



# Absolutní interferometrie s přeladěním vlnové délky pro měření planparalelních optických elementů

## Diplomová práce

*Studijní program:*

N3901 Aplikované vědy v inženýrství

*Studijní obor:*

Aplikované vědy v inženýrství

*Autor práce:*

**Bc. Lukáš Veselý**

*Vedoucí práce:*

Ing. Jan Kredba

Ústav nových technologií a aplikované informatiky





## Zadání diplomové práce

# Absolutní interferometrie s přeladěním vlnové délky pro měření planparalelních optických elementů

*Jméno a příjmení:* **Bc. Lukáš Veselý**  
*Osobní číslo:* M19000183  
*Studijní program:* N3901 Aplikované vědy v inženýrství  
*Studijní obor:* Aplikované vědy v inženýrství  
*Zadávací katedra:* Ústav nových technologií a aplikované informatiky  
*Akademický rok:* **2020/2021**

### Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s principy absolutní interferometrie, metodami fázového posuvu prostřednictvím změny vlnové délky a se způsoby zpracování interferometricky naměřených dat.
2. Navrhněte experimentální uspořádání interferometru pro měření planparalelních optických elementů.
3. Navržený interferometr sestavte a proveďte měření planparalelních optických elementů v různých konfiguracích.
4. Vyhodnoťte naměřená data a zhodnoťte výsledky.

*Rozsah grafických prací:*  
*Rozsah pracovní zprávy:*  
*Forma zpracování práce:*  
*Jazyk práce:*

dle potřeby dokumentace  
40 – 50 stran  
tištěná/elektronická  
Čeština



### **Seznam odborné literatury:**

- [1] MALACARA, D. Optical shop testing. 3rd ed. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2007. ISBN 0471484040.  
[2] SALLEH, B. E. A. , TEICH, M.C.: Základy fotoniky I,II , MATFYZPRESS, Praha, 1994-95.  
[3] DE GROOT, P.J.: Measurement of transparent plates with wavelength-tuned phase-shifting interferometry, Appl. Opt. 39 2658 (2000).

*Vedoucí práce:*

Ing. Jan Kredba  
Ústav nových technologií a aplikované informatiky

*Datum zadání práce:*

19. října 2020

*Předpokládaný termín odevzdání:*

16. května 2022

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.  
děkan

L.S.

Ing. Josef Novák, Ph.D.  
vedoucí ústavu

V Liberci dne 19. října 2020

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

30. května 2022

Bc. Lukáš Veselý



# Absolutní interferometrie s přeladěním vlnové délky pro měření planparalelních optických elementů

## Abstrakt

Tématem diplomové práce je přesné a rychlé měření tvaru optických ploch planparalelních elementů, homogenity indexu lomu a jejich tloušťky. K tomuto účelu byla zvolena interferometrická metoda měření využívající řízenou změnu fáze a Fourierovu transformaci pro oddělení interferenčních obrazů. K separaci interferogramů pro jejich následné vyhodnocení byly využity diskrétní číslicové filtry s nekonečnou impulzní odezvou. Metoda je ověřena na více typech fizeau interferometrech a doplněna o absolutní interferometrii pro zjištění tloušťky měřených vzorků.

**Klíčová slova:** Měření planparalelních elementů, Interferometrie s řízenou změnou fáze, Fourierova transformace, Absolutní interferometrie, Fizeau interferometr

## Abstract

The topic of the diploma thesis is precise and fast measurement of the shape of optical surfaces of plane-parallel elements, homogeneity of refractive index and width. For this purpose, an interferometric measurement method using controlled phase shifting and Fourier transform for separation of interference images was chosen. Discrete digital filters with infinite impulse response were used to separate interferograms for their subsequent evaluation. The method is verified on several types of fizeau interferometers and supplemented by absolute interferometry to determine the thickness of the measured samples.

**Keywords:** Measurement of plane-parallel elements, Phase-shifting interferometry, Fourier transform, Absolute interferometry, Fizeau interferometer

## Poděkování

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu Janu Kredbovi za vedení práce a vyhrazení času na komentáře, díky kterým mohla být práce dokončena. Také za umožnění přístupu k interferometrům v centru TOPTEC a jeho odborné rady.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Planparalelní optické elementy</b>	<b>10</b>
1.1	Využití . . . . .	10
1.2	Parametry . . . . .	10
1.2.1	Homogenita indexu lomu . . . . .	11
1.2.2	Centrální tloušťka a klín . . . . .	11
1.2.3	Kvalita optického povrchu . . . . .	11
<b>2</b>	<b>Interferometrie</b>	<b>13</b>
2.1	Geometrické uspořádání . . . . .	14
2.1.1	Newtonův interferometr . . . . .	14
2.1.2	Fizeau interferometr . . . . .	15
2.2	Interferometrické metody . . . . .	16
2.2.1	Interferometrie s řízenou změnou fáze . . . . .	16
2.2.2	Měření planparalelních elementů . . . . .	17
2.2.3	Absolutní interferometrie . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Separace interferogramů</b>	<b>23</b>
3.1	Frekvenční filtrace . . . . .	23
3.2	Metoda nejmenších čtverců . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Měření povrchu vzorků a průchod vlnoplochy</b>	<b>26</b>
4.1	Odstranění zadního odrazu . . . . .	26
4.2	Jednoúčelový fizeau interferometr . . . . .	27
4.2.1	Komponenty . . . . .	28
4.2.2	Měření . . . . .	28
4.2.3	Frekvenční filtrace . . . . .	30
4.2.4	Vyhodnocení fázových map . . . . .	30
4.2.5	Laserové tyče, Nd:YAG . . . . .	36
4.3	Absolutní interferometrie na fizeau interferometru AWA . . . . .	37
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>40</b>
	<b>Použitá literatura</b>	<b>42</b>

## Seznam obrázků

1.1	Výšková mapa planparalelního transmisního elementu z taveného křemenu. Měřeno na ASI QED a vyhodnoceno v prostředí Zygo MetroPro.	12
2.1	Základní uspořádání pro pozorování Newtonových kroužků, zpracováno dle [2]	14
2.2	Uspořádání Fizeau interferometru využívající referenční rovinu, zpracováno dle [2]	15
2.3	Průběh vyhodnocení	16
2.4	Průběh intenzity na fázovém posunu, zpracováno dle [2]	17
2.5	Překrývání interferencí, vzorek - destička z taveného křemene	18
2.6	Odrazy od čtyř povrchů, zpracováno dle [9]	18
3.1	Označení dvou míst na kterých je získán frekvenční obraz průběhu intenzity	24
3.2	Frekvenční obraz průběhu intenzity ze dvou míst. Všechny vrcholy mají stejnou frekvenci.	24
4.1	Měřený vzorek z taveného křemene položený na podložce s broušenou zadní stranou pomocí glycerolu	26
4.2	Fáze vzniklé odražením od ploch měřeného planparalelního vzorku z taveného křemene na interferometru ASI	27
4.3	Schéma jednoúčelového Fizeau interferometru pro měření planparalelních elementů	27
4.4	Schéma jednoúčelového Fizeau interferometru pro měření planparalelních elementů	28
4.5	Ukázka řízené změny fáze	29
4.6	Zobrazení průběhu intenzity v jednom bodě	29
4.7		30
4.8	Navržený IIR filtr pro selekci jednoho interferogramu	31
4.9	Zaznamenaný snímek 666 před aplikací filtru	31
4.10	Zaznamenaný snímek 666 po aplikaci filtru	32
4.11	Zabalené fáze seřazené podle pořadí frekvenčních vrcholů	32
4.12	Čtveřice rozbalených fází, seřazených podle pořadí frekvenčních vrcholů	33
4.13	Vyhodnocení fáze prázdné kavity	33
4.14	Tvar povrchu přední a zadní strany měřeného vzorku, jednotky jsou metry	34

4.15 Klín mezi vyleštěnými povrchy měřeného vzorku, jednoty jsou metry	34
4.16 Deformace vlnoplochy pro průchodu měřeným planparalelním elementem . . . . .	35
4.17 Vyhodnocená homogenita měřeného vzorku podle vzorce 4.4 . . . . .	36
4.18 Zobrazení rozbalených fází z měření laserových tyčí . . . . .	37
4.19 Měřicí uspořádání v interferometru AWA . . . . .	38
4.20 Detail na umístění vzorku v interferometru AWA . . . . .	39
4.21 Vyhodnocená tloušťka po celé ploše měřeného elementu, jednotkou jsou milimetry . . . . .	39

## Úvod

Planparalelní transmisní optické elementy jsou častými komponenty moderních optických systémů, na něž jsou v současné době kladeny stále vyšší nároky na kvalitu. Při průchodu světelného svazku těmito elementy dochází při výskytu tvarové nepřesnosti či jiných optických aberací k deformaci vlnoplochy a tím i snížení kvality výsledného optického systému, v němž jsou integrovány. Proto je nutné velice přesně znát tvar obou jejich optických ploch a homogenitu indexu lomu. K tomu lze s výhodou dobrého prostorového rozlišení využít bezkontaktní interferometrické metody, které měří celou plochu najednou a eliminují tak možnost zanesení parazitních struktur do výsledného měření. Oproti jiným optickým elementům však díky vzájemné rovnoběžnosti a shodnému tvaru obou optických ploch odchází ke složení signálu získaného odrazem od obou těchto ploch a proto pro ně nelze použít běžných interferometrických metod.

V teoretické části jsou popsány typy a způsoby využití planparalelních transmisních optických elementů, důležité parametry a způsoby jejich měření. Vzhledem k výhodám bezkontaktních interferometrických metod měření, jako rychlost měření z důvodu záznamu celé plochy elementu nebo dobré prostorové rozlišení, je popsán princip skládání dvou vlnění. Dále jsou rozebrány geometrická uspořádání a popis dvou z nich, používaných v praktické části. Následně jsou popsány interferometrické metody záznamu dat a popis superpozice více signálů vznikajících odrazy od více ploch, při měření planparalelních elementů. Z důvodu překrývání zaznamenaných signálů je nutné použít metodu pro jejich vzájemné oddělení popsanou v poslední kapitole teoretické části.

V praktické části se práce zabývá ukázkovým měřením planparalelních elementů na komerčním interferometru ASI QED. Dále je pomocí znalostí z teoretické části diplomové práce, sestaven jednoúčelový interferometr na půdě Technické univerzity v Liberci speciálně pro měření transmisních planparalelních elementů. Pro ověření funkčnosti sestaveného uspořádání je naměřený vzorek změřen také na interferometru AWA v centru TOPTEC. Ten navíc rozšiřuje možnosti použité interferometrické metody o absolutní měření tloušťky elementu, která je také vyhodnocena.

# 1 Planparalelní optické elementy

Optické komponenty se za posledních několik dekad integrovaly do mnoha oborů každodenního života. Využívají ve vědeckých oborech úzce spojených s optikou jako je interferometrie, spektrometrie, holografie a mnoho dalších nebo oborech využívající optické komponenty pro obrábění (laserové řezání) nebo přenos informace (optická vlákna) a v mnoha dalších odvětvích lidské činnosti. Planparalelní elementy jsou jen jedním druhem transmisních optických elementů. Dalšími jsou sférické, asférické elementy a freeform komponenty. Optické soustavy obvykle tvoří jednotky až desítky těchto komponent velmi přesně umístěných a seřízených, což klade nároky na přesnou výrobu.

## 1.1 Využití

Planparalelní transmisní elementy jsou elementy se dvěma rovnoběžnými rovinnými plochami hojně využívané v optických systémech. Mezi ně řadíme vlnové nebo-li fázové destičky používané pro úpravu polarizace světla způsobené průchodem skrz ně. Jedná se o dvojlomné anizotropní krystaly vyráběné především z křemene, slídy a dalších podobných materiálů. Dalším příkladem jsou laserové tyče, jejichž čela tvoří vzájemně rovnoběžné plochy. S lasery se pojí i další využití planparalelních elementů, tím jsou optické rezonátory. Dále lze do planparalelních elementů zařadit optické filtry, wafery a další.

