

Bakalářská práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická

**Akomodace stopy pole a numerické  
apertury mezi konvenčním jednovidovým  
optickým vláknem a vláknem s vysokou  
numerickou aperturou**

**Bedřich Kyndl**

Školitel: Ing. Matěj Komanec, Ph. D.  
Květen 2019



## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce panu Ing. Matěji Komancovi, Ph.D. za jeho ochotu a cenné rady při konzultacích během vzniku tohoto projektu.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a pouze s pomocí citovaných zdrojů pod vedením Ing. Matěje Komance Ph. D.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kyndl** Jméno: **Bedřich** Osobní číslo: **435015**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra telekomunikační techniky**  
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**  
Studijní obor: **Sít'ové a informační technologie**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Akomodace stopy pole a numerické apertury mezi konvenčním jednovidovým optickým vláknem a vláknem s vysokou numerickou aperturou**

Název bakalářské práce anglicky:

**Mode Field and Numerical Aperture Accomodation between Conventional Single-mode Fiber and High Numerical Aperture Fiber**

Pokyny pro vypracování:

Provedte rešerši jednovidových optických vláken v konvenčním provedení a s vysokou numerickou aperturou (Ultra-High Numerical Aperture, UHNA). Diskutujte stěžejní parametry pro jejich vzájemné trvalé napojení. Vytvořte v simulačním prostředí model těchto vláken a analyzujte ztráty vlivem rozdílné numerické apertury a stopy optického pole. Dále navrhnete, na základě teoretických předpokladů, řešení napojení těchto vláken za využití CO2 laseru a vláknového taperování. Realizujte toto napojení a vyhodnoťte ztráty na vytvořeném spoji pomocí přímého měření výkonu a metodou OTDR.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Novotný K., Martan T., Šístek J.: Systémy pro optické komunikace. Vydavatelství ČVUT. Praha 2007. ISBN: 978-80-01-03920-5.
- [2] Hui R., O'Sullivan M.: Fiber Optic Measurement Techniques. Academic Press, 2009 ISBN: 978-0-12373-865-3.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Matěj Komanec, Ph.D., katedra elektromagnetického pole FEL**

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

Datum zadání bakalářské práce: **11.02.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

Ing. Matěj Komanec, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je řešit parametry konvenčních jednovlákenných vláken SMF-28 a vláken UHNA (Ultra-High Numerical Aperture), která jsou význačná svojí vysokou numerickou aperturou. Dále jsou na základě teoretických předpokladů diskutovány a simulačních výstupů navrženy možnosti trvalého propojení konvenčních jednovlákenných vláken SMF-28 a UHNA vláken pomocí vláknového taperování. Navržené propojení je realizováno pomocí CO<sub>2</sub> laseru a porovnáno s optimalizovaným svařecím procesem bez využití taperů. K výrobě taperů byl použit svařecí systém na bázi CO<sub>2</sub> laseru Fujikura LZM-100. Vytvořené vzorky taperů byly vhodně zalomeny a navařeny na vlákno UHNA. Skutečné ztráty realizované optické trasy jsou poté vyhodnocovány pomocí metody přímého výkonu a metody OTDR. Získané hodnoty byly poté porovnávány s hodnotami modelu vytvořeného v simulačním prostředí BeamPROP. Řešení uvedené v této práci umožňuje trvalé spojení výše uvedených typů vláken s minimálními ztrátami spoje. Tato zapojení se uplatňují například pro aplikace připojení konvenčních vláken k optickému čipu či jinému optickému zařízení, které z důvodu rozměrů jader používaných konvenčních optických vláken není často možné připojovat přímo.

**Klíčová slova:** UHNA vlákna, SMF-28, taperování, svařování optických vláken, MFD, přizpůsobení stopy pole

**Školitel:** Ing. Matěj Komanec, Ph. D.  
Praha, Technická 1902/2,  
místnost: B2-533

## Abstract

The purpose of this bachelor thesis is research of conventional single-mode optical fibers SMF-28 and UHNA (Ultra-High Numerical Aperture) fibers, which are distinguished for their high numerical aperture value. Next, based on theoretical assumptions and simulation results, there was discussed and suggested possibilities of single-mode fibers SMF-28 and UHNA fibers permanent join by fiber tapers. The suggested join is realized by CO<sub>2</sub> laser and compare with optimized joining process without tapers use. Splicing system Fujikura LMZ-100 on CO<sub>2</sub> laser base has been used for production of tapers. These created taper samples were broken in suitable way and spliced on UHNA fibers. The real loss of implemented optical route has been analyzed with direct power measurement method and OTDR method. Gained values have been compared with model values created in the simulation environment BeamPROP. The solution referred in this thesis allows permanent join with above-referred types of fibers with minimal splice loss. Such fibers splices are used for example for application of conventional optical fibers connecting with an optical chip or other optical device, which is not possible to connect directly due to the difference of core dimension at used conventional optical fibers.

