
opravay = 3600*tand(meany/(max(v)-min(v)))

odchylkax=std(mX);
odchylkay=std(mY);

rozptylx=sum(odchylkax)/max(size(odchylkax))
rozptyly=sum(odchylkay)/max(size(odchylkay))

```