



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

## **Ústav přístrojové a řídicí techniky**

**Kompenzátor fáze Mach-Zehnderova  
interferometru**

**Phase Compensator for Mach-Zehnder  
interferometer**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2019**

**Martina TVRZICKÁ**

**Studijní program:** B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

**Studijní obor:** 2301R000 Studijní program je bezoborový

**Vedoucí práce:** Ing. Bc. Šárka Němcová, Ph.D.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tvrzická** Jméno: **Martina** Osobní číslo: **465506**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Kompensátor fáze Mach-Zehnderova interferometru**

Název bakalářské práce anglicky:

**Phase Compensator for Mach-Zehnder Interferometer**

Pokyny pro vypracování:

Navrhnout zařízení pro změnu optické dráhy v Mach-Zehnderově interferometru na principu naklánění skleněné destičky. Citlivost nastavení má být desetin vlnové délky He-Ne laseru. Zařízení bude ručně ovládané, rozměry jsou omezené stávající konstrukcí interferometru. Provedte matematickou analýzu optického kompensátoru. Výstupem bude matematický popis optické funkce zařízení, s možností změn parametrů (tloušťka skel, index lomu), návrh mechanické konstrukce a experiment prokazující funkci kompensátoru.

Seznam doporučené literatury:

Václavík, P.: Technická optika II, skripta ČVUT 1984  
moodle stránky předmětu Základy optiky

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Bc. Šárka Němcová, Ph.D., odbor přesné mechaniky FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

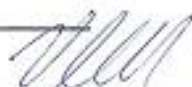
Datum zadání bakalářské práce: **26.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **12.06.2019**

Platnost zadání bakalářské práce:



Ing. Bc. Šárka Němcová, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce



podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkane(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

**26-04-2019**

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Kompenzátor fáze Mach-Zehnderova interferometru“ vypracovala samostatně pod vedením Ing. Bc. Šárky Němcové, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

- V Praze dne

podpis autora

## Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat paní Ing. Bc. Šárce Němcové, Ph.D. za její trpělivost, ochotu, cenné rady a pevné nervy při vedení mé práce. Dále bych chtěla poděkovat mé rodině a blízkým za jejich podporu, kterou mi poskytli během tvorby práce a celého mého studia.

## Anotační list

Jméno autora: Martina TVRZICKÁ

Název BP: Kompenzátor fáze Mach-Zehnderova

Anglický název: Phase Compensator for Mach-Zehnder interferometer

Rok zpracování: 2019

Studijní program: B2342 Teoretický základ strojního inženýrství

Obor studia: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Ústav: Ústav přístrojové a řídicí techniky

Vedoucí práce: Ing. Bc. Šárka Němcová, Ph.D.

Oponent: Doc. Ing. Jan Hošek, Ph.D.

Bibliografické údaje: Počet stran: 54  
Počet obrázků: 31  
Počet tabulek: 3  
Počet příloh: 7

Klíčová slova: interference, interferenční obrazec, Mach-Zehnderův interferometr, změna optické dráhy

Key words: interference, interference pattern, Mach-zehnder interferometer, optical path change

Abstrakt: Tato bakalářská práce obsahuje návrh a konstrukci zařízení na změnu optické dráhy Mach-Zehnderova interferometru. První část práce se zaměřuje na rešerši, která zahrnuje základní pojmy týkající se praktické části. V druhé části je popsáno seřízení Mach-Zehnderova interferometru, sestavení konstrukce zařízení na změnu optické dráhy, ověření výpočtů v praxi a experiment na funkci kompenzátoru.

Abstrakt: This thesis contains a design and construction of a device for changing of Mach-Zehnder interferometer's optical path. The first part focuses on searches that includes basic concepts that relate to the practical part. In the second part there is a description of the adjustment of the Mach-Zehnder interferometer, the assembly of the optical path change construction, verification of calculation in practice and the experiment for the function of the compensator.

## Obsah

<b>1. Úvod .....</b>	<b>8</b>
<b>2. Světlo.....</b>	<b>9</b>
2.1 Interference světla .....	10
<b>3. Interferometry .....</b>	<b>11</b>
3.1 Interferenční komparátory.....	11
3.2 Interferenční refraktometry.....	12
3.3 Interferenční spektroskopy .....	13
<b>4. Mach-Zehnderův interferometr .....</b>	<b>16</b>
4.1 Vznik inverzních interferenčních obrazců .....	17
<b>5. Praktická část .....</b>	<b>20</b>
5.1 Sestavení Mach-Zehnderova interferometru.....	20
5.2 Kompenzátor fáze .....	25
5.3 Experiment – ověření funkčnosti kompenzátoru.....	42
<b>6. Závěr.....</b>	<b>46</b>
<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>47</b>
<b>Seznam použitých znaků .....</b>	<b>49</b>
<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>50</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>50</b>
<b>Seznam příloh.....</b>	<b>51</b>

# 1. Úvod

První interferometr byl sestaven v 19. století a své první využití měl při slavném experimentu o podání důkazu existence éteru. Ve vědě interferometry sloužily ke zlepšení rozlišení hvězdářských dalekohledů a v průmyslu k určování koncentrace plynů v dolech. V dnešní době mají velké využití ve farmacii, v lékařství, v automobilovém a stavebním průmyslu, v optice a mnoha dalších odvětvích vědy a techniky.

Cílem bakalářské práce je navržení a sestavení zařízení, které umožní změnu optické dráhy v Mach-Zehnderově interferometru v rozsahu jednotek vlnové délky a experiment potvrzující funkci kompenzátoru.

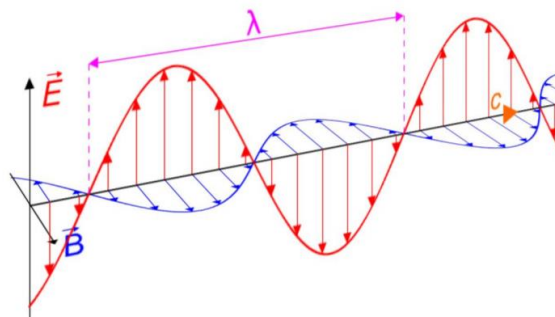
První část práce obsahuje seznámení s interferometry. Popisuje jejich funkci, rozdělení a využití. Blíže popisuje Mach-Zehnderův interferometr, především princip jeho funkce a matematický popis děje.

Druhá část práce se zabývá seřízením Mach-Zehnderova interferometru a sestavením zařízení na změnu optické dráhy. Zahrnuje veškeré výpočty a teoretické úvahy zařízení a praktické ověření teorie.



## 2. Světlo

Už od pradávna lidé zkoumali optické a další jevy, které souvisí se světlem. Samotnou podstatu světla však začali zkoumat mnohem později. V 17. století se vyvinuly dvě teorie o povaze světla. Jedna tvrdí, že světlo je tok částic, podle druhé se světlo podélně vlní. Až o mnoho let později se prokázalo, že obě teorie mají pravdu. Světlo se chová současně jako vlna i jako částice. Dnes víme, že světlo má duální povahu. Světlo je elektromagnetické vlnění a zároveň se projevuje jako tok fotonů. [1]



Obr. 1: Světlo – elektromagnetické vlnění [2]

Světlo, jakožto příčné elektromagnetické vlnění, nepotřebuje ke svému šíření žádné látkové prostředí (tzn. šíří se i ve vakuu). Ve vakuu se světlo šíří nejrychleji a tato rychlost ( $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) je maximální možná rychlost, kterou se fyzikální objekt může pohybovat. V jiném prostředí (tzv. látkovém prostředí) se záření pohybuje pomaleji. Poměr rychlosti záření ve vakuu a rychlosti v daném prostředí se nazývá index lomu  $n$

$$n = \frac{c}{v}. \quad (2.1)$$

Podle rychlosti a frekvence se určí vlnová délka záření

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (2.2)$$

kde  $v$  je rychlost záření v daném prostředí a  $f$  je frekvence záření. Pouhým okem jsme schopni vnímat jen určitou oblast vlnových délek záření. Tento vjem (vidění) vyvolává elektromagnetické vlnění o vlnové délce 390 nm až 790 nm. Světlo s různou frekvencí v oku vyvolá vjem charakterizovaný jako barva světla. [3]

V optickém (látkovém) prostředí o indexu lomu  $n$  je však vlnová délka světla  $n$ -krát menší než ve vakuu. Urazí-li světlo v optickém prostředí dráhu  $s$ , ve vakuu jí odpovídá dráha  $l = n \cdot s$ , která se nazývá optická dráha. Optická dráha je taková vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu za stejný čas, za který ho urazí v daném látkovém prostředí. [4]

## 2.1 Interference světla

Pokud alespoň dvě elektromagnetická vlnění, která vycházejí z různých zdrojů, přicházejí do určitého bodu, dochází v daném místě k vzájemnému skládání vln a v okolí tohoto bodu k zesilování či zeslabování intenzity světla. Výsledkem tohoto jevu je interferenční obrazec, na kterém je možno vidět zesílení a zeslabení světla v podobě světlých a tmavých proužků (konstruktivní a destruktivní interference). Tento fyzikální jev se nazývá interference světla. [5] [6]

Aby však k interferenci mohlo dojít, musí být dané světlo koherentní. Koherentní jsou ta světelná vlnění, která mají stejnou frekvenci a jejich fázový rozdíl v uvažovaném bodě se s časem nemění. Fáze jednotlivých vlnění se mohou s časem měnit, ale tak, aby jejich rozdíl zůstal stejný. Pokud by se fázový rozdíl v čase měnil a ke změnám by docházelo příliš rychle, nebylo by možné interferenci pozorovat pouhým okem a nedalo by se rozhodnout, zda k interferenci vůbec dochází. [7]

### 3. Interferometry

Interferometr je velmi přesný optický přístroj, který je využíván v mnoha oblastech vědy a techniky. Svůj název nese podle jevu, při kterém dochází ke sloučení dvou a více zdrojů světla, které poté vytvoří interferenční obrazec. Interferometry se používají k měření délek, úhlů, vlnových délek světla, k určení jemné struktury spektrálních čar a indexu lomu látek a mnoha dalších optických a fyzikálních vlastností. [6]

Základní princip interferometrů je ve zjištění fázového posunu (rozdíl fází) dvou koherentních svazků. Interferometr rozdělí světelný svazek vycházející z jednoho zdroje do dvou větví, měřicí a referenční. V měřicí větvi se nachází měřený vzorek, který vyvolá změnu optické dráhy. Tato změna se projeví po následném sloučení svazků z obou větví na interferenčním obrazci. Z velikosti změny optické dráhy lze poté určit velikost měřené veličiny na vzorku. [8]

Dnes existuje velká škála interferometrů, která je rozdělena do tří skupin podle využití. Rozdělují se na interferenční komparátory, interferenční refraktometry a interferenční spektroskopy. Každý z interferometrů má odlišný princip činnosti. Jejich společnou částí je využívání interference světla. [9]

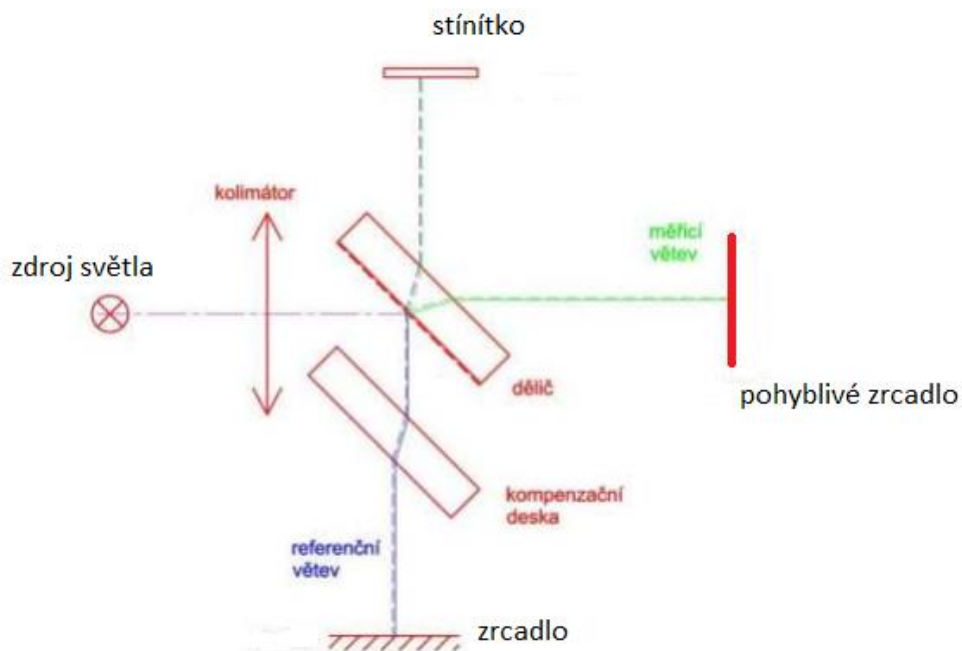
#### 3.1 Interferenční komparátory

Interferenční komparátory jsou přístroje, které slouží k měření délek. Nejznámější a pro mnoho měření nejvhodnější je interferometr Michelsonův. Dalšími významnými zástupci jsou interferometr Machův-Zehnderův a Sagnacův interferometr. [9]

Michelsonův interferometr je často označován jako základní interferometr. Byl sestaven v 19. století vědcem Albertem Abrahamem Michelsonem. První návrh sloužil ke studování éteru. V dnešní době je to široce používaný přístroj k měření vlnové délky světla, k měření délek, k topografickým měřením a k měření deformací a posuvů. [8]

Svazek světla putující ze zdroje dopadne na planoparalelní skleněnou desku (nebo lze použít dělič), která svazek rozdělí na dvě části s přibližně stejnou intenzitou. Jeden svazek prochází skrz desku, druhý je odražen pod úhlem  $90^\circ$ .

Svazek proší planparalelní deskou dál putuje k zrcadlu, od kterého je odražen zpět k desce po stejné dráze, od desky se odrazí a směřuje ke stínítku. Odražený svazek směrem k zrcadlu prochází druhou kompenzační deskou, která pouze kompenzuje vliv planparalelní desky (vyrovnání dráhy ve skle). Od zrcadla se též odrazí a putuje zpět po stejné dráze skrz planparalelní desku až k stínítku. Na stínítku se svazky spojí a interferují. Posouváme-li pohyblivým zrcadlem, interferenční obrazec se změní. Této změny se využívá k měření délek a vlnových délek. [6] [9]



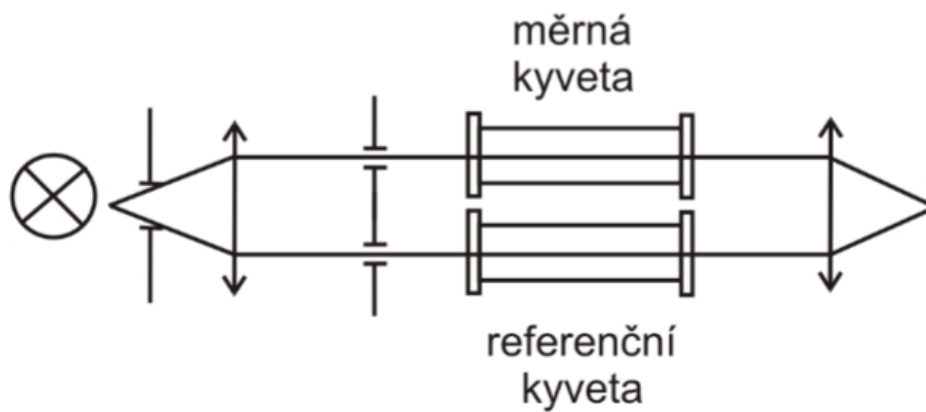
Obr. 2: Schéma – Michelsonův interferometr [8]

### 3.2 Interferenční refraktometry

Interferenční refraktometry jsou interferometry, jejichž účelem je stanovit relativní změny světelné rychlosti a tímto způsobem určit indexy lomu plyných, nebo kapalných látek. Neurčuje se však přímo index lomu zkoumané látky, ale rozdíl indexů lomu mezi dvěma prostředími, prostředí se známým indexem lomu a zjišťovaným prostředím (zkoumaná látka). Pro porovnání se využívá difrakce a interference světla na úzké štěrbině. [9] [10]

Do ohniska kolimátorové čočky je umístěn světelný zdroj, ze kterého vychází světlo s vlnovou délkou  $\lambda$ . Za čočkou je postavena destička se dvěma štěrbinami, díky níž dojde k rozdělení světla na dva rovnoběžné světelné paprsky, které následně procházejí dvěma trubicemi. V jedné trubici je zkoumaná látka, v druhé látka se známým indexem lomu. Za trubicemi se nachází další spojná čočka, v jejímž ohnisku vzniká interference. [8] [10]

Hlavními zástupci interferenčních refraktometrů jsou Jaminův, Rožděstvenského - Machův a Rayleighův interferometr.