## 1.2 Parametry

Vzhledem k vysokým požadavkům na kvalitu optických ploch, současně s nároky na fyzikální vlastnosti elementů, je potřeba dosahovat adekvátní přesnosti měření řady klíčových parametrů těchto optických elementů. Řadíme mezi ně tvar optických ploch, homogenitu indexu lomu a tloušťka elementu. Některé tyto parametry je možné měřit jak kontaktními tak bezkontaktními metodami. Obecně jsou však vhodnější bezkontaktní metody, vzhledem k větší přesnosti a menšímu riziku poškození vzorku. Mezi tyto metody řadíme mimo jiné i interferometrické metody rozebrané v kapitole 2.

Obráběcí stroje a procesy optické výroby jsou v současnosti na vysoké úrovni. Jsme schopni dosáhnout stabilní opakovatelnosti na kvality opracování optických ploch a dosažení mikrodrsnosti povrchu až pod jeden nanometr [1]. U planparalel-

ních elementů je také kladený veliký důraz na homogenitu indexu lomu a fyzickou tloušťku po celé ploše. [2][3]

### 1.2.1 Homogenita indexu lomu

Jedním z důležitých parametrů optických materiálů je prostorové rozložení indexu lomu. Leštěním nelze ovlivnit index lomu použitého materiálu. Tento parametru je odvozen od kvality polotovaru, ze kterého je element vyráběn. Tato skutečnost nic nemění na tom, že se jedná o kritický parametr ovlivňující výsledné vlastnosti výrobku. Zkoumanými nedokonalostmi jsou především šlíry, které se vyznačují velkým gradientem změny indexu lomu na malé ploše. Díky absolutní interferometrii s řízenou změnou fáze jsme tento parametru schopni určit ze stejného měření jako všechny další parametry. Výhodou je tedy krátký čas měření ohledem na počet parametrů zjištěných z vyhodnocení viz. 2.2.2.[4][2]

### 1.2.2 Centrální tloušťka a klín

Klín označuje vzájemný náklon mezi dvěma stranami optického elementu. V případě planparalelních elementů je nutné klín odstranit již během obrábění optickým ploch vzhledem k požadavku na jejich rovnoběžnosti. V případě existence klínu mezi plochami bude docházet k lomu procházejícího světla a tím k vybočení svazku mimo optickou osu. Tím se zvyšují nároky na přesnost výroby a i na přesnost metrologické metody. Centrální tloušťka zásadním způsobem ovlivňuje optickou dráhu, kterou světlo urazí v optickém elementu. Všechny transmisní elementy mění vlnoplochu průchozího světla a je tedy nutné znát jejich přesnou tloušťku.[4] [2]

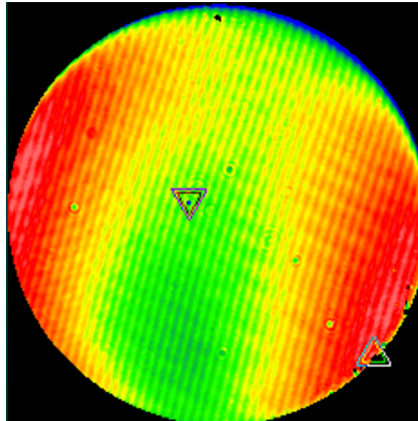
### 1.2.3 Kvalita optického povrchu

Z hlediska kvality vyleštění rovinného optického povrchu se u planparalelních elementů sleduje rovinnost obou ploch. Častými nedokonalostmi vyskytujícími se při výrobě rovinných elementů jsou kopce, údolí, ale také astigmatismus. Eliminace těchto jevů je možná korigováním parametrů během obrábění, jak na NC autorotačních kinematických strojích (kerger) tak na moderních CNC leštících strojích. Správné korigování je však možné pouze v případě přesného a rychlého měření přímo ve výrobě. Jako ideální zařízení se jeví jednoúčelový interferometr viz kapitulu 2.2.2. Jakmile se pomocí interferometrie zjistí přesně tvar a nedokonalosti plochy, upraví se výrobní proces a je možné výrazně potlačit sférickou aberaci a jiné další irregularity. [4][2]

Optické výrobky s rovnoběžnými vyleštěnými plochami je obtížné měřit interferometricky. Z důvodu překrývání vícero interferometrických obrazců přes sebe na snímači. Možností jak měřit požadované parametry bez potřeby rozklíčovat překrývající se interferogramy je měření vyleštěných ploch pomocí imerzní kapaliny. Využívá se kapalně sloučeniny například glycerolu, který má podobný index lomu jako měřený element. Měřený element se pomocí kapaliny přiloží k dalšímu rovinnému elementu se stejným indexem lomu, který má jako zadní povrch klín nebo



je povrch broušený. Tím se z velké části docílí eliminace odrazu od zadní strany. Nejsme ovšem schopni docílit naprosto schodného indexu lomu těchto dvou elementů a imerzní kapaliny, proto je do měření zanesená systematická chyba z důvodu částečných odrazů na rozhraních viz obrázek 1.1, který byl realizován v kapitole 4.1. [2][3]



Obrázek 1.1: Výšková mapa planparalelního transmisního elementu z taveného křemenu. Měřeno na ASI QED a vyhodnoceno v prostředí Zygo MetroPro.

## 2 Interferometrie

Jedná se o přesnou bezkontaktní metodu měření vzdáleností. V moderních interferometrech jsme schopni dosáhnout přesnosti měření ve zlomcích vlnové délky použitého zdroje záření až  $\lambda/20$  [5]. První interferometr sestavil Albert Abraham Michelson v roce 1881 s použitím širokospektrálního světelného zdroje. Taková interferometrická měření jsou možná, ovšem při vyžití monochromatického zdroje jsou snadněji realizovatelná. Z důvodu větší prostorové i časové koherence světla. Proto rychlý rozvoj laserů po roce 1960 umožnil také rozvoj metrologické oblasti interferometrie, která do té doby narážela na limity zdrojů světla. Pro zjednodušení popisu budeme v následujícím odstavci uvažovat pouze monochromatické záření.[6][7]

Metoda je založena na principu skládání dvou světelných monochromatických vln, pro zjednodušení budeme uvažovat rovinné vlny popsané rovnicí[2]:

$$\vec{E} = E_0 \cdot e^{i(\omega t + \varphi)} \quad (2.1)$$

kde:

$E_0$  = amplituda intenzity elektrického pole

$i$  = imaginární jednotka

$\omega$  = úhlová frekvence

$\varphi$  = fáze vlny

Intenzita světla je úměrná druhé mocnině intenzity elektrického pole podle rovnice:

$$I \propto |E|^2 \quad (2.2)$$

V případě složení dvou vln lze intenzitu popsat rovnicí:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\varphi \quad (2.3)$$

kde:

$I_1$  = intenzita prvního vlnění

$I_2$  = intenzita druhého vlnění

$\varphi$  = rozdíl fází

Rozdíl fází  $\varphi$  určuje výslednou intenzitu po složení dvou vlnění. Na základě odlišností v optických drahách dvou vln dochází k ovlivnění fázového posunu a pozorujeme na snímači interferenční proužky, ze kterých lze vyčíst relativní informaci o poloze a tím určit tvar a nedokonalosti vyleštěné plochy. Tyto proužky nazýváme interferogram, vznikají díky změnám intenzity složeného záření. [2][6]

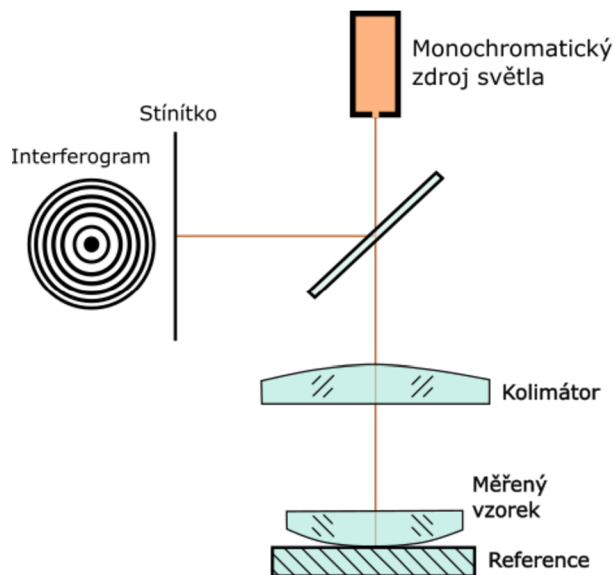
## 2.1 Geometrické uspořádání

V současné době se používají především Fizeau interferometr pro měření tvaru optických ploch, rozebraný níže. Mach-Zender interferometr používaný pro vizualizaci proudění, ve fyzice plazmatu nebo přenosu tepla, pro hustoty, tlaku a přenosu tepla v plynech [7]. Dále Twyman-green interferometr sloužící pro měření optických komponent vložením do jedné větve interferometru a sledování interferenčních proužků na detektoru [2] nebo více svazkové či jiné common path interferometry. V praktické části práce probíhají experimenty na různých typech Fizeau interferometrech, proto v následujících podkapitolách bude popsán právě tento typ a také jeho předchůdce Newtonův interferometr. Dále bude popsán způsob záznamu dat pomocí řízené změny fáze, možnost získání absolutní vzdálenosti z interferogramů a měření plan-paralelních elementů. [2][6][7]

### 2.1.1 Newtonův interferometr

Jejím z prvních měřících uspořádání byl newtonův interferometr, ze kterého následně vychází Fizeau interferometr. Jednalo se pozorování takzvaných newtonových kroužků, ty lze pozorovat při umístění přesně vyleštěného optického prvku, může se jednat jak o rovinu tak o sféru, a měřeného transmisního optického elementu s minimální vzduchovou mezerou mezi nimi. Pozorovaný interferogram je výsledek rozdílu dvou optických ploch, reference a zkoumané plochy.

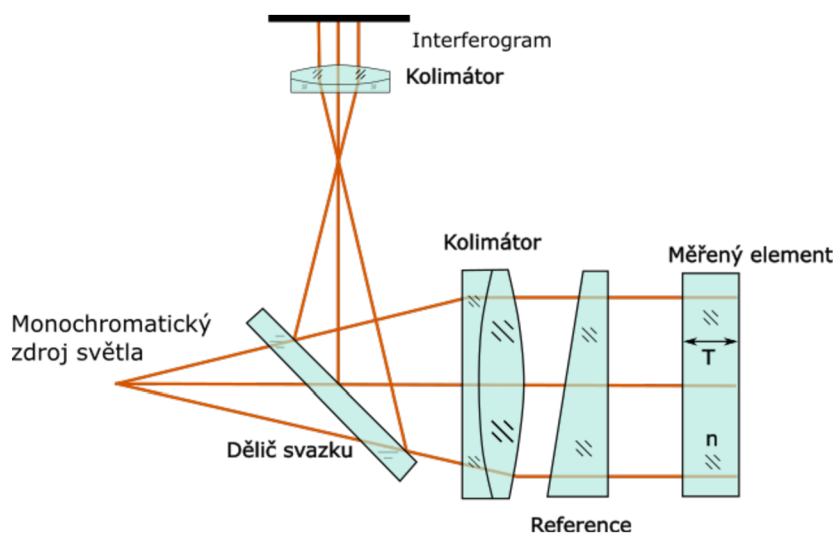
Na obrázku 2.1 je ukázáno jednoduché uspořádání pro pozorování Newtonových kroužků při zkoumání sfér s dlouhým rádiem a referenční roviny. [2][6][7]



Obrázek 2.1: Základní uspořádání pro pozorování Newtonových kroužků, zpracováno dle [2]

## 2.1.2 Fizeau interferometr

Fizeau interferometr má základy v uspořádání komponent pro pozorování Newtonových prstenců. Oproti výše zmíněnému Newtonovu interferometru zde dochází ke mnohonásobnému zvětšení vzduchové mezery mezi testovým objektem a referenční plochou. Tím se zvětšuje rozdíl dráhy tzv. OPD (=optical path difference), kterou paprsek urazí po odražení od reference a následně od zkoumaného objektu. Zvětšení optické dráhy na zpravidla jednotky a až desítky centimetrů způsobí značné komplikace. Na rozdíl od Newtonova interferometru, kde OPD je v řádek jednotek násobků vlnové délky použitého zdroje světla, vzniká u Fizeu interferometru nárok na koherentní a monochromatický zdroj světla. Tyto podmínky byly splněny právě příchodem laserů. Na obrázku 2.2 je zobrazeno základní uspořádání fizeau interferometru pro měření optických ploch. [2][6][7]



