

Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci

KATEDRA OPTIKY



Měření rovinnosti metodou tří kalibrů pomocí
Shack-Hartmannova senzoru

Diplomová práce

Vypracoval: Bc. Filip Avrat

Studijní obor: Digitální a přístrojová optika

Vedoucí: RNDr. Ing. Jan Podloucký

Datum odevzdání: 5.5.2021

Bibliografická identifikace:

Jméno a příjmení autora:	Bc. Filip Avrat
Instituce:	Univerzita Palackého v Olomouci Přírodovědecká fakulta 17. listopadu 1192/12 771 46 Olomouc
Pracoviště:	Katedra optiky
Studijní obor:	Digitální a přístrojová optika
Název práce:	Měření rovinnosti metodou tří kalibrů pomocí Shack-Hartmannova senzoru
Vedoucí práce:	RNDr. Ing. Podloucký, Jan
Počet stran:	41
Klíčová slova:	Shack-Hartmannův senzor, měření rovinnosti

Abstrakt:

Cílem této práce je seznámit se s metodami měření tvaru optických ploch a experimentálně ověřit možnost využití Shack-Hartmannova senzoru pro absolutní měření tvaru rovinných ploch metodou tří kalibrů.

Bibliographical identification:

Author's first name and surname:	Bc. Filip Avrat
University:	Palacky University in Olomouc Faculty of Science 17. listopadu 1192/12 771 46 Olomouc
Department:	Department of Optics
Study programme:	Digital and instrumental optics
Title of thesis:	Flatness measurement of optical surfaces using the three flats method with Shack-Hartmann sensor
Thesis consultant:	RNDr. Ing. Jan Podloucký
Number of pages:	41

Abstract:

Goal of this thesis is to study methods of optical surfaces form measurement and to experimentally test the use of Shack-Hartmann sensor for the absolute flatness measurement of optical surfaces using three flats method.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci napsal samostatně s použitím uvedené literatury a s pomocí vedoucího této práce RNDr. Ing. Jana Podlouckého.

V Olomouci dne

.....

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. RNDr. Janu Podlouckému za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této diplomové práce. Práce byla zpracována s podporou studentského projektu „Moderní optika a její aplikace“ IGA_PrF_2018_003.

Obsah

1. Úvod	1
2. Shack-Hartmannův senzor.....	2
2.1. Popis funkce Shack-Hartmannova senzoru	2
2.2 Princip výpočtu analyzované vlnoplochy z jejího gradientu.....	3
3. Metody měření rovinnosti optické plochy.....	5
3.1. Kontaktní metody měření rovinnosti optické plochy	5
3.1.1. Newtonův interferometr	5
3.2. Bezkontaktní metody měření rovinnosti optické plochy	11
3.2.1. Fizeaův interferometr	11
3.2.2. Twyman-Greenův interferometr.....	13
4. Absolutní měření rovinnosti optických ploch	14
4.1. Absolutní měření rovinnosti optických ploch metodou tří kalibrů	15
4.2. Algoritmus absolutního měření metody tří kalibrů pomocí čtyř kombinací.....	17
5. Popis optické sestavy.....	23
6. Měření odchylek optických ploch	24
6.1. Měření odchylek optických ploch zakrýváním jednoho z optických prvků.....	24
6.2. Měření odchylek optických ploch separací z jednoho společného snímku	25
7. Výsledky.....	28
7.1. Shrnutí výsledků měření	32
8. Závěr.....	38
9. Seznam obrázků a tabulek	39
10. Seznam použité literatury	40
11. Seznam příloh.....	41

1. Úvod

Určování rovinnosti optických ploch je jeden ze základních úkolů optických měření. Při výrobě je plocha obrobena s nerovnostmi, a je proto nutné měřit odchylky takovéto vyrobené optické plochy od rovinného kalibru (etalonu), jehož tvar je definován s úzkými tolerancemi. Ve většině případů měření rovinné optické plochy znamená interferometrické porovnání daného optického prvku, ať už v kontaktu s kalibrem anebo bezkontaktně, např. pomocí Newtonova nebo Fizeauova interferometru.

Základním kamenem těchto metod je tedy znalost tvaru plochy jednoho prvku (kalibru) předem. Při absolutním měření rovinné optické plochy je největší otázkou, jak získat informace o daných plochách bez předešlé znalosti tvaru ploch kterékoliv z nich. Tento problém se řeší metodou tří kalibrů, které se vůči sobě porovnávají interferometricky. Další možností vzájemného porovnání ploch kalibrů umožňuje využití Shack-Hartmannova senzoru. Tato práce se věnuje právě prověření této možnosti.

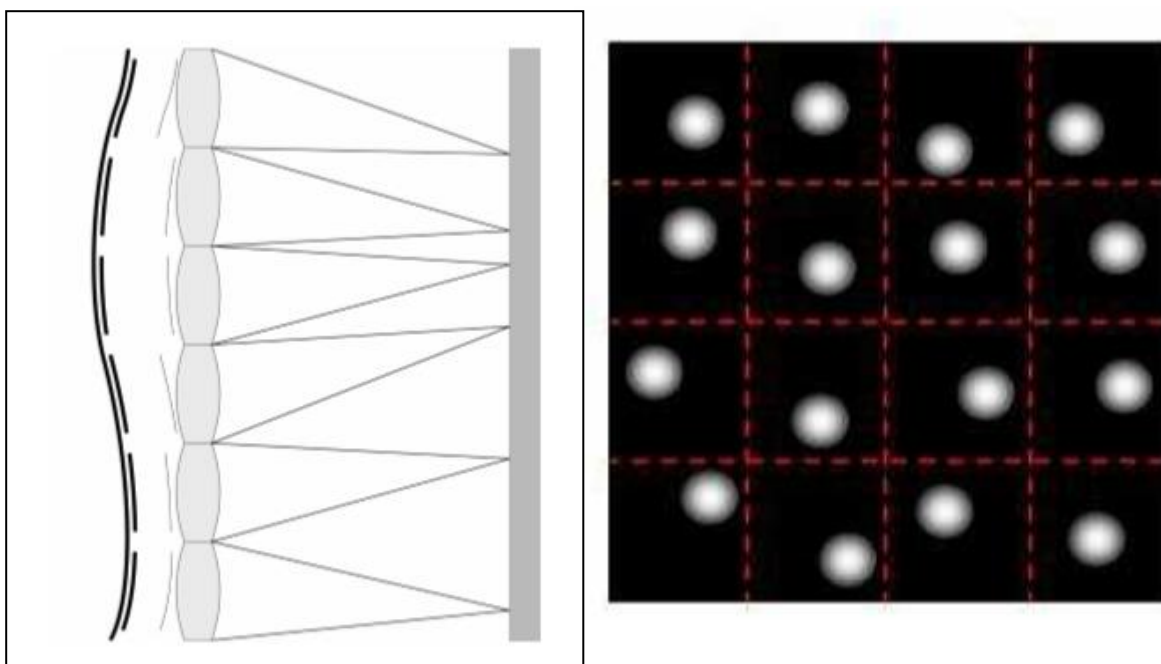
2. Shack-Hartmannův senzor

Shack-Hartmannův senzor je přístroj využívaný pro zjištění tvaru dopadající vlnoplochy. Původně byl vyvinut pro zlepšení kvality obrazu při sledování hvězd., jelikož zemská atmosféra omezuje kvalitu a expoziční dob pořízených obrazů hvězd [1].

V dnešní době však již nachází uplatnění v metrologii optických systémů a v některých případech nahrazuje interferometrické systémy [2].

2.1. Popis funkce Shack-Hartmannova senzoru

Monochromatický, kolimovaný svazek dopadající na Shack-Hartmannův senzor je navzorkován pomocí pole mikročoček, které fokusují dopadající světlo do ohniskové roviny, kde je umístěn obrazový snímač. Je-li dopadající svazek dokonale kolimovaný, tak je výsledný snímek vytvořen z pravidelného pole bodů, kde každý bod odpovídá ohnisku dané mikročočky. Vlnoplocha je pak vypočítána z gradientu v každém z fokusovaných bodů, které jsou umístěny v mřížce odpovídající velikosti apertur mikročoček a její vzdálenosti od detektoru [2].



Obr 1: Princip Shack-Hartmannova senzoru (převzato z [2], [3])

Je-li vlna nějakým způsobem deformovaná, tak vytvořené stopy jsou vůči původním posunuté úměrně, vzhledem k průměrné hodnotě fázového gradientu na celém poli mikročoček. Díky zmíněným posunům je možné získat mapu fázových gradientů, ze které lze určit fázovou distribuci vlny před polem mikročoček (obr. 1) V případě, že dopadající vlnoplocha je hodně deformovaná, může nastat situace, kdy se fokusované stopy mikročoček zobrazí mimo svůj daný region subapertury [3].

Výhodou Shack-Hartmannova senzoru je jeho velký dynamický rozsah, který není závislý na vlnové délce, ale na velikosti a ohniskové vzdálenosti mikročoček. Jeho citlivost roste s delší ohniskovou vzdáleností a jeho prostorové rozlišení roste s počtem mikročoček. [3].

2.2 Princip výpočtu analyzované vlnoplochy z jejího gradientu

Pro výpočet tvaru analyzované vlnoplochy je nejdříve nutné zjistit změnu polohy těžišť fokusovaných bodů mezi referenční a měřenou vlnoplochou. Poloha těžiště musí být opravdu přesně vypočítána pro zajištění vysoké přesnosti měření.

Pro zjištění polohy bodů jednotlivých mikročoček je detektor rozdělen na pole subapertur, ve kterých se hledané body nachází. Pozice bodů se určuje jako těžiště detekovaného profilu intenzity daného bodu v subapertuře, který je dán vztahem

$$\begin{aligned} x_c &= \frac{\sum_{i=i_0}^{i_1} \sum_{j=j_0}^{j_1} i \delta_x I(i, j)}{\sum_{i=i_0}^{i_1} \sum_{j=j_0}^{j_1} I(i, j)}, \\ y_c &= \frac{\sum_{i=i_0}^{i_1} \sum_{j=j_0}^{j_1} i \delta_y I(i, j)}{\sum_{i=i_0}^{i_1} \sum_{j=j_0}^{j_1} I(i, j)}, \end{aligned} \quad (1)$$

kde $I(i, j)$ je hodnota intenzity bodu $I(i, j)$ se souřadnicemi (x_i, y_i) a δ_x, δ_y jsou vzdálenosti mezi jednotlivými pixely detektoru ve směru osy x, y . Do výpočtu se kvůli odstranění šumu a jiných negativních vlivů zahrnují jen hodnoty překračující detekční práh.

Za předpokladu kruhových mikročoček s průměrem D , šířkou $\delta = \delta_x = \delta_y$, ohniskovou vzdáleností f a vlnové délky dopadajícího světla λ , je možné aproximací získat vzorec pro maximální hodnotu gradientu vlnoplochy (δ_x, δ_y)

$$\left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)_{max} = \left(\frac{\partial W}{\partial y}\right)_{max} = \frac{\Delta x_{max}}{f} = \frac{\Delta y_{max}}{f} = \frac{\delta - 2,44 \frac{f\lambda}{D}}{2f} \quad (2)$$

Pro výpočet výsledné vlnoplochy ze znalosti maximálního gradientu se nejčastěji v praxi využívá dvoudimenzionální polynomiální aproximace. Vlnoplochu $W(x, y)$ je možné vyjádřit polynomy P_k jako

$$W(x, y) = \sum_{k=0}^K C_k P_k(x, y) \quad (3)$$

kde C_k jsou koeficienty a K je počet polynomů. Touto metodou je možné získat informaci o vlnoploše z celé apertury. Nejčastěji se využívají Zernikeho, Čebyševovy, Seidelovy nebo Legendreovy polynomy.

Výsledný vztah pro polohu těžišť má pak následující tvar

$$\begin{aligned} \frac{\Delta x_i}{f} &= \frac{\partial W(x_i, y_i)}{\partial x} = \sum_{k=0}^K C_k \frac{\partial P_k(x_i, y_i)}{\partial x}, \\ \frac{\Delta y_i}{f} &= \frac{\partial W(x_i, y_i)}{\partial y} = \sum_{k=0}^K C_k \frac{\partial P_k(x_i, y_i)}{\partial y} \end{aligned} \quad (4)$$

kde $i = 1, 2, \dots, N$, N je počet bodů, kde změna polohy těžiště $\Delta x_i, \Delta y_i$ je známá. Aproximační koeficient C_k je možné vypočítat pomocí metody nejmenších čtverců [2].

3. Metody měření rovinnosti optické plochy

Pro měření rovinnosti optické plochy je obvykle nutné využít optického kalibru a pro bezkontaktní měření i monochromatického zdroje. Referenční plocha kalibru musí být pravidelně kontrolována pro zajištění přesnosti měření. Citlivosti měření se obvykle pohybují v rozmezí $\lambda/10 \dots \lambda/100$, kde λ je vlnová délka používaného zdroje záření. Monochromatické záření je možné získat z rtuťových výbojek, laserů atd. Pokud používaný zdroj má čárové spektrum s více vlnovými délkami, je nutné použít interferenční nebo absorpční filtr pro odfiltrování nežádoucích čar. Pro lepší pozorování je důležité, aby osvit sestavy byl kolmý a aby byla sestava odstíněna pro odstranění parazitních odrazů [5].

