

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: 2019

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: 32

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: 32

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 the 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

Obsah	6
1. Úvod	1
2. Metody měření rovinnosti optické plochy	2
2.1. Kontaktní metody měření rovinnosti optické plochy	2
2.1.1. Newtonův interferometr	2
2.2. Bezkontaktní metody měření rovinnosti optické plochy	8
2.2.1. Fizeaův interferometr	8
2.2.2. Twyman-Greenův interferometr	10
2.2.3. Absolutní měření rovinnosti optických ploch	11
3. Popis optické sestavy	19
4. Měření odchylek optických ploch	20
4.1. Měření odchylek optických ploch zakrýváním jednoho z optických prvků	21
4.2. Popis měření odchylek optických ploch separací z jednoho společného obrázku	22
5. Výsledky	25
6. Závěr	29
7. Seznam obrázků	30
8. Seznam použité literatury	31
9. Seznam příloh	32

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. Metody měření rovinnosti optické plochy

Pro měření rovinnosti optické plochy je 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. [2]

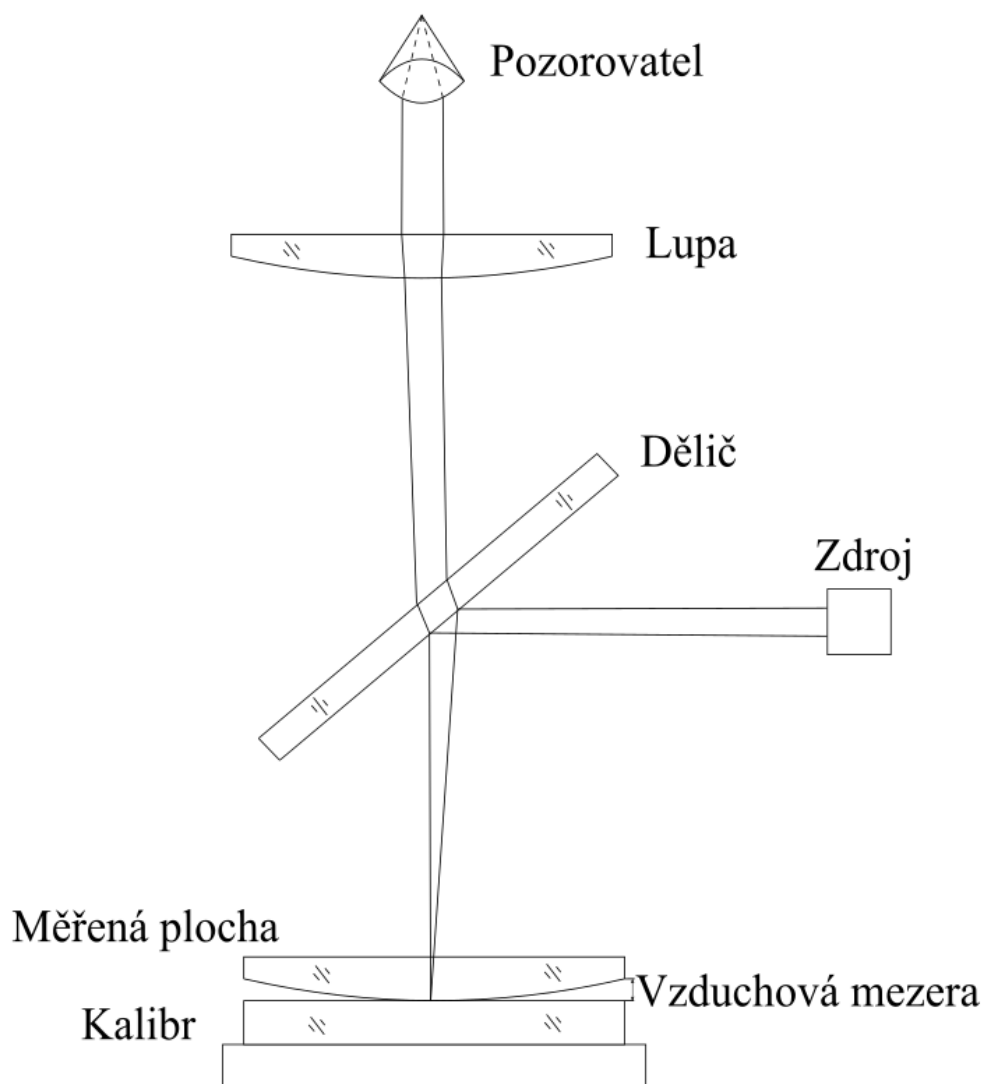
2.1. Kontaktní metody měření rovinnosti optické plochy

2.1.1. 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. 1. Pro lepší pozorování Newtonových kroužků je výhodné použít lupu [2].

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 odchylkám. 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 [2].

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 [1].



Obr 1: Newtonův interferometr (přepřacováno z [1])

Provedme měření rovinného kalibru a rovinného optického prvku, jak je ilustrováno na obr. 2. Optické plochy nejsou paralelní, takže vzduchová mezera je na levé straně menší než na pravé, tzn. že dva optické prvky mají mezi sebou úhel φ , 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 [1].

Tmavé proužky se dají tedy popsat jako

$$2\alpha x = m\lambda, \quad (1)$$

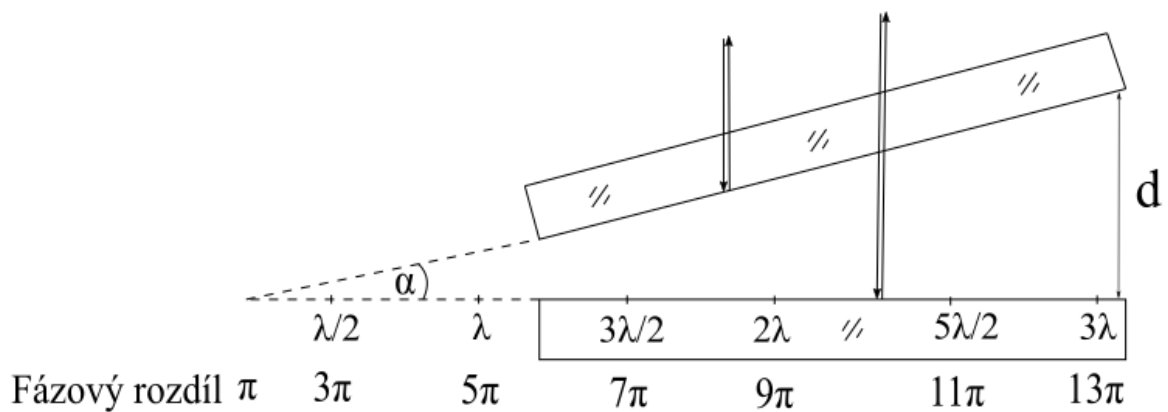
kde m je celočíselný koeficient. Světlé proužky mohou být popsány následujícím tvarem

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

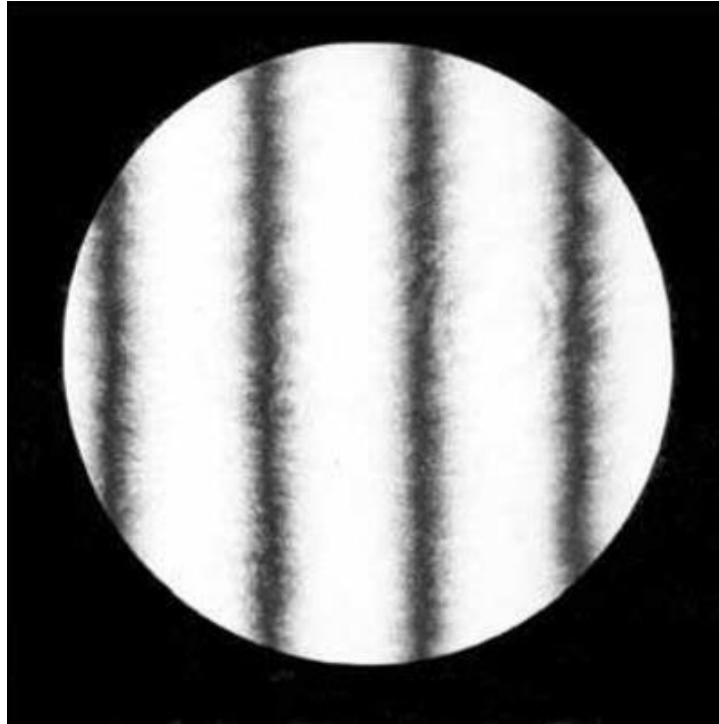
Obě tyto rovnice popisují systém rovnoměrně rozložených proužků a vzdálenost d mezi těmito proužky je

$$d = \frac{\lambda}{2\alpha}, \quad (3)$$

Výsledný interferenční obrazec dvou rovinných optických prvků v kontaktu, mezi kterými se vytvoří vzduchová komora můžeme pozorovat na obr. 3 [1].



