

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav přístrojové a řídicí techniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Laserová cesta pro endoskop

Bc. Barbora Spurná

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

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Spurná** Jméno: **Barbora** Osobní číslo: **459621**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojn**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**
Studijní program: **Strojn inženýrství**
Studijní obor: **Biomechanika a lékařské přístroje**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Laserová cesta pro endoskop

Název diplomové práce anglicky:

Laser path for endoscope

Pokyny pro vypracování:

1. Seznámit se se současnou konstrukcí optické cesty laseru v očním endoskopu.
2. Provést rešerši despeckle systémů.
3. Navrhnout vlastní řešení despeckle pro endoskop.
4. Provést ověřovací experiment navrženého systému.

Seznam doporučené literatury:

- [1] DAINTY, J. C., ed. Laser Speckle and Related Phenomena [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1975 [cit. 2020-10-11]. Topics in Applied Physics. ISBN 978-3-662-43207-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-662-43205-1.
- [2] SCULLY, Charles N. LASER TARGET SPECKLE ELIMINATOR. Apr. 16, 1985. USA. 4,511,220. Zapsáno Apr. 16, 1985.
- [3] TRISNADI, Jahja I. a Ming H. WU. [online]. In: . 2002-4-30, s. 131-137 [cit. 2020-10-11]. Dostupné z: doi:10.1117/12.463781.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **30.10.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **20.01.2021**

Platnost zadání diplomové práce: _____

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

_____ podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

30.10.2020

Datum převzetí zadání

Spurná

Podpis studentky

Anotace

Jméno autora:	Bc. Barbora Spurná
Název diplomové práce:	Laserová cesta pro endoskop
Anglický název:	Laser path for endoscope
Akademický rok:	2020/2021
Ústav:	Ústav přístrojové a řídicí techniky
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Bc. Šárka Němcová, Ph.D.
Bibliografické údaje:	počet stran: 84 počet obrázků: 55 počet tabulek: 15

Klíčová slova: endoskop, laser, optické vlákno, spekl, despekl, módy ve vláknech

Key words: endoscope, laser, optical fiber, speckle, despeckle, modes in waveguides

Abstrakt

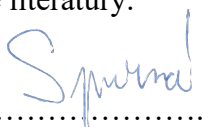
Tato diplomová práce se zabývá eliminací speklů v osvětlovací soustavě prototypového očního endoskopu. Hlavní náplní je provést rešerši despeklovacích systémů a navrhnout vlastní řešení pro redukci speklů. Vybranou metodu je nutné experimentálně ověřit.

Abstract

The aim of this diploma thesis is elimination of speckles in the fiber optic illuminator of prototype eye endoscope. Main focus has been invested in to the thorough research of despeckle systems and in to the development of technical solution reducing the speckles. The chosen method has been experimentally tested.

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Bc. Šárky Němcové, Ph.D. a s literaturou, jež je uvedena v seznamu použité literatury.“

Praha 4.1.2021



.....

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala mé vedoucí diplomové práce Ing. Bc. Šárce Němcové, Ph.D. za věnovaný čas, cenné rady, trpělivost a lidský přístup při tvoření této práce. Dále bych chtěla poděkovat rodině a přátelům za podporu při studiu.

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	5
1 Úvod	8
2 Rešerše	9
2.1 Optická vlákna	9
2.1.1 Dělení optických vláken	13
2.1.2 Materiály optických vláken	16
2.1.3 Spojování optických vláken	16
2.2 Módy ve vlákně	19
2.3 Jevy ovlivňující šíření světla v optických vláknech	27
2.3.1 Disperze	27
2.3.2 Absorpce	29
2.3.3 Rozptyl	29
2.3.4 Další ztráty	31
2.3.5 Ztráty na konektorech	32
2.4 Spekly	33
3 Eliminace specklu	35
3.1 Despeklování pomocí pohyblivých prvků	35
3.2 Vláknové despekly	37
3.3 Metoda vibrování	39
3.3.1 Využití válcového piezoelektrického měniče	39
3.4 Změna parametrů optického vlákna	40
4 Experimentální část	41
4.1 Prototypový endoskop	41
4.2 Použité komponenty	42
4.3 Vibrování vláknem	44
4.3.1 První set experimentů	46
4.3.2 Druhý set experimentů	51
4.3.3 Třetí set experimentů	61
4.4 Frekvenční analýza	69
4.4.1 Výsledky z frekvenční analýzy	70
5 Diskuse	75
5.1 Zhodnocení experimentálních výsledků	75
5.2 Zhodnocení frekvenční analýzy	78
6 Závěr	80
7 Literatura	82

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Jednotky	Název
a	$[m]$	Poloměr jádra
A_u	$[dB/m]$	Měrný útlum světelného signálu
α	$[^\circ]$	Aperturní úhel
b	$[-]$	Zobecněný index lomu
β	$[m^{-1}]$	Konstanta šíření
γ	$[^\circ]$	Úhel dopadu na rozhraní jádra a obalu
γ'	$[^\circ]$	Úhle lomu
γ_m	$[^\circ]$	Mezní úhel
d	$[m]$	Průměr jádra
Δt	$[s/m]$	Relativní zpoždění módu na jednotku délky vlákna
e	$[m]$	Odchylka soustřednosti
E	$[-]$	Vektor elektrického pole
H	$[-]$	Vektor magnetického pole
k	$[-]$	Vlnový vektor
l	$[-]$	Azimutální módové číslo
L	$[m]$	Délka optického vlákna
λ	$[m]$	Vlnová délka
λ_c	$[m]$	Mezní vlnová délka
m	$[-]$	Radiální módové číslo
M_{GI}	$[-]$	Počet módů pro vlákno se gradientním indexem lomu
M_{SI}	$[-]$	Počet módů pro vlákno se skokovou změnou indexu lomu
n_0	$[-]$	Index lomu okolního prostředí
n_1	$[-]$	Index lomu jádra optického vlákna
n_2	$[-]$	Index lomu obalu optického vlákna

N	$[-]$	Efektivní index lomu
NA	$[-]$	Numerická apertura
r	$[-]$	Amplitudová odrazivost
R	$[-]$	Energiová odrazivost
T	$[-]$	Energiová propustnost
t	$[-]$	Amplitudová propustnost
τ	$[s]$	Perioda
v_f	$[m/s]$	Fázová rychlost
v_g	$[m/s]$	Grupová rychlost
V	$[-]$	Normalizovaná frekvence
ϕ_{e1}	$[W]$	Vstupní světelný výkon
ϕ_{e2}	$[W]$	Výstupní světelný výkon
ω	$[m/s]$	Fázová rychlost

Zkratka	Význam zkratky
APC	Typ konektoru (Angled Physical Contact)
FC	Typ konektoru (Fixed/ Ferrule Connection)
GRIN	Gradientní změna indexu lomu
HCS	Hard Clad Silica
HPCS	Hard Plastic Clad Silica
IR	Infračervené světlo
LC	Typ konektoru (Lucent Connector)
LP	Lineárně polarizovaný mód
LSR	Laser speckle reducer
MM	Multimódové/ mnohavidové optické vlákno
PC	Typ konektoru (Physical Contact)
PDM	Polarizační módová disperze

PMMA	Polymethylmetakrylát
POF	Plastic Optical Fiber
PZT	Piezoelektrický měnič
SC	Typ konektoru (Subscriber Connector)
SI	Skoková změna indexu lomu (step index)
SM	Singlemódové/ jednovidové optické vlákno
ST	Typ konektoru (Straight Tip)
TE	Transverzálně elektrické pole
TEM	Transverzálně elektromagnetické pole
TM	Transverzálně magnetické pole
UPC	Typ konektoru (Ultra Physical Contact)
UV	Ultrafialové světlo

1 Úvod

V současné době, kdy trávíme spoustu času u počítače, či čtením zpráv z malého displeje na mobilním telefonu, tak se počet lidí s poruchou zraku zvyšuje. Převážně se jedná o krátkozrakost, kdy lidé nedokážou dostatečně zaostřit na dálku [1]. Stále většina lidí preferuje brýle, či kontaktní čočky. Avšak aplikace kontaktních čoček může být občas nepohodlná a i bolestivá, zároveň nošení brýlí nese s sebou také určitá úskalí při sportovních aktivitách. Proto se lidé čím dál tím častěji uchylují k laserovým operacím. K očním operacím samozřejmě nedochází jen v těchto případech, ale i při úrazech, či jiných poškozeních částí oka.

Při vyšetřování a také při očních operacích se typicky používá mikroskop, kterým se pozoruje vnitřní část oka skrz pacientovu zornici. Avšak v případě neprůhledného předního segmentu oka, čočky či sklivce se přechází na oční endoskop. Tím je možné zachytit okrajové části sítnice, či zadní stranu řasnatého tělíska, kam mikroskop už nevidí.

Tato diplomová práce je zaměřena na vývoj prototypového očního endoskopu, na které spolupracuje ČVUT s podnikem STAVUS a.s. Výhodou tohoto očního endoskopu je minimalizování invazivního otvoru do pacientova oka, a navíc vhodným uspořádáním očního endoskopu stačí pouze jeden otvor. Propojením osvětlení, operačního laseru a kamery v jednom zařízení se usnadňuje i práce chirurgům, kterým se tím uvolní jedna ruka.

Diplomová práce bude zaměřena na vylepšení osvětlovacího systému, který je zasažen tzv. speklý a obraz je tedy značně nečitelný. V teoretické části se zaměříme na bližší popis a chování módů v optickém vlákne a jejich vliv na tvorbu speklů. Budou popsány možné eliminace speklů a následně v experimentálním oddílu bude navržen a experimentálně ověřen despekl systém pro daný oční endoskop.

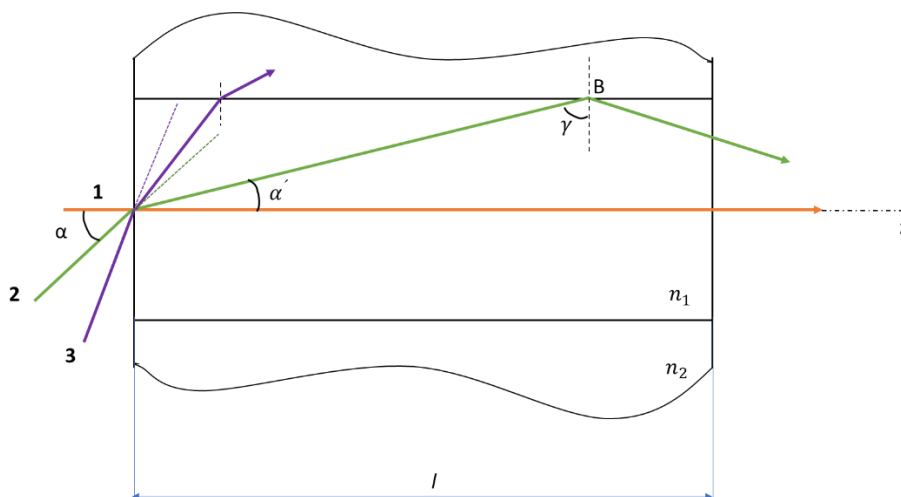
2 Rešerše

Teoretická část této diplomové práce bude zaměřena na optická vlákna, jejich dělení, strukturu a využití. Dále bude věnována pozornost ztrátám v optických vláknech, budou zde podrobněji diskutovány módy ve vláknech a s nimi spojený vznik speklů. Zmíněna bude eliminace speklů, které bude věnována i praktická část.

2.1 Optická vlákna

Optická vlákna se často používají v komunikaci, k osvětlení v mikroskopii, medicínském zobrazování či endoskopii pomocí laseru.

Optické vlákno funguje jako dielektrický vlnovod určen k šíření elektromagnetických vln ve směru osy daného vlákna. Popis světla v optickém vlákně pomocí geometrické optiky je možný pouze tehdy, když poloměr vlákna je mnohem větší než vlnová délka použitého světla. Světlo je vázáno uvnitř vlákna díky tomu, že na rozhraní dvou prostředí s odlišným indexem lomu dochází k úplnému vnitřnímu odrazu. I přesto nezůstává všechna energie v původním prostředí, ale část energie pronikne do druhého prostředí. [2]



Obrázek 1: Chod paprsků optickým vláknem.

Optickým vláknem se šíří vlna (reprezentována paprsky) několika způsoby (Obrázek 1). První paprsek se nazývá axiální a šíří se ve směru osy vlákna bez jakýchkoliv odrazů.

Paprsek označen číslem 2 vstupuje do vlákna pod úhlem α a dle Snellova zákona se z prostředí před vláknem s indexem lomu n_0 láme do jádra s indexem lomu n_1 . Snellův zákon vypadá následovně:

$$n_0 \sin \alpha = n_1 \sin \alpha' \quad (1)$$

Z obrázku (Obrázek 1) je patrné, že při vstupním úhlu α dochází na hranici jádra a obalu, v bodě B, k úplnému vnitřnímu odrazu. Aby mohlo dojít k úplnému vnitřnímu odrazu, tak musí platit, že jádro má vyšší hodnotu indexu lomu než obal ($n_1 > n_2$). Dále musí být splněna podmínka: $\gamma \geq \gamma_m$, kde γ_m je mezní úhel, tedy minimální úhel, při kterém dochází k úplnému vnitřnímu odrazu na rozhraní dvou prostředí. Mezní úhel γ je tím menší, čím více se od sebe liší hodnoty indexů lomu. To vede ke zvětšení rozsahu úhlů, které umožňují úplný vnitřní odraz na rozhraní dvou prostředí. Kvůli rozdílným hodnotám úhlu dopadu a odrazu jednotlivých vln se liší i doba proběhnutí vlny skrze vlákno. Pokud rovinná vlna svírá s osou vlákna úhel α' , tak ve vlákně o délce l urazí dráhu $l / \cos \alpha'$. Rovinná vlna dále dopadá pod úhlem γ na rozhraní dvou prostředí (jádra a obalu) s různou hodnotou indexu lomu. Na tomto rozhraní platí Snellův zákon (2).

$$n_1 \sin \gamma = n_2 \sin \gamma' \quad (2)$$

Kde n_1 je index lomu jádra a n_2 označuje index lomu obalu. Již zmíněný úhel γ je úhel dopadu na rozhraní a γ' je úhel lomu. Aby byla vlna dále vláknem vedena, musí být splněny výše zmíněné podmínky pro úplný vnitřní odraz. To znamená, že rovinná vlna se neláme do druhého prostředí, ale odráží se do původního prostředí, tedy do jádra. Proto úhel $\gamma' = 90^\circ$ a rovnici (2) je možné přepsat do tvaru (3).

$$\sin \gamma = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

Z goniometrie víme, že platí vztah (4)

$$\sin \alpha' = \cos \gamma = \sqrt{1 - \sin^2 \gamma} \quad (4)$$

Při dosazení rovnice (3) do rovnice (4) získáme vztah:

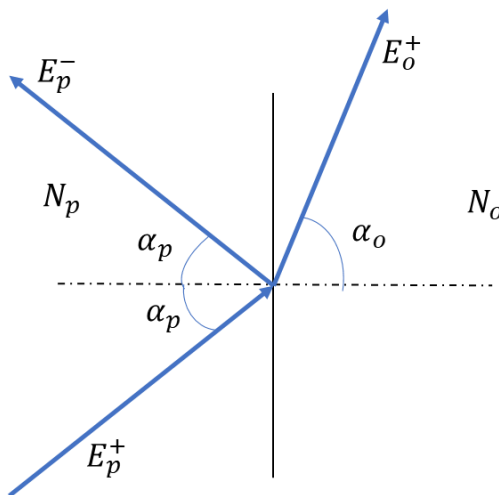
$$\sin \alpha' = \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}} \quad (5)$$

Následně do vztahu (1) dosadíme rovnici (5).

$$n_0 \sin \alpha = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (6)$$

Vztah (6) je známý jako numerická apertura (dále označována jako NA). NA definuje maximální (aperturní) úhel α , pod kterým může vlna vstupovat do vlákna a být jím dál vedena. NA zdroje světla by neměla být vyšší, než je NA optického vlákna, aby byla dosažena maximální účinnost vedení. [3]

Vlna dopadající na rozhraní jádra a obalu pod větším úhlem se vláknem dále nešíří, protože se část energie láme do druhého prostředí (paprsek číslo 3, Obrázek 1). Jak moc se vlna dopadající na rozhraní láme do druhého prostředí, či odráží, lze popsat pomocí Fresnelových vzorců [4] určených pro výpočet propustnosti a odrazivosti na rozhraní dvou dielektrik. (Obrázek 2).



Obrázek 2: Rozpad dopadající rovinné vlny na lomenou a odraženou vlnu.

Fresnelovy vzorce udávají poměry amplitud vektorů elektrického pole \vec{E} v odražené a prošlé vlně ku amplitudě vektoru elektrického pole vlny dopadající na rovinné rozhraní.

Amplitudová odrazivost vlny TE (transverzálně elektrické) je $r = \frac{E_p^-}{E_p^+}$ a rovnice $t = \frac{E_o^+}{E_p^+}$

udává amplitudovou propustnost vlny TE. Vektor elektrického pole je možné rozložit na složku rovnoběžnou (TM) a kolmou (TE) k rovině dopadu. Fresnelovy amplitudy rovnoběžné a kolmé složky \vec{E} jsou dány následujícími vztahy, které jsou možné uvádět ve dvou podobách s využitím Snellova zákona v podobě: $N_p \sin \alpha_p = N_o \sin \alpha_o$

$$r_{TM} = -\frac{\operatorname{tg}(\alpha_p - \alpha_o)}{\operatorname{tg}(\alpha_p + \alpha_o)} \quad r_{TM} = -\frac{N_o \cos \alpha_p - N_p \cos \alpha_o}{N_o \cos \alpha_p + N_p \cos \alpha_o} \quad (7)$$

$$r_{TE} = -\frac{\sin(\alpha_p - \alpha_o)}{\sin(\alpha_p + \alpha_o)} \quad r_{TE} = -\frac{N_p \cos \alpha_p - N_o \cos \alpha_o}{N_p \cos \alpha_p + N_o \cos \alpha_o}$$

$$t_{TM} = \frac{2 \cos \alpha_p \sin \alpha_o}{\sin(\alpha_p + \alpha_o) \cos(\alpha_p - \alpha_o)} \quad t_{TM} = \frac{2 N_o \cos \alpha_p}{N_o \cos \alpha_p + N_p \cos \alpha_o} \quad (8)$$

$$t_{TE} = \frac{2 \cos \alpha_p \sin \alpha_o}{\sin(\alpha_p + \alpha_o)} \quad t_{TE} = \frac{2 N_p \cos \alpha_p}{N_p \cos \alpha_p + N_o \cos \alpha_o}$$

kde úhel α_p je úhel dopadu světelné vlny na rozhraní a úhel α_o udává úhel lomu. Index lomu N_p je vztažen k prostředí dopadové a odražené vlny a index lomu pro prostředí lomené vlny je označen jako N_o .

Energiová odrazivost R a propustnost T udávají poměry výkonů, které se odrážejí, nebo procházejí plošnou jednotkou rozhraní vůči dopadajícímu výkonu. Pro odrazivost v obou směrech platí (9).

$$R = r^2 \quad (9)$$

Vztahy pro propustnost v rovnoběžném a kolmém směru na rozhraní jsou následující (10).

$$T_{TM} = \frac{\sin 2\alpha_o \sin 2\alpha_p}{\sin^2(\alpha_p + \alpha_o) \cos^2(\alpha_p - \alpha_o)} \quad T_{TE} = \frac{\sin 2\alpha_o \sin 2\alpha_p}{\sin^2(\alpha_p + \alpha_o)} \quad (10)$$

Z rovnic (9) a (10) vidíme, že T a R jsou pro rovnoběžný a kolmý směr různé, proto závisí jejich hodnoty na polarizaci dopadající vlny. Platí, že po odrazu či lomu je světlo částečně polarizováno.

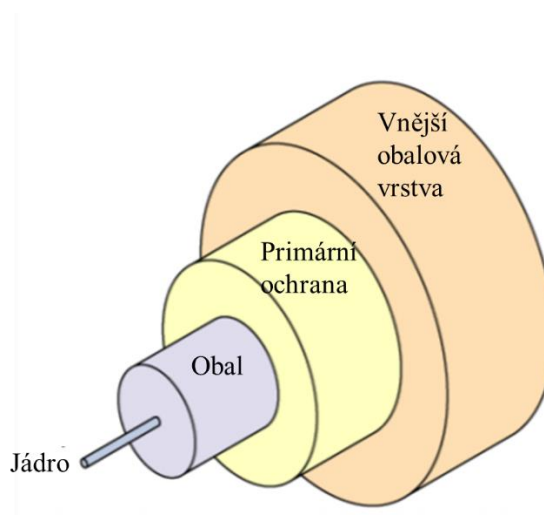
Pokud \vec{E} svírá s rovinou dopadu obecný úhel δ , pak rozložíme \vec{E} na složky TE a TM. Odrazivost a propustnost dané vlny dále rozdělíme na rovnoběžné a kolmé složky a získáme vztahy

$$R = R_{TE}\sin^2\delta + R_{TM}\cos^2\delta \qquad T = T_{TE}\sin^2\delta + T_{TM}\cos^2\delta \quad (11)$$

Pro dopad pod úhlem větším, než je mezní úhel γ_m na opticky řidší prostředí, je úhel lomu 90° . V tomto případě je $R = 1$. [4]

2.1.1 Dělení optických vláken

Optické vlákno se skládá ze čtyř základních částí: jádra, obalu jádra (plášť jádra), primární ochrany a sekundární ochrany. Jádrem se šíří vlna. Obal jádra má primárně podporovat úplný vnitřní odraz na rozhraní jádra a obalu. Kvůli tomu se vyrábí z materiálů o nižším indexu lomu, než je zhotovené jádro. Primární ochrana chrání vlákno proti fyzikálnímu poškození. Mechanickou ochranu celého vlákna zajišťuje vnější obalová vrstva (sekundární ochrana).



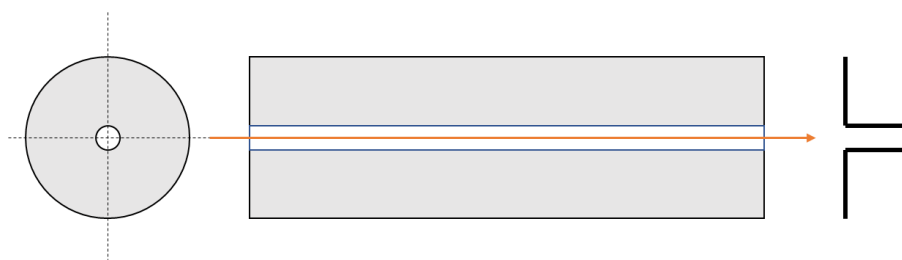
Obrázek 3: Struktura optického vlákna.

Dle velikosti, tvaru a indexu lomu jádra a obalu se odvíjí šíření světla vláknem. Jádro může být jakéhokoliv tvaru, ale většina jader má kruhovitý průřez. Ovšem existují i elipticky tvarovaná vlákna. Dle rozměrů a geometrie se dělí optická vlákna na dva hlavní typy, konkrétně multimódová (mnohomódová/mnohovidová) (MM) a jednomódová

(jednovidová) vlákna (SM). Bližší specifikace módů optických vláken bude popsána v kapitole 2.2.

SM optická vlákna (Obrázek 4) jsou obecně malého průměru a jsou schopná vést pouze jeden mód (kapitola 2.2). Tato vlákna mají konstantní index lomu po celém průměru jádra. Dochází u nich k malé disperzi světla, konkrétně se u SM vláken projevuje polarizační a chromatická disperze (kapitola 2.3.1). Naopak se zde neprojevuje módová disperze. Vlákna s jedním módem se vyznačují malou NA a používají se především v telekomunikacích na delší vzdálenosti. [3]

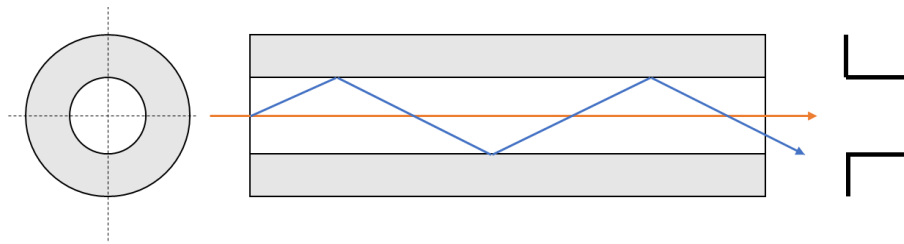
SM optická vlákna se široce využívají zvláště kvůli tomu, že na jejich výstupu je jeden mód, který je dokonce podobný Gaussovu svazku. Avšak SM vlákna lze navázat jen malé množství energie a jsou náchylná na poškození. Z těchto důvodů se v některých případech dává přednost MM optickým vláknům.