**Keywords:** UHNA fiber, SMF-28, tapering, optical fiber splicing, MFD, accommodation mode field diameter

**Title translation:** Mode Field and Numerical Aperture Accommodation between Conventional Single-mode Fiber and High Numerical Aperture Fiber

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Parametry optických vláken</b>	<b>3</b>
1.1 Numerická apertura NA .....	3
1.2 Stopa pole .....	4
1.3 Vlákná se slabým vedením vlny ..	6
1.4 Tabulka parametrů (srovnání optických vláken) .....	6
<b>2 Analýza a porovnání jednotlivých spojení</b>	<b>9</b>
2.1 Konektory .....	9
2.2 Mechanické spojky .....	9
2.3 Použití optických elementů při navazování světla mezi vlákny ....	10
2.4 Svařování optických vláken .....	11
2.4.1 Proces sváření optických vláken .....	11
2.4.2 Taperování vláken .....	12
<b>3 Simulační prostředí BeamPROP</b>	<b>13</b>
<b>4 Nedokonalosti spojů vláken</b>	<b>15</b>
4.1 Nesouosost vláken .....	15
4.2 Dutiny a nehomogenity spoje ...	18
<b>5 Měřicí metody</b>	<b>21</b>
5.1 Metody pro odhad útlumu u svářecích stanic .....	21
5.1.1 Metoda PAS .....	21
5.1.2 Metoda RTC .....	22
5.1.3 Metoda LID .....	22
5.2 Měření útlumu na svařovaných spojích .....	23
<b>6 Návrh a postup měření</b>	<b>27</b>
6.1 Navrhované řešení .....	27
6.2 Výsledky měření .....	31
<b>Zhodnocení a závěr</b>	<b>37</b>
<b>Literatura</b>	<b>39</b>
<b>Technické dokumentace</b>	<b>41</b>
<b>A Grafy</b>	<b>45</b>
<b>B Simulace</b>	<b>49</b>

## Obrázky

1.1 Akceptační kužel a akceptační úhel $\Theta_a$ .....	4	6.5 Laserový zdroj použitý o určení útlumu spojů .....	31
1.2 Poloměr stopy pole normovaný poloměrem jádra v závislosti na $V$ —parametru dle Marcusova vzorce a vzorce modifikovaného dle Presmanna II .....	5	6.6 Měřič výkonu výstupního signálu PM100D (vlevo) a detektor s fotodiodou (v pravo) .....	32
1.3 Stopa pole a rozložení výkonu v optickém vlákne .....	6	6.7 Výstupní graf pro model taperovaného spoje.....	33
2.1 Nákres $V$ – spojky v řezu .....	10	6.8 Detaily vláken během procesu svařování .....	34
4.1 Efektivita spojení při příčném spojení pro jednotlivá UHNA vlákna	16	6.9 Výstupní exportovaný graf z OTDR reflektometru pro směr AB	35
4.2 Příčné posunutí vlákna při sváření a) UHNA3 b) SMF-28 .....	16	6.10 Detail saturované signálové špičky ve výstupním grafu OTDR .....	35
4.3 Efektivita spoje při chybě v zarovnání v úhlu pro vlákno SMF-28 a vlákna UHNA .....	17	A.1 Efektivita spojení vlákna SMF-28 a UHNA3 .....	45
4.4 Porovnání výsledků simulačních monitorů .....	18	A.2 Efektivita spoje vlákna SMF-28 při příčném posuvu .....	46
4.5 Ukázka vlivu vzduchové dutinky v ose vlákna na velikost útlumu šířeného signálu .....	19	A.3 Taper A s lineárním profilem .	46
4.6 Šíření signálu a zpětné odrazy v okolí dutiny .....	20	A.4 Taper B s lineárním profilem ..	47
5.1 Princip pro odhad útlumu savářecích stanic Fujikura .....	21	A.5 Taper C se sinusovým profilem	47
5.2 Princip metody LID .....	22	A.6 Taper D se sinusovým profilem	48
5.3 Závislost mezi úhlem navázání a úhlem odrazu od rozhraní jádra plášt .....	23	B.1 Srovnání útlumů signálů při úhlové chybě zarovnání pro vlákna UHNA3 a vlákna SMF-28 .....	49
5.4 Metody měření útlumu a) metoda dvou délek b) metoda vložných ztrát	24	B.2 Příčné posunutí vlákna při sváření vlevo UHNA3 vpravo SMF-28 pro posunutí vláken o $\frac{1}{4}$ , $\frac{1}{2}$ , $\frac{3}{4}$ a celý poloměr příslušného jádra .....	50
5.5 Možný profil optické trasy vytvořené pomocí optického reflektometru.....	25		
6.1 Simulovaný model přímého napojení UHNA3 vlákna na vlákno SMF-28 .....	27		
6.2 Taper D se sinusovým profilem	29		
6.3 Taperované vlákno připravené na zalomení.....	30		
6.4 Kontrola rozměrů a zalomení taperu .....	30		