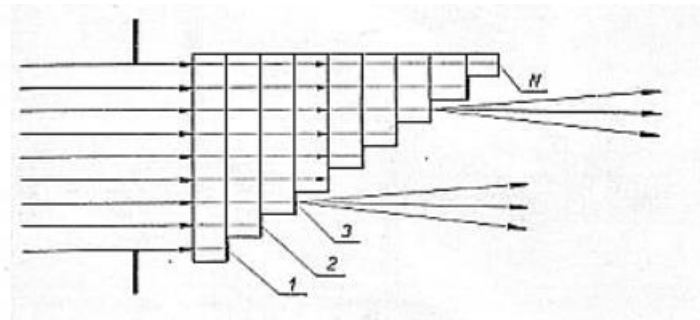
Obr. 3: Schéma – Rayleighův interferometr [8]

### 3.3 Interferenční spektroskopy

Pomocí interferenčních spektroskopů se určují jemné struktury spektrálních čar. Mezi nejvýznamnější zástupce interferenčních spektroskopů patří Michelsonova stupňová mřížka, Fabryův-Perotův interferometr a Lummerova-Gehrecheova deska.

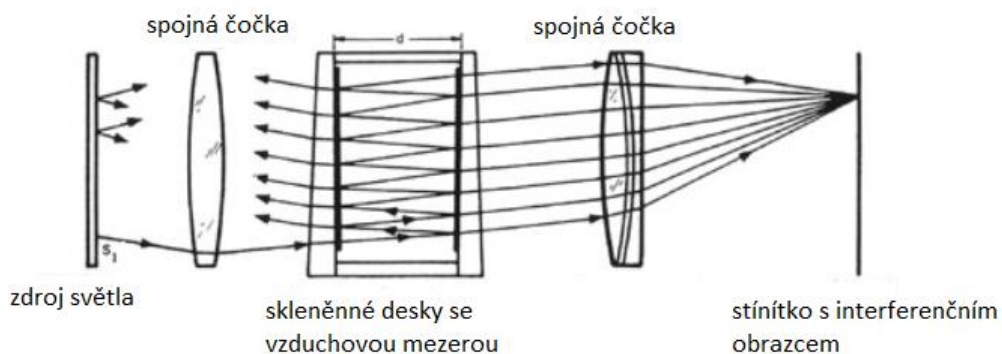
Michelsonova stupňová mřížka je spektroskop složený z řady planparalelních destiček o přesně stejné tloušťce. Destičky jsou vyrobeny z průhledného materiálu o určitém indexu lomu  $n$  a jsou vůči sobě rovnoběžné. Uspořádány jsou do tvaru schodů o stejné šířce a jsou spojeny optickým kontaktem. Princip činnosti spočívá v průchodu světla těmito schůdky. Rovnoběžný svazek paprsků, který vychází ze zdroje světla, dopadá kolmo na vstupní plochu interferometru. Každý stupeň, kterým projde světelný svazek, se stává novým

zdrojem záření. Vzniklé světelné svazky, které vycházejí z přístroje, spolu vzájemně interferují a vytváří interferenční obrazec. [5] [9]



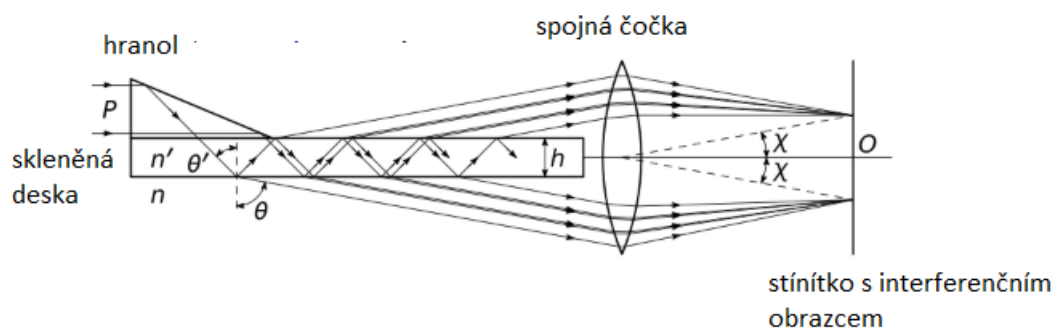
Obr. 4: Schéma – Michelsonova stupňová mřížka [9]

Fabryův-Perotův interferometr se skládá ze dvou rovnoběžných skleněných desek, které jsou umístěny přímo naproti sobě, a jejich vzdálenost je přesně nastavitelná (obvykle se volí 3-10 mm). Vnitřní strana desek je slabě postříbřená, tudíž jsou desky polopropustné. Mezi deskami je tenká vzduchová mezera. Princip funkce je založen na šíření světelného svazku, který prochází první skleněnou deskou do vzduchové mezery a dopadá na druhou desku. Při dopadu se světelný svazek rozdělí na dvě části, první část se odráží od druhé desky a druhá část touto deskou prochází. Odražená část svazku putuje k první desce, na jejímž povrchu se opět odráží a směřuje k druhé desce. Poté se proces znovu opakuje. Za druhou skleněnou deskou se nachází spojná čočka, pomocí které lze vystupující koherentní svazky přivést k interferenci, kterou je možné sledovat na stínítku. Díky vysoké citlivosti má velké uplatnění zejména v astronomii u spektroskopu. [5] [6] [9] [11]



Obr. 5: Schéma – Fabryův-Perotův interferometr [12]

Princip činnosti Lummerovy-Gehrecheovy desky je velmi podobný činnosti Fabryově-Perotově interferometru. Hlavní rozdíl je v tom, že místo vzduchové mezery se zde nachází mezera z průhledného materiálu. Lummerova-Gehrecheova deska se skládá z dlouhé desky ze skla nebo křemene, jejíž plochy jsou vyleštěny a deska je polopropustná. Zdroj světla vstupuje do desky pomocí hranolu, který je přitmělen na jeden její konec. Úhel  $\alpha$  (vrchol hranolu) se volí tak, aby svazek světla dopadal na rovinnou stěnu desky pod úhlem  $\theta'$ , velmi blízkým k meznímu úhlu dopadu, to je pod úhlem, který splňuje podmínku  $\sin \theta' = \frac{1}{n}$ , kde  $n$  je index lomu desky. Část svazku se odrazí, část vystupuje z desky pod úhlem  $\theta$  blízkým  $90^\circ$ . Ve směru podélné osy desky lze sledovat vystupující svazky světla, které tvoří po obou stranách řadu rovnoběžných interferenčních proužků. K vytvoření interferenčního obrazce je možno použít spojnou čočku jako u Fabryova-Perotova interferometru. Dříve se velmi využíval ve spektroskopii, dnes se používá zřídka. Z velké části byl nahrazen Fabryově-Perotově interferometrem používajícím modernější dielektrické reflexní povlaky. [5] [9] [13]

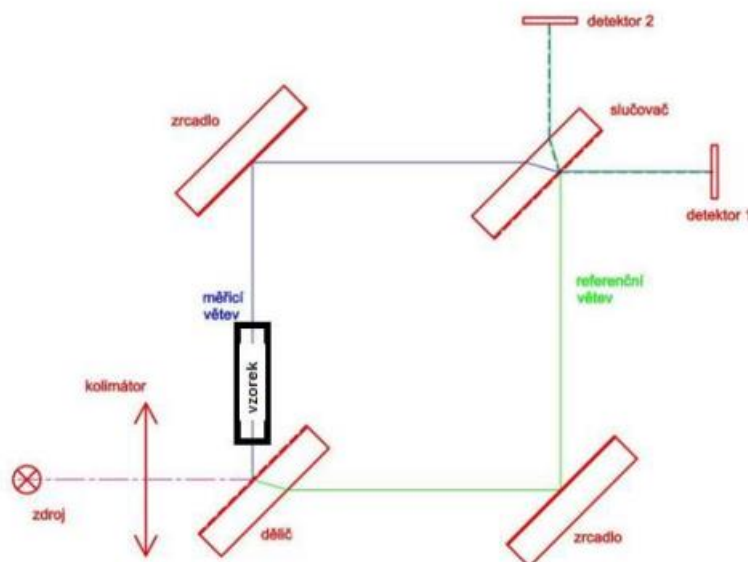


Obr. 6: Schéma – Lummerova – Gehrecheova deska [13]

## 4. Mach-Zehnderův interferometr

Mach-Zehnderův interferometr, též nazývaný „dvoucestný interferometr“, byl vyvinut v letech 1891-1892 významnými fyziky Ludwigem Machem a Ludwigem Zehnderem. První využití interferometrů bylo v polovině 19. století a sloužily k určení koncentrace plynu v dolech. Postupem času se interferometry začaly využívat k určení relativního fázového posunutí, délky svých ramen, indexu lomu a dalších veličin. V dnešní době se převážně používá ke zviditelnění a měření proudění plynů kolem modelů v aerodynamickém tunelu. [5] [6] [8]

Mach-Zehnderův interferometr se sice řadí do skupiny interferenčních komparátorů, poněvadž s ním lze měřit vzdálenost, ale může se řadit i mezi interferenční refraktometry, jelikož s tímto interferometrem je možné určit i index lomu kapalin a plynů. Svým principem činnosti se podobá Michelsonovu interferometru. Využívá rozdělení světelného paprsku do dvou ramen, referenční a měřící rameno, ve kterých se nachází měřené prvky. Oproti Michelsonově interferometru je ale stabilnější díky rovnoběžnému chodu svazků v obou ramenech. Výhodou Mach-Zehnderova interferometru je značná variabilita. Protože vzniklá ramena na sobě nejsou závislá, můžeme do jednoho z ramen různými způsoby zavádět změnu optické dráhy. [5] [8] [14]



Obr. 7: Schéma – Mach-Zehnderův interferometr [8]



Mach-Zehnderův interferometr je složen ze dvou odrazných a dvou polopropustných zrcadel (děliče svazku). Světelný svazek se šíří ze zdroje, dokud nenarazí na první polopropustné zrcadlo, kde se rozdělí do dvou větví. První část rozděleného svazku projde děličem, putuje až k odrazovému zrcadlu a odrazí se do druhého polopropustného zrcadla (tzv. slučovač). Ve druhé větvi prochází rozdělený svazek stejně, s tím rozdílem, že se od děliče odrazí. V této větvi dochází ke zpoždění vlivem vloženého měřeného vzorku, který ovlivňuje optickou dráhu dané větve, a vzniká fázový posun.

Ve druhém polopropustném zrcadle se rozdělené paprsky opět spojí a interferují. Vlivem změny fáze lze pozorovat závislost výstupní intenzity na zavedeném fázovém posunu. Vznikají dva interferenční obrazce, které jsou k sobě inverzní. [5] [6] [8]



*Obr. 8: Interferenční obrazce k sobě inverzní*

#### 4.1 Vznik inverzních interferenčních obrazců

Ze slučovače Mach-Zehnderova interferometru vycházejí dva světelné svazky, které v detektorech (nebo na stínítkách) vytvářejí interferenční obrazce. Každý interferenční obrazce se skládají z obou rozdělených větví. Rozdíl je však v tom, že svazky z obou větví procházejí odlišnou dráhou oproti druhému detektoru. [8]

V děliči (i v slučovači) se nachází částečně odrazivá kovová vrstva, která při dopadu světelného svazku část světla odráží a část propouští. Při odrazu na opticky hustším prostředí (sklo) se mění fáze  $\varphi$  odraženého světla o  $\pi$  (dráhový posun  $\Delta = \lambda/2$ ). Ve skle prochází světlo pomaleji než vzduchem, čímž také vzniká fázový (tedy

i dráhový) posun, který je závislý na tloušťce  $t$  a na indexu lomu  $n$  skla ( $\Delta = n \cdot t$ ). Při odrazu na opticky řidším prostředí a při lomu světla k fázovému posunu nedochází. [8]

Detektor 1:

Referenční větev: svazek nejdříve projde děličem, poté se odrazí od zrcadla a následně i od slučovače a míří do detektoru 1

Měřicí větev: svazek se od děliče odrazí, odraz nastane i u zrcadla a po průchodu slučovačem míří do detektoru 1

Referenční větev:

Měřicí větev:

Průchod děličem	$\sigma_1 = n \cdot t$		Odraz na děliči	$\Delta_1 = \lambda/2$
Odraz na zrcadle	$\sigma_2 = \lambda/2$		Odraz na zrcadle	$\Delta_2 = \lambda/2$
Odraz na slučovači	$\sigma_3 = \lambda/2$		Průchod slučovačem	$\Delta_3 = n \cdot t$

Dráhový rozdíl interferujících svazků na detektoru 1

$$\Delta L_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 - (\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3) = 0$$

se rovná 0 a dochází ke konstruktivní interferenci, objeví se světlý proužek.

Detektor 2:

Referenční větev: svazek prochází děličem, odráží se od zrcadla, prochází slučovačem a míří do detektoru 2

Měřicí větev: svazek se odráží od děliče a od zrcadla a cestou k detektoru 2 prochází dvakrát slučovačem

Referenční větev:

Měřicí větev:

Průchod děličem	$\sigma_1 = n \cdot t$		Odraz na děliči	$\Delta_1 = \lambda/2$
Odraz na zrcadle	$\sigma_2 = \lambda/2$		Odraz na zrcadle	$\Delta_2 = \lambda/2$
Průchod slučovačem	$\sigma_3 = n \cdot t$		Průchod slučovačem	$\Delta_3 = 2 \cdot n \cdot t$

Dráhový rozdíl interferujících svazků na detektoru 2

$$\Delta L_2 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 - (\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3) = \lambda/2$$

se rovná  $\lambda/2$  a vzniká destruktivní interference, objeví se tmavý proužek.

Dráhové rozdíly detektorů se liší. Rozdíl dráhových rozdílů obou detektorů

$$\Delta = \Delta L_2 - \Delta L_1 = \lambda/2$$

se rovná  $\lambda/2$  a to se rovná fázovému posunu  $\varphi = \pi$ . Z tohoto důvodu vznikají interferenční obrazce, které jsou k sobě inverzní.