Obr 2: Popis vzniku interferenčních proužků. Fázové rozdíly ilustrují polohy tmavých proužků (přepřacováno z [2])



Obr 3: Ukázka interferenčního obrazce pro kvalitní optickou rovinnou plochu [1]

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

$$\frac{x^2}{R} = m\lambda, \quad (4)$$

Vzdálenost m -tého tmavého proužku je rovna

$$x_m = \sqrt{mR\lambda}, \quad (5)$$

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

$$x_{m+1} - x_m = \sqrt{R\lambda}(\sqrt{m+1} - \sqrt{m}), \quad (6)$$

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

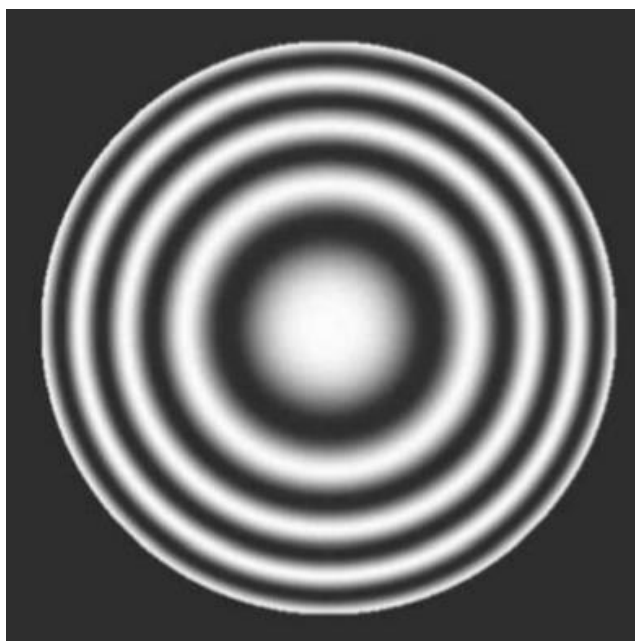
$$x_{m+2} - x_{m+1} = \sqrt{R\lambda}(\sqrt{m+2} - \sqrt{m+1}), \quad (7)$$

Z rovnic (6) a (7) můžeme vyjádřit poměr

$$\frac{x_{m+1} - x_m}{x_{m+2} - x_{m+1}} \approx 1 + \frac{1}{2m}, \quad (8)$$

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

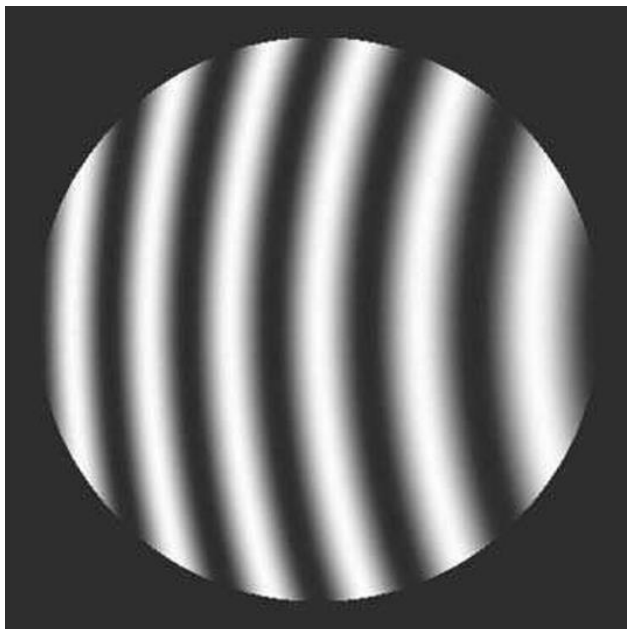
Pro zjištění, zda je plocha sférická, je nutné manipulovat s optickými prvky takovým způsobem, aby se daly pozorovat interferenční proužky s nižšími řády m . Na obr. 4 jsou zobrazeny Newtonovy interferenční kroužky pro maximální hodnotu $x^2/2R = 2\lambda$. Pro maximální hodnotu $x^2/2R = \lambda/2$ 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. [1]



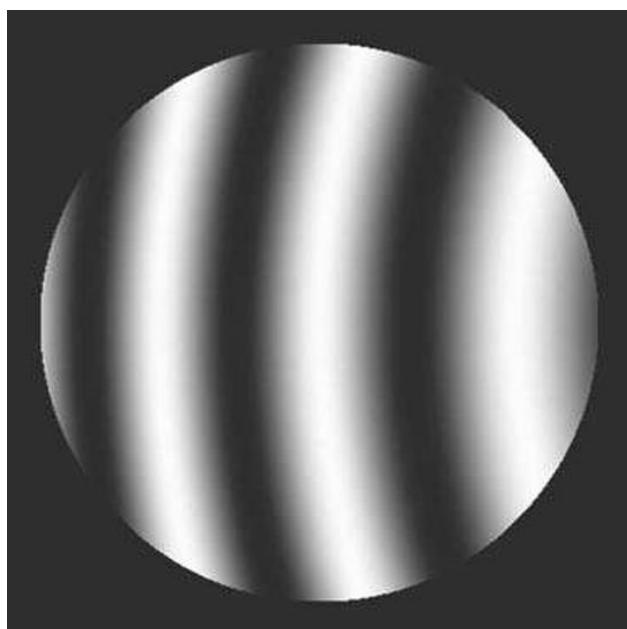
Obr 4: Negativ interferenčního obrazce pro sférickou plochu s maximální odchylkou od roviny 2λ [1]

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. [1]

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. [1]



Obr 5: Newtonovy kroužky pro sférickou plochu s velkým poloměrem křivosti a maximální odchytkou 4λ od rovinné plochy [1]



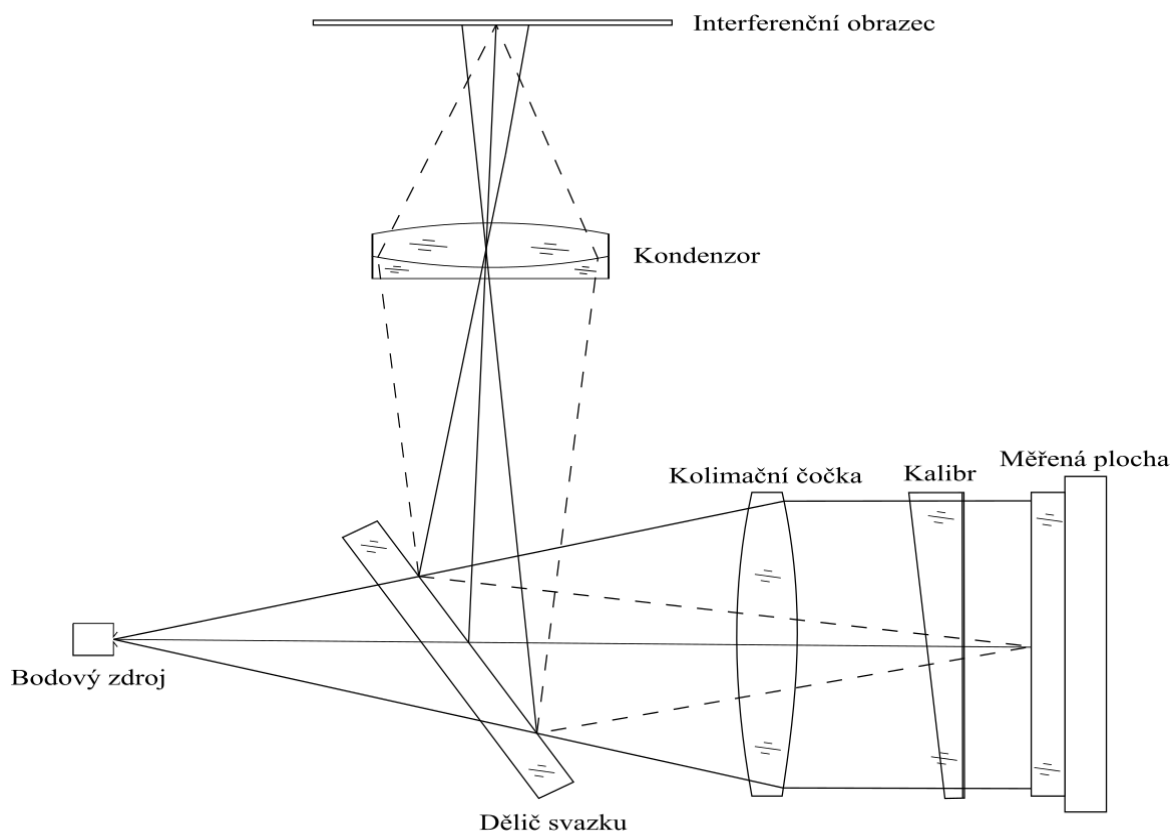
Obr 6: Newtonovy kroužky pro sférickou plochu s velkým poloměrem křivosti a maximální odchytkou 8λ od rovinné plochy [1]

2.2. Bezkontaktní metody měření rovinnosti optické plochy

2.2.1. 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 pádem 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 [1].