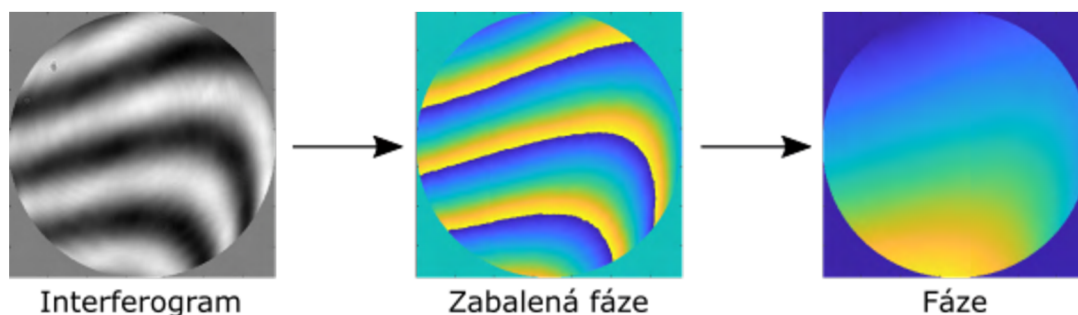
Obrázek 2.2: Uspořádání Fizeau interferometru využívající referenční rovinu, zpracováno dle [2]

Z obrázku je patrné, že nespornou výhodou tohoto uspořádání je absence jiných optických nebo mechanických elementů mezi objektovou a referenční větví interferometru, nedojde tedy k znehodnocení výsledku. Referenční a objektová větev sdílí stejnou dráhu jedná se tedy o typ common path interferometru, z toho plynou výhody během měření. Na rozdíl od Michelsonova nebo Twyman-Greena interferometru, kde obě větve mají svou vlastní dráhu a výsledná interference těchto dvou paprsků je velmi náchylná na vibrace, není tak náchylná na chyby způsobené vlivem prostředí. Fizeau interferometr je velice oblíbeným uspořádáním v optické metrologii pro měření vzdáleností a tím k měření tvarů a je použito také v praktické části této diplomové práce pro experimenty. [2][6]

## 2.2 Interferometrické metody

### 2.2.1 Interferometrie s řízenou změnou fáze

Interferometrie s řízenou změnou fáze, anglicky nazývaná phase shifting interferometry (PSI) je způsob záznamu dat a jejich následná analýza, která lze využít v mnoha typech geometrických uspořádání a měření. Z klasického statického interferogramu nelze například zjistit orientaci výškové mapy vzorku, kterou získáme vyhodnocením středů světlých a tmavých proužků, vzniklých rozdílem mezi referenčním a testovaným povrchem. Ty lze chápat jako vrstevnice, tedy body ležící na stejném středu interferenčního proužku odpovídají stejnému rozdílu optických drah (optical path difference = OPD). Rozdíl optických délek dvou sousedních středů interferenčních proužků odpovídá polovině vlnové délky použitého koherentního zdroje světla. Nedostatkem je získání vyhodnocených dat jen v místě středů, výšková mapa se tedy mění skokovitě. Nejsme tedy schopni určit plynule se měnící OPD přímo z dat, což mnoho měřících metod vyžaduje. Chybějící data mezi středy proužků, lze získat vhodnou interpolací. Vzhledem k schopnosti přesněji vyhodnotit širší proužky zde existuje nepřímá úměra mezi počtem bodů ve výškové mapě a rozlišením. Při záznamu interferogramů pomocí PSI odpadá nutnost vyhodnocování středů proužků a s tím i spojné problémy. [2][7][8]



Obrázek 2.3: Průběh vyhodnocení

Základem interferometrie s řízenou změnou fáze je zanesení definované změny fáze závislé na čase mezi referenční a testovanou vlnoplochu. Toho lze docílit vícero způsoby, umístěním fázového objektu do optické dráhy, pohybem referenčního nebo měřeného objektu v řádech desítek nm nebo přeladěním vlnové délky zdroje světla. Diplomová práce je zaměřena na měření planparalelních elementů, pro jejich měření není možné pro změnu fáze použít fázový objekt nebo lineární posun větvě. Z důvodu nutnosti oddělení vícero zaznamenaných interferencí do jednoho interferogramu viz kapitola 2.2.2.[2][7][8]

Rovnice popisující referenční a testovanou vlnoplochu jsou:

$$w_r(x, y, t) = a_r(x, y) \cdot e^{i[\varphi_r(x, y) - \delta(t)]} \quad (2.4)$$

$$w_t(x, y) = a_t(x, y) \cdot e^{i[\varphi_t(x, y)]} \quad (2.5)$$

kde:

- $a_r(x, y)$  = amplituda referenční vlnoplochy
- $a_t(x, y)$  = amplituda testované vlnoplochy
- $\varphi_r(x, y)$  = fáze referenční vlnoplochy
- $\varphi_t(x, y)$  = fáze testované vlnoplochy
- $\delta(t)$  = relativní fázový posun mezi vlnoplochami

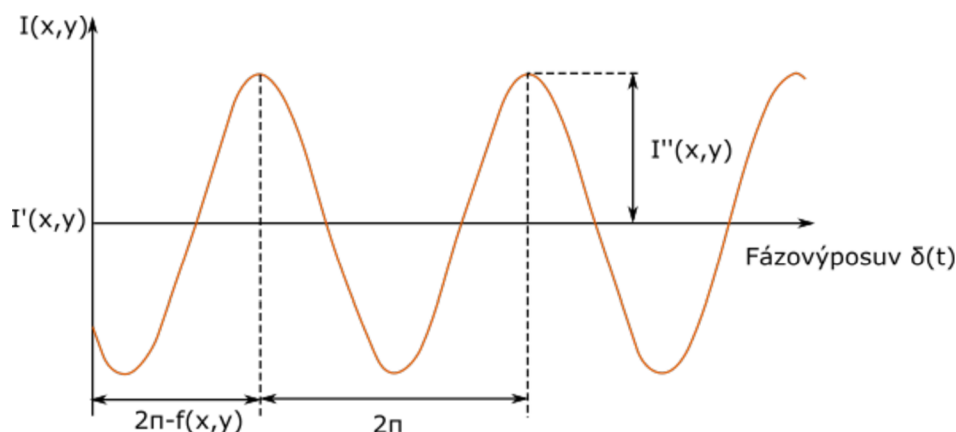
Základní rovnicí pro PSI je matematický popis výsledného interferogramu po složení těchto dvou vlnoploch:

$$I(x, y, t) = I'(x, y) + I''(X, y) \cdot \cos[\varphi_t(x, y) - \varphi_r(x, y) + \delta(t)] \quad (2.6)$$

kde:

- $I'(x, y) = a_r^2(x, y) + a_t^2(x, y)$ , průměrná intenzita
- $I''(X, y) = 2 \cdot a_r(x, y) \cdot a_t(x, y)$ , modulace intenzity
- $\varphi_t(x, y) - \varphi_r(x, y)$  = rozdíl fází vlnoploch

Rovnice interference vychází z rovnice 2.3 Na průběhu závislosti intenzity v jednom bodě na hodnotě fázového posunu, lze pozorovat sinusovou závislost. Pro lineární změnu fáze odpovídá tento průběh závislosti intenzity na čase. Všechny neznámé z předchozí rovnice lze určit z toho průběhu viz. obrázek 2.4. Důsledkem změny fázového posunu je viditelný pohyb proužků zobrazovaného interferogramu. [2]



Obrázek 2.4: Průběh intenzity na fázovém posunu, zpracováno dle [2]

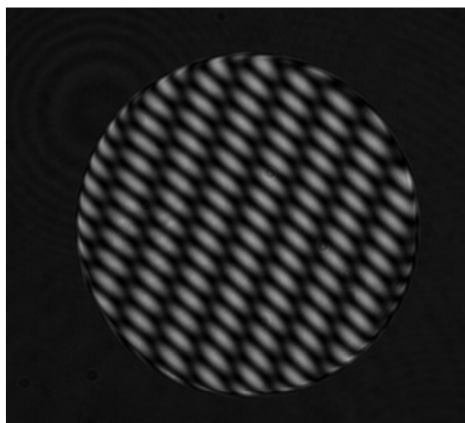
## 2.2.2 Měření planparalelních elementů

Úskalí při měření planparalelních elementů je v záznamu vícero interferencí na čipu kamery. Na obrázku 2.5 je ukázán interferogram s překrývajícími se interferencemi. Ty vznikají odrazy jak od přední strany měřeného elementu, tak i od zadní strany. Počet interferogramů je dán vztahem:

$$Pocet = N \cdot \frac{(N - 1)}{2} \quad (2.7)$$

kde:

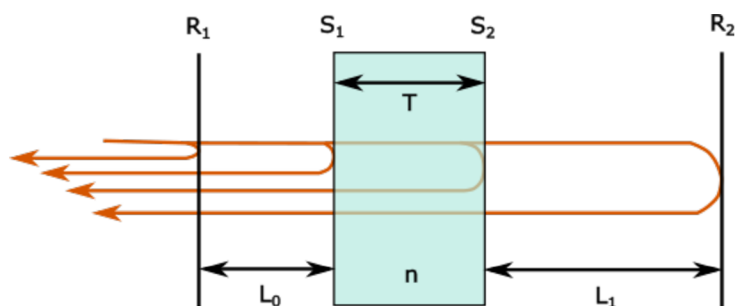
$N$  = počet rovnoběžných povrchů v měřicí kavitě



Obrázek 2.5: Překrývání interferencí, vzorek - destička z taveného křemene

Jednou z možností je pro měření planoparalelních optických elementů používána metoda potlačení nežádoucího druhého odrazu testovacího elementu. Toho se dosáhne použitím imerzní kapaliny a následném přiložení klínového elementu nebo objektu s matnou zadní stranou. Tento způsob měření je velmi náročný na čas a také na chyby způsobené tvorbou bublin v imerzní kapalině, která je navíc pro velké indexy lomu z toxických látek.[9][10][8]

Jiným řešením je tzv. Fourier transform phase-shifting interferometry (FTPSI). Při této metodě není třeba měřený vzorek nijak upravovat a také umožňuje měření více parametrů najednou. Jak bylo uvedeno v kapitole 2.2.1 fázový posun lze vytvořit různými metodami, ale tou vhodnou je definovaná změna vlnové délky zdroje záření (laseru). [9][11]



Obrázek 2.6: Odrazy od čtyř povrchů, zpracováno dle [9]

Tento způsob sběru dat je doplněn o frekvenční analýzu pomocí Fourierovi transformace. Metoda si zakládá na různých rychlostech změny fáze v závislosti na délce

kavit. Pokud zajistíme správné vzdálenosti kavit podle vztahů [3]:

$$L_1 = h \cdot 3 \cdot nT \quad (2.8)$$

$$L_2 = h \cdot 9 \cdot nT \quad (2.9)$$

kde:

$L_1, L_2, T, n$  = parametry měřeného vzorku podle obrázku 2.6  
 $h$  = kladné celé číslo, většinou 1

V případě velké tloušťky měřeného elementu, by měřící kavita byla příliš dlouhá pro konstrukci. Proto je vhodné volit délky  $L_1$  a  $L_2$  podle rovnic [3]:

$$L_1 = \frac{nT}{3} \quad (2.10)$$

$$L_2 = \frac{nT}{9} \quad (2.11)$$

pak jsme schopni ve frekvenční doméně od sebe oddělit dílčí interference ze získaného interferogramu. Za použití těchto metod vyhodnocení lze z naměřených dat získat relativní informace o kvalitě optickým ploch a homogenitě indexu lomu z testovaného planparalelního elementu. Na obrázku 2.6 je zobrazeno schéma se čtyřmi rovinnými povrchy, dva prostřední reprezentují testovaný element a krajní dvě reference. [9][10][11]