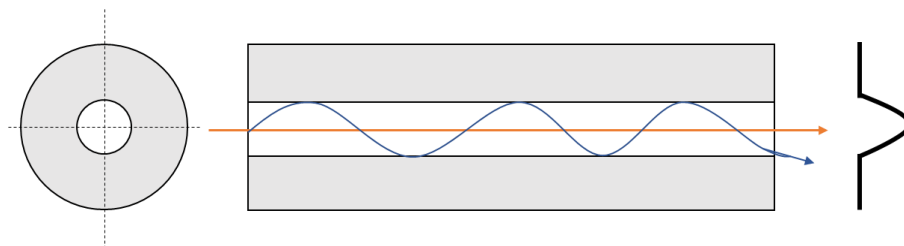
Obrázek 4: Jednomódové vlákno se skokovým průběhem indexu lomu.

MM optická vlákna mají naopak větší průměr jádra, čímž jsou schopná přenášet více módů i vyšších řádů. MM vlákna se dělí dle typu indexu lomu jádra na vlákna se skokovou změnou indexu lomu (SI – „step index“) a vlákna s plynulou změnou indexu lomu, tzv. gradientní (GRIN). U vláken se skokovou změnou indexu lomu (Obrázek 5) je přenos zajištěn úplným vnitřním odrazem na rozhraní jádro/obal. Gradientní vlákna mají index lomu proměnný a to tak, že se od středu jádra index lomu parabolicky snižuje až k rozhraní jádro/obal (Obrázek 6). Po celém poloměru jádra dochází tedy k neustálému lomu světla. [3]

MM vlákna mají vyšší NA, zároveň jsou levnější, ale oproti SM vláknům zde dochází k větším ztrátám energie vlivem většího útlumu a disperze (kapitola 2.3), a proto se používají na kratší vzdálenosti. Vzhledem k vysoké NA se do vlákna snadněji navazuje energie. [3]



Obrázek 5: Multimódové vlákno se skokovou změnou indexu lomu (SI).



Obrázek 6: Multimódové vlákno s gradientní změnou indexu lomu.

V příčném řezu je možné vidět, že se paprsky v optických vláknech šíří dvěma způsoby. V prvním případě kříží optickou osu a ve druhém případě optickou osou nikdy neprojdou (Tabulka 1). [3]

	Meridionální paprsek	Mimoosový paprsek
SI vlákna		
GRIN vlákna		

Tabulka 1: Meridionální a mimoosové paprsky v MM vláknech. [3]

Následující kapitoly budou pojednávat o vlastnostech, které ovlivňují elektromagnetické vlnění ve vláknech. Konkrétně se jedná o materiály vláken a o módy, někdy také označované jako vidy či režimy vlákna.

2.1.2 Materiály optických vláken

Dle použité oblasti vlnových délek k přenosu v optickém vlákne se vybírá materiál jádra optického vlákna.

Nejkvalitnější vlákna určená pro dálkový přenos se vyrábějí z taveného křemene (SiO_2), ze kterého je zhotoveno jádro i obal. Křemen může být dopován různými příměsemi např. germaniem nebo fosforem pro zvýšení indexu lomu a borem či fluorem ke snížení indexu lomu.

MM optická vlákna se převážně používají skleněná nebo plastová. Mezi významné skupiny optických vláken patří vlákna s označením HCS (Hard Clad Silica) a HPCS (Hard Plastic Clad Silica).

HCS vlákna mají jádro i obal z čistého skla, kde obal je dále dopován vhodnými příměsemi. Obal je pokrytý primární ochranou z tvrdého polymeru. Tento typ vláken se používá pro rozsahy vlnových délek od UV přes viditelné pásmo do IR oblasti. Konstrukce těchto optických vláken zaručuje vysokou pevnost.

Levnější variantou HCS jsou HPCS vlákna. Obal těchto vláken je vyroben z tvrdého polymeru a jádro je tvořeno SiO_2 .

Poslední a nejlevnější skupinou jsou celoplastová optická vlákna POF (plastic optical fiber), která mají největší útlum. Jádro i obal je z plastu, nejčastěji se jedná o PMMA (polymethylmetakrylát).

2.1.3 Spojování optických vláken

Kvůli omezené délce optických vláken či kvůli potřebě navázání různých typů optických vláken je nutné spojit konce vláken tak, aby se světlo z jednoho konce vlákna mohlo dostat do druhého vlákna, aniž by došlo k velkým ztrátám energie. Spoje mohou být rozebíratelné či nerozebíratelné. Do kategorie nerozebíratelných spojů patří svařování, které je nejlepším spojem a zároveň nejdražším kvůli nutnosti speciálního zařízení. Zároveň je velice obtížné svařovat optická vlákna v terénu. Rozebíratelné spoje poskytují

jednoduché a opakovatelné spojování a rozpojování optických vláken. V této práci se budeme zabývat rozebíratelnými spoji, ke kterým se řadí optické konektory.

Při přenosu světla závisí na vlnové povaze světla, protože při změně velikosti jádra dochází ke změně profilu módů. Část světla z prvního vlákna se nedostane do obalu druhého vlákna kvůli nedostatečnému přizpůsobení vedených módů z prvního vlákna do druhého vlákna.

Spolehlivé připojení vyžaduje, aby konce vláken byly opticky hladké a přesně zarovnané. Ke správnému zarovnání konců vláken slouží tzv. klíčování (Obrázek 7). U spojování optických vláken pomocí konektorů je důležité hlídat soustřednost jader. Aby bylo možné dál vést signál, je nutné dodržet podmínku $e \ll d$. Kde e je odchylka soustřednosti a d označuje průměr jádra. Dostačující je, aby druhé vlákno mělo průměr jádra a NA stejnou nebo vyšší, než jsou hodnoty těchto parametrů prvního vlákna. Pak by měl být výkon přenosu ve druhém vlákne stejný, ale s nižším jaselem. [12]



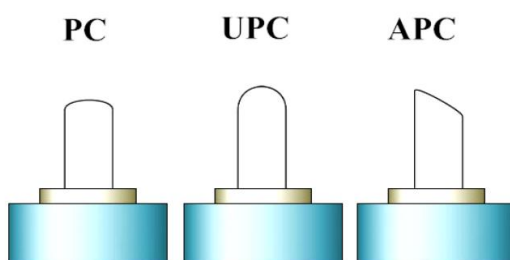
Obrázek 7: Konektor s upevňovacím systémem. [13]

Mezi tři hlavní součásti všech konektorů patří ferule, tělo konektoru a spojovací mechanismus. Ferule je nejčastěji válcová komponenta zajišťující přesné vycentrování optického vlákna. Často se vyrábí z keramiky či nerezové oceli. Tělo konektoru drží feruli a připojuje se k obalu konektoru. Tělo konektoru je nejčastěji zhotoveno z plastu nebo kovu. Spojovací mechanismus může být tvořen např. bajonetem a slouží k udržení jedné polohy konektoru.

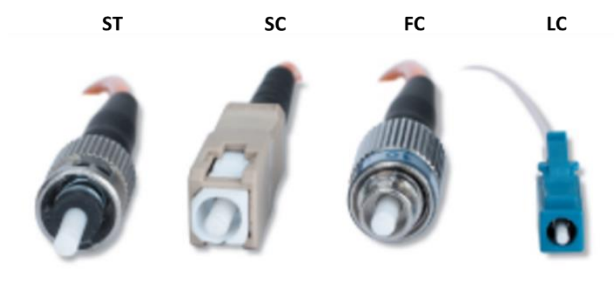
Pro aplikace se SM vláknem se používají konektory typu FC, SC a LC. Konektory typu ST jsou převážně určeny pro spojování MM vláken. Dále existuje mnoho variací těchto typů.

U ST konektorů se optické vlákno umísťuje do válcovité keramické ferule zajišťující těsný kontakt konců vláken. Vlákno se vkládá do rychloupínacího odpruženého bajonetového konektoru.

Dalším typem jsou FC (Fixed connection) konektory s rovinným kontaktem. Avšak konce vláken se obvykle brousí, aby byl vytvořen zaoblený povrch a konce vláken se dotýkaly jen v jednom bodě. Konektory s bodovým kontaktem snižují zpětný odraz, který jinak snižuje kvalitu přenášeného signálu. Zpětný odraz je potlačen, protože díky zaoblenému konci vlákna se vlna odrazí pod větším úhlem. Zpětně odražená vlna je vedena z jádra do obalu optického vlákna. FC konektory jsou odolné vůči silným vibracím kvůli závitovému připojení a díky klíčovému systému jsou přesně napolohované konce vláken. Konektory označené zkratkou APC (Angled Physical Contact) mají konce vláken sešikmené. Tímto způsobem se dosahuje opravdu vysokého tlumení zpětného toku. Výroba konců vláken s přesně daným úhlem náklonu je velice obtížná, a tedy i nákladná. Úhlové konektory typu FC se označují jako FC/APC. Dále se mohou konce konektorů leštit do oblých tvarů, pak se jedná o typy PC či UPC (Obrázek 8). [12]



Obrázek 8: Typy konektorů dle leštěného povrchu. [12]



Obrázek 9: Porovnání základních typů konektorů.

SC jsou univerzální konektory a LC jsou konektory s malou ferulí pro vlákna o maximálním průměru 1,25 mm. Oba typy konektorů se užívají převážně pro SM vlákna. [12]

2.2 Módy ve vlákně

Mód označuje specifické rozdělení elektromagnetického pole ve vlnovodu a určuje stupeň přerozdělení energie v prostoru. Jednotlivé módy jsou elektromagnetické vlny lišící se geometrií pole. Aproximací módu je paprsek, který se používá v geometrické optice a je znázorňován jako přímka. Lineární kombinací několika módů je možné popsat libovolné pole uvnitř optického vlákna. [5] [6]

V optickém vlákně se vyskytují tři typy módů v závislosti na NA: vedené módy, vyzářující módy a tunelující módy.

Mód je veden, pokud je navázán při menší NA, než je NA optického vlákna. Vedené módy jsou vymezeny konstantou šíření β , která se pohybuje mezi úhlem pro osový mód a mezní vedený mód, který je určen úhlem α z rovnice (6). Každý mód má svou vlastní hodnotu β . K vyvázání tohoto módu z jádra je zapotřebí velkého ohybu, při kterém dojde k vyvázání jen části energie. Zbytek energie je veden dál vláknem. [2] [5] [6]

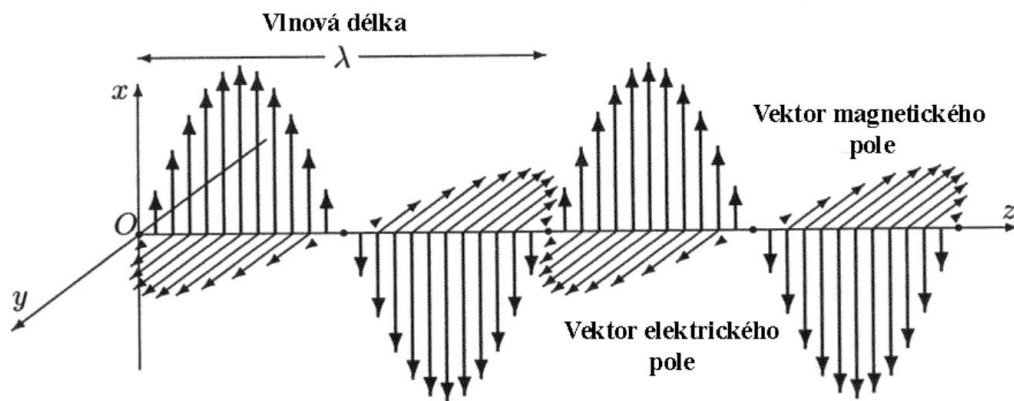
$$\frac{2\pi}{\lambda} n_2 \leq \beta \leq \frac{2\pi}{\lambda} n_1 \quad (12)$$

Vyzářující módy se do vlákna navazují pod větším úhlem, než je NA, ani nespĺňují podmínku úplného vnitřního odrazu na rozhraní jádro/obal. Důsledkem je vyvázání světla z vlákna, čímž dojde ke ztrátě energie. [5]

Poslední skupinou jsou tunelující nestabilní módy, které se navazují pod menším úhlem, než je NA, ale nespĺňují podmínku úplného vnitřního odrazu. Zde dochází k vyvázání z vlákna velmi snadno. [5]

Ve vlnovodech se módy dělí dle rozložení elektromagnetického pole na: transverzálně elektromagnetické (TEM), transverzálně elektrické (TE), transverzálně magnetické (TM). Pro TE platí, že elektrický vektor je kolmý ke směru šíření a složka vektoru elektrického pole $E_z = 0$. Někdy je TE mód nazýván magnetickým módem, protože se

podél šířící se vlny vyskytuje pouze magnetické pole. Obdobně to platí pro TM (někdy též elektrický mód), kde vektor magnetického pole je kolmý ke směru šíření a $H_z = 0$. TEM mód ($E_z, H_z = 0$) se vyskytuje pouze v koaxiálních vedeních. Složky elektrického/magnetického pole se nevyskytují ve směru šíření vlny. Hybridními módy značíme takové módy, kdy při součtu TE a TM ani jedna ze složek nezmizí. Jedná se o módy HE, kde E_z, H_z mají stejnou orientaci. V opačném případě se hybridní mód značí EH. [3]



Obrázek 10: TEM mód.

Distribuce elektromagnetického pole se popisuje pomocí dvou celých čísel l a m . Číslo l je azimutální módové číslo a označuje azimutální variace elektromagnetického pole. Číslo m zastupuje radiální módové číslo a specifikuje možnosti pole v radiálním směru. [3]

Konkrétně pro vlákna se skokovou změnou indexu lomu (SI) a s kruhovým průřezem existují pole módů TE_{lm} , TM_{lm} , EH_{lm} , HE_{lm} a jejich lineární kombinace. [3]

K charakterizaci módů šířících se ve vláknech se převážně využívají dva zobecněné parametry: normalizovaná frekvence V a zobecněný index vedení b , pro které platí následující vztahy vztahované k vláknu se skokovou změnou indexu lomu (SI).

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi}{\lambda} a \cdot NA \quad (13)$$

$$b = \frac{N^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} \quad (14)$$

kde a je poloměr jádra, λ označuje vlnovou délku šířící se vlny, index lomu jádra reprezentuje n_1 a index lomu obalu optického vlákna je n_2 . NA zastupuje hodnotu numerické apertury a N je efektivní index lomu, který se počítá dle rovnice (15). [3]

$$N = \frac{\beta}{k} \quad (15)$$

V rovnici (15) je písmenem β označena konstanta šíření (rovnice (12)) a k je vlnový vektor (rovnice (20)).

Při dané normalizované frekvenci V se může v optickém vlákně nacházet jen konečný počet různých typů módů. Počet těchto módů vlákna je zhruba úměrný ploše průřezu jádra (rovnice (13)). [3]

Čím vyšší je hodnota normalizované frekvence V , tím existuje větší množství vedených módů v daném vlákně. Pro SM vlákna je $V \leq 2,405$, což značí existenci jednoho vedeného módu s možností různých směrů polarizace. Pro vlákna s kruhovým průřezem je dominantním módem HE_{11} (Obrázek 11) a ostatní módy se v jádře SM vlákna nevyskytují. [3]

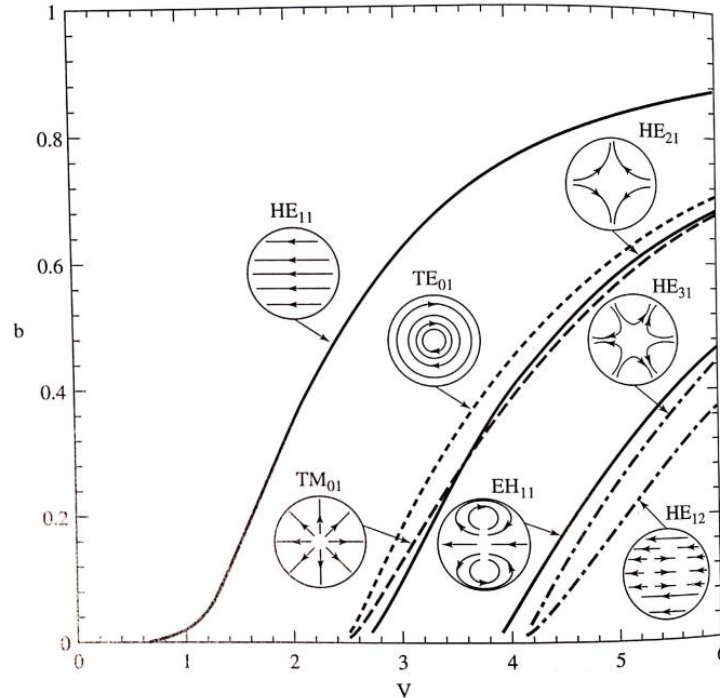
Pro MM vlákna se hodnota normalizované frekvence V pohybuje nad hodnotou 2,405 ($V \geq 2,405$) a počet módů je v takovém vlákně úměrný druhé mocnině normalizované frekvence (V^2) [7]. Počet módů ve vlákně se skokovou změnou SI a gradientní změnou indexu lomu GI se získá z následujících vztahů:

$$M_{SI} = \frac{4V^2}{\pi^2} \quad (16)$$

$$M_{GI} = \frac{V^2}{2} \quad (17)$$

Z obrázku (Obrázek 11) vidíme, že pro MM vlákno se skokovou změnou indexu lomu existují další módy. Módy TE_{01} a TM_{01} přestanou existovat pod hodnotou $V = 2,405$. Módy TE_{01} , TM_{01} a HE_{21} nejsou lineárně polarizované, ale jejich superpozicí může vzniknout lineárně polarizované pole. [3]

Další tři módy (HE_{12} , EH_{11} a HE_{31}) se nacházejí v intervalu $3,83 < V < 5,14$. Ve slabě vedených vláknech se tyto módy degenerují, ale superpozicí těchto polí vzniknou přibližně lineárně polarizovaná pole. [3]



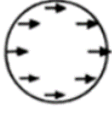



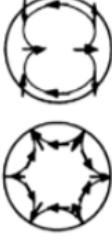

Obrázek 11: Závislost zobecněných parametrů b na V [3].

Módová čísla l a m se používají jak k popisu tradičních módů (TEM, TE, TM), tak i k popisu lineárně polarizovaných (LP) módů. LP módy se využívají pro jednodušší charakterizaci módů optických vláken. Módové číslo l , obdobně jako u klasických módů, informuje o úhlových variacích LP pole. Pole LP módů se mění jako $\sin l\phi$ nebo $\cos l\phi$. Pokud je $l = 0$, pak je LP pole nezávislé na úhlu ϕ . Indexem m se specifikuje maximální počet polí v radiálním směru. Pro dané l a m existují dva možné stavy polarizace – lineární polarizace ve směru osy x a ve směru osy y , kde jsou možné úhlové variace ($\sin l\phi$ nebo $\cos l\phi$). Z toho vyplývá, že pro každou sadu l a m jsou k dispozici čtyři možné módy. Značení módů je následující:

$$LP_{lm} \leftrightarrow HE_{l+1m}, EH_{l-1m} \quad \text{pro } l \neq 1$$

$$LP_{1m} \leftrightarrow HE_{2m}, TE_{0m}, TM_{0m} \quad \text{pro } l = 1$$

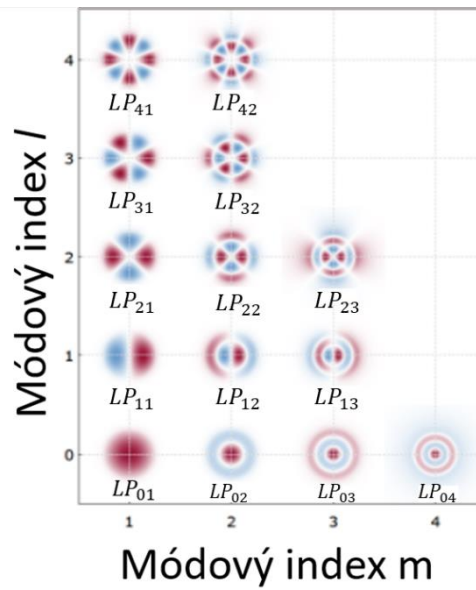
Rozdíl mezi značením LP módů a tradičních módů a také jejich vzájemný vztah s grafickým znázorněním rozložení elektrického pole lze vidět v tabulce (Tabulka 2).

Označení LP módů	Označení tradičních módů	Rozložení elektrického pole	Rozložení intenzity elektrického pole ve směru xy
LP_{01}	HE_{11}		
LP_{11}	TE_{01} TM_{01} HE_{21}		
LP_{21}	EH_{11} HE_{31}		

Tabulka 2

Za předpokladu bezztrátového optického vlákna mají jednotlivé módy stálý profil intenzity, které jsou znázorněny v tabulce (Tabulka 2). Nejjednodušším módem a zároveň základním módem pro LP pole je LP_{01} , který má profil intenzity podobný Gaussovu svazku. Z obrázku (Obrázek 12) je znatelné, že módy LP_{0m} jsou přibližně rozprostřené po celém průřezu jádra, a tudíž mají navzájem velmi podobné vlastnosti. Všimněme si módů LP_{23} a LP_{04} , které zaniknou při mírném prodloužení vlnové délky zdroje. Tyto módy z větší části pronikají do obalu vlákna a jsou citlivější na ohyb. [3] [7] [8]

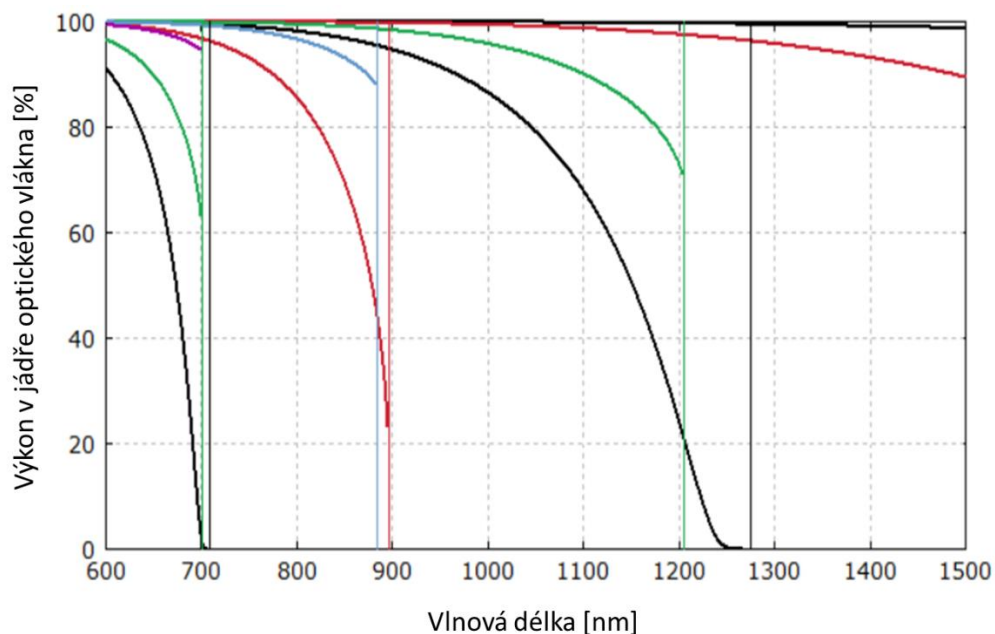
Počet módů v optickém vlákne je možné měnit. Nižšího/vyššího počtu módů je možné dosáhnout volbou vlákna s menším/větším průměrem jádra, zvětšit/zmenšit vlnovou délku, anebo zmenšit/zvětšit rozdíl indexu lomu n_1 a n_2 . [5]



Obrázek 12: Profily amplitud módů MM vláken. [8]

K určení, zda se vláknem šíří jeden či více módů se využívá mezní vlnové délky¹:

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{V} a \cdot NA \quad (18)$$



Obrázek 13: Šíření módů v jádře optického vlákna v závislosti na vlnové délce. [9]

¹ V anglicky psaných publikacích je mezní vlnová délka označována pojmem cut off.

