



# Jednocestná digitální holografická interferometrie

## Bakalářská práce

*Studijní program:*

B3901 Aplikované vědy v inženýrství

*Studijní obor:*

Aplikované vědy v inženýrství

*Autor práce:*

**Vojtěch Pátek**

*Vedoucí práce:*

Ing. Pavel Psota, Ph.D.

Ústav nových technologií a aplikované informatiky





## Zadání bakalářské práce

# Jednocestná digitální holografická interferometrie

*Jméno a příjmení:* **Vojtěch Pátek**  
*Osobní číslo:* M18000117  
*Studijní program:* B3901 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. Seznámení se s principy digitální holografické interferometrie a způsoby rekonstrukce digitálních hologramů.
2. Navržení a otestování způsobů dělení/filtrace svazku v rámci jednocestného holografického interferometru.
3. Sestavení experimentálního holografického interferometru a provedení měření vhodného transmisního vzorku.
4. Vyhodnocení dat a zhodnocení výsledků.

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

dle potřeby dokumentace  
30 – 40 stran  
tištěná/elektronická  
Čeština



### **Seznam odborné literatury:**

- [1] KREIS, Thomas. Handbook of holographic interferometry: optical and digital methods. Weinheim: WILEY-VCH, 2005. ISBN 978-352-7405-466.
- [2] KIM, Myung K. Digital holographic microscopy: principles, techniques, and applications. New York: Springer, 2011. Springer series in optical sciences, v. 162. ISBN 978-144-1977-939.
- [3] SCHNARS, U, JUEPTNER, W. Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques . Berlin : Springer, 2005. 164 p.

*Vedoucí práce:*

Ing. Pavel Psota, Ph.D.  
Ústav nových technologií a aplikované informatiky

*Datum zadání práce:*

19. října 2020

*Předpokládaný termín odevzdání:*

17. května 2021

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

L.S.

Ing. Josef Novák, Ph.D.  
vedoucí ústavu

## Prohlášení

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

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou 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 bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou 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 bakalářská 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.

20. dubna 2021

Vojtěch Pátek

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval panu Ing. Pavlu Psotovi, Phd. za odborné vedení této bakalářské práce, poskytnuté zázemí v laboratoři a věnovaný čas.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá jednocestnou digitální holografickou interferometrií. Cílem bylo navrhnout a sestavit funkční jednocestný holografický interferometr. V První části práce je uveden teoretický základ. Následuje praktická část, která se věnuje sestavení přístroje, otestování funkčnosti na měření vhodných vzorků a zpracování hologramů. V závěru jsou zhodnoceny výsledky práce.

### **Klíčová slova:**

Digitální holografická interferometrie, holografie, interferometrie, vlnění, hologram

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with common-path digital holographic interferometry. The main target was to design and assemble functional common-path holographic interferometer. First part of the work describes theoretical basics. The other part deals with construction of the device, functionality testing on suitable samples and hologram processing. In the conclusion the results are evaluated.

### **Key words:**

Digital holographic interferometry, holography, interferometry, optical waves, hologram

# Obsah

Úvod.....	9
1 Úvod do vlnové optiky.....	10
1.1 Světlo jako vlna.....	10
1.2 Intenzita.....	12
1.3 Interference.....	13
1.3.1 Superpozice.....	13
1.3.2 Youngův dvojštěrbínový experiment.....	13
1.3.3 Rozložení intenzity při interferenci dvou vln.....	14
1.4 Koherence.....	15
1.4.1 Časová koherence.....	15
1.5 Polarizace.....	16
1.6 Difrakce.....	17
1.6.1 Fraunhoferova difrakce na kruhové apertuře.....	18
2 Úvod do Fourierovské optiky.....	20
2.1 Fourierova řada.....	20
2.2 Fourierova transformace.....	21
2.3 Fourierova transformace v optice.....	22
3 Holografie.....	23
3.1 Rekonstrukce digitálních hologramů.....	24
3.2 Digitální holografická interferometrie.....	24
4 Návrh a sestavení experimentálního digitálního holografického interferometru.....	26
4.1 Návrh jednocestného holografického interferometru.....	26
4.2 Sestavení experimentálního jednocestného holografického interferometru.....	27
5 Měření a vyhodnocení dat.....	29
5.1 Kalibrace.....	29
5.2 Měření plynu unikajícího ze zapalovače.....	32
5.3 Měření transparentního vzorku – žabí vajíčka.....	34
5.4 Testování robustnosti metody vůči vibracím.....	36
Závěr.....	38
Seznam použitých zdrojů.....	39

## Seznam ilustrací

Obrázek 1 - Elektromagnetické vlnění [13].....	10
Obrázek 2 - Youngův dvojštěrbínový experiment.....	13
Obrázek 3 - Youngův dvojštěrbínový experiment – odvození [15].....	14
Obrázek 4 – Polarizace [16].....	17

Obrázek 5 - Hyugensův princip .....	18
Obrázek 6 - Difrakce na kruhové apertuře – rozložení intenzity [18] .....	19
Obrázek 7 – Rozlišitelnost dvou bodů .....	20
Obrázek 8 - Rozklad čtvercového signálu do Fourierovy řady .....	20
Obrázek 9 - Fourierova transformace postupné vlny .....	22
Obrázek 10 - Fourierova transformace pomocí čočky .....	23
Obrázek 11 – Holografie [19] .....	23
Obrázek 12 - Mach-Zehnderův interferometr (vlevo bez fázového objektu, vpravo s fázovým objektem) [6] .....	24
Obrázek 13 - Sagnacův interferometr .....	25
Obrázek 14 - Jednocestný holografický interferometr-schéma .....	26
Obrázek 15 - Sestavení jednocestného holografického interferometru (pohled shora) .....	27
Obrázek 16 – Sestavení jednocestného holografického interferometru (pohled zepředu) .....	27
Obrázek 17 - Laserový zdroj ADR-1805 .....	28
Obrázek 18 - Optické děliče Thorlabs [20] .....	28
Obrázek 19 - Kamera IDS UI-3370CP [21] .....	29
Obrázek 20 - Špatné umístění objektu-neostrý obraz a difrakce .....	30
Obrázek 21- Transparentní destička s měrkou-hologram (vpravo výřez-interferenční proužky) .....	30
Obrázek 22 - Transparentní destička-Fourierova transformace .....	31
Obrázek 23 - Transparentní destička-intenzitní pole .....	31
Obrázek 24 - Plyn unikající ze zapalovače-referenční snímek z videa .....	32
Obrázek 25 - Plyn unikající ze zapalovače-snímek z videa obsahující plyn (oblast uvnitř červené elipsy) .....	32
Obrázek 26 – Fázové pole způsobené unikajícím plynem ze zapalovače .....	33
Obrázek 27 - Plyn unikající ze zapalovače-demodulované fázové pole Sloupec vpravo znázorňuje fázi v radiánech a jaké barvě odpovídá .....	34
Obrázek 28 - Žabí vajíčka-stupně šedi-snímek z videa .....	34
Obrázek 29 - Žabí vajíčka – fázové pole .....	35
Obrázek 30 - Žabí vajíčka-demodulovaná fáze .....	35
Obrázek 31 - Test robustnosti vůči vibracím .....	36
Obrázek 32 - Porovnání dvou snímků v jiných časech .....	36
Obrázek 33 - Test odolnosti vůči vibracím-změna fáze .....	37



# Úvod

Digitální holografická interferometrie je metoda využívající principy interferometrie a holografie k měření fyzikálních vlastností objektů, které ovlivňují fázi světelného vlnění. Jako příklad můžeme uvést deformace, vibrace nebo rozložení hustoty. Jedná se o velmi přesná měření, která nám umožňují měřit s přesností zlomku vlnové délky. Zakladateli této metody jsou Karl A. Stetson a Robert L. Powell, kteří v 60. letech 20. století při pokusech s holografii zjistili, že v hologramech lze pozorovat interferenční obrazce.

Princip metody spočívá v porovnávání vlnění, které nese informaci o měřeném objektu s referenčním vlněním. V praxi je nejběžnější tzv. dvoucestné uspořádání. Koherentní vlnění rozdělíme na dvě části. Jedna část osvětluje měřený objekt a nese o něm informaci. Toto vlnění je následně osvětleno referenčním vlněním, dochází k interferenci a výsledek je zaznamenán na digitální kameru. Digitální záznam je poté zpracován a vyhodnocen.

Nevýhodou dvoucestného uspořádání je jeho velká citlivost na vibrace prostředí. Pokud dojde k vibracím, jednotlivé větve se můžou vůči sobě rozladit a výsledek bude nepřesný. Řešením by mohlo být jednocestné uspořádání, kde obecně referenční i objektové vlnění cestuje stejnou „cestou“. Pokud pak v této větvi dojde k vibracím, jsou obě cesty ovlivněny jako celek a nedojde k posunutí vůči sobě. Navržení, sestavení a otestování takového přístroje bylo cílem této bakalářské práce.

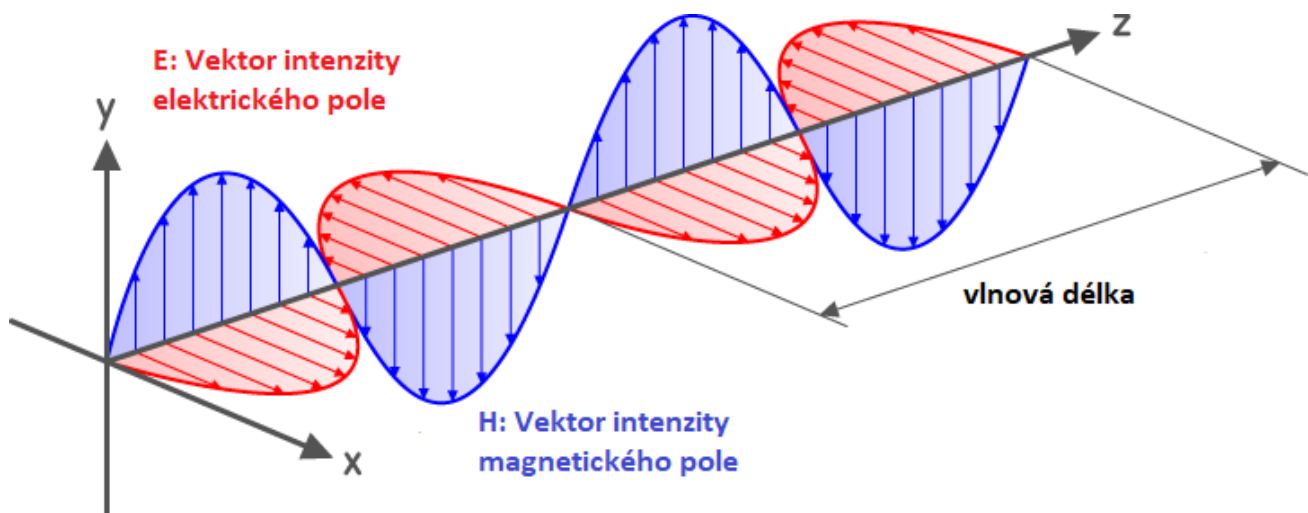
Práce je rozdělena do pěti kapitol. První kapitola obsahuje teoretický základ vlnového popisu světla. Následuje úvod do Fourierovské optiky, která hraje důležitou roli při rekonstrukci hologramů. Třetí kapitola se věnuje obecně holografii a holografické interferometrii. Ve čtvrté kapitole je popsán návrh a sestavení experimentálního jednocestného interferometru. Poslední kapitola obsahuje měření a vyhodnocení dat.

# 1 Úvod do vlnové optiky

O světle říkáme, že má tzv. vlnově-částicové vlastnosti. Můžeme tedy pozorovat, že se v určitých situacích chová jako částice a jindy zase jako vlna. Částicovým popisem světla se zabývá kvantová mechanika a vlnovým popisem vlnová optika. Jelikož tato bakalářská práce využívá zejména vlnový popis, tak se teoretická část věnuje právě této disciplíně.

## 1.1 Světlo jako vlna

Světlo je příčné elektromagnetické vlnění, které popisujeme pomocí vektoru elektrické intenzity  $\mathbf{E}$  a vektorem intenzity magnetického pole  $\mathbf{H}$ . Pro rovinnou vlnu o těchto vektorech můžeme říci, že jsou na sebe kolmé a zároveň jsou kolmé na směr šíření.