## Tabulky

1 Seznam zkratek a symbolů .....	1
1.1 Porovnání a parametry jednotlivých vláken .....	7
6.1 Parametry pro přímé svaření vlákna UHNA7 a SMF-28 [q] .....	31
6.2 Měřené výkony, vypočítané útlumy, a odhady útlumů svářecích systémů	32
6.3 Naměřené hodnoty výkonu a spočítané útlumy taperů .....	32





<b>Zkratka</b>	<b>Anglický název</b>	<b>Český název</b>
DSF	Dispersion-shifted fibers	Disperzně posunutá vlákna
LID	Local Injection and Detection	Systém s lokálním navázáním a detekcí
MFD	Mode Field Diameter	Průměr stopy pole
MFR	Mode Field Radius	Poloměr stopy pole
$n$	Refractive index	Index lomu
NA	Numerical Aperture	Numerická apertura
PAS	Profile Alignment System	Profilový zarovnávací systém
PCF	Photonic crystal fiber	Krystalická (mikrostrukturální) optická vlákna
POF	Plastic (polymeric) optical fiber	Polymerní optické vlákno
RTC	Real Time Control	Systém řízení v reálném čase
SMF	Single mode fiber	Jednovidové optické vlákno
V	V – value, Normalized frequency	V-parametr, Normovaná frekvence

**Tabulka 1:** Seznam zkratk a symbolů



## Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou vytvoření trvalého spoje konvenčního jednojádřového vlákna SMF-28 vycházejícího z doporučení ITU-G.652A a vlákna s vysokou numerickou aperturou (UHNA – Ultra-high numerical aperture). Vlákná s vysokou numerickou aperturou se používají zejména v aplikacích, kde přímé napojení například na planární vlnovod není možné uskutečnit konvenčním jednojádřovým vláknem SMF-28 z důvodů jeho velkého poloměru jádra a stopy pole. UHNA vlákna vynikají malými rozměry jádra a vysokou numerickou aperturou. Právě díky jejich vysoké numerické apertuře jsou tato vlákna vhodná jako přechod mezi běžnými SMF-28 vlákny a planárními vlnovody, optickými čipy, apod. I přes vysokou numerickou aperturu UHNA vláken je část energie při přímém spojení ztracena. Cílem této bakalářské práce je na základě stěžejních parametrů navrhnout a realizovat taperovaný přechod SMF-28, který přizpůsobí stopu pole a minimalizuje tak ztráty ve svařovaném spoji. Vzniklá optická trasa je poté měřena pomocí metody přímého měření optického výkonu a metody OTDR. Naměřené hodnoty jsou srovnány s výslednými hodnotami získanými pomocí simulačního prostředí BeamPROP, ve kterém je daná situace modelována. Přínosem této práce může být návrh řešení pro spojování optických vláken s rozdílnými konstrukčními parametry. Přestože je zde zkoumána situace spojení UHNA vláken a SMF-28 může být taper o příslušné délce a sklonu použit jako redukce pro přizpůsobení stopy pole i u jiných vláken, pokud to jejich materiálová struktura dovoluje.