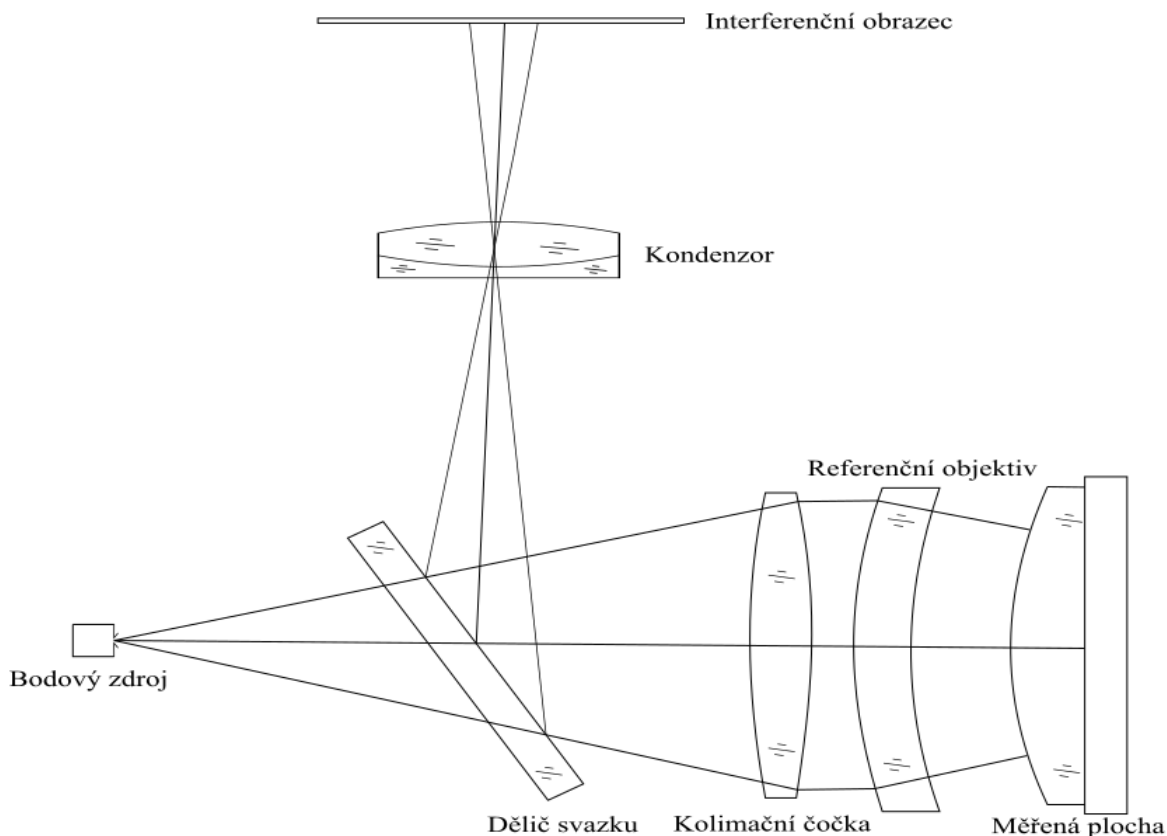
Fizeaův interferometr je jedním z nejvyužívanějších interferometrů pro testování optických prvků. Sestava je složena z dírkové clony, která leží v ohniskové rovině kolimátoru. Optický kalibr je obvykle přichycen napevno ke konstrukci interferometru a je nastaven tak, aby se obraz dírkové clony zobrazoval 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 čočkou 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. 7 [1].



Obr 7: Schéma interferometru pro měření rovinných ploch (přepřacováno z [1])

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 [1].

Využitím Fizeaova 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. Oba odrazy následně dopadají na zobrazovací rovinu interferometru, kde se vyhodnocují interferenční proužky. Jedna z realizací této sestavy je zobrazena na obr. 8 [1].



Obr 8: Ilustrace interferometru pro měření konvexních ploch (přepřacováno z [1])

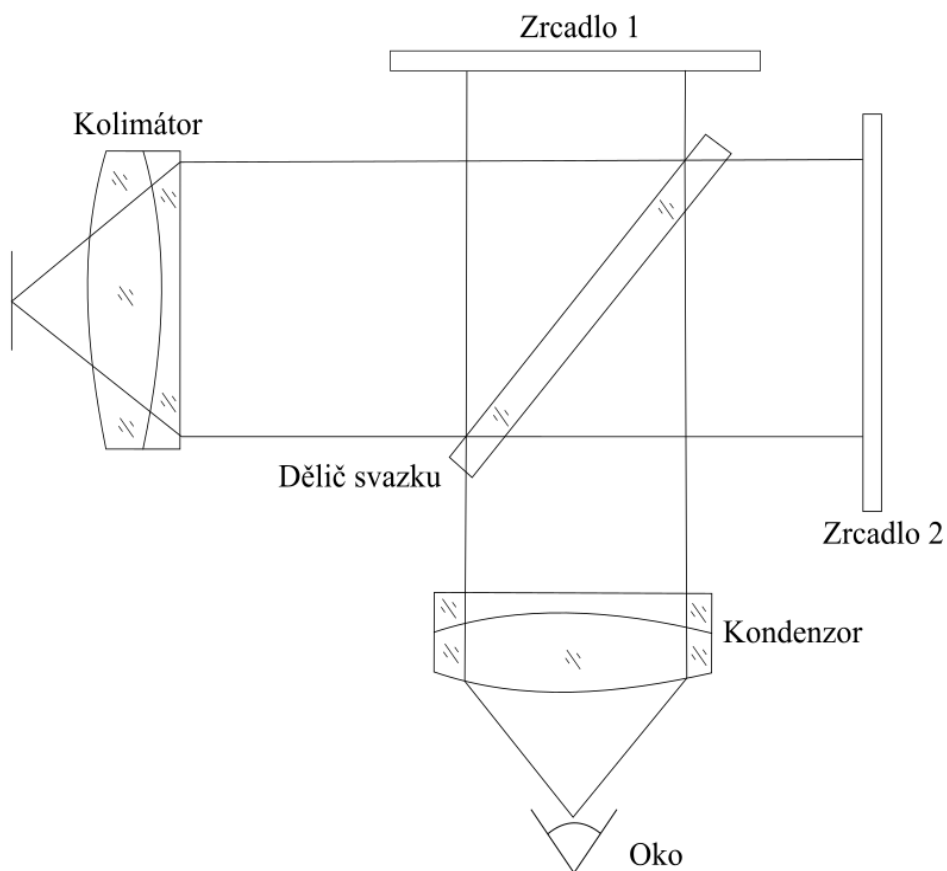
2.2.2. Twyman-Greenův interferometr

Dalším způsobem, jak lze měřit optické prvky bezkontaktně je Twyman-Greenův interferometr. Jde o modifikaci Michelsonova interferometru. Princip interferometru je zobrazen na obr. 9 [2].

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 [2].

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 [2].



Obr 9: Ilustrace složení sestavy Twyman-Greenova interferometru (přepřacováno z [2])

2.2.3. 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 [1].

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 [1].

2.2.3.1. Absolutní měření rovinnosti optických ploch metodou šesti kombinací tří kalibrů

V literatuře byla uvedena m.j. metoda absolutního měření rovinnosti porovnáváním páru tří prvků v osmi kombinacích [1].

Nicméně se ukazuje, že osm kombinací obsahuje redundantní informace, a proto v této kapitole bude popsána metoda, která využívá pouze šesti.

Při měření pomocí Fizeaova interferometru dvě rovinné plochy jsou pod sebou a vytváří vzduchovou mezeru. Vytvoří se interferenční proužky, ze kterých se získá optický dráhový rozdíl. Na základě ODR se získá rozdíl tvarů obou ploch. V tradiční metodě tří kalibrů jsou roviny porovnávány v párech. Převrácením a rotací prvků vůči sobě se získají profily měřených ploch jen pro některé průběhy odchylek od roviny, které disponují vhodnou symetrií. Bylo navrženo několik metod pro nejúplnější zjištění profilu celého povrchu. Všechny tyto metody využívají prokladu metodou nejmenších čtverců. Následkem je vymizení některých jemných detailů povrchu. V této kapitole bude popsána metoda, která využívá měření šesti kombinací tří měřených prvků, které jsou zobrazeny na obr. 11 [4].

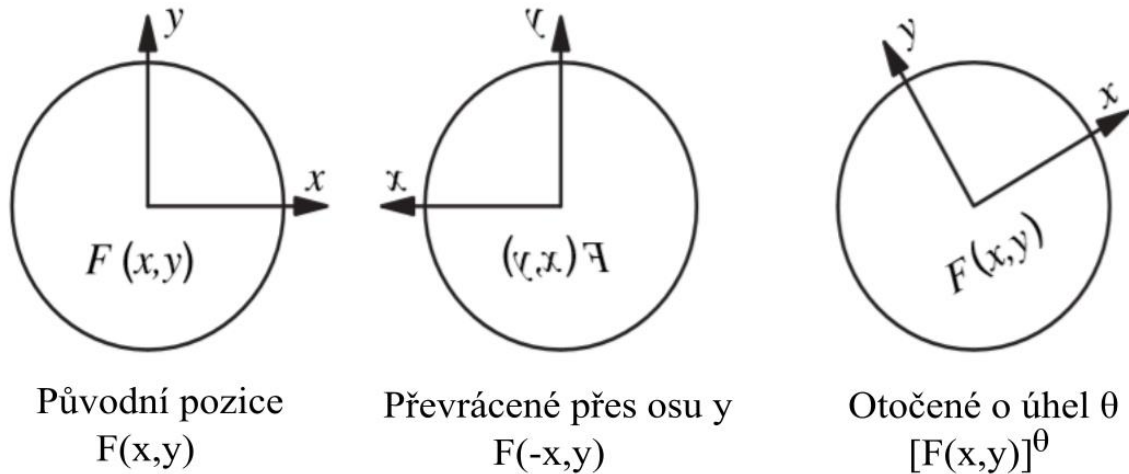
Tvar měřené plochy v karteziánském souřadnicovém systému popsany funkcí $F(x, y)$ lze rozložit na součet čtyř elementárních složek se symetriemi sudé v osách x a y , sudé v ose x a liché v ose y , liché v ose x a sudé v ose y , liché v osách x a y následujícím způsobem:

$$F(x, y) = F_{ss} + F_{ll} + F_{ls} + F_{sl}, \quad (9)$$

kde

$$\begin{aligned} F_{ss} &= \frac{F(x, y) + F(-x, y) + F(x, -y) + F(-x, -y)}{4}, \\ F_{ll} &= \frac{F(x, y) - F(-x, y) - F(x, -y) + F(-x, -y)}{4}, \\ F_{sl} &= \frac{F(x, y) + F(-x, y) - F(x, -y) - F(-x, -y)}{4}, \\ F_{ls} &= \frac{F(x, y) - F(-x, y) + F(x, -y) - F(-x, -y)}{4} [4]. \end{aligned} \quad (10)$$

Jelikož měřené prvky jsou postaveny rovinami k sobě, jedna rovina je otočena přes osu y . Jestliže jsou dvě roviny popsány jako $F(x, y)$ a $G(x, y)$ a rovina $G(x, y)$ je převrácena, pak optický dráhový rozdíl je $F(x, y) + G(-x, y)$. Pro přehlednost se zavádí dva operátory $[]^x$, $[]^\theta$. Na obr. 10 jsou ilustrovány tři možné orientace prvků při měření.