Obrázek 1 - Elektromagnetické vlnění [13]

Jelikož se jedná o elektromagnetické vlnění, musí světlo splňovat Maxwellovy rovnice

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad (1.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{j} \quad (1.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.4)$$

$\mathbf{B}$  je vektor magnetické indukce,  $\mathbf{D}$  vektor elektrické indukce a  $\rho$  hustota volného náboje. Z nich je poté možné odvodit vlnovou rovnici, která popisuje šíření konkrétní složky prostředím. Ve vakuu má rovnice pro vektor elektrické intenzity  $\mathbf{E} = (E_x, E_y, E_z)$  tvar

$$\Delta \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0, \quad (1.5)$$

kde  $\Delta$  je Laplaceův operátor, který je definován jako

$$\Delta = \nabla \cdot \nabla = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (1.6)$$

a  $c$  je rychlost šíření vlny v prostředí (pro vakuum  $c_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ ). V prostředí o indexu lomu  $n$  se světlo šíří rychlostí

$$c = \frac{c_0}{n} \quad (1.7)$$

Uvažujeme-li šíření světla v homogenním prostředí, můžeme vlnovou rovnici řešit pro každou složku zvlášť. Vlnovou rovnici poté můžeme přepsat do skalární podoby a libovolnou složku reprezentovat skalární funkcí  $U$ . Ve směru  $z$  má rovnice tvar

$$\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0 \quad (1.8)$$

Nejjednodušším a zároveň velice významným řešením vlnové rovnice je rovinná harmonická monochromatická vlna

$$U(z, t) = U_0 \cos(\omega t - kz + \varphi_0), \quad (1.9)$$

kde  $\omega$  je úhlová rychlost,  $\varphi_0$  počáteční fáze a  $k$  je vlnové číslo definované pomocí vlnové délky  $\lambda$  jako

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.10)$$

Přejdeme-li do komplexního oboru, můžeme pak obecné řešení zapsat jako

$$\hat{U}(\mathbf{r}, t) = U_0 \exp[i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \varphi_0)], \quad (1.11)$$

kde  $\mathbf{k}$  je tzv. vlnový vektor definovaný jako jednotkový vektor ve směru šíření  $\mathbf{s}$  vynásobený vlnovým číslem a  $\mathbf{r}$  je polohový vektor.

$$\mathbf{k} = k\mathbf{s} = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{s} \quad (1.12)$$

Metodou separace proměnných můžeme z vlnové rovnice získat časově nezávislé řešení, které se nazývá Helmholtzova rovnice a můžeme ji zapsat ve tvaru

$$\Delta U(\mathbf{r}) + k^2 U(\mathbf{r}) = 0 \quad (1.13)$$

## 1.2 Intenzita

Intenzita světla  $I(\mathbf{r}, t)$  je závislá na výkonu dopadajícího světla  $P(t)$  na jednotku plochy  $S$ . Tedy rozměr této veličiny je watt na  $\text{cm}^2$ . Intenzita je potom definovaná jako dvojnásobek časové střední hodnoty druhé mocniny vlnové rovnice.

$$I(\mathbf{r}, t) = 2\langle U^2(\mathbf{r}, t) \rangle \quad (1.14)$$

Provedeme-li průměrování z rovnice (1.14) pro rovinnou vlnu, dobereme se ke vztahu

$$I = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c |U_0|^2 \approx |U_0|^2 \quad (1.15)$$

kde  $\varepsilon_0 \approx 8,54 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$  je permitivita vakua.

## 1.3 Interference

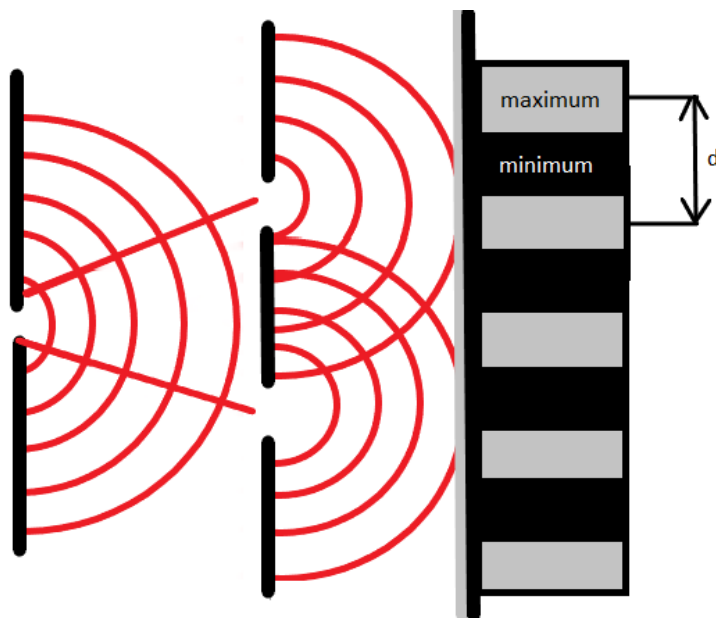
### 1.3.1 Superpozice

Podobně jako pro vlny na vodní hladině platí pro světelné vlny princip superpozice. Když se setká obecně  $n$  vln, můžeme výslednou vlnu popsat jako součet všech jednotlivých vln.

$$U(\mathbf{r}, t) = \sum_{k=1}^n U_k(\mathbf{r}, t) \quad (1.16)$$

### 1.3.2 Youngův dvojštěrbinový experiment

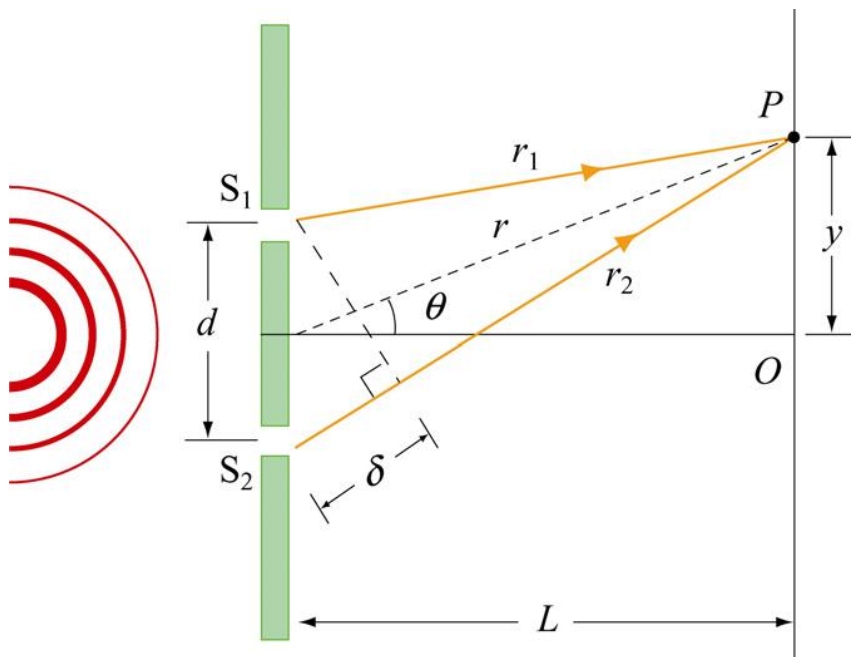
Vlnovou podstatu světla dokázal v roce 1801 Thomas Young při svém dvojštěrbinovém pokusu.



Obrázek 2 - Youngův dvojštěrbinový experiment

Nechal dopadat rovinnou monochromatickou vlnu na stínítko se štěrbinou  $S_0$ . Tato štěrbina se podle Huygensova principu stává novým zdrojem vlnění, které dopadá na další stínítko se dvěma štěrbinami  $S_1$  a  $S_2$ . Z těchto dvou štěrbin se šíří dvě vlnění, které spolu interferují a podle principu superpozice

na posledním stínítku pozorujeme světlé a tmavé proužky podle toho, jestli v daném místě složením vln o fázovém rozdílu  $\delta$  vzniklo maximum nebo minimum. Znázorníme-li si vzdálenosti jednotlivých štěrbin od nějakého bodu  $P$  na stínítku viz. Obrázek 3.



Obrázek 3 - Youngův dvojštěrbinový experiment – odvození [15]

můžeme odvodit, že pro fázový rozdíl  $\delta$  platí

$$\delta = r_2 - r_1 = d \sin \theta \quad (1.17)$$

Světlé proužky pak pozorujeme v místech, kde je fázový rozdíl roven celočíselným násobkům vlnové délky a tmavé proužky v místech o fázovém rozdílu rovnému lichým násobkům poloviny vlnové délky. Pro vzdálenost sousedních maxim  $d$  pak platí

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \quad (1.18)$$

### 1.3.3 Rozložení intenzity při interferenci dvou vln

Necháme-li spolu interferovat dvě monochromatické vlny  $U_1$  a  $U_2$  platí princip superpozice viz. (1.16). Neplatí však, že výsledná intenzita je součet jednotlivých intenzit. Můžeme zavést, že pro vlnu  $U$  a její komplexně sdruženou vlnu  $U^*$  platí

$$U \sim \sqrt{I} \exp(i\varphi) \quad (1.19)$$

$$U^* \sim \sqrt{I} \exp(-i\varphi)$$

Výslednou intenzitu pak můžeme podle rovnic (1.15) a (1.19) spočítat jako

$$I = |U_1 + U_2|^2 \quad (1.20)$$

$$I = |U_1|^2 + |U_2|^2 + U_1^* U_2 + U_2^* U_1$$

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\varphi$$

Výraz  $2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\varphi$  nazýváme interferenční člen, který závisí na rozdílu fází jednotlivých vln.

Pomocí rozložení intenzity v interferenčním obrazci (v maximech  $I_{max}$  a v minimech  $I_{min}$ ) pak zavádíme tzv. viditelnost interferenční struktury, kterou získáme jako

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (1.21)$$

## 1.4 Koherence

Pokud chceme pozorovat interferenci, musí splňovat světlo několik podmínek. Jednou z nich je, že světlo musí být koherentní. Obecně můžeme říci, že dvě vlnění jsou koherentní, pokud jejich fázový rozdíl zůstává konstantní ( $\Delta\varphi = konst.$ ).

### 1.4.1 Časová koherence

Vlnění můžeme nazvat časově koherentním, pokud se fázový rozdíl  $\Delta\varphi$  v čase nemění. Reálné zdroje světla však nikdy nemohou být absolutně koherentní. Schopnost zdroje generovat koherentní světlo o vlnové délce  $\lambda$  je vyjádřeno tzv. koherenční délkou  $L$ , která nám udává, jaký maximální dráhový rozdíl můžeme v interferometru nastavit, aby byl interferenční obrazec viditelný. Koherenční délka souvisí s šířkou spektra zdroje  $\Delta\lambda$ . Zdroje s úzkým spektrem (např. laser<sup>1</sup>) vykazují vysokou míru koherence. Naopak zdroje s širokým spektrem (např. žárovka) jsou velmi málo koherentní.

$$L = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (1.22)$$

---

<sup>1</sup> Zkratka pochází z anglického názvu Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Jedná se o přístroje, které zesilují světlo a vyzářují ho ve formě úzkého svazku. Využívá se stimulované emise, při které atom na určité energetické hladině „spadne“ na hladinu nižší a při tomto přechodu vyzáří foton.

## 1.5 Polarizace

Polarizace nám dává informaci o směru kmitání vektoru intenzity elektrického pole  $\mathbf{E}$ . U nepolarizovaného světla může  $\mathbf{E}$  obecně kmitat do všech směrů. Pro popis polarizace musíme zjistit jakou křivku opisuje „konec“ tohoto vektoru. Budeme-li uvažovat polarizovanou vlnu, která se šíří ve směru osy  $z$ , jejíž vektor elektrické intenzity kmitá v rovině  $xy$ , můžeme složky vektoru  $\mathbf{E}$  zapsat jako

$$E_x = E_{x0} \cos(\omega t - kz + \delta_x) = E_{x0} \cos(\varphi + \delta_x) \quad (1.23)$$

$$E_y = E_{y0} \cos(\omega t - kz + \delta_y) = E_{y0} \cos(\varphi + \delta_y) \quad (1.24)$$

$$E_z = 0 \quad (1.25)$$

Úpravou rovnic (1.23) a (1.24) můžeme získat tvar

$$\frac{E_x^2}{E_{x0}^2} + \frac{E_y^2}{E_{y0}^2} - 2 \frac{E_x E_y}{E_{x0} E_{y0}} \cos \delta = \sin^2 \delta, \quad (1.26)$$

což je rovnice elipsy. „Konec“ kmitajícího vektoru  $\mathbf{E}$  polarizovaného světla teda v prostoru obecně opisuje tvar elipsy. Pokud komponenta  $y$  předbíhá komponentu  $x$  ( $\delta_y > \delta_x$ ), elipsa se „otáčí“ po směru hodinových ručiček a mluvíme o tzv. pravotočivé polarizaci. V opačném případě ji nazýváme levotočivou. V případě, že fázový rozdíl  $\delta$  je roven lichým násobkům  $\pi/2$  a amplitudy  $E_{x0}$  a  $E_{y0}$  jsou stejné ( $E_{x0} = E_{y0} = E_0$ ), rovnice se zjednoduší na