Předpokladem je, že vlnoplocha dopadající na vzorek je rovinná a odraz na prvním rozhraní  $R_1$  má počáteční fázi rovnou nule. Komplexní hodnoty amplitud světelného vlnění od zkoumaných povrchů jsou popsány rovnicemi:

$$E_0 = 1 \quad (2.12)$$

$$E_1 = a_1 \cdot e^{[i2\pi \cdot 2(L_0 - S_1)/\lambda]} \quad (2.13)$$

$$E_2 = a_2 \cdot e^{[i2\pi \cdot 2(L_0 - S_1 + nT + nS_1 + nS_2)/\lambda]} \quad (2.14)$$

$$E_3 = a_3 \cdot e^{[i2\pi \cdot 2(L_0 - S_1 + nT + nS_1 + nS_2 + L_1 - R_2)/\lambda]} \quad (2.15)$$

Pokud uvažujeme, že odrazy od povrchů jsou malé. U transmisních elementů se obecně uvažují 4% odrazu z procházející vlnoplochy. Tím můžeme pro interferenci



uvažovat pouze první odrazy od každého povrchu.

$$\begin{aligned}
I &= |E_0 + E_1 + E_2 + E_3|^2 \\
&= 1 + a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + \\
&+ 2a_1 \cos[4\pi(L_0 - S_1)/\lambda] + \\
&+ 2a_2 \cos[4\pi(L_0 - S_1 + nT + nS_1 + nS_2)/\lambda] + \\
&+ 2a_3 \cos[4\pi(L_0 - S_1 + nT + nS_1 + nS_2 + L_1 - R_2)/\lambda] + \\
&+ 2a_1 a_2 \cos[4\pi(nT + nS_1 + nS_2)/\lambda] + \\
&+ 2a_1 a_3 \cos[4\pi(nT + nS_1 + nS_2 + L_1 - R_2)/\lambda] + \\
&+ 2a_2 a_3 \cos[4\pi(L_1 - R_2)/\lambda]
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Protože během záznamu dat cíleně do měření zanášíme fázový posun, dochází k závislosti vlnové délky na čase viz rovnice 2.17. Výsledkem měření je tedy pohyblivý interferogram se šesti frekvencemi změny intenzity, které jsou závislé na velikosti kavity. [9][10][11]

$$\lambda(t) = c/(\nu_0 + \alpha t) \tag{2.17}$$

kde:

- $\nu_0$  = počáteční frekvence
- $\alpha$  = změna frekvence v čase
- $c$  = rychlost světla

Po dosazení do rovnice 2.16 získáme popis závislosti interference na čase:

$$\begin{aligned}
I(t) &= 1 + a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + \\
&+ 2a_1 \cos(\varphi_{01} + 2\pi f_1 t) + \\
&+ 2a_2 \cos(\varphi_{02} + 2\pi f_2 t) + \\
&+ 2a_3 \cos(\varphi_{03} + 2\pi f_3 t) + \\
&+ 2a_1 a_2 \cos(\varphi_{12} + 2\pi f_4 t) + \\
&+ 2a_1 a_3 \cos(\varphi_{13} + 2\pi f_5 t) + \\
&+ 2a_2 a_3 \cos(\varphi_{23} + 2\pi f_6 t) +
\end{aligned} \tag{2.18}$$

kde:

- $\varphi_{01} = 4\pi(L_0 - S_1)/\lambda_0$
- $\varphi_{02} = 4\pi(L_0 - S_1 + nT + nS_1 + nS_2)/\lambda_0$
- $\varphi_{03} = 4\pi(L_0 - S_1 + nT + nS_1 + nS_2 + L_1 - R_2)/\lambda_0$
- $\varphi_{12} = 4\pi(nT + nS_1 + nS_2)/\lambda_0$
- $\varphi_{13} = 4\pi(nT + nS_1 + nS_2 + L_1 - R_1)/\lambda_0$
- $\varphi_{23} = 4\pi(L_1 - R_1)/\lambda_0$

Popisují změny fází při interferencích od povrchů označených na obrázku 2.6 a frekvence rychlostí změn amplitudy interferencí jsou určeny:

$$\begin{aligned}
f_1 &= 2\pi(L_0 - S_1)\alpha/c \\
f_2 &= 2\pi(L_0 - S_1 + nT + nS_1 + nS_2)\alpha/c \\
f_3 &= 2\pi(L_0 - S_1 + nT + nS_1 + nS_2 + L_1 - R_2)\alpha/c \\
f_4 &= 2\pi(nT + nS_1 + nS_2)\alpha/c \\
f_5 &= 2\pi(nT + nS_1 + nS_2 + L_1 - R_1)\alpha/c \\
f_6 &= 2\pi(L_1 - R_1)\alpha/c
\end{aligned}$$

Výše uvedenými rovnicemi je popsán výslední interferogram složený ze šesti interferencí. Pro vyhodnocení interferogramu je nutné oddělit od sebe těchto šest interferencí. Způsoby jak toho docílit jsou popsány v kapitole 3.[9][10][11]

### 2.2.3 Absolutní interferometrie

Absolutní interferometrie rozšiřuje možnosti interferometrie se řízenou změnou fáze. Ke sběru měřených dat popsáných v kapitole 2.2.1 se přidá další simultánní měření vlnové délky zdroje záření. Metoda tedy stejně jako při měření planparalelních elementů vyžaduje, aby k řízené změně fáze docházelo pomocí přeladění vlnové délky zdroje záření. [12]

Jak bylo popsáno v předchozí kapitole interferenční fáze závisí na velikosti kavity:

$$\varphi(x, y) = 2kL(x, y); \quad (2.19)$$

kde:

$$\begin{aligned}
k &= \text{vlnové číslo } k = 2\pi/\lambda \\
L &= \text{velikost kavity}
\end{aligned}$$

Fázový rozdíl vlnoploch odražených od reference a testovaného povrchu lze vyjádřit rovnicí:

$$\varphi(x, y) = \varphi_w(x, y) + N(x, y)2\pi \quad (2.20)$$

kde:

$$\begin{aligned}
\varphi_w &= \text{je zabalená fáze jako modulace v intervalu } [-\pi, \pi] \\
N &= \text{celočíslný násobek}
\end{aligned}$$

Zabalenou fázi  $\varphi_w$  lze získat z naměřeného interferogramu viz kapitola 2.2.1, ale násobek  $N$  zůstává neznámý. Pokud dosadíme do rovnice 2.20 výraz 2.19 a vyjádříme  $\varphi_w(x, y)$  získáme rovnici o dvou neznámých ( $L, N$ ):

$$\varphi_w(x, y) = 2kL(x, y) - N(x, y)2\pi \quad (2.21)$$

Pokud ale vyjádříme závislost zabalené fáze na změně vlnového čísla, které závislé na definovaném přeladění vlnové délky použitého zdroje světla. Ze získané závislosti nyní zmizí konstantní člen  $N(x, y)2\pi$  a je možné určit velikost kavity podle vztahu:

$$\frac{d\varphi_w(x, y)}{dk} = 2L(x, y) \quad (2.22)$$

po vyjádření  $L(x,y)$ :

$$L(x, y) = \frac{1}{2} \frac{d\varphi_w(x, y)}{dk} \quad (2.23)$$

Pokud tedy zajistíme současně měření změny vlnové délky během záznamu interferogramu během měření s využitím řízené změny fáze, lze určit délku kavity a tím docílit změření tloušťku zkoumaného transmisního elementu. [12]

## 3 Separace interferogramů

Jak bylo uvedeno v kapitole 2.2.2 k vyhodnocení všech parametrů, které pomocí interferometrie s řízenou změnou fáze chceme měřit, je nutné separovat interferogramy. Z nasbíraných dat získáme interferogram složený z

$$N \cdot \frac{(N - 1)}{2} \quad (3.1)$$

kde:

$N$  = počet rovnoběžných povrchů v měřící kavitě

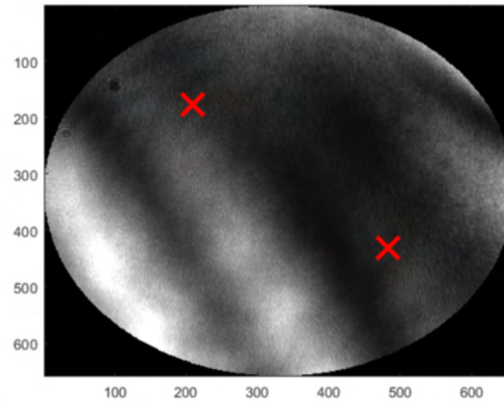
interferencí přes sebe pohybujících se s různou frekvencí. V případě měření planparalelních elementů je  $N$  rovno čtyřem. Dojde tedy na interferogramu k překrytí šesti interferencí viz obrázek 2.5

Protože se jedná o interferometrii s řízenou změnou fáze získáme ze záznamu měření stovky po sobě jdoucích snímků. Můžeme si tedy zobrazit průběh intenzity na jednom pixelu. S ohledem na rovnice vyjadřující frekvenci změny intenzity, zjistíme že je frekvence závislá na velikosti OPL, která nemusí být po celé délce kavity konstantní. Na měřeném vzorku je možné, že se bude vyskytovat klín nebo nerovnosti přední a zadní strany. Ovšem s ohledem na velikost celé kavity a délky měřených vzorků, v rádech jednotek nebo desítek centimetrů, jsou tyto nedokonalosti zanedbatelné viz obrázek 3.2. Na něm jsou zobrazené frekvenční obrazy průběhu intenzity na dvou místech zaznamenaného interferogramu. Lze tedy z jednoho pixelu určit průběh intenzity na celém měřeném povrchu.[3][8]

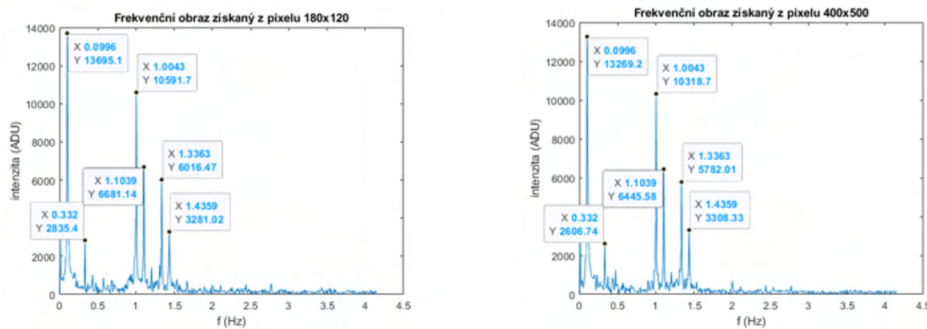
Jak bylo uvedeno v předchozích kapitolách je nutné interferenční obrazce pro vyhodnocení od sebe oddělit. V současné době jsou pro tento problém vyvinuty dvě metody, které dokáží spolehlivě rozlišit dílčí interferogramy.

### 3.1 Frekvenční filtrace

Pokud si pomocí Fourierovi transformace zobrazíme frekvenční spektrum signálu získaného v jednom bodě, získáme šest vrcholů reprezentující jednotlivé interference. Na základě znalosti těchto šesti vrcholů ve frekvenčním spektru je možné vytvořit vektor nulových hodnot o stejné velikosti jako je počet snímků. Vektor nabírá nulových hodnot pouze na místě peaku, který chceme vyfiltrovat. Takto vytvořeným vektorem vynásobíme každý pixel zaznamenaného signálu, následně inverzní Fourierovo transformací získáme zpět interferogram s pouze jednou interferencí.[3][8]



Obrázek 3.1: Označení dvou míst na kterých je získán frekvenční obraz průběhu intenzity



Obrázek 3.2: Frekvenční obraz průběhu intenzity ze dvou míst. Všechny vrcholy mají stejnou frekvenci.