Obr 10: Tři možné orientace měřených prvků (přepřacováno z [1])

Převrácení x -ové osy je

$$[F(x, y)]^x = F(-x, y) \quad (11)$$

Rotace plochy vzhledem k původní pozici je

$$[F(x, y)]^\theta = F(x \cos \theta - y \sin \theta, x \sin \theta + y \cos \theta), \quad (12)$$

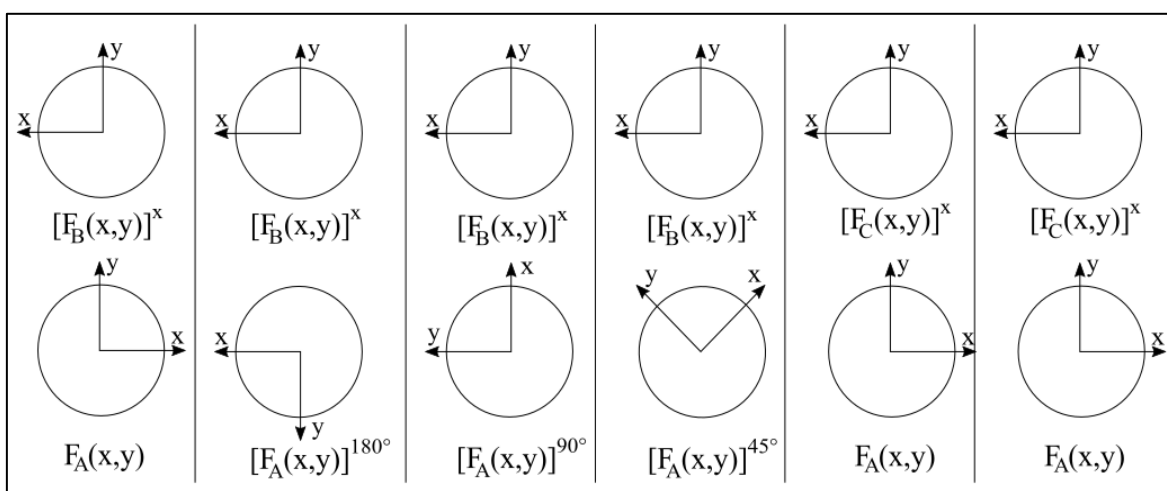
A proto

$$\begin{aligned}
 [F(x, y)]^{180} &= F(-x, -y), \\
 F(x, y) + G(-x, y) &= F(x, y) + [G(x, y)]^x.
 \end{aligned} \quad (13)$$

Aplikováním těchto operátorů do rovnice (9) se odvodí

$$\begin{aligned}
 [F(x, y)]^{180} &= F_{ss} + F_{ll} - F_{ls} - F_{sl}, \\
 [F(x, y)]^x &= F_{ss} - F_{ll} - F_{ls} + F_{sl}.
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Porovnání rovnic (14) a (9) ukazuje změnu na pravé straně rovnice. Za využití této znalosti lze vyřešit sudé-liché, liché-sudé, sudé-sudé, liché-liché složky rovinné plochy. První tři složky se dají vypočítat, avšak získat lichou-lichou složku je obtížné. Pro řešení tohoto problému se analyzuje profil povrchu ploch pomocí Fourierových sinových řad [4].



Obr 11: Přehled šesti kombinací potřebných pro výpočet profilů ploch (přepřacováno z [4])

V polárních souřadnicích je kruhový profil vycentrován na počátek funkcí θ a má periodu 360° . Periodická funkce se dá popsat pomocí Fourierových řad. Pro $x^2 + y^2 = konst.$, $F_{ls}(x, y)$, $F_{ss}(x, y)$, $F_{sl}(x, y)$, $F_{ll}(x, y)$ 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 [4].

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:

$$F_{ll}(x, y) = \sum_{m=1} f_{2m} \sin(2m\theta) \quad (15)$$

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 [4].

Rovnice (15) může být tedy zapsána jako

$$F_{ll} = F_{ll,2\theta} = F_{ll,2\theta lichá} + F_{ll,2\theta sudá}, \quad (16)$$

kde

$$\begin{aligned} F_{ll,2\theta sudá} &= \sum_{m=sudá} f_{2m} \sin(2m\theta) \\ &= \sum_{m=1} f_{4m} \sin(4m\theta) = F_{ll,4\theta} \\ F_{ll,2\theta lichá} &= \sum_{m=lichá} f_{2m} \sin(2m\theta). \end{aligned} \quad (17)$$

Dolní indexy $2lichá\theta$ a $2sudá\theta$ reprezentuje sumu lichých složek $F_{ll,2\theta}$ a sumu sudých složek $F_{ll,2\theta}$. V rovnicích (17) dolní index 4θ udává, že $F_{ll,2\theta sudá}$ má fundamentální frekvenci 4 (tzn. periodu o 90°).

$$F_{ll,4\theta} = F_{ll,4\theta lichá} + F_{ll,4\theta sudá}, \quad (18)$$

kde

$$\begin{aligned} F_{ll,4\theta lichá} &= \sum_{m=lichá} f_{4m} \sin(4m\theta) \\ F_{ll,4\theta sudá} &= \sum_{m=sudá} f_{4m} \sin(4m\theta). \end{aligned} \quad (19)$$

A proto lichá-lichá složka může být vyjádřena jako suma $n - lichých\theta$ složek, kde $n = 2, 4, 8, 16, 32, \dots$. To znamená:

$$F_{U,2\theta} = F_{U,2\theta lichá} + F_{U,4\theta lichá} + F_{U,8\theta lichá} + F_{U,16\theta lichá} + \dots, \quad (20)$$

kde $8lichá\theta$ a $16lichá\theta$ složky jsou definovány stejným způsobem jako v rovnicích (19). Každá složka zahrnuje další členy Fourierových sinových řad. Například $F_{U,2\theta lichá}$ obsahuje část $\sin(2\theta), \sin(6\theta), \sin(10\theta), \sin(14\theta)$ atd., a $F_{U,4\theta lichá}$ obsahuje $\sin(4\theta), \sin(12\theta), \sin(20\theta), \sin(28\theta)$ atd. Pro hladký povrch je lichá-lichá složka reprezentována prvními dvěma členy v rovnici (20). Aplikováním rotačního operátoru se dají rovnice (16) a (18) přepsat na

$$\begin{aligned} [F_{U,2\theta}]^{90^\circ} &= -F_{U,2\theta lichá} + F_{U,2\theta sudá}, \\ [F_{U,4\theta}]^{45^\circ} &= -F_{U,4\theta lichá} + F_{U,4\theta sudá}, \end{aligned} \quad (21)$$

kde výrazy na pravé straně rovnice jsou definovány v rovnicích (17) a (19). Díky pootočení roviny o 45° se získá $2lichá\theta$ složka a pootočení roviny o 90° $4lichá\theta$ složka. Vyšší řády lze teoreticky získat z pootočení roviny o méně než 45° , ale příliš malé pootočení může do výpočtu vnést větší relativní chyby [4].

Výsledné profily ploch jsou následně rekonstruovány pomocí vztahu

$$\begin{aligned} A &= A_{SS} + A_{IS} + A_{SI} + A_{U,2lichá\theta} + A_{U,4lichá\theta}, \\ B &= B_{SS} + B_{IS} + B_{SI} + B_{U,2lichá\theta} + B_{U,4lichá\theta}, \\ C &= C_{SS} + C_{IS} + C_{SI} + C_{U,2lichá\theta} + C_{U,4lichá\theta} [4]. \end{aligned} \quad (22)$$

Pro rovinnou plochu jsou obecně složky vyšších frekvencí Fourierovy řady malé. Složka lichá-lichá může být aproximována $2lichá\theta$ a $4lichá\theta$ členy. Tyto členy nejsou však získány Fourierovou transformací, ale jednoduchými aritmetickými operacemi. Při rotaci prvku o úhel, který není násobkem 90° , je nutné využít interpolace pro získání informací o optickém dráhovém rozdílu [3].

2.2.3.2. Absolutní měření rovinnosti optických ploch metodou tří kalibrů pomocí čtyř kombinací

Bylo navrženo několik metod pro absolutní měření pomocí čtyř kombinací, například využitím Zernikových polynomů pro rozložení odchylek ploch do ortogonálních funkcí. Tyto metody vždy trpí ztrátou informací u vyšších prostorových frekvencích [5].

Metoda měření se čtyřmi kombinacemi, které je věnována tato práce, vychází z popisu v předešlé kapitole [3].