$$E_x^2 + E_y^2 = E_0^2 \quad (1.27)$$

Jelikož se jedná o rovnici kružnice, nazýváme tuto polarizaci kruhová viz. Obrázek 4  
Pro fázový rozdíl rovný celočíselnému násobku čísla  $\pi$  dostaneme rovnici ve tvaru

$$\frac{E_x^2}{E_{x0}^2} + \frac{E_y^2}{E_{y0}^2} - 2 \frac{E_x E_y}{E_{x0} E_{y0}} = 0, \quad (1.26)$$

jejíž řešením je

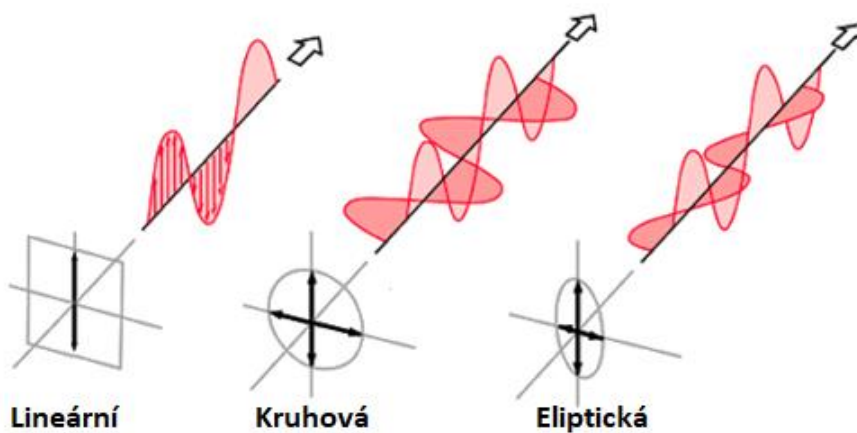


$$\frac{E_x}{E_{x0}} = \frac{E_y}{E_{y0}} \quad (1.27)$$

Pokud podíl amplitud  $E_{y0}$  a  $E_{x0}$  označíme jako  $k$  můžeme rovnici (1.27) přepsat jako lineární funkci

$$E_y = kE_x \quad (1.28)$$

Tento speciální případ nazýváme lineární polarizace viz. Obrázek 4

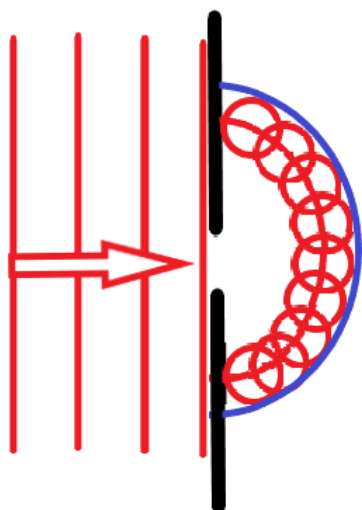


Obrázek 4 – Polarizace [16]

Optické prvky, které nám umožňují měnit polarizaci světla se nazývají polarizátory. V praxi fungují tak, že propouštějí světlo, jehož vektor elektrické intenzity kmitá požadovaným směrem. Nejčastěji se používají lineární polarizátory.

## 1.6 Difrakce

Můžeme pozorovat, že se světlo při pohybu kolem překážek nešíří přímočaře, ale za překážkou se ohýbá. Důvodem je šíření světla podle Huygensova principu, kdy každý bod vlnoplochy je zároveň zdrojem sekundárního vlnění viz. Obrázek 5



Obrázek 5 - Huygensův princip

Sekundární vlnění spolu interferují a na stínítku pozorujeme difrakční obrazec, u kterého důsledkem konstruktivní a destruktivní interference dochází k rozložení intenzity. Pozorujeme-li difrakci v dostatečné vzdálenosti od překážky, můžeme přicházející vlny považovat za rovinné. Zároveň geometrie obrazce na stínítku neodpovídá tvaru překážky. Pro tento případ se používá tzv. Fraunhoferova difrakce. Pokud je stínítko „blízko“ za překážkou, přicházející vlnění nelze považovat za rovinné. Volíme složitější matematický popis pomocí parabol, jež nazýváme Fresnelova difrakce.

### 1.6.1 Fraunhoferova difrakce na kruhové apertuře

Difrakce na kruhové apertuře hraje důležitou roli v optických soustavách. Určuje limitní rozlišení všech optických přístrojů. Předpokládejme, že dochází k difrakci na kruhovém otvoru o poloměru  $R$ . Podle Huygensova principu bude element vlnoplochy  $dS$  zdrojem vlnění

$$d\tilde{U}_P = \frac{U_A dS}{r} \exp[-i(\omega t - kr)], \quad (1.29)$$

kde  $U_A dS$  je amplituda sekundární vlny a  $r$  je vzdálenost elementu plochy od bodu  $P$ , ve kterém zkoumáme intenzitu. Pokud vzdálenost elementu  $dS$  od optické osy označíme  $s$  a  $r_0$  označíme vzdálenost, kterou světlo urazí k bodu  $P$ , pokud prochází středem apertury a s optickou osou svírá úhel  $\alpha$ , můžeme zavést vzdálenost  $r$  jako funkci vzdálenosti  $s$  jako

$$r = r_0 + s(\sin\alpha), \quad (1.30)$$

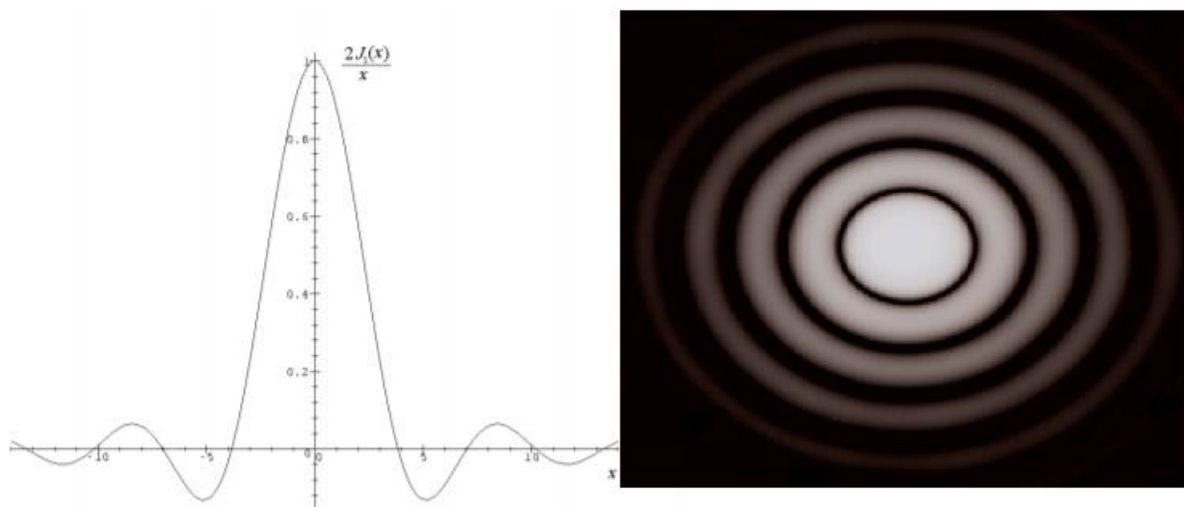
příčemž  $s(\sin\alpha)$  je dráhový rozdíl. Celkové vlnění v bodě  $P$  bude integrálem jednotlivých příspěvků. Pro Fraunhoferovu aproximaci lze dokázat, že výsledné vlnění můžeme zapsat v následujícím tvaru

$$\bar{U}_P = \frac{U_A}{r_0} \exp[-i(\omega t - kr_0)] \iint \exp(iks \sin\alpha) dS \quad (1.31)$$

Z rovnice (1.31) poté můžeme odvodit vztah pro rozložení intenzity

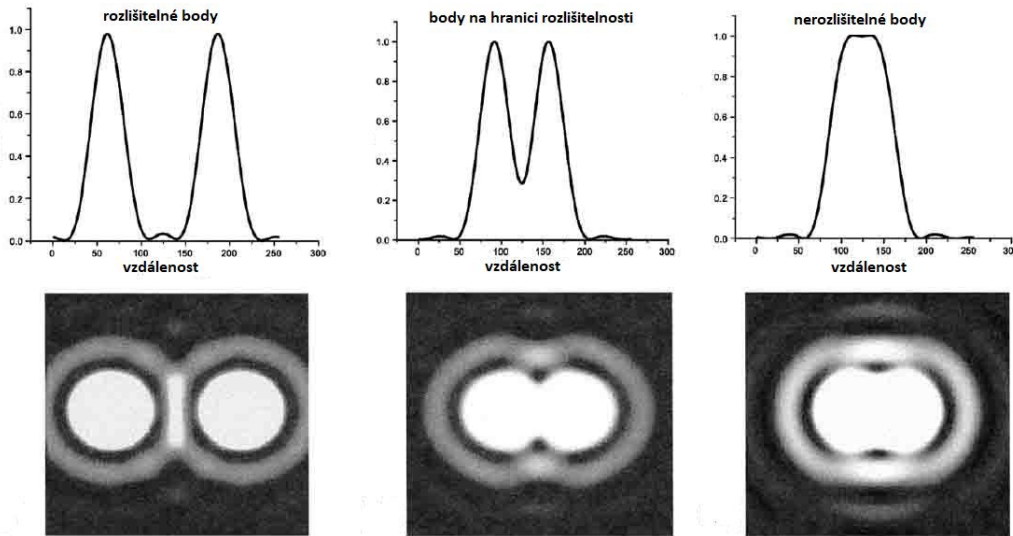
$$I = I_0 \left[ \frac{2J_1(\gamma)}{\gamma} \right]^2, \quad (1.32)$$

kde  $J_1$  je první řád Besselovy funkce prvního druhu a  $\gamma = kR\sin\alpha$ .



Obrázek 6 - Difrakce na kruhové apertuře – rozložení intenzity [18]

Na Obrázek 6 můžeme vidět, že intenzita je nejvíce soustředěna ve středovém kroužku, který se nazývá Airyho disk, jehož poloměr je určen první nulou Besselovy funkce, která nastává při hodnotě  $\gamma = 1,22\pi$ . Pomocí Airyho disku můžeme zavést tzv. difrakční limit, který nám určuje minimální vzdálenost dvou bodů v obraze, které jsou od sebe rozlišitelné. Difrakční limit můžeme určit např. Rayleighovým kritériem, které definuje, že dva body jsou rozlišitelné, právě když maximum prvního zobrazeného bodu neleží blíže, než je první minimum druhého zobrazeného bodu viz. Obrázek 7.



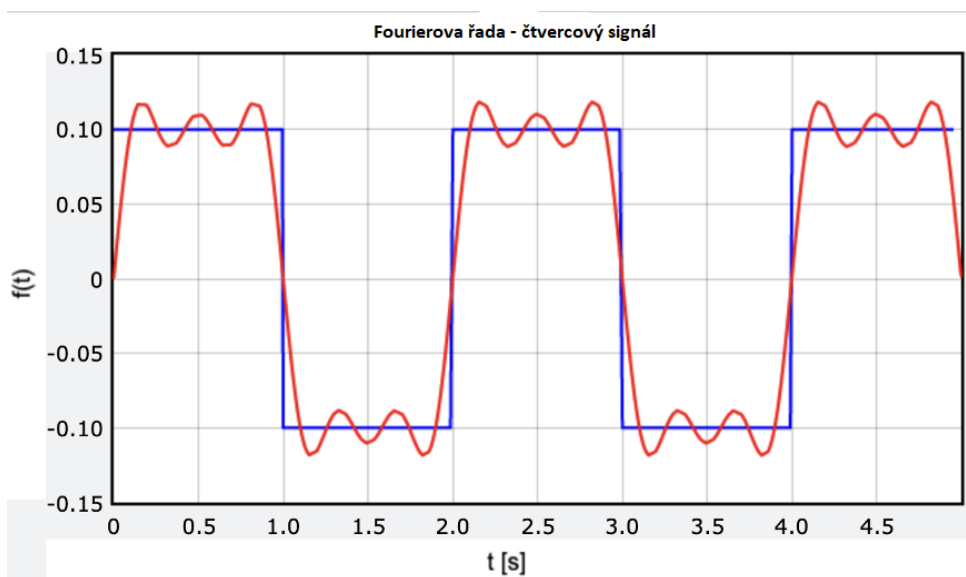
Obrázek 7 – Rozlišitelnost dvou bodů

## 2 Úvod do Fourierovské optiky

Fourierovská optika popisuje šíření světelných vln na základě Fourierovy transformace.

### 2.1 Fourierova řada

Mějme obecnou periodickou funkci  $f(x)$ . Naším cílem je zapsat tuto funkci pomocí základních goniometrických funkcí sinus a cosinus viz. Obrázek 8.