Mezní vlnová délka je nejkratší vlnovou délkou, při které se optické vlákno projevuje jako SM a lze jím tedy vést jeden mód. Pro dlouhé vlnové délky existuje pouze jeden mód. Mezní vlnová délka existuje pro každý mód zvlášť a určuje hodnotu, nad kterou přestává daný mód existovat. Na následujícím obrázku (Obrázek 13) jsou znázorněny jednotlivé módy a tenké svislé čáry označují mezní vlnové délky módů. Pro základní mód (např. LP_{10}) neexistuje mezní hodnota vlnové délky, protože tento mód je veden vždy. Těsně pod mezní hodnotou vlnové délky se vlastnosti módů liší. Poloměr módu v blízkosti mezní vlnové délky se prudce navyšuje a šířící se energie uvnitř jádra vlákna klesá. [3]

Jednotlivé módy se dělí na módy nižších a vyšších řádů. Módy nižších řádů mají malou hodnotu indexu m a na rozdíl od vyšších módů mají větší úhel dopadu γ (Obrázek 1). Módy vyšších řádů výrazně zasahují do pláště, kde vykazují pomalý pokles intenzity. Každý mód se šíří jinou rychlostí. Oproti módům nižšího řádu mají módy vyšších řádů nižší grupovou rychlost², ale výrazně vyšší fázovou rychlost³. Módy vyšších řádů vstupují do vlákna pod větším úhlem než módy nižších řádů, proto mají relativní zpoždění (rovnice (19)) oproti osovým paprskům. Nejvyšší mód je ten, který vstupuje do vlákna na hranici mezního úhlu (rovnice (6)). [8] [10]

$$\Delta t = \frac{n_1}{c} \left(\frac{1}{\sin \gamma_m} - 1 \right) \quad (19)$$

Rovnice (19) udává vztah pro relativní zpoždění módu na jednotku délky vlákna. V rovnici (19) je n_1 indexem lomu jádra vlákna, c označuje rychlost světla ve vakuu a γ_m zastupuje mezní úhel. Jedná se o hodnotu, se kterou se krátký pulz rozšiřuje šířením přes vlákno. Reciproční hodnota relativního zpoždění je největší modulace frekvence, která může být přenášena vláknem, a proto definuje nejširší elektrickou šířku vlnového pásma, která může být využita. [10]

K popisu jednotlivých módů se využívá vlnový vektor, který je definován jako prostorová změna fáze vlnění. Velikost vlnového vektoru monochromatické vlny je dána vztahem (20).

² Grupovou rychlostí se pohybují místa stejné amplitudy. Udává rychlost obálky interferujících vln.

³ Fázovou rychlostí se pohybují místa stejné fáze.

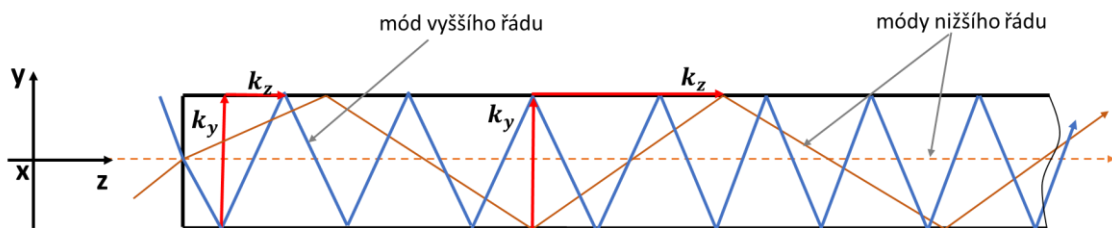
$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \left[\frac{1}{m} \right] \quad (20)$$

Vlnový vektor \mathbf{k} má směr shodný se směrem šíření vlny. Vztah mezi jednotlivými složkami vlnového vektoru lze vyjádřit následovně (21).

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k_0^2 \quad (21)$$

Pokud platí, že složky vlnového vektoru ve směru osy x a y jsou nenulové ($k_x, k_y \neq 0$), pak složka vlnového vektoru ve směru osy z musí mít mnohem menší hodnotu, než je velikost vlnového vektoru ($k_z < k_0$), aby platila rovnice (21). Čím je frekvence vlnového módu vyšší, tím je hodnota složky vlnového vektoru k_z nižší. Jelikož je možné fázovou rychlost vyjádřit následujícím způsobem (rovnice (22)), tak platí, že se snižující se hodnotou vlnového vektoru ve směru osy z se zvyšuje fázová rychlost daného vlnového módu. Proto se módy vyššího řádu pohybují vyšší rychlostí než módy nižšího řádu (Obrázek 14).

$$v_f = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k_z} \quad (22)$$



Obrázek 14: Rozdělení módů v optickém vlákně

U vláken s gradientním indexem lomu se index lomu od středu jádra k opláštění parabolicky snižuje, tudíž paprsek jdoucí středem jádra se pohybuje nižší rychlostí než paprsky jdoucí blíže plášti, tedy dále od jádra. Z toho vyplývá, že se módy vyšších řádů pohybují rychleji než módy nižších řádů. Takto nevzniká velký dráhový rozdíl a předchází se módové disperzi (kapitola 2.3) světla, což zvyšuje šířku pásma optického vlákna. [3] [11]

Módy se však nešíří pouze jádrem vlákna, ale také obalem. Rozdělení intenzity módů zaujímá celou oblast obalu včetně jádra. Obalem se šíří velké množství módů, které ale podléhají velkým energetickým ztrátám, zejména na vnějším rozhraní obalu a primární ochrany. [3]

2.3 Jevy ovlivňující šíření světla v optických vláknech

Přenos světla optickým vláknem není dokonalý a ovlivňují ho disperzní a ztrátové jevy. Světlo, či jakýkoliv optický signál, má na konci vlákna menší energii a také jiné rozložení energie v příčném směru než na počátku kvůli ztrátám různého původu. Obecně platí, že výkon světla v optickém vlákně postupně se vzdáleností od zdroje klesá. Tomuto poklesu se říká měrný útlum světelného signálu, je nejčastěji udáván v dB/km a lze ho vypočítat dle vztahu (23).

$$A_u = \frac{10 \log \frac{\Phi_{e1}}{\Phi_{e2}}}{L} \quad (23)$$

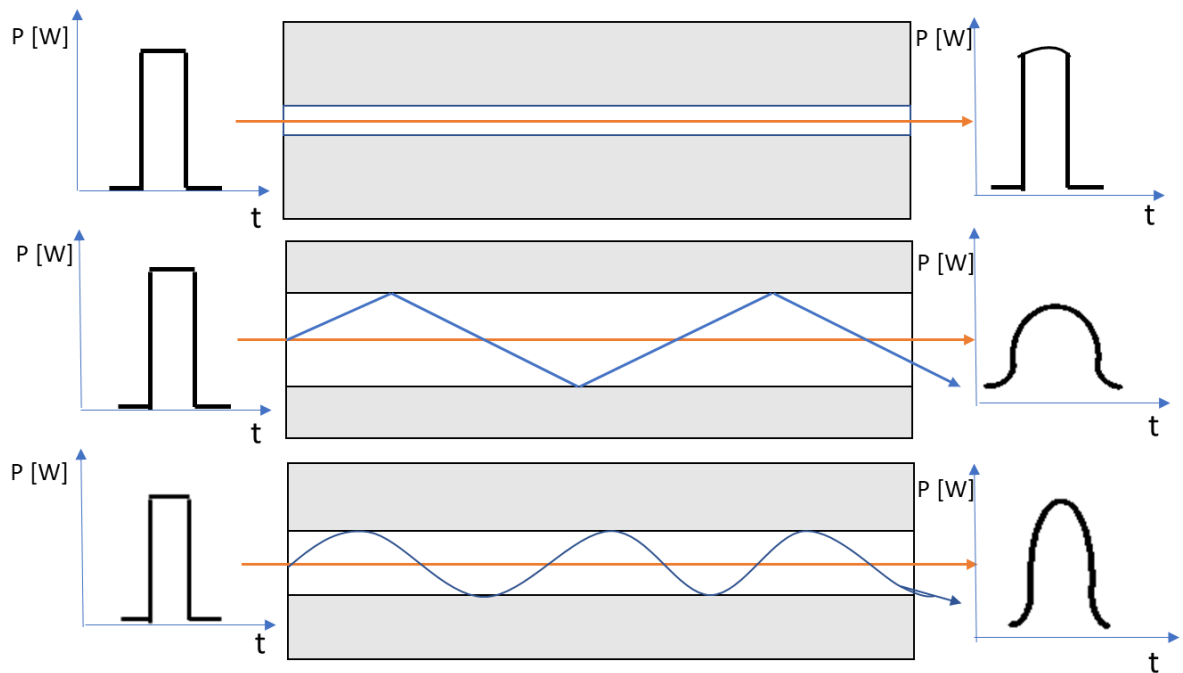
V rovnici (23) Φ_{e1} zastupuje vstupní světelný výkon a Φ_{e2} je výstupní světelný signál. Písmeno L označuje délku optického vlákna, kde je útlum měřen. Útlum světla v optickém vlákně může být způsoben fyzikálními jevy, jako je absorpce či rozptyl světla. Další příčinou útlumu světla mohou být vnější vlivy a mechanické namáhání jako např. ohyb vlákna, mikroohyby, absorpce, rozptyl na nehomogenitách, a ztráty na konektorech. [14]

2.3.1 Disperze

Obecně lze disperzi charakterizovat jako závislost fázové rychlosti na frekvenci šířícího se elektromagnetického záření. Dle příčin vzniku je možné disperzi rozdělit na módovou, materiálovou a polarizační. Módová a materiálová disperze vychází ze struktury vlákna, kdežto polarizační disperze je závislá na řadě náhodných veličin. [15]

K módové disperzi (někdy označována jako vidová disperze) světla dochází v MM vláknech. Protože se jednotlivé módy šíří s rozdílnou grupovou rychlostí, tak se i každý

mód přeneše na konec vlákna v různých časech. Vzhledem k rozdílným rychlostem jednotlivých módů je limitována maximální frekvence přenosu, a tedy i šířka pásma MM vlákna (Obrázek 15). Módová disperze je tím větší, čím je vyšší počet vedených módů v optickém vlákně. U vláken se skokovou změnou indexu lomu tento typ disperze převládá nad ostatními druhy disperze. Při nežádoucí módové disperzi je nutné nahradit vlákno gradientním nebo SM vláknem. [3] [15]

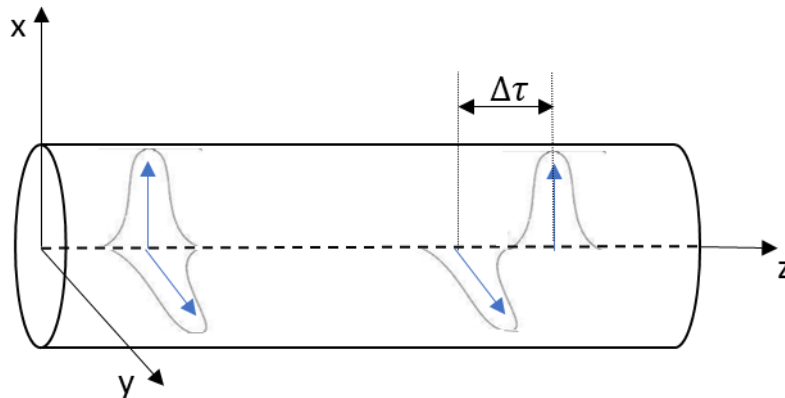


Obrázek 15: Porovnání vstupního a výstupního signálu vzhledem k SM, MM se skokovou změnou a gradientní změnou indexu lomu.

Speciálním případem módové disperze je polarizační módová disperze (PMD), která vede ke stejnému zkreslení signálu jako módová disperze. Výsledkem PMD je zpoždění módů ve dvou přípustných směrech vůči sobě. V reálném vlákně dochází ke dvojlomu na základě geometrických nedokonalostí způsobených výrobním procesem či mechanickým namáháním, čímž se mění rychlost módů ve dvou směrech, pro které platí různý index lomu. K PMD dochází i u SM vláken, kdy jeden prostorový mód je rozložen do dvou ortogonálně polarizovaných módů. Obrázek (Obrázek 16) znázorňuje časové zpoždění módů v reálném vlákně. [15]

Polarizační disperze je proměnná v čase a závisí na vlnové délce, ohybech a deformaci vlákna. Tato disperze zastupuje velmi malou část a je takřka zanedbatelná. Polarizační disperze se projevuje až u vysokých přenosových rychlostí.

Materiálová disperze je založena na tom, že s vlnovou délkou se mění index lomu materiálu, a tedy jednotlivé vlnové délky se šíří různou rychlostí. Materiálovou disperzi je možné potlačit zvýšením monochromatickosti zdroje světla.



Obrázek 16: PDM ve dvojlomném vlákně.

2.3.2 Absorpce

Ztráty ve vláknech se liší dle použitého materiálu pro zhotovení optického vlákna, protože každý materiál má určitou vnitřní absorpci. Ta se rozlišuje jako vlastní a nevlastní absorpce. Principem vlastní absorpce je pohlcení části optického záření vlastními molekulami optického vlákna. Nevlastní absorpce je způsobena pohlcením části optického záření molekulami nečistot, které mohou do vlákna vniknout již při výrobě, či v důsledku špatné vnější ochrany optického vlákna. [8] [14]

2.3.3 Rozptyl

Ztráty rozptylem jsou dány náhodným rozložením molekul v amorfním materiálu (sklo, plyny, kapaliny), které tvoří nehomogenity. Pokud jsou nehomogenity a obsažené nečistoty malé oproti vlnové délce zdroje, pak se rozptylové ztráty vznikající na nich

nazývají Rayleighovy a šíří se všemi směry. Tento typ ztrát je přítomen vždy. Rayleighův rozptyl je důsledkem elastických srážek mezi procházejícím optickým zářením a molekulami hmoty jádra optického vlákna. Následkem těchto kolizí dochází k lomu a odrazům částí paprsků, které se tím rozptylují do všech směrů. Takto rozptýlené záření je odkloněno od původního směru šíření a již se nejedná o vedený paprsek, protože uniká do obalu, kde zaniká. Rayleighův rozptyl je jev způsobený prolétávajícími fotony, které mohou excitovat elektron v obalu atomu určitého prvku. Jelikož excitovaný stav je energeticky nevýhodný, tak se elektron vrátí zpět na svou základní energetickou hladinu, přičemž vyžáří foton téže frekvence, jakou měl původní foton. Ale směr pohybu nového fotonu se nemusí shodovat s původním směrem pohybu. [6] [14]

Naopak při Stokesovu rozptylu dochází k neelastickým srážkám, při kterých dochází ke změně energie. Při Stokesově rozptylu přejde excitovaný elektron spontánní emisí na vyšší energetickou hladinu, než ze které byl excitován. Emitovaný foton má oproti původnímu fotonu nižší frekvenci. Rozdíl energií je absorbován materiálem optického vlákna. [16]

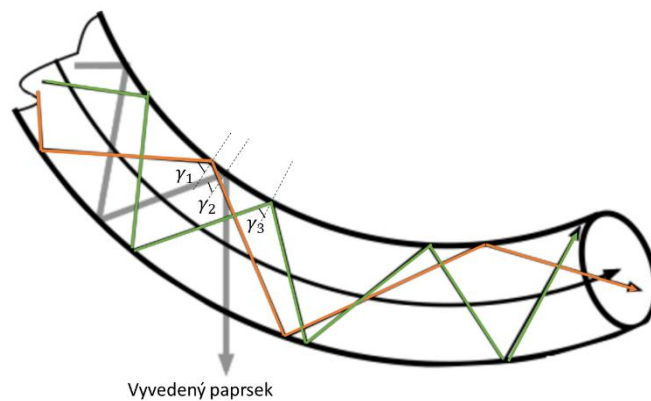
Následujícím typem rozptylu je Ramanův, který vzniká ve vláknech při interakci fotonů s vibračními a rotačními energetickými stavy atomů či molekul. V důsledku tohoto rozptylu se do původního světla přidává navíc šum, tedy fotony různých frekvencí. Rozdíl energií v tomto případě není závislý na energii původního fotonu, ale závisí pouze na míře vibrací elektronů v atomech materiálu optického vlákna. Ramanův rozptyl má podstatně menší intenzitu, než Rayleighův rozptyl. [16]

Pro optická vlákna je také charakteristický Brillouinův rozptyl, u kterého vlivem deformace optického vlákna (tah, tlak, ohyb či krut), akustických vibrací nebo procházejícím proudem dochází ke změně frekvence části fotonů v určitém směru. V důsledku deformace se změní síly působící v materiálu, a to se projeví ve změně energetických hladin elektronů, čímž dojde k rozptylu světla. Fotony rozptýleného světla se většinou pohybují opačným směrem ve srovnání s původním šířením světelného svazku. [16]

2.3.4 Další ztráty

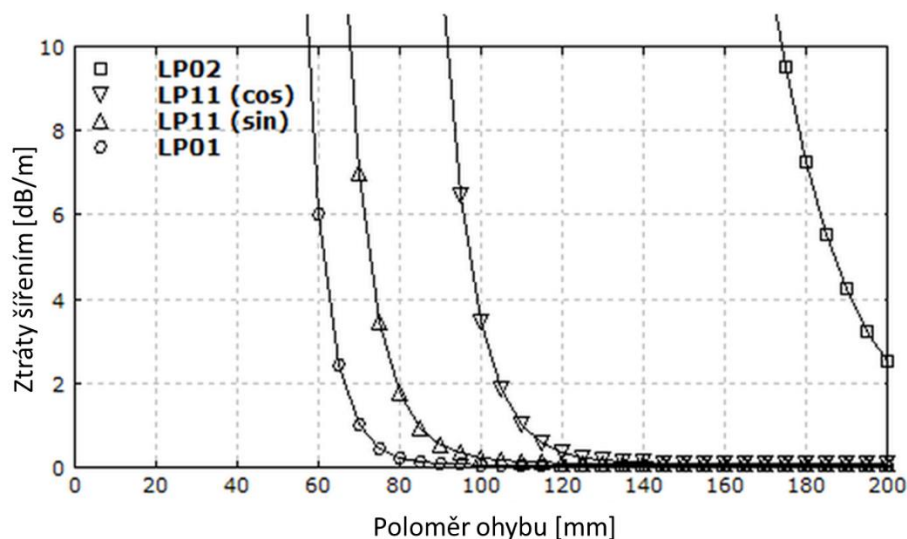
Dále se projevují ztráty vyvolané ohybem vlákna (Obrázek 17), kde závisí především na kritickém poloměru ohybu. Při ohybu se mění trajektorie vedeného paprsku, protože při ohybu dochází ke změně úhlů dopadu a odrazu přenášených paprsků. To může způsobovat vyvázání paprsku z jádra do pláště, pokud paprsek překročí mezní hodnotu úhlu odrazu, jako je tomu na obrázku (Obrázek 17) pro úhel γ_2 . U módů vyššího řádu je kritický poloměr ohybu větší (Obrázek 18), čehož se využívá k odfiltrování nežádoucích módů. [8]

Ohybem může také dojít k mechanickému poškození vlákna. V místě ohybu je optické vlákno mnohem náchylnější na poškození. Ohyb je ve většině případů nežádoucí a je nutné dbát na minimální poloměr ohybu optického vlákna. Minimální poloměr ohybu je závislý na poloměru optického vlákna a na materiálu vlákna. Čím je průměr vlákna větší, tím větší je minimální poloměr ohybu. Vlákna vyrobená z plastu mají při stejném průměru menší minimální poloměr ohybu než skleněná vlákna. [5]



Obrázek 17: Šíření paprsků v ohýbaném vlákne. [6]

Výrobce by měl u vláken uvádět minimální poloměr ohybu vlákna. Pokud tomu tak není, pak se dá držet obecných pouček. Pro skleněná vlákna platí, že při krátkodobém ohybu by ohyb neměl být menší než stonásobek poloměru skleněného vlákna. Při dlouhodobé instalaci by neměl být poloměr ohybu menší než 200 - 600násobek poloměru skleněného vlákna. [5]



Obrázek 18: Závislost ztrát vybraných módů na poloměru ohybu optického vlákna. [8]

Ztráty ohybem se dělí na mikroohybové a makroohybové ztráty. Makroohybové ztráty závisí na tom, jak moc je vlákno ohnuto, kdežto mikroohyby jsou zcela náhodné. Mikroohyby jsou způsobeny nedokonalostí geometrie vlákna, která vzniká při výrobě, či působením okolních vlivů, které mohou deformovat obal vlákna. Mikroohyby se vyskytují po celé délce optického vlákna. V důsledku mikroohybů se mohou některé paprsky z vlákna vyvézat, čímž způsobí zvýšení útlumu. [5]

Další ztráty jsou způsobeny napojováním jednotlivých vláken za sebou. Napojování vláken s různými módy je vždy zatíženo nějakými ztrátami, pokud nejsou obě vlákna SM. [8]

2.3.5 Ztráty na konektorech

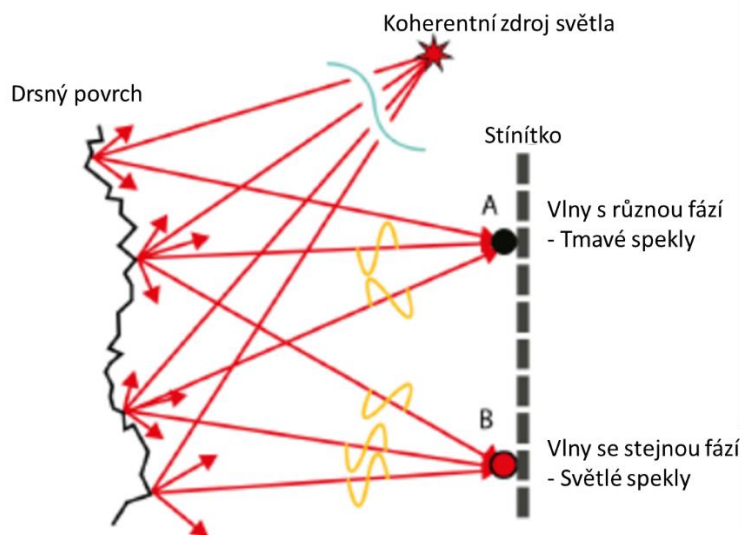
Každý optický spoj vnáší do spoje útlum šířící se energie. Ztráty mohou být způsobeny nedokonalostí jednotlivých částí konektoru nebo špatným opracováním konců vláken. Tyto odchylky se potom projevují jako ztráty v důsledku příčného posuvu jader vláken, podélným posuvem či úhlovou odchylkou čelních ploch.

Jako hlavní parametry konektorů se udávají dvě ztráty tzv. ztráta vložení a ztráta odrazu. Ztráta vložení je měřítkem útlumu celého zařízení určením výkonu před a po vložení konektoru a její hodnota je dána v decibelech. Hodnota vložené ztráty je typicky 0,5 dB.

Ztráta odrazu vzniká při odrazu světla na rozhraní. Např. při odrazivosti menší než 1 % se hodnota útlumu zpětně odraženého signálu pohybuje okolo 20 dB u MM vláken a u SM vláken je to až o polovinu větší hodnota.

2.4 Spekly

Odrazem koherentního světla od drsného povrchu, či při šíření koherentního světla médiem s nahodilými změnami indexu lomu se generuje náhodné rozložení intenzity světla, které způsobuje zrnitý vzhled, tzv. speklkový vzor. Též se lze setkat s názvem skvrna či zrnitý obraz. Jedná se o interferenční jev, při kterém dochází ke ztrátě kvality obrazu a následnému snížení rozlišení zobrazovacích systémů. [17] [18] [19]



Obrázek 19: Tvorba speklů odrazem koherentního světla od drsného povrchu.

Fenomén spekl byl zjištěn při provozu prvního laseru HeNe v roce 1960, kdy objekty pozorované vysoce koherentním světlem měly zrnitý vzhled. Jedná se o chaotickou a neuspořádanou strukturu, která nemá žádný zjevný vztah k makroskopickým vlastnostem osvětlovaného objektu, ale je závislá na drsnosti povrchu. Většina povrchů běžných materiálů je pokládána za extrémně drsné, protože hodnota drsnosti jejich povrchů přesahuje vlnovou délku laserového světla. Když pak necháme od takového povrchu odrazit monochromatické světlo, tak vznikající optická vlna v jakémkoliv mírně vzdáleném bodě je složena z mnoha koherentních složek, z nichž každá vychází z jiného

mikroskopického bodu povrchu. Vzdálenosti uražené různými vlnami se mohou lišit o několik vlnových délek, právě díky zmiňované drsnosti povrchu. Při interferenci těchto nefázových vln dochází k tvorbě speklů (Obrázek 19). [17]

Tato práce se bude zabývat převážně speklly vznikajícími přímo ve vlákne (ukázka speklů v kapitole 4.3). Při šíření koherentního světla v optickém vlákne, zejména v MM vlákne, dochází k interferenci mezi jednotlivými módy pohybující se různou rychlostí. [20]

Statistické vlastnosti speklů závisí na módové disperzi optických vláken a také na použitém zdroji světla. Na základě dráhových rozdílů a odlišných úhlů mezi směrem šíření a osou vlákna je na výstupu z vlákna značný fázový rozdíl mezi módy optického vlákna. Pokud dráhový rozdíl módů nepřesahuje koherenční délku světelného zdroje, tak světlo na výstupu optického vlákna podstupuje složité interference mezi několika módy. Tím je fáze i amplituda náhodně rozdělována, což způsobuje speklly. Z toho je patrné, že tvorba speklů souvisí s počty módů v optickém vlákne. [21][22]

3 Eliminace speklu

Tato práce bude zaměřena na redukci speklů, k jejichž eliminaci se využívají pasivní součástky, tzv. despekly. Existují aplikace, kde je nelze využít. Proto se tento problém řeší i jinými technologiemi. Konkrétní řešení pro redukci speklu je závislé na výběru laserového zdroje a na konstrukci optického přístroje. [23]

V našem případě využíváme RGB laserový zdroj světla s výstupem do SM vlákna. Na SM vlákno je nutné napojit MM vlákno, které vede do endoskopu, kde se využívá k osvětlení pacientova oka.