## 5. Praktická část

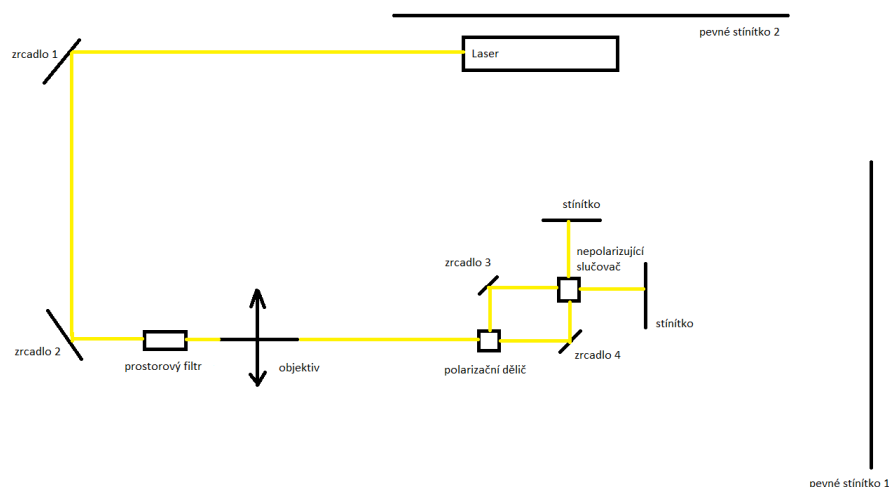
Cílem praktické části je sestavení Mach-Zehnderova interferometru se zařízením na změnu optické dráhy. Celý interferometr má sloužit jako zařízení, které dokáže zobrazit či přímo změřit pnutí ve skle.

Homogenní sklo bez vnitřního pnutí je opticky izotropní látka, která má ve všech směrech stejné optické vlastnosti. Po vyvolání pnutí se sklo stává opticky anizotropním (nestejnorodým). Důsledkem anizotropie je vznik tzv. dvojlomu. To zapříčiní, že se dopadající svazek na sklo rozdělí na dva paprsky, řádný a mimořádný, které jsou k sobě kolmo polarizované. Od pnutí vznikají v skle v různých směrech různé indexy lomu. Každý paprsek prochází sklem po jiné dráze, jinou rychlostí a pro každý platí jiný index lomu. Po průchodu pnutým sklem je mezi řádným a mimořádným paprskem dráhový rozdíl. [15] [16]

Pomocí interferometru zobrazíme vzniklé pnutí, které se projeví deformací proužků interferenčního obrazce. Kompenzátozem fáze budeme následně měřit rozdíl optických drah vytvořených svazků od tohoto pnutí. První dělič, který je polarizační, jednu polarizaci propouští a druhou odráží. Tím dojde k rozdělení řádného a mimořádného paprsku do dvou větví Mach-Zehnderova interferometru. Na výstupu z interferometru pak můžeme určit jejich dráhový rozdíl.

### 5.1 Sestavení Mach-Zehnderova interferometru

Mach-Zehnderův interferometr je sestaven podle následujícího schématu. (Obr. 9)



Obr. 9: Schéma – sestavení Mach-Zehnderova interferometru

Skládá se ze dvou odrazných zrcadel, prostorového filtru, objektivu, polarizačního děliče, dvou zrcátek, nepolarizujícího děliče (slučovač) a stínítek. Zdroj svazku je He-Ne (helium-neon) laser. Odrazná zrcadla používáme kvůli delší trase svazku od laseru k děliči. Konstrukce interferometru je omezena vybavením v laboratoři. Celý interferometr přizpůsobujeme poloze laseru, se kterým nemanipulujeme, na seřizovacím stole. Aby zařízení dobře fungovalo, musí se každá součást správně nastavit. Seřízení výšky součástí se odvíjí od laseru, jelikož se nachází v jedné neměnné poloze. Proto v seřizení toto nastavení dále nezohledňují. Každá součást se nejdříve nastaví na správnou výšku a poté se doladuje ke své funkci.

Seřízení:

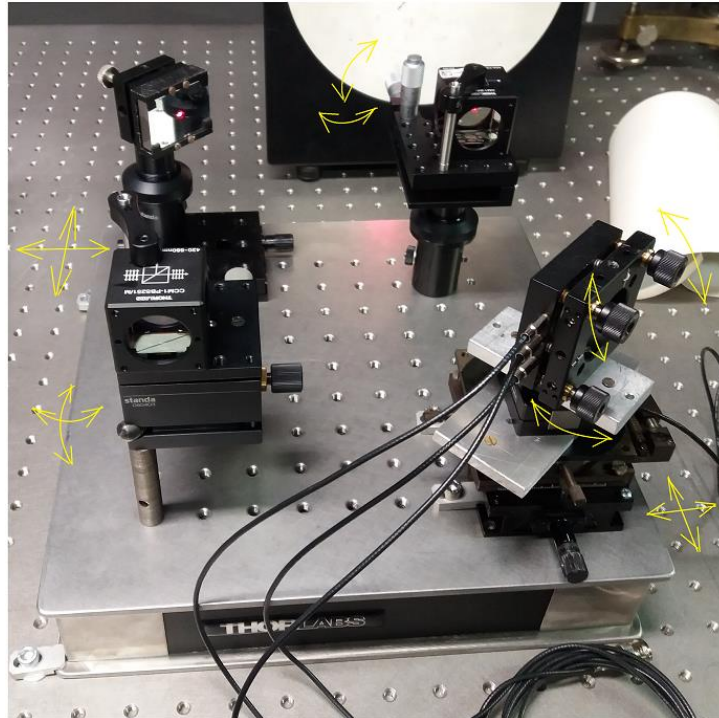
1. Zapnutí laseru
2. Zrcadla (1 a 2) – zrcadlo 1 se pootočí od laseru o  $45^\circ$ , aby se paprsek laseru odrazil kolmo. Druhé zrcadlo se také otočí o  $45^\circ$ , ale v opačném směru. Pro přesnost se použije „ruční“ stínítko (není součástí zařízení, jen pomocné), které postavíme hned za zrcadlo 2 ve směru chodu svazku a vyznačíme na něm značkou polohu paprsku. Stínítko poté přesuneme na druhý konec stolu (stále ve směru chodu svazku) a nastavujeme zrcátka tak, aby byl na stínítku nový bod od svazku ve stejné výšce jako vyznačená značka.

I když po zrcadlech jde laser do prostorového filtru a objektivu, nejdříve se seřídí hlavní součásti interferometru – dělič, zrcátka a slučovač. Všechny součásti jsou vybaveny speciálními stolečky, které umožňují rotační anebo naklápěcí pohyby.

3. Polarizační dělič – v první fázi se dělič musí nastavit tak, aby rozdělil svazek do směrů, do kterých potřebujeme. Dělič rozdělí svazek do dvou ramen (část svazku děličem prochází a část se od děliče odrazí kolmo), která na pevných stínítkách (nejsou součástí zařízení, jsou pouze pomocná, v tomto výzkumu jako pevné stínítko slouží zdi) vytvoří každý jeden bod. Natáčením a naklápěním stoleček se nastaví vodorovný chod svazku (pomocí „ručního“ zrcátka, který postavíme za dělič ve směru prošlého svazku, hledáme zpětný

- odraz svazku, který pomocí naklápění a natáčení děliče dostaneme přes zrcátka 1 a 2 zpátky do laseru). Poté se na zdech označí vzniklé dva body.
4. Zrcátko 3 – zrcátko se pootočí o  $45^\circ$  (jak je znázorněno ve schématu). Na pevném stínítku 1 vznikne druhý bod (první je od děliče). Pomocí měřítka (dlouhé pravítko či měřítka na papíře) se v blízké vzdálenosti od děliče odměří vzdálenost svazků procházející děličem a odraženého od zrcátka 3. Tato vzdálenost a správná výška se nastaví i mezi body na pevném stínítku naklápěním a posouváním zrcátka 3.
  5. Nepolarizující slučovač – upevní se do takové polohy, aby mohl přijímat a slučovat vzniklé dva svazky paprsku. Poté se za pomoci naklápění a rotace nastaví vodorovný chod paprsku (opět musí zpětně odražený svazek doputovat zpátky do laseru).
  6. Zrcátko 4 – v tomto zrcátku se musí v jednom bodě sejít dva paprsky, první od průchodu děličem a druhý od zpětného odrazu od slučovače. Na pevném stínítku 2 vznikne druhý bod (první je od děliče). I zde se pomocí měřítka v blízké vzdálenosti od děliče odměří vzdálenost svazků odražený děličem a odraženého od zrcátka 4. Tato vzdálenost a správná výška se nastaví i mezi body na pevném stínítku naklápěním a rotací zrcátka 4. Pomocí posuvů posouváme zrcátko tak, aby se svazky z obou ramen sešly uprostřed zrcátka i slučovače.

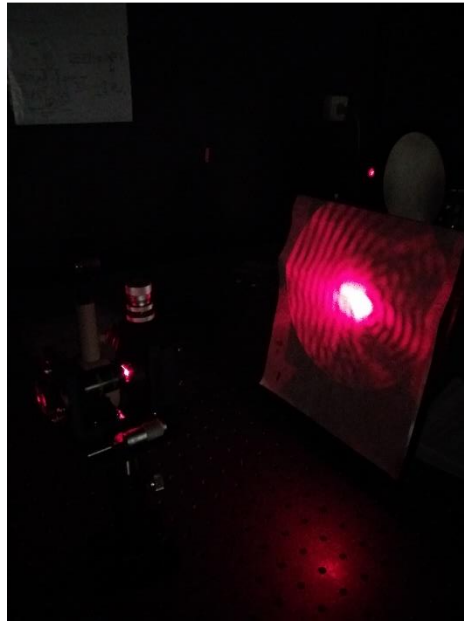
Celý interferometr je sestaven na speciální desce, která umožňuje hýbat se všemi součástmi najednou. Tudíž pokud jsou součásti nastaveny správně vůči sobě, stačí pro seřízení desky do správné polohy použít zpětné odrazy od polarizačního děliče a nemusí se přestavovat každá součást zvlášť.



Obr. 10: Seřízení děliče, slučovače a odrazných zrcátek na desce s justážními pohyby

Mezi polarizační dělič a zrcátko 4 je vložena půlvlnná destička, která mění směr polarizace světla. Půlvlnná destička vytváří fázové zpoždění  $\varphi = \pi$  a mění směr polarizace lineárně polarizovaného svazku. Půlvlnnou destičku využíváme z toho důvodu, abychom v obou větvích měly svazky stejné polarizace.

7. Prostorový filtr – prostorový filtr se skládá z mikroskopového objektivu a dírkové clonky. Mikroskopový objektiv soustřeďuje svazek do svého ohniska, kde se nachází dírková clonka s průměrem dírky 0,03 milimetry. Clonka zastupuje funkci filtru, tzn. svazky, které byly odkloněny ohybem nebo optickými vadami, jsou filtrovány (neprojdou clonkou). Mikroskopový objektiv se clonkou seřídíme pomocí „ručního“ zrcátka, které přiložíme před objektiv tak, aby se vytvořil zpětný odraz procházející skrz objektiv zpátky do laseru přes zrcátka 1 a 2. Poté se seřídí správná poloha clonky vůči objektivu. Před clonku místo „ručního“ zrcátka postavíme „ruční“ stínítko a clonku posuneme do krajní polohy. Na stínítku se objeví obrazec, podle kterého poznáme, že je clonka defokusevaná a decentrovaná.

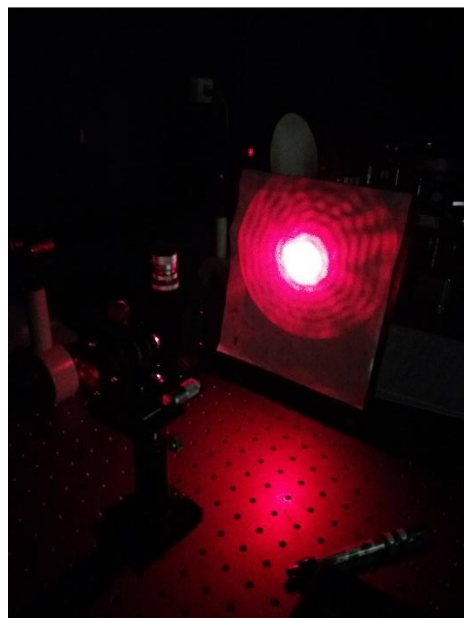


*Obr. 11: Defokusace a decentrace clonky*

Defokusace – kružnice kolem zářivého středu jsou matné a nepravidelné

Decentrace – protáhlý tvar kružnic

Posouváním clonky ve svislém směru docílíme její centrace. Tu poznáme opět podle obrazu na stínítku.



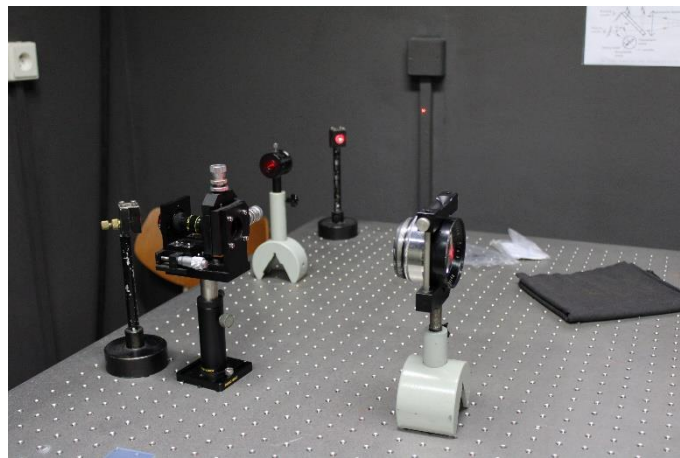
*Obr. 12: Defokusace clonky*

Centrace – kružnice kolem zářivého středu jsou soustředné.



Vodorovným posouváním clonky se seřídí defokus (clonka bude v ohnisku objektivu) a na stínítku se objeví pouze zářivý střed.

8. Objektiv – objektiv slouží k rozšíření svazku. Svazek, který vybíhá rozbíhavě z clonky je objektivem převeden na svazek rovnoběžných paprsků. Dírková clonka se musí nacházet v předmětovém ohnisku objektivu. Na objektiv přiložíme „ruční“ zrcátko, které vytvoří zpětný odraz směřující zpět do ohniska – do clonky. Posouváme objektivem směrem od clonky, dokud se zpětný chod nedostane zpět do ohniska. Správná poloha lze také ověřit pomocí plandesky, která vytvoří na „ručním“ stínítku jednotný obrazec.



*Obr. 13: Seřízení prostorového filtru a objektivu*

Základní části zařízení jsou nyní seřizené a pevně uchycené.

Mach-Zehnderův interferometr se vyjímá právě tím, že můžeme měnit délku optické dráhy jednoho z ramen. Sestrojili jsme proto takové zařízení, které nám umožní změnit optickou dráhu tohoto ramene v hodnotách vlnové délky použitého laseru.