Obrázek 8 - Rozklad čtvercového signálu do Fourierovy řady

Budeme-li uvažovat periodickou integrovatelnou funkci  $f(x)$  s periodou  $2L$ , můžeme ji zapsat jako Fourierovu řadu ve tvaru

$$f(x) \sim \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{n\pi x}{L} \quad (1.33)$$

kde  $a_0, a_n, b_n$  se nazývají Fourierovy koeficienty a platí pro ně

$$a_0 = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) dx \quad (1.34)$$

$$a_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \cos \frac{n\pi x}{L} dx, n = 0, 1, \dots, \quad (1.35)$$

$$b_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \sin \frac{n\pi x}{L} dx, n = 1, 2, \dots, \quad (1.36)$$

## 2.2 Fourierova transformace

Jedná se o integrální transformaci, která převádí funkci času  $f(t)$  na integrál frekvenčně závislých harmonických funkcí.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g(\omega) \exp(-i\omega t) d\omega \quad (1.37)$$

$$g(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(i\omega t) dt \quad (1.38)$$

kde  $g(\omega)$  je tzv. zpětná Fourierova transformace.

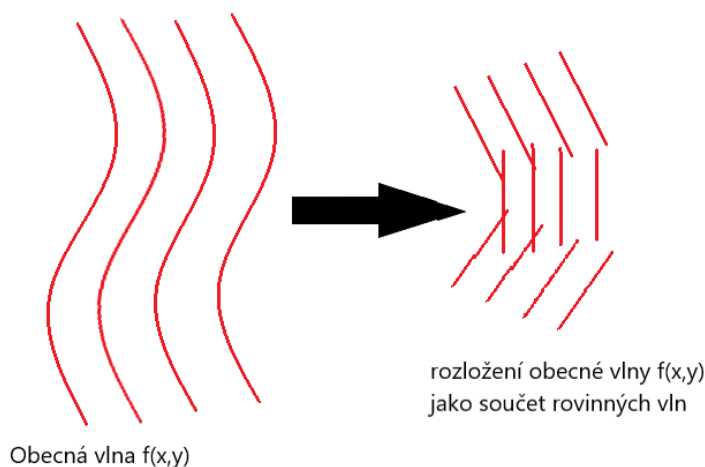
## 2.3 Fourierova transformace v optice

Ve Fourierovské optice často pracujeme s vlnou, kterou popisujeme jako funkci dvou prostorových proměnných  $f(x,y)$ . Její Fourierovu transformaci můžeme zapsat jako

$$f(x,y) = \iint_{-\infty}^{\infty} g(k_x, k_y) \exp [i(k_x x + k_y y)] dk_x dk_y \quad (1.39)$$

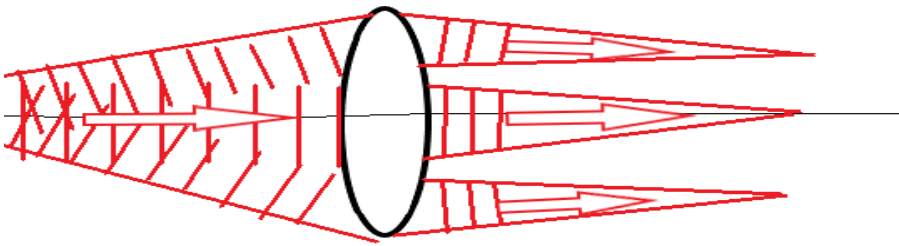
$$g(k_x, k_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x,y) \exp [-i(k_x x + k_y y)] dx dy \quad (1.40)$$

kde  $k_x, k_y$  jsou složky vlnového vektoru, které se také nazývají prostorové frekvence. Výraz uvnitř integrálu v rovnici (1.39) odpovídá předpisu rovinné vlny. Vztah (1.39) tedy můžeme chápat tak, že obecnou postupnou vlnu lze vyjádřit jako součet rovinných vln viz. Obrázek 9.



Obrázek 9 - Fourierova transformace postupné vlny

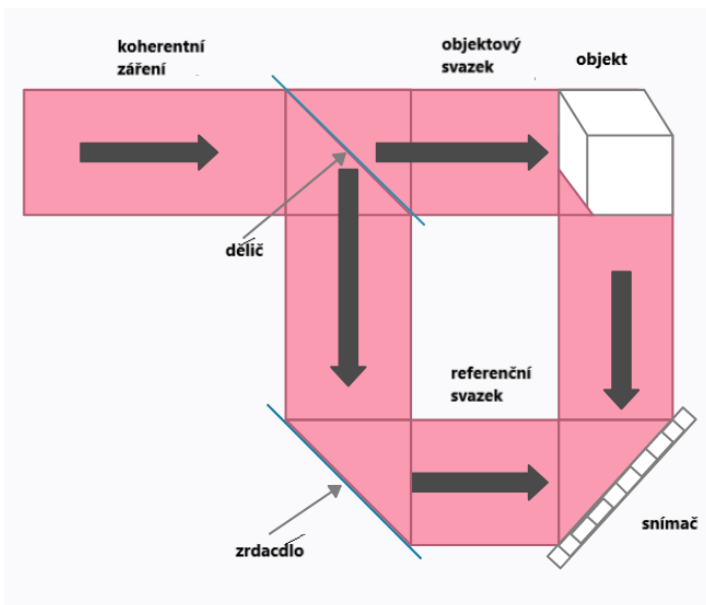
Jednotlivé složky se šíří pod různými úhly. Pro různé aplikace v optice je výhodné jednotlivé rovinné vlny oddělit, aby se nepřekrývaly. Toho docílíme buď ve velké vzdálenosti od zdroje, nebo můžeme použít čočku, která bude každou rovinnou vlnu zaměřovat do jiného bodu viz. Obrázek 10.



Obrázek 10 - Fourierova transformace pomocí čočky

### 3 Holografie

Obdobně jako fotografie, se holografie snaží zaznamenávat optický signál. V holografii však nezaznamenáváme pouze intenzitu jako např. ve fotografii, ale i fázi vlny. Z různých pozorovacích úhlů navíc vidíme různé projekce vlny, tudíž získáváme i prostorovou informaci. Realizace metody spočívá v „osvětlení“ objektu koherentním vlněním. Toto vlnění nesoucí informaci o objektu poté „osvítíme“ referenčním svazkem a výsledný hologram snímáme vhodným snímačem viz. Obrázek 11.



Obrázek 11 – Holografie

Pokud hologram snímáme digitálním snímačem např. CCD nebo CMOS, mluvíme o tzv. digitální holografii.

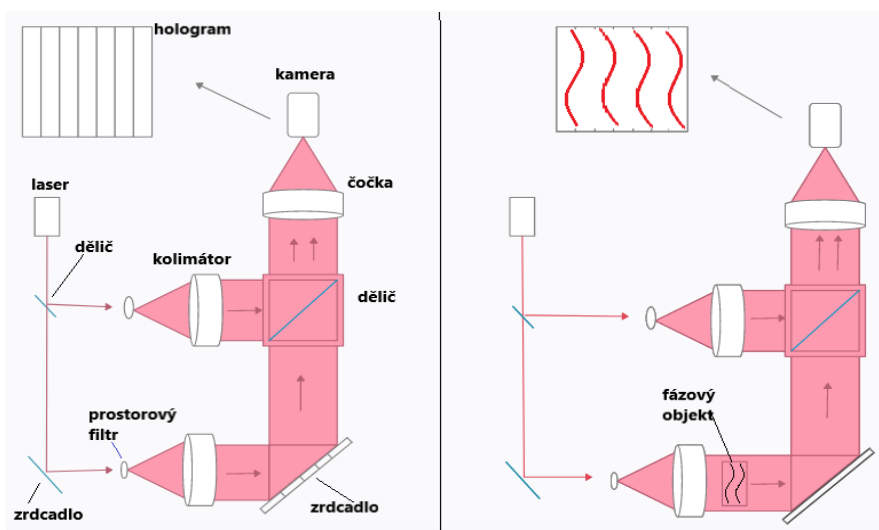
### 3.1 Rekonstrukce digitálních hologramů

Digitální hologram je reprezentován hodnotami jasu uloženými v paměti počítače. Abychom mohli s hologramem dále pracovat, je potřeba jej rekonstruovat. V klasické holografii je rekonstrukce provedena osvětlením hologramu rekonstrukčním svazkem, který dopadá pod stejným úhlem jako referenční svazek při záznamu. Dochází k difrakci a za hologramem se šíří rekonstruované vlnění, které nese informaci jak o intenzitě, tak i o fázi původního optického signálu. Dá se tedy říci, že dostáváme zdánlivý prostorový obraz. V digitální holografii však musíme záznam rekonstruovat numericky. Obecně řešíme difrakční úlohu, jejímž řešením je tzv. Fresnelova transformace, při které používáme diskretní Fourierovu transformaci. V numerických softwarech se nejvíce používá algoritmus rychlé Fourierovy transformace neboli FFT. Výhodou tohoto přístupu je možnost rekonstrukce digitálních hologramů téměř v reálném čase.

### 3.2 Digitální holografická interferometrie

Digitální holografická interferometrie nám umožňuje porovnávat dva různé stavy digitálního hologramu v čase. Touto metodou můžeme měřit fyzikální veličiny, které lze převést na změnu fáze světelné vlny. Můžeme měřit například teplotu, deformace, vibrace, rozložení indexu lomu atd. V praxi metoda probíhá tak, že zaznamenáme různé stavy objektu jako hologramy a následně pomocí vhodného softwaru zjistíme fázový rozdíl mezi stavy.

Pro klasická interferometrická měření je nejpoužívanějším dvoucestné uspořádání. Nejvýznamnějším je tzv. Mach-Zehnderův interferometr viz. Obrázek 12.

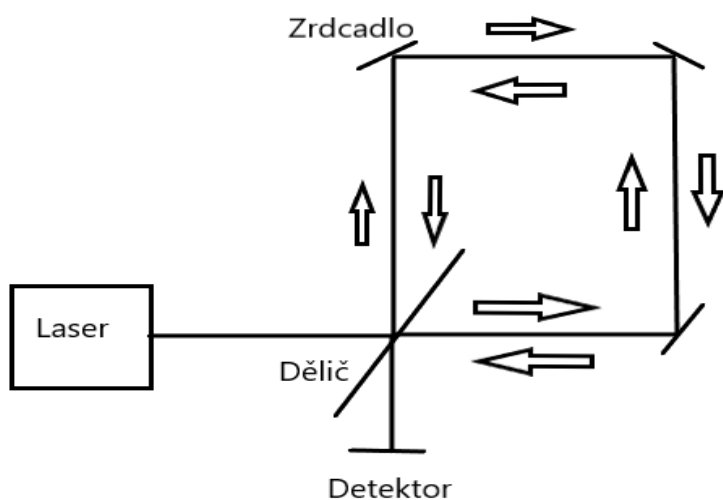


Obrázek 12 - Mach-Zehnderův interferometr (vlevo bez fázového objektu, vpravo s fázovým objektem)



Koherentní vlnění je rozděleno do dvou větví, přičemž jedna prochází fázovým objektem a druhá je referenční. Oba svazky se následně spojí v děliči a jejich interferenci snímáme na kameře. Pokud je v jedné větvi vložen objekt, který ovlivňuje fázi vlny, budeme na hologramu pozorovat zvlnění proužků oproti referenčnímu stavu, ve kterém by proužky měli být rovnoběžné viz. Obrázek 12. Výhodou dvoucestných interferometrů je jejich přesnost a velká citlivost na změnu fáze. Nevýhodou je, pokud měření provádíme v nestacionárním prostředí, mohou se jednotlivé větve „rozladit“ a ovlivnit tak výsledné měření.

Robustnější vůči vibracím jsou jednocestné interferometry, kde je referenční i objektový svazek veden stejnou větví. Nejznámějším jednocestným interferometrem je Sagnacův viz. Obrázek 13.