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

$$\begin{aligned}A + B^X &= M_1 \\A + C^X &= M_2 \\B + C^X &= M_3 \\B + A^{X90} &= M_4,\end{aligned}\tag{23}$$

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

$$\begin{aligned}B^X(x, y) &= B(-x, y) \\A^{90}(x, y) &= A(x\cos(90^\circ) - y\sin(90^\circ), x\sin(90^\circ) + y\cos(90^\circ)), \\A^{90}(x, y) &= A(x, -y)\end{aligned}\tag{24}$$

Jako v metodě popsané v předešlé kapitole, rekonstruované roviny jsou složeny ze 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

$$\begin{aligned}A &= A_1 + A_{ls} + A_{ll}, \\B &= B_1 + B_{ls} + B_{ll}, \\C &= C_1 + C_{ls} + C_{ll}.\end{aligned}\tag{25}$$

Členy A_1, B_1, C_1 lze charakterizovat

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{(M_2 - M_3 + M_1^x)}{2}, \\ B_1 &= \frac{(M_1 - M_2 + M_3)}{2}, \\ C_1 &= \frac{(M_2 - M_3 + M_3^x)}{2}. \end{aligned} \tag{26}$$

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

$$\begin{aligned} M_5 &= (M_4 - M_1)^{90} + M_4 \\ &= (A^{90} + B^x - A - B^x)^{90} + A^{90} + B^x \\ &= A^{90} - A^{90} + A^{90} + B^x \\ &= A^{90} + B^x, \end{aligned} \tag{27}$$

a obdobně

$$M_6 = (M_5 - M_1)^{90} + M_5 = A^{180} + B^x. \tag{28}$$

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

$$\begin{aligned} A_{ls} &= (M_1 - M_6 - A_1 + A_1^{180})/2 \\ &= ((M_1 - M_6) - (A_1 - A_1^{180}))/2 \end{aligned} \tag{29}$$

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

$$\begin{aligned} B_{ls} &= A_{ls} + (m_1^{180} - m_1)/2, \\ C_{ls} &= A_{ls} + (m_2^{180} - m_2)/2, \end{aligned} \tag{30}$$

kde členy m_1, m_2 jsou

$$\begin{aligned} m_1 &= M_1 - A_1 - B_1, \\ m_2 &= M_2 - A_1 - C_1 \text{ [3]}. \end{aligned} \tag{31}$$

Do tohoto bodu bylo vcelku jednoduché vypočítat první tři dílčí složky, nicméně vypočítat složku čtvrtou (lichá-lichá) je složitější. Pro získání této složky je nutné sečíst řady 2θ členů, jak bylo vysvětleno v předchozí kapitole. V této metodě všechny liché-liché složky obsahují všechny řady $2n\theta$ členů, kde n je liché číslo. První člen má symetrii 2θ a udává informaci o astigmatismu dané plochy pro úhel 45° . [3]

Lichá-lichá složka pro členy 2θ je

$$\begin{aligned} A_{l,2lichá\theta} &= (M_1 - M_5 - A_1 - A_{ls} + A_1^{90} + A_{ls}^{90})/2 \\ B_{l,2lichá\theta} &= A_{l,2lichá\theta} + (m_3^{90} - m_3)/2, \\ C_{l,2lichá\theta} &= A_{l,2lichá\theta} + (m_4^{90} - m_4)/2, \end{aligned} \tag{30}$$

kde

$$\begin{aligned} m_3 &= m_1 - A_{ls} - B_{ls}, \\ m_4 &= m_2 - A_{ls} - C_{ls}. \end{aligned} \tag{31}$$

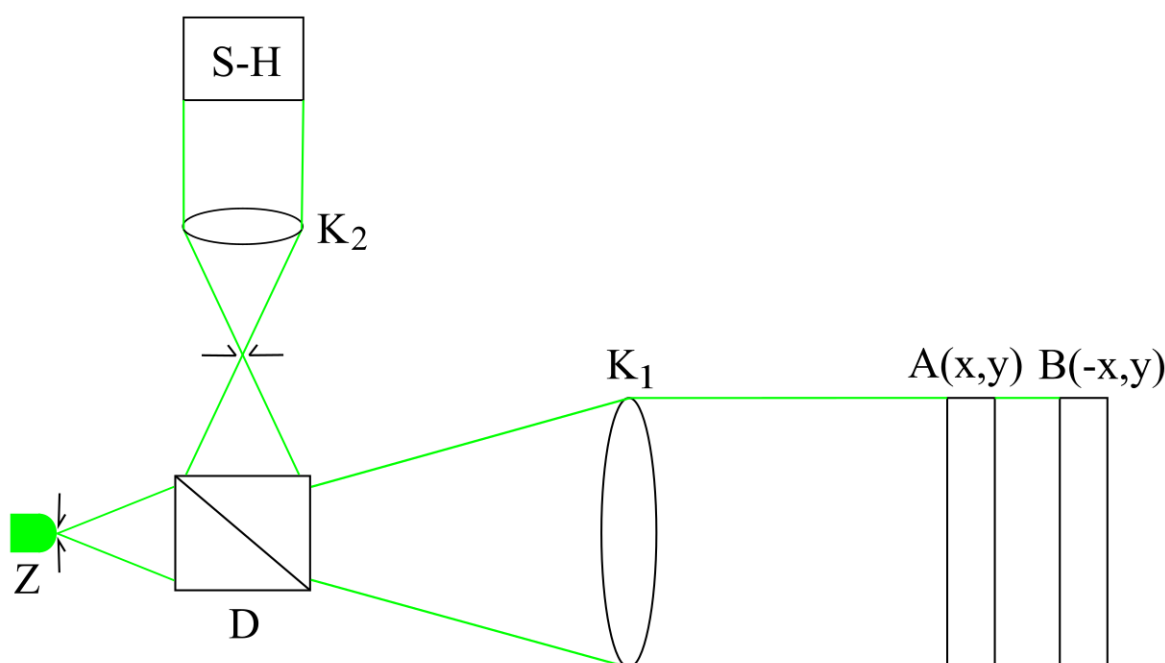
Výsledný profil měřených tří ploch je následně aproximován dle

$$\begin{aligned} A &= A_1 + A_{l,2lichá\theta} \\ B &= B_2 + B_{l,2lichá\theta} \\ C &= C_3 + C_{l,2lichá\theta} \end{aligned} \tag{32}$$

Tato metoda využívá pouze čtyř kombinací pro získání absolutní kalibrace tří ploch a její výhodou je jednoduchá manipulace se čtyřmi kalibry. [3]

3. 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. 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. Kolimační čočka K_2 dále kolimuje svazky na Shack-Hartmannův sensor, který je postaven v takové vzdálenosti, aby do jeho vstupní apertury dopadaly odrazy od obou měřených optických ploch. Schéma sestavy je zobrazeno na obr. 12.



Obr 12: Schéma měřící sestavy metody absolutního měření rovinnosti metodou tří kalibrů. Měřené plochy jsou na obrázku znázorněny dvojitou čarou.

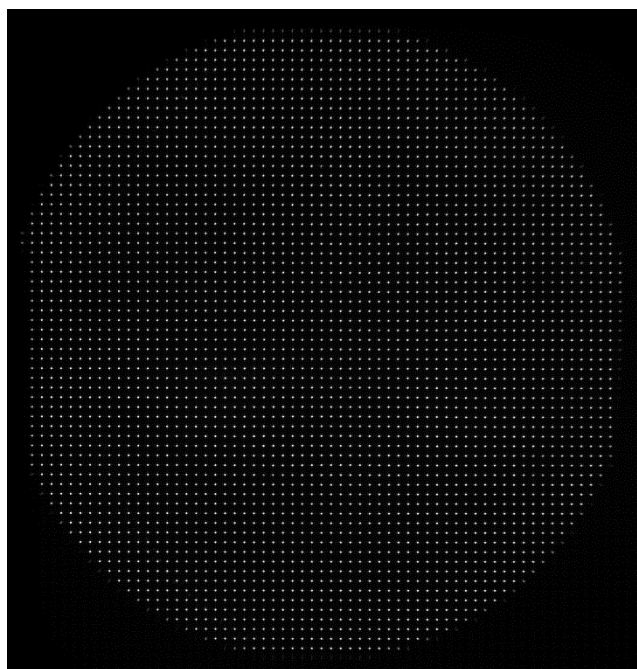
Kolimační čočky K_1 a K_2 využitě v této sestavě mají ohniskové vzdálenost $f_1 = 500 \text{ mm}$ a $f_2 = 100 \text{ mm}$. V této optické sestavě byl použit Shack-Hartmannův sensor s rozlišením $2048 \times 2048 \text{ px}$ a roztečí mikročoček $5,5 \times 5,5 \mu\text{m}$. Rastr mikročoček má rozměry $10 \times 10 \text{ mm}$, velikost mikročoček je $150 \mu\text{m}$ s ohniskovou vzdáleností $5,2 \text{ mm}$ [6].

4. Měření odchylek optických ploch

4.1. Měření odchylek optických ploch zakrýváním jednoho z optických prvků

Prvním způsobem, jak lze zjistit výsledné profily ploch měření je založeno na zakrývání 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. 12. Jemnými náklony obou prvků se docílí toho, aby se odrazy od obou ploch překrývaly na Shack-Hartmannově senzoru (viz. obr 13). Jemné náklony jsou zajištěny pomocí šroubů na upínací mechanice optických prvků.