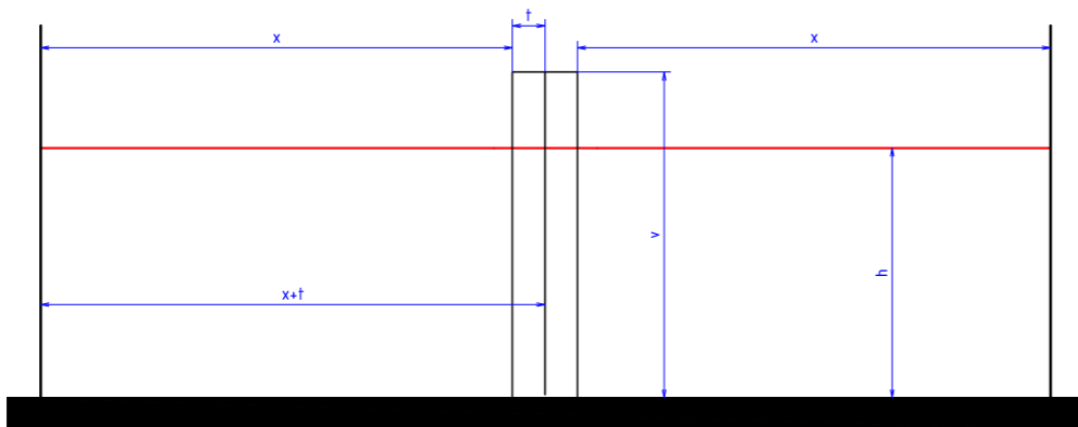
## 5.2 Kompenzátor fáze

K návrhu zařízení pro změnu optické dráhy jsme využili základní optické zákony. Využíváme zákon odrazu a lomu z opticky řidšího do opticky hustšího prostředí a naopak. Zařízení se skládá ze dvou sklíček, která jsou postavena do tvaru střechy (opírají se navzájem o horní hranu), viz schéma.

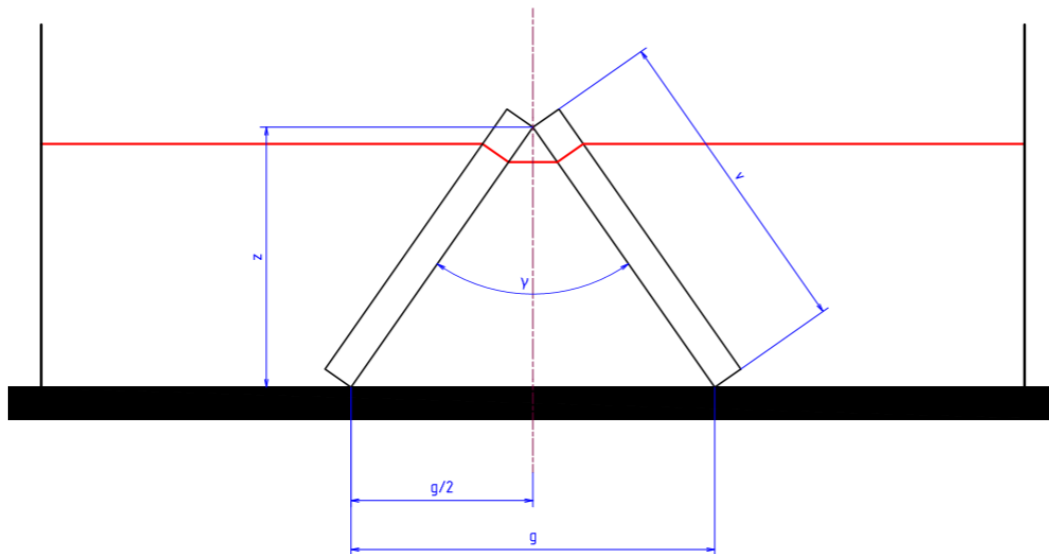
Sklička jsou postavena tak, aby tvořila rovnoramenný trojúhelník. Jelikož jsou vůči laseru nakloněná, neprochází paprsek rovně, ale láme se podle zákona lomu. Tudíž paprsek změni svoji dráhu jak geometrickou, tak i optickou. Výhoda tohoto uspořádání je v tom, že svazek po průchodu kompenzátozem pokračuje dál v původním směru a nemění svoji polohy ani stranově ani výškově.

K této teorii musíme matematicky popsat závislost změny optické dráhy na parametrech kompenzátozu (tloušťka a výška skliček, jejich index lomu, úhel mezi skličky). Sklička vložíme do imaginárního prostoru, kde laser začíná v určité vzdálenosti  $x$  od prvního sklička a zavedeme několik proměnných.

U skliček známe jejich tloušťku  $t$  a jejich index lomu  $n$ . Protože jsou postavena do rovnoramenného trojúhelníku a víme, jak jsou od sebe vzdálena, dokážeme dopočítat úhel mezi nimi. Pro výpočty nám stačí jen polovina zařízení. (viz. Obr. 16).



Obr. 14: Schéma – procházející laser skrz rovná sklička + parametry



Obr. 15: Schéma – rozevřená sklíčka ve vzdálenosti  $g$

Známe:

1.  $t$  – tloušťka sklíček
2.  $v$  – velikost sklíček
3.  $g$  – vzdálenost mezi sklíčky
4.  $h$  – výška laseru
5.  $x$  – vzdálenost laseru od prvního sklíčka v imaginárním prostoru

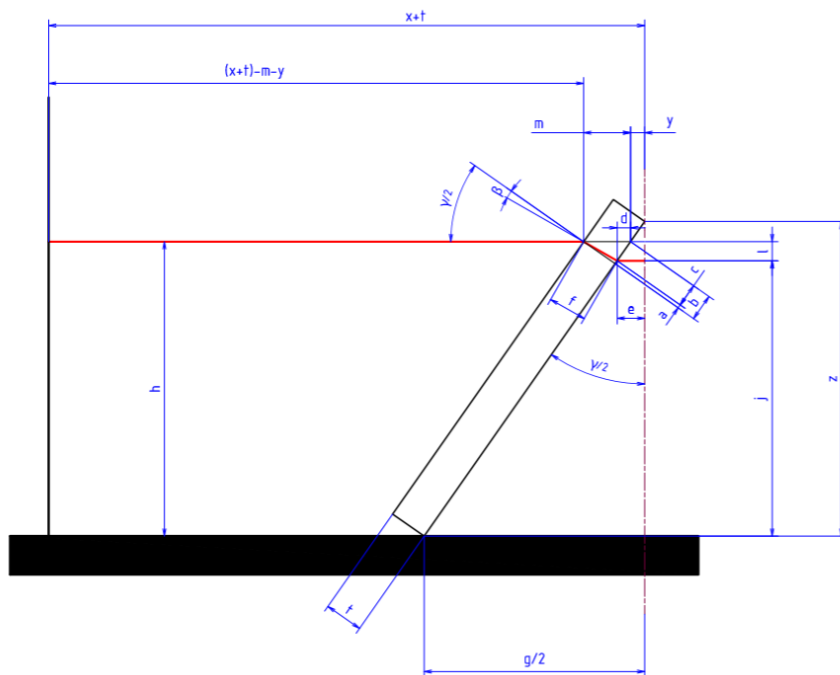
Protože nám stačí polovina zařízení, z rovnostranného trojúhelníka vznikne pravoúhlý trojúhelník s odvěsnami  $g/2$  a  $z$  a přeponou  $v$ .

Dopočítáme:

6.  $z$  – délka odvěsny
7.  $\gamma/2$  – poloviční úhel vrcholu
8. Přes podobnost trojúhelníků dostáváme, že pod stejným úhlem  $\gamma/2$  dopadá laser na první sklíčko
9. Úhel  $\beta$  – úhel lomu  $\beta$  dopočítáme přes zákon lomu (známe jak úhel dopadu, tak indexy sklíčka i prostředí)
10.  $f$  – dráha, kterou urazí laser ve sklíčku

11.  $e$  – vzdálenost konce prvního sklíčka k odvěsně  $z$

12.  $j$  – výška laseru na odvěsně  $v$



Obr. 16: Schéma – nakloněné sklíčko se zvolenými proměnnými veličinami

Výpočty:

Úhel  $\gamma/2$

$$\sin \gamma/2 = \frac{g}{z}$$

$$\gamma/2 = \arcsin \frac{g}{z} \quad (5.1)$$

Odvěsna  $z$

$$z = \cos \frac{\gamma}{2} \cdot v \quad (5.2)$$

Vzdálenost laseru od nakloněného sklíčka  $[(x + t) - y - m]$

$$y = (z - h) \cdot \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} \quad (5.3)$$

$$m = \frac{t}{\cos \frac{\gamma}{2}} \quad (5.4)$$

Úhel  $\beta$

$$\frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\beta = \arcsin \left( \frac{n_1 \cdot \sin \frac{\gamma}{2}}{n_2} \right) \quad (5.5)$$

Dráha laseru  $f$  ve sklíčku

$$f = \frac{t}{\cos \beta} \quad (5.6)$$

Vzdálenost  $e$  konce nakloněného sklíčka od odvěsny  $v$

$$a = \sqrt{f^2 - t^2} \quad (5.7)$$

$$b = tg \frac{\gamma}{2} \cdot t \quad (5.8)$$

$$c = b - a \quad (5.9)$$

$$d = c \cdot \sin \frac{\gamma}{2} \quad (5.10)$$

$$e = d + y \quad (5.11)$$

Výška laseru mezi sklíčky

$$l = c \cdot \cos \frac{\gamma}{2} \quad (5.12)$$

$$j = h - l \quad (5.13)$$

Optická dráha

$$w = 2 \cdot [(x + t - m - y) \cdot n_1 + f \cdot n_2 + e \cdot n_1] \quad (5.14)$$

Optickou dráhu musíme vynásobit 2, protože odvození je provedeno jen pro polovinu zařízení.

Dosazené hodnoty:

Zadání 1

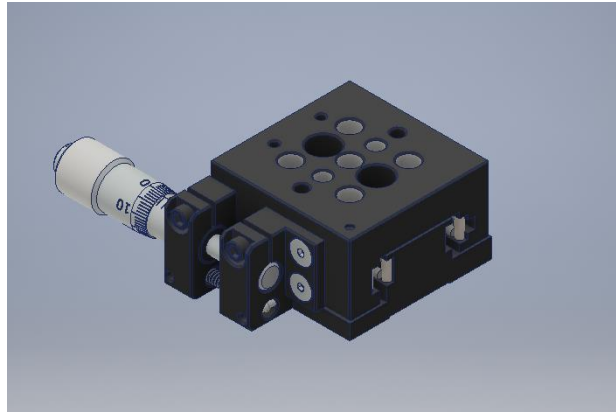
x	g/2(1)	g/2(2)	v	t	h	n <sub>1</sub>	n <sub>2</sub>
150 mm	24 mm	25 mm	50 mm	10 mm	20 mm	1	1,52

Tab. 1: Výsledky výpočtů se zvolenými parametry

zadání							
úhel gama [°]	57,37	úhel gama [°]	60	vlnová délka	0,0006328		
výška skla - v [mm]	50	výška skla - v [mm]	50				
výška laseru - h [mm]	20	výška laseru - h [mm]	20				
index skla n <sub>2</sub>	1,52	index skla n <sub>2</sub>	1,52				
index prostředí n <sub>1</sub>	1	index prostředí n <sub>1</sub>	1	g/2(1)	24		
tloušťka skla - t [mm]	10	tloušťka skla - t [mm]	10	g/2(2)	25		
vzdálenost - x [mm]	150	vzdálenost - x [mm]	150	rozdíl	0,088638466		
<b>1. část</b>		<b>1. část</b>					
z	43,86	z	43,3				
y	13,06	y	13,45				
m	11,4	m	11,55				
<b>2. část</b>		<b>2. část</b>					
beta	18,41	beta	19,2				
f	10,54	f	10,59				
<b>3. část</b>		<b>3. část</b>					
a	3,328	a	3,483				
b	5,472	b	5,774				
c	2,143	c	2,29				
d	1,029	d	1,145				
e	14,09	e	14,6				
<b>4. část</b>		<b>4. část</b>					
l	1,88	l	1,983				
j	18,12	j	18,02				
<b>dráha</b>	331,3	<b>dráha</b>	331,4				

Po dosazení zadaných hodnot zjišťujeme, že kompenzátor prodlužuje optickou dráhu daného ramene. Změnou úhlu mezi sklíčky docílíme změny optické dráhy a následný rozdíl optických drah těchto dvou poloh kompenzátoru. Sklíčka proto dimenzujeme na zařízení, které umožní změnu vzdálenosti sklíček. Změnou vzdálenosti se změní i úhel mezi sklíčky a tím nastane změna optické dráhy.

Zařízení je tvořeno malým stolečkem, jehož součástí je mikrometrický šroub, pomocí kterého lze lineárně pohybovat vrchní částí stolečku. Jedna otáčka šroubu posune stoleček o půl milimetru na jednu či druhou stranu od základní polohy.



Obr. 17: Schéma – stoleček s aretačním šroubem

Aby celé zařízení interferometru pracovalo efektivně, je nutné najít nejhodnější hodnoty parametrů sklíček, které zaručí nejmenší změnu optické dráhy. Měníme proto hodnoty všech parametrů tak, abychom docílili rozdílu optických dráhy v hodnotě jedné vlnové délky použitého laseru na jednu otáčku šroubu (změna polohy sklíček je 0,5 milimetru).

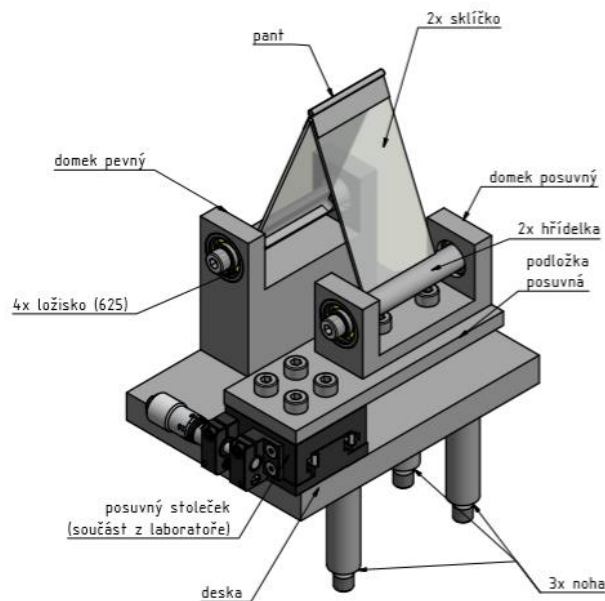
Tab. 2: Výsledky výpočtů po změně hodnot parametrů

zadání					
úhel gama [°]	31,92	úhel gama [°]	32,3	vlnová délka	0,0006328
výška skla - v [mm]	80	výška skla - v [mm]	80		
výška laseru - h [mm]	20	výška laseru - h [mm]	20	počet otáček	1
index skla n2	1,5	index skla n2	1,5		
index prostředí n1	1	index prostředí n1	1	g/2	22
tloušťka skla - t [mm]	1	tloušťka skla - t [mm]	1	g/2+x*0,25	22,25
vzdálenost - x [mm]	20	vzdálenost - x [mm]	20	rozdíl	0,000626229
<b>1. část</b>		<b>1. část</b>			
z	76,92	z	76,84		
y	16,28	y	16,46		
m	1,04	m	1,041		
<b>2. část</b>		<b>2. část</b>			
beta	10,56	beta	10,69		
f	1,017	f	1,018		
<b>3. část</b>		<b>3. část</b>			
a	0,186	a	0,189		
b	0,286	b	0,29		
c	0,1	c	0,101		
d	0,027	d	0,028		
e	16,31	e	16,49		
<b>4. část</b>		<b>4. část</b>			
l	0,096	l	0,097		
j	19,9	j	19,9		
<b>dráha</b>	43,03	<b>dráha</b>	43,03		

Největší vliv na změnu optické dráhy mají tloušťka sklíček, jejich výška a počáteční vzdálenost mezi sklíčky. Naopak žádný vliv nemá výška laseru a jeho vzdálenost od nakloněného sklíčka. Index lomu sklíček optickou dráhu také ovlivní, ale změna nastává až na šestém desetinném místě.