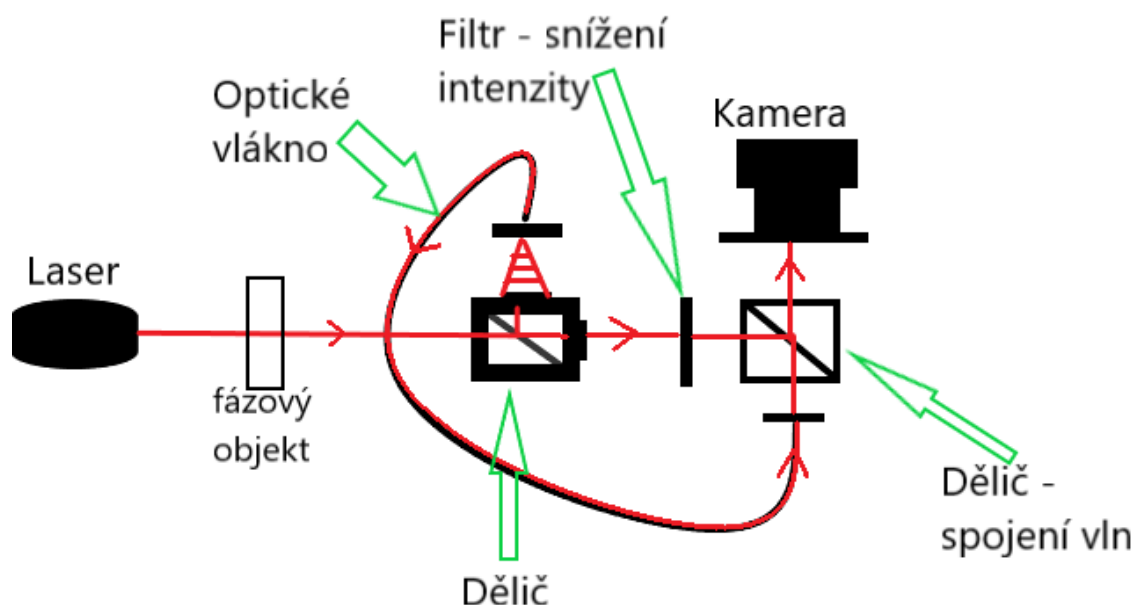
Obrázek 13 - Sagnacův interferometr

Tento interferometr se však nepoužívá k holografii. Primární využití je v aplikacích, kde se pracuje s otáčkami např. Gyroskopy. Jednocestné interferometry se obecně k holografické interferometrii běžně nevyužívají. Navržení a sestavení jednocestného interferometru, který by byl odolný vůči vibracím a zároveň použitelný pro holografická měření je cílem této bakalářské práce.

## 4 Návrh a sestavení experimentálního digitálního holografického interferometru

### 4.1 Návrh jednocestného holografického interferometru

Důležitou částí této bakalářské práce bylo sestavení experimentálního jednocestného holografického interferometru. Ten jsme sestavili podle námi navrženého schématu viz. Obrázek 14.

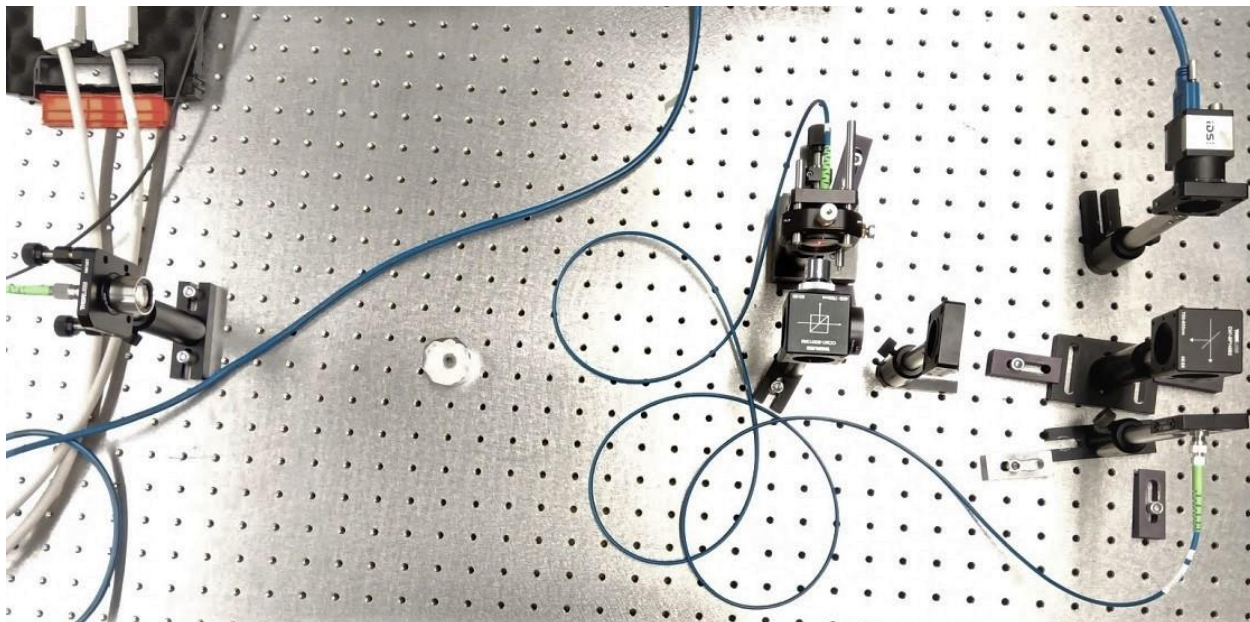


Obrázek 14 - Jednocestný holografický interferometr-schéma

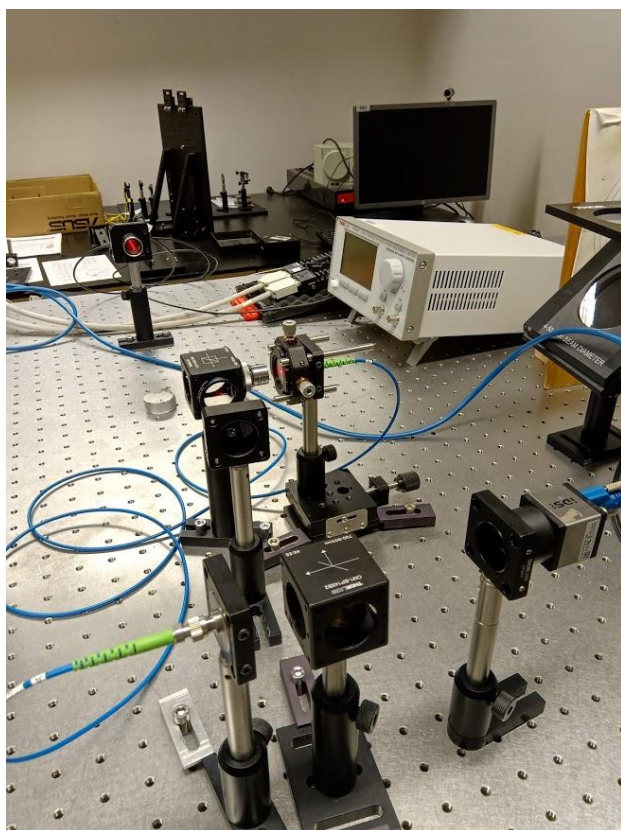
Koherentní zdroj světla osvětluje fázový objekt. Dále svazek vstupuje do děliče, kde je rozdělen do dvou větví. Jedna větev je pomocí spojně čočky navedena do jednomódového optického vlákna, na jehož malé jádro se naváže pouze světlo dopadající pod malým úhlem a odfiltruje další prostorové módy obdobně jako na *Obrázek 10 - Fourierova transformace pomocí čočky*. Z vlákna poté vychází „nová“ sférická vlna, která není ovlivněna fázovým objektem a bude plnit roli referenční vlny. Druhou větví prochází vlnění nesoucí informaci o fázovém objektu. Z děliče je vedeno přes optický filtr, který snižuje intenzitu na úroveň vlnění procházející optickým vláknem. Obě větve jsou poté spojeny v dalším děliči, kde spolu vlnění interferují. Interferenci snímáme kamerou a získáváme digitální hologram. Předpokladem tohoto schématu je odolnost vůči vibracím v oblasti mezi zdrojem světla a prvním děličem. Světlo by bylo ovlivněno jako celek a nedošlo by k posunu jednotlivých větví vůči sobě. Pro oblast, kde je světlo rozděleno do dvou cest, však tento předpoklad již neplatí.

## 4.2 Sestavení experimentálního jednocestného holografického interferometru

Podle navrženého schématu viz. Obrázek 14 jsme v laboratoři sestavili jednocestný holografický interferometr viz. Obrázek 15. a Obrázek 16.



Obrázek 15 - Sestavení jednocestného holografického interferometru (pohled shora)



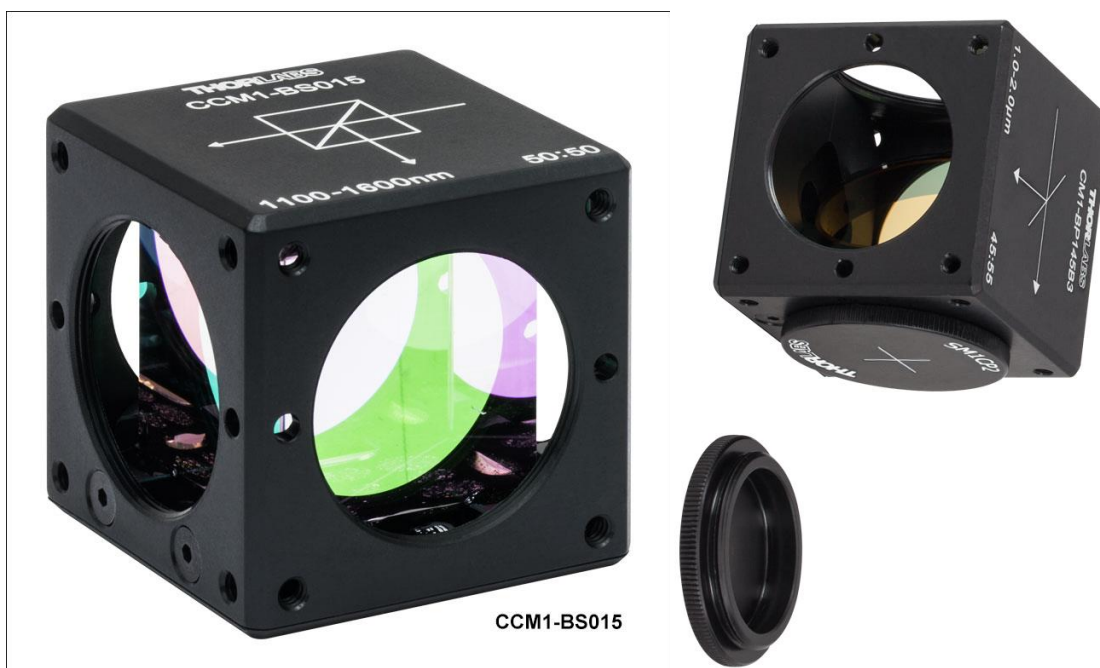
Obrázek 16 – Sestavení jednocestného holografického interferometru (pohled zepředu)

Jako koherentní zdroj světla jsme použili laser ADR-1805 od společnosti Accusy Phototech, Ltd., s nastavitelnou intenzitou světla pomocí vstupního napětí viz. Obrázek 17.



Obrázek 17 - Laserový zdroj ADR-1805

Jako děliče byly použity optické nepolarizační děliče CCM1-BS015 a CM1-BP145B3 od firmy Thorlabs, inc. viz. Obrázek 18.



Obrázek 18 - Optické děliče Thorlabs [20]



Interferenci jsme snímali průmyslovou kamerou UI-3370CP od firmy IDS viz. Obrázek 19.



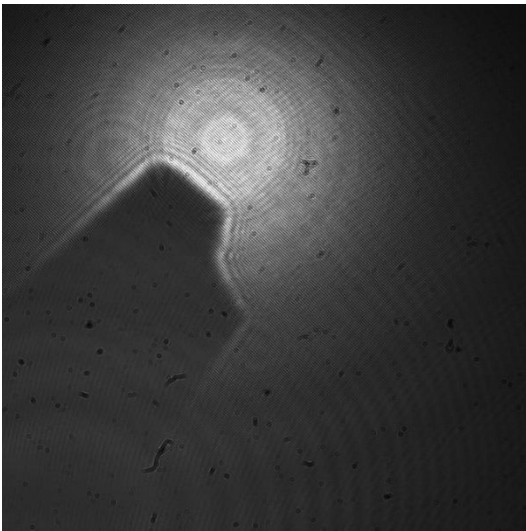
*Obrázek 19 - Kamera IDS UI-3370CP [21]*

Kamera je vybavena 4 megapixelovým senzorem typu CMOS dosahujícím rozlišení 2048 x 2048 pixelů a snímkové frekvence 80 snímků za sekundu. Kamera byla ovládána pomocí softwaru uEye Cockpit od firmy IDS. Jako fázové objekty jsme zvolili různé transmisivní vzorky a plyn unikající ze zapalovače.

## **5 Měření a vyhodnocení dat**

### **5.1 Kalibrace**

První částí měření byla kalibrace na transparentní destičce s měrkou o velikosti dílku 0,2 mm. Nejprve bylo třeba správně umístit destičku, aby byl obraz ostrý a nedocházelo na hranách k difrakci viz. Obrázek 20.