# Kapitola 1

## Parametry optických vláken

Vláknová optika a optoelektronika dnes zastává významnou roli v mnoha odvětvích. V páteřních telekomunikačních sítích optické kabely již zcela nahradily metalická vedení a v dnešní době již dochází především k nahrazování části tras na tzv. poslední míli. Uplatnění však také nachází čím dál tím častěji v sensorové technice, kde optické vláknové senzory vynikají svojí vysokou přesností či chemickou odolností. Je nutné také zmínit zastoupení miniaturních optických vlnodů a čipů, jejichž způsob napojení na konvenční optické vlákno je navrhnout právě v této práci. Z důvodů rozdílných aplikací vzniklo krom velikého množství konvenčních a běžně používaných vláken také mnoho vláken se specifickými vlastnostmi či specializovanou strukturou, která je pro danou aplikaci nejvhodnější. Je zřejmé, že tak často dochází k situacím, kdy je potřeba vytvořit stálý spoj dvou vláken s odlišnými parametry. Tato kapitola se zaměřuje na základní popis parametrů, které jsou pro naši problematiku uvažovány

### 1.1 Numerická apertura NA

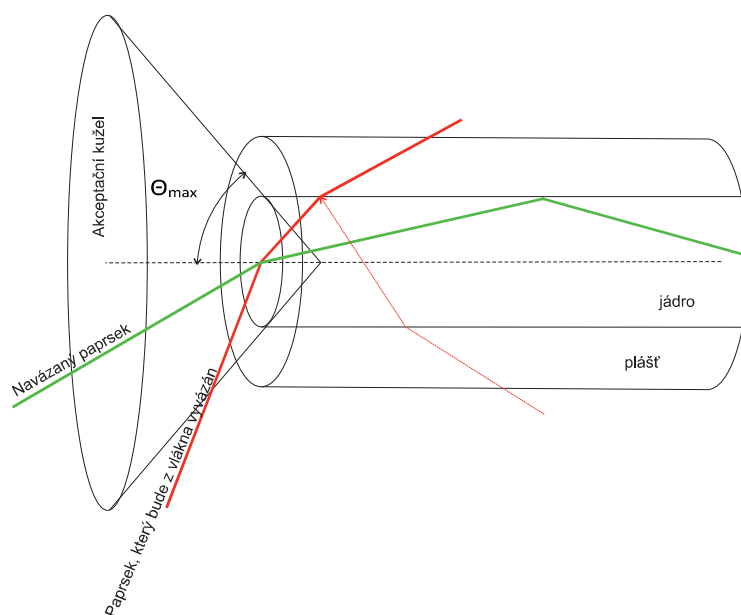
Numerická apertura je nejčastěji udávána jako schopnost vlákna navázat pod určitým úhlem optický paprsek, který se pak šíří dále vláknem. Numerickou aperturu je možné určit vztahem (1.1):

$$NA = n \sin \Theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.1)$$

kde  $n_1$  je index lomu jádra a  $n_2$  je index lomu pláště optického vlákna. Pomocí vztahu (1.2) je možné určit úhel, který je svírán mezi výškou a boční stěnou pomyslného kužele, jehož obsah vymezuje prostor, ve kterém je možné navázat optický paprsek tak, aby byl dále příslušným vláknem veden. Kužel, který takto NA vymezuje se nazývá kuželem akceptace. Tato situace je zachycena na obr. 1.1

$$\Theta_a = \arcsin(NA) [^\circ] \quad (1.2)$$

U běžných jednovidových vláken se hodnota NA pohybuje obvykle v rozmezí  $0,1 \sim 0,2$ , a rozdíl indexů lomů  $\Delta$  je v rozmezí  $0,2 \% \sim 1 \%$ . Z uvedených vztahů (1.1)(1.2) vycházejí pro úhel  $\Theta_a$  hodnoty  $5,7^\circ \sim 11,5^\circ$  [1] Pro vlákna