Aby nastal rozdíl optických drah v hodnotě jedné vlnové délky na jednu otáčku šroubu, je potřeba vybrat nejtenčí a nejvyšší sklíčka a v počáteční vzdálenosti je nastavit nejbližše k sobě. Čím vyšší a tenčí sklíčka budou a čím blíže budou u sebe, tím menší nastane rozdíl optických drah.

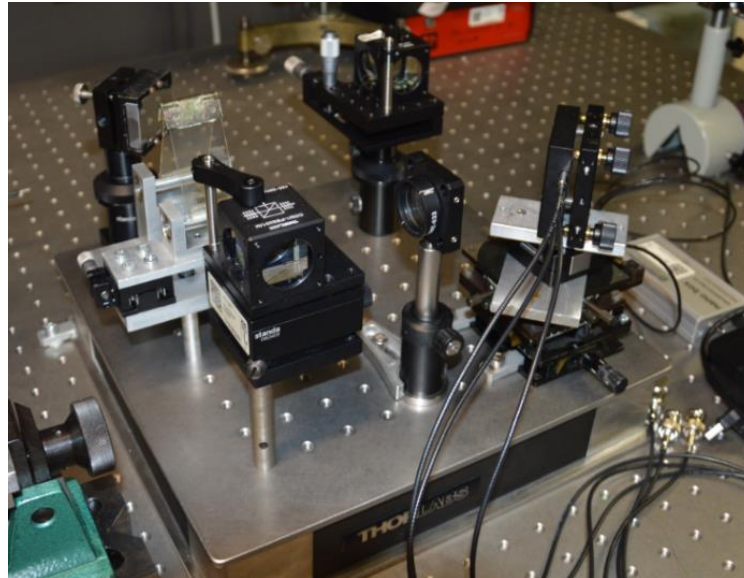
Abychom dané výpočty a výsledky mohli vyzkoušet v praxi, a tím ověřit funkčnost teorie, musí se pro sklíčka a stoleček vytvořit konstrukce, která zajistí pevnost a stabilitu sklíček.



*Obr. 18: Konstrukce pro zařízení na změnu optické dráhy*

Konstrukce je navržena pro náš interferometr do levého ramene mezi polarizační dělič a zrcátko 3. Stoleček umožní pohyb jednoho sklíčka, druhé je připevněno na pevno. Obě sklíčka jsou vsazena do drážky v hřidelkách uložených v ložiskách. Horní část sklíček je spojena pantem.





Obr. 19: Konstrukce – součást interferometru

Ověření:

Parametry jsou voleny podle použitého sklíčka a konstrukce. Konstrukce umožní pohyb sklíček v rozmezí 6 milimetrů. V základní poloze jsou 49 milimetrů od sebe a stoleček s aretačním šroubem umožní posunutí sklíček o 3 milimetry od sebe či k sobě. Jelikož tloušťka sklíček ovlivní optickou dráhu, vybíráme nejtenčí sklo, které je dostupné. Výšku skla volíme takovou, aby sklíčka byla stabilní a byla snadná manipulace, ale zároveň aby rozdíl optických drah pro dané hodnoty vycházel optimálně. Díky uchycení do pantu se jejich výška prodlouží.

Zvolené parametry:

x	$g/2$	v	t	h	$n_1$	$n_2$
20 mm	24,5 mm	64 mm	1,1 mm	20 mm	1	1,5168

Tab. 3: Výsledky výpočtů s parametry použitých sklíček

úhel gama [°]	45,02	úhel gama [°]	45,5	vlnová délka	0,0006328
výška skla - v [mm]	64	výška skla - v [mm]	64		
výška laseru - h [mm]	20	výška laseru - h [mm]	20	počet otáček	1
index skla $n_2$	1,517	index skla $n_2$	1,517		
index prostředí $n_1$	1	index prostředí $n_1$	1	$g/2$	24,5
tloušťka skla - t [mm]	1,1	tloušťka skla - t [mm]	1,1	$g/2+x*0,25$	24,75
vzdálenost - x [mm]	20	vzdálenost - x [mm]	20		
				rozdíl	0,001328692

S parametry konstrukce a sklíček dostáváme změnu optické dráhy v hodnotě dvou vlnových délek na jednu otáčku šroubu. Danou změnu bychom mohli ovlivnit tím, že změníme hodnoty parametrů. Jelikož jsme vybrali nejtenčí možné sklíčko, které bylo k dispozici, nemůžeme tloušťku skla zmenšit. Z tohoto důvodu také neovlivníme index lomu tohoto sklíčka. Kvůli konstrukci můžeme posunout vzdálenost sklíček jen o 3 milimetry na jednu či druhou stranu. Výsledek se tím však příliš nezmění. Jediné, čím můžeme zmenšit hodnotu změny optické dráhy je výška sklíček. Sklíčka by mohla být vyšší, ale hrozila by větší citlivost konstrukce během měření.

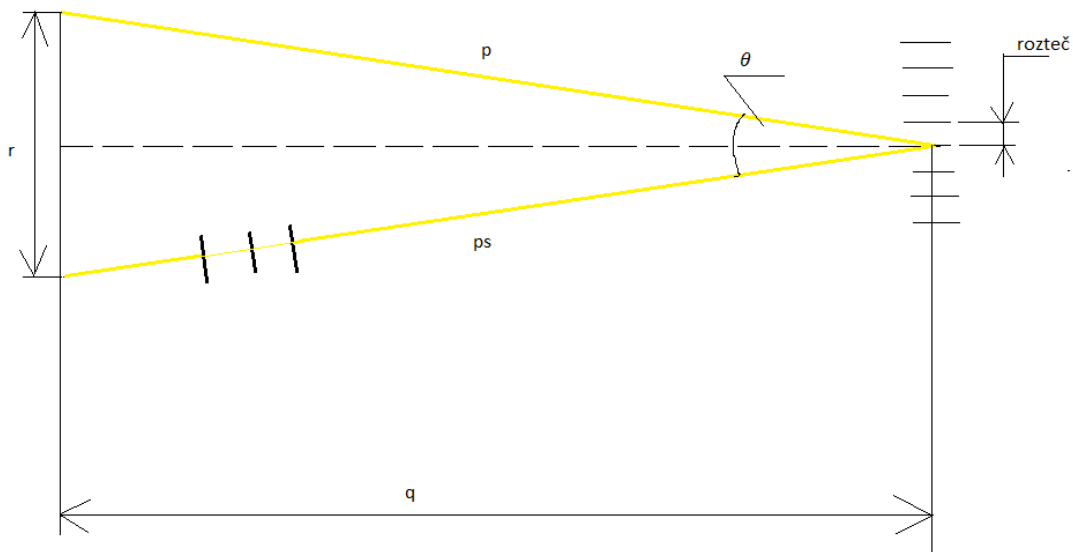
Z výpočtů v tabulce zjistíme, jaká změna optické dráhy by měla v praxi nastat v určité poloze sklíček při jedné otáčce šroubu. Jelikož budeme rozdíly optických drah měřit v interferenčním obrazci, potřebujeme rozdíl optických drah v nanometrech převést na počet proužků interferenčního obrazce. Interferenční obrazec vzniklý na stínítku je však velmi malý a nečitelný. Pokud jsou výpočty správné, počet proužků na jednu otáčku je podíl rozdílu optických drah a vlnové délky, ale pro ověření správnosti výsledků uděláme následující výpočet. Pomocí okuláru po kalibraci zjistíme, jaká je rozteč proužků a poté kolik proužků se posune při jedné otáčce šroubem v dané poloze sklíček.

Čtení z okuláru:

Na vzdálenosti 0,5 mm je 96 dílků stupnice v okuláru. Na 97 dílků stupnice připadá 7 proužků interferenčního obrazce. Z toho vyplývá, že rozteč proužků je

$$\text{rozteč} = \left( \frac{0,5}{96} \cdot \frac{97}{7} \right) = 0,072172619 \text{ mm} \quad (5.15)$$

Ověření výpočtem:



Obr. 20: Schéma – výpočet přepočtu rozdílu optické dráhy na počet proužků

$p$  – dráha paprsku procházející sklíčky v základní poloze

$ps$  – dráha paprsku procházející sklíčky po jedné otáčce šroubem

$q$  – vzdálenost zdroje paprsku k interferenčnímu obrazci (námi zvoleno)

$r$  – rozpětí mezi posuzujícími paprsky

úhel  $\theta$  – úhel mezi paprsky

výpočet:

$$q = 50 \text{ mm} \quad (5.16)$$

$$\text{rozteč} = 0,072172619 \text{ mm} \quad (5.17)$$

$$r = \frac{\lambda \cdot q}{\text{rozteč}} = \frac{0,0006328 \cdot 50}{0,072172619} = 0,43839 \text{ mm} \quad (5.18)$$

$$\text{rozteč} = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin \frac{\theta}{2}} \rightarrow \frac{\theta}{2} = \arcsin \frac{\lambda}{2 \cdot \text{rozteč}} \quad (5.19)$$

$$\frac{\theta}{2} = \arcsin \frac{0,0006328}{2 \cdot 0,072172619} = 0,2511817^\circ \quad (5.20)$$

$$p = \sqrt{\left(\frac{r}{2}\right)^2 + q^2} = \sqrt{\left(\frac{0,43839}{2}\right)^2 + 50^2} = 50,00048 \text{ mm} \quad (5.21)$$

$$ps = p - 2 \cdot (t + x) + \text{dráha}$$

$$ps = 50,00048 - 2 \cdot (20 + 1,1) + 43,39652 = 51,197 \text{ mm} \quad (5.22)$$

$$\Delta y = \frac{q}{r} \cdot (\text{optická dráha} - \text{geometrická dráha})$$

$$\Delta y_1 = \frac{50}{0,43839} \cdot [43,39652 - 2 \cdot (20 + 1,1)] = 136,466222 \text{ mm} \quad (5.23)$$

$$\Delta y_2 = \frac{50}{0,43839} \cdot [43,3978465 - 2 \cdot (20 + 1,1)] = 136,617763 \text{ mm} \quad (5.24)$$

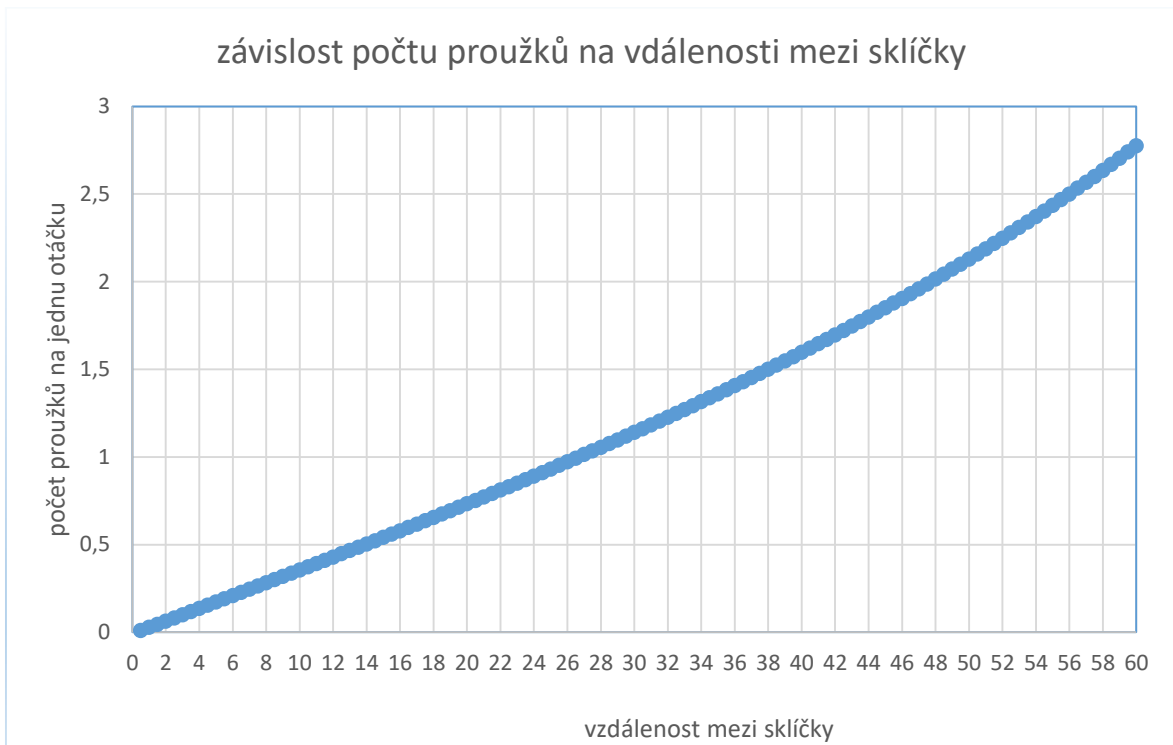
$$\Delta y_2 - \Delta y_1 = 136,617763 - 136,466222 = 0,151541 \text{ mm} \quad (5.25)$$

$$\text{počet proužků} = \frac{\Delta y_2 - \Delta y_1}{\text{rozteč}} = \frac{0,151541}{0,072172619} = \mathbf{2,0997 \text{ proužků}} \quad (5.26)$$

Porovnání:

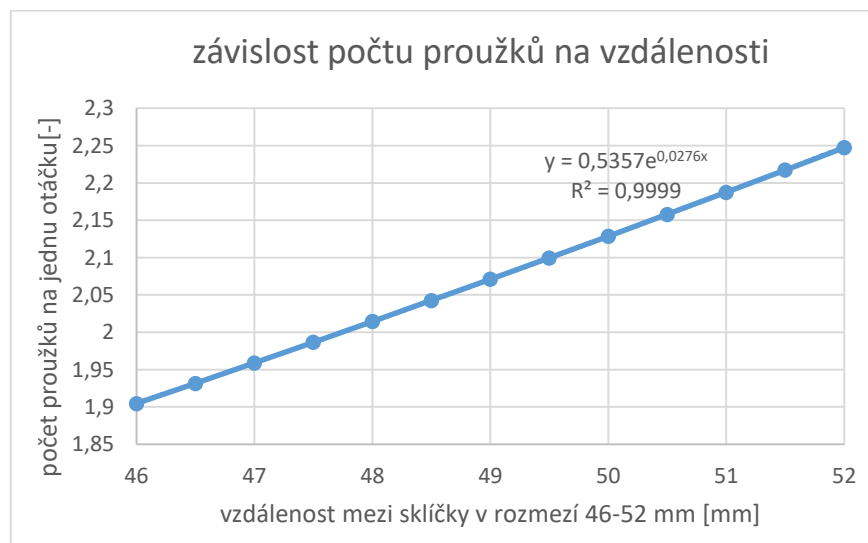
$$\text{počet proužků} = \frac{\text{rozdíl optických drah}}{\lambda} = \frac{0,001328692}{0,0006328} = \mathbf{2,0997 \text{ proužků}} \quad (5.27)$$

Pomocí výpočtu je dokázáno, že teoretická úvaha je správná a víme, kolik proužků interferenčního obrazce se posune při jedné otáčce šroubem v určité poloze sklíček. Z grafu je vidět závislost počtu proužků na otáčku na vzdálenosti mezi sklíčky od nulové vzdálenosti po maximální rozevření.