Obrázek 20 - Špatné umístění objektu-neostrý obraz a difrakce

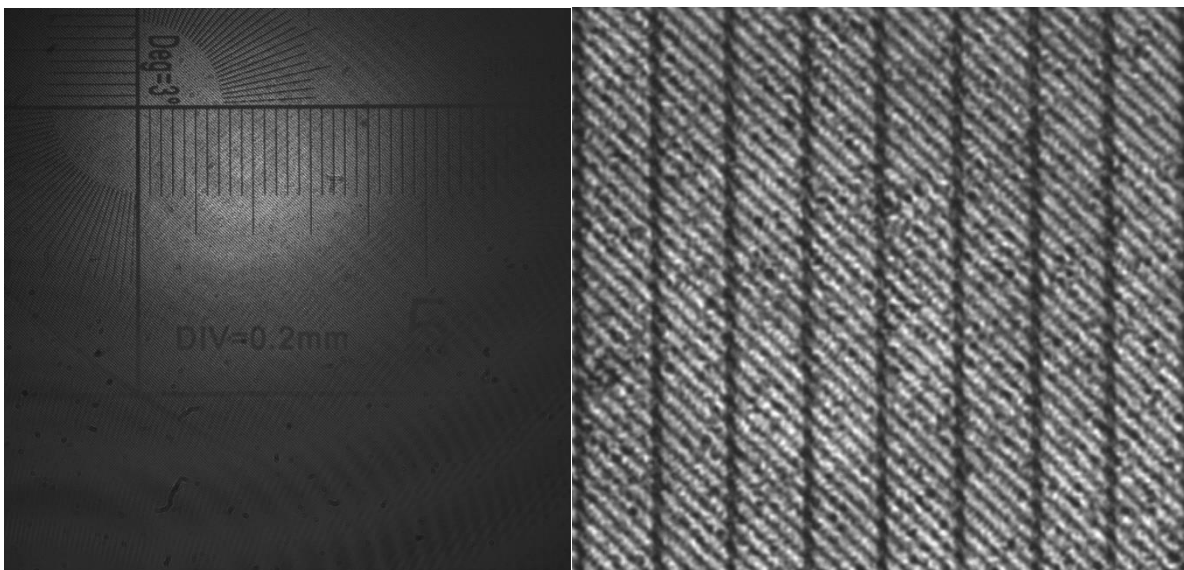
Správné umístění jsme vypočítali z jednoduché zobrazovací rovnice čočky, která má tvar

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f} \quad (1.41)$$

kde  $a$  je objektová vzdálenost,  $a'$  obrazová vzdálenost a  $f$  ohnisko čočky. Ohnisková vzdálenost použité čočky je 15 cm a hodnota obrazové vzdálenosti byla v laboratoři určena na 31,5 cm. Jednoduchou úpravou byla z rovnice (1.41) vyjádřena a vypočtena hodnota objektové vzdálenosti, která vyšla 28,6 cm.

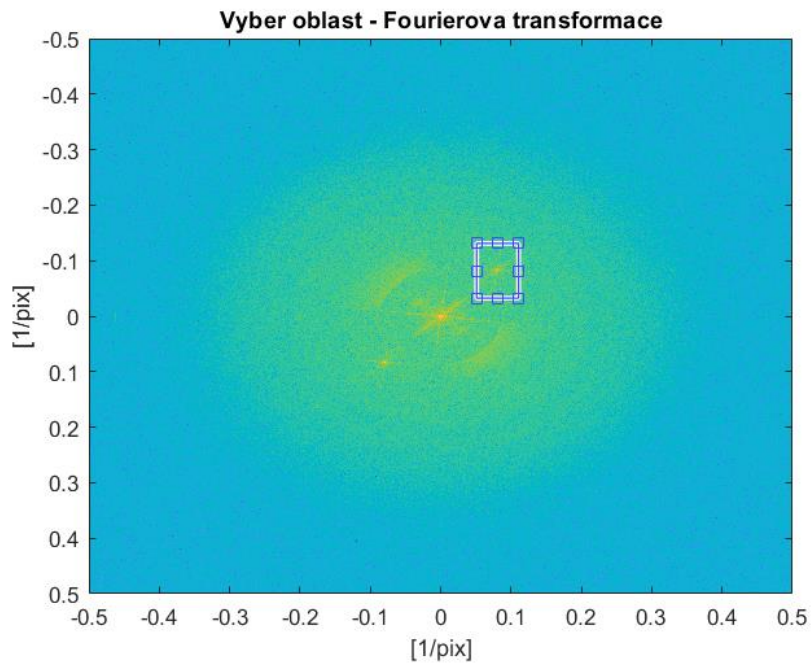
Následně byla snímána destička a výsledek byl v počítači uložen jako digitální hologram viz.

Obrázek 21.



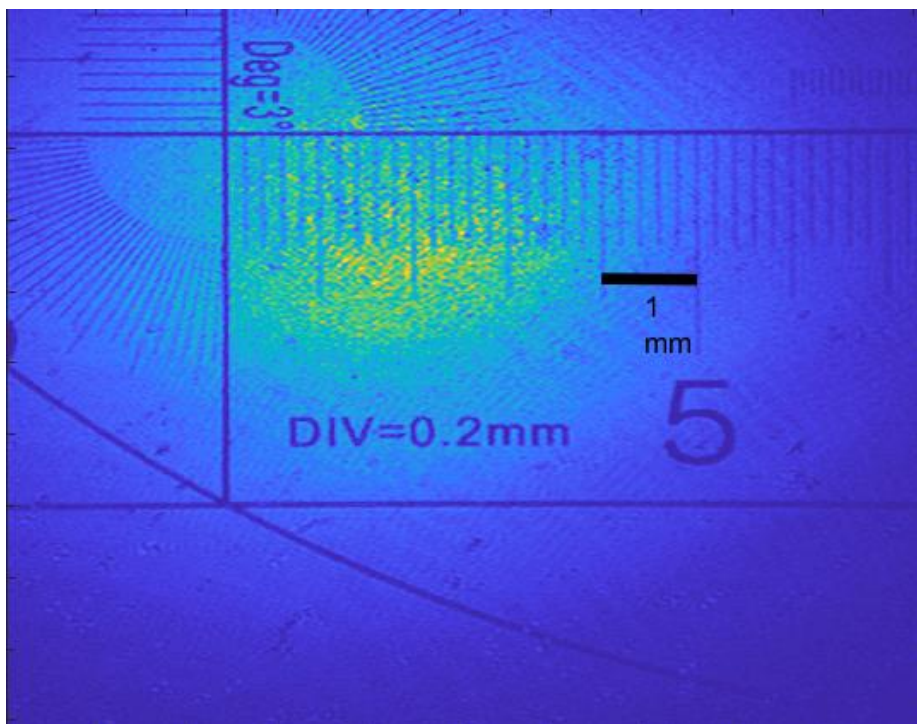
Obrázek 21- Transparentní destička s měrkou-hologram (vpravo výřez-interferenční proužky)

Dále byl obraz v prostředí MATLAB pomocí Fourierovy transformace rozložen na jednotlivé složky viz. Obrázek 22.



Obrázek 22 - Transparentní destička-Fourierova transformace

Poté se vybrala oblast spektra, kterou převedeme do prostorové oblasti inverzní Fourierovy transformace. Výsledkem je komplexní pole reprezentující optické vlnové pole  $U$ , z kterého byla vypočteno výsledné intenzitní pole viz. Obrázek 23, jako absolutní hodnota  $U$ .

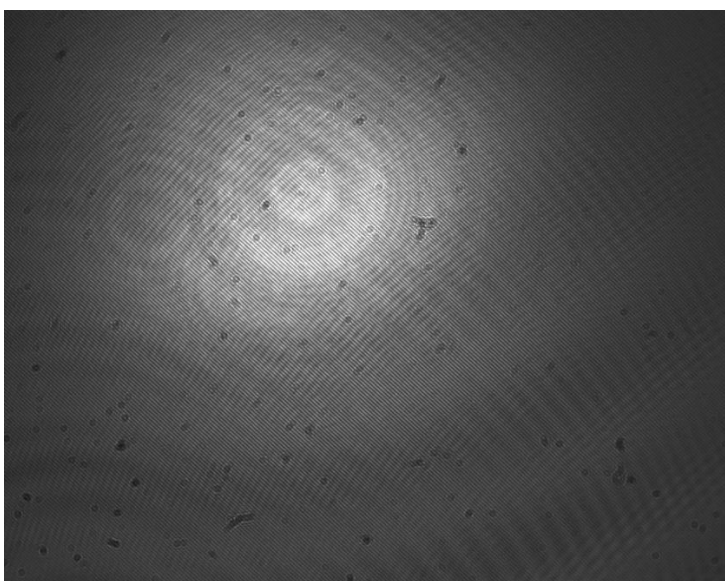


Obrázek 23 - Transparentní destička-intenzitní pole

Z hologramu můžeme vyčíst v jakých rozměrech přístroj snímá. Na obrázku je znázorněno, jak velkou část zabírá úsečka o délce 1 mm. Celková šířka zorného pole je cca 9 mm.

## 5.2 Měření plynu unikajícího ze zapalovače

Cílem dalšího měření bylo snímat plyn unikající ze zapalovače a následně určit změnu fáze. Tento experiment demonstruje aplikovatelnost metody při měření fázových fyzikálních polí v reálném čase. Plyn unikající ze zapalovače má jiný index lomu než vzduch, a tak bylo možné proudové pole interferometricky měřit. Byl pořízen videozáznam, který obsahuje unikající plyn i referenční snímky viz Obrázek 24 a Obrázek 25.



Obrázek 24 - Plyn unikající ze zapalovače-referenční snímek z videa

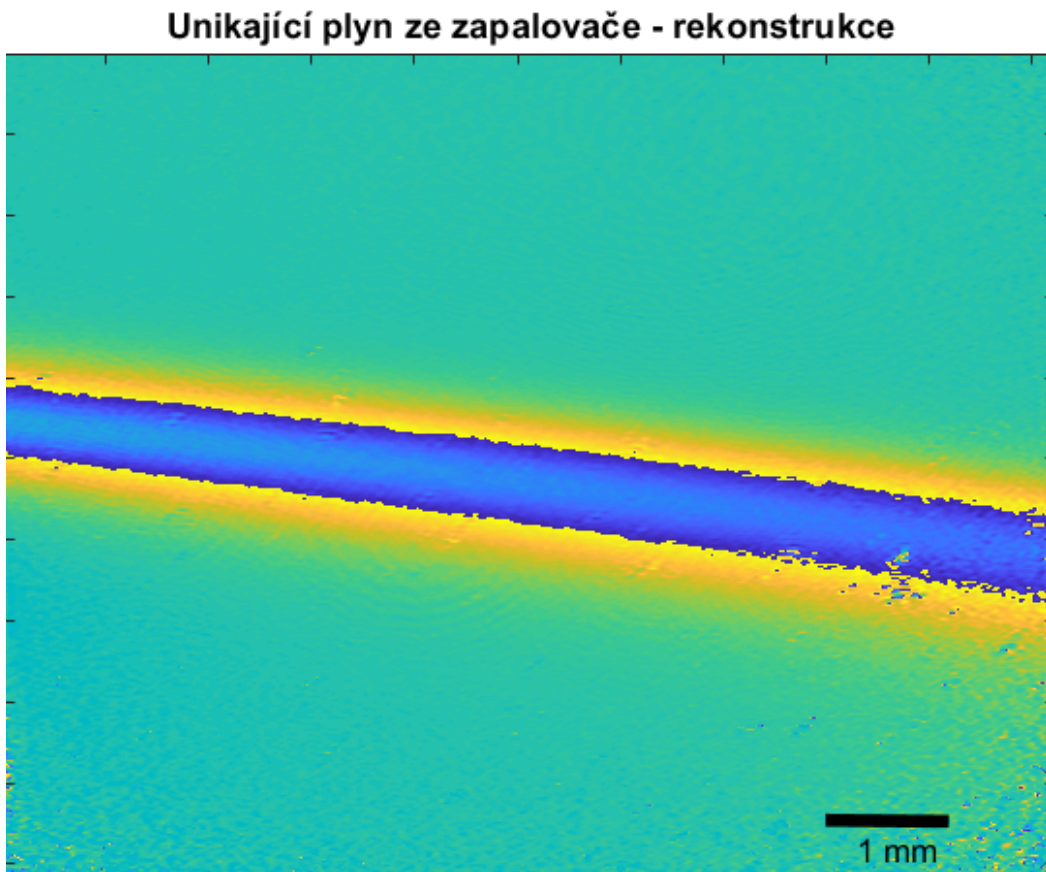


Obrázek 25 - Plyn unikající ze zapalovače-snímek z videa obsahující plyn (oblast uvnitř červené elipsy)