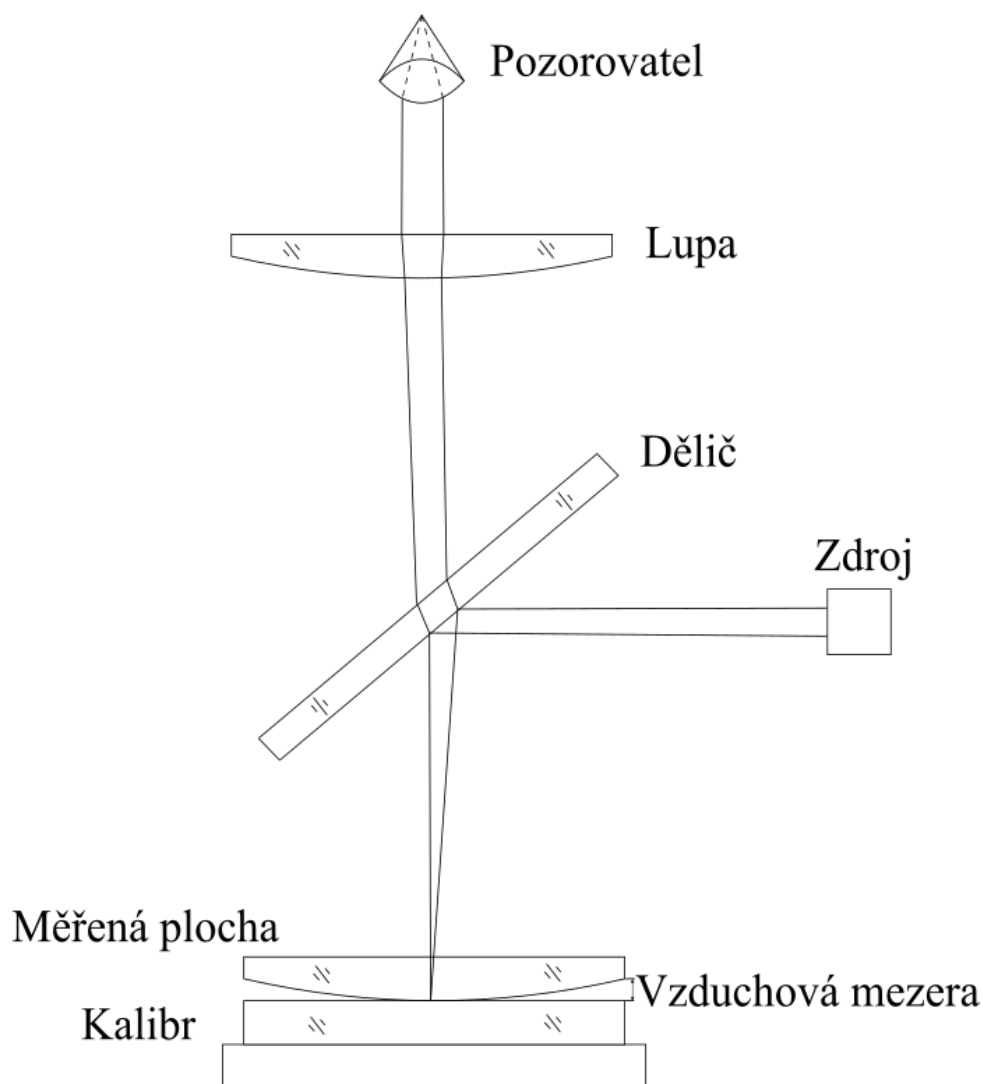
3.1. Kontaktní metody měření rovinnosti optické plochy

3.1.1. Newtonův interferometr

Pro jednoduchost lze považovat jakékoliv uspořádání dvou optických ploch v kontaktu, osvětlených monochromatickým zářením za Newtonův interferometr. Jedna z realizací Newtonova interferometru je zobrazena na obr. 2. Pro lepší pozorování Newtonových kroužků je výhodné použít lupu [5].

Před měřením je nutné očistit optické plochy od jakýchkoliv nečistot. Čistota optických ploch je důležitá, jelikož neodstraněné nečistoty mohou poškodit optickou plochu a mít vliv na přesnost měření. Po očištění optických ploch je navíc nutné zajistit, aby kalibr a měřený optický prvek dosáhly stejné teploty. Kalibr je většinou vyroben ze skla, které má nízkou teplotní roztažnost a měl by být odolný vůči teplotním odchýlkám. Měřené optické prvky však mohou být vyrobeny téměř z jakéhokoliv optického materiálu a teplotní gradienty mohou ovlivnit interferenční obrazec. Je tedy důležité zajistit stabilní teplotní podmínky i při průběhu měření [5].

Při měření vzniká mezi kalibrem a měřeným optickým prvkem vzduchová mezera, jejíž tloušťka bývá nanejvýš v jednotkách vlnové délky. V Newtonově interferometru zkoumáme nerovnoměrnost vzduchové mezery pozorováním a následným vyhodnocením Newtonových kroužků, které vznikají interferencí vlny odražené od plochy měřeného optického prvku a vlny odražené od optické plochy kalibru [4].



Obr 2: Newtonův interferometr (přepřacováno z [4])

Provedme měření rovinného kalibru a rovinného optického prvku, jak je ilustrováno na obr. 3. Optické plochy nejsou paralelní, takže vzduchová mezera je na levé straně menší než na pravé, tzn. že dva optické prvky mají mezi sebou úhel α , který je velmi malý. Jestliže vzduchová mezera má hodnotu x , pak optický dráhový rozdíl (ODR) dvou odražených paprsků je roven $2x$. Fázový rozdíl mezi těmito paprsky tedy vytvoří tmavý proužek, pokud

ODR je násobkem používané vlnové délky. Pokud tedy $x = 0$, vytvoří se tmavý proužek [4].

Tmavé proužky se dají tedy popsat jako

$$2\alpha x = m\lambda, \quad (5)$$

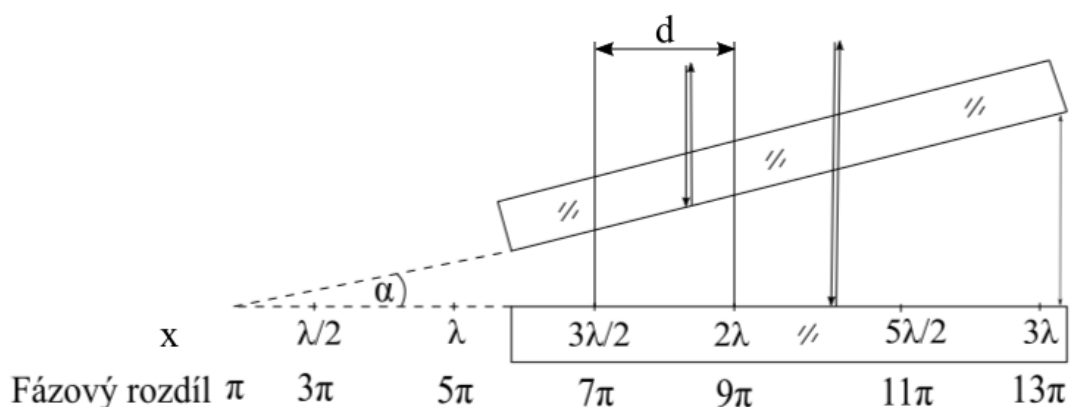
kde m je celočíselný koeficient. Světlé proužky mohou být popsány následujícím tvarem

$$2\alpha x + \frac{\lambda}{2} = m\lambda, \quad (6)$$

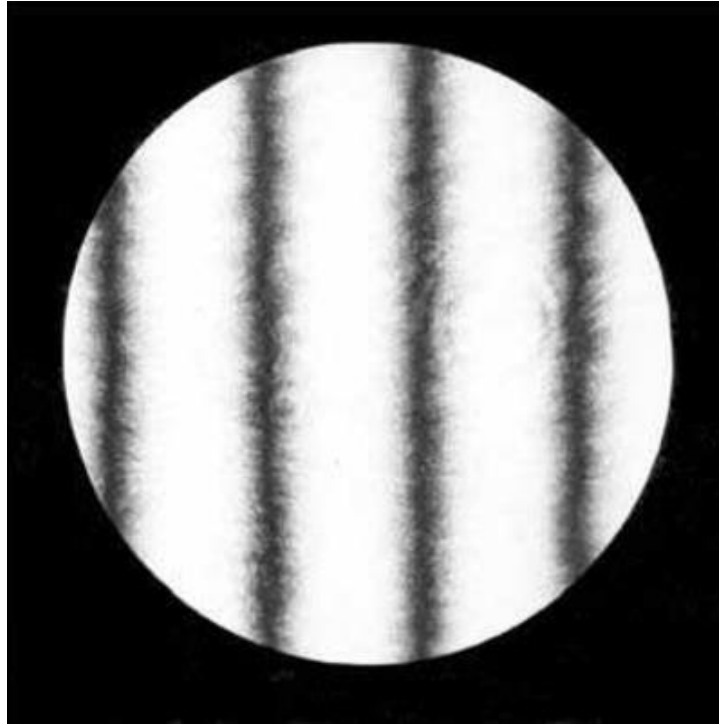
Obě tyto rovnice popisují systém rovnoměrně rozložených proužků a vzdálenost d mezi těmito proužky je

$$d = \frac{\lambda}{2\alpha} \quad (7)$$

Výsledný interferenční obrazec dvou rovinných optických prvků v kontaktu, mezi kterými se vytvoří vzduchová komora můžeme pozorovat na obr. 4 [4].



Obr 3: Popis vzniku interferenčních proužků. Fázové rozdíly ilustrují polohy tmavých proužků (přepřacováno z [4])



Obr 4: Ukázka interferenčního obrazce pro kvalitní optickou rovinnou plochu [4]

Zbývá prozkoumat měření nerovinného prvku. Odchylka sférické plochy s velkým poloměrem křivosti R je rovna $s^2/2R$, kde s je vzdálenost měřená od středu symetrie. Optický dráhový rozdíl je tedy $s^2/2 + \lambda/2$ a pozice tmavých proužků je dána vztahem

$$\frac{s^2}{R} = m\lambda, \quad (8)$$

Vzdálenost m -tého tmavého proužku je rovna

$$s_m = \sqrt{mR\lambda}, \quad (9)$$

Z tohoto vyplývá že vzdálenost mezi $(m + 1)$ a m -tým proužkem je

$$s_{m+1} - s_m = \sqrt{R\lambda}(\sqrt{m+1} - \sqrt{m}), \quad (10)$$

A podobně vzdálenost mezi $(m + 2)$ a $(m + 1)$ proužkem je

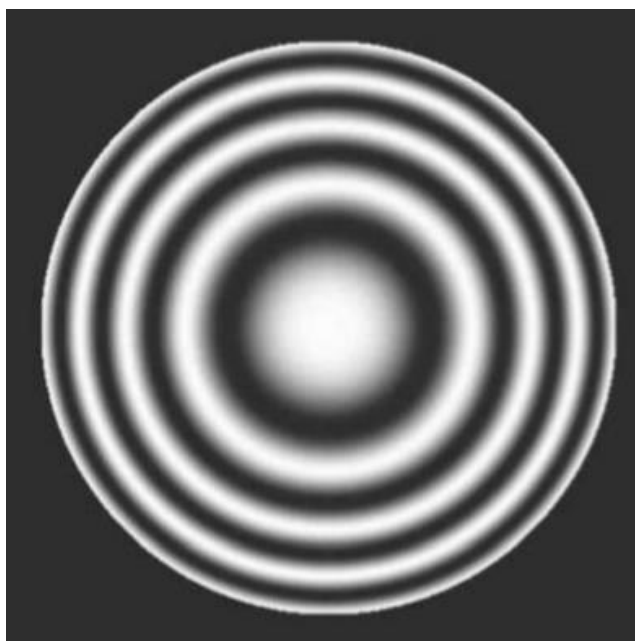
$$s_{m+2} - s_{m+1} = \sqrt{R\lambda}(\sqrt{m+2} - \sqrt{m+1}), \quad (11)$$

Z rovnic (10) a (11) můžeme vyjádřit poměr

$$\frac{s_{m+1} - s_m}{s_{m+2} - s_{m+1}} \approx 1 + \frac{1}{2m}, \quad (12)$$

Při pozorování vyšších řádů m se interferenční proužky jeví, že jsou od sebe stejně vzdáleny, nicméně ve skutečnosti se vzdálenost s rostoucími řády zmenšuje.

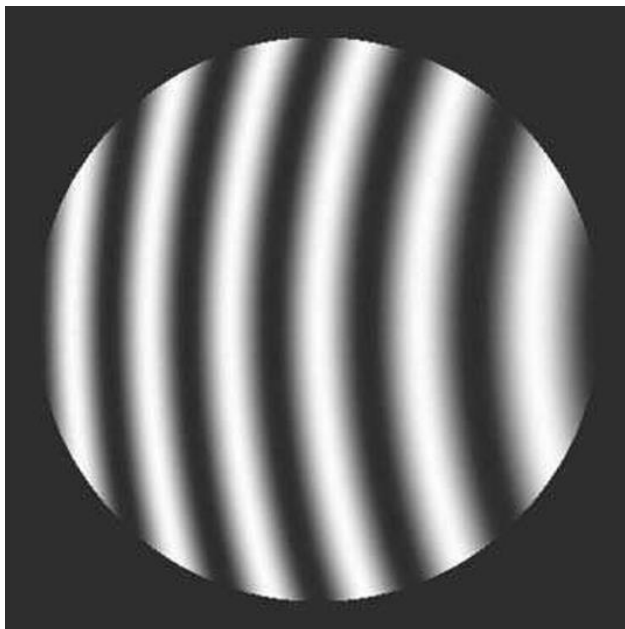
Pro zjištění, zda je plocha sférická, je nutné manipulovat s optickými prvky takovým způsobem, aby se daly pozorovat interferenční proužky s nižšími řády m . Na obr. 5 jsou zobrazeny Newtonovy interferenční kroužky pro maximální hodnotu $s^2/2R = 2\lambda$. Pro maximální hodnotu $s^2/2R = \lambda/2$ lze pozorovat pouze jeden Newtonův kroužek, pro který je maximální odchylka $\lambda/2$. Pokud je maximální odchylka menší než $\lambda/2$ je potřeba posunout střed symetrie interferenčních kroužků vhodným přitlačením na měřený kus [4].



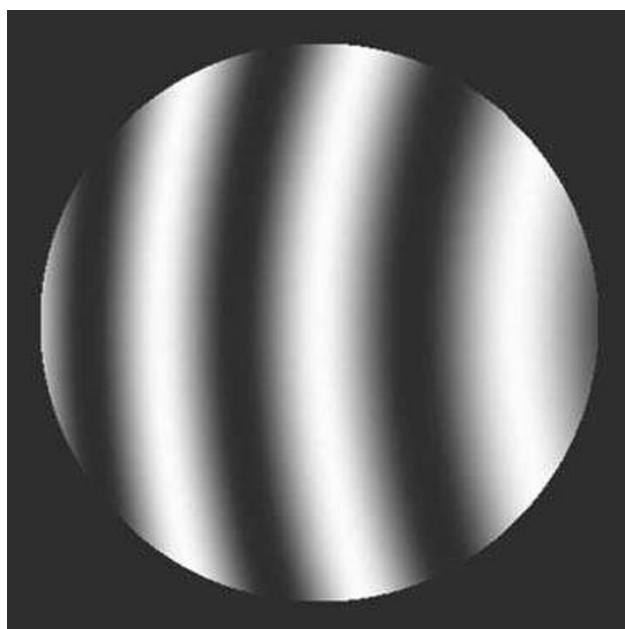
Obr 5: Negativ interferenčního obrazce pro sférickou plochu s maximální odchylkou od roviny 2λ [4]

Tímto způsobem lze jednoduše určit, zda je plocha konvexní nebo konkávní. Je-li plocha konvexní střed interferenčního proužků se posune směrem k tlakovému bodu. Je-li plocha konkávní, střed interferenčních proužků se naopak posouvá směrem od tlakového bodu [4].

Druhým způsobem, jak zjistit jakého charakteru je daná plocha, je zatlačení na střed měřeného kusu. Jestli je plocha konvexní, pak střed interferenčních proužků se neposune, ale zvětší se jejich průměr [4].