Obr. 21: Graf závislosti počtu proužků interferenčního obrazce na vzdálenosti mezi sklíčky

V grafu by mohla být znázorněna mnohem větší vzdálenost mezi sklíčky, ale pro nás je nejdůležitější úsek od 46 do 52 milimetrů. V tomto rozmezí se mohou pohybovat sklíčka v konstrukci. I když se v graf závislosti počtu proužků na vzdálenosti v rozmezí 46 – 52 mm zdá spíše lineární, je závislost exponenciální, která je vyjádřena rovnicí  $y = 0,5357e^{0,02576x}$  s jistotou 99,99 %.



Obr. 22: Graf závislosti počtu proužků interferenčního obrazce na vzdálenosti mezi s klíčky v rozmezí 46 – 52 milimetrů

### Praktické ověření:

K úplnosti ověření teoretické úvahy zbývá poslední část. Konstrukce je umístěna mezi polarizační dělič a zrcátko v levém rameni. Po zapnutí laseru prochází paprsek všemi součástmi a na stínítkách vytváří interferenční obrazce. Jelikož je interferenční obrazec malý a proužky nejsou dostatečně čitelné, provádíme měření pomocí mikroskopického objektivu, ve kterém se nám obraz zvětší.

### Měření 1:

Skříčka si nastavíme do vzdálenosti 46 milimetrů od sebe a šroubem budeme postupně otáčet. Jedna otáčka šroubem je posunutí stolečku o 0,5 milimetrů. Stupnice aretačního šroubu je rozdělena po setinách milimetru od 0 do 50 setin milimetru. V mikroskopu sledujeme proužky a vždy když se posune jeden proužek, zapíšeme si, o kolik setin jsme posunuli šroubem a výsledky poté zkontrolujeme s výpočty v tabulce.

Start – 46 milimetrů

Posun stolku [mm]	0	0,23	0,48	0,74	1	1,25	1,5
Odečtené proužky	0	1	2	3	4	5	6
Vypočtené proužky	0	0,885	1,854	2,868	3,89	4,88	5,877

1,75	2,02	2,26	2,54	2,8	3,05	3,33	3,6	3,86
7	8	9	10	11	12	13	14	15
6,88	7,97	8,95	10,099	11,173	12,214	13,388	14,528	15,635

Výsledky z odčítání z mikroskopu se úplně neshodují s výsledky z výpočtů, ale hodnota počtu proužků se liší jen o několik desetín proužku. Vzniklá nesrovnalost mohla vzniknout špatným pozorováním posunujících proužků v mikroskopu (nebylo snadné říct, zda se posunul právě jeden proužek – proužky byly široké a měly neostré okraje) nebo nepřesným odečítáním milimetrů na stupnici

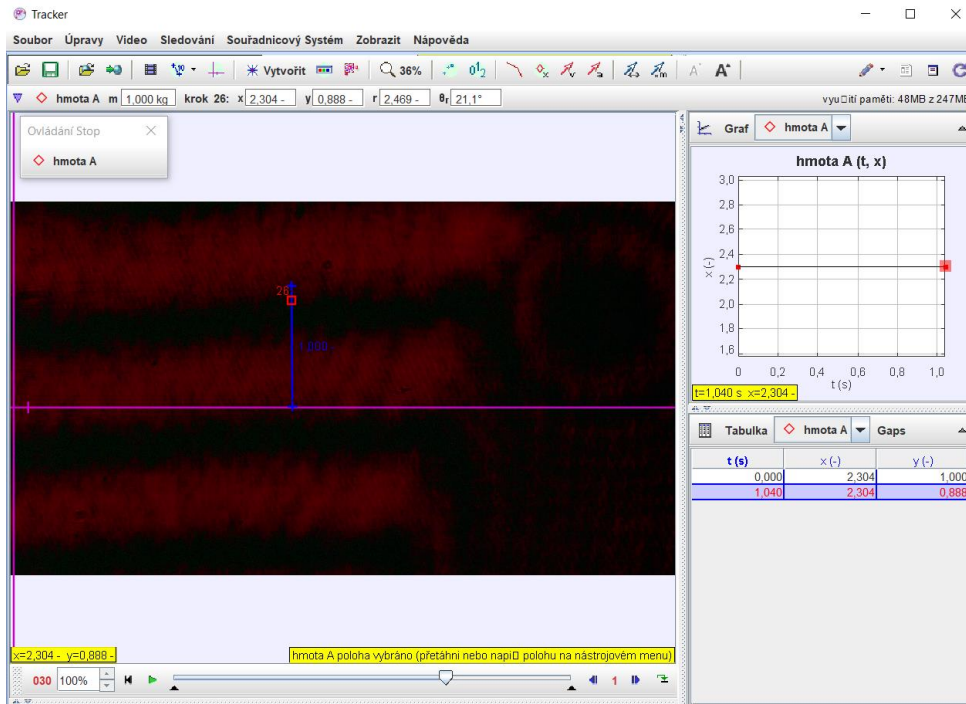
šroubu (měření muselo být prováděno v přítomnosti kvůli laseru). Z výsledků však lze říct, že se měřením potvrdila teoretická úvaha a výpočty se ubíraly správným směrem.

### **Měření 2:**

Sklička nyní nastavíme do vzdálenosti 52 mm. Šroubem budeme postupně otáčet o jednu otáčku a zapíšeme, kolik proužků interferenčního obrazce se posunulo. Místo mikroskopu použijeme kameru, kterou postavíme proti směru výstupu paprsku ze slučovače. Kameru připojíme k počítači, ve kterém zaznameneáme změnu polohy proužků. Po každém otočení šroubu a posunutí proužků uložíme v programu v počítači snímek aktuální polohy. Získáme tedy 12 snímků od maximální (52 mm) do minimální (46 mm) vzdálenosti skliček s posunutím o 0,5 milimetru.

Pouhým okem jsme schopni rozpoznat, že se proužky pohybují směrem dolů a na jednu otáčku šroubu se posunou o přibližně dva proužky. Z grafu na obr. 14 víme, kolik proužků by se podle výpočtů mělo posunout během jedné otáčky v určité poloze. Ze zaznamenaných snímků proto musíme zjistit, o jakou část proužku se nová poloha posunula víc či míň.

K určení přesnější polohy použijeme program *Tracker*, ve kterém odečteme posun proužku mezi dvěma po sobě jdoucími snímky. Z těchto dvou snímků vytvoříme krátké video, které vložíme do programu *Tracker*. První snímek slouží jako aktuální poloha, druhý je nová poloha posunutá o 0,5 milimetru. V programu si vyznačíme vzdálenost jednoho proužku pomocí kalibrační tyče a vzdálenost přepíšeme na „1“ (jeden proužek). Poté označíme bodem horní okraj proužku aktuální polohy na kalibrační tyči. Po zapnutí videa v programu sledujeme změnu polohy horního okraje proužku a okraj nové polohy také označíme bodem. Pokud by se proužky posunuly vždy přesně o dva, nová poloha by proti původní byla beze změny a horní okraj proužku by zůstal na stejném označeném místě („1“).



Obr. 23: Program Tracker – odečtení posunu proužku

Do programu postupně vkládáme všech 12 videí, ve kterých vytvoříme kalibrační tyč a označíme body aktuální a nové polohy sklíček. Z programu následně vytáhneme vzdálenost posunutého okraje proužku od kalibrační tyče (od „1“). Pokud je horní okraj posunutého proužku nad kalibrační tyčí, posunutí proužků po jedné otáčce šroubem bylo méně než dva proužky. Pokud se nový okraj nachází v kalibrační tyči a níže, posunutí bylo o více než dva proužky.

Odečtení z programu:

posun	51,5-51	51-50,5	50,5-50	50-49,5	49,5-49
Odečet [-]t	0,89	0,98	0,845	1	1,07
Přepočet na proužky	2,11	2,02	2,155	2	1,93
Proužky-výpočet	2,217	2,187	2,158	2,129	2,0997
Rozdíl	-0,107	-0,167	-0,003	-0,129	-0,1697



49-48,5	48,5-48	48-47,5	47,5-47	47-46,5	46,5-46
1,05	1,04	1,12	1,18	1,11	1,1
1,95	1,96	1,88	1,82	1,89	1,9
2,071	2,043	2,0145	1,9866	1,959	1,932
-0,121	-0,083	-0,1345	-0,1666	-0,069	-0,032

(Posunutí z 52 mm na 51,5 mm je vynecháno z důvodu špatného zaznamenání počáteční polohy)

Hodnoty z odečtu z programu musíme nejdříve přepočítat. Hodnoty, které jsou menší než 1, znamenají, že se interferenční obrazec posunul o více jak dva proužky a naopak hodnoty, které jsou větší než 1, znamenají, že se interferenční obrazec posunul o méně než dva proužky. Je to z toho důvodu, že se proužky posouvaly směrem dolů a hodnota „1“ je brána k hornímu bodu kalibrační tyče. Na přepočet tedy stačí od dané hodnoty odečíst „1“ a zjistíme, o jakou hodnotu proužku se nová poloha posunula více nebo méně než dva proužky.

Po přepočítání zjišťujeme, že se hodnoty z odečtu z programu neshodují s hodnotami z výpočtů. Vznik odchylek a nepřesností mohl nastat z důvodu nepříznivých podmínek pro měření. Měření muselo být prováděné ve tmě kvůli laseru, tudíž šroub nemusel být otočen přesně o jednu otáčku a i nedotočení o 1 dílek ovlivní měření v hodnotách setin až desetín proužku. Nebo naopak přetočení o více než jednu otáčku a následné otočení zpátky naruší posun proužků vlivem vymezování vůlí v konstrukci. Nepřesnosti mohly vzniknout i z důvodu velké citlivosti zařízení, proto i malý kontakt ruky se sklíčky může ovlivnit měření. Další chyba mohla nastat špatným změřením velikosti výšky sklíček posuvným měřítkem. I o půl milimetru větší výška sklíček dokáže ovlivnit výpočty v rámci setin proužku.

Největší výchylka nastala během posunu ze 49,5 mm na 49 mm, kdy se mělo posunout 2,0997 proužku, ale v měření se dva proužky nedotočily o 0,07 proužku.

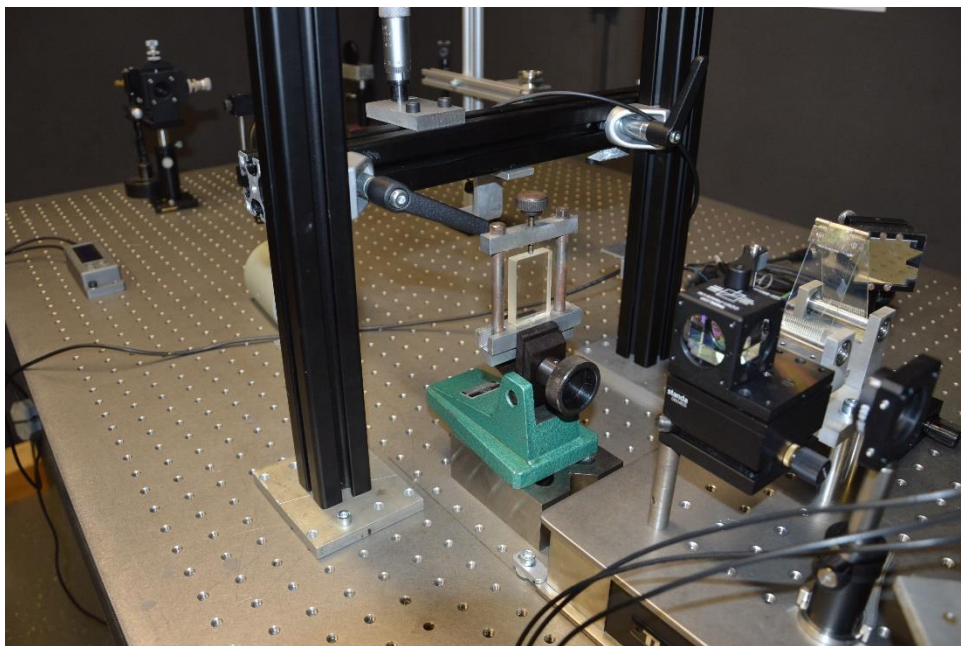
### 5.3 Experiment – ověření funkčnosti kompenzátoru

Celý interferometr má sloužit jako zařízení, které dokáže zobrazit pnutí ve skle. V tomto experimentu budeme ověřovat funkčnost kompenzátoru fáze pomocí zatěžovaného tělesa. Zatěžované těleso postavíme mezi polarizační filtr a interferometr tak, aby na interferenčním obrazci byla vidět horní hrana tělesa.

Principem experimentu je kompenzace zatížení pomocí změny optické dráhy. Horní hranu tělesa zatížíme silou, která bude viditelná na interferenčním obrazci deformací proužků. Změnou optické dráhy by se daná zatěžovací síla měla kompenzovat.

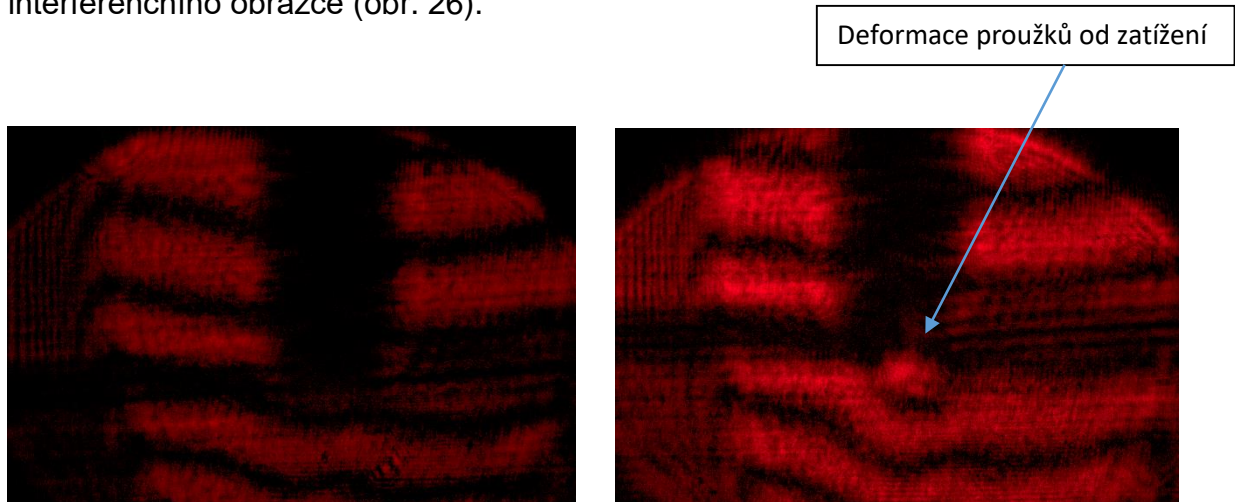
#### Experiment:

Jako zatěžované těleso použijeme malý skleněný kvádr. Kvádr v uložení postavíme do chodu paprsku laseru před interferometr (před polarizační dělič) a zatížíme ho silou o neznámé velikosti. Interferenční obrazec snímáme kamerou připojenou k počítači a deformaci proužků zaznamenáváme pomocí snímků a videa.