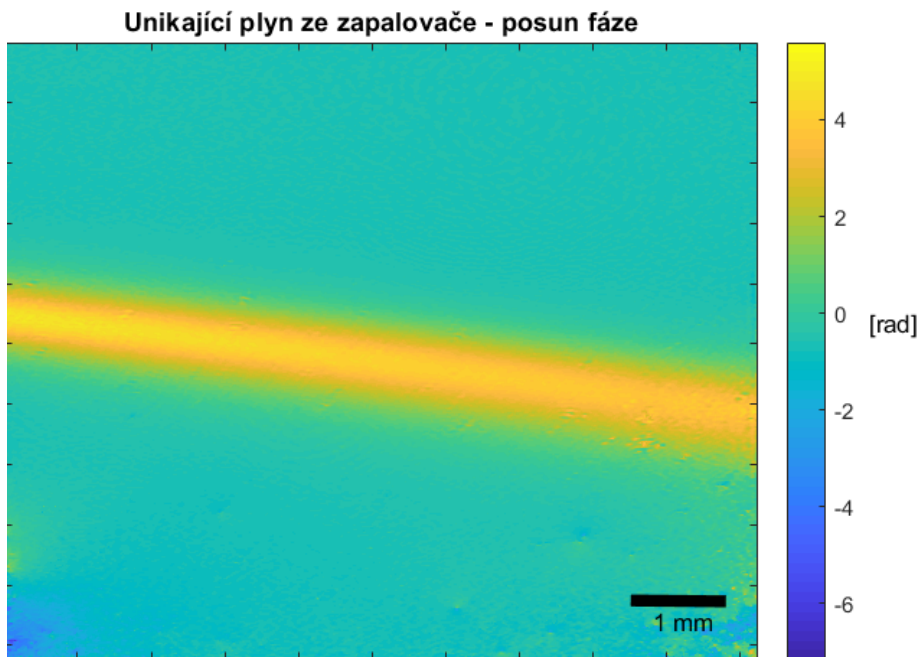
Dále byly v prostředí MATLAB z videa vybrány vhodné snímky a z komplexního pole  $U$  bylo podle rovnice (1.42) vypočítáno fázové pole  $U_{fáz}$  znázorňující unikající plyn viz Obrázek 26.

$$U_{fáz} = atan2 \frac{Im(U)}{Re(U)} \quad (1.42)$$



*Obrázek 26 – Fázové pole způsobené unikajícím plynem ze zapalovače*

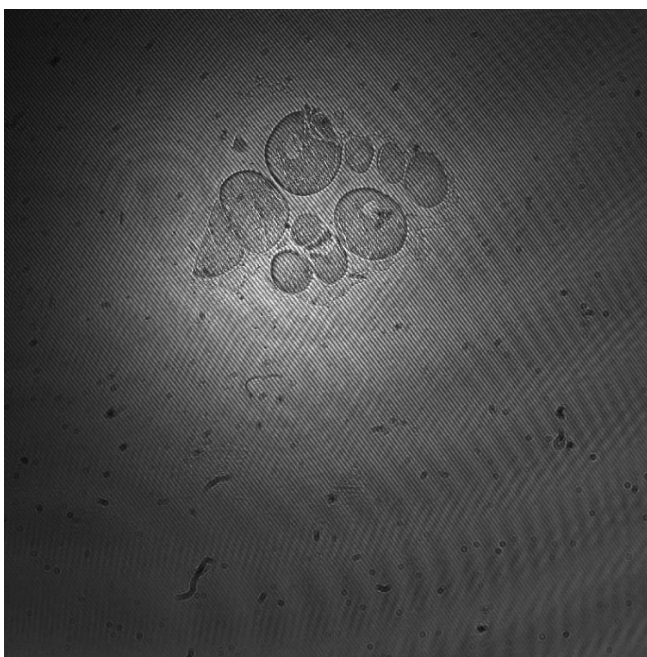
Fázové pole na *Obrázek 26* je zabalené, tj. hodnoty jsou v intervalu  $[-\pi, \pi]$ . To je dané harmonickou povahou světla. Abychom získali hladké pole bez ostrých  $2\pi$  skoků, je potřeba provést rozbalení (demodulaci) fáze. Výsledné rozložení fáze po demodulaci je ukázáno na *Obrázek 27*.



*Obrázek 27 - Plyn unikající ze zapalovače-demodulované fázové pole  
Sloupec vpravo znázorňuje fázi v radiánech a jaké barvě odpovídá*

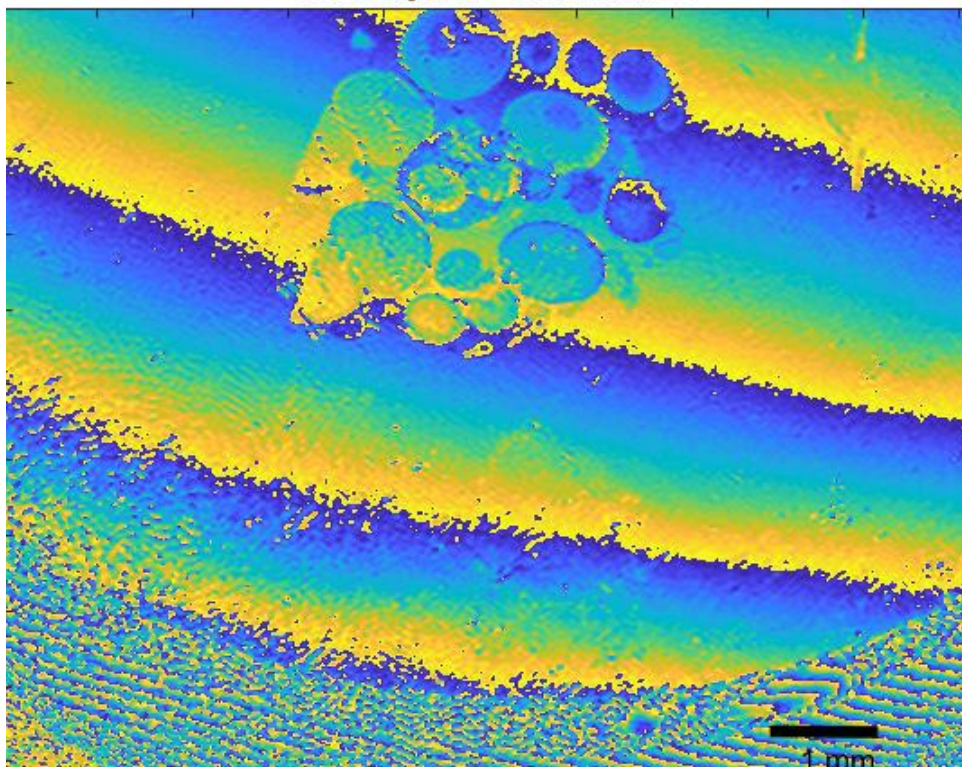
### **5.3 Měření transparentního vzorku – žabí vajíčka**

Dalším měřeným vzorkem byla žabí vajíčka. Cílem tohoto měření je ověřit možnost měření topografie vzorků pomocí interferometrického měření. Obdobně jako při měření unikajícího plynu byl nasnímán hologram viz. Obrázek 28 a následně spočtena a rozbalena fáze vybraného snímku viz. Obrázek 29 a 30.

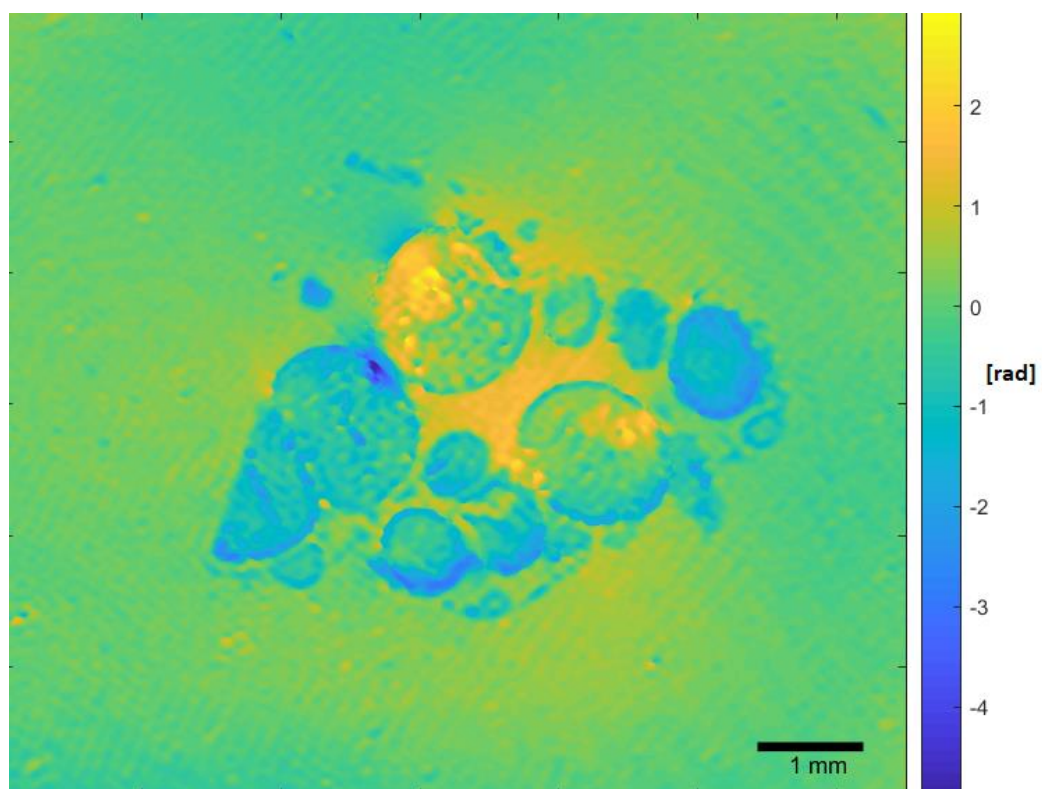


*Obrázek 28 - Žabí vajíčka-stupně šedi-snímek z videa*

### Žabí vajíčka - změna fáze



Obrázek 29 - Žabí vajíčka – fázové pole

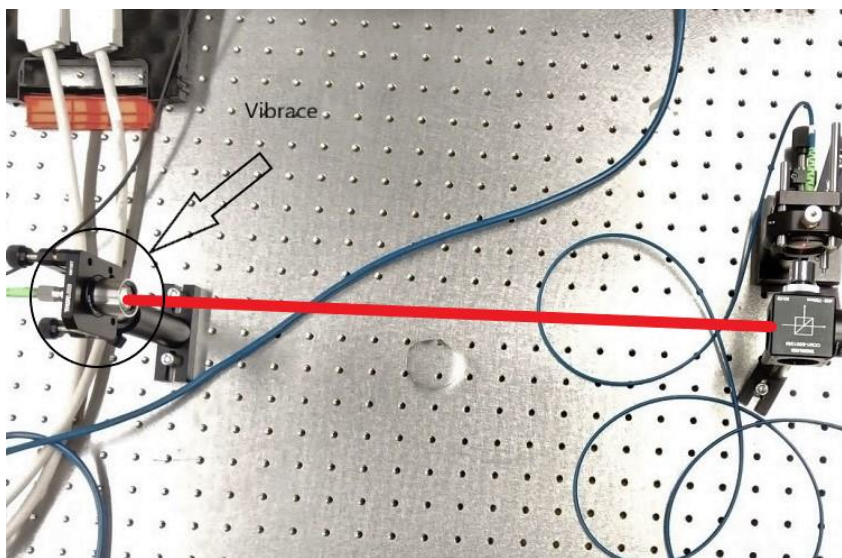


Obrázek 30 - Žabí vajíčka-demodulovaná fáze



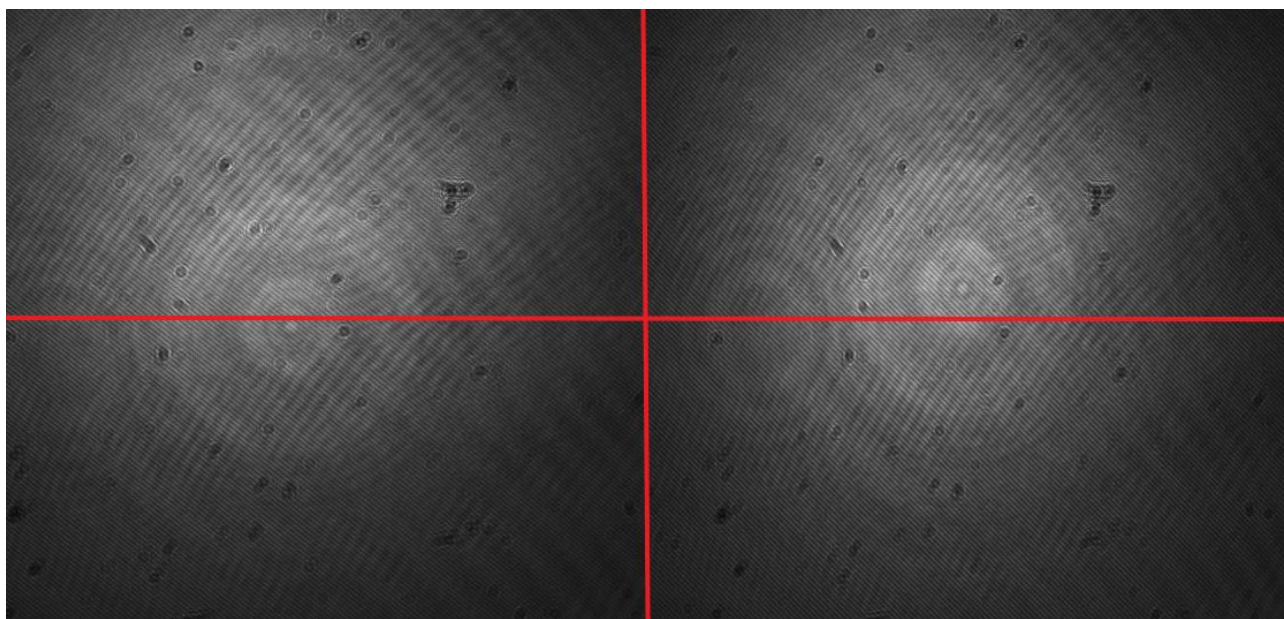
## 5.4 Testování robustnosti metody vůči vibracím