3.1 Despeklování pomocí pohyblivých prvků

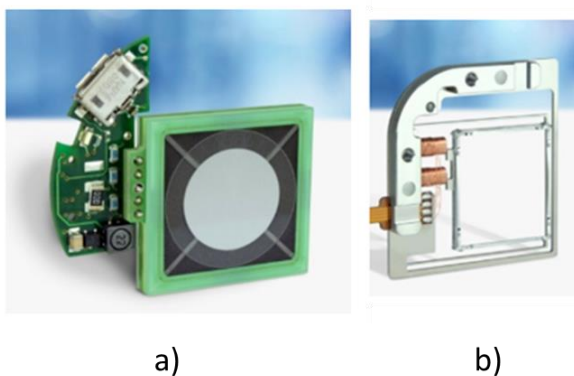
Spekl jako takový nelze zcela eliminovat. Pro eliminaci speklu vnímaného kamerou či okem pozorovatele lze pracovat s prostorovými a časovými integračními vlastnostmi lidského oka či kamery. Díky známé časové odezvě ($30-60\text{ ms}$) a prostorovému rozlišení ($5 \times 5\ \mu\text{m}^2$) lidského oka je možné potlačit vnímání speklů. Na základě časových a prostorových průměrovacích vlastností oka pozorovatele, lze určit v jakém rozsahu je reálné snížit intenzitu speklu [23]. Prostorové průměrování je založeno na záznamu obrazu s velikostí pixelu větší, než je velikost speklu, či Fourierovým filtrováním obrazu. Časové průměrování je založeno na záznamu časově proměnlivých speklů. Využívají se k tomu techniky obsahující pohyblivé, rotující či vibrující optické prvky, mezi které se řadí difuzory. [24]

Rotující/vibrující difuzory ničí prostorovou a časovou koherenci laserového světla a zároveň i specky způsobené koherentním zdrojem světla. Difuzorová deska se umísťuje do dráhy laserového paprsku v blízkosti objektu. Dochází tak k integraci nezávislých speklů v delším časovém období, než je časové rozlišení ⁴detektoru, což vede ke snížení kontrastu speklů. Řešením pro eliminaci speklu se jako další nabízí pohybující se či vibrující obrazovky, clony, optické prvky a vlákna. [19] [25] [26]

⁴ určuje minimální časový interval mezi průchody dvou částic detektorem, které lze ještě rozlišit

Běžně prodávanými pohyblivými difuzéry jsou tzv. LSR (Laser speckle reducer) dvojího typu. Prvním typem je Electro-active polymer LSR, který se skládá z elastické membrány nesoucí uprostřed lehký difuzor. Okolo difuzoru jsou čtyři elektrody, které se aktivují při fázovém posunu 90° a indukují kruhový pohyb difuzoru.

Druhým typem je Reluctance force LSR, který se skládá z tenké ocelové konstrukce, která je uvedena do rezonance pulzováním ovládací cívky. Pulzování je umožněno procházejícím proudem, který generuje silnou reluktanční (magnetickou) sílu. [27]



Obrázek 20: Typy pohyblivých difuzorů: a) elektro-active polymer, b) reluctance force. [27]

Firma Optotune nabízí mimo jiné tyto dva typy difuzorových despekľů (Obrázek 20), jejichž parametry jsou zaznamenány v následující tabulce (Tabulka 3). Cena těchto produktů se pohybuje mezi 630–830 \$. [27]

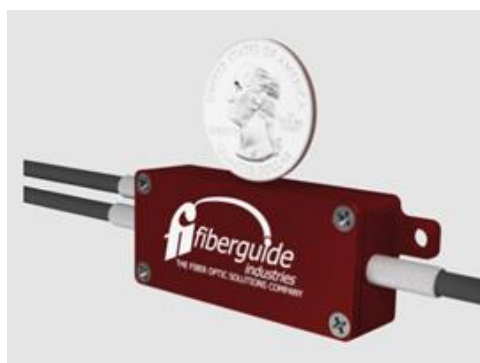
Parametr	Electro-active polymer	Reluctance force
Aperturní clona	5 nebo 10 mm	18,5x18,5 mm
Přenos	až 93 %	až 98 %
Hmotnost	3 g	11 g
Oscilační amplituda	300 – 400 μm	800 μm

Tabulka 3: Parametry vybraných difúzorů.

Bohužel despekly difuzorového typu nelze v našem případě aplikovat kvůli následnému rozptýlení světla do okolí.

3.2 Vláknové despekly

Další komerčně využívaná technologie pro eliminaci speklů jsou vláknové despekly. Vláknové despekly vyrábí společnost Fiberguide [28], jejíž výrobek De-Speckler (Obrázek 21) eliminuje speklkový vzor tím, že průměruje modální šum v optickém vlákne. De-Speckler je určen přímo pro vláknové sestavy, kde vznikají speckly interferencí módů. Výrobek je malý a lze u něj přizpůsobit velikost vlákna, tvar jádra či obalu, aby vyhovoval dané aplikaci. De-Speckler je určen pro vedení vlnových délek v rozmezí $400 - 1550\text{nm}$ a velikost jádra optického vlákna je mezi $100 - 400\mu\text{m}$. [28]



Obrázek 21: De-Speckler od společnosti Fiberguide. [28]

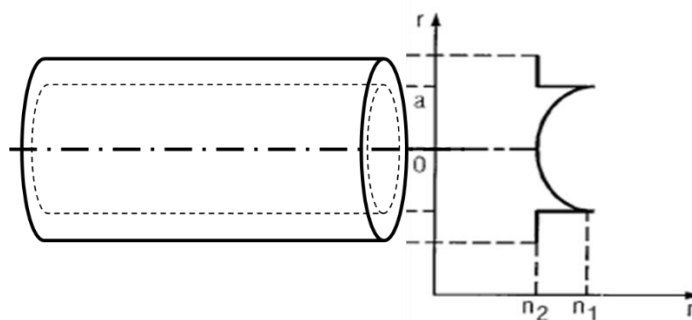
Vláknoými despekly se také zabývá společnost Lfiber, od které byl v této diplomové práci využit produkt In-line laser speckle reducer [29]. Jejich výrobek je despekler a zároveň homogenizér optického svazku. Jedná se o celokovovou pasivní součástku, která je užitečná k homogenizaci svazku, pro rovnoměrnou distribuci energie a snížení nežádoucích modálních šumů, jako je např. pruhování v MM optickém vlákne. Homogenizér světelného svazku vytvoří stabilní výstupní svazek s rovnoměrným profilem energie. Tím pomáhá snižovat citlivost na změny vlastností zdroje jako je amplituda nebo fáze. Principem je rozdělení vstupního smíšeného svazku paprsků na menší svazky a překonfigurování módů světla, čímž dojde k homogenizaci výstupního svazku. [29] [30].

Numerická apertura tohoto na zakázku vyrobeného homogenizéru je $0,12$. Homogenizér je uzpůsoben pro vedení vlnových délek v rozmezí $400 - 1800\text{nm}$ a přenosová účinnost převyšuje 90% . [29]



Obrázek 22: Homogenizér optického svazku. [29]

V [31] redukovali speklly despeklovacím vláknem, které bylo zkonstruováno tak, aby se v něm zvýšil počet módů. Větší počet módů přispívá k vytvoření mnoha nezávislých speklů, které se zprůměrují na detektoru. V publikaci [31] porovnávali vlákno se skokovou změnou indexu lomu, s gradientním indexem lomu a speciální despeklovací vlákno (Obrázek 23). Již z kapitoly 2.1.1 je známo, že vlákno se skokovou změnou indexu lomu má konstantní index lomu po celém průměru, kdežto u vláken s gradientním indexem lomu a u despeklových vláken se index jádra mění v závislosti na poloměru. Vzhledem ke vzrůstajícímu indexu lomu směrem do středu jádra (GI) se minimalizuje modální disperze oproti vláknům se skokovou změnou indexu lomu. Avšak tento fakt je nežádoucí při omezování speklů na detektoru. Pro zvýšení módů ve vlákne je možné použít fotonický plášť, který na základě ohybů udrží světlo v jádře. Dále je možné změnit index lomu pláště legováním krycího skla (např. fluorem). Despeklové vlákno (Obrázek 23) má maximální index lomu na hranici jádra a obalu, směrem do středu jádra se tato hodnota snižuje. Tato konfigurace optického vlákna způsobuje, že módy vyššího řádu mají mnohem delší optickou dráhu než módy nižších řádů, což způsobuje velkou modální disperzi, která přispívá ke snížení speklů. [31]



Obrázek 23: Despeklové vlákno. [31]

3.3 Metoda vibrování

Zásadní metodou eliminace speklu pro tuto práci je vibrování/ třepání optickým vláknem, na čemž je založena praktická část této diplomové práce. Obecně jde o změnu polohy vlákna, čímž se změní distribuce energie mezi módy vlákna.

Vibrací optickým vláknem dojde k dynamickému posunu módů uvnitř vlákna a následně se z vlákna posune samotný spekl. Za předpokladu, že frekvence vibrací je dostatečně vysoká, tak lidské oko není schopno sledovat posun speklu a vidí pouze vyhlazený světelný vzor. Daný vzor by měl odpovídat shluku módů, z nichž má každý různou rychlost šíření. Elektrické pole na výstupním konci vlákna náhodně mění svou intenzitu a s ní i fázový profil. Neoptimálnějším způsobem provedení by bylo připojení vibračního mechanismu k samotnému vláknem. [23] [31]

V patentu z [31] eliminovali specky pomocí vibrací optického vlákna. Připojili optické vlákno k vibračnímu zařízení, které bylo schopné vibrovat vláknem nad prahovou frekvencí. Poté nakonfigurovali optické vlákno tak, aby jeho profil indexu lomu byl vhodný ke zvýšení počtu módů a modální disperze. Došlo ke snížení kontrastu speklů na frekvencích vyšších, než je detektor/ lidské oko schopno zachytit (nad 20 Hz). [31]

3.3.1 Využití válcového piezoelektrického měniče

V [32] uvedli metodu eliminace speklů na výstupu MM vlákna pomocí válcového piezoelektrického měniče (PZT), který vibruje v radiálním směru. Optické vlákno o délce 5 m se omotalo do 20 otáček kolem PZT a tím docházelo k pravidelnému roztahování optického vlákna. Výsledkem experimentu bylo značné potlačení speklů v MM vláknem o průměru 50 μm a 200 μm . Oproti skelnému vláknem docházelo k lepším výsledkům u polymerního vlákna. Účinek PZT byl největší při frekvenci 24,16 kHz.

Při experimentu se optické vlákno deformovalo, čímž docházelo ke změnám jeho parametrů. Schéma experimentu je znázorněno na obrázku (Obrázek 24), kde v pravé části je znázorněn PZT s omotaným optickým vláknem v počáteční poloze a v levé části obrázku je znázorněn PZT vibrující v radiálním směru. Tímto způsobem je vlákno natahováno a zároveň i vibrováno [32]

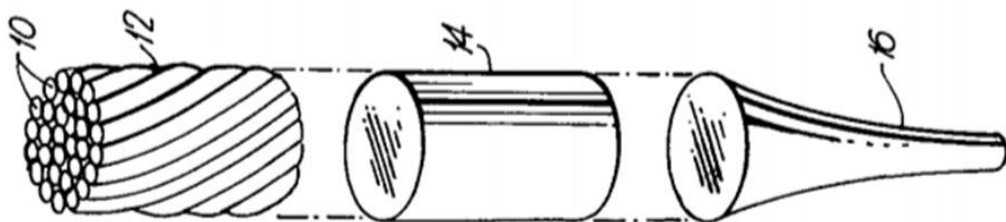


Obrázek 24: Schéma natahování a vibrování optickým vláknem na PZT. [32]

3.4 Změna parametrů optického vlákna

Pokud by bylo možné si samostatně vyrobit vlákno, nebo si navolit vlastní parametry, pak by jedním z nejjednodušších způsobů snížení kontrastu speklu bylo zvýšení počtu módů uvnitř vlákna, navýšením NA či zvýšením počtu vláken. Tyto metody jsou efektivní pouze pro vyhlazení speklů v běžných vláknech se skokovou změnou indexu lomu [31].

V [33] využili optické vlákno obsahující soubor menších vláken s rozdílnými indexy lomu. Na obrázku (Obrázek 25) je znázorněn princip spojení jednotlivých optických vláken do jednoho optického vlákna. Číslem 10 jsou označena optická vlákna s různou hodnotou indexu lomu, která se spojují do svazku 12. Svazek 12 je zahříván, aby se jednotlivá vlákna spojila dohromady do svazku 14. Svazek 14 je dále zahříván na tažnou teplotu, při které se vlákno vtáhne do jednoho vlákna označeným číslem 16. Původní vlákna jsou prodloužena a zúžena v obvodu. Superpozicí několika speklů docílili poklesu kontrastu mezi tmavými a světlými skvrnami. Jednotlivá vlákna s malým průměrem fungují v tomto případě jako sekundární zdroje s novými módy. [33]



Obrázek 25: Princip spojování optických vláken s různou hodnotou indexu lomu do jednoho vlákna. [33]

4 Experimentální část

V experimentální části této práce se nejprve seznámíme s prototypovým endoskopem a jeho částmi. Dále se bude práce ubírat k experimentům spojených s osvětlovací soustavou a eliminací speklů.

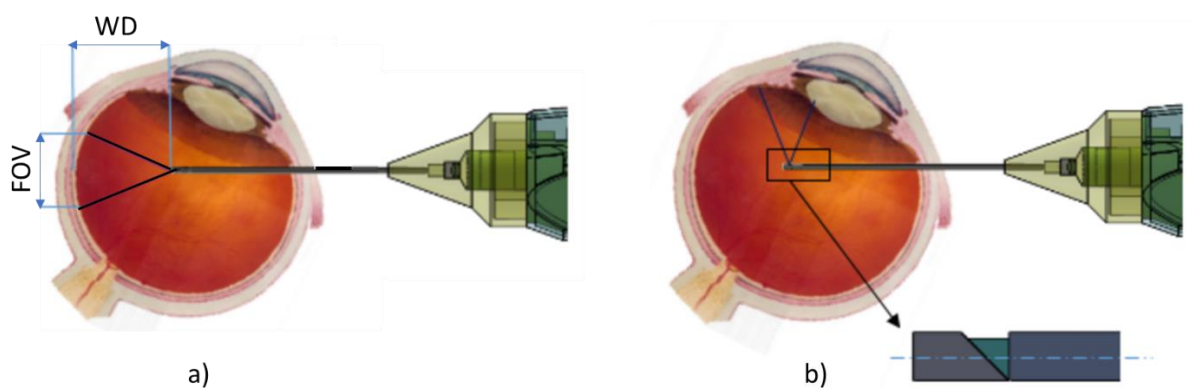
4.1 Prototypový endoskop

Zobrazovací část komerčních endoskopů malých průměrů tvoří svazek SM vláken, jehož konečné prostorové rozlišení je omezeno počtem SM vláken a velikostí jádra.

V našem případě se jedná o endoskop s GRIN čočkou, která má rotačně symetrické rozložení indexu lomu kolem optické osy, tedy hodnota indexu lomu je závislá na vzdálenosti r od optické osy.

V současné době spolupracuje ČVUT s průmyslovým podnikem na vývoji očního endoskopu. Je kladen důraz na minimální průměr distálního konce endoskopické sondy, která vniká do pacientova oka. Vnější průměr takové sondy je *23 Gauge*, čemuž odpovídá *0,635 mm*.

Endoskopická sonda je přizpůsobena k přímému i bočnímu (umožňuje „pohled za roh“) pozorování (Obrázek 26).



Obrázek 26: Endoskopická sonda při a) přímém a b) bočním pozorování. [35]

Endoskop obsahuje vlastní osvětlení, operační laser a kameru, která má výstup v počítači. Díky výhodnému spojení osvětlovací soustavy a laserové cesty v jednom zařízení má chirurg k dispozici volnou ruku k další manipulaci s pacientem, a navíc stačí pouze jeden otvor v oku.

4.2 Použité komponenty

Tato diplomová práce se zabývá převážně problematikou speklů, které se tvoří právě v osvětlovací soustavě. Jedná se o kompaktní vícebarevný laserový modul, v našem případě se třemi lasery (FISBA READYBeam ind) o vlnových délkách 450, 520 a 660 nm. Tyto tři lasery jsou navázány do jednoho SM vlákna o průměru 3 μm . Na výstupu ze SM vlákna je rozbíhavý svazek s NA o velikosti 0,12. Za SM vlákno je připojeno MM vlákno o průměru 200 μm a $NA = 0,12$. Toto MM vlákno má předepsanou hodnotu kritického poloměru 18 mm. Při osvětlení předmětu tímto vlákem a pozorování endoskopem jsou na monitoru jasně viditelné spekly (Obrázek 27).



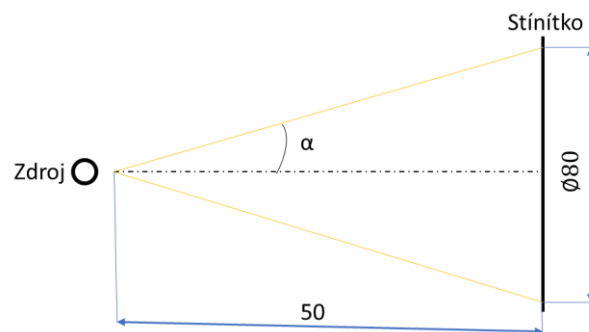
Obrázek 27: Obraz se spekly.

Numerickou aperturu (NA) MM vlákna bylo nutné dopočítat následujícím způsobem, kdy se ve vzdálenosti 50 mm osvětlovala plocha stínítka světelnou sondou. Následně byl změřen průměr osvětleného povrchu, který činil 80 mm.



Obrázek 28: Měření NA optického vlákna Alcon určeného k experimentům.

Pro výpočet NA platí následující vztah (24), kde n_0 je index lomu světla v daném prostředí, v tomto případě se jedná o vzduch ($n_0 = 1$). Úhel α je poloviční vrcholový úhel kužele šířících se paprsků.



Obrázek 29: Geometrie pro výpočet NA.

$$NA = n_0 \sin \alpha \quad (24)$$

$$\alpha = \arctg \frac{40}{50} = 38,66^\circ$$

Po dosazení hodnoty úhlu α do rovnice (24) činí výsledná velikost $NA = 0,62$.

$$NA = 1 \cdot \sin(38,66^\circ) = \mathbf{0,62}$$

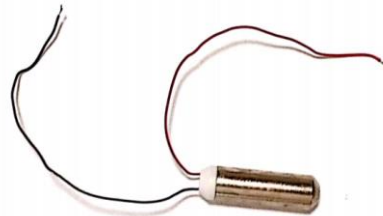
V rámci tohoto projektu byl od společnosti Lfiber pořízen homogenizér laserového svazku, který funguje také jako vláknový despektr [29]. Při připojení homogenizéru přímo za MM optické vlákno se spekly ještě zhoršovaly v důsledku malého počtu světelných módů v optickém vlákne. Proto byl homogenizér využit alespoň k experimentálním měření.

Ke snímání obrazu byla používána kamera Ximea – MU9PM-MH se senzorem Aptina MT9P031 [36] s velikostí jednoho pixelu $2,2 \mu m$.

Pro správnou funkci samotného endoskopu je nutné, aby byl obraz dobře čitelný a ostrý. V našem případě se v obraze vyskytovaly již zmiňované spekly, které extrémně narušovaly obraz. Proto bylo nutné vymyslet metodu, která obraz despekluje, tedy zbaví obraz rušivých elementů. Byla zvolena metoda vibrování vláknem, která z rešerše vyšla jako nejméně náročná a zároveň účinná metoda eliminace speklů.

4.3 Vibrování vláknem

Hlavním úkolem bylo zjistit, jakým způsobem, v jakém místě a jak velkým kusem optického vlákna by bylo nejlepší pohybovat, aby došlo k co největší eliminaci speklů. Ověřovalo se, zda se musí vibrovat až posledním vláknem. Jako první byla vyzkoušena varianta ručního vibrování, při kterém docházelo k ne zcela znatelným změnám obrazu. Navíc udržet určitou vibrační frekvenci rukou je náročné a nepraktické v reálném užití. Proto byla zvolena varianta vibračního mechanismu. Jednalo se o vodotěsný vibrační elektromotor s excentrem (Obrázek 30), jehož parametry jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 4).

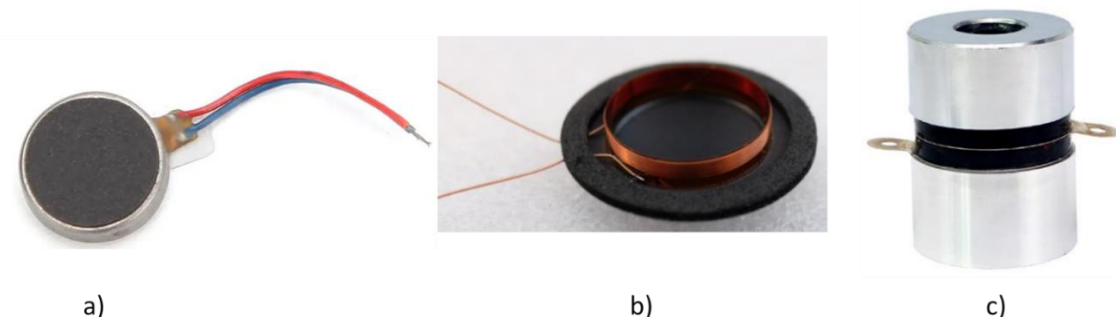


Obrázek 30: Použitý vodotěsný vibrační elektromotor (1,5 - 3 V).

Napájení	1,5 – 3 V
Otáčky	8000–24000 ot/min
Odběr	0,01 - 0,06 W
Rozměr	7x25 mm
Hmotnost	5,16 g

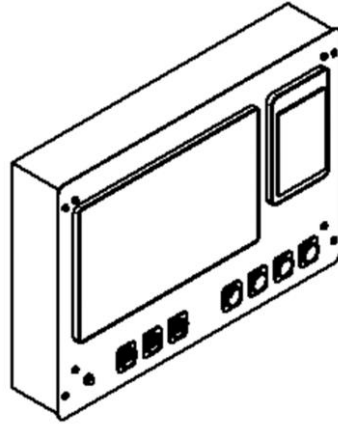
Tabulka 4: Parametry použitého vibračního elektromotoru.

Další variantou vibračního elektromotoru jsou ploché vibrační mini motory (Obrázek 31 a)). Také se nabízí řada jiných vibračních zařízení, u kterých by bylo nutné jiné konstrukční řešení uchycení. Mezi další varianty patří např. kmitací cívky z reproduktorů (Obrázek 31 b)), kde by bylo možné umístit vlákna po obvodu kmitající membrány. V úvahu přichází piezoelektrické motory (Obrázek 31 c)), které využívají piezoelektrického jevu, kdy deformace povrchové vrstvy statoru je převedena na rotační pohyb rotoru. V současné době se využívají v objektivách fotoaparátů či mikroskopech. Vhodnou variantou by byl válcový piezoelektrický měnič, který byl zmíněn v kapitole 3.3.1.



Obrázek 31: Další varianty vibračních zařízeních.

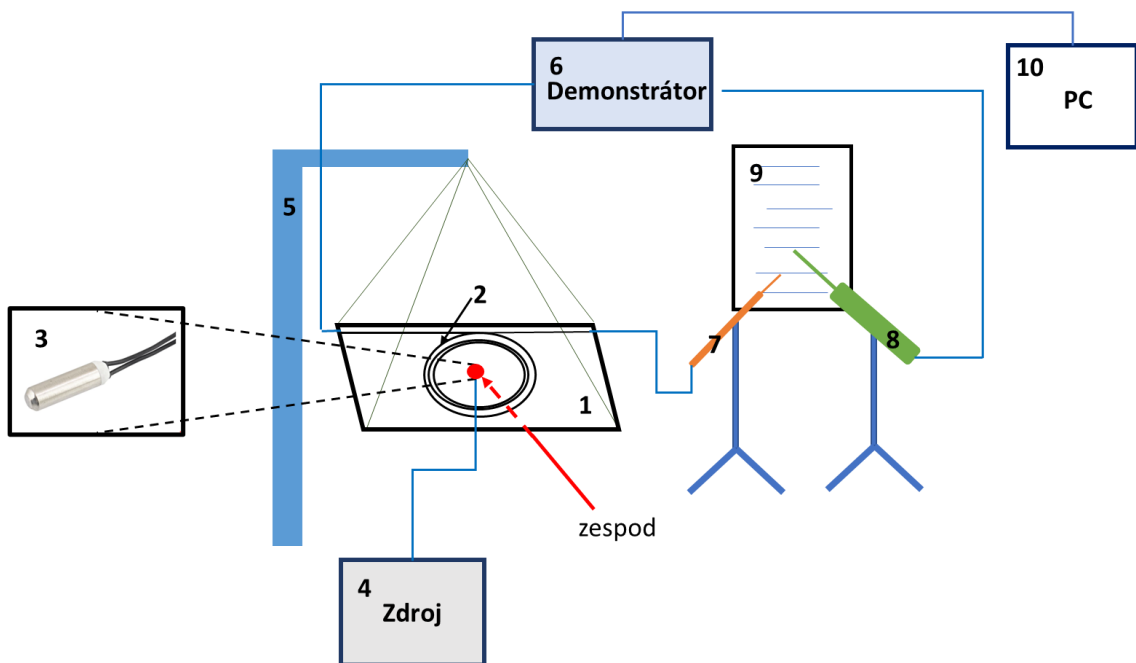
U všech experimentálních měření byl použit tzv. demonstrátor (Obrázek 32). Demonstrátor je krabice s osvětlovací soustavou (Fisba), displejem a počítačem Raspberry Pi, který ovládá osvětlovací soustavu i kameru endoskopu. K demonstrátoru se připojuje endoskop a případně i druhý monitor.