*Obr. 24: Zatěžované těleso*

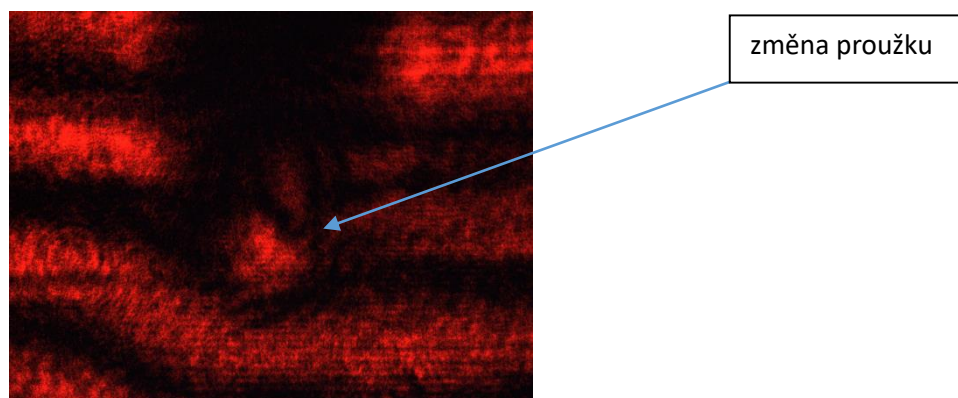
Sklička jsou nastavena na vzdálenost 49 milimetru. Kamera snímá interferenční obrazec vycházející ze slučovače a v počítači vytváříme první snímek (obr. 25). Kvádr zatížíme silou od šroubu a sledujeme deformaci proužků interferenčního obrazce (obr. 26).



Obr. 25: Interferenční obrazec před zatížením Obr. 26: Interferenční obrazec se zatížením

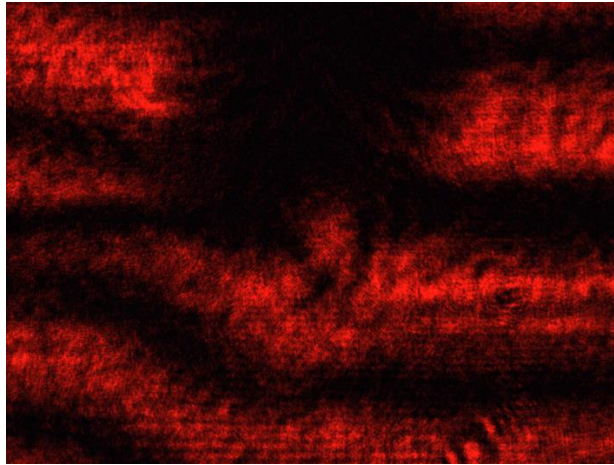
Sklička začneme pomalu a citlivě posouvat otáčením mikrometrického šroubu a v počítači přes kameru zaznamenáváme pohyb a změnu proužků. Šroubem otáčíme po 0,1 milimetru (10 dílků na stupnici mikrometrického šroubu) s krátkými pauzami mezi otáčkami. Ze zaznamenaných snímků a z videa je patrné, že se deformace proužků od zatížení postupně minimalizuje a poté opět narůstá. Nejviditelnější změna nastává na vzniklé „skvrně“ od zatížení (obr. 17b), která se vlivem změny optické dráhy posouvá, částečně zaniká a následně se znovu vytváří.

Po první otáčce (0,1 milimetru, 10 dílků) se vzniklá „skvrna“ posouvá a jeví se jako součást následujícího proužku.



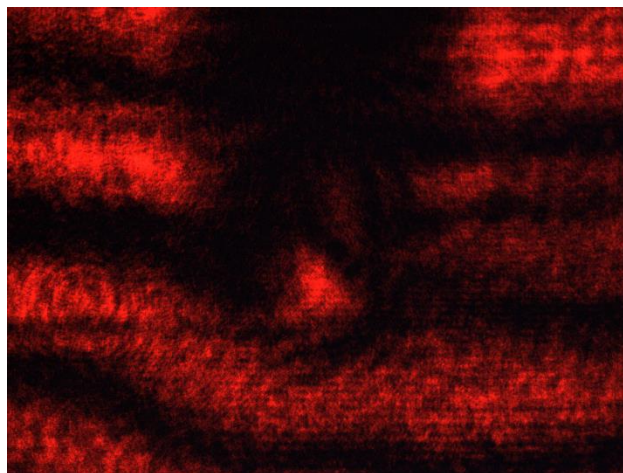
Obr. 27: Posunutí o 10 dílků – změna polohy „skvrny“

Dalším posouváním sklíček (0,2 milimetry od základní polohy) se proužky dál posouvají, původní „skvrna“ zaniká a vytváří se počátek nové „skvrny“.



*Obr. 28: Posunutí o 20 dílků – částečně zmizelá „skvrna“*

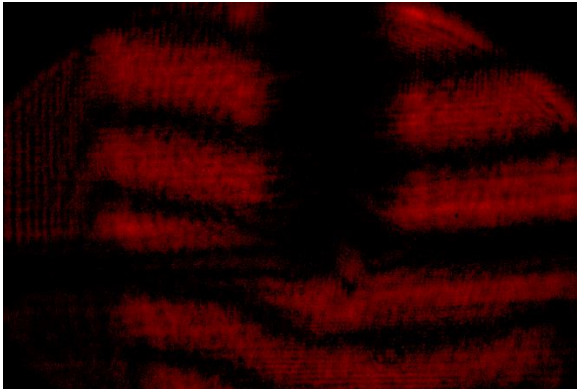
V následující otáčce (0,3 milimetry od základní polohy) se nová „skvrna“ odděluje od proužku a nastává stejná poloha interferenčního obrazce jako v základní poloze sklíček po zatížení kvádru (obr. 24b)



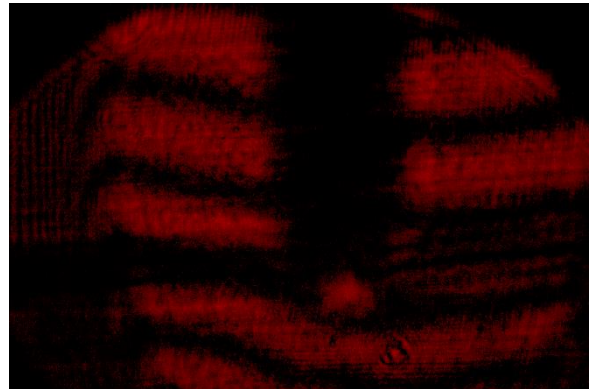
*Obr. 29: Posunutí o 30 dílků – nová „skvrna“*

Po dalším otočení o 10 dílků se proužky opět posouvají, deformace mění svůj tvar a celý proces se opakuje.

Pomalým a velmi citlivým otáčením z polohy 49 milimetrů provádíme měření ještě jednou a snažíme se zachytit přesný okamžik kompenzace. Zjišťujeme, že nejmenší viditelnost „skvrny“ nastává po otočení o 12 až 15 dílků. Stejná deformace proužků se opět objevuje po otočení 25-28 dílkách.



Obr. 30: Nejmenší viditelnost „skvrny“



Obr. 31: Stejná deformace

Pomocí kompenzátoru jsme schopni vzniklé pnutí ve skle kompenzovat. Přesnou hodnotu dráhového rozdílu od pnutí však nejsme schopni zjistit. Jelikož je děj periodický, nedokážeme přesně říct, zda dráhový rozdíl odpovídá jednomu proužku či třem, nebo jiné hodnotě.

K zjištění přesnějšího výsledku by se měření dalo vylepšit konstrukcí pro zatěžované i zatěžovací těleso. Zatížení by probíhalo pomocí tenzometru, kde by byla snímána přesná hodnota zatížení. Se znalostí fotoelastického koeficientu skla by se dalo porovnat zatížení změřené tenzometrem s výsledky změřené interferometrem s kompenzátozem.

## 6. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout a sestrojít zařízení na změnu optické dráhy v Mach-Zehnderově interferometru. Zařízení mělo spočívat v naklápění skleněné destičky s citlivostí nastavení desetiny vlnové délky použitého laseru. Tento kompenzátor následně matematicky popsat a provést experiment na ověření funkce kompenzátoru.

Zařízení na změnu optické dráhy je sestrojeno ze dvou sklíček, která jsou pevně spojena a vytváří rovnoramenný trojúhelník. Výhodou tohoto uspořádání je, že po průchodu kompenzátozem nemění svazek svůj směr a není ani stranově ani výškově posunutý. Pro celé zařízení je navržena konstrukce, která umožní změnu vzdálenosti mezi sklíčky a tím se zajistí změna optické dráhy. Pomocí matematického odvození je zjištěno, jaké parametry sklíček mají na danou změnu optické dráhy největší vliv a naopak, které změnu vůbec neovlivní.

V měření nevycházejí totožné výsledky s výpočty, ale je ověřen správný směr teoretické úvahy zařízení. Z důvodu velké citlivosti a náchylnosti kompenzátoru a nepříznivých podmínek pro měření vznikají výchyly mezi měřením a výpočty.

Kompenzátor fáze je navržen tak, aby pomocí něho bylo možno změřit pnutí ve skle. Pnutím vzniká ve skle dvojlom, který vytvoří dva kolmo polarizované svazky s dráhovým rozdílem. V experimentu je prokázáno, že pomocí interferometru je možno zobrazit vzniklé pnutí a kompenzátozem toto pnutí kompenzovat. Přesnou hodnotu dráhového rozdílu řádného a mimořádného paprsku vzniklého od pnutí nejsme schopni změřit.

Vylepšením měření o konstrukci pro zatěžované těleso a zatěžovací mechanismus, pomocí kterého by se znala přesná hodnota zatížení. Se znalostí fotoelastického koeficientu by se dalo vzniklé pnutí porovnat s výsledky z měření pomocí interferometru s kompenzátozem.

## Seznam použité literatury

- [1] Fyzikální podstata světla. *Světlo: časopis pro světlo a osvětlení* [online]. Praha: FCC Public s.r.o, 2000, 2(4), 1. Dostupné z:  
<http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/fyzikalni-podstata-svetla--16967>
- [2] *RNDr. Vladimír Vaščák: osobní stránky učitele z Moravy* [online]. Dostupné z:  
[https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/galerie/big\\_opt\\_vlna.pn](https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/galerie/big_opt_vlna.pn)
- [3] Encyklopedie fyziky. *Světlo jako elektromagnetické vlnění* [online]. 2006. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/434-svetlo-jako-elektromagneticke-vlneni>
- [4] Encyklopedie fyziky. *Interference na tenké vrstvě* [online]. 2006. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/453-interference-na-tenke-vrstve>
- [5] *Simulace Mach-Zehnderova interferometru* [online]. Brno, 2017. Dostupné z:  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=152240](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=152240).  
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [6] VÁCLAVÍK, Pavel. *Technická optika II*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1984.
- [7] Interference světla. Fyzika 007 [online]. 2012. Dostupné z:  
<http://www.fyzika007.cz/optika/interference-svetla>
- [8] Přednášky Vlnová optika [online] dostupné z: <https://moodle-vyuka.cvut.cz/course/view.php?id=1160>
- [9] FUKA, Josef a Bedřich HAVELKA. *Optika a atomová fyzika: I. optika, fyzikální kompendium pro vysoké školy* [online]. Díl IV. Praha: SPN, 1961. Dostupné z:  
[http://www.opto.cz/fuka\\_havelka/index.html#TOC1](http://www.opto.cz/fuka_havelka/index.html#TOC1)
- [10] *Typy refraktometrů* [online]. Brno, 2011. Dostupné z:  
[https://is.muni.cz/th/326354/lf\\_b/Typy\\_refraktometru.pdf](https://is.muni.cz/th/326354/lf_b/Typy_refraktometru.pdf). Bakalářská práce. Masarykova univerzita.
- [11] The Fabry-Perot Interferometer. *Davidson Physics* [online]. 2005. Dostupné z:  
[https://www.phy.davidson.edu/StuHome/cabell\\_f/diffractionfinal/pages/Fabry.htm#Theory](https://www.phy.davidson.edu/StuHome/cabell_f/diffractionfinal/pages/Fabry.htm#Theory)
- [12] *MODULE 10-5 EFABRY-PEROT INTERFEROMETERS* [online]. 2019-08-14]. Dostupné z:  
<https://pe2bz.philpem.me.uk/Lights/-%20Laser/Info-999-LaserCourse/C10-M05-Efabry-Perot-Interferometers/Module10-5.htm>

- [13] Lummer–Gehrcke interferometer. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Lummer–Gehrcke\\_interferometer](https://en.wikipedia.org/wiki/Lummer–Gehrcke_interferometer)
- [14] „Konstrukce vláknového Mach-Zehnderova interferometru se dvěma děliči s proměnnými dělicími poměry [online]. Olomouc, 2012. Dostupné z: [http://orgchem.upol.cz/lemr/data/bula\\_bakalarka.pdf](http://orgchem.upol.cz/lemr/data/bula_bakalarka.pdf). Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci.
- [15] Trvalé napětí ve skle a jeho stanovení. *Glassrevue* [online]. 2001, 2001, 1(14), 1. Dostupné z: <http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=413&cid=6.html>
- [16] POPOVIČ, Štěpán. *Výroba a zpracování plochého skla* [online]. Praha: Grada, 2009. ISBN 978-80-247-3154-4. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=nmMyD3\\_-vkwC&printsec=frontcover&key=AlzaSyDIPfI89JdFhWBVsMVsavVo6aNh057xITc#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cz/books?id=nmMyD3_-vkwC&printsec=frontcover&key=AlzaSyDIPfI89JdFhWBVsMVsavVo6aNh057xITc#v=onepage&q&f=false)



## Seznam použitých znaků

$a$	délka odvěsny trojúhelníku atf [mm]
$b$	délka odvěsny trojúhelníku tbm [mm]
$c$	rozdíl vzdáleností a; b [Nm]
$d$	kroucí moment kuličkového šroubu [Nm]
$e$	dráha svazku od sklíčka k ose [mm]
$f$	dráha svazku ve skle [mm]
$g$	vzdálenost pat sklíček [mm]
$h$	výška laseru [mm]
$j$	výška vycházejícího svazku ze skla [mm]
$l$	rozdíl výšky laseru a výšky vycházejícího svazku [mm]
$m$	rovná dráha paprsku v nakloněném sklíčku – paprsek by se nelámal [mm]
$n_1$	index lomu prvního prostředí [ $min^{-1}$ ]
$n_2$	index lomu druhého prostředí [ $min^{-1}$ ]
$p$	dráha paprsku procházející sklíčky v základní poloze [mm]
$ps$	dráha paprsku procházející sklíčky po jedné otočce šroubem [mm]
$q$	vzdálenost zdroje paprsku k interferenčnímu obrazci [mm]
$r$	rozpětí mezi posuzujícími [mm]
$t$	tloušťka sklíček [mm]
$v$	výška sklíček [mm]
$w$	optická dráha [mm]
$x$	vzdálenost laseru od sklíčka v základní poloze [mm]
$y$	vzdálenost posunuté části sklíčka ve výšce h [mm]
$\Delta y$	dráha paprsku [mm]
$z$	délka odvěsny trojúhelníku zvg/2 [mm]
$\beta$	úhel lomu [°]
$\gamma$	úhel mezi sklíčky [°]
$\theta$	úhel mezi paprsky [°]