Jedná o možnou variantu filtrace, ovšem není zcela vhodná. Lepších výsledků dosáhneme při použití sofistikovanějších typů filtrů. Pro účely diplomové práce byly zkoumány výsledky aplikování číslicových diskrétních filtrů, konkrétně filtr s nekonečnou impulzní odezvou (IIR) a filtr s konečnou impulzní odezvou (FIR). [3][8]

## 3.2 Metoda nejmenších čtverců

Frekvenční analýzou získáme údaje o frekvencích sinusových signálů průběhu jednotlivých interferencí. Neznámé jsou ale amplitudy a fáze, přičemž fáze je nutné získat. Kromě filtrace je další možností proložení naměřeného signálu funkcí získané z optimalizační úlohy [3][8]:

$$I(x) = I^c + \sum_{j=1}^N I^c_j \cdot \cos(2\pi \cdot f_j \cdot x + \varphi_j) \quad (3.2)$$

kde:

$N$  = počet rovnoběžných povrchů v měřící kavitě

$I'$  = střední hodnota intenzity

$I''$  = amplituda intenzity

$\varphi$  = fáze jednotlivých kavit

Rovnice 3.2 je nelineární v parametrech a bylo by nutné pro její řešení použít nelineární metodu nejmenších čtverců. Je tedy nutné rovnici upravit do podoby, kdy bude lineární v parametrech. Toho docílíme tvarem [3][8]:

$$I(x) = I' + \sum_{j=1}^N [I''_j \cdot \cos(2\pi \cdot f_j \cdot x) \cos(\varphi_j) - I''_j \cdot \sin(2\pi \cdot f_j \cdot x) \sin(\varphi_j)] \quad (3.3)$$

Po určení neznámých pomocí metody nejmenších čtverců nejsou ještě získány fázové mapy jednotlivých interferogramů, ale hodnoty sinů a cosinů násobené amplitudou. Fáze lze dopočítat podle vztahu [3]:

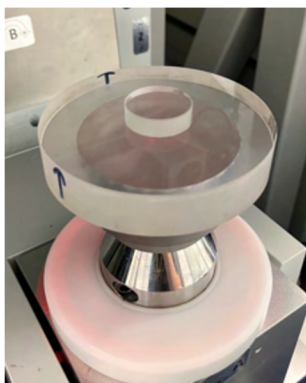
$$\varphi_j = \tan^{-1} \left( \frac{I''_j \sin(\varphi_j)}{I''_j \cos(\varphi_j)} \right) \quad (3.4)$$

## 4 Měření povrchu vzorků a průchod vlnoplochy

V rámci ověření tvrzení popsaných v předchozích kapitolách byl realizován experimentální setup v laboratoři Technické univerzity v Liberci. Na kterém bylo otestováno několik typů planparalelních elementů. V centru TOPTEC bylo umožněno využití komerčního fizeau interferometru ASI QED a vyvíjeného fizeau interferometru AWA, na kterých byly ověřeny výsledky z měření na TUL. Interferometr AWA umožňuje zároveň se záznamem interferogramu synchronně zaznamenat i vlnovou délku použitého laseru, lze tedy vyhodnocení rozšířit o zjištění tloušťky měřeného elementu viz kapitola 2.2.3.

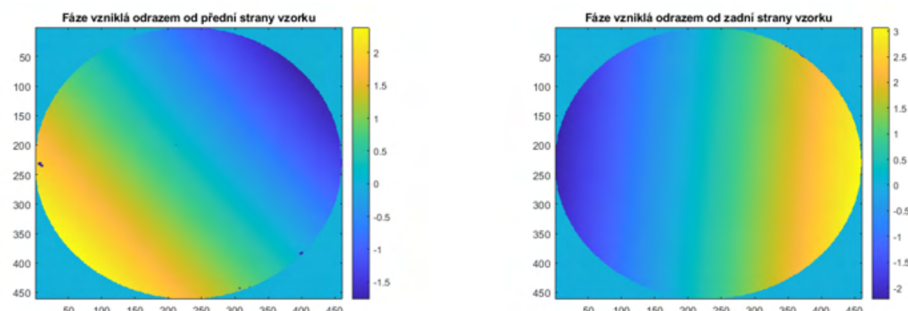
### 4.1 Odstranění zadního odrazu

Pro ukázkou bylo provedeno měření na fizeau interferometru ASI QED v centru TOPTEC, jedná se o interferometr s řízenou změnou fáze viz kapitola 2.2.1, kde je změny fáze docíleno piezo posunem referenčního elementu. Pro vyhodnocení zaznamenaných dat byl použit software Zygo MetroPro využívající třinácti krokový algoritmus. Vzorkem byla planparalelní destička z taveného křemene o optickém průměru 30 mm a tloušťkou 9,2 mm. Vzorek byl pomocí glycerolu položen na podložku také z tavného křemene, která měla zadní stranu broušenou, obrázek 4.1.



Obrázek 4.1: Měřený vzorek z taveného křemene položený na podložce s broušenou zadní stranou pomocí glycerolu

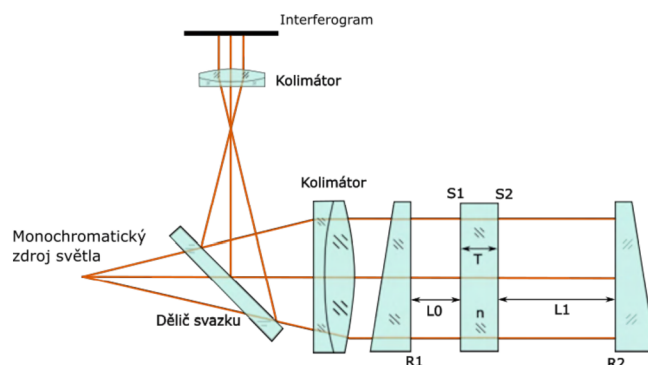
Při měření planparalelních elementů pomocí odstranění zadního odrazu, je nutné nejdříve změřit jednu plochu. Následuje důkladné očištění vzorku od imerzní kapaliny a následně se stejný postup měření opakuje s druhou plochou. Tento postup je jak zdlouhavý, tak i náchylný na chyby způsobené přikládáním na kapalinu, ve které mohou vznikat vzduchové bubliny a ovlivnit následné vyhodnocení.



Obrázek 4.2: Fáze vzniklé odražením od ploch měřeného planparalelního vzorku z taveného křemene na interferometru ASI

## 4.2 Jednoúčelový fizeau interferometr

Pro eliminování nutnosti odstranění zadního odrazu při měření transmisních planparalelních elementů, bylo v laboratoři na Technické univerzitě v Liberci sestaveno experimentální uspořádání fizeau interferometru. Pro sestavení podle schématu 4.3 a vyhodnocení měření byly použity teoretické znalosti z kapitol 2.2.1 a 2.2.2. S ohledem na tloušťku vzorku 9,2 mm a indexu lomu taveného křemene 1,45. Byly dopočteny vzdálenosti  $L_0$  a  $L_1$  podle rovnic 2.10 a 2.11.



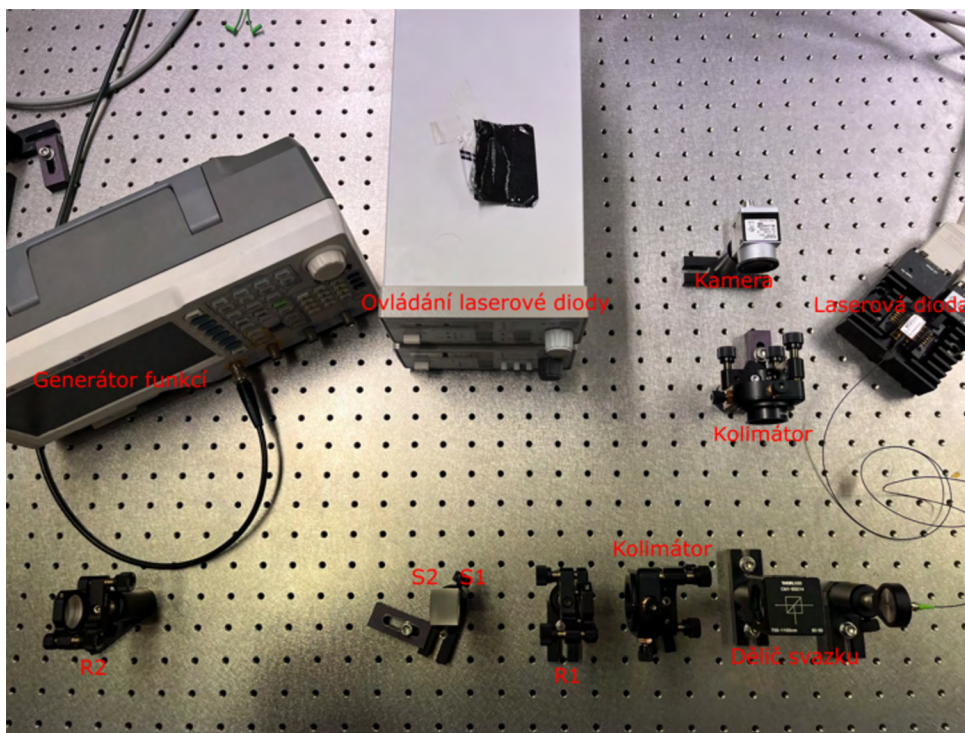
Obrázek 4.3: Schéma jednoúčelového Fizeau interferometru pro měření planparalelních elementů



## 4.2.1 Komponenty

Pro sestavení Fizeau interferometru byly jako reference použity 1" klínky od firmy ThorLabs s náklonem ploch  $2^\circ$ . Jako kolimátory byly zvoleny 1" spojné čočky také od firmy ThorLabs. První z nich kolimující laserový svazek z vlákna do nekonečna, byla zvolena s ohniskovou vzdáleností 150 mm. Druhá přezobrazující interferogram na čip kamery byla zvolena s ohniskovou vzdáleností 50 mm. Důvodem je nutnost zmenšení obrazu na čip kamery, který u použitého typu Basler acA2440-35uc měří 9 mm. Díky této volbě ohniskových vzdáleností se dosáhne trojnásobného zmenšení.

Jako zdroj záření byla použita laserová dioda od Eagleyard photonics s vlnovou délkou 780 nm. Tu je třeba teplotně a proudově řídit. Pro řízení teploty, kterým je do měření zanášena řízená změna fáze, byl použit TED 200 C temperature controller od ThorLabs ve spojení s generátorem funkcí Rigol DG4102. A pro proudové řízení laser diode controller LDC 202 C opět od firmy ThorLabs.

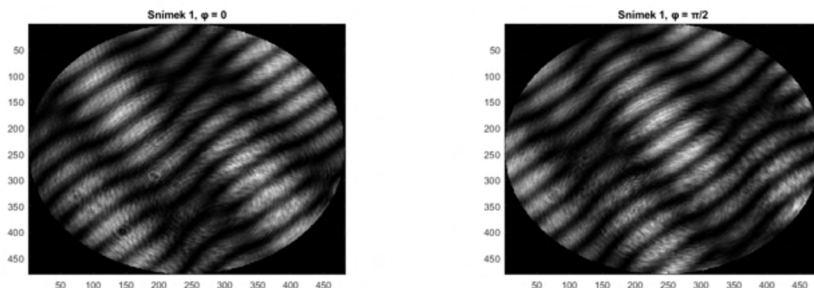


Obrázek 4.4: Schéma jednoúčelového Fizeau interferometru pro měření planoparalelních elementů

## 4.2.2 Měření

V rámci měření byly provedeny záznamy tisíce snímků. Řízená změna fáze během měření byla realizována pomocí přesného nastavení teploty laserové DFB diody o vlnové délce 780 nm a udržení konstantního napájecího proudu. Přeladění teploty la-

serové diody probíhalo v intervalu teplot 5,03°C. Na obrázku 4.5 je ukázána řízená změna fáze o  $\pi/2$  pomocí změny teploty laserové diody.