Obrázek 32: Demonstrátor.

4.3.1 První set experimentů

První set experimentů probíhal na závěsném zařízení dle následujícího schématu (Obrázek 33). Na kartonové desce bylo v prvním případě umístěno optické vlákno Alcon (Obrázek 34). Ve druhém případě byl před optické vlákno Alcon prostřednictvím optického konektoru připojen homogenizér s optickým vláknem (Obrázek 22). Ten byl umístěn na kartonovou desku (Obrázek 35). Vlákno Alcon má koncovku s nerezovou trubičkou 23 g (cca 0,6 mm) a používá se jako osvětlovací sonda při očních operacích. Standardně se připojuje k operačnímu přístroji.

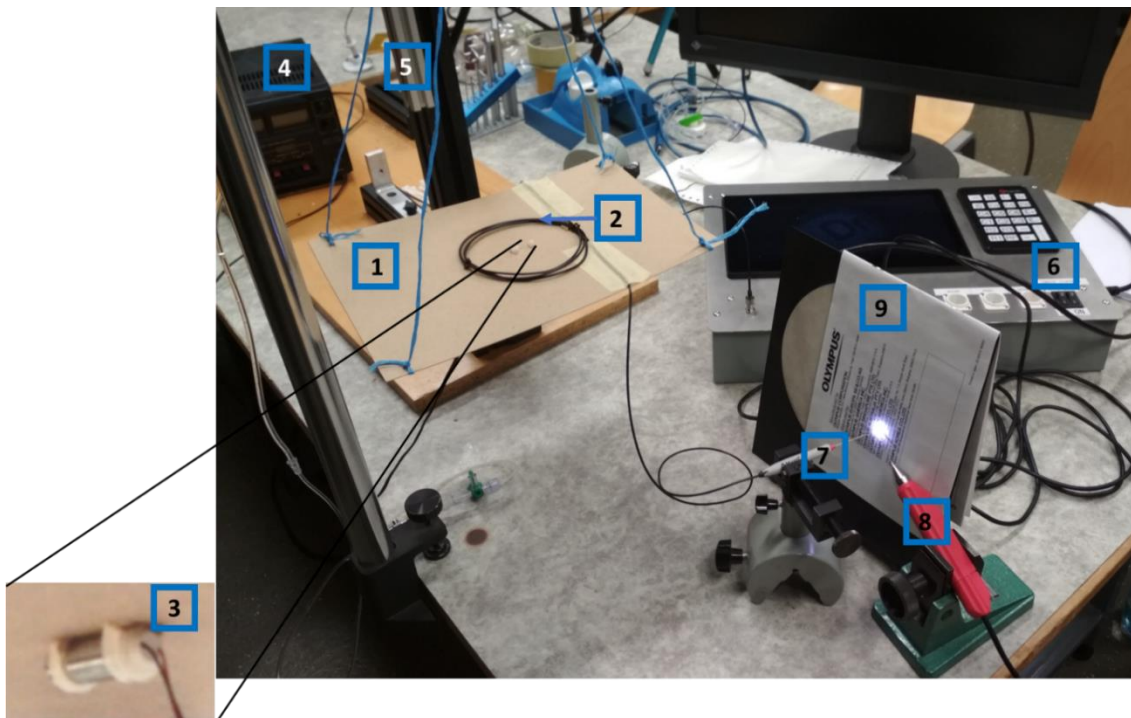


Obrázek 33: Schéma experimentální aparatury závěsným zařízením.

V následujících podkapitolách budou popsány jednotlivé experimenty s následným vyhodnocením a porovnáním jednotlivých měření. Poté v diskusi (kapitola 5) budou výsledky zhodnoceny.

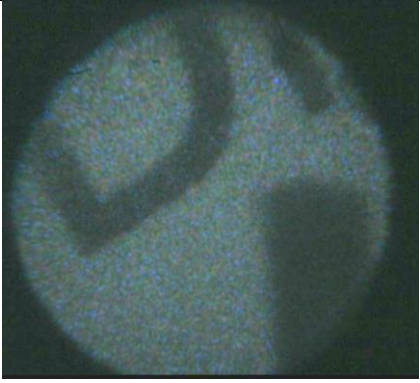



4.3.1.1 Vibrování optickým vláknem Alcon

Počátkem první experimentální sestavy (Obrázek 33) je kartonová deska (1), na kterou bylo přichyceno optické MM vlákno 23Ga značky Alcon (2). Prostřední část (1,1m) optického MM vlákna byla smotána do kruhu o průměru 100 mm. Doprostřed kruhu vytvořeného z optického vlákna byl zespodu kartonové desky umístěn vibrační elektromotor (3). Tento motor byl napájen ze zdroje (4) s proměnným napětím a proudem. Celá kartonová deska se všemi komponenty byla zavěšena na čtyřech provázcích cca 400 mm dlouhých. Provázky byly připevněny ke stojanu (5). Jeden konec MM vlákna byl připojen k demonstrátoru (6). Druhým koncem, tedy osvětlovací sondou (7), byla osvětlována deska s náhodným textem (9). Číslem 8 je označován endoskop s kamerou, který je připojen k demonstrátoru s monitorem. Demonstrátor byl připojen k počítači (10), kde se sledovala závislost speklů na napětí. Prostřednictvím programu OBS Studio bylo možné zaznamenávat jednotlivé změny speklů během experimentu.



Obrázek 34: Sestava pro experiment se závěsným zařízením a optickým vláknem Alcon.

Během experimentu byla pozorována závislost intenzity speklového vzoru na vzrůstajícím napětí. Experiment byl proveden pro dvě různé pracovní vzdálenosti (3 a 7 mm), tedy vzdálenosti endoskopické sondy od desky s textem, který je snímán kamerou.

Napájecí napětí [V]	Pracovní závislost	
	3 mm	7 mm
0		
0,6		

Tabulka 5: Porovnání obrazu v závislosti na pracovní vzdálenosti endoskopu.

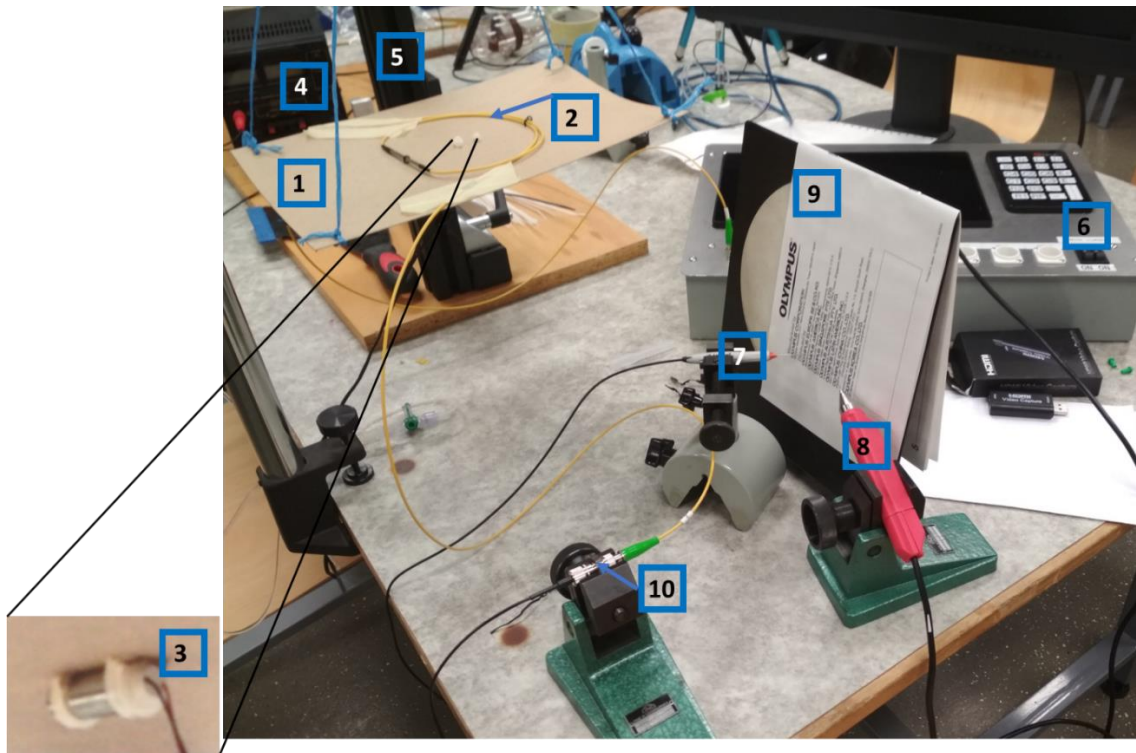
Na obrázcích znázorněných v tabulce (Tabulka 5) je zobrazen vliv pracovní vzdálenosti na výstupní obraz. Již z tohoto porovnání (Tabulka 5) je patrná změna při zvětšení napětí z 0 V na 0,6 V, kdy je obraz v obou pracovních vzdálenostech bez viditelných speklů. Při 0 V a menší pracovní vzdálenosti jsou pozorovatelné větší velikosti speklů. Proto se další měření provádělo pouze v pracovní vzdálenosti 3 mm.

4.3.1.2 Vibrování homogenezérem a jeho optickým vláknem


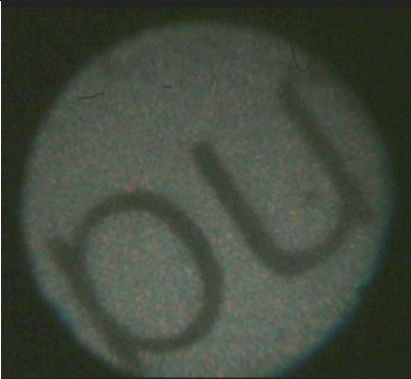

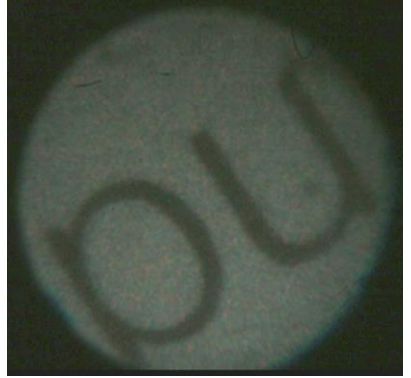
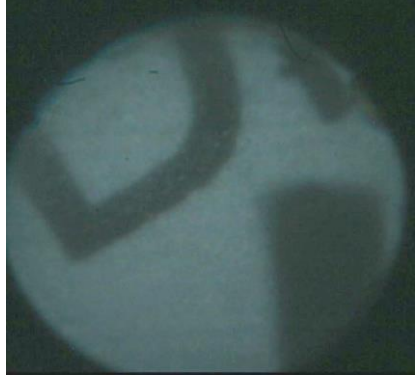
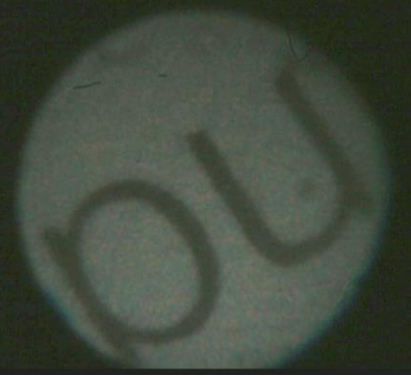
Dále byl vyzkoušen ten samý experiment, avšak s homogenezérem a jeho vláknem. Pokud by se vibrační homogenezéru, či jeho vlákna eliminovaly spekly, pak by se vibrační prvek mohl umístit přímo do demonstrátoru, aby nepřekážel. K ověření, zda stačí vibrovat pouze homogenezérem, byl konektor upevněn do svěráku. Tím se minimalizoval přenos vibrační na další vlákno.

Na fotografii (Obrázek 35) je znázorněna sestava pro experimentální měření speklového vzoru závislého na vibracích a platí pro ni stejné schéma (Obrázek 33) jako v předchozím případě. Rozdíl je v uchyceném vlákně na závěsné ploše. V tomto případě byl na desce (1) umístěn homogenezér s jeho optickým vláknem (2), který byl prostřednictvím konektoru (10) propojen s MM optickým vláknem Alcon (7).

V následující tabulce (Tabulka 6) jsou porovnány výsledky z prvního setu experimentů (Obrázek 33) s optickým vláknem Alcon (Obrázek 34) a homogenezérem (Obrázek 35). Pracovní vzdálenost endoskopu byla v obou případech nastavena na 3 mm a osvětlovací sonda byla od stínítka vzdálena 10 mm.



Obrázek 35: Sestava se závěsným zařízením a homogenezérem světelného svazku.

Napájecí napětí [V]	Typ vibrovaného optického vlákna	
	Alcon	Homogenizér
0		
0,6		
0,8		

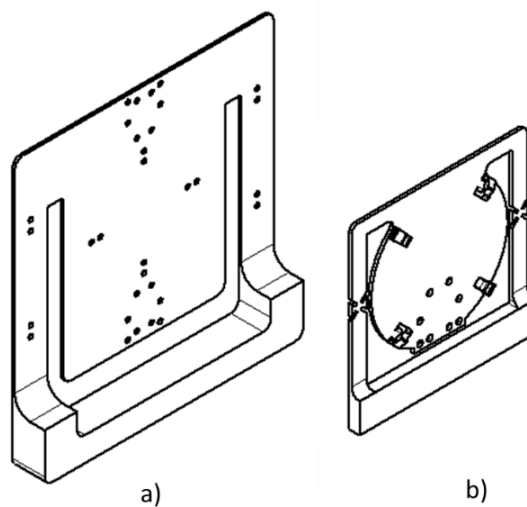
Tabulka 6: Porovnání obrazu v závislosti na zvoleném optickém vlákne v případě prvního setu experimentů.

Z obrázků z tabulky (Tabulka 6) je zřejmé, že při vibrování optickým vláknem Alcon se spekly ruší již při malém navýšení napětí. Při 0,6 V nejsou spekly viditelné a obraz je čistý. Kdežto při vibrování homogenizérem jsou spekly znatelné i při 0,8 V.

4.3.2 Druhý set experimentů

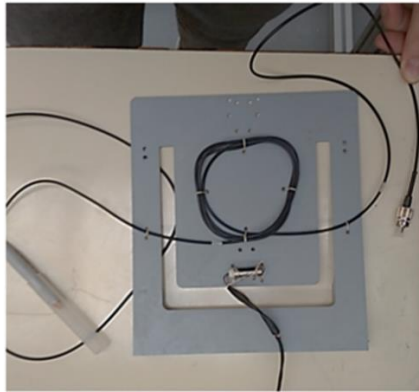
Po zdárném výsledku s vibrováním vlákna na zavěšené desce byly vytvořeny dva přípravky (Obrázek 36) pro uchycení vlákna a vibračního elektromotoru. Tyto přípravky bylo možné uchytit do držáku. V programu Autodesk Inventor Professional 2018 a Solidworks 2019 byly vymodelovány a následně na 3D tiskárně vytištěny dva přípravky o různé velikosti (Obrázek 36).

První variantou je velký přípravek, který není vhodný k umístění do demonstrátoru, avšak je účelný při porovnání velikosti vibrované plochy. Velký přípravek má rozměry 160×165 mm a malý přípravek 90×90 mm. Oba přípravky mají otvory pro uchycení vibračního elektromotoru ve vodorovné či ve svislé poloze. Dále u velkého přípravku jsou otvory pro uchycení vlákna s možností několika otáček o průměru 60 mm. Na malém přípravku jsou místo děr vytvořeny „háčky“ pro ukotvení vlákna, otáčka má také průměr 60 mm. Na okrajích obou přípravků je prostor pro upevnění konců vlákna směřujícího do demonstrátoru a k osvětlovací sondě.

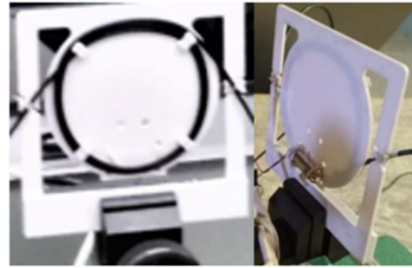


Obrázek 36: Přípravky pro uchycení vlákna o průměru 60 mm a vibračního elektromotoru ve vodorovné/svislé poloze: a) velký přípravek, b) malý přípravek.

Z obrázku (Obrázek 37) je zřejmé, že u velkého přípravku lze velice složitě docílit symetrického namotání vlákna oproti malému přípravku. Navíc u malého přípravku je vibrační elektromotor umístěn přesně pod vlákem, což by mohlo vyvolat větší vibrace.

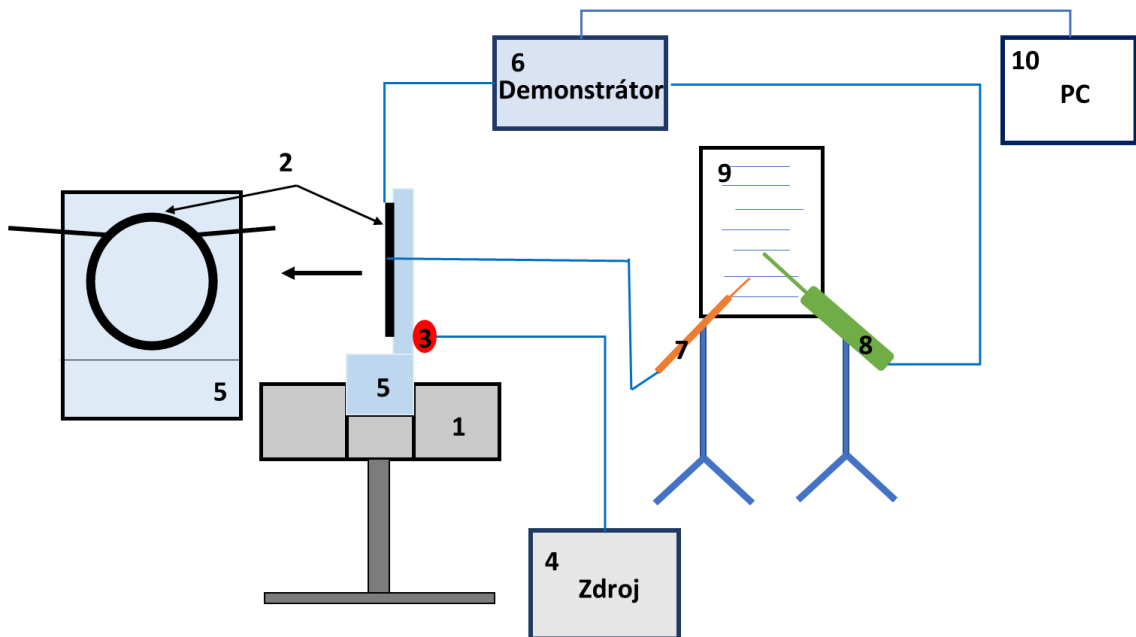


a)



b)

Obrázek 37: Reálné uchycení optického vlákna a vibračního elektromotoru na a) velkém přípravku a na b) malém přípravku.



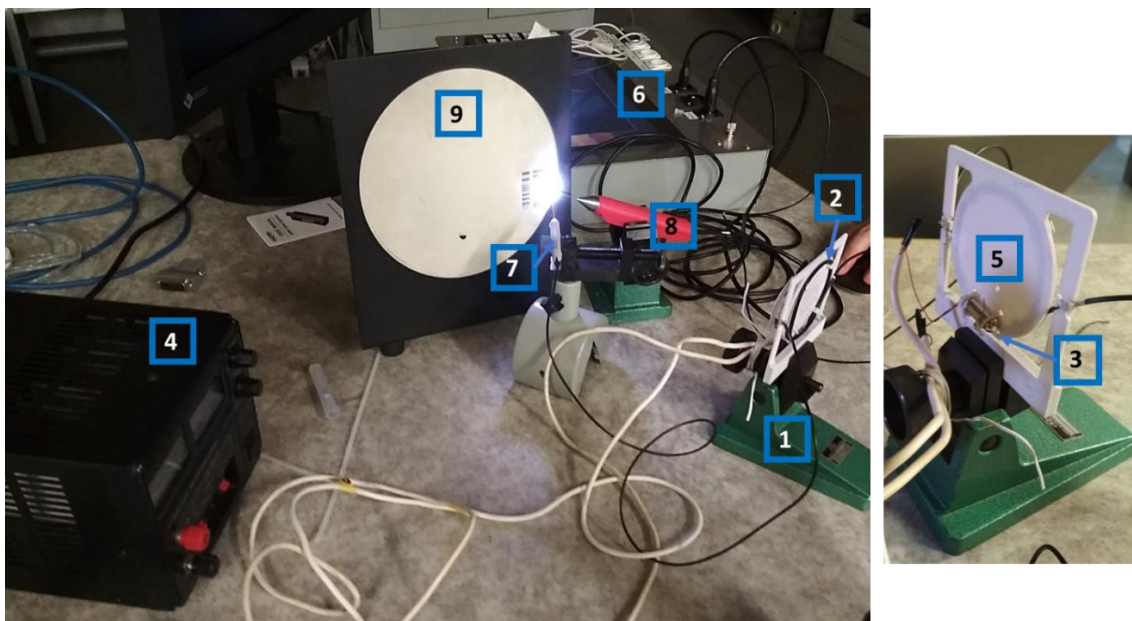
Obrázek 38: Schéma experimentální aparatury pro druhý set experimentů s přípravky.

4.3.2.1 Vibrování velkým a malým přípravkem s vodorovně umístěným vibračním elektromotorem a vláknem Alcon

Samotný experiment byl prováděn obdobně jako předešlé experimenty, jen s tím rozdílem, že místo zavěšené kartonové desky byl použit držák s připevněnými přípravky. Tento set experimentů je znázorněn na následujícím schématu (Obrázek 38). Číslem 1 je označen držák, který svírá přípravek (5) za širší okraj. Na přípravku je upevněno vlákno

(2) s průměrem smyčky 60 mm v obou případech. Pro velký přípravek se vlákno stočilo do 4 smyček a na malém přípravku bylo vlákno smotáno do 2,5 smyčky. Dále byl na přípravek umístěn vibrační elektromotor (3) do vodorovné polohy. U velkého přípravku byl elektromotor umístěn na stejnou plochu jako vlákno, kdežto u malého přípravku se elektromotor umístil z druhé strany přípravku. Propojení jednotlivých komponent experimentu je dále stejné jako v předchozím případě (4.3.1).

U velkého přípravku byl endoskop umístěn ve vzdálenosti 3 mm od textu a osvětlovací sonda byla ve vzdálenosti 10 mm od zkoumaného předmětu. Při testování s malým přípravkem byla pracovní vzdálenost endoskopu opět 3 mm a konec osvětlovací sondy byl umístěn 15 mm od textu.