## Seznam obrázků

Obr. 1: Světlo – elektromagnetické vlnění [2].....	9
Obr. 2: Schéma – Michelsonův interferometr [8] .....	12
Obr. 3: Schéma – Rayleighův interferometr [8] .....	13
Obr. 4: Schéma – Michelsonova stupňová mřížka [9].....	14
Obr. 5: Schéma – Fabryův-Perotův interferometr [12].....	14
Obr. 6: Schéma – Lummerova – Gehecheova deska [13] .....	15
Obr. 7: Schéma – Mach-Zehnderův interferometr [8] .....	16
Obr. 8: Interferenční obrazce k sobě inverzní.....	17
Obr. 9: Schéma – sestavení Mach-Zehnderova interferometru .....	20
Obr. 10: Seřízení děliče, slučovače a odrazných zrcátek na desce s justážními pohyby .....	23
Obr. 11: Defokusace a decentrace clonky.....	24
Obr. 12: Defokusace clonky.....	24
Obr. 13: Seřízení prostorového filtru a objektivu .....	25
Obr. 14: Schéma – procházející laser skrz rovná sklíčka + parametry.....	26
Obr. 15: Schéma – rozevřená sklíčka ve vzdálenosti g .....	27
Obr. 16: Schéma – nakloněné sklíčko se zvolenými proměnnými veličinami.....	28
Obr. 17: Schéma – stoleček s aretačním šroubem.....	31
Obr. 18: Konstrukce pro zařízení na změnu optické dráhy .....	32
Obr. 19: Konstrukce – součást interferometru .....	33
Obr. 20: Schéma – výpočet přepočtu rozdílu optické dráhy na počet proužků.....	35
Obr. 21: Graf závislosti počtu proužků interferenčního obrazce na vzdálenosti mezi sklíčky .....	37
Obr. 22: Graf závislosti počtu proužků interferenčního obrazce na vzdálenosti mezi s klíčky v rozmezí 46 – 52 milimetrů.....	37
Obr. 23: Program Tracker – odečtení posunu proužku.....	40
Obr. 24: Zatěžované těleso .....	42
Obr. 25: Interferenční obrazec před zatížením Obr. 26: Interferenční obrazec se zatížením .....	43
Obr. 27: Posunutí o 10 dílků – změna polohy „skvrny“ .....	43
Obr. 28: Posunutí o 20 dílků – částečně zmizelá „skvrna“ .....	44
Obr. 29: Posunutí o 30 dílků – nová „skvrna“ .....	44
Obr. 30: Nejmenší viditelnost „skvrny“ .....	45
Obr. 31: Stejná deformace .....	45

## Seznam tabulek

Tab. 1: Výsledky výpočtů se zvolenými parametry .....	30
Tab. 2: Výsledky výpočtů po změně hodnot parametrů .....	31
Tab. 3: Výsledky výpočtů s parametry použitých sklíček .....	33

## Seznam příloh

Příloha 1: Výkres – hřídel

Příloha 2: Výkres – noha

Příloha 3: Výkres – domek posuvný

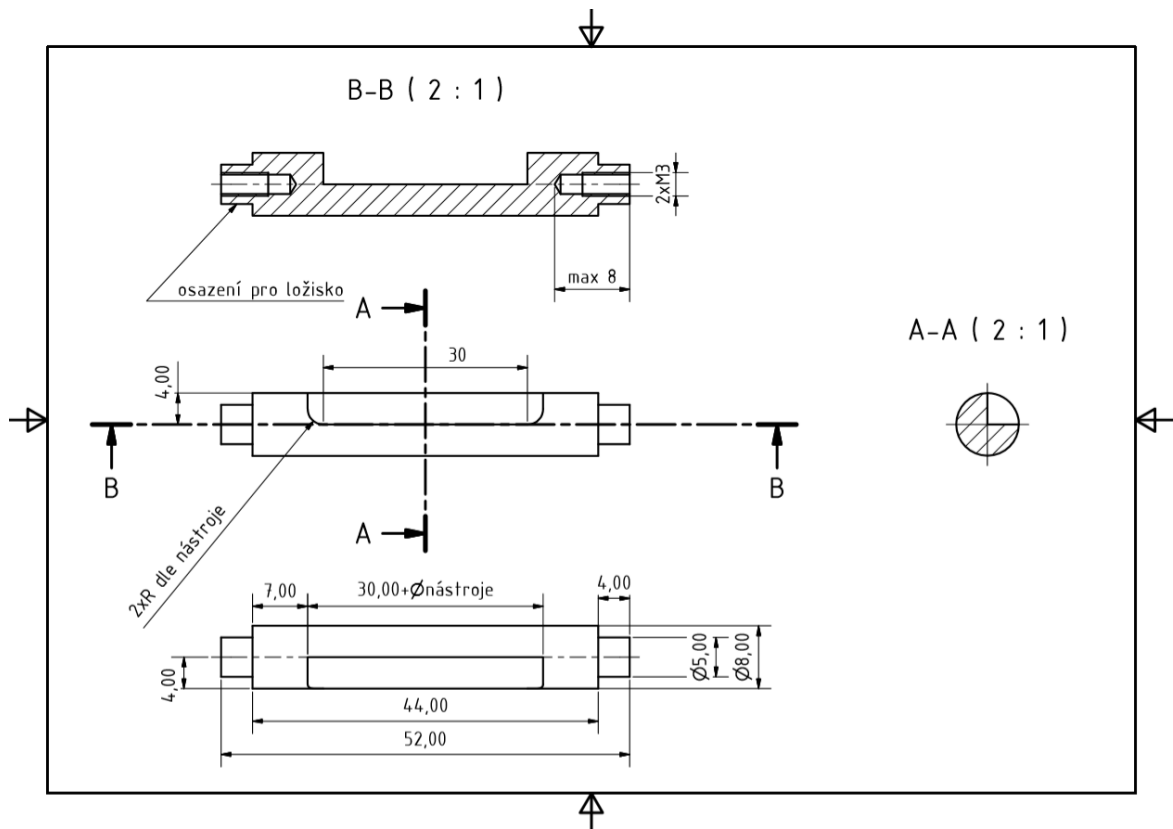
Příloha 4: Výkres – domek pevný

Příloha 5: Výkres – deska

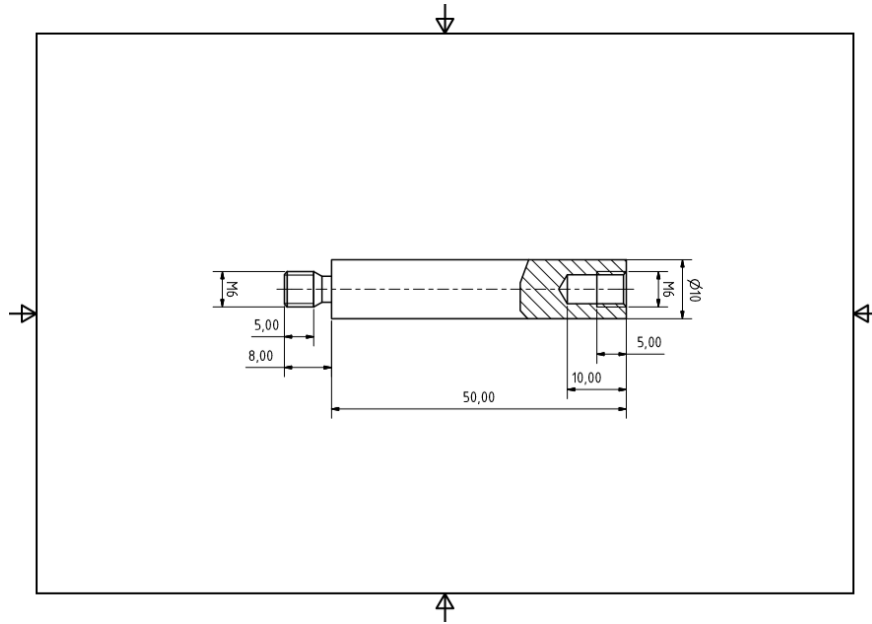
Příloha 6: Výkres – podložka posuvná

Příloha 7: Výkres – sklo

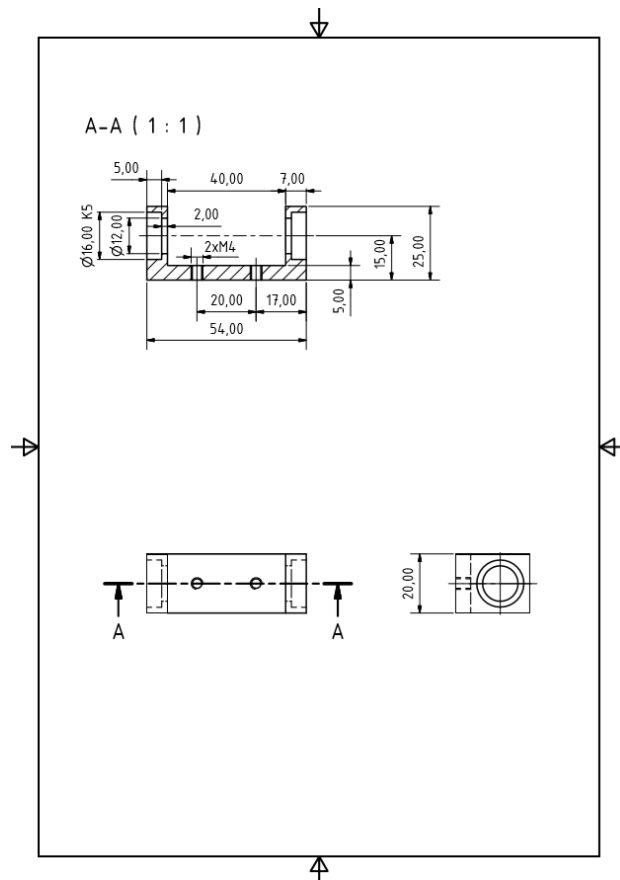
Příloha 1: Výkres – hřídele



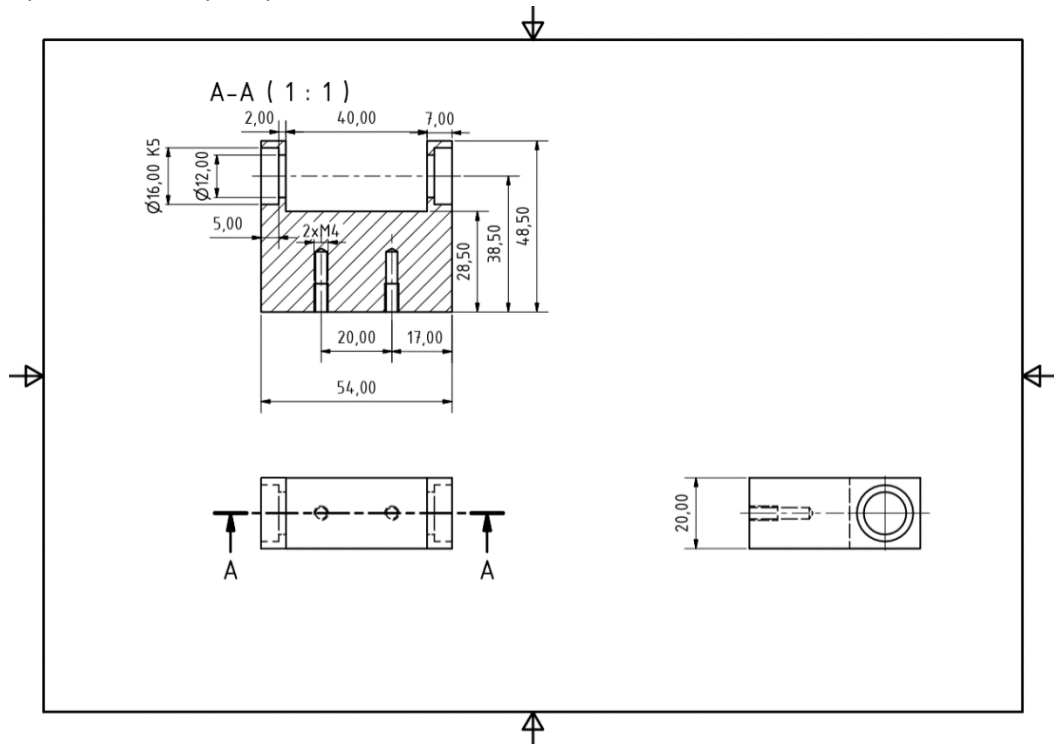
Příloha 2: Výkres – noha



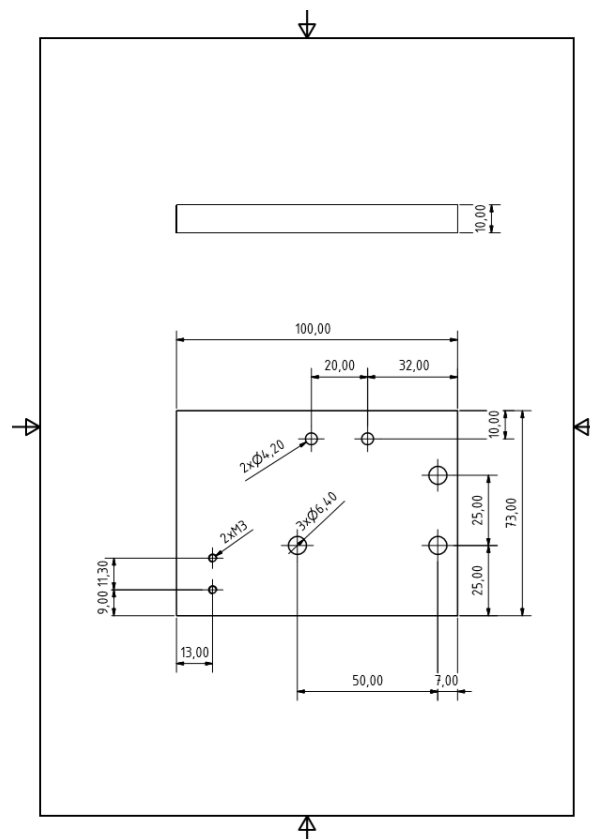
Příloha 3: Výkres – domek posuvný



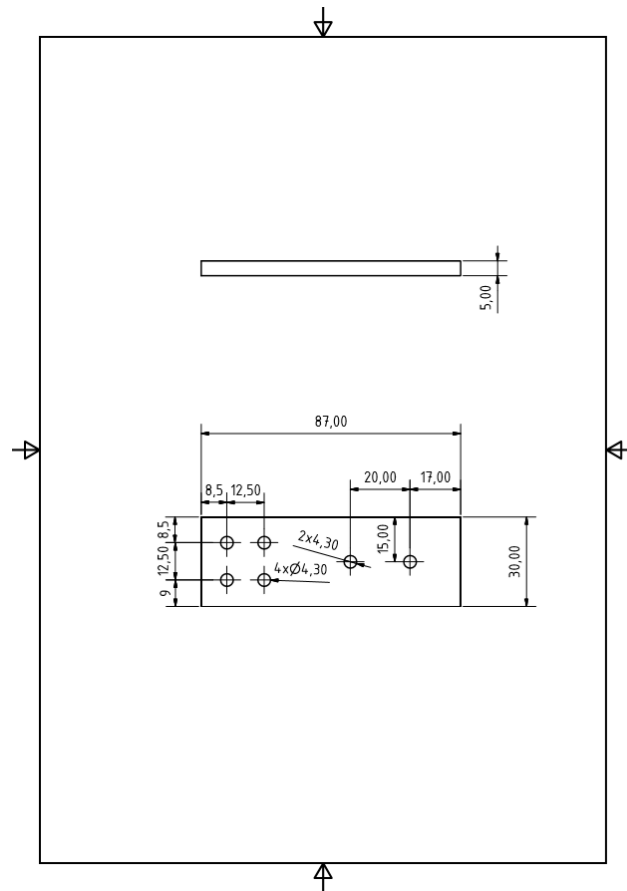
Příloha 4: Výkres – domek pevný



Příloha 5: Výkres – deska



Příloha 6: Výkres – podložka posuvná



Příloha 7: Výkres – sklo