**Obrázek 1.1:** Akceptační kužel a akceptační úhel  $\Theta_a$

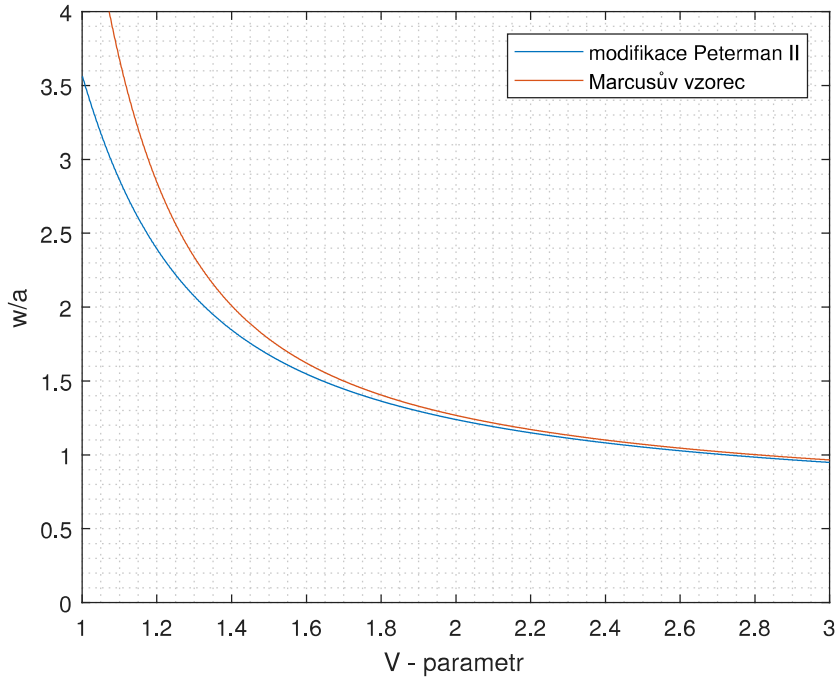
UHNA se hodnoty pro NA pohybují v rozmezí  $0,28 \sim 0,41$  [a], pro tato vlákna se tedy akceptační úhel pohybuje v rozmezí  $16,2^\circ \sim 24,2^\circ$ . Existují i vlákna s vyšší NA než mají vlákna řady UHNA, tato vlákna jsou však vyrábena jako vícevidová a jejich rozměr jádra je podstatně větší. Příkladem mohou být například POF vlákna (Plastic Optic Fibers) s  $NA \sim 0,50$ , jejichž poloměr jádra může být až pětisetnásobně větší oproti vláknům UHNA [1][b]. Nejen pro tyto důvody není použití těchto a obecně vícevidových vláken pro praktickou část této práce uvažováno.

## 1.2 Stopa pole

Stopa pole je důležitý parametr, na kterém závisí efektivita spojení mezi vlákny. Velikost stopy pole a její šíření závisí nejen na profilech indexu lomu vlákna, ale také na vlnové délce optického signálu šířícího se vláknem. Všechny tyto hodnoty jsou funkcí  $V$  – parametru. Stopa pole se tedy mění v závislosti na tomto parametru viz obr. 1.2. Navíc s jeho pomocí lze určit mezní frekvenci resp. vlnovou délku při které se ve vlákně s danými parametry ještě nevybuzují vyšší vidy. Vztah (1.3) pro výpočet  $V$  - parametru i s podmínkou pro jednovidovost vlákna je:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2,405 \quad (1.3)$$

kde  $a$  je poloměr jádra,  $\lambda$  je vlnová délka paprsku, který se šíří vláknem a  $J_0 = 2,405$  je první kořen Besselovy funkce. Přesto, že z větší části je energie šířená vláknem soustředěna do jádra vlákna, určitá část se šíří také po vnitřní straně pláště. Protože u klasických jednovidových vláken



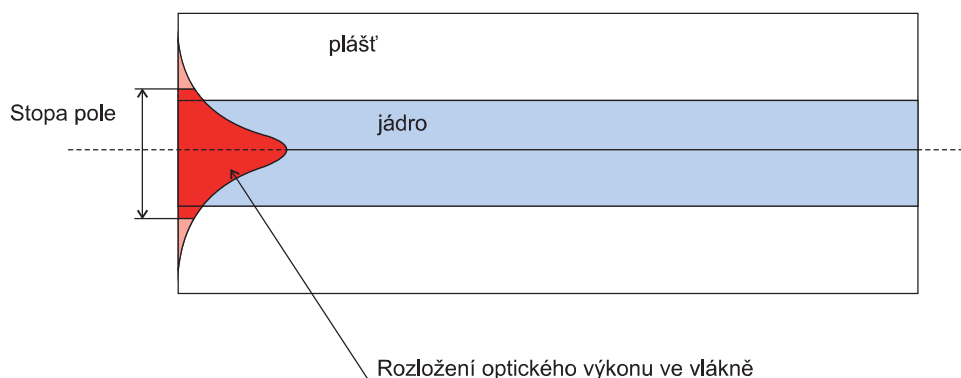
**Obrázek 1.2:** Poloměr stopy pole normovaný poloměrem jádra v závislosti na  $V$ —parametru dle Marcusova vzorce a vzorce modifikovaného dle Presmanna II