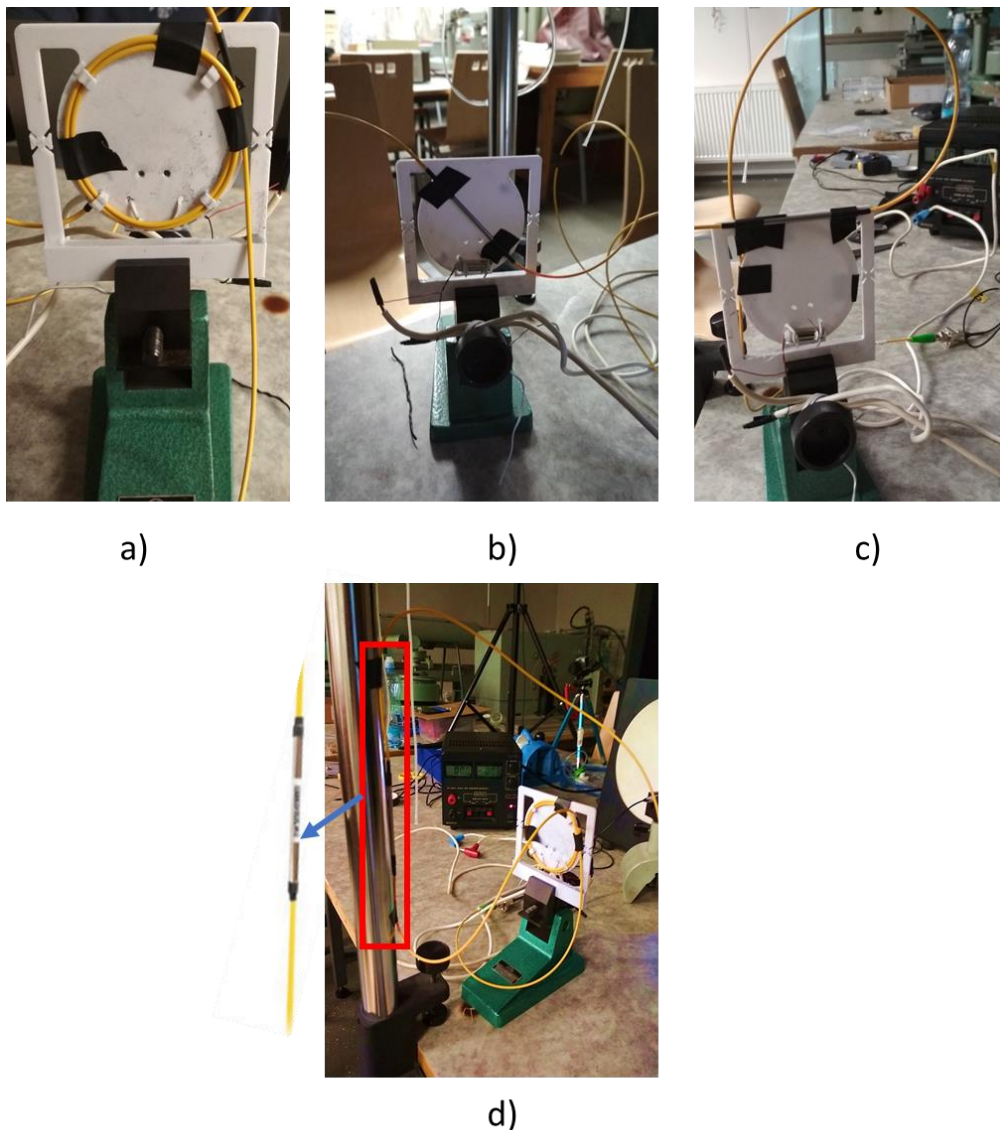


Obrázek 39: Experimentální sestava s malým přípravkem.

4.3.2.2 Vibrování malým přípravkem s vodorovně umístěným vibračním elektromotorem a homogenizérem

Na malý přípravek byl umístěn homogenizér s jeho optickým vláknem. Na obrázku (Obrázek 40) jsou vyobrazeny různé polohy umístění vlákna homogenizéru a homogenizéru samotného. Vibrační elektromotor je stále ve vodorovné poloze. Písmenem a) (Obrázek 40) je označena fotografie malého přípravku s upevněným vláknem homogenizéru do smyčky o průměru 60 mm . Další možnost umístění je znázorněna písmenem b). Zde je na malém přípravku úhlopříčně umístěn pouze

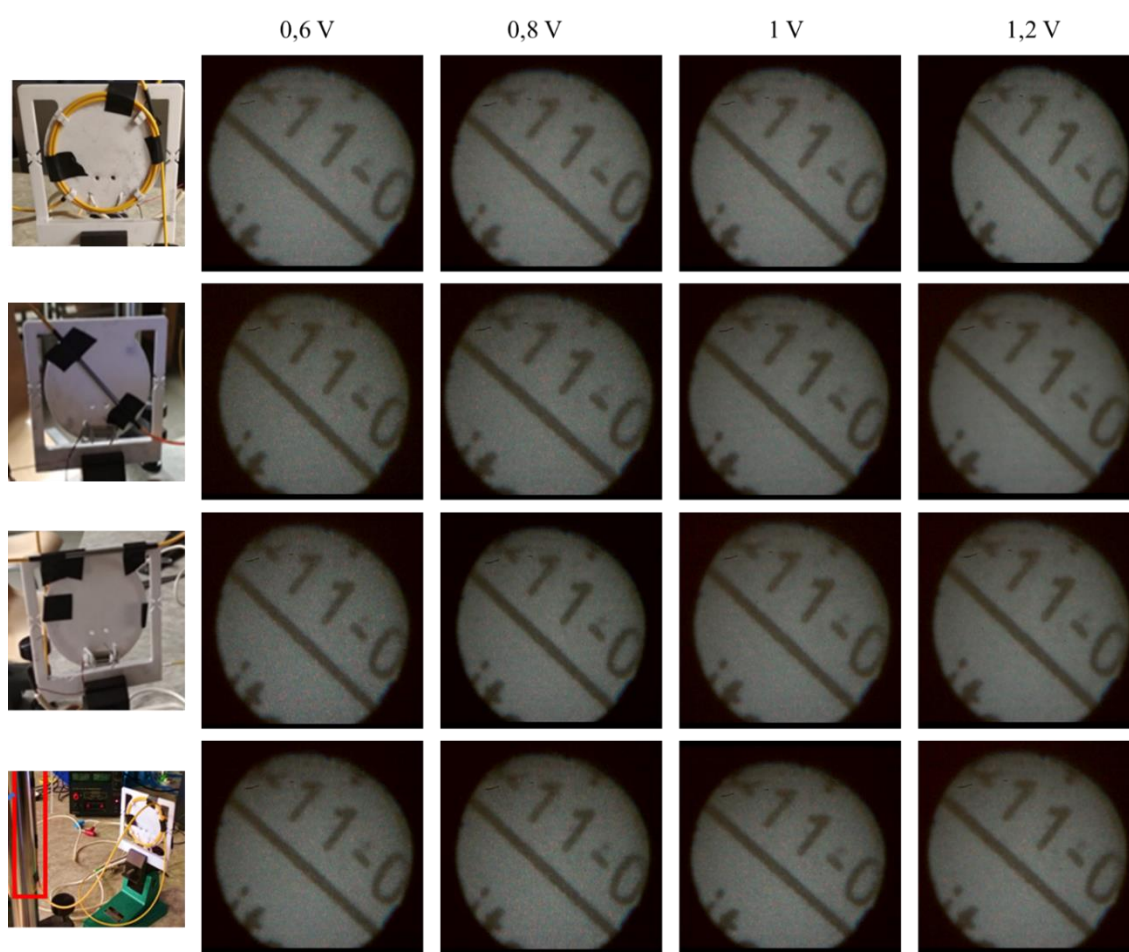
homogenizér a jeho vlákno je volně položeno vedle držáku. Pod písmenem c) je fotografie zobrazující optické vlákno homogenizéru upevněné podobně jako v případě a) ve smyčce o průměru 60 mm. Navíc je v horní části na druhé ploše přípravku přilepený homogenizér. V horní části přípravku je umístěn z toho důvodu, že při frekvenční analýze (4.4) se horní část přípravku pohybovala s maximální amplitudou. Poslední variantou z této části experimentů je umístění optického vlákna homogenizéru opět na malý přípravek do smyčky o průměru 60 mm a homogenizér byl fixně upnut ke stojanu, jak je znázorněno na obrázku d) (Obrázek 40).



Obrázek 40: Různé umístění optického vlákna homogenizéru a homogenizéru samotného na malý přípravek.

Ve všech případech bylo na vlákno homogenizéru napojeno optické vlákno Alcon, které je ukončeno světelnou sondou ve vzdálenosti 15 mm od textu a endoskop byl umístěn ve vzdálenosti 3 mm od textu s pohledem za roh. Konektor propojující homogenizér a optické vlákno Alcon byl fixně upevněn ve svěráku.






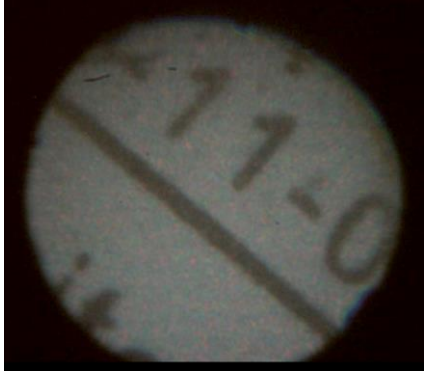
Na obrázku (Obrázek 41) jsou znázorněny výsledky jednotlivých uspořádání homogenizéru na malém přípravku. Již není nutné zobrazovat stav při 0 V , jelikož počáteční stav speklů je zaznamenán v jiných tabulkách (např. Tabulka 6).



Obrázek 41: Porovnání výstupů při vibrování homogenizéru a jeho vlákna dle druhého setu experimentů.

Ze čtyř různých konfigurací homogenizéru na malém přípravku (Obrázek 41) dosahuje nejlepších výsledků druhé uspořádání (Obrázek 40 b)), kdy se vibruje pouze homogenizérem umístěným diagonálně přes malý přípravek. Zde je obraz při $1,2\text{ V}$ přijatelně odspeklovaný. V ostatních případech jsou speckly při $1,2\text{ V}$ stále znatelné a narušují výsledný obraz.


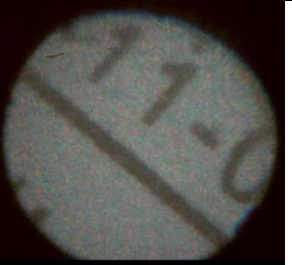






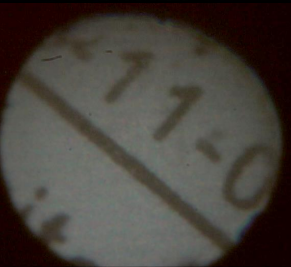


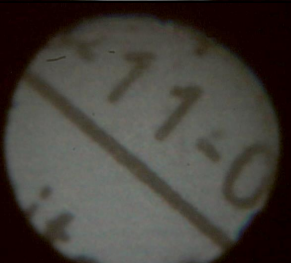
Současně v další tabulce (Tabulka 7) porovnáváme dvě vlákna (Alcon a homogenizér) z druhého setu experimentů na malém přípravku.

Napájecí napětí [V]	Typ vibrovaného optického vlákna	
	Alcon	Homogenizér
0		
0,6		
0,8		

Tabulka 7: Porovnání obrazu v závislosti na zvoleném optickém vlákne v případě druhého setu experimentů (malý přípravek).

Opět z tabulky (Tabulka 7) je patrné, že při vibrování optickým vláknem Alcon dochází k eliminaci speklového vzoru při 0,6 V a obraz dále zůstává čistý. U homogenizéru dochází se zvyšujícím se napětím k mírnému zlepšení, kdy specky mizí od středu obrazu. Ale i při 0,8 V jsou specky stále kontrastní.

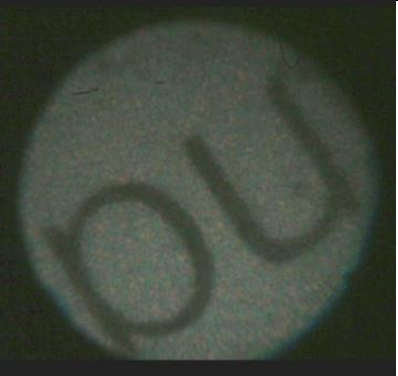
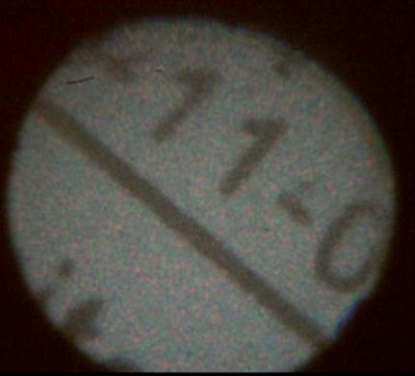




Nyní je možné porovnat výsledky prvního a druhého setu experimentů s vláknem Alcon (Obrázek 34, Obrázek 37). Výsledky z těchto měření jsou znázorněny v tabulce (Tabulka 8).

	Vibrační aparatura		
	Závěsný systém	Velký přípravek	Malý přípravek
Napětí [V]	Typ vlákna – Alcon		
0			
0,6			
0,8			
1			

Tabulka 8: Porovnání obrazu z prvního a druhého setu experimentů pro optické vlákno Alcon.

Při 0,8 V jsou spečky v prvním i druhém setu experimentů při vibrování optickým vláknem Alcon přijatelné (Tabulka 8). Při použití závěsného systému či malého přípravku mizí spečky již při 0,6 V.

Porovnání prvního a druhého setu experimentů s vibrovaným homogenizérem je znázorněno v další tabulce (Tabulka 9). Ve druhém setu experimentů jsme homogenizér umístili pouze na malý přípravek (Obrázek 40).

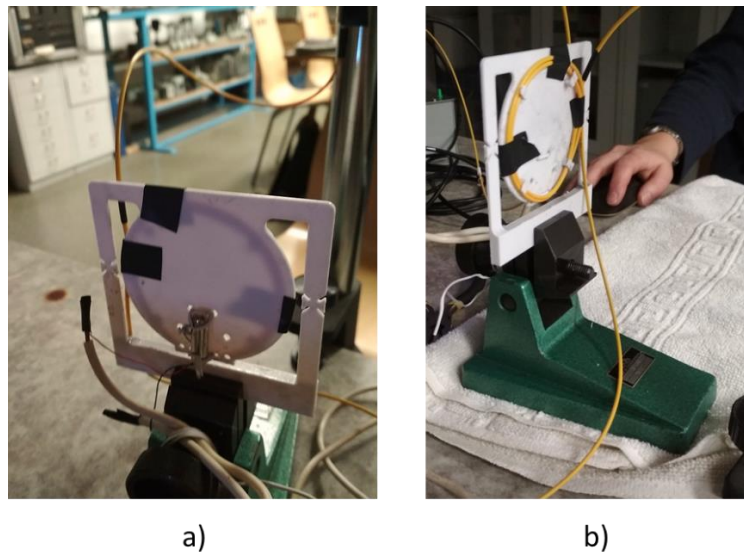
Napětí [V]	Vibrační aparatura	
	Závěsný systém	Malý přípravek
Typ vlákna – Homogenizér		
0		
0,6		
0,8		

Tabulka 9: Porovnání obrazu z prvního a druhého setu experimentů pro homogenizér.

Vibrováním homogenizéru na závěsném systému nebo na malém přípravku se kontrast speklů postupně od středu obrazu snižuje, avšak speckly při navyšování napětí zcela nemizí.

4.3.2.3 Vibrování malým přípravkem se svisle umístěným vibračním elektromotorem a homogenizérem

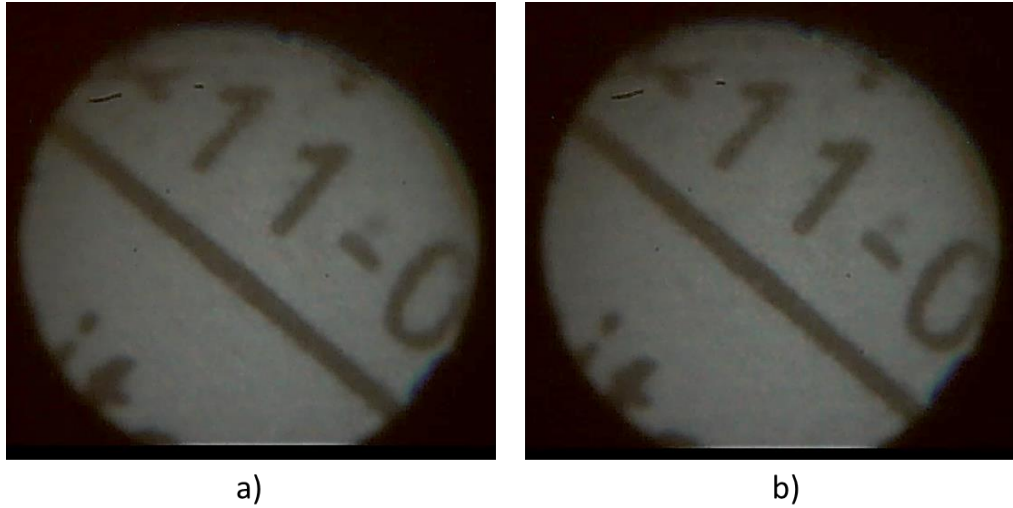
V dalších částech experimentu byla vyzkoušena změna polohy vibračního elektromotoru, který byl nadále umístován vertikálně. Rozmístění jednotlivých komponent zůstalo stejné. První experimentální sestava se svislou polohou elektromotoru je složena z malého přípravku, na který je umístěno vlákno homogenizéru ve dvou smyčkách a homogenizér je stále pevně přidělán ke stojanu (Obrázek 42).



Obrázek 42: Vlákno homogenizéru umístěné na malém přípravku s vibračním elektromotorem ve svislé poloze. Přípravek je umístěn a) na stejné ploše jako ostatní komponenty, b) na ručníku.

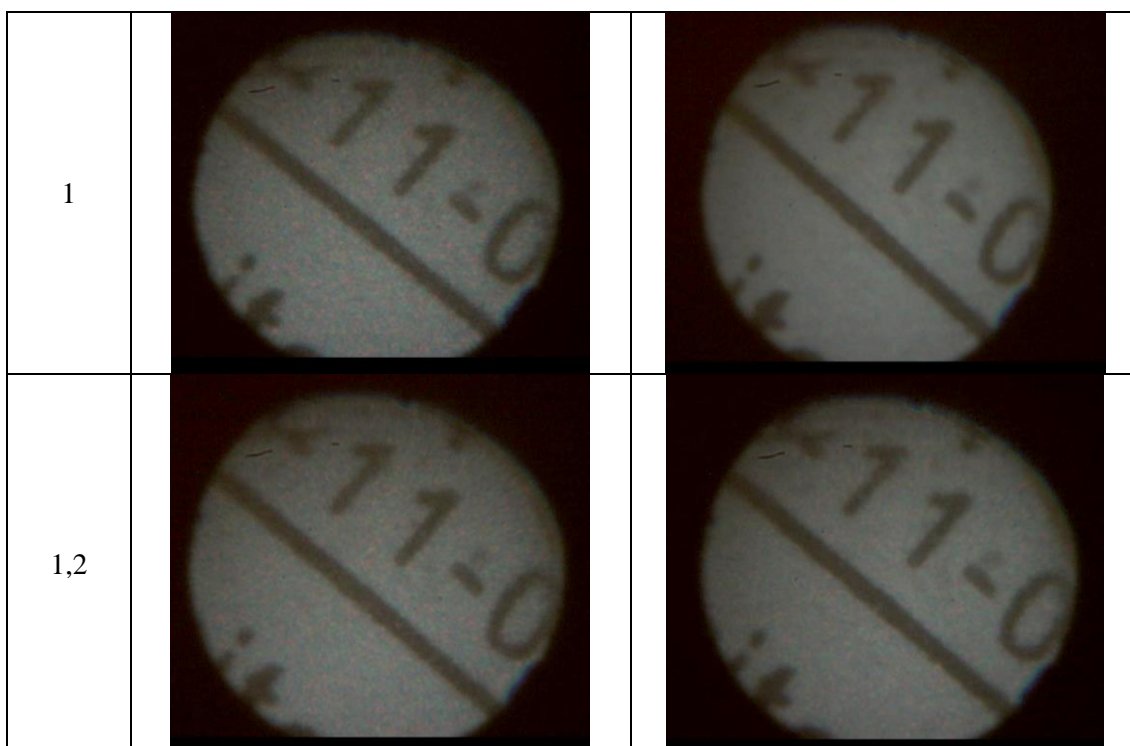
Bohužel při tomto pokusu bylo zjištěno, že k rušení speklů přispívaly i vibrace přenášené plochou stolu na další komponenty. Převážně se vibrace přenášely na konektor a výstupní osvětlovací vlákno. Z tohoto důvodu bylo nutné šíření vibrací do okolí omezit na minimum. Jako první byl použit měkký ručník, který vibrace částečně utlumil a výsledky se rázem zhoršily (Obrázek 43).

V této části experimentu také došlo ke změně polohy vibračního elektromotoru. Pro posouzení vlivu polohy vibračního elektromotoru (Tabulka 10) byl využit homogenizér fixně připevněný na stojan (Obrázek 40 d), Obrázek 42) s optickým vláknem upevněným na malém přípravku s vodorovnou/ svislou polohou vibračního elektromotoru.



Obrázek 43: Držák s malým přípravkem byl umístěn a) na stole, b) na měkkém ručníku.
Napájecí napětí 1 V.

		Poloha vibračního elektromotoru	
		Vodorovná	Svislá
Napětí [V]	Typ vlákna – Homogenizér		
	0,6		
0,8			

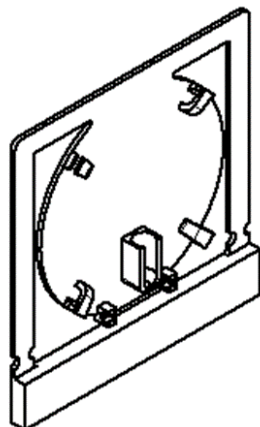


Tabulka 10: Porovnání dvou poloh vibračních elektromotorů.

Při srovnání dvou poloh vibračního elektromotoru (Tabulka 10) je vidět, že při vodorovné poloze elektromotoru dochází k minimální změně a speklový vzor je jasně viditelný i při 1,2 V. Při svislé poloze elektromotoru dochází k výrazným změnám při hodnotě napětí 0,6 V. Při 1 V je obraz bez výrazných speklů. Ale s dalším navyšováním hodnoty napětí se speckly znovu objevují.

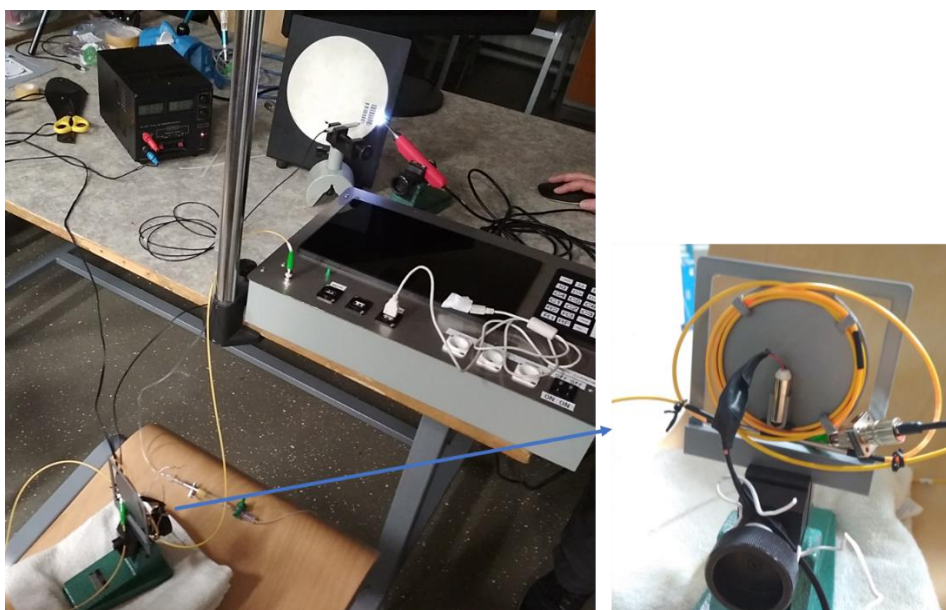
4.3.3 Třetí set experimentů

Vzhledem k příznivějším rozměrům malého přípravku se další úpravy prováděli jen na něm. Byl vytvořen přípravek o stejných rozměrech jako měl původní malý přípravek, ale nový typ přípravku (přípravek II) měl pouzdro pro uložení vibračního elektromotoru a také úchyt pro homogenizér přímo pod elektromotorem (Obrázek 44).



Obrázek 44: Přípravek II pro uchycení optického vlákna, vibračního elektromotoru a homogenizéru.

4.3.3.1 Vibrování přípravkem II mimo pracovní plochu se svisle umístěným vibračním elektromotorem a homogenizérem



Obrázek 45: Sestava pro experiment s přípravkem II.

Další sada experimentů probíhala s přípravkem II, který byl vždy umístěn mimo pracovní plochu, tedy mimo stůl. Prvně se na přípravek smotalo vlákno homogenizéru do 4 smyček. Pak se umístil samotný homogenizér do předem připravených úchyťů, vsunul se vibrační elektromotor a do volného prostoru přípravku II byl zachycen konektor

(Obrázek 45). V další části experimentu se vibrovalo pouze konektorem umístěným v těsné blízkosti vibračního elektromotoru (Obrázek 46).



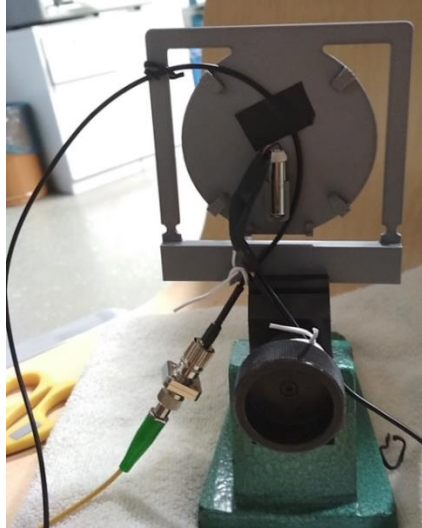
Obrázek 46: Vibrování s konektorem na přípravku II.