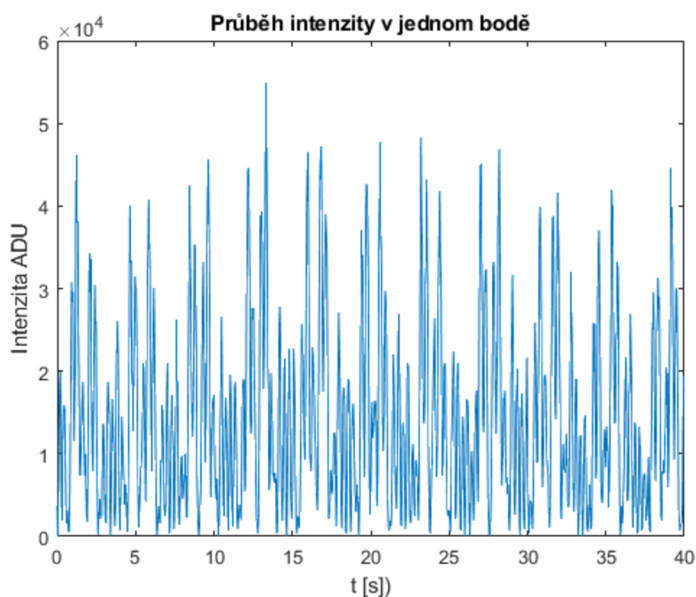


(a) Interferogram s počáteční(nulovou) fází

(b) Interferogram s fází posunutou o  $\pi/2$

Obrázek 4.5: Ukázka řízené změny fáze

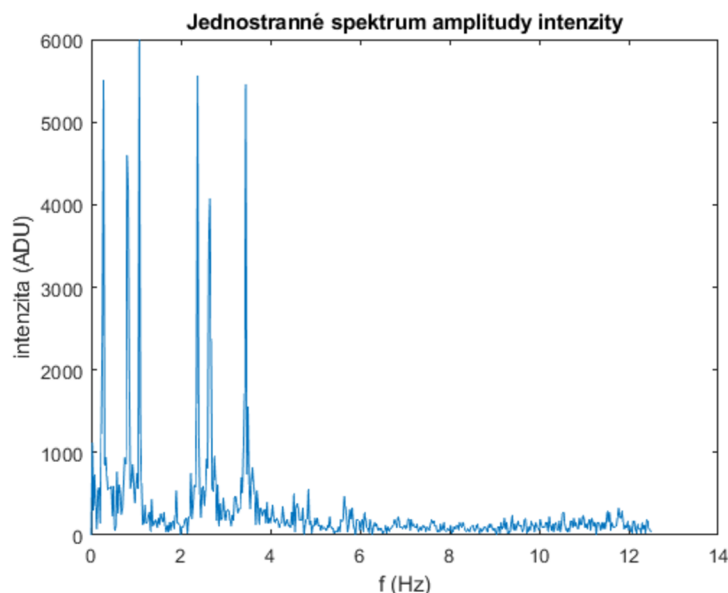
Záznam dat u tohoto vzorku proběhl v rozsahu hodnot teploty laserové diody 16 - 21,03°C. Hodnota proudu po celých 1000 znamenáných snímků byla 90 mA a rychlost snímání kamery byla 25 FPS. Celý záznam trval 42 sekund. Na obrázku 4.5 je zobrazeno překrývání šestice interferogramů a na obrázku 4.6 je zobrazen průběh intenzity v jednom bodě.



Obrázek 4.6: Zobrazení průběhu intenzity v jednom bodě

Po aplikování fourierovy transformace na tento průběh intenzity získáme šest vrcholů ve frekvenčním spektru viz obrázek 4.7. Šestice vrcholů náleží interferencím

od rovinných ploch podle schématu 4.3 zleva interference  $S_1S_2$ ,  $S_2R_2$ ,  $S_1R_2$ ,  $S_1R_1$ ,  $S_2R_1$  a  $R_1R_2$ . Na základě znalosti těchto šesti vrcholů je možné navrhnout číslicové filtry, díky kterým bude možné oddělit interferogramy od sebe.



Obrázek 4.7

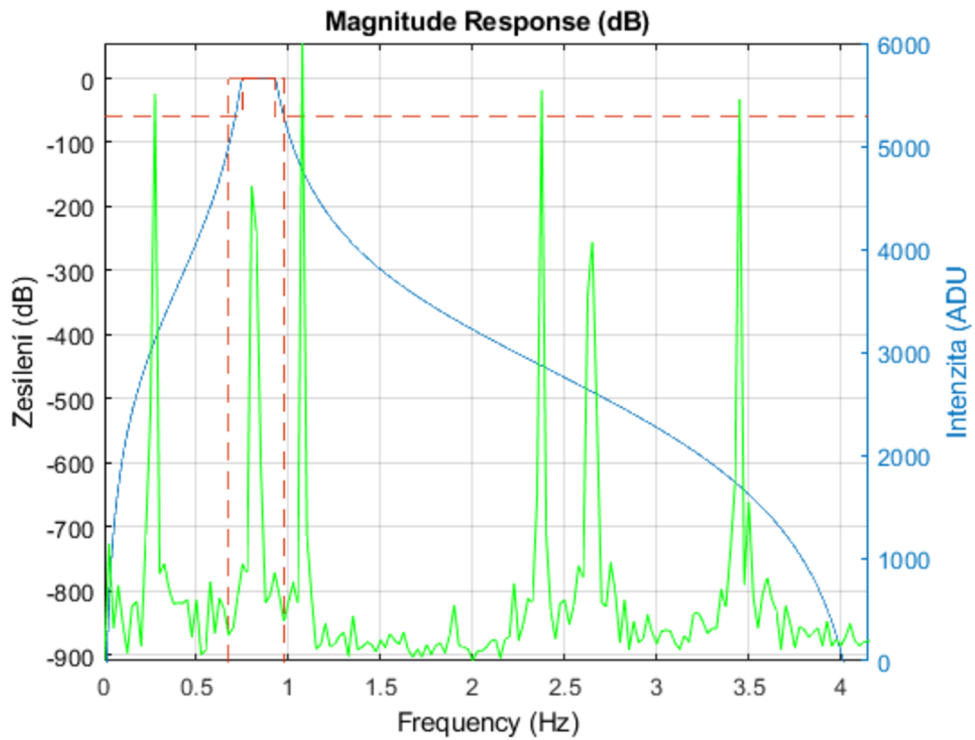
### 4.2.3 Frekvenční filtrace

Jak bylo uvedeno v kapitole 2.2.2 je nutné od sebe jednotlivé interference oddělit. K tomuto účelu byly v kapitole 3 představeny a popsány možnosti pro oddělení a byly také ukázány důvody, proč je nejvhodnějším způsobem použití číslicového filtru s nekonečnou impulzní odezvou (IIR filtr). Pro návrh šestic číslicových filtrů jsou použita data z Fourierovy transformace průběhu intenzity viz obrázek 4.7.

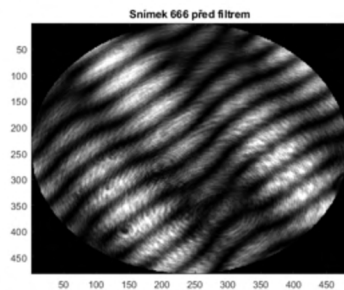
Na obrázku 4.8 je zobrazen navržený číslicový filtr pro separaci interference přední strany vzorku a zadní interference. Po navržení je třeba filtr aplikovat na zaznamenaná data, vynásobením frekvenčního obrazu zaznamenaných snímků v každém pixelu. Po aplikování filtru je frekvenční obraz inverzní fourierovo transformací převeden zpět na průběh intenzity.

### 4.2.4 Vyhodnocení fázových map

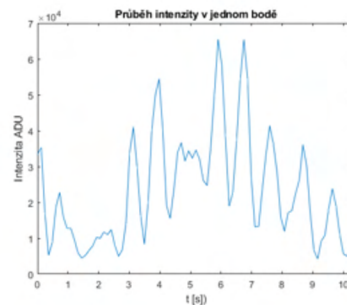
Po aplikování upravených filtrů stejným způsobem, jak bylo uvedeno v kapitole 4.2.3 na frekvenční vrcholy. Pro vyhodnocení parametrů potřebujeme separovat vrcholy reprezentující interference  $S_1S_2$ ,  $S_2R_2$ ,  $S_1R_1$  a  $R_1R_2$ . Po převedení zpět na průběh intenzity získáme oddělené interference, které můžeme následně vyhodnotit viz obrázek 2.3. Z interferogramů lze pomocí výše uvedeného vztahu určit zabalenou



Obrázek 4.8: Navržený IIR filtr pro selekci jednoho interferogramu



(a) Výšková mapa zaznamenaného interferogramu

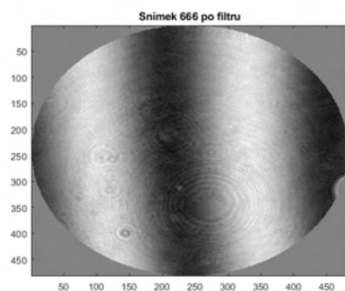


(b) Průběh intenzity v jednom pixelu

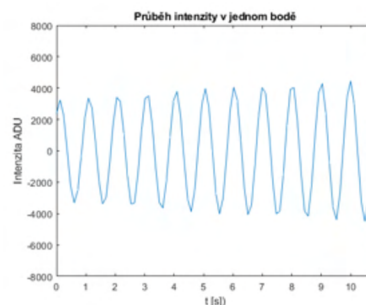
Obrázek 4.9: Zaznamenaný snímek 666 před aplikací filtru

fázi, která je modulovaná do  $[-\pi, \pi]$ . Na obrázku 4.11 jsou zobrazeny všechny čtyři interferogramy, následně na obrázku 4.11 jsou zobrazeny zabalené fáze.

Tyto zabalené fáze je třeba následně rozbalit. Průběh rozbalení probíhá v porovnávání sousedních bodů (pixelů), když dojde ke skoku hodnoty mezi body o  $\pi$  dojde buď k odečtení nebo k přičtení hodnoty  $\pi$ . Po aplikování algoritmu pro rozbalení je ještě třeba získanou fázi vydělit vlnovým číslem  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ . Tímto postupem

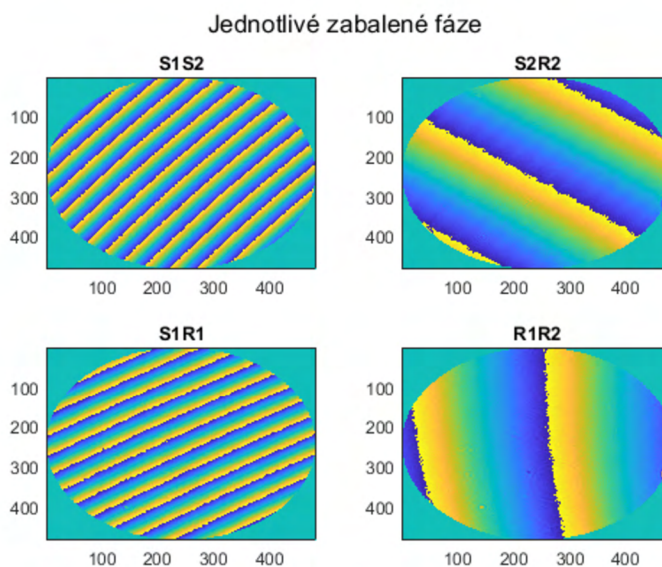


(a) Výšková mapa zaznamenaného interferogramu



(b) Průběh intenzity v jednom pixelu

Obrázek 4.10: Zaznamenaný snímek 666 po aplikaci filtru



Obrázek 4.11: Zabalené fáze seřazené podle pořadí frekvenčních vrcholů

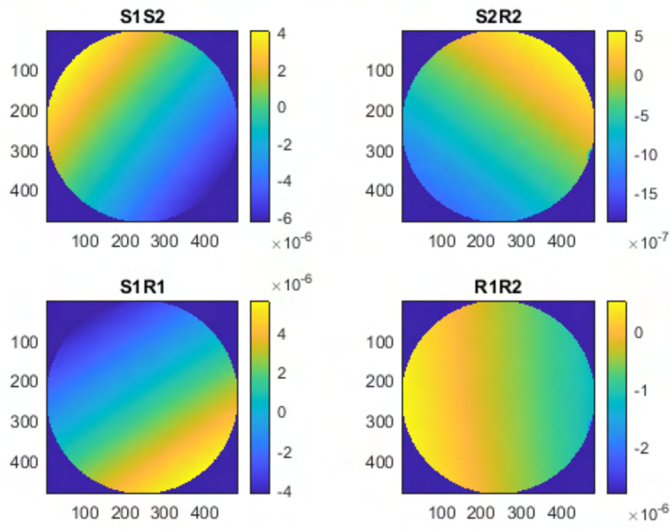
získáme fázové mapy jednotlivých interferencí viz 4.12, ze kterých lze určit parametry měřeného planparalelního elementu. Pro některé parametry je třeba ještě znát vzájemnou polohu referencí bez ovlivnění vlnoplochy průchodem měřeného vzorku. Tu získáme změřením prázdné kavity a vyhodnocením stejným způsobem jako při měření vzorku. Tím získáme vše potřebné pro určení parametrů vzorku, těmi jsou změřením deformace vlnoplochy po průchodu elementem, tvar obou vyleštěných ploch a homogenita indexu lomu.