uvažujeme válcovitou strukturu, je pole základní vid šířící se vláknem kruhově symetrický, můžeme pole vidu šířícího se vláknem určit jako MFD (mode-field diameter), neboli stopu pole [1]. Stopu pole uvažujeme pouze u jednovidových, popřípadě vícevidových vláken s několika málo vidy. Pokud uvažujeme Gaussovské rozložení energie šířící se vláknem, pak můžeme stopu pole definovat jako průměr tohoto svazku tedy  $1/e^2$  ( $\sim 13,5\%$ ). Pokud je však rozložení energie jiné než Gaussovské (např. většina DSF vláken), zásadně se od něj liší a není možné takovýto průběh Gaussovským průběhem dostatečně věrně aproximovat, je třeba zvolit jiné metody určení šíře svazku např.  $D4\sigma$ , Petermann I, Petermann II, Marcus, přičemž každá z těchto metod vykazuje pro různé profily jiné odchylky [2, 3, 4]. Příkladem odlišnosti průběhů dle jednotlivých aproximací můžeme vidět na obr. 1.2

$$\omega_M = \frac{w_1}{a} = 0,65 + \frac{1,619}{V^{\frac{3}{2}}} + \frac{2,879}{V^6} \quad (1.4)$$

$$\omega_P = \omega_M - 0,016 + 1,561V^{-7} \quad (1.5)$$

Kde  $\omega_M$  je aproximační vzorec Marcus a  $\omega_P$  aproximační vzorec Petermann II. Ačkoliv je v grafu na obr. 1.2 a v aproximačních vzorcích Marcus a Petermann II (1.4)(1.5) je zmíněn poloměr stopy pole MFR (Mode Field Radius), v praxi se častěji používá stopa pole (MFD) tedy dvojnásobek MFR. Obvykle platí, že čím je stopa pole větší, tím více energie je vedeno mimo jádro vlákna.



**Obrázek 1.3:** Stopa pole a rozložení výkonu v optickém vlákně

U běžných SMF vláken bývá stopa pole obvykle větší, než je samotná šířka jádra, výjimkou jsou například PCF vlákna, kde je tato šířka menší.

### 1.3 Vlákná se slabým vedením vlny

Za vlákna se slabým vedením vlny se považují vlákna, která mají rozdíl indexů lomů mezi jádrem a pláštěm v řádu maximálně jednotek procent. Pro vlákna se slabým vedením vlny platí následující vztah (1.6)

$$\Delta = \frac{n_{\text{jádra}} - n_{\text{pláště}}}{n_{\text{pláště}}} \ll 1 \quad (1.6)$$

Tato vlákna mají tedy obecně malou NA a jedná se především o jednovidová vlákna. U těchto vláken je uvažované šíření paprsku téměř totožné s osou vláknem. Jednovidová vlákna se vyznačují malým poloměrem jádra ( $< 10 \mu\text{m}$ ), nízkým měrným útlumem ( $\sim 0,02 \text{ dB/km}$  při  $\lambda=1550$ ) a velkou šířkou pásma, díky čemuž je možné jejich využití i v dálkových trasách. Tato vlákna jsou obvykle tvořena křemenným sklem, které může být pro potřeby dosažení požadovaných parametrů dopované potřebnými látkami. Například materiál jádra u vláken UHNA je tvořen kompozicí  $\text{SiO}_2$  a  $\text{GeO}_2$ .

### 1.4 Tabulka parametrů (srovnání optických vláken)

V následující tabulce 1.1 jsou shrnuty běžné parametry několika vybraných typů běžně dostupných vláken. Ačkoliv tato práce se převážně zabývá SMF vlákny, jsou zde pro přehled vypsány i vlákna vícevidová či vlákna s modifikovanou vnitřní strukturou, tato vlákna se nacházejí v dolní polovině tabulky pod dvojitou čarou. Parametry pro jednotlivé typy vláken byly získány převážně z dokumentací jednotlivých výrobců, na jejichž dokumentaci je v posledním sloupci uveden odkaz. Tabulka tedy slouží jako přehled vybraných parametrů vybraných optických vláken s cílem poukázat na jejich vzájemnou odlišnost.