Obr 13: Síť bodů překrytých odrazů od obou optických ploch

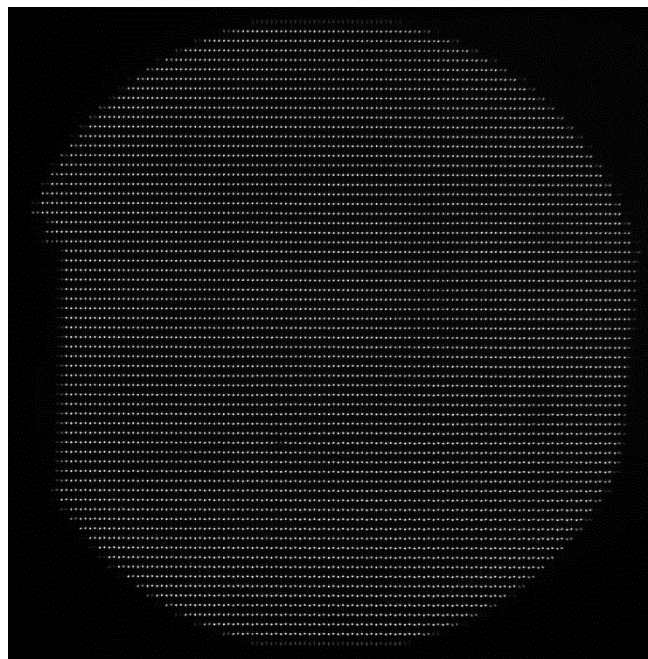
Nejprve se zaznamená obraz překrytých odrazů AB , následně se prvek B zakryje a opět se sejmou data prvku A . V jednoduchém algoritmu v programu MATLAB se od sebe tyto dva obrazy odečtou a získají se informace o prvku B . Prvek B se následně použije jako reference a pomocí programu MeoSHS se zjistí data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

zakomponován ořez, který zajišťuje, aby tento jev nezasahoval do vyhodnocení výsledných profilů ploch.

Kvůli časové prodlevě při zakrývání jednoho z prvků může vliv turbulence zatížit výsledné profily různou chybou. Pro odstranění vlivu turbulence byl ověřen další způsob, jak získat informace o odchylkách ploch.

4.2. Popis měření odchylek optických ploch separací z jednoho společného obrázku

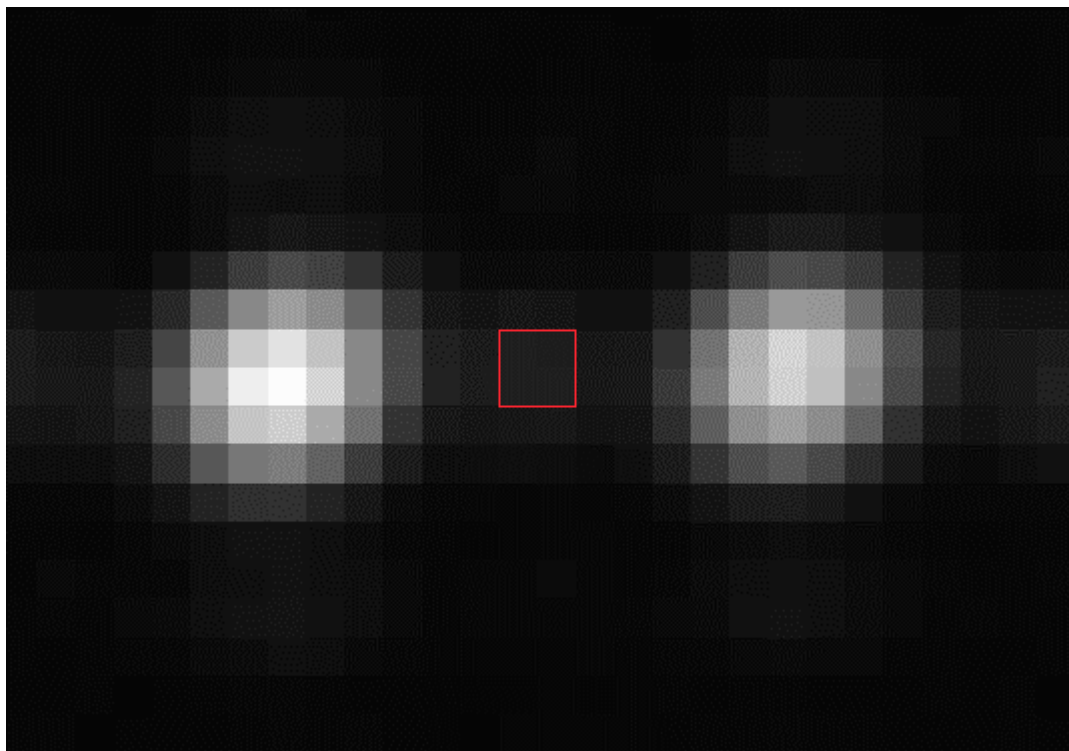
Jak bylo popsáno v předchozí kapitole, turbulence může mít vliv na získání dat odchylek ploch. V této metodě se tedy vynechá zakrývání jednoho prvku. Prvky se opět vloží do sestavy a obrazy obou ploch se zobrazí na Shack-Hartmannově senzoru (dále S-H senzor).



Obr 14: Síť bodů posunutých odrazů od obou optických ploch

Jemným náklonem jednoho z optických prvků se dosáhne toho, aby se stopy v rastru vytvořeném odrazem od obou ploch nepřekrývaly, ale byly posunuty vedle sebe. Jedna síť bodů by měla být ve středu mezer fokusovaných bodů sítě druhé (obr. 14).

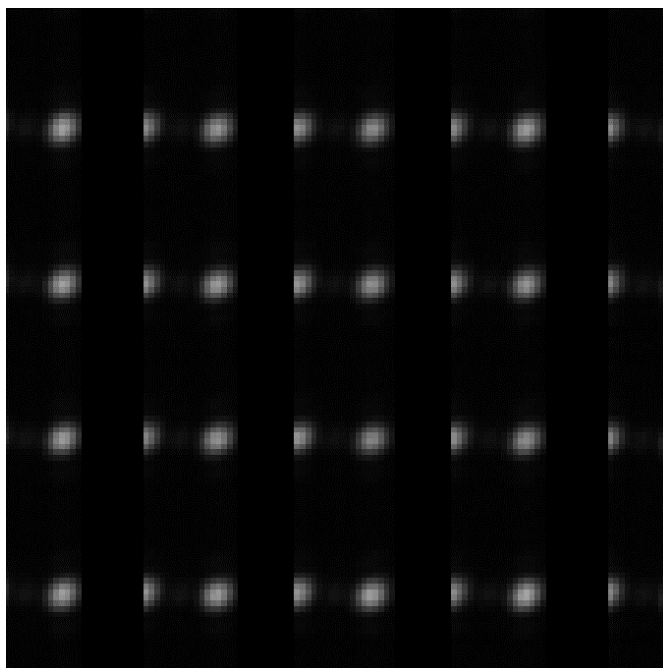
Ze snímku je nyní potřeba obě sítě separovat do samostatných obrázků. U takto získaného snímku se s použitým S-H senzorem projevuje vliv difrakce vznikem sekundárních stop (obr. 15).



Obr 15: Sekundární stopa, která vznikla vlivem difrakce na S-H senzoru. (vyznačena červeným rámečkem)

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 14x14 pixelů. K vyloučení vlivu sekundárních stop se do separovaných snímků přenášejí výřezy s obrazy stop s okolím o rozměru 11x11 pixelů.

Jedním způsobem, jak separovat dva obrázky, bylo vytvoření harmonické mřížky s prostorovou frekvencí odpovídající nasnímanému rastru. Vlivem deformace dopadající vlnoplochy není bodový rastr rovnoměrný a aplikovaná mřížka v některých místech obrazu části stop svazků odřízne (viz obr. 16). Tomuto jevu se dalo částečně zamezit ručním posunutím mřížky, nicméně vždy tam nějaké porušení stopy zůstalo.