### Tvar vyleštěných ploch vzorku a klín

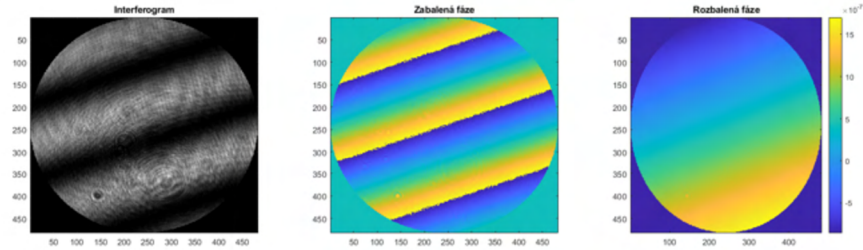
Tvaru přední strany vzorku označené jako S1 na obrázku 4.3 náleží fázová mapa



Jednotlivé zabalené fáze v metrech



Obrázek 4.12: Čtveřice rozbalených fází, seřazených podle pořadí frekvenčních vrcholů



Obrázek 4.13: Vyhodnocení fáze prázdné kavity

$\varphi_{R1S1}$ . Pro získání tvaru zadní strany je třeba od interference zadní strany a druhé reference odečíst fázi prázdné kavity podle vztahu [9][3]:

$$\varphi_{zadnistrana} = \varphi_{S2R2} - \varphi_{PK} \quad (4.1)$$

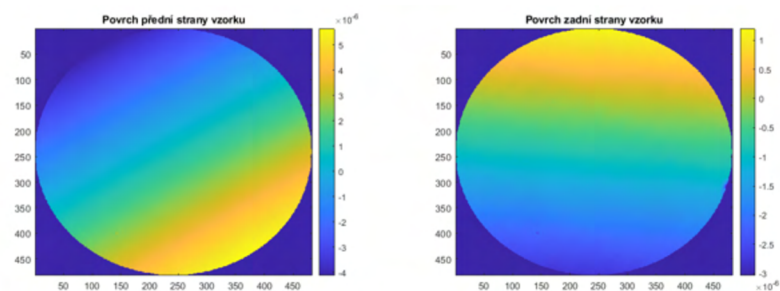
kde:

$\varphi_{S2R2}$  = fáze z interference od zadní strany a prázdné kavity  
 $\varphi_{PK}$  = fáze prázdné kavity

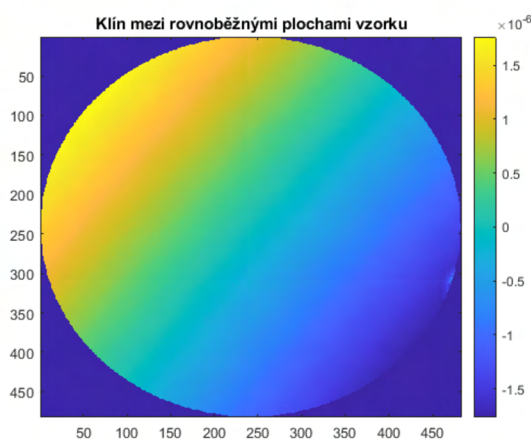
$$\varphi_{klin} = \frac{(\varphi_{PK} - \varphi_{S2R2} - \varphi_{R1S1})}{2k} \quad (4.2)$$

kde:

$k$  = vlnové číslo vyjádřené jako  $\frac{2\pi}{\lambda}$



Obrázek 4.14: Tvar povrchu přední a zadní strany měřeného vzorku, jednotky jsou metry



Obrázek 4.15: Klín mezi vyleštěnými povrchy měřeného vzorku, jednotky jsou metry

### Měření deformace vlnoplochy po průchodu

Metodami, které potlačují odraz od zadní strany planparalelního měřeného elementu, není možné změřit deformaci vlnoplochy po průchodu. V případě interferometrie s řízenou změnou fáze toto měření možné je. Fáze vlnoplochy po průchodu elementem se určí ze vztahu 4.3 a je zobrazen na obrázku 4.16.

$$\varphi_{pruchod} = \varphi_{R1R2} - \varphi_{PK} \quad (4.3)$$

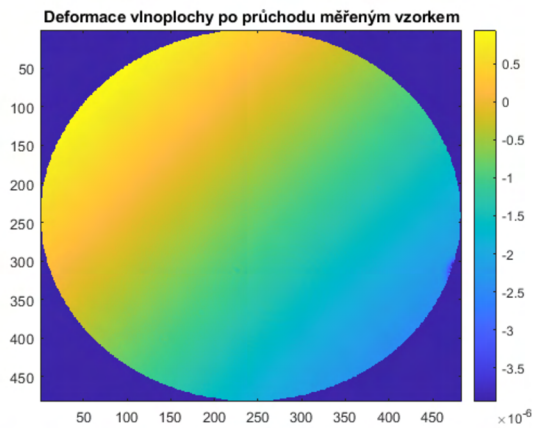
kde:

$\varphi_{R1R2}$  = fáze z interference od referencí

$\varphi_{PK}$  = fáze prázdné kavity

### Homogenita indexu lomu

Pro určení homogenity indexu lomu je potřeba znát fáze interferencí přední a zadní strany vzorku, tato interference v sobě obsahuje informaci o homogenitě indexu lomu a tvaru ploch. Pro odečtení informace o tvaru a vzájemné poloze přední a zadní



Obrázek 4.16: Deformace vlnoplochy pro průchodu měřeným planparalelním elementem

plochy, je potřeba znát interferenci první reference a přední plochy vzorku a interferenci zadní plochy a druhé reference. Abychom mohli provést odečtení je ještě potřeba určit vzájemnou polohu dvou referenčních rovin. Tu získáme vyhodnocením interference referencí bez vzorku. Pak podle vztahu [3] lze spočítat homogenitu indexu lomu v měřeném vzorku:

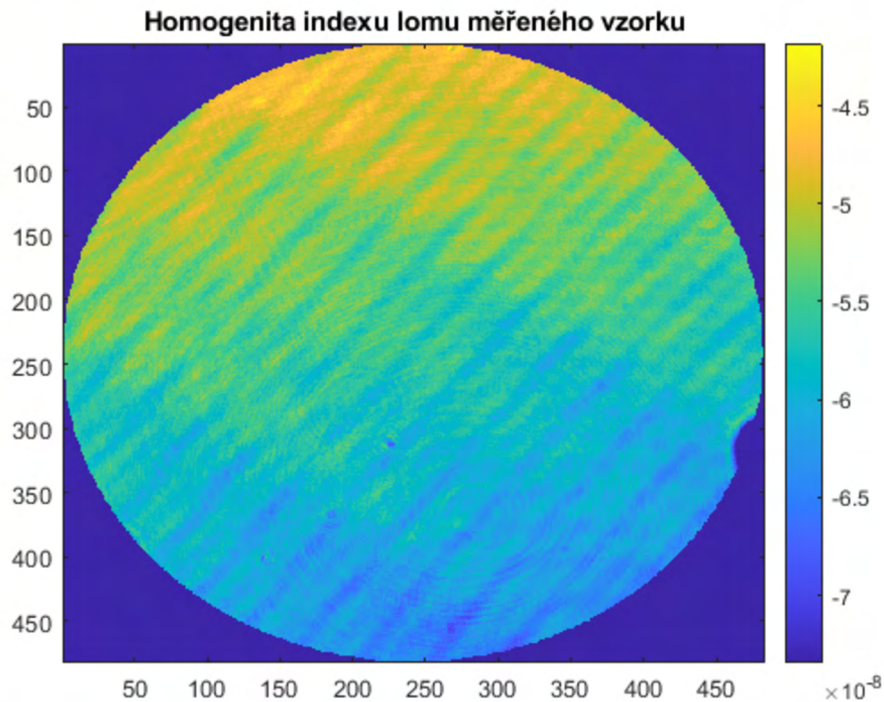
$$\delta n = \frac{\varphi_{S1S2} - n \cdot (\varphi_{PK} - \varphi_{S2R2} - \varphi_{R1S1})}{2k \cdot T} \quad (4.4)$$

kde:

$n$  = předpokládaný index lomu materiálu

$T$  = tloušťka měřeného vzorku





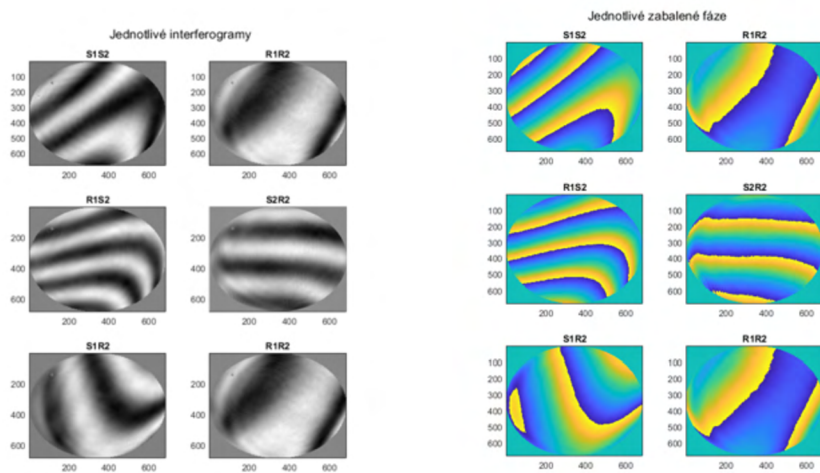
Obrázek 4.17: Vyhodnocená homogenita měřeného vzorku podle vzorce 4.4

Vyhodnocená homogenita indexu lomu viz obrázek 4.17 je zkruslena parazitními jevy. Ty jsou způsobené především difrakcí na mechanickém uložení optických komponent či průchodem světla přes dělič svazku. Parazitní jevy také do měření zanášejí povrchové úpravy čipu kamery.

#### 4.2.5 Laserové tyče, Nd:YAG

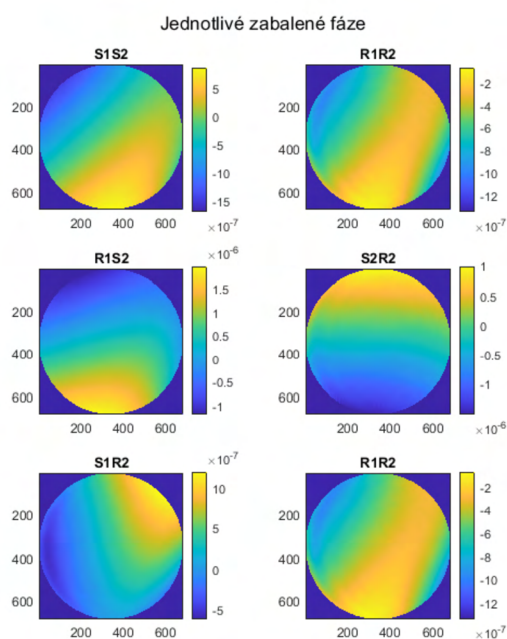
První záznam dat u tohoto vzorku proběhl v rozsahu hodnot teploty laserové diody 20 - 24°C. Hodnota proudu po celých 1000 znamenáných snímků byla 90 mA a rychlost snímání kamery byla 8 FPS. Celý záznam trval 125 sekund. Vyhodnocení dat probíhalo stejným způsobem jako při měření planparalelní destičky z taveného křemene. Účelem tohoto měření bylo vyzkoušet funkčnost měřicího uspořádání a vyhodnocovacích metod pro vzorky s velkým poměrem tloušťky ku průměru.