Předpokladem našeho uspořádání holografického interferometru viz. Obrázek 15 bylo, že bude odolné vůči vibracím v oblasti měření mezi zdrojem světla a prvním děličem. Byl proveden pokus, kdy bylo manuálně pohybováno zdrojem světla a testováno, zda bude stále možné pozorovat interferenci viz. Obrázek 30. V případě dvoucestného klasického interferometru dochází v případě vibrací k narušení interferenční struktury, což často vede k úplné ztrátě informace.



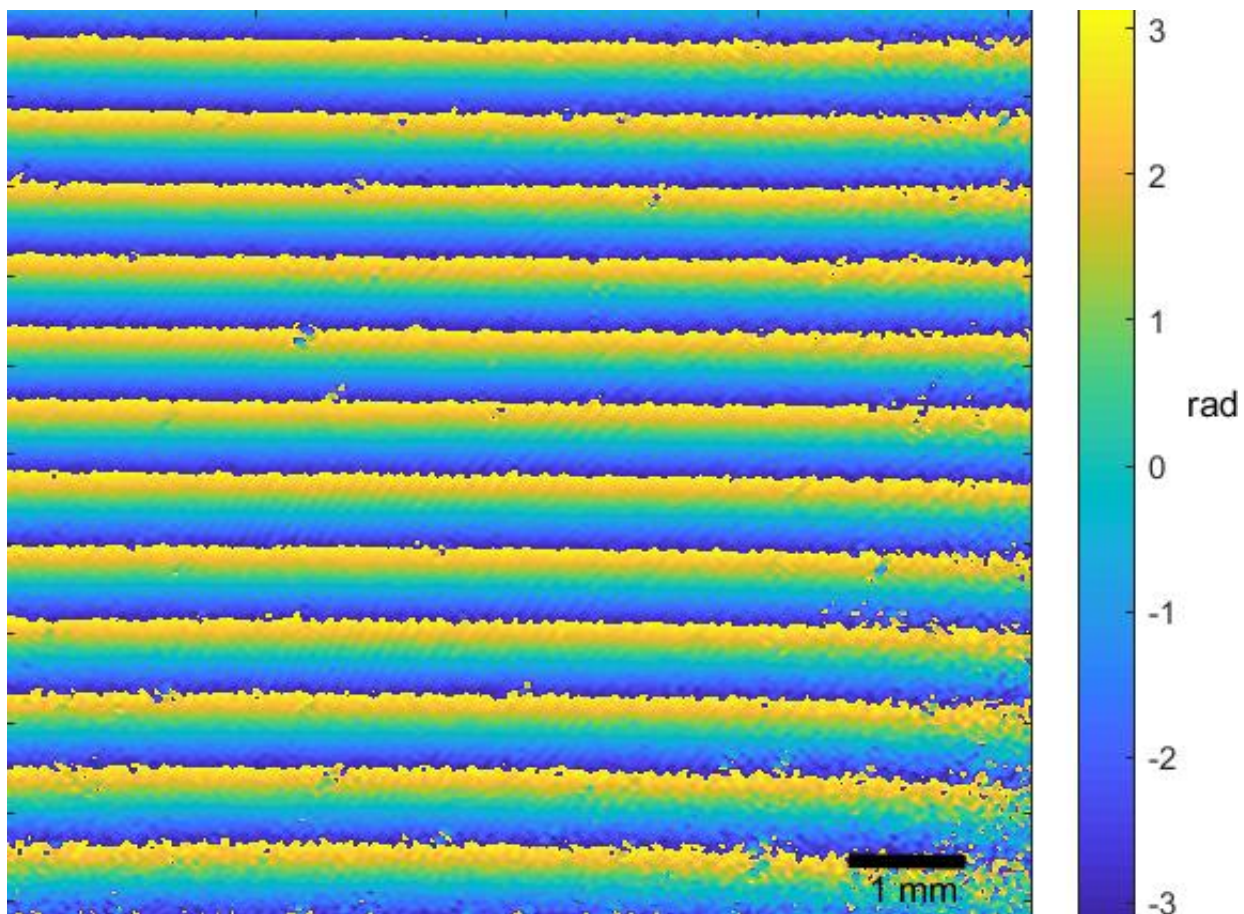
Obrázek 31 - Test robustnosti vůči vibracím

Opět bylo nasnímáno video, ze kterého jsme zjistili, že se interferenční obrazec neztrácí, ale pouze mění svou polohu v zorném poli v závislosti na pohybu zdroje světla viz. Obrázek 31.



Obrázek 32 - Porovnání dvou snímků v jiných časech

Dále bylo testováno, jestli kvůli vibracím nedochází ke ztrátě či zašumění fáze v čase kvůli vnějším efektům v měřicí zóně interferometru. Záznam byl tedy zpracován pomocí Fourierovy transformace jako v předchozích měřeních. Na Obrázek 32 je znázorněno rozložení fáze modulo  $2\pi$ .



Obrázek 33 - Test odolnosti vůči vibracím-změna fáze

Z Obrázek 33 je patrné, že se podařilo fázové pole zrekonstruovat. V měřicí oblasti nebyl žádný objekt. Předpokladem tedy bylo, že proužky nebudou ovlivněny a výsledkem budou pouze rovné proužky. Výsledné fázové pole je tedy v souladu s predikcí.

## Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá jednocestnou digitální holografickou interferometrií. V prvních třech kapitolách práce je uveden teoretický základ týkající se této problematiky. První kapitola se zabývá vlnovým popisem světla, druhá kapitola úvodem do Fourierovské optiky a třetí základy holografie.

Následuje kapitola věnující se návrhu a sestavení experimentálního digitálního holografického interferometru. Koherentním zdrojem světla osvětlujeme transmisivní vzorek. Za vzorkem vlnění putuje do děliče, kde je rozděleno do dvou větví. Jedna větev je pomocí čočky navedena do jádra jednomódového optického vlákna, jehož výstup pak funguje jako nový zdroj vlnění, které tímto způsobem přišlo o informaci o fázovém objektu. Za štěrbinou je vedeno optickým vláknem do dalšího děliče. Druhá větev nesoucí informaci o fázovém objektu je vedena přes neutrální optický filtr přímo do druhého děliče, kde se setká s první referenční vlnou. Optický filtr je zde z důvodu snížení intenzity světla této větve na úroveň referenční větve. Světlo vycházející z optického vlákna má intenzitu mnohonásobně nižší a nedosáhli bychom jinak maximální viditelnosti proužků v digitálním hologramu.

Poslední kapitola se zabývá měřením vzorků a vyhodnocením dat. Měření bylo provedeno na řadě vzorků. V bakalářské práci je uvedeno měření transmisivní destičky s měrkou, plynu unikajícího ze zapalovače a vzorku se žábími vajíčky. U všech vzorků byla provedena rekonstrukce hologramu v prostředí MATLAB. U unikajícího plynu a žábích vajíček byla navíc provedena analýza změny fáze světelného vlnění. V této kapitole se bakalářská práce věnuje také odolnosti vůči vibracím. Předpokladem bylo, že přístroj bude odolný vůči vibracím v oblasti mezi zdrojem světla a prvním děličem. Bylo provedeno měření a tento předpoklad byl potvrzen.

Všechna měření byla provedena na vzorcích o rozměrech v řádu milimetrů. Pokud bychom chtěli měřit vzorky menších rozměrů, bylo by potřeba přístroj upravit na mikroskop. To by mohlo být cílem další práce.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] KREIS, Thomas. Handbook of holographic interferometry: optical and digital methods. Weinheim: WILEY-VCH, 2005. ISBN 978-352-7405-466.
- [2] KIM, Myung K. Digital holographic microscopy: principles, techniques, and applications. New York: Springer, 2011. Springer series in optical sciences, v. 162. ISBN 978-144-1977-939.
- [4] SCHNARS, U, JUEPTNER, W. Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques. Berlin: Springer, 2005. 164 p.
- [5] FEYNMAN, Richard Phillips, Robert B. LEIGHTON a Matthew SANDS. *Feynmanovy přednášky z fyziky 3: revidované vydání s řešenými příklady*. 2. vydání. Přeložil Ivan ŠTOLL. Praha: Fragment, 2013. ISBN 978-80-253-1644-3.
- [6] LÉDL, Vít, Pavel PSOTA, Petr VOJTÍŠEK a Roman DOLEČEK. *Digitální holografická interferometrie*. 1. Liberec: ReproArt Liberec s.r.o, Nová 348/26, Liberec, 2015. ISBN 978-80-906324-0-0.
- [7] FEYNMAN, Richard Phillips, Robert B. LEIGHTON a Matthew SANDS. *Feynmanovy přednášky z fyziky 1: revidované vydání s řešenými příklady*. 2. vydání. Přeložil Ivan ŠTOLL. Praha: Fragment, 2013. ISBN 978-80-253-1642-9.
- [8] FEYNMAN, Richard Phillips, Robert B. LEIGHTON a Matthew SANDS. *Feynmanovy přednášky z fyziky 2: revidované vydání s řešenými příklady*. 2. vydání. Přeložil Ivan ŠTOLL. Praha: Fragment, 2013. ISBN 978-80-253-1643-6.
- [9] MALÝ, Petr. *Optika*. Praha: Karolinum, 2008. ISBN 978-80-246-1342-0.
- [10] SALEH, Bahaa E. A. a Malvin Carl TEICH. *Základy fotoniky: Fundamentals of photonics*. Praha: Matfyzpress, 1996. ISBN 80-85863-01-4.
- [11] JÍNOVÁ, Denisa. *Interferometrie pro určování polohy v 3D*. Liberec, 2015. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.
- [12] FRANCÚZ, Vladimír. *Digitální holografická mikroskopie pro měření topografie reflexních vzorků*. Liberec, 2017. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Doc. RNDr. Miroslav Šulc, Ph.D.
- [13] Light is An Electromagnetic Wave - Light Electromagnetic Wave. *NICEPNG* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.nicepng.com/s/electromagnetic-wave/>
- [14] Young's Double Slit Experiment. *StackExchange* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://physics.stackexchange.com/questions/114926/youngs-double-slit-experiment-what-would-happen-if-the-first-slit-was-too-w>
- [15] Dvojitřbinový experiment. *Aldebaran* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/elmg/kurz.php>

- [16] Methods for achieving polarization. *HyperPhysics* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/polclas.html>
- [17] Huygens' Principle & Wavelets. *Nightlase* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.nightlase.com.au/?pg=resources&t=diffraction>
- [18] Graf Airyho funkce  $2J_1(x)/x$ , Fraunhoferova difrakce na kruhovém otvoru. *Ústav fyzikálního inženýrství, Fakulta strojního inženýrství* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <http://physics.fme.vutbr.cz/~komrska/Difrakce/KapD04.pdf>
- [19] Recording a hologram. *Wikipedia* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Holography#/media/File:Holograph-record.svg>
- [20] Cube-Mounted, Non-Polarizing, 50:50 Beamsplitter Cubes. *THORLABS* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=4129&pn=CCM1-BS015](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=4129&pn=CCM1-BS015)
- [21] UI-3370CP Rev. 2. *IDS* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://en.ids-imaging.com/store/ui-3370cp-rev-2.html>