Typ vlákna	Průměr jádra/pláště [ $\mu\text{m}$ ]	NA	Stopa pole [ $\mu\text{m}$ ]	Operační vln. délka [nm]	Disperze [ps/nm·km]	Měrný útlum [dB/km]	zdroje
SMF-28 (Corn - ing)	8,2/125	0,14	9,2 $\pm$ 0,4 @ 1310 nm 10,4 $\pm$ 0,5 @ 1550 nm	1260-1625	<18 @ 1550 nm < 22 @ 1625 nm	0,03 @ 1310 nm 0,02 @ 1550 nm	[c]
UHNA1	2,5/125	0,28	4,0 $\pm$ 0,3 @ 1310 nm 4,8 $\pm$ 0,3 @ 1550 nm	1100-1600	(-35)-(-15) @ 1550 - 2000 nm	<20 @ 1550 nm	[a][d] [5]
UHNA3	1,8/125	0,35	3,3 $\pm$ 0,3 @ 1310 nm 4,1 $\pm$ 0,3 @ 1550 nm	960 - 1600	(-85)-(-35) @ 1400 - 2200 nm	<20 @ 1550 nm	[a][d] [5]
UHNA4	2,2/125	0,35	3,3 $\pm$ 0,3 @ 1310 nm 4,0 $\pm$ 0,3 @ 1550 nm	1100-1600	(-40) @ 2000 nm	<20 @ 1550 nm	[a][d] [5]
UHNA7	2,4/125	0,41	3,2 $\pm$ 0,3 @ 1550 nm	1500-2000	(-49,56) @ 1920 nm	<20 @ 1550 nm	[d][e] [5]
MMF - SI	50 - 62,5 /125	0,18 - 0,24		850		2,3 @ 850 nm 0,6 @ 1300 nm	[f]
MMF - GRIN	50-62,5 /125	0,18 - 0,24		850 + 1300		2,9 @ 850 nm 0,6 @ 1300 nm	[g]
POF	980 /1000	0,5		650		0,19-0,22 @ 650	[b]
PCF	7,5-20 /250-350	0,04 - 0,08	10,1 $\pm$ 1 @ 1064 nm 10,5 $\pm$ 1 @ 1550 nm	780-1700	$\sim$ 40 @ 1550 nm	8 @ 1064 nm 3 @ 1550 nm	[h]
DCF	5-6 /125	0,14	5,72-6,3 @ 1550 nm	1550 nm	(-49) —(-30)	0,256 @ 1550 nm	[i]
DSF NZD*	9/125	0,14	9,6 @ 1550 nm	1550	2-11,2 @ 1530-1550 nm	0,2-0,4 @ 1383 - 1625 nm	[j]
Aktivní vlákna + Er	4/125	0,21	5,5-6,6 @ 1550 nm	1530		>10 @ 1200 nm	[k]

\*Non-Zero-Dispersion

**Tabulka 1.1:** Porovnání a parametry jednotlivých vláken



## Kapitola 2

### Analýza a porovnání jednotlivých spojení

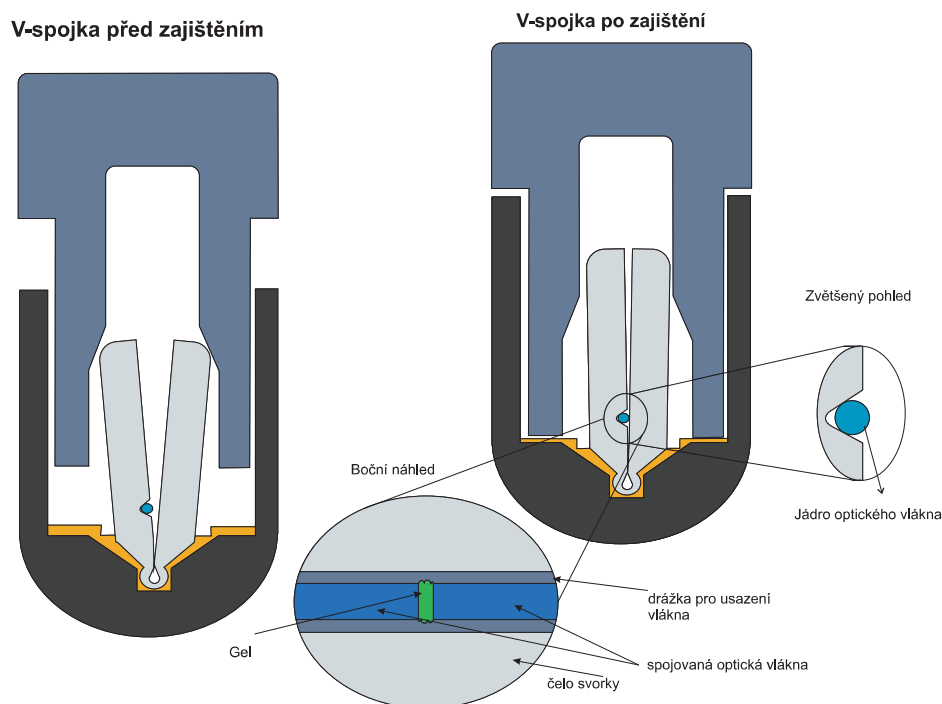
Existuje několik způsobů spojování optických vláken, které se mezi sebou liší požadavky na stálost, odolností, vložný útlum, náklady a rychlostí pořízení spoje. Na kvalitu výsledného spoje má samozřejmě vliv nejenom způsob spojení vláken, ale také preciznost provedení u jednotlivých spojů.