Z vyhodnocených dat je patrné, že je možné pomocí tohoto jednoúčelového fizeau interferometru měřit i planparalelní elementy typu laserových tyčí bez větších úskalí.



(a) Zobrazení vyfiltrovaných interferogramů

(b) Zobrazení zabalených fází

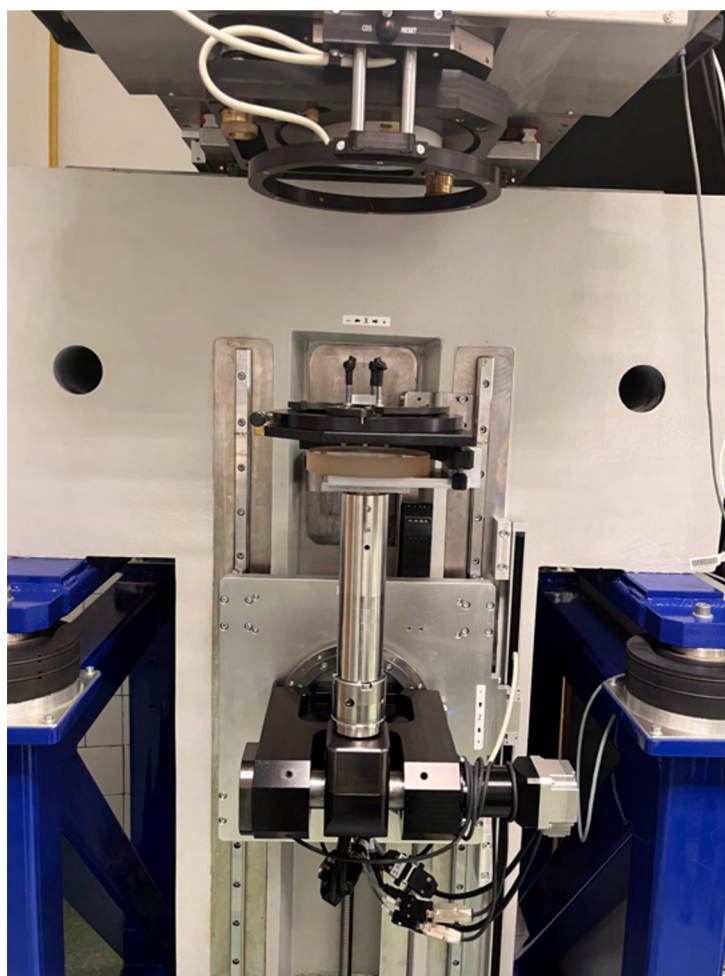


Obrázek 4.18: Zobrazení rozbalených fází z měření laserových tyčí

### 4.3 Absolutní interferometrie na fizeau interferometru AWA

Pro ověření správné funkce sestaveného interferometru, byl měřený planparalelní vzorek převezen do centra TOPTEC, kde byl změřen na fizeau interferometru AWA,

obrázek 4.19.



Obrázek 4.19: Měřící uspořádání v interferometru AWA

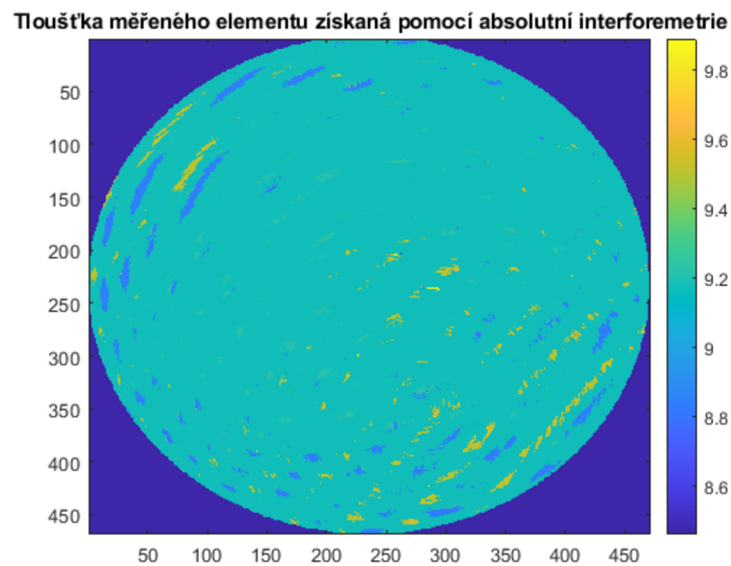
Stejně jako fizeau interferometr postavený v kapitole 4.2 i na interferometru AWA je řízená změna fáze do měření zanášena pomocí změny teploty laserového zdroje záření. Oproti výše sestavenému a popsanému interferometru disponuje třemi laserovými diodami s různými vlnovými délkami (780, 785, 852 nm). Měřený vzorek byl změřen a porovnám s předchozími výsledky pro ověření správnosti měření, kterému vyhověl.

Vzhledem k možnosti současně během záznamu interferogramů měřit i měnící se vlnovou délku zdroje záření, je možné vyhodnocení obohatit o absolutní interferometrii popsanou v kapitole 2.2.3.

Na obrázku 4.21 je zobrazeno vyhodnocení tloušťky měřeného elementu z taveného křemene. Opět stejně jako při měření homogenity indexu lomu je měření částečně znehodnoceno parazitními jevy. Reálná tloušťka elementu je 9,2 mm, zkreslení parazitními jevy je tedy 13%. Vyhodnocení proběhlo ze čtyř skenů vzorku vždy s jinou



Obrázek 4.20: Detail na umístění vzorku v interferometru AWA



Obrázek 4.21: Vyhodnocená tloušťka po celé ploše měřeného elementu, jednotkou jsou milimetry

vlnovou délkou a jejich následné napojení. Dalšího zpřesnění bychom docílili navýšením počtu skenů a tím i zvýšením počtu snímků. Toto zvyšování s sebou ovšem nese delší čas záznamu, během kterého se do měření mohou zanést další parazitní jevy. Roste také požadavek na dostatek paměti pro uložení velkého souboru dat a jeho následné vyhodnocení.

## 5 Závěr

Diplomová práce je zaměřena na měření transmisních planparalelních elementů. Cílem bylo seznámit se s principy interferometrických měření pomocí řízené změny fáze, diskutovány byly možnosti realizace a odůvodnění použití způsobu změny fáze přeladěním vlnové délky zdroje světla. To jako jediné vyhovuje pro účel měření planparalelních elementů. Dále byly zkoumány možnosti rozšíření interferometrie s řízenou změnou fáze o absolutní interferometrii. Toho lze dosáhnout simultánním měřením záznamu interferogramu a vlnové délky, která se v čase mění.

Pro správný záznam dat a jejich následné vyhodnocení bylo nutné se seznámit s nároky na měřicí uspořádání a metody separace zaznamenaných interferencí v jednom interferogramu. Z rešerše o separaci, jako nejvhodnější metoda vyšla možnost převedení průběhu intenzity interferogramu v jednom bodě fourierovo transformací pro získání frekvencí. Tyto frekvence závislé na délkách kavit, je následně možné pomocí diskrétních číslicových filtrů s nekonečnou impulzní odezvou oddělit a získat tak jednotlivé interference.

Na základě těchto znalostí bylo navrženo experimentální uspořádání interferometru pro měření planparalelních optických elementů. Toto navržení bylo následně sestaveno v laboratoři na Technické univerzitě v Liberci. Byla provedena série měření různých planparalelních transmisních elementů a jejich následné vyhodnocení. Tyto výsledky byly pro ověření správnosti porovnány s další sérií měření na fizeau interferometru AWA v centru TOPTEC. Díky možnosti měřit v laboratoři metrologie centra TOPTEC zároveň i vlnovou délku použitého zdroje světla, bylo možné vyzkoušet vyhodnocení tloušťky elementu pomocí absolutní interferometrie.



## Použitá literatura

- [1] GOLINI, Donald, William I. KORDONSKI, Paul DUMAS a Stephen J. HOGAN. Magnetorheological finishing (MRF) in commercial precision optics manufacturing. In: STAHL, H. Philip (ed.). *Optical Manufacturing and Testing III*. SPIE, 1999, sv. 3782, s. 80–91. Dostupné z DOI: [10.1117/12.369174](https://doi.org/10.1117/12.369174).
- [2] MALACARA, D. *Optical Shop Testing*. Wiley, 2007. Wiley Series in Pure and Applied Optics. ISBN 9780470135969. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=qMHKB1mKFr4C>.
- [3] MATOUŠEK, Ondřej a Ing. Ph.D. Skolitel : 55721 Lédl VÍT. *Interferometrie s řízenou změnou fáze pro měření vlastností planparalelních optických elementů*. Technická Univerzita v Liberci, 2018. Dostupné také z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/151794>.
- [4] HARTMANN, P. *Optical Glass*. SPIE Press, 2014. Press Monographs. ISBN 9781628412925. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=Ri7RoQEACAAJ>.
- [5] LOUGHRIDGE, Russell a Daniel ABRAMOVITCH. A tutorial on laser interferometry for precision measurements. In: 2013, s. 3686–3703. ISBN 978-1-4799-0177-7. Dostupné z DOI: [10.1109/ACC.2013.6580402](https://doi.org/10.1109/ACC.2013.6580402).
- [6] SALEH, Bahaa E A a Malvin Carl TEICH. *Fundamentals of photonics; 2nd ed.* New York, NY: Wiley, 2007. Wiley series in pure and applied optics. Dostupné také z: <https://cds.cern.ch/record/1084451>.
- [7] HARIHARAN, P. *Basics of Interferometry*. 2012. Dostupné z DOI: [10.1016/B978-0-12-373589-8.X5000-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373589-8.X5000-7).
- [8] GROOT, Peter de. Measurement of transparent plates with wavelength-tuned phase-shifting interferometry. *Appl. Opt.* 2000, roč. 39, č. 16, s. 2658–2663. Dostupné z DOI: [10.1364/AO.39.002658](https://doi.org/10.1364/AO.39.002658).
- [9] ZHANG, Lin, Huan REN, Yi YANG, Yong LIU, Zhendong SHI, Quan YUAN a Hongzhen JIANG. Analyses of multiple surfaces transform interferometry in parallel plate measurement. In: CZARSKE, Jurgen, ZHANG, Shulian, SAMPSON, David, WANG, Wei a LIAO, Yanbiao (ed.). *International Symposium on Optoelectronic Technology and Application 2014: Laser and Optical Measurement Technology; and Fiber Optic Sensors*. SPIE, 2014, sv. 9297, s. 225–230. Dostupné z DOI: [10.1117/12.2071877](https://doi.org/10.1117/12.2071877).

- [10] OKADA, Katsuyuki, Hironobu SAKUTA, Teruji OSE a Jumpei TSUJIUCHI. Separate measurements of surface shapes and refractive index inhomogeneity of an optical element using tunable-source phase shifting interferometry. *Appl. Opt.* 1990, roč. 29, č. 22, s. 3280–3285. Dostupné z DOI: [10.1364/AO.29.003280](https://doi.org/10.1364/AO.29.003280).
- [11] DECK, Leslie L. Fourier-transform phase-shifting interferometry. *Appl. Opt.* 2003, roč. 42, č. 13, s. 2354–2365. Dostupné z DOI: [10.1364/AO.42.002354](https://doi.org/10.1364/AO.42.002354).
- [12] KREDBA, Jan, Pavel PSOTA, Marek STAŠÍK, Vít LÉDL, Lukáš VESELÝ a Jakub NEČÁSEK. Absolute interferometry for fast and precise radius measurement. *Opt. Express*. 2021, roč. 29, č. 8, s. 12531–12542. Dostupné z DOI: [10.1364/OE.420372](https://doi.org/10.1364/OE.420372).