Obr 6: Newtonovy kroužky pro sférickou plochu s velkým poloměrem křivosti a maximální odchylkou $\lambda/4$ od rovinné plochy [4]



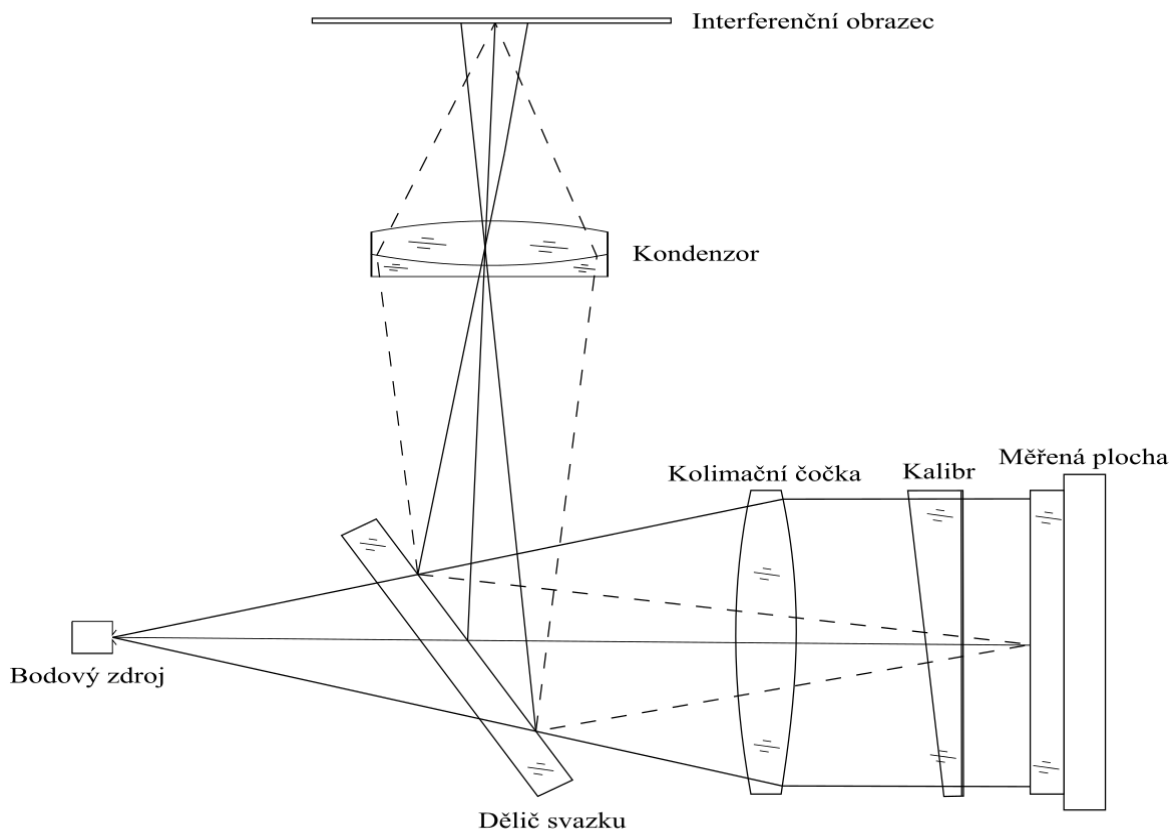
Obr 7: Newtonovy kroužky pro sférickou plochu s velkým poloměrem křivosti a maximální odchylkou $\lambda/8$ od rovinné plochy [4]

3.2. Bezkontaktní metody měření rovinnosti optické plochy

3.2.1. Fizeaův interferometr

Při měření Newtonovým interferometrem vzduchová mezera mezi kalibrem a měřeným prvkem byla velmi malá, v řádech vlnové délky. V jiných případech je výhodné vyhodnocovat interferenční obrazec v situaci, kdy vzduchová mezera je mnohem větší. Tím se zmenší potřeba důkladně čistit optické plochy a je menší pravděpodobnost, že se optické plochy poškodí. Soustava má však větší nároky na monochromaticnost a kolimaci svazku v optické soustavě interferometru. Takovým interferometrem je Fizeaův interferometr [4].

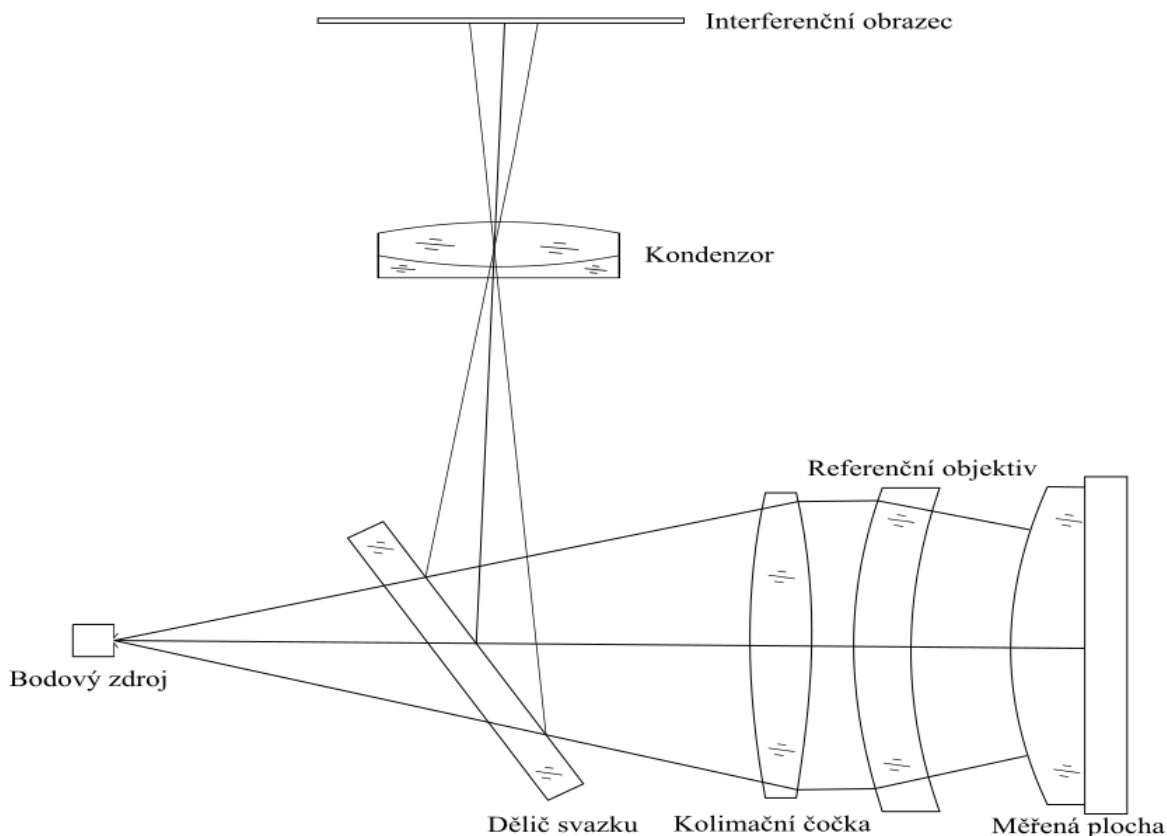
Fizeaův interferometr je jedním z nejvyužívanějších interferometrů pro testování optických prvků. Světlo ze zdroje se fokusuje do dírkové clony v ohniskové rovině kolimátoru. Optický kalibr je obvykle přichycen napevno ke konstrukci interferometru a je nastaven tak, aby se obraz dírkové clony zobrazoval zpět na clonu. Pro izolaci odrazu od zadní strany kalibru je buď zadní strana opatřena antireflexní vrstvou anebo je optický kalibr ve tvaru klínu. Pro sledování interferenčních proužků je mezi dírkovou clonou a kolimační čočku postaven dělič svazku. Měřená optická plocha je položena na optický stolek pod kalibr. Optický stolek je vybaven šrouby, kterými se mění jeho náklon a tím se mění klínovitost vzduchové mezery. Pokud je klínovitost velká, v ohniskové rovině kolimační čočky se objeví dva obrazy dírkové clony, jeden tvořený odrazem od optického kalibru a druhý od měřené optické plochy. Náklonem měřeného prvku je možné zajistit překryv těchto dvou obrazů a následně vyhodnocovat v zobrazovací rovině interferenční proužky. Jemnou úpravou náklonu je možné změnit směr a počet interferenčních proužků. Schéma interferometru je na obr. 8 [4].



Obr 8: Schéma interferometru pro měření rovinných ploch (přepřacováno z [4])

Jestliže má optická soustava interferometru nebo měřený prvek vysokou odrazivost a kalibr nemá žádnou vrstvu, pak dva vytvořené obrazy budou mít rozdílné intenzity a výsledný interferenční obrazec bude mít malý kontrast. Pro získání stejných intenzit obou odrazů musí být i odrazivost měřené optické plochy velmi nízká [4].

Využitím Fizeauova interferometru se dají také měřit sférické optické plochy. Referenční plocha opět není opatřena antireflexní vrstvou. Kolimovaný svazek opět prochází přes optický kalibr, který může být buď rovinný anebo sférický a dopadá na měřenou optickou plochu. Střed křivosti sférického kalibru musí být ve stejném místě, ve kterém se nachází střed křivosti měřené sférické optické plochy a paprsky měřicího svazku musí procházet kolmo k referenční kulové ploše. Oba odrazy následně dopadají na zobrazovací rovinu interferometru, kde se vyhodnocují interferenční proužky. Jedna z realizací této sestavy je zobrazena na obr. 9 [4].



Obr 9: Ilustrace interferometru pro měření konvexních ploch (přepřacováno z [4])

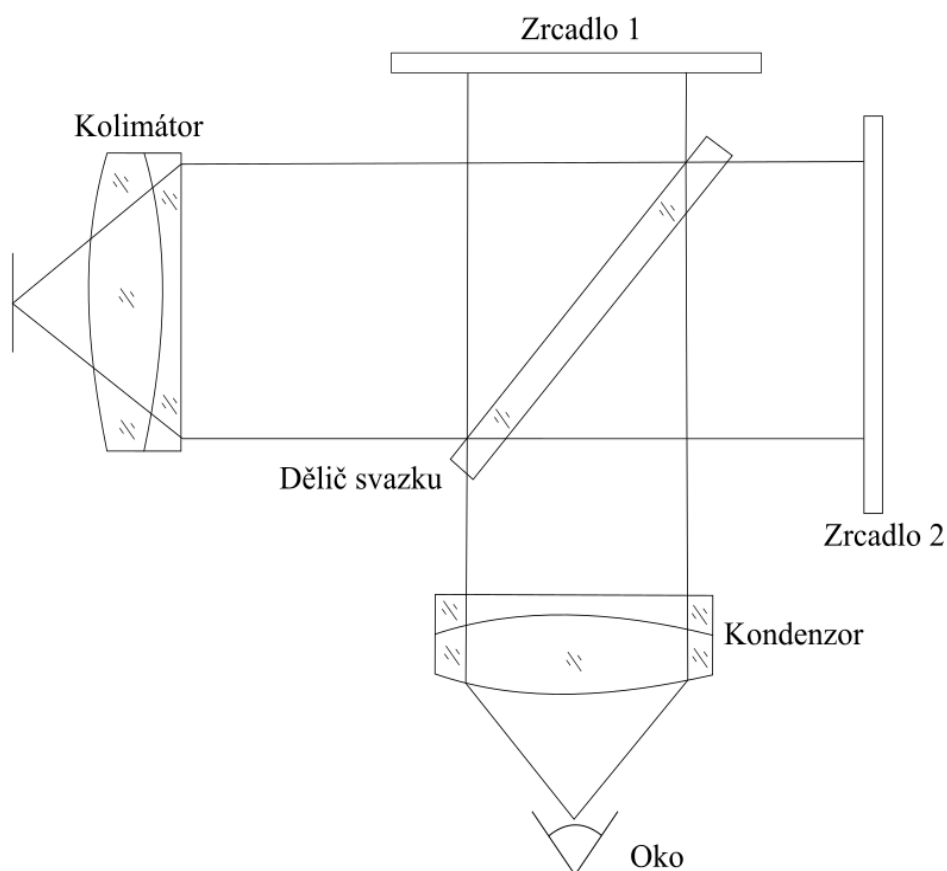
3.2.2. Twyman-Greenův interferometr

Dalším způsobem, jak lze měřit optické prvky bezkontaktně je Twyman-Greenův interferometr. Jde o modifikaci Michelsonova interferometru. Princip interferometru je zobrazen na obr. 10.

Monochromatické záření prochází přes dírkovou clonu nacházející se v ohnisku kondenzoru. Kolimovaný svazek se šíří na dělič svazku D , který je nakloněn o 45° . Svazek se tu částečně odráží na zrcadlo $Z1$ a částečně prochází na zrcadlo $Z2$. Zrcadlo $Z2$ je možné nahradit testovaným prvkem. Odražené svazky spolu následně interferují na stínítku. Úpravou vzdáleností $DZ1$ a $DZ2$ je možné zajistit, aby optické dráhy obou větví byly stejné. Jemným nakláněním jednoho z obou zrcadel je možné docílit toho, aby dva vzniklé obrazy clony dopadaly na sebe. Na stínítku následně vyhodnocujeme interferenční proužky. Z interferenčních proužků lze pak určit tvar optické plochy [5].

Tento interferometr je užitečný pro měření optických klínů a objektivů. V případě měření objektivů je do sestavy interferometru zakomponováno precizní kulové zrcadlo do takové

vzdálenosti od měřeného prvku, aby střed křivosti zrcadla souhlasil s polohou ohniska objektivu [5].



Obr 10: Ilustrace složení sestavy Twyman-Greenova interferometru (přepřacováno z [5])

4. Absolutní měření rovinnosti optických ploch

V předchozích kapitolách se zjišťovala rovinnost optických ploch porovnáváním měřeného optického prvku s rovinným kalibrem. Otázkou je, jak změřit tvar samotného kalibru [4].

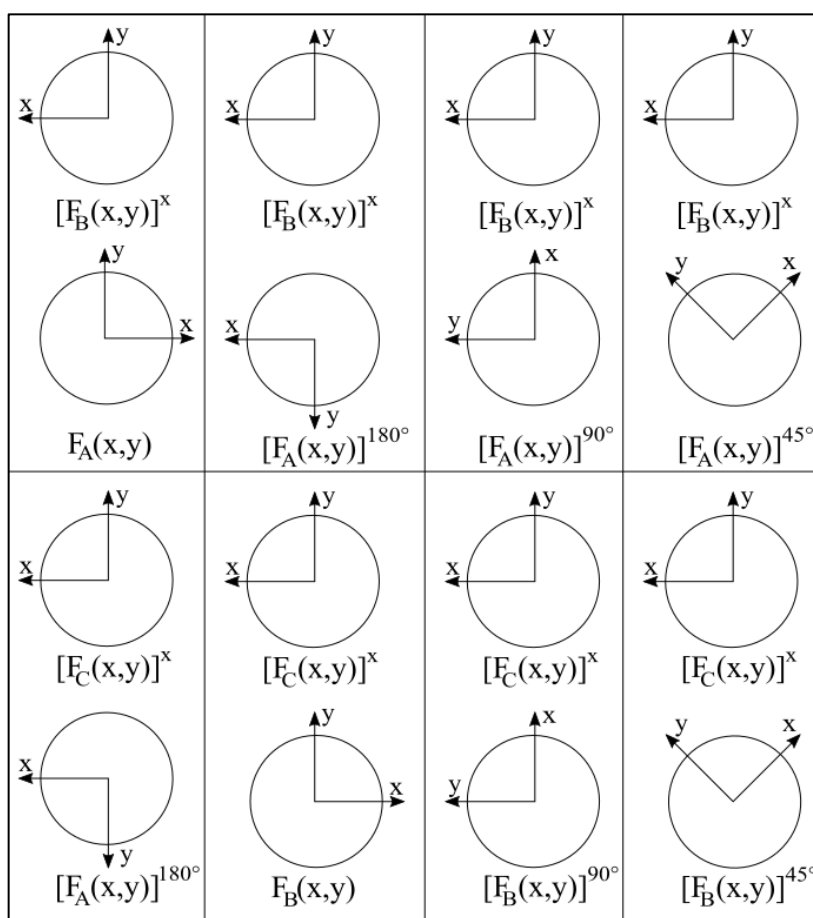
Jednou z možností je vytvořit si jako referenci rovinu z kapaliny. Jako referenci lze použít kapaliny, které jsou čiré a mají vysoké vnitřní tření, například glycerin, minerální oleje a čistý ricinový olej. Voda není vhodná kvůli své nízké viskozitě. Rovina, která je vytvořena pomocí vhodné tekutiny může mít odchylku menší než $\lambda/100$. V praktickém využití se však při měření s takovou referencí vyskytuje mnoho problémů. Hlavním problémem je odstranění vlivu vibrací na kapalinu. Je také důležité odstranit z vyhodnocení

oblasti u stěn nádoby, ve které je kapalina uložena. Dalším negativním vlivem na vyhodnocení mají prachové částice dopadající na kapalinu [4].