#### 2.1 Konektory

Tento typ spojení má jednoznačnou výhodu rychlého opakovaného rozpojení a spojení. Díky těmto vlastnostem se využívá zejména v aplikacích, kde není kladen důraz na stálost spojení a počítá se s častými přepojováními a rekonfiguracemi. Jejich nevýhodou je pak jejich vyšší vložný útlum (0,2–0,4 dB) a menší stabilita např. oproti svařovaným spojům. Pokud mají být difrakční ztráty udrženy pod hodnotou 0,2 dB, je nutné, aby čelní stěny jader nebyly od sebe vzdáleny více než 10 % jejich poloměru. To představuje problém zejména u vláken s malými rozměry jader [6][7]. Konektory jsou vyráběny v různých variantách a provedeních a mohou být doplněny dodatečnými ochranami proti znečištění vlákna a k ochraně zraku při neodborné manipulaci. Pro vícevidová vlákna se používají konektory ST a pro jednovidová vlákna pak konektory FC, PC, SC. Tyto typy se od sebe liší nejen různým provedením konektorů, ale také zbroušením ferulí. Důvodem zbroušení ferulí je potlačení zpětných odrazů do vlákna, které mohou být pro některé citlivé vysílače nežádoucí.

#### 2.2 Mechanické spojky

Mechanické spoje jsou částečně rozebíratelné spoje, které jsou stabilnější, než v případě použití konektorů. Rozpojování a celková manipulace s těmito spoji je však obtížnější a časově náročnější. Proto jsou používány hlavně v případech, kdy k rozpojování či přepojování dochází jen minimálně, nebo vůbec. V principu se jedná o mechanické spojení, kdy jsou čela optických jader upevněna proti sobě tak, aby nedocházelo k jejich vzájemnému posuvu a prostor mezi čely je vyplněn k tomu určeným gelem, jehož index lomu je velmi blízký indexům lomu spojovaných jader. Tím je možné potlačit



Obrázek 2.1: Nákres V – spojky v řezu

odrazy na čelních rozhraních jader až o 35 dB. Pro vytvoření mechanických spojů je možné využít například tzv. V–drážek, jejichž nákres je na obr. 2.1. Pokud jsou takovéto mechanické spoje dobře provedeny, je jejich vložný útlum  $< 0,1$  dB [6]. Alternativou V – spojky jsou speciální trubičky o přesných rozměrech, do nichž je opět nanesen gel snižující odrazy a útlum spoje. Vlákna jsou pak v této trubičce zajištěna zajišťovacím kroužkem [6] [1] [m].

## 2.3 Použití optických elementů při navazování světla mezi vlákny

Jedním ze způsobů navazování optického signálu je použití optických elementů, které jsou nejčastěji tvořeny objektivem nebo dvěma čočkami. Výhodou tohoto typu spojů je, že vlákna nejsou v těsném kontaktu, čímž lze zabránit jejich vzájemnému mechanickému poškození. Mezi další výhody patří možnost navazování signálu mezi vlákny s více odlišnými parametry a možnost vřazení dalších optických prvků jako např. optické filtry či Faradayův izolátor. Mezi hlavní nevýhody těchto spojů patří citlivost těchto soustav na prach a nečistoty a také nutnost zachování stabilního uspořádání. Navíc není možné se vyhnout ztrátám a odrazům, která vznikají na rozhraních.

## ■ 2.4 Svařování optických vláken

Svařování optických vláken se používá v případech, kdy nepožadujeme rozpojitelnost spoje a kde vyžadujeme nízký vložný útlum. Pokud je svar dobře proveden, je možné dosáhnout i vložného útlumu  $<0,1$  dB. Tento druh spojení je z hlediska vložného útlumu a stálosti nejlepší z výše jmenovaných variant. Místo svaru je však citlivější na mechanické namáhání, a proto