4.3.3.2 Vibrování přípravkem II mimo pracovní plochu se svisle umístěným vibračním elektromotorem a optickým vláknem Alcon




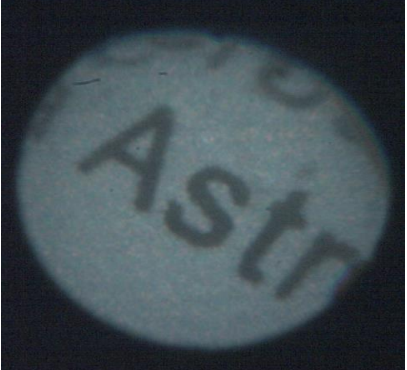
Po řadě experimentů bylo jasné, že k eliminaci speklů bude nutné vibrovat převážně koncovým vláknem, které vychází z demonstrátoru. Naším původním cílem bylo zničit specky již před výstupem z demonstrátoru. Avšak vzhledem k nedostačujícím výsledkům při vibrování optickým vláknem homogenizéru a konektoru byl proveden poslední experiment s vibrováním koncového optického vlákna Alcon (Obrázek 47).


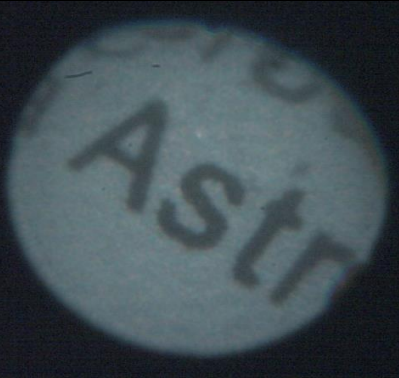



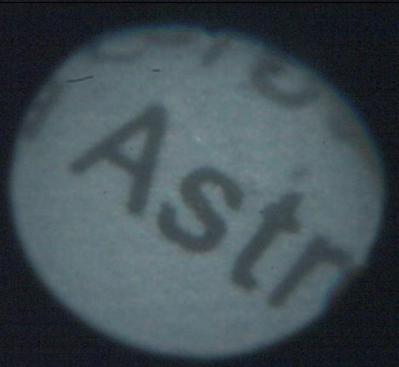
Na fotografii (Obrázek 47) z posledního experimentu sledování závislosti vibrací na eliminaci speklů je mimo pracovní plochu (na židli) umístěn držák, ve kterém je sevřen přípravek II se svisle umístěným vibračním elektromotorem. V těsném dotyku je vedeno koncové vlákno Alcon. Tento experiment má simulovat vibrování optického vlákna Alcon hned při výstupu z demonstrátoru.

Dále bylo provedeno porovnání výsledků získaných pomocí malého přípravku se svislou polohou vibračního elektromotoru (Obrázek 42) a přípravku II, který má též vibrační elektromotor ve svislé poloze (Obrázek 45). Toto porovnání (Tabulka 11) je možné provést pouze s vláknem homogenizéru, protože ve druhém setu experimentů bylo optické vlákno Alcon testováno jen s vibračním elektromotorem ve vodorovné poloze.



Obrázek 47: Vibrování částí optického vlákna Alcon.








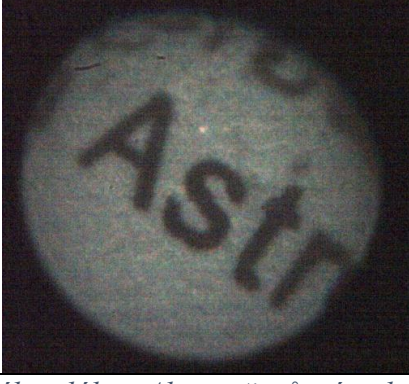
		Vibrační aparatura se svislou polohou vibr. elektromotoru	
		Malý přípravek	Přípravek II
Napětí [V]	Typ vlákna – Homogenizér		
0			
0,6			

0,8		
1		
1,2		

Tabulka 11: Porovnání výsledků při vibrování malým přípravkem a přípravkem II se stejnou polohou vibračního elektromotoru a se stejným typem vlákna.

V tabulce (Tabulka 11) porovnávající malý přípravek s přípravkem II je zaznamenáno, že oba výstupy jsou přijatelné od 0,8 V, kdy je viditelný pouze malý kontrast speklů. U přípravku II zůstává obraz se zvyšujícím se napětím čistý, tedy bez speklového vzoru. S použitím malého přípravku se po překročení 1,2 V spekle opět objevují.

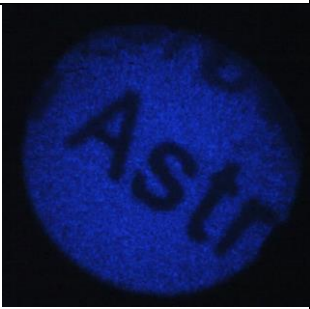


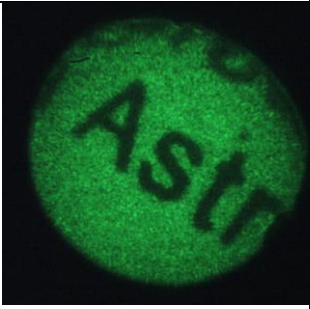
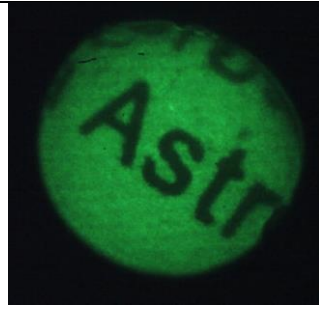

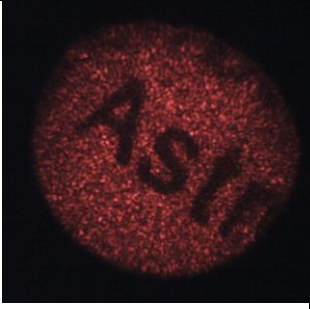


Porovnání výsledků s optickým vláknem Alcon na malém přípravku a přípravku II je v tabulce (Tabulka 12). Je možné posoudit vliv polohy vibračního elektromotoru na změnu speklů v optickém vlákně Alcon, protože vibrační elektromotor byl na malém přípravku umístěn ve vodorovné poloze a na přípravku II ve svislé poloze.

	Poloha vibračního elektromotoru	
	Vodorovná (malý přípravek)	Svislá (přípravek II)
Napětí [V]	Typ vlákna – Alcon	
0,6		
0,8		
1		
1,2		

Tabulka 12: Porovnání výsledků z vibrování optického vlákna Alcon při různé poloze vibračního elektromotoru.

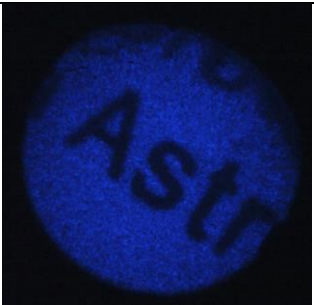
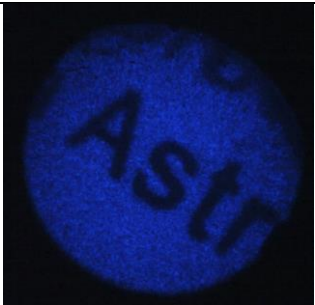

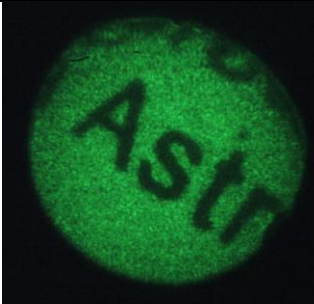
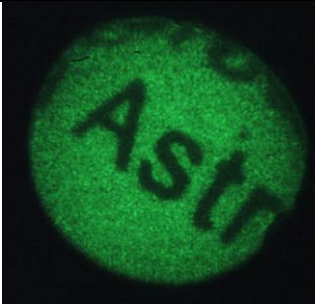

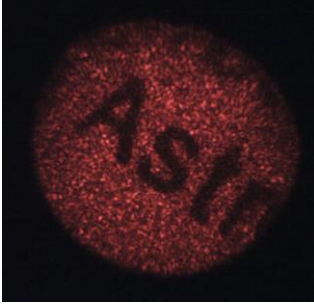


Pro výsledky z tabulky (Tabulka 12) platí, že obraz při použití malého přípravku s vláknem Alcon je bez výrazných speklů při 0,6 V a dále se obraz nemění. Oproti tomu při vibrování vláknem Alcon na přípravku II se kontrast speklů jen nepatrně snížil a obraz není přijatelný ani při 1,2 V.

V rámci třetího setu experimentů byl porovnáván vliv vlnové délky na eliminaci speklů (Obrázek 44). Jako první byl na přípravek připevněn homogenizér s jeho vláknem a konektorem (Obrázek 45). Poté bylo měření provedeno s optickým vláknem Alcon (Obrázek 47). Výsledky jsou uvedeny v tabulkách (Tabulka 13, Tabulka 14).

Homogenizátor s jeho optickým vláknem			
Vln. délka [nm]	Napětí [V]		
	0	0,8	1
450			
520			
660			

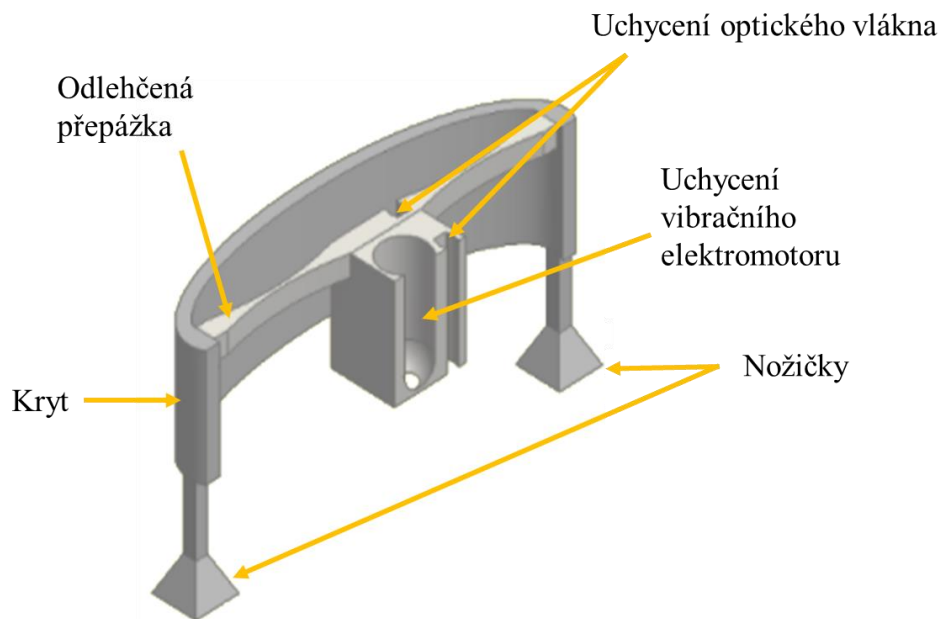
Tabulka 13: Záznam vlivu vibrací na jednotlivé vlnové délky při vibrování homogenizátorem.

Z tabulky (Tabulka 13, Tabulka 14) je vidět, že nejlepšího výsledku se dosahuje u modré barvy. U zelené barvy dochází k potlačení menšího množství speklů, než je tomu u modré barvy a červená barva vykazuje vysoký kontrast speklů po celou dobu zvyšování napětí. Při použití homogenizéru dochází k eliminaci speklů u modré barvy okamžitě při zvýšení hodnoty napětí z 0 V. Ale při vibrování optickým vláknem Alcon se u modré barvy kontrast speklů sníží, ale zcela nezmizí.

Optické vlákno Alcon			
Vln. délka [nm]	Napětí [V]		
	0	0,8	1
450			
520			
660			

Tabulka 14: Záznam vlivu vibrací na jednotlivé vlnové délky při vibrování optickým vláknem Alcon.

Na základě výsledků z experimentální části byl vymodelován návrh technického řešení pro uchycení vibračního elektromotoru a optického vlákna. Tento návrh (Obrázek 48) je určen k připevnění vně demonstrátoru, kvůli potřebě vibrovat posledním vláknem. Model návrhu obsahuje úchyt pro vibrační elektromotor a pro optické vlákno. Díky dvěma otvorům určených k uchycení vlákna, je možné vlákno stočit do několika smyček. Na tyto části navazuje poddajná přepážka, která je připevněna ke krytu celého zařízení. K uchycení návrhu k demonstrátoru slouží rozšířená spodní část nožiček s dírou pro šroub.



Obrázek 48: Technický návrh pro uchycení vibračního elektromotoru a optického vlákna na vnější straně demonstrátoru.

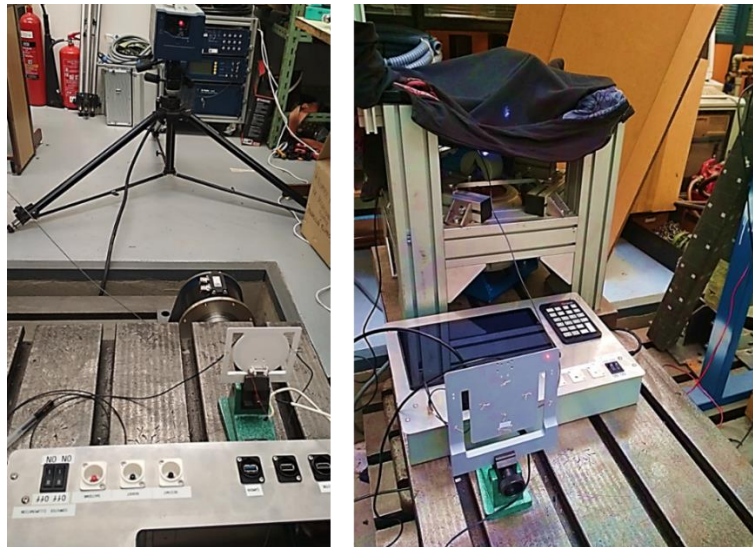
4.4 Frekvenční analýza

V rámci laboratoře Odboru mechaniky a mechatroniky nám Ing. Pavel Steinbauer, Ph.D. poskytl laserové vibrační zařízení, pomocí kterého byly získány hodnoty frekvencí a amplitud našich přípravků (velkého a malého) pro různé hodnoty napětí vibračního elektromotoru. K tomuto účelu byl použit PSV – 500 skenovací vibrometr, který je schopen zachytit vibrační rychlosti od $0,01 \mu\text{m/s}$ do 30 m/s .

Bylo nutné přenést naši experimentální sestavu (Obrázek 38) určenou pro druhý set experimentů do laboratoře, kde bylo možné pozorovat závislost velikosti amplitud jednotlivých částí přípravků na eliminaci speklů a použitého napětí (Obrázek 50).



Obrázek 49: PSV – 500 skenovací vibrometr. [34]



Obrázek 50: Aparatura pro měření vibrací na velkém a malém přípravku.

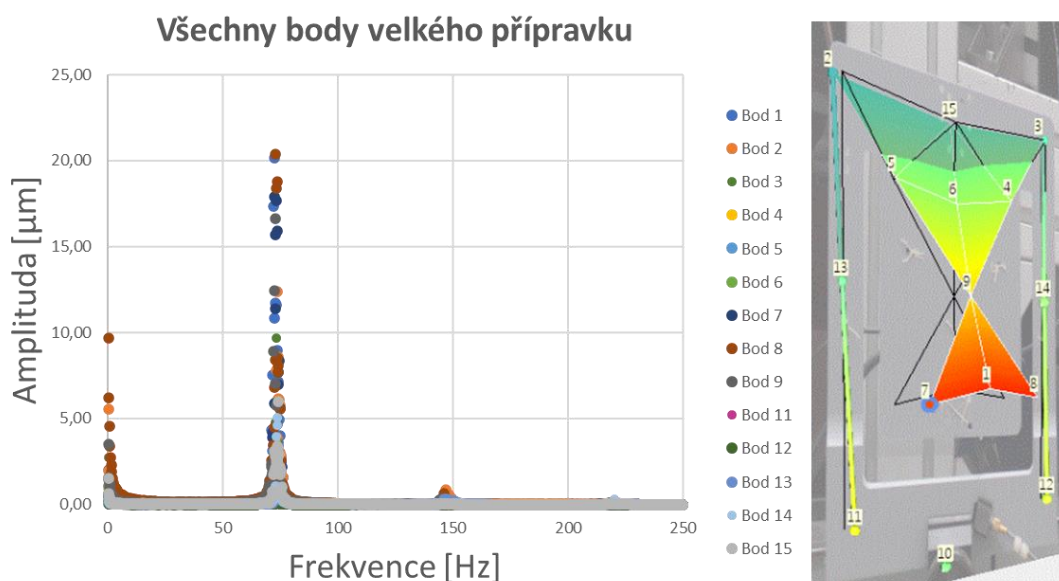
4.4.1 Výsledky z frekvenční analýzy

Frekvenční analýza pomocí skenovacího vibrometru byla provedena pouze pro velký a malý přípravek (Obrázek 37) a pro 3 různé hodnoty napětí (0,8 V, 1 V, 1,2 V). Na přípravcích se určilo několik bodů, ve kterých se měřily hodnoty frekvencí a amplitud.

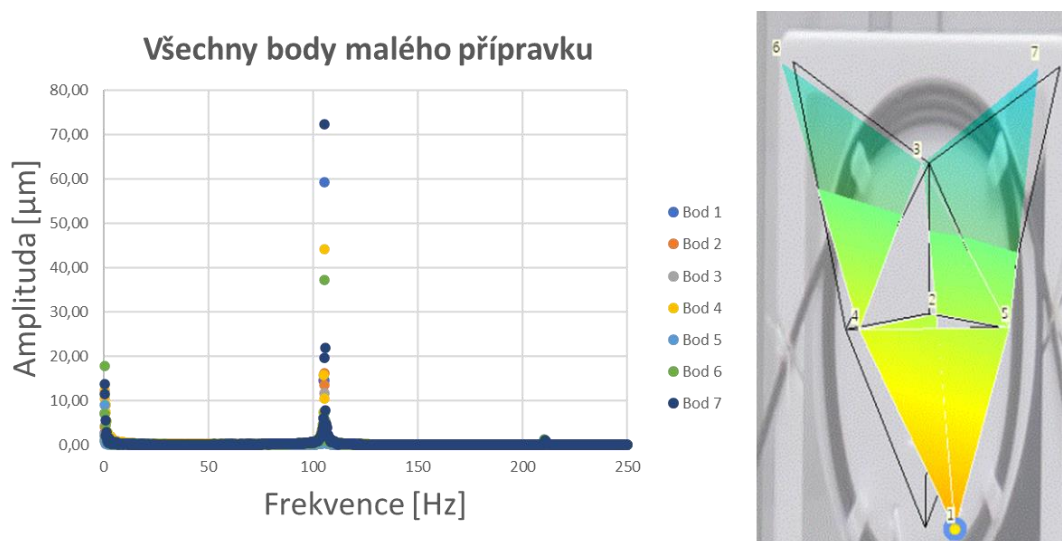
Výsledky frekvenční analýzy byly poté zpracovány v programu Excel, kde byly ke každému bodu přípravku (velkého i malého) vyneseny závislosti amplitud na frekvenci.

Pro představu jsou uvedeny grafy se všemi naměřenými body do frekvence 250 Hz (Obrázek 51, Obrázek 52), protože dále amplitudy jednotlivých bodů oscilovaly kolem nuly. Ve vyhodnocení byl vynechán bod 10, který sloužil jako referenční bod.

Z grafů (Obrázek 51, Obrázek 52) je patrné, že se objevují vždy dvě výrazné frekvence, z nichž jedna se mění s napětím (Tabulka 15 a Obrázek 53 - Obrázek 54).



Obrázek 51: Závislost amplitudy na frekvenci bodů velkého přípravku při 0,8 V.



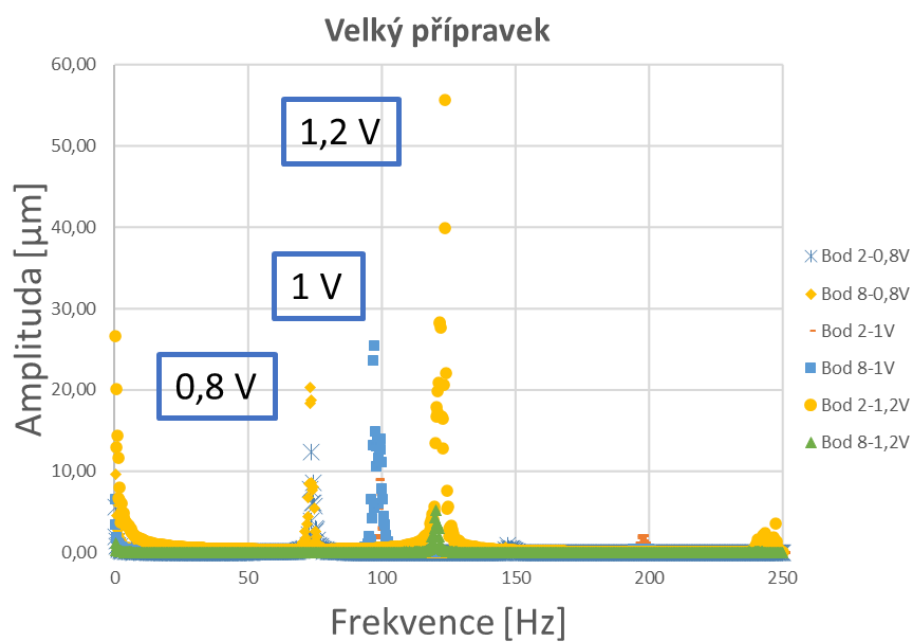
Obrázek 52: Závislost amplitudy na frekvenci bodů malého přípravku při 0,8 V.

V následující tabulce (Tabulka 15) jsou vypsány maximální hodnoty amplitud výrazných frekvencí pro body s největším rozkmitem. Pro velký přípravek jsou to body 2 a 8 a pro malý přípravek body 1 a 7. Dále jsou zaznamenány hodnoty významných frekvencí přiřazené k jednotlivým amplitudám. Jak se mění významná frekvence s napětím pro jednotlivé body rozkmitu je znázorněno na grafech (Obrázek 53, Obrázek 54).

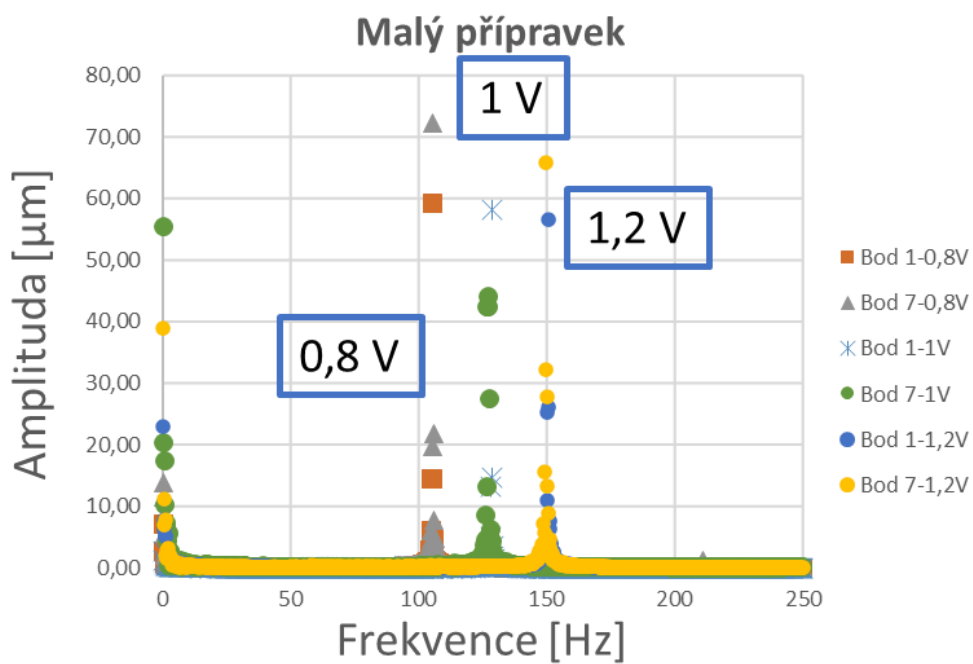
		Napětí [V]		
		0,8	1	1,2
Velký přípravek bod 2/ bod 8	1.Max. amplituda	$-5,55 \mu m /$ $9,66 \mu m$	$-1,52 \mu m /$ $6,5 \mu m$	$-2,66 \mu m /$ $1,13 \mu m$
	frekvence	0,25 Hz	0,25 Hz	0,25 Hz
	2.Max.amplituda	$-7,83 \mu m /$ $18,4 \mu m$	$-1,19 \mu m /$ $25,40 \mu m$	$-55,67 \mu m /$ $0,23 \mu m$
	frekvence	73,25 Hz	97,25 Hz	123,5 Hz
Malý přípravek bod 1/ bod 7	1.Max. amplituda	$-7,07 \mu m /$ $11,51 \mu m$	$-2,63 \mu m /$ $55,4 \mu m$	$-22,9 \mu m /$ $38,8 \mu m$
	frekvence	0,25 Hz	0,25 Hz	0,25 Hz
	2.Max.amplituda	$-14,52 \mu m /$ $72,24 \mu m$	$-58,2 \mu m /$ $4,33 \mu m$	$-6,8 \mu m /$ $65,7 \mu m$
	frekvence	105,5 Hz	128,5 Hz	149,75 Hz

Tabulka 15: Významné frekvence a jim odpovídající amplitudy.