4.1. Absolutní měření rovinnosti optických ploch metodou tří kalibrů

V tradiční metodě tří kalibrů jsou roviny porovnávány v párech na Fizeauově interferometru. Převrácením a rotací prvků vůči sobě se získají profily měřených ploch jen pro ty průběhy odchylek od roviny, které disponují vhodnou symetrií. Bylo navrženo několik metod pro přesnější zjištění profilu celého povrchu.

V literatuře je popsáno několik metod absolutního měření rovinnosti porovnáváním tří kalibrů. Jednou z nich je porovnání tří kalibrů v osmi kombinacích. K dispozici jsou tři prvky, které se měří v párech v osmi kombinacích. Prvky v páru jsou umístěny na sebe s tím, že vrchní prvek je převrácen přes osu y a spodní prvek je možné rotovat o úhel θ .



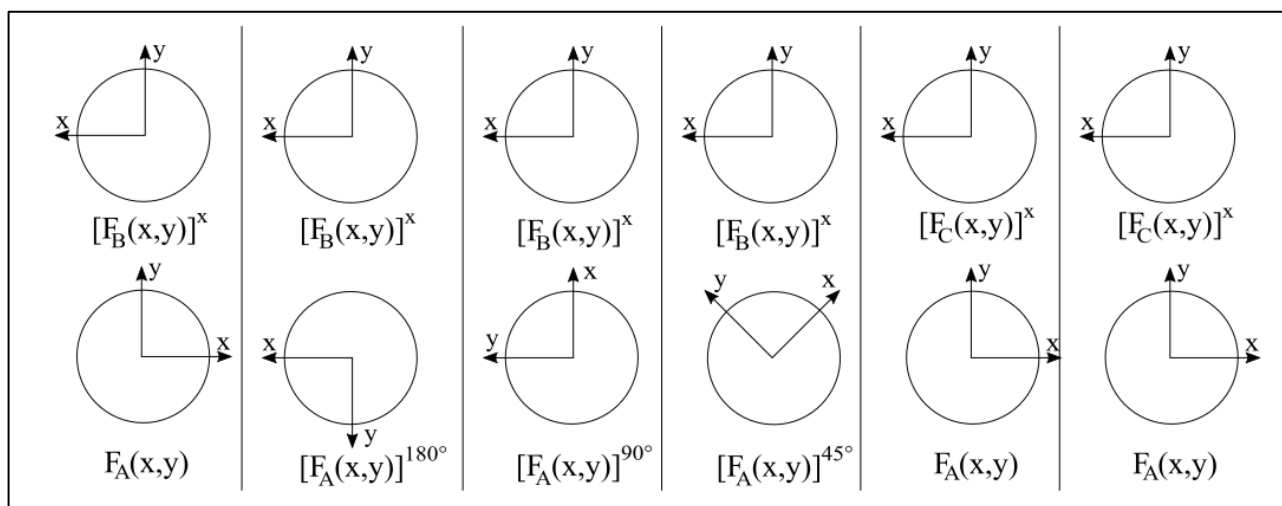
Obr 11: Osm kombinací třech měřených prvků (převzato z [4])

Optický dráhový rozdíl vytvářející interferenční obrazce pro osm kombinací je pak možné vyjádřit jako

$$\begin{aligned}
 G_1(x, y) &= [F_B(x, y)]_x - F_A(x, y) \\
 G_2(x, y) &= [F_B(x, y)]_x - [F_A(x, y)]_{180} \\
 G_3(x, y) &= [F_B(x, y)]_x - [F_A(x, y)]_{90} \\
 G_4(x, y) &= [F_B(x, y)]_x - [F_A(x, y)]_{45} \\
 G_5(x, y) &= [F_C(x, y)]_x - [F_A(x, y)]_{180} \\
 G_6(x, y) &= [F_C(x, y)]_x - F_B(x, y) \\
 G_7(x, y) &= [F_C(x, y)]_x - [F_B(x, y)]_{90} \\
 G_8(x, y) &= [F_C(x, y)]_x - [F_B(x, y)]_{45}
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

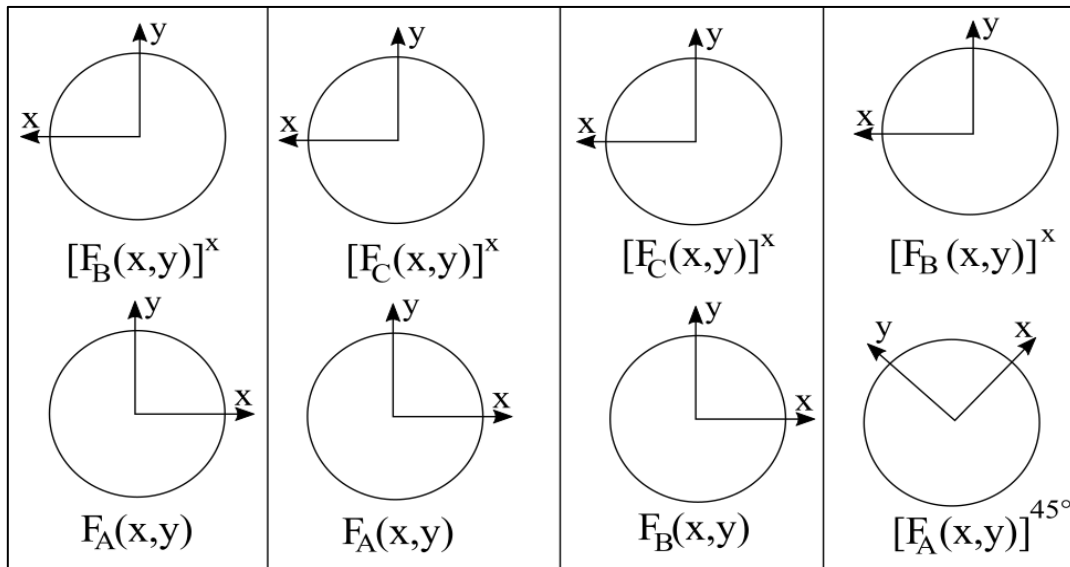
kde index x znamená převrácení kalibru kolem osy y a číselný index označuje rotaci kalibru. S těmito výrazy se pak dá dle literatury údajně vypočítat celý profil měřených ploch [4].

Nicméně se ukazuje, že osm kombinací obsahuje na jedné straně redundantní informace a na druhé straně i chybové informace (šum), a proto se v literatuře prozkoumala i metoda využívající šesti kombinací [6].



Obr 12: Šest kombinací třech měřených prvků (přepřacováno z [6])

Další publikovanou metodou je absolutní měření pomocí čtyř kombinací, která využívá Zernikeho polynomů pro rozložení odchylek ploch do ortogonálních funkcí. Tato metoda zkoumá, jestli je možné zmenšit počet kombinací. Po hlubším prozkoumání se ukázalo, že čtyři z osmi kombinací nejsou lineárně nezávislé. Tyto nalezené kombinace (obr. 13) jsou pak využity pro výpočet profilu optických ploch. Výsledné výpočty ale vždy trpí ztrátou informací u vyšších prostorových frekvencí [7].



Obr 13: Čtyři kombinace třech měřených prvků

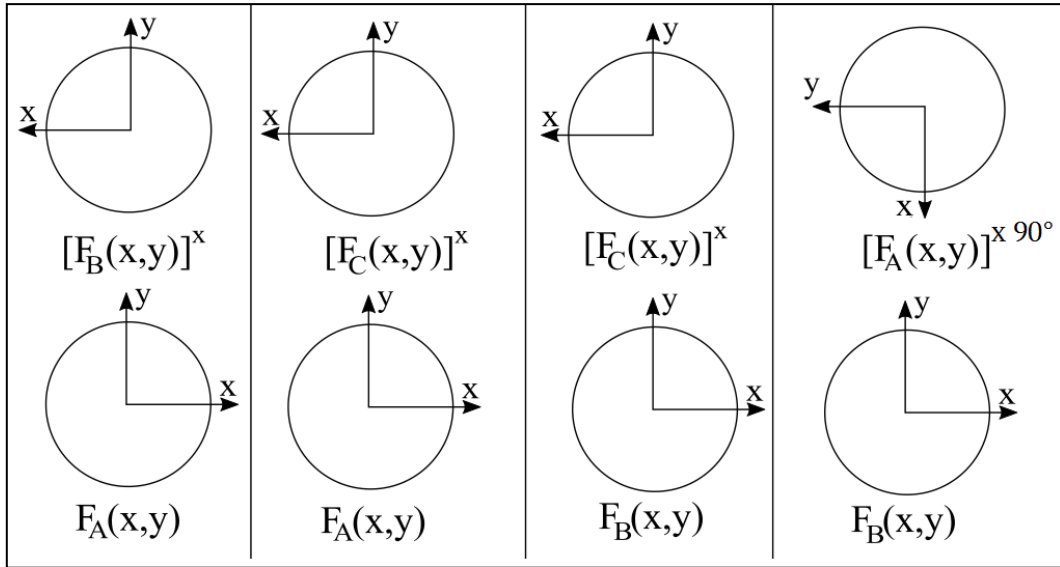
4.2. Algoritmus absolutního měření metody tří kalibrů pomocí čtyř kombinací

Pro ověření aplikace Shack-Hartmannova senzoru při absolutním měření rovinnosti metodou tří kalibrů volíme čtyři kombinace jejich vzájemných poloh podle obr. 14.

Jsou pořízeny čtyři interferogramy M_1, M_2, M_3, M_4 pro čtyři kombinace prvků A, B, C :

$$\begin{aligned}
 A + B^x &= M_1 \\
 A + C^x &= M_2 \\
 B + C^x &= M_3 \\
 B + A^{x90} &= M_4,
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

kde index x značí otočení dané plochy přes osu y a 90 značí otočení dané plochy o 90 stupňů.



Obr 14: : Ilustrace čtyř kombinací párů pro optické prvky A, B, C

Jinými slovy,

$$\begin{aligned}
 B^X(x, y) &= B(-x, y) \\
 A^{90}(x, y) &= A(x\cos(90^\circ) - y\sin(90^\circ), x\sin(90^\circ) + y\cos(90^\circ)), \\
 A^{90}(x, y) &= A(-y, x) \\
 A^{x90}(x, y) &= A(-y, -x).
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Při porovnání dané plochy s touto plochou převrácenou kolem osy y se nezjistí žádný rozdíl, pokud řezy touto plochou ve směru osy x budou popsány lichou funkcí, tj. funkcí symetrickou podle počátku (kdy platí, že $f(x) = f(-x)$). Funkci dvou proměnných $F(x, y)$ lze z hlediska její symetrie vůči proměnným x, y zapsat jako součet čtyř dílčích složek: sudá-sudá (ss), sudá-lichá (sl), lichá-sudá (ls) a lichá-lichá (ll).

$$F(x, y) = F_{ss} + F_{sl} + F_{ls} + F_{ll} \tag{16}$$

kde jednotlivé dílčí funkce lze vyčíslit následovně:

$$\begin{aligned}
 F_{ss} &= (F(x, y) + F(-x, y) + F(x, -y) + F(-x, -y))/4 \\
 F_{sl} &= (F(x, y) - F(-x, y) - F(x, -y) + F(-x, -y))/4 \\
 F_{ls} &= (F(x, y) + F(-x, y) - F(x, -y) - F(-x, -y))/4 \\
 F_{ll} &= (F(x, y) - F(-x, y) + F(x, -y) - F(-x, -y))/4
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

V našem případě tedy funkce A, B, C popisující tvar povrchu kalibrů vyjádříme jako součet čtyř složek: lichá-sudá, sudá-lichá, sudá-sudá a lichá-lichá. První dvě složky se dají jednoduše získat ze tří kombinací. Tím pádem se rekonstruované rovinné plochy dají popsat výrazem

$$\begin{aligned} A &= A_1 + A_{ls} + A_{ll}, \\ B &= B_1 + B_{ls} + B_{ll}, \\ C &= C_1 + C_{ls} + C_{ll}. \end{aligned} \tag{18}$$

Členy A_1, B_1, C_1 lze z rovnice (18) vyjádřit následovně

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{(M_2 - M_3 + M_1^x)}{2}, \\ B_1 &= \frac{(M_1 - M_2 + M_3)}{2}, \\ C_1 &= \frac{(M_2 - M_1 + M_3^x)}{2}. \end{aligned} \tag{19}$$

Pro nalezení ostatních dvou členů je nutné využít rotace jednoho z prvků. Složku lichá-sudá je možné získat vytvořením pomocných vlnoploch M_5, M_6 pomocí vztahů

$$\begin{aligned} M_5 &= (M_4^x - M_1) + M_1 \\ &= A^{90} + B^x - A - B^x + A + B^x \\ &= A^{90} + B^x. \end{aligned} \tag{20}$$

a obdobně

$$M_6 = (M_5 - M_1)^{90} + M_5 = A^{180} + B^x. \tag{21}$$

Nyní je možné vypočítat lichou-sudou složku. Při aplikaci $(A - A^{180})$ na jakoukoliv plochu platí

$$\begin{aligned} A_{ls} &= (M_1 - M_6 - A_1 + A_1^{180})/2 \\ &= ((A - A^{180}) - (A_1 - A_1^{180}))/2 \end{aligned} \tag{22}$$

a je možné odvodit, že se vyruší liché-liché, sudé-sudé a sudé-liché složky. Obdobně pro ostatní plochy

$$\begin{aligned} B_{ls} &= A_{ls} + (m_1^{180} - m_1)/2, \\ C_{ls} &= A_{ls} + (m_2^{180} - m_2)/2, \end{aligned} \quad (23)$$

kde členy m_1, m_2 jsou

$$\begin{aligned} m_1 &= M_1 - A_1 - B_1, \\ m_2 &= M_2 - A_1 - C_1 [7]. \end{aligned} \quad (24)$$

Do tohoto bodu dává výpočet první tři dílčích složek jednoznačné výsledky. Výpočet čtvrté složky (lichá-lichá) je však složitější a pro dané podmínky měření (převrácení kalibrů a jejich rotace kolem optické osy bez možnosti stranového posunutí) ji nelze zcela vypočítat a tvar ploch bude určen až na měření nezjistitelné reziduum [6].