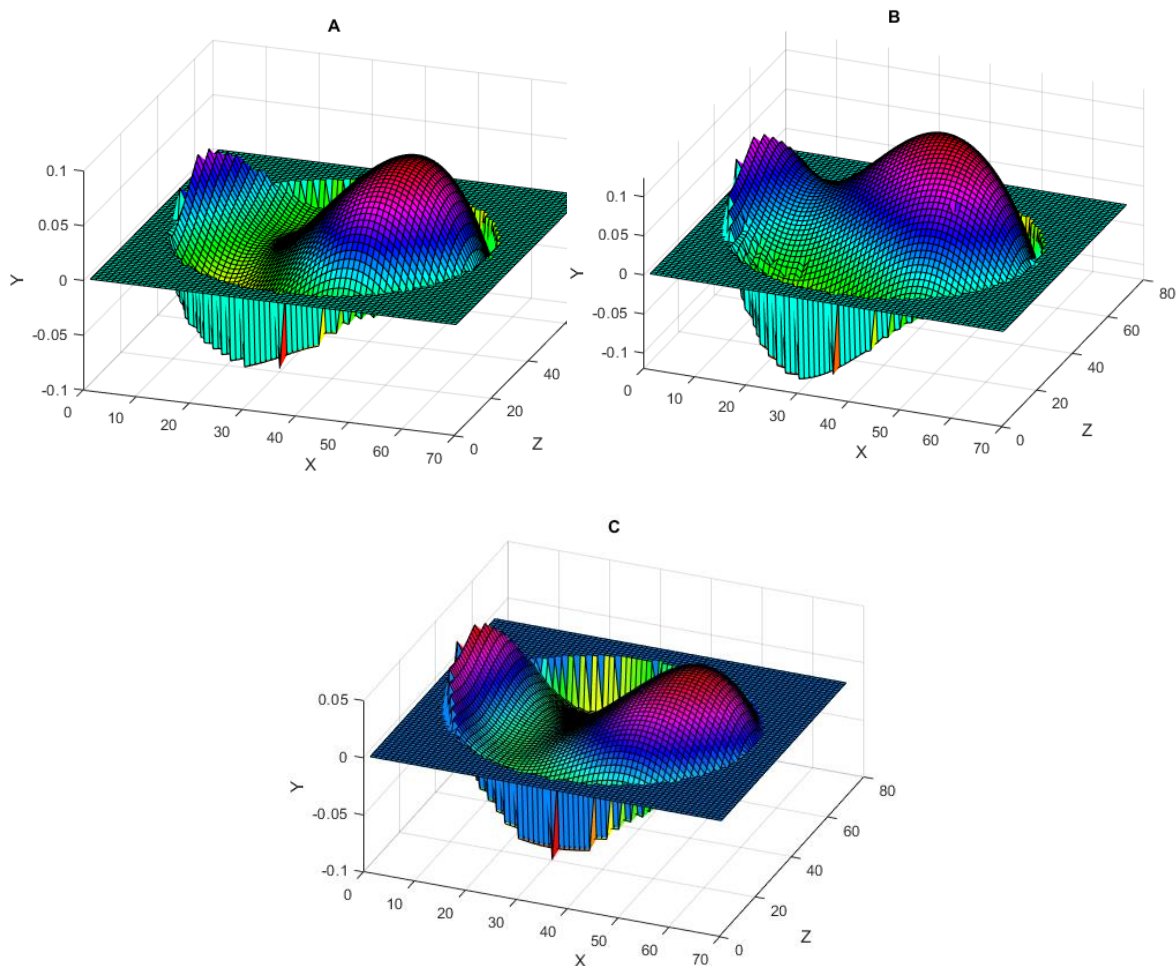


Obr 16: Ukázka useknutí stop svazků po aplikování mřížky na společný obraz

Dalším způsobem, jak separovat dva obrázky je využití znalosti poloh těžišť získaných z kalibračního souboru programu MeoSHS. Ze znalosti přesné polohy těžišť 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.

5. Výsledky

Pro měření pomocí zakrytí jednoho z prvků jsou výsledné tvary optických ploch:

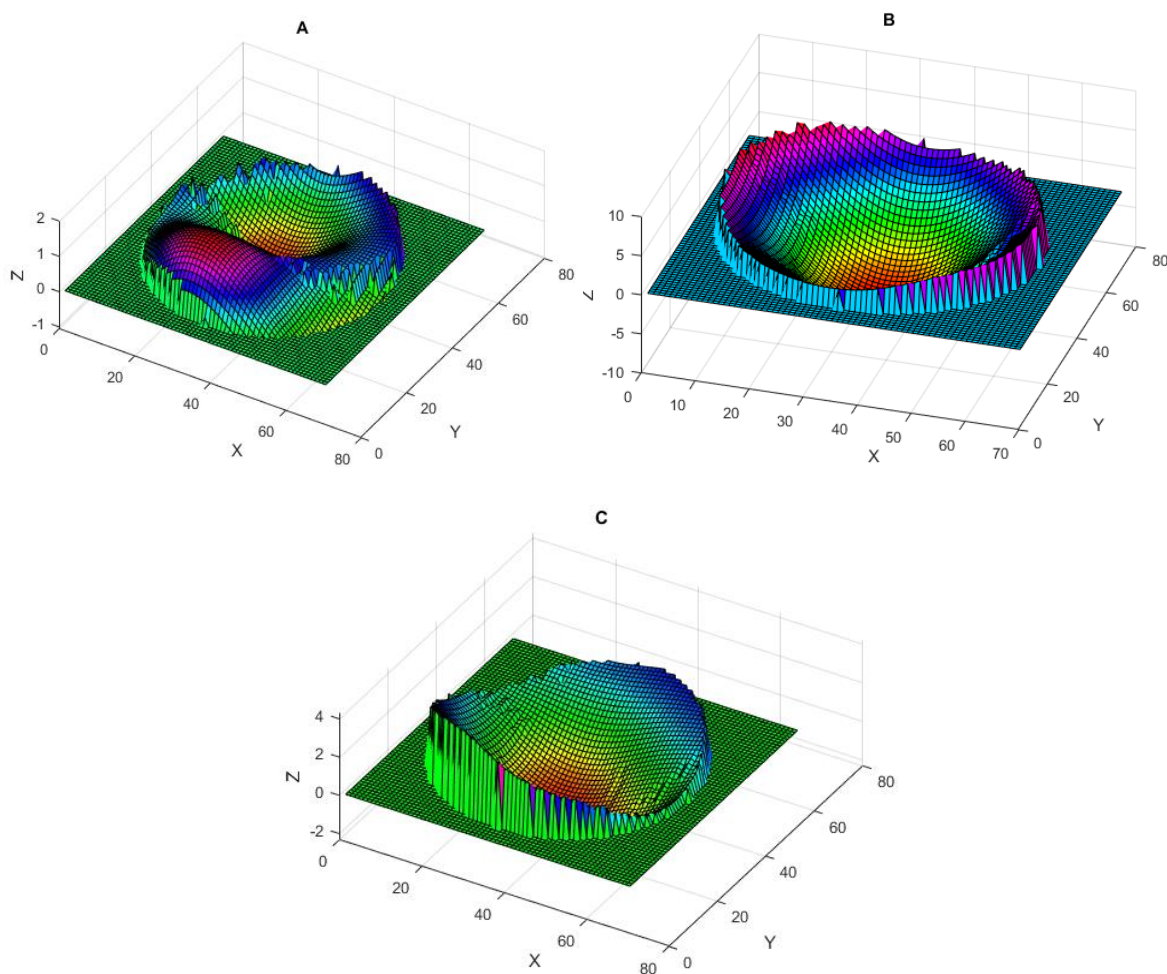


Obr 17: Výsledné tvary optických ploch prvků *A, B, C* při zakrytí jednoho z prvků

Tabulka 1: Maximální hodnoty PV pro výsledné tvary optických ploch *A, B, C*

	PV [λ]
<i>A</i>	0,24
<i>B</i>	0,44
<i>C</i>	0,175

Výsledné tvary ploch při měření separováním z jednoho společného obrázku za využití mřížky jsou:

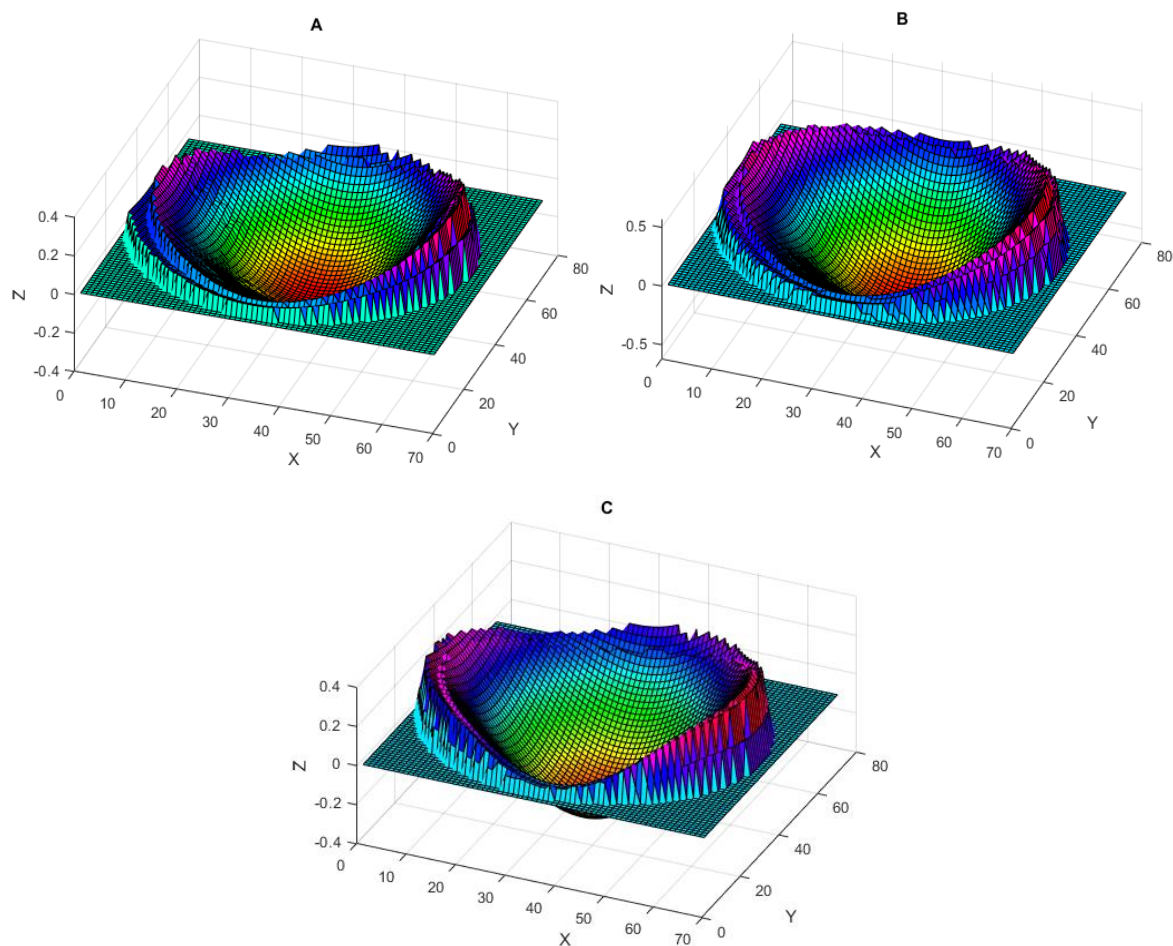


Obr 18: Výsledné tvary ploch při separaci ze společného snímku za využití mřížky

Tabulka 2: Maximální hodnoty PV pro výsledné tvary optických ploch *A, B, C*

	PV [λ]
<i>A</i>	4,924
<i>B</i>	26,11
<i>C</i>	11,77

Výsledné tvary měřených optických ploch za využití znalosti poloh těžišť z kalibračního souboru programu MeoSHS jsou:

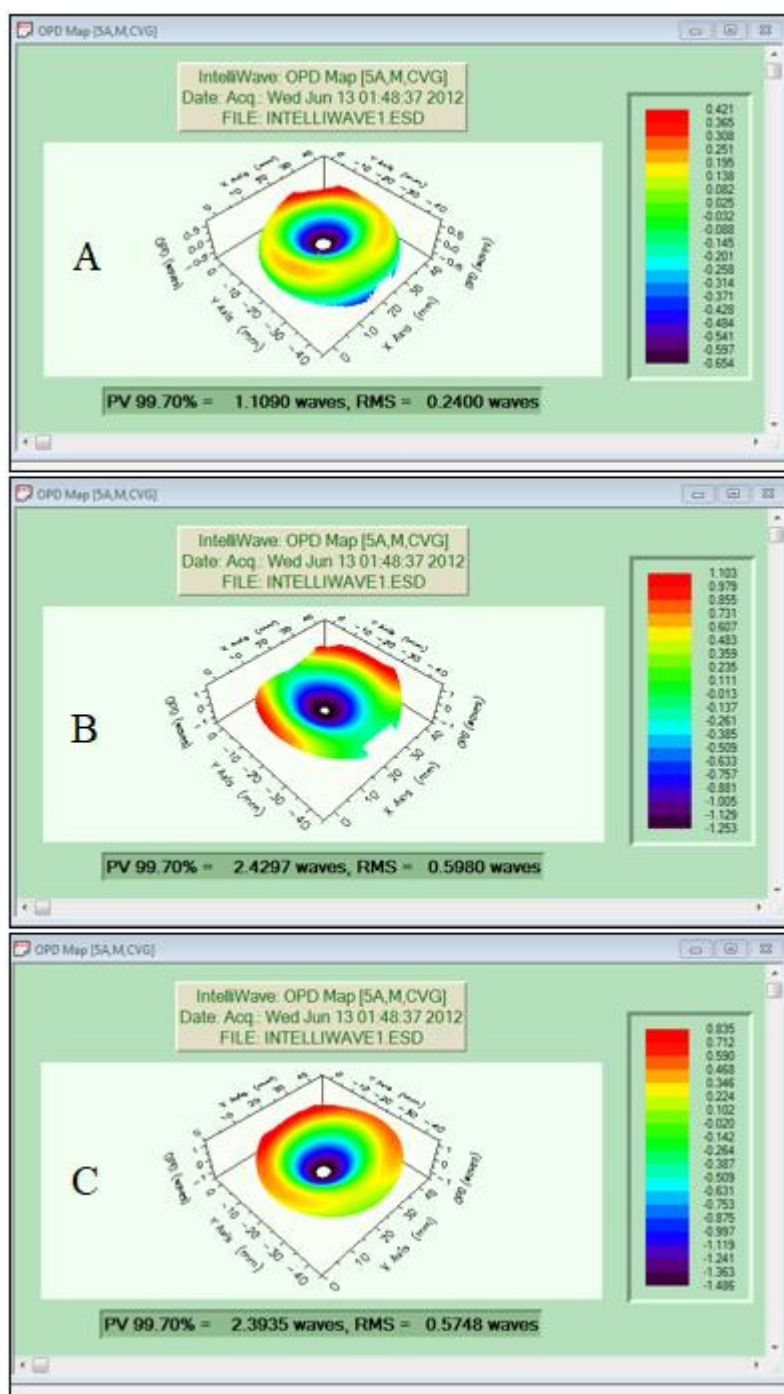


Obr 19: Výsledné tvary měřených optických ploch získaných separací z jednoho společného snímku za využití znalosti polohy těžišť

Tabulka 3: Maximální hodnoty PV pro výsledné tvary optických ploch A, B, C

	PV [λ]
<i>A</i>	0,9110
<i>B</i>	1,6261
<i>C</i>	1,1377

Pro porovnání byly optické prvky změřeny na interferometru Mahr v Meoptě a vyhodnoceny v programu IntelliWave.



Obr 20: Výsledné tvary plochy pro optické prvky A, B, C (seřazeny sestupně) změřených na interferometru. Hodnoty PV jsou zobrazeny na obrázku.

6. 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° .

Byly navrženy dva způsoby měření. Při prvním způsobu se při snímání jeden prvek zakryl pro zjištění informací o obou optických plochách. Nicméně kvůli časové prodlevě po zakrytí, mohly být výsledky zatíženy chybou vlivem turbulence.

Druhý způsob již tento vliv eliminoval. Nasnímal se společný snímek dvou poněkud posunutých rastrů a následně se z něj separovaly dva snímky s daty o každé z optických ploch samostatně. Pro separaci byly navrženy dvě metody: separace aplikováním vytvořené mřížky a separace za využití znalosti poloh těžišť z kalibračního souboru programu MeoSHS.

Ukázalo se, že při zakrývání jednoho z optických prvků výsledné tvary optických ploch neodpovídají výsledkům naměřených na interferometru. Hodnoty PV jsou odlišné o 78% – 93%.

Metoda separace z jednoho společného obrázku za využití mřížky je pro účel měření tvarů optických ploch nepoužitelná, chyba měření je obrovská.

Při separaci z jednoho společného obrázku ze znalosti polohy těžišť stop svazků, výsledné tvary optických ploch odpovídají naměřeným tvarům na interferometru. Hodnoty PV se liší o 18 – 52%. Uvedené rozdíly lze do značné míry přičíst skutečnosti, že při vyhodnocení snímků SH detektoru byla na měřených kusech vymezena menší plocha než při měření na interferometru.

V práci byl vytvořen a experimentálně ověřen algoritmus pro využití Shack-Hartmannova senzoru k absolutnímu měření rovinnosti metodou tří kalibrů. Dosavadní výsledky potvrzují schůdnost této metody. Při jejím dalším rozvíjení je nutné dále řešit preciznější uchycení měřených kusů a ověřit volbu senzoru s většími aperturami mikročoček.

7. Seznam obrázků

Obr 1: Newtonův interferometr	3
Obr 2: Popis vzniku interferenčních proužků.....	4
Obr 3: Ukázka interferenčního obrazce pro kvalitní optickou rovinnou plochu	5
Obr 4: Negativ interferenčního obrazce pro sférickou plochu	6
Obr 5: Newtonovy kroužky pro sférickou plochu (odchylka 2λ).....	7
Obr 6: Newtonovy kroužky pro sférickou plochu (odchylka 8λ).....	7
Obr 7: Schéma interferometru pro měření rovinných ploch.....	9
Obr 8: Ilustrace interferometru pro měření konvexních ploch	10
Obr 9: Ilustrace složení sestavy Twyman-Greenova interferometru.....	11
Obr 10: Tři možné orientace měřených prvků.....	13
Obr 11: Přehled šesti kombinací potřebných pro výpočet profilů ploch.....	14
Obr 12: Schéma měřicí sestavy metody tří kalibrů.	20
Obr 13: Síť bodů překrytých odrazů od obou optických ploch	21
Obr 14: Síť bodů posunutých odrazů od obou optických ploch.....	22
Obr 15: Sekundární stopa, která vznikla vlivem difrakce na S-H senzoru.....	23
Obr 16: Ukázka useknutí stop svazků po aplikování mřížky na společný obraz	24
Obr 17: Výsledné tvary optických ploch prvků A, B, C při zakrytí jednoho z prvků	25
Obr 18: Výsledné tvary ploch při separaci ze společného snímku za využití mřížky.....	26
Obr 19: Výsledné tvary ploch při separaci za využití znalosti polohy těžišť	27
Obr 20: Výsledné tvary ploch změřených na interferometru	28

8. Seznam použité literatury

- [1] Malacara, D.: *Optical shop testing*. 3rd edition. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, p. 385, 2007

- [2] EDMUND OPTICS INC. Optical flat manual: Optical Techniques for Measuring Flatness, 2004, dostupné [online] na:
<https://www.edmundoptics.com/document/download/396272>

- [3] 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

- [4] Ai, Ch., Wyant, J. C. – *Absolute testing of flats by using even and odd functions*, Applied Optics, Vol. 32, No. 25 (1993), 4698 s.

- [5] Fritz, B. S. – *Absolute calibration of an optical flat*, Proc. SPIE, 433, 123-30 (1983)

- [6] Paúr, Martin – *Měření rovinných ploch pomocí Shack-Hartmannova senzoru*, str. 23, 2014

9. Seznam příloh

Přílohy na CD:

- Text práce.....DP_Avrat.pdf
- Výpočetní algoritmy:
 - Výpočet tvarů ploch..... vypocet_tvaru_ploch.m
 - Vytvoření harmonické mřížky.....harmonicka_mrizka.m
 - Separace obrázků ze znalosti polohy těžišť.....polohy_tezist.m
- Naměřená data:
 - Metoda zakrývání jednoho prvku.....odchylky_zakryvani.xlsx
 - Metoda aplikování harmonické mřížky.....odchylky_mrizka.xlsx
 - Metoda separace obrázků ze znalosti polohy těžišť.....odchylky_teziste.xlsx
 - data z kalibračního souboru.....stredAB.xlsx, stredAC.xlsx, stredBC.xlsx, stred BAx90.xlsx