Na grafech (Obrázek 51 - Obrázek 54) i z tabulky (Tabulka 15) je zřejmé, že první významná frekvence (0,25 Hz) se při zvyšujícím napětí nemění. Kdežto druhá významná frekvence se s rostoucím napětím posouvá k větším hodnotám. U velkého přípravku dokonce platí, že s rostoucím napětím se zvyšuje i maximální amplituda. Z grafu (Obrázek 55) je jasné, že se na malém přípravku dosahuje mnohem větších hodnot amplitud, než je tomu u velkého přípravku.

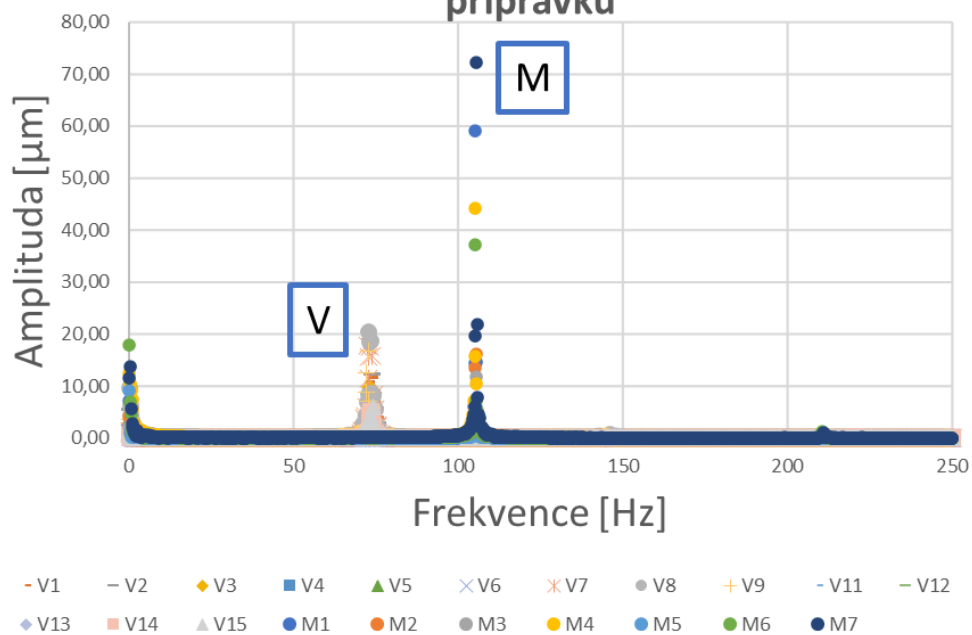


Obrázek 53: Závislost změny významné frekvence na napětí u velkého přípravku.



Obrázek 54: Závislost změny významné frekvence na napětí u malého přípravku.

Porovnání velkého (V) a malého (M) přípravku



Obrázek 55: Porovnání amplitud velkého (V) a malého (M) přípravku při 0,8 V.

5 Diskuse

Cílem této práce bylo přijít na způsob eliminace speklů v osvětlovací soustavě prototypového očního endoskopu, zkonstruovat despeklovací systém a ověřit jeho funkci. Na základě rešerše věnované despeklovacím systémům jsme se rozhodli pro eliminaci speklového vzoru pomocí vibrací. Byly vytvořeny tři sety experimentů s různými testovacími přípravky určenými k vibrování optickým vláknem. Následně byl porovnán vliv jednotlivých přípravků, druhy a umístění optického vlákna. Také byl sledován vliv polohy vibračního elektromotoru a vliv vlnové délky na eliminaci speklů. Výsledky z měření byly zpracovány ve formě výstupních obrazů přímo z kamery nebo prostřednictvím demonstrátoru, ke kterému byl připojen počítač. Pro zajímavost se v laboratoři Odboru mechaniky a mechatroniky změřily amplitudy posuvů velkého a malého přípravku v závislosti na frekvencích pro různé hodnoty napájecího napětí vibračního elektromotoru. Tato frekvenční analýza byla poté zpracována ve formě grafů závislosti amplitudy na frekvenci.

5.1 Zhodnocení experimentálních výsledků

Z experimentálních výsledků (4.3) je vidět jasná závislost eliminace speklů na zvyšujícím se napětím. Ve většině případů platí, že s rostoucím napětím vibračního zařízení specky postupně mizí. Vibrační elektromotor byl nastavován na maximální hodnotu $1,2\text{ V}$, jelikož při dalším zvýšení napětí byl elektromotor velmi hlučný. Proto se zpracovávali výsledky pro rozmezí hodnot napětí $0\text{ V} - 1,2\text{ V}$.

Také byl porovnán vliv výstupního obrazu na pracovní vzdálenosti endoskopu. Z tabulky (Tabulka 5) porovnávající pracovní vzdálenost $3\text{ a }7\text{ mm}$ je zřejmé, že pozorování blízkého bodu umožňuje vidět větší detaily i větší specky.

V průběhu všech experimentů se používaly dva typy optických vláken – optické vlákno 23 Ga Alcon a homogenizér laserového svazku s optickým vláknem.

Při prvním setu experimentů (Obrázek 33) mizí speklový vzor u optického vlákna Alcon při nepatrném zvýšení napětí elektromotoru ($0,6\text{ V}$), kdežto u homogenizéru specky zůstávají i při $0,8\text{ V}$ (Tabulka 6). Pro maximální eliminaci specku považujeme u prvního

setu experimentů se závěsným zařízením za nejvhodnější řešení vibrovat koncovým vláknem Alcon. Pro získání čistého obrazu při použití homogenizéru by se muselo napětí na vibračním elektromotoru zvýšit. Avšak při vyšším napětí je vibrační elektromotor hodně hlučný.

Stejně se vůči sobě vlákna chovají i při vibrování na malém přípravku v druhém setu experimentů (Tabulka 7), kdy při vibrování optickým vláknem Alcon je obraz odspeklován již při hodnotě napětí $0,6$ V. Během vibrování vláknem homogenizéru se spekly neeliminují a jsou znatelné i při dalším zvyšování napětí, dokonce i při různých konfiguracích (Obrázek 41). Proto i u druhého setu experimentů by bylo optimální vibrovat optickým vláknem Alcon.

Rozdíl mezi experimentální aparaturou prvního a druhého setu experimentů byl značný, jelikož se jednalo o zcela jiné uspořádání vibračního zařízení. V první variantě mělo zařízení větší volnost pohybu (Obrázek 33) než ve druhém setu experimentů (Obrázek 38). Z porovnání jednotlivých experimentálních setů (Tabulka 8) při vibrování optickým vláknem Alcon vidíme, že u velkého přípravku mizí spekly až s vyšším napětím oproti malému přípravku či závěsnému systému. Jelikož závěsný systém není vhodný pro reálné využití, tak můžeme říci, že nejlepší variantou pro vibrování optického vlákna Alcon je malý přípravek (Obrázek 39), se kterým dochází k eliminaci speklů již při $0,6$ V. Co se týče homogenizéru a jeho vlákna (Tabulka 9), tak nelze jednoznačně říct, která z metod je lepší. Vliv na posouzení jistě může mít to, že jsme u prvního setu experimentů brali obrázky z demonstrátoru a u druhého setu experimentů z počítače, kde se měnila expozice kamery. Avšak spekly jsou viditelné u obou variant i při $0,8$ V. Což potvrzuje, že se v koncovém optickém vlákně Alcon ustaví jiné módy, které tvoří další spekly. Zároveň se mohlo stát, že jsme neodstranili všechny spekly vytvořené v homogenizéru a ty se šířily dál do koncového vlákna.

V rámci dalších experimentů byl vyzkoušen vliv dvou odlišných poloh vibračního elektromotoru – vodorovná a svislá. U vodorovně umístěného elektromotoru na malém přípravku s upevněným homogenizérem nedochází k výraznému snížení kontrastu speklů během zvyšování hodnoty napětí. Z tabulky (Tabulka 10) je patrné, že se svisle umístěným vibračním elektromotorem dochází k výraznější eliminaci speklů již od $0,6$ V. Při nastavení hodnoty 1 V je obraz v optimálním stavu bez výrazných speklů. Během

dalšího navyšování napětí se opět zobrazují viditelné spekly, a navíc se elektromotor utišil, což může být způsobeno přechodem přes vlastní frekvenci.

Dále jsme se pokusili utlumit vibrace přenášené od přípravku k ostatním částem experimentální aparatury. Pod držák upínající malý přípravek byl přidán měkký ručník, čímž se zvýšil kontrast speklů. Pro objektivnější výsledky se dále umisťoval vibrující přípravek na židli, mimo pracovní plochu.

Ve třetím setu experimentů se pracovalo s novým přípravkem (označován II), jehož rozměry odpovídaly malému přípravku z druhého setu experimentů. Přípravek II by měl být poddajnější vůči vibracím. Navíc je u něj vytvořen úchyt pouze pro svislou polohu vibračního elektromotoru (Obrázek 44). Porovnání výsledných obrazů z malého přípravku a přípravku II jsou v tabulkách (Tabulka 11, Tabulka 12). Při vibrování homogenizérem (Tabulka 11) se svislou polohou vibračního elektromotoru se lépe osvědčil přípravek II, u kterého se obraz despekloval při 0,8 V a dále se nezhoršoval. U malého přípravku byl výsledek akceptovatelný pouze při 1 V.

Porovnání malého přípravku a přípravku II s vibrovaným vláknem Alcon je znázorněno v tabulce (Tabulka 12). Zároveň je zde možné porovnat i vliv polohy vibračního elektromotoru, který byl na malém přípravku umístěn ve vodorovné poloze a na přípravku II ve svislé poloze. Vibrování optickým vláknem Alcon pomocí elektromotoru ve vodorovné poloze má na eliminaci speklů větší účinek než ve druhém případě. Při použití přípravku II se svisle situovaným elektromotorem se kontrast speklů mírně snižuje od napětí 1 V. Při vodorovném umístění elektromotoru je obraz despeklován od 0,6 V. Tento výsledek může být ovlivněn nejen přípravkem, polohou elektromotoru, ale i délkou vibrovaného vlákna. V případě malého přípravku bylo namotáno 2,5 smyčky optického vlákna o průměru 60 mm, kdežto u přípravku II byla na desce přípravku pouze malá část optického vlákna (60 mm) těsně přiléhajícího k elektromotoru. Bohužel vlákno Alcon nemá dostatečnou délku k tomu, aby bylo větší množství namotáno na přípravek a dále ještě zbývalo dostatečné množství vlákna pro manipulaci s osvětlovací sondou. Navíc oproti malému přípravku byl přípravek II s držákem umístěn mimo pracovní plochu. Z toho důvodu mohou být výsledky s přípravkem II horší, jelikož nedocházelo k šíření dalších vibrací pracovní plochou na ostatní komponenty měřící aparatury. Vzhledem k různému uspořádání malého přípravku a přípravku II nelze říct, který by byl vhodnější

pro eliminaci despekul pomoci vibrování vláknem Alcon. Ale je zřejmé, že by bylo vhodné vibrovat delším kusem vlákna.

Jelikož osvětlovací soustava je tvořena třemi lasery, byla testována závislost eliminace spekul na jednotlivých barvách. Z výsledků (Tabulka 13, Tabulka 14) je vidět, že každá vlnová délka reaguje na vliv vibrací odlišně. Na první pohled je patrné, že při 0 V jsou specky nejvíce znatelné u červené barvy, u které se zároveň nejhůře eliminují. To odpovídá tomu, že červená barva má nejdelší vlnovou délku, tudíž je u červené barvy potřeba nejvíce změnit dráhu módů, aby se specky vyrušily. Nejméně zasažená je modrá barva, u které specky mizí okamžitě při mírném zvýšení napětí. Kvůli škodlivému působení krátkých vlnových délek modré barvy na sítnici se tento typ laserů samostatně nevyužívá.

Lze konstatovat, že se vzrůstající vlnovou délkou se zhoršuje spekulový vzor. U optického vlákna Alcon (Tabulka 14) vidíme mírné zlepšení, avšak ne takové, jako u homogenizéru (Tabulka 13). Tudíž můžeme opět potvrdit, že závisí na vibrované délce optického vlákna.

5.2 Zhodnocení frekvenční analýzy

V rámci kapitoly 4.4.1 byly zpracovány výsledky získané z vibrometru do závislostí amplitud a jejich příslušných frekvencí pro tři různé velikosti napětí na velkém a malém přípravku.

Obecně platí, že u velkého přípravku se dosahovalo podstatně menších hodnot amplitud než u malého přípravku (Obrázek 51 - Obrázek 55). Což se prokázalo i na spekulovém vzoru, který se snadněji eliminoval na malém přípravku. U velkého přípravku se dle očekávání nejvíce pohybovala část v blízkosti vibračního elektromotoru, tedy body 1, 7, 8 (Obrázek 51). Avšak u malého přípravku docházelo k maximálnímu prohnutí v pravém horním rohu (Obrázek 52), na nejvzdálenějším místě od vibračního elektromotoru (bod 7). V bodě 7 docházelo k velkým posuvům vlivem vlastních frekvencí malého přípravku. Až druhým amplitudovým maximem byl bod 1. Tento bod je v místě vibračního elektromotoru.

Dle očekávání se na velkém přípravku nejvíce prohýbají body 7 a 8 (Tabulka 15), což jsou body v těsné blízkosti vibračního elektromotoru. Při nižších frekvencích u malého přípravku se maximálních hodnot amplitud dosahuje v bodech 4, 6 a 7, které jsou paradoxně nejdále od vibračního elektromotoru. Při vyšších frekvencích, tedy v druhém píku amplitud se dosahuje maximálních hodnot v bodech 1 a 7. Kde bod 1 je bod středu vibračního elektromotoru, avšak bod 7 je nejdále od vibračního elektromotoru. Jedná se protichůdné body, u kterých lze pozorovat prokmit celého přípravku. U velkého přípravku byly zvoleny protichůdné body 2 a 8. Maximální prokmity byly zaznamenány v tabulce (Tabulka 15), ze které je vidět, že u velkého přípravku se s rostoucím napětím zvětšuje i rozkmit amplitud protichůdných bodů. U malého přípravku to tak není.

6 Závěr

Tato diplomová práce se zabývala vylepšením laserové cesty prototypového očního endoskopu. V osvětlovacím systému se tvořily spekle, které činily výsledný obraz nečitelným. V teoretické části byla popsána struktura optických vláken, materiály, ze kterých se optická vlákna mohou vyrábět a také jak se optická vlákna spojují. Dále byla zaměřena pozornost na podrobný popis módů v optických vláknech a jejich vliv na tvorbu speklů. Pro lepší pochopení vedení módů optickými vlákny byly popsány i jednotlivé jevy, které ovlivňují šíření světla ve vláknech. Další kapitola byla věnována rešerši despeklovacích systémů. Byly popsány komerčně používané metody k eliminaci speklů a další možnosti zkoumané zatím jen teoreticky.

V experimentální části byly navrženy čtyři různé despeklovací systémy, ve kterých se využívalo vibrací za pomoci vibračního elektromotoru. První aparatura byla vytvořena jen pro ověření, zda vibrování vláknem může doopravdy eliminovat spekle. Jednalo se o robustní závěsný systém, kde se na zavěšenou kartonovou desku připevnilo zaspeklované vlákno s vibračním elektromotorem. V dalších fázích se systém zmenšoval a byly vyrobeny dva přípravky – velký a malý, které se daly uchopit do svěraku a bylo na nich možné měnit polohu vibračního elektromotoru. Poslední vyrobený přípravek (označován jako přípravek II) byl uzpůsoben tak, aby byl více poddajný vibracím. Dále měl úchop jen pro jednu polohu vibračního elektromotoru.

Pomocí experimentů s navrženými despeklovacími systémy bylo zjištěno, že nelze samostatně využít komerčně prodáváný homogenizér laserového svazku. Současně byly odhaleny závislosti uspořádání aparatury na eliminaci speklů. Z experimentálních měření byl vypořádkován vliv délky vibrovaného vlákna, vliv polohy vibračního elektromotoru či vliv vlnové délky zdroje světla. Na snižování kontrastu speklového vzoru měl dopad také typ vibrovaného vlákna.

Jako nejlepší despeklující varianta se ukázala aparatura s malým přípravkem, na kterém se pomocí vibračního elektromotoru ve vodorovné poloze vibrovalo koncovým vláknem Alcon. Vlákno Alcon bylo na malý přípravek namotáno ve 2,5 smyčkách o průměru 60 mm. Již při 0,6 V byl obraz dostatečně despeklován. K maximální eliminaci speklového vzoru při vibrování homogenizéru a jeho optického vlákna docházelo od 0,8 V za použití přípravku II se svislou polohou vibračního elektromotoru.

Prokázalo se, že pomocí vibrací dojde k eliminaci speklů, vytvořených v optickém vlákně. Dalším krokem tohoto výzkumu je otestování navrhovaného vibračního zařízení (Obrázek 48) a případné jeho úpravy. Alternativou provedených experimentů je změna vibračního zařízení (cívka z reproduktoru či jiný typ vibračního elektromotoru), nebo použití více vibračních zařízení najednou. Dražší variantou by mohlo být zapojení několika homogenizérů laserového svazku za sebou bez použití vibračního zařízení.

7 Literatura

- [1] LISSAK, Gadi. Adverse physiological and psychological effects of screen time on children and adolescents: Literature review and case study. *Environmental Research* [online]. 2018, **164**, 149-157 [cit. 2020-12-28]. ISSN 00139351. Dostupné z: doi:10.1016/j.envres.2018.01.015.
- [2] Čižmár, T., Dholakia, K. Exploiting multimode waveguides for pure fibre-based imaging. *Nat Commun* **3**, 1027 (2012). <https://doi.org/10.1038/ncomms2024>.
- [3] CHEN, Chin-Lin. *Elements of optoelectronics and fiber optics*. Chicago: Irwin, c1996. ISBN 0256141827.
- [4] NĚMCOVÁ, Šárka. Odraz a lom rovinné vlny. *Moodle-výuka* [online]. [cit. 2021-01-13]. Dostupné z: https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/88665/mod_resource/content/0/ZO-prednaska2.pdf.
- [5] MARŠÁLEK, Leoš. *Optická vlákna* [online]. In: . 2006 [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: <http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>.
- [6] BUBNÍK, Lukáš, Jiří KLAJBL a Petr MAZUCH. *Optoelektronika* [online]. In: . [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: doi:978-80-88058-20-5.
- [7] PASCHOTTA, Rüdiger. LP Modes. *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/lp_modes.html.
- [8] PASCHOTTA, Rüdiger. Passive fiber optics. *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/passive_fiber_optics.html.
- [9] PASCHOTTA, Rüdiger. Cut-off Wavelength. *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/cut_off_wavelength.html.
- [10] YOUNG, Matt. *Optics and lasers: an engineering physics approach*. Berlin: Springer, 1977. ISBN 3-540-08126-7.
- [11] MASSA, Nick. *Fiber Optic Telecommunication: Module 1.8* [online], [cit.2021-01-02]. Dostupné z:<https://spie.org/Documents/Publications/00%20STEP%20Module%2008.pdf>.
- [12] An Overall Understanding of Fiber Optic Connectors. *Opticalcommunication* [online]. 2016 [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: <http://opticalcommunication.over-blog.com/2016/05/an-overall-understanding-of-fiber-optic-connectors.html>.
- [13] *FIBER CONNECTIVITY* [online]. [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: <https://fiberopticshow.com/product/st-fiber-optic-connector-2/>.

- [14] J. Doleček: Optoelektronika a optoelektronické prvky BEN technická literatura, Praha 2005.
- [15] *Polarization mode dispersion*. Editor Andrea GALTAROSSA, editor Curtis R. MENYUK. New York: Springer, 2005. ISBN 0-387-23193-5.
- [16] *Rozptyl světla v optickém vlákně* [online]. [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1671-rozptyl-svetla-v-optickem-vlaknu>.
- [17] DAINTY, J. C., ed. *Laser Speckle and Related Phenomena* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1975 [cit. 2020-10-11]. Topics in Applied Physics. ISBN 978-3-662-43207-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-662-43205-1.
- [18] SCULLY, Charles N. *LASER TARGET SPECKLE ELIMINATOR*. Apr. 16, 1985. USA. 4,511,220. Zapsáno Apr. 16, 1985.
- [19] MEHTA, Dalip Singh, Dinesh N. NAIK, Rakesh Kumar SINGH a Mitsuo TAKEDA. Laser speckle reduction by multimode optical fiber bundle with combined temporal, spatial, and angular diversity. *Applied Optics* [online]. 2012, **51**(12) [cit. 2020-10-11]. ISSN 1559-128X. Dostupné z: doi:10.1364/AO.51.001894.
- [20] FREUDE, W., C. FRITZSCHE, G. GRAU a LU SHAN-DA. Speckle interferometry for spectral analysis of laser sources and multimode optical waveguides. *Journal of Lightwave Technology* [online]. 1986, **4**(1), 64-72 [cit. 2020-11-29]. ISSN 0733-8724. Dostupné z: doi:10.1109/JLT.1986.1074634.
- [21] HA, W., Jes BROENG, Clifford HEADLEY III, S. LEE, Y. JUNG, J. KIM a K. OH. *Speckle reduction in multimode fiber with a piezoelectric transducer in radial vibration for fiber laser marking and display applications* [online]. In: . 2008-2-7, 68731V- [cit. 2020-10-24]. Dostupné z: doi:10.1117/12.774889.
- [22] MASAOKI, Imai. *Statistical properties of optical fiber speckles* [online]. In: . 1985 [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: https://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/bitstream/2115/41972/1/130_89-104.pdf.
- [23] AKRAM, M. Nadeem a Xuyuan CHEN. Speckle reduction methods in laser-based picture projectors. *Optical Review* [online]. 2016, **23**(1), 108-120 [cit. 2020-10-11]. ISSN 1340-6000. Dostupné z: doi:10.1007/s10043-015-0158-6.
- [24] KONDÁSZ, Bence, Béla HOPP a Tomi SMAUSZ. Homogenization with coherent light illuminated beam shaping diffusers for vision applications: spatial resolution limited by speckle pattern. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications* [online]. 2018, **14**(1) [cit. 2021-01-02]. ISSN 1990-2573. Dostupné z: doi:10.1186/s41476-018-0095-7.

- [25] TRISNADI, Jahja I. a Ming H. WU. [online]. In: . 2002-4-30, s. 131-137 [cit. 2020-10-11]. Dostupné z: doi:10.1117/12.463781.
- [26] CHELLAPPAN, Kishore V., Erdem ERDEN a Hakan UREY. Laser-based displays: a review. *Applied Optics* [online]. 2010, **49**(25) [cit. 2020-10-11]. ISSN 0003-6935. Dostupné z: doi:10.1364/AO.49.000F79.
- [27] Laser speckle reducers (LSR). *Optotune* [online]. [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: <https://www.optotune.com/laser-speckle-reducers>.
- [28] De-Speckler. *Fiberguide* [online]. [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: <https://www.fiberguide.com/product/despeckler/>.
- [29] In-line Laser Speckle Reducer (Fiber Optical Beam Homogenizer). *Lfiber* [online]. [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: <https://www.lfiber.com/laser-speckle-reducer-beam-homogenizer/>.
- [30] FELDMAN, Michael R. *BEAM HOMOGENIZER*. Feb. 28, 1994. USA. 5,610,733. Uděleno Mar 11, 1997. Zapsáno Feb. 28, 1994.
- [31] CURTIS, Kevin. *DESPECKLING DEVICES AND METHODS*. Jan. 10, 2013. USA. Zapsáno Jan. 10, 2013.
- [32] HA, Woosung, Sejin LEE, Yongmin JUNG, Jun Ki KIM a Kyunghwan OH. Acousto-optic control of speckle contrast in multimode fibers with a cylindrical piezoelectric transducer oscillating in the radial direction. *Optics Express* [online]. 2009, **17**(20) [cit. 2020-12-30]. ISSN 1094-4087. Dostupné z: doi:10.1364/OE.17.017536.
- [33] MACIEJKO, Roman. *Fiber optic element for reducing speckle noise*. Canada. Uděleno Nov 23, 1982.
- [34] PSV-500 Scanning Vibrometer. *Polytec* [online]. [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: <https://www.polytec.com/eu/vibrometry/products/full-field-vibrometers/psv-500-scanning-vibrometer/>.
- [35] Oční endoskop. *Ústav přístrojové a řídicí techniky* [online]. [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: <https://control.fs.cvut.cz/cs/vyzkum/node-1969/>.
- [36] ON Semiconductor MT9P031 smallest USB color camera. *Ximea* [online]. [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: <https://www.ximea.com/en/products/cameras-filtered-by-sensor-sizes/aptina-mt9p031-smallest-usb-color-camera>.