Pro tuto složku si všimneme, jak vypadá popis tvaru plochy $F(x, y)$ v azimutálních souřadnicích. Profil funkce F pro některý poloměr r ($r^2 = x^2 + y^2$) je v závislosti na azimutu θ funkce periodická s periodou 360° . Pro účely ilustrace výpočtu lze periodickou funkci popsat pomocí Fourierových řad. Pro $x^2 + y^2 = konst.$, členy $F_{ls}(x, y)$, $F_{ss}(x, y)$, $F_{sl}(x, y)$, $F_{ll}(x, y)$ mohou být popsány jako $\sum f_i \cos(i\theta)$, $\sum f_j \cos(j\theta)$, $\sum f_m \sin(m\theta)$, $\sum f_n \sin(n\theta)$, kde $i, m =$ lichá, $j, n =$ sudá.

Obecně Fourierovy řady obsahují nekonečně mnoho frekvencí, avšak v praktickém využití může být zachycena jen část. Profil ploch může být aproximován sumou známých složek Fourierových řad, což má za následek, že zjištěný tvar je zatížen zbytkovou chybou[6].

Jak bylo zmíněno dříve, liché-sudé, sudé-liché a sudé-sudé složky lze vypočítat exaktně, proto se zbytek metody soustředí na výpočet liché-liché složky $F_{ll}(x, y)$. Pro body na kružnici se středem v počátku je lichá-lichá složka v karteziánském souřadnicovém systému lichou funkcí θ v polárních souřadnicích a má periodu 180° . Funkce $F_{ll}(x, y)$ může být vyjádřena jako Fourierovská sinova řada následujícím způsobem:

$$F_{ll}(x, y) = \sum_{m=1} f_{2m} \sin(2m\theta) \quad (25)$$

kde $x^2 + y^2 = konst.$, f_{2m} je příslušný koeficient a index m je přirozené číslo. Pro zdůraznění, že $F_{ll}(x, y)$ má fundamentální frekvenci 2 (tzn. periodu o 180°) je zaveden do výpočtů dolní index 2θ [6].

Rovnice (25) může být tedy zapsána jako

$$F_{ll} = F_{ll,2\theta} = F_{ll,2lichá\theta} + F_{ll,2sudá\theta}, \quad (26)$$

kde

$$\begin{aligned} F_{ll,2sudá\theta} &= \sum_{m=sudá} f_{2m} \sin(2m\theta) \\ &= \sum_{m=1} f_{4m} \sin(4m\theta) = F_{ll,4\theta} \\ F_{ll,2lichá\theta} &= \sum_{m=lichá} f_{2m} \sin(2m\theta). \end{aligned} \quad (27)$$

Dolní indexy $2lichá\theta$ a $2sudá\theta$ reprezentují sumu lichých složek $F_{ll,2lichá\theta}$ a sumu sudých složek $F_{ll,2sudá\theta}$. Dolní index 4θ v rovnici (27) udává, že $F_{ll,2sudá\theta}$ má fundamentální frekvenci 4 (tzn. periodu o 90°). Pootočením této složky o 90° se její průběh nezmění a tato složka není v našem experimentu zachycena.

Aplikováním rotačního operátoru se dá rovnice (26) přepsat na

$$[F_{ll,2\theta}]^{90^\circ} = -F_{ll,2lichá\theta} + F_{ll,2sudá\theta} [6], \quad (28)$$

Zachycená složka $F_{ll,2lichá\theta}$, tedy obsahuje členy $\sin(2\theta), \sin(6\theta), \sin(10\theta)$ atd. a nezachycená složka (reziduum) obsahuje členy $\sin(4\theta), \sin(8\theta), \sin(12\theta)$ atd.

Je důležité zmínit, že Fourierovy řady sloužily pouze pro ilustraci dané problematiky a v této práci je lichá-lichá složka získána aritmeticky pomocí naměřených snímků ze Shack-Hartmannova senzoru.

Pro získání liché-liché složky v této metodě je tedy nutné sečíst řady $2lichá\theta$ členů. První člen má symetrii 2θ a udává informaci o astigmatismu dané plochy pro úhel 45° [7].

Lichá-lichá složka pro členy 2θ je

$$\begin{aligned}A_{ll,2\theta} &= (M_1 - M_5 - A_1 - A_{ls} + A_1^{90} + A_{ls}^{90})/2 \\B_{ll,2\theta} &= A_{ll,2\theta} + (m_3^{90} - m_3)/2, \\C_{ll,2\theta} &= A_{ll,2\theta} + (m_4^{90} - m_4)/2,\end{aligned}\tag{29}$$

kde

$$\begin{aligned}m_3 &= m_1 - A_{ls} + B_{ls}, \\m_4 &= m_2 - A_{ls} + C_{ls}.\end{aligned}\tag{30}$$

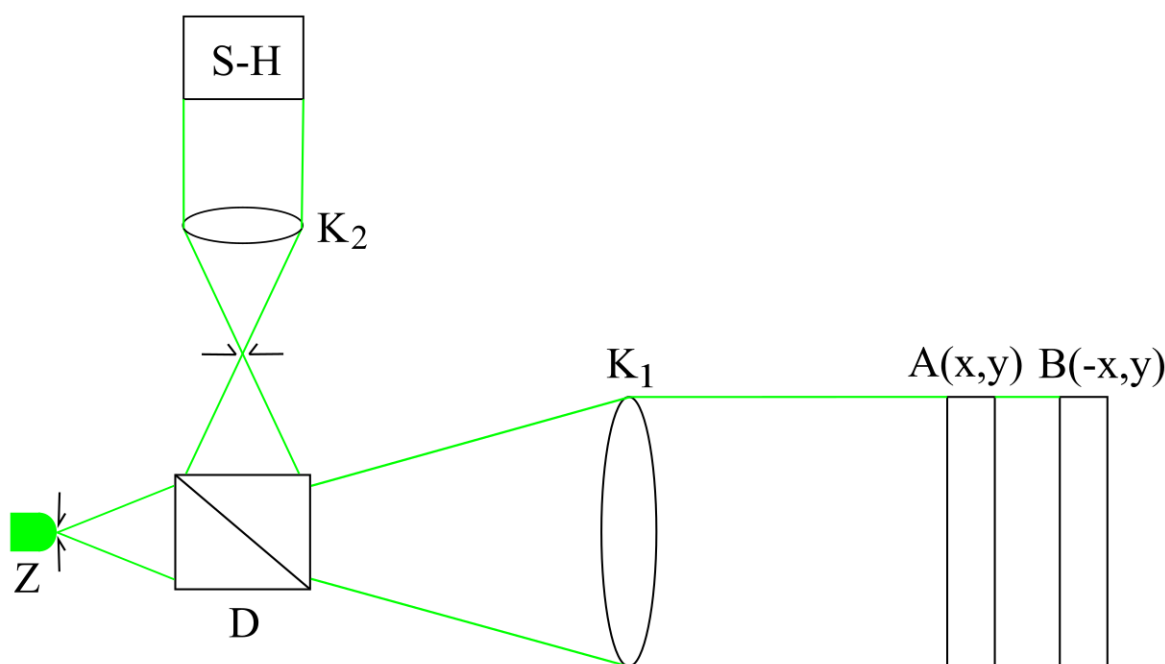
Výsledný profil měřených tří ploch je následně aproximován dle

$$\begin{aligned}A &= A_1 + A_{ls} + A_{ll,2\theta} \\B &= B_1 + B_{ls} + B_{ll,2\theta} \\C &= C_1 + C_{ls} + C_{ll,2\theta}.\end{aligned}\tag{31}$$

Tato metoda využívá pouze čtyř kombinací pro získání absolutní kalibrace tří ploch a její výhodou je jednoduchá manipulace se čtyřmi kalibry. I když nevyčíslené reziduum je při rotaci o 90° větší než při rotaci o 45° , je již plně zachycen člen se symetrií lichá-lichá popisující astigmatismus [7].

5. Popis optické sestavy

Optická sestava se skládá z monochromatického bodového zdroje, mikroskopového objektivu, dělicí kostky, měřených prvků, dírkové clony, dvou kolimačních čoček a Shack-Hartmannova senzoru. Jako monochromatický zdroj byla použita LED dioda (525 nm), za kterou je postaven mikroskopový objektiv. Divergentní svazek se šíří přes dělicí kostku D , kde část prochází dál a část svazku se odráží mimo sestavu. Prošlá část svazku dopadá na dva měřené prvky, které jsou postaveny za sebou. Svazky se následně odrazí od jejich ploch a fokusují se při zpětném průchodu kolimační čočkou K_1 přes dělicí kostku do ohniska kolimační čočky K_2 , kde je umístěna dírková clona pro odstranění nežádoucích reflexů od ostatních komponent optické soustavy. Kolimační čočka K_2 dále kolimuje svazky na Shack-Hartmannův senzor, který je postaven v takové vzdálenosti, aby do blízkosti vstupní apertury dopadaly obrazy obou měřených optických ploch. Schéma sestavy je zobrazeno na obr. 15.



Obr 15: Schéma měřicí sestavy metody absolutního měření rovinnosti metodou tří kalibrů

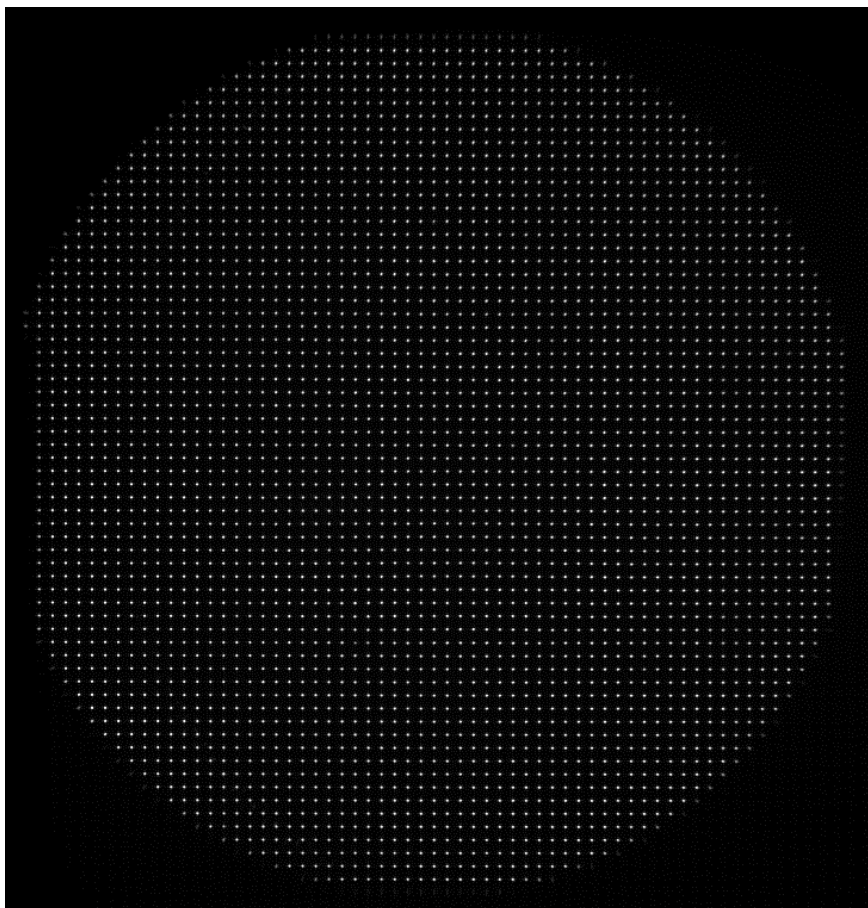
Kolimační čočky K_1 a K_2 využitě v této sestavě mají ohniskové vzdálenost $f_1 = 500 \text{ mm}$ a $f_2 = 100 \text{ mm}$. V této optické sestavě byl použit Shack-Hartmannův senzor s rozlišením $2048 \times 2048 \text{ px}$ a roztečí pixelů $5,5 \times 5,5 \text{ } \mu\text{m}$. Rastr mikročoček má rozměry $10 \times 10 \text{ mm}$, velikost mikročoček je $150 \text{ } \mu\text{m}$ s ohniskovou vzdáleností $5,2 \text{ mm}$ [8].

6. Měření odchylek optických ploch

6.1. Měření odchylek optických ploch zakrýváním jednoho z optických prvků

Prvním způsobem, jak lze zjistit výsledné profily ploch měření je založeno na zakrýváním jednoho z prvků. Pro ilustraci je popsání metody omezeno na pár AB . Informace o ostatních párech se získají stejným způsobem.

Měřené prvky se vloží do sestavy v daných párech, jak je znázorněno na obr. 15. Jemnými náklony obou prvků se docílí toho, aby se obrazy obou ploch překrývaly na Shack-Hartmannově senzoru (viz. obr 16). Jemné náklony jsou zajištěny pomocí šroubů na upínací mechanice optických prvků.



Obr 16: Síť bodů překrytých odrazů od obou optických ploch

Nejprve se zaznamená obraz překrytých odrazů AB , následně se prvek B zakryje a opět se sejmou data prvku A . V jednoduchém algoritmu v programu MATLAB se od sebe tyto dva obrazy odečtou a získají se informace o prvku B . Prvek B se následně použije jako reference a pomocí programu MeoSHS se zjistí data rozdílů M_1 mezi plochami A a B . Výsledná data se dále vloží do algoritmu, který byl popsán v kapitole 4.2.

Kvůli časové prodlevě při zakrývání jednoho z prvků může vliv turbulence zatížit výsledné profily chybou. Kvůli snaze zatížit měření co nejmenší chybou vlivem turbulence byl ověřen další způsob získání informace o odchylkách ploch viz. kapitola 6.2.

Obdobou tohoto způsobu měření je další zkoumaná metoda, kdy se sejme snímek dvou překrytých odrazů AB , následně se přední kalibr jemným posuvem odkloní, tak aby byl zachycen dírkovou clonou. Poté se pořídí snímek zbylého obrazu a pomocí algoritmu v programu MATLAB odečte od společného snímku.

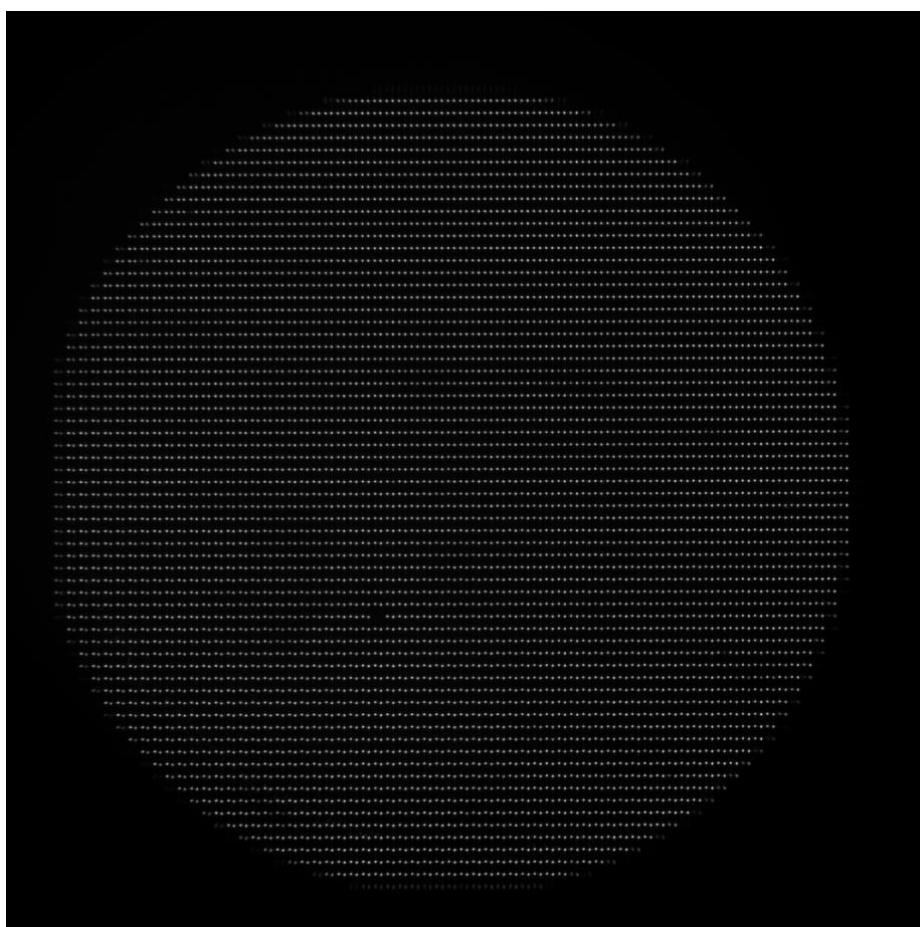
6.2. Měření odchylek optických ploch separací z jednoho společného snímku

Jak bylo popsáno v předchozí kapitole, turbulence může mít vliv na získání dat odchylek ploch. V této metodě se tedy vynechá zakrývání jednoho prvku. Prvky se opět vloží do sestavy a obrazy obou ploch se zobrazí na Shack-Hartmannově senzoru (dále S-H senzor).

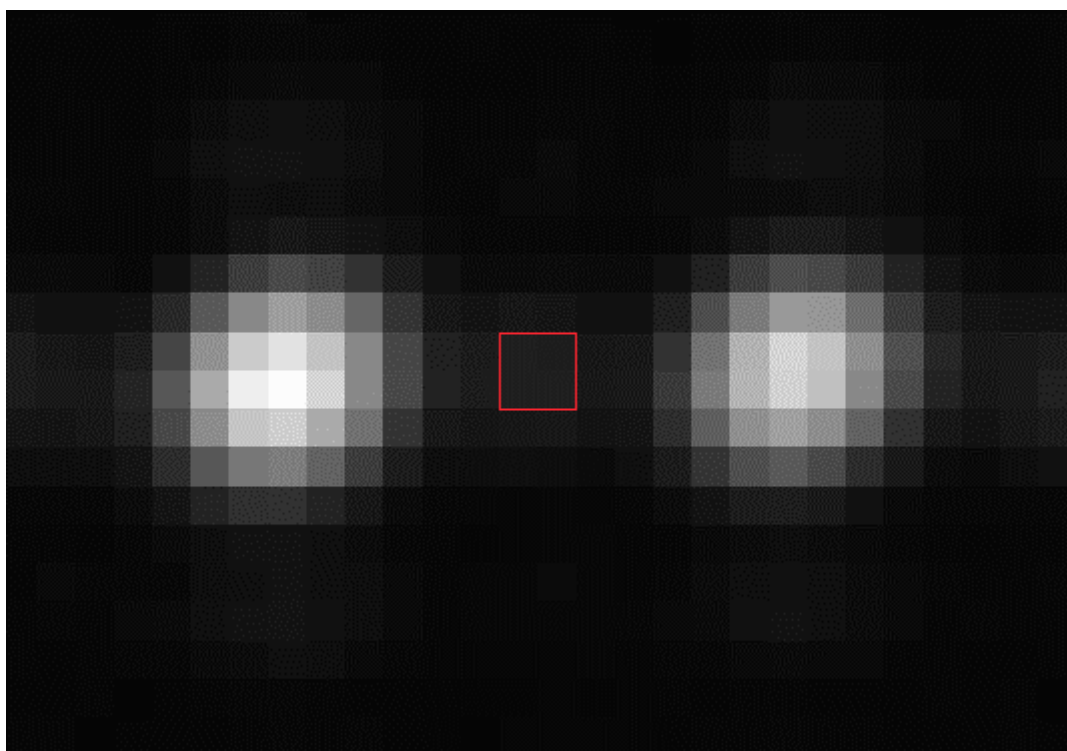
Jemným náklonem jednoho z optických prvků se dosáhne toho, aby se stopy v rastru od obou ploch nepřekrývaly, ale byly posunuty vedle sebe. Jedna síť bodů by měla být ve středu mezer fokusovaných bodů sítě druhé (obr. 17).

Ze snímku je nyní potřeba obě sítě separovat do samostatných obrázků. U takto získaného snímku se s použitým S-H senzorem projevuje vliv difrakce vznikem sekundárních stop (obr. 18).

Kvůli vzniku sekundárních stop je důležité zjistit, jak velké je pole kolem jednoho bodu. Z nasnímaných dat vyplynulo, že dlaždice kolem jedné stopy má velikost 14×14 pixelů. K vyloučení vlivu sekundárních stop se do separovaných snímků přenášejí výřezy s obrazy stop s okolím o rozměru 11×11 pixelů.



Obr 17: Síť bodů posunutých odrazů od obou optických ploch

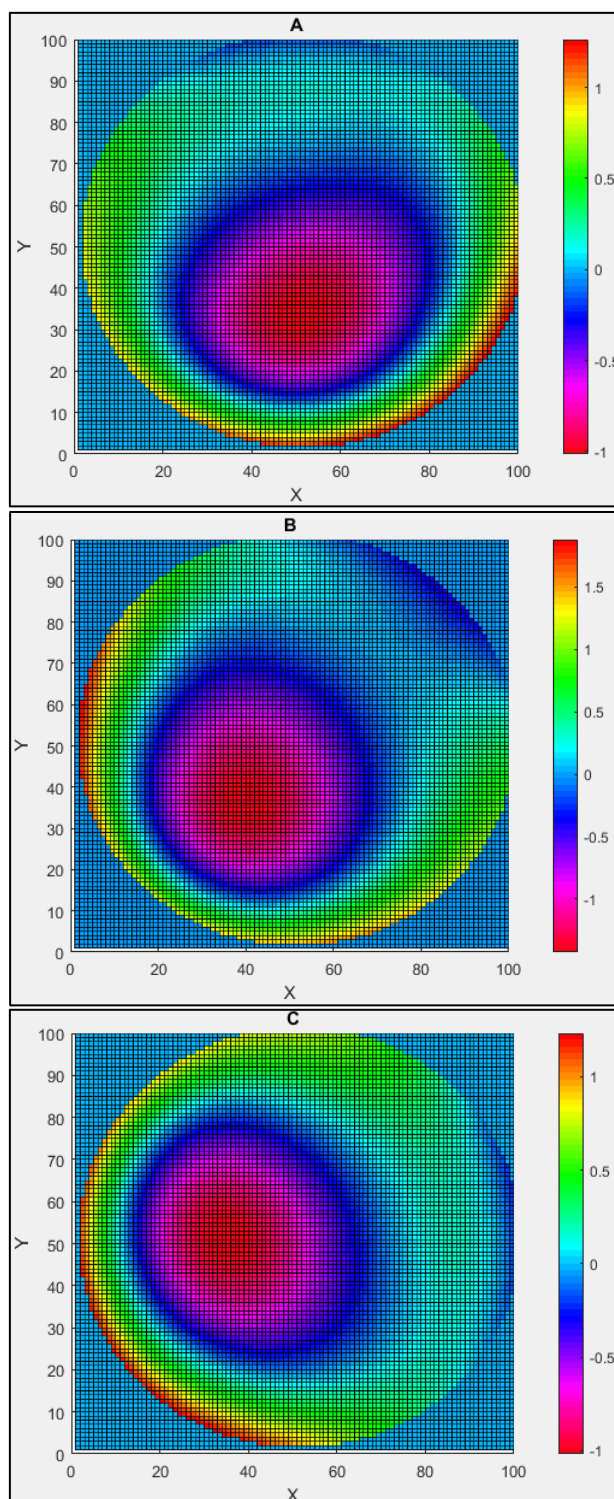


Obr 18: Sekundární stopa, která vznikla vlivem difrakce na S-H senzoru. (vyznačena červeným rámečkem)

Dalším způsobem, jak separovat dva obrázky, je využití znalosti poloh těžišť získaných z kalibračního souboru programu MeoSHS. Ze znalosti přesné polohy těžišť a velikosti ořezu kolem pixelu pro odstranění projevu difrakce je možné vytáhnout ze společného obrázku sít' bodů pro jeden optický prvek, přesunout ho do samostatného obrázku a posunout ho o vhodný počet pixelů tak, abychom získali dvojici snímků zpracovatelných programem MeoSHS.

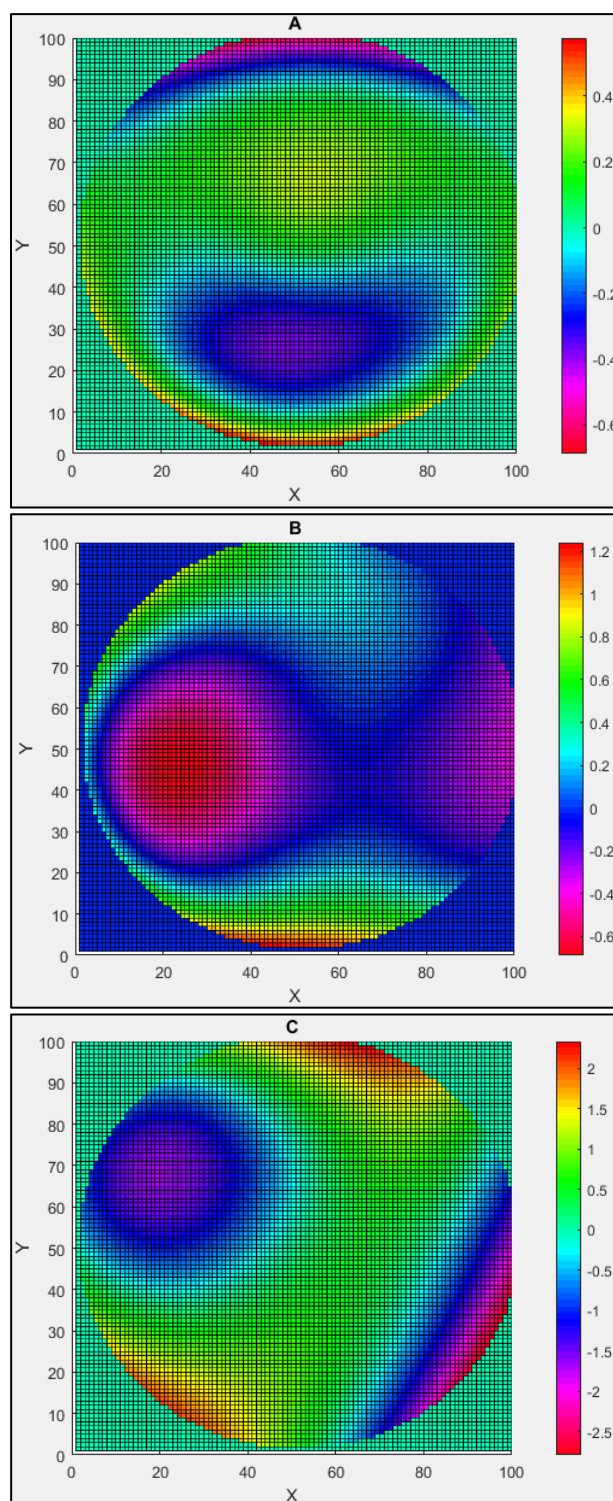
7. Výsledky

Bylo ověřeno několik metod měření, jejichž výsledky budou prezentovány v této kapitole. První z metod popsaných v předešlých kapitolách je metoda, kde se měří profily optických ploch kalibrů pomocí zakrývání jednoho z optických elementů.



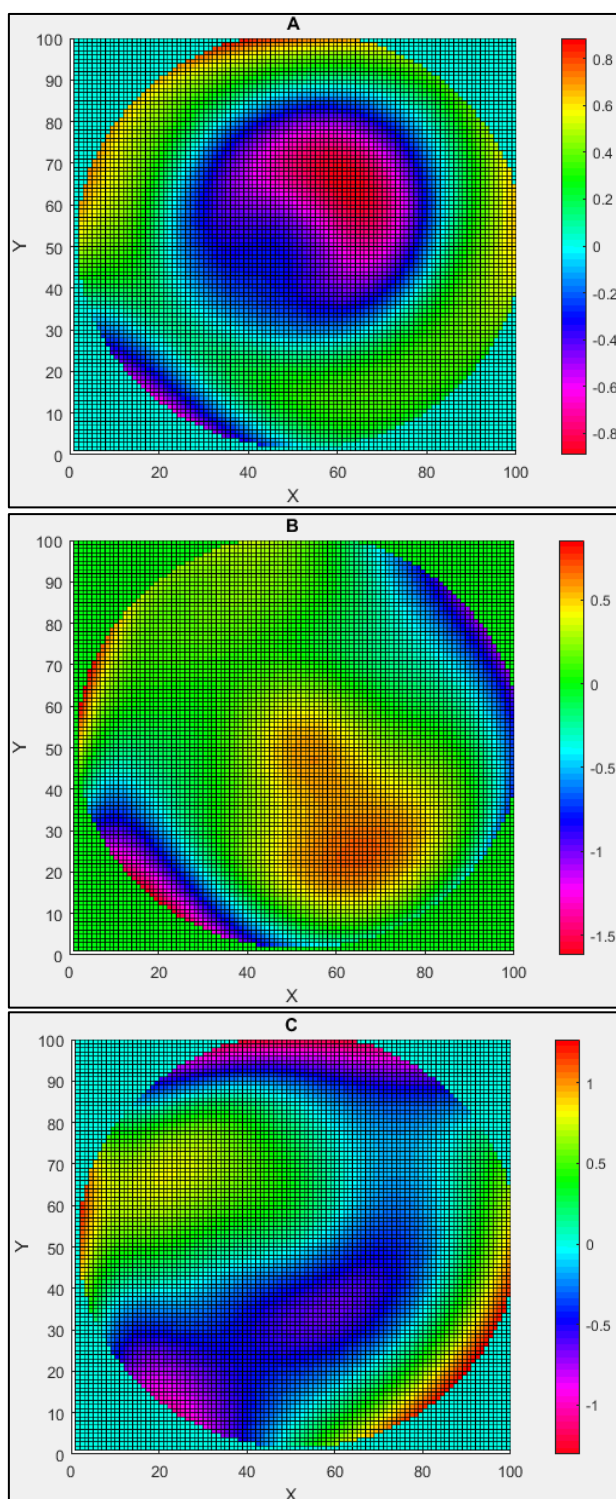
Obr 19: Profily optických ploch A, B, C

Další metodou bylo jemné odklonění jednoho prvku pro získání profilů optických ploch.



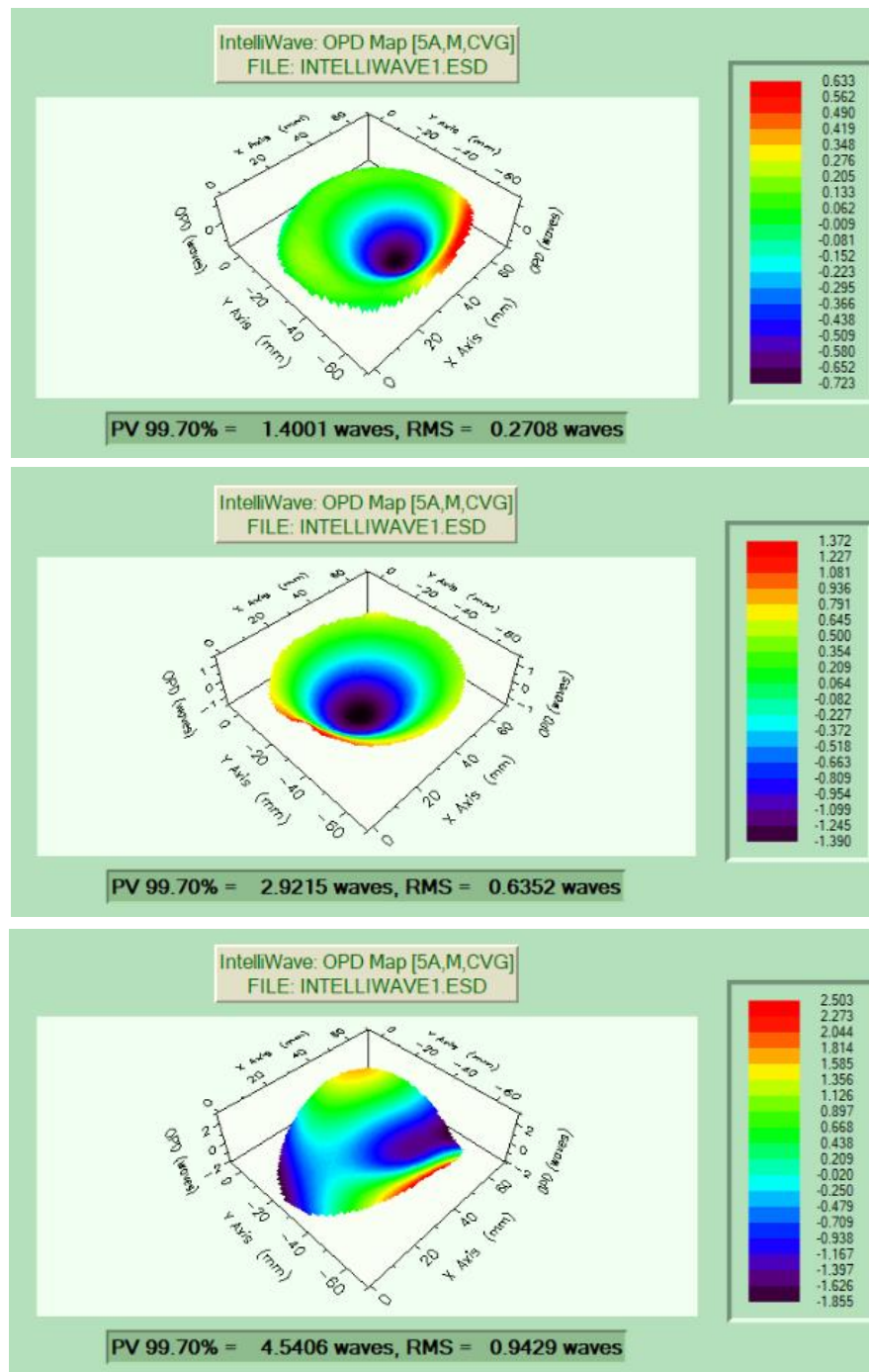
Obr 20: Profily optických ploch A, B, C

Poslední metodou bylo získání informace o tvaru optické plochy z jednoho snímku díky znalosti polohy těžišť jednotlivých stop svazků z kalibračního souboru programu MeoSBS.



Obr 21: Profily optických ploch A, B, C

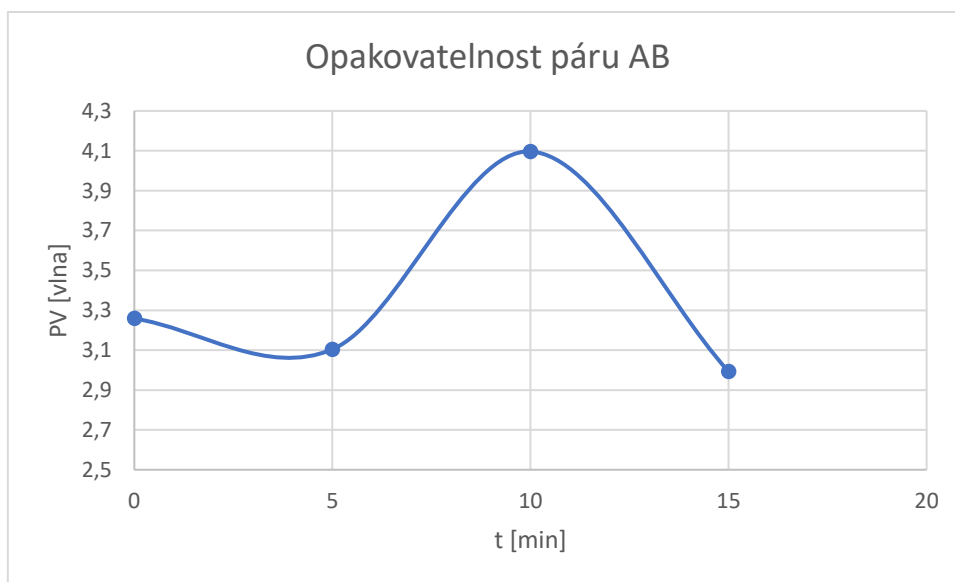
Pro porovnání se optické kalibry naměřily na interferometru Mahr v Meoptě a následně vyhodnotily v programu Intelliwave.



Obr 22: Výsledné tvary ploch pro optické prvky A, B, C změřených na interferometru

7.1. Shrnutí výsledků měření

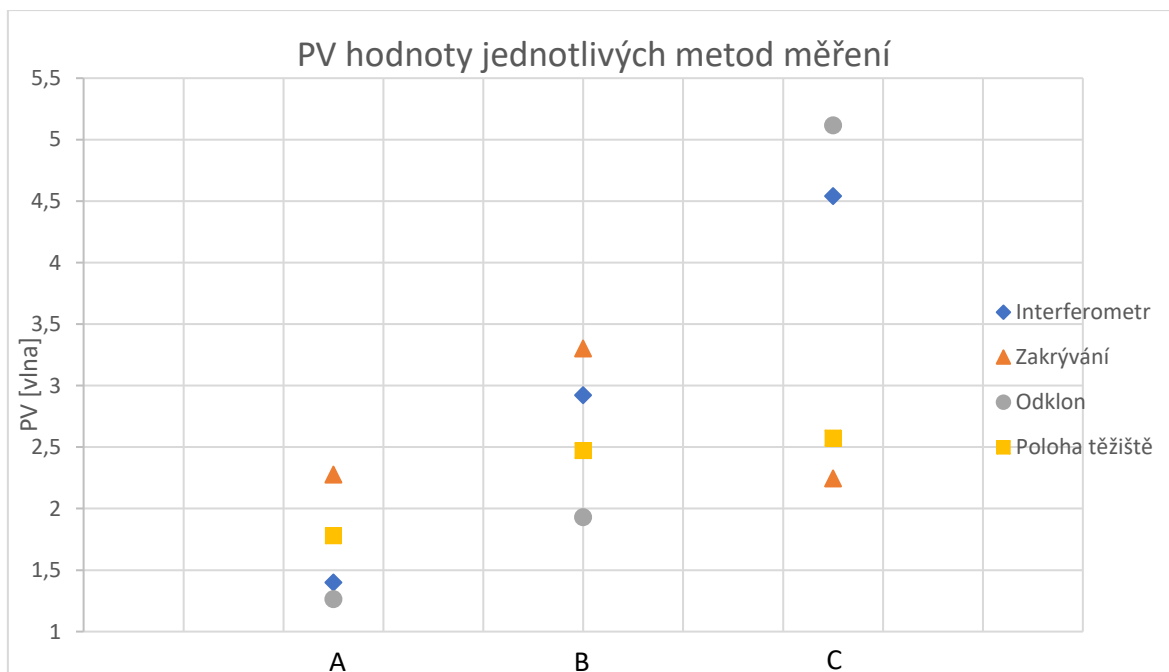
Z metody zakrývání lze pozorovat, že se profily měřených optických ploch až na tvar optického prvku *C* podobají měření na interferometru. Pro bližší posouzení relevantnosti výsledků byla vyhodnocena opakovatelnost měření jednoho páru optických prvků.



Obr 23: Graf průběhu opakovatelnosti měření vybraného páru

Jako parametr pro porovnávání jednotlivých profilů ploch byly vybrány peak-to-valley hodnoty (dále *PV*). Měření opakovatelnosti bylo provedeno v různých časových intervalech bez jakékoliv manipulace s optickými prvky, a to po 5, 10 a 15 minutách. Z grafu vyplývá, že při delším měření se může zanést chyba přibližně $0,8\lambda$. Větší odskok od ostatních hodnot na desáté minutě by mohl z části být důsledkem turbulence v optické laboratoři kvůli vzduchotechnice umístěné nad optickou soustavou.

Pro porovnání výsledků jednotlivých metod pro optické prvky A, B, C byly naneseny jejich PV hodnoty do grafu níže. Jelikož formát naměřených dat z interferometru nebyl kompatibilní s MeoSHS, nebylo bohužel možné porovnat plochy datově. Veškerá porovnání jsou tedy zpracována ze snímku pořízeného z programu Intellwave na interferometru.

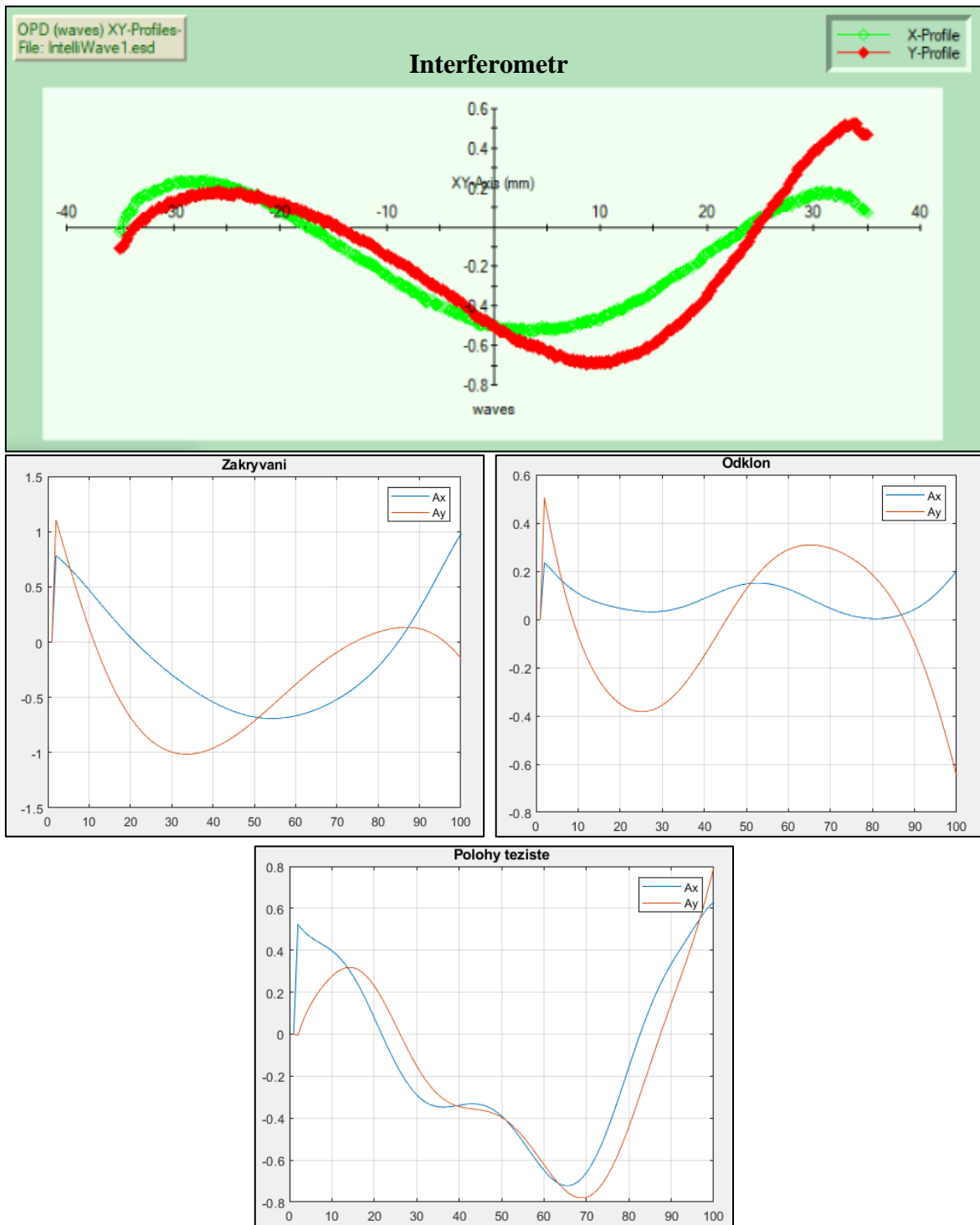


Obr 24: Nanesené PV hodnoty jednotlivých metod měření pro optické prvky A, B, C

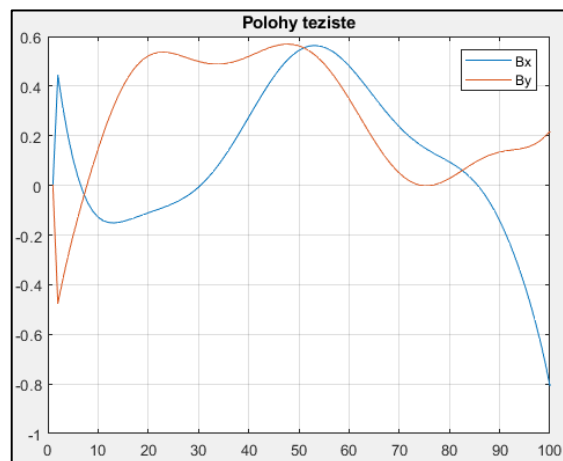
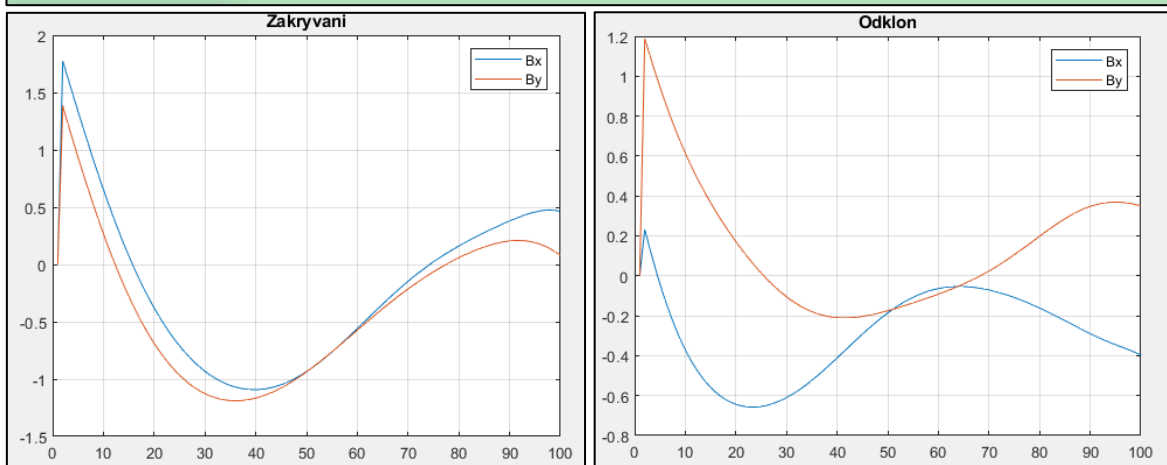
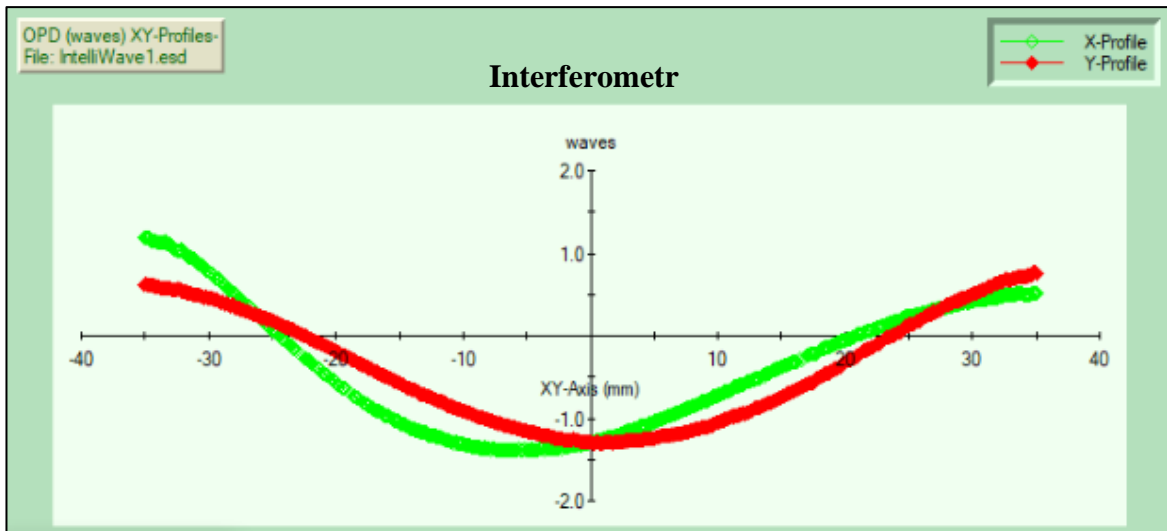
	A	B	C
Interferometr	1,4001	2,9215	4,5406
Zakrývání	2,2772	3,3026	2,2470
Odklon	1,2636	1,9299	5,1169
Poloha těžiště	1,7793	2,4726	2,5747

Tabulka 1: Výsledné hodnoty PV pro jednotlivé metody měření

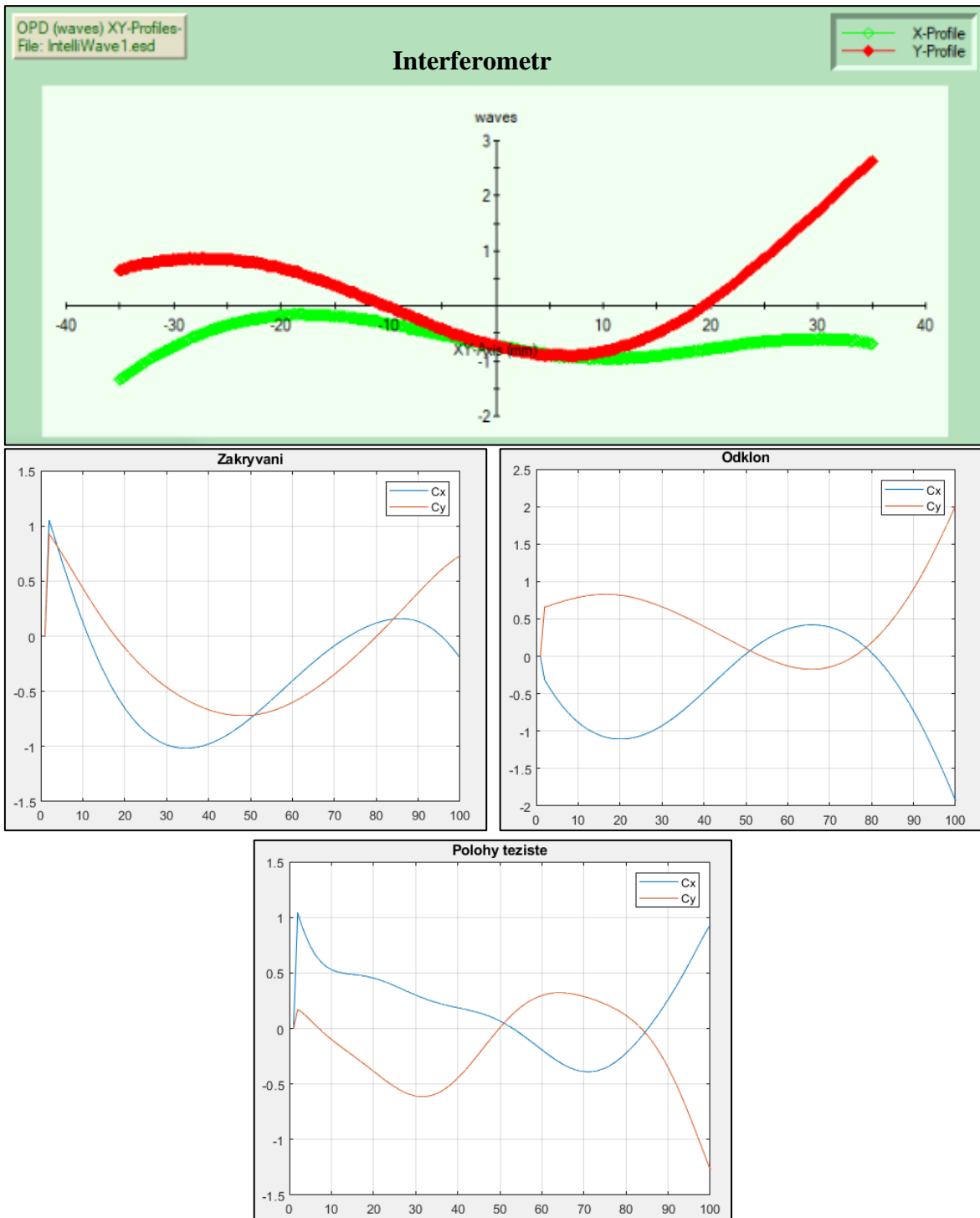
Pro porovnání tvaru výsledných ploch se provedly řezy středem daných ploch podél osy x, y .



Obr 25: Řezy optického prvku A pro všechny měřené metody



Obr 26: Řezy optického prvku B pro všechny měřené metody



Obr 27: Řezy optického prvku C pro všechny měřené metody

Jednotlivá měření mezi sebou nevykazují korelaci, co se tvaru ploch týče. Rozdíly v naměřených profilech optických ploch mohou být důsledkem menší oblasti vyhodnocení než při měření na interferometru nebo nepříliš preciznímu uchycení prvků, tzn. mohlo dojít k malému posunu optických prvků v objímkách při jejich manipulaci během měření. Dalším faktorem v rozdílných tvarech optických ploch může být nepřesné vycentrování jednotlivých prvků při měření.

8. Závěr

Tato práce byla zaměřena na měření absolutní rovinnosti optických ploch metodou tří kalibrů. Pro zjištění výsledných tvarů optických ploch bylo nutné měřit vzájemné odchylky tvaru tří rovinných ploch ve čtyřech kombinacích. Při zpracování naměřených dat se vychází ze skutečnosti, že funkci popisující tvar plochy lze vyjádřit jako součet dílčích složek se symetriemi sudá-sudá, sudá-lichá, lichá-sudá a lichá-lichá. První dvě složky bylo snadné zjistit ze tří párů měření, kdy jeden kalibr byl pro porovnání překlopen vždy kolem osy y a pro určení třetí a části čtvrté dílčí složky bylo ještě zapotřebí otočit převrácený kalibr o 90° .

Bylo navrženo několik způsobů měření. Při prvním způsobu se při snímání jeden prvek zakryl pro zjištění informací o obou optických plochách. Tato metoda ukazuje asi největší potenciál při porovnání s výsledky na interferometru. Kvůli časové prodlevě po zakrytí, mohly být výsledky zatíženy chybou vlivem turbulence. Z měření opakovatelnosti se ukazuje, že dochází k rozptylu hodnot přibližně o $0,8\lambda$.

Druhým způsobem bylo měření, při kterém se místo zakrývání jeden z optických prvků odklonil jemným posuvem tak, aby byl odcloněn dírkovou clonou.

Třetí způsob se snažil omezit vliv turbulence v optické laboratoři. Nasnímal se společný snímek dvou poněkud posunutých rastrů a díky znalosti poloh těžišť se z něj separovaly dva snímky s daty o každé z optických ploch samostatně.

Během experimentování se usilovalo o nalezení metody, kdy by se záznam odrazů od obou porovnávaných ploch pořizoval současně, aby se tak potlačil efekt turbulence a jiných rušivých vlivů během pořizování snímků Shack-Hartmannovým senzorem. Ukázalo se však, že nejlepší výsledky se dosáhnou metodou postupného zakrývání (viz obr. 25, 26, 27). Pro dosažení přesnějších výsledků je tedy vhodné se v dalším měření soustředit na potlačení vlivu turbulence a mechanických vibrací zakrytíváním optické sestavy a její instalací např. na odpružený optický stůl.

9. Seznam obrázků a tabulek

Obr 1: Princip Shack-Hartmannova senzoru	2
Obr 2: Newtonův interferometr	6
Obr 3: Popis vzniku interferenčních proužků.....	7
Obr 4: Ukázka interferenčního obrazce pro kvalitní optickou rovinnou plochu	8
Obr 5: Negativ interferenčního obrazce pro sférickou plochu s maximální odchylkou od roviny 2λ	9
Obr 6: Newtonovy kroužky pro sférickou plochu s velkým poloměrem křivosti a maximální odchylkou $\lambda/4$ od rovinné plochy	10
Obr 7: Newtonovy kroužky pro sférickou plochu s velkým poloměrem křivosti a maximální odchylkou $\lambda/8$ od rovinné plochy	10
Obr 8: Schéma interferometru pro měření rovinných ploch.....	12
Obr 9: Ilustrace interferometru pro měření konvexních ploch	13
Obr 10: Ilustrace složení sestavy Twyman-Greenova interferometru.....	14
Obr 11: Osm kombinací třech měřených prvků	15
Obr 12: Šest kombinací třech měřených prvků	16
Obr 13: Čtyři kombinace třech měřených prvků	17
Obr 14: Ilustrace čtyř kombinací párů pro optické prvky A, B, C	18
Obr 15: Schéma měřicí sestavy metody absolutního měření rovinnosti	23
Obr 16: Síť bodů překrytých odrazů od obou optických ploch	24
Obr 17: Síť bodů posunutých odrazů od obou optických ploch.....	26
Obr 18: Sekundární stopa, která vznikla vlivem difrakce na S-H senzoru.....	26
Obr 19: Profily optických ploch A, B, C	28
Obr 20: Profily optických ploch A, B, C	29
Obr 21: Profily optických ploch A, B, C	30
Obr 22: Výsledné tvary ploch pro optické prvky A, B, C změřených na interferometru....	31
Obr 23: Graf průběhu opakovatelnosti měření vybraného páru	32
Obr 24: Nanesené PV hodnoty jednotlivých metod měření pro optické prvky A, B, C	33
Obr 25: Řezy optického prvku A pro všechny měřené metody	34
Obr 26: Řezy optického prvku B pro všechny měřené metody.....	35
Obr 27: Řezy optického prvku C pro všechny měřené metody.....	36

10. Seznam použité literatury

- [1] Platt, B. C., PhD; Shack, R., PhD: *History and Principles of Shack-Hartmann Wavefront Sensing*, p. 573-577, 2001
- [2] Novak, Jiri & Novak, Pavel & Miks, Antonin.: *Application of Shack-Hartmann wavefront sensor for testing optical systems*. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 6609. 10.1117/12.739665, 2007
- [3] Greivenkamp, J. E.; Smith, D. G; Goodwin, E.: *Calibration Issues with Shack-Hartman Sensors for Metrology Applications*, p.372-380, 2004
- [4] Malacara, D.: *Optical shop testing*. 3rd edition. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, p. 385, 2007
- [5] EDMUND OPTICS INC. Optical flat manual: Optical Techniques for Measuring Flatness, 2004, dostupné [online] na:
<https://www.edmundoptics.com/document/download/396272>
- [6] Ai, Ch., Wyant, J. C. – *Absolute testing of flats by using even and odd functions*, Applied Optics, Vol. 32, No. 25 (1993), 4698 s.
- [7] Shao, L., Parks, R. E., Ai, Ch. – *Absolute testing of flats using four data sets*, SPIE Vol. 1776 Interferometry: Surface Characterization and Testing (1992), 22. S
- [8] Paúr, Martin – *Měření rovinných ploch pomocí Shack-Hartmannova senzoru*, str. 23, 2014

11. Seznam příloh

Přílohy na CD:

- Text práce.....DP_Avrat_2021.pdf
- Výpočetní algoritmy:
 - Výpočet tvarů ploch.....vypocet_tvaru_ploch.m
- Naměřená data:
 - Odchyly zakrýváním jednoho prvku.....odchyly_zakryvani.xlsx
 - Odchyly odklonu.....odchyly_odklon.xlsx
 - Odchyly separace obrázků ze znalosti polohy těžišť...odchyly_teziste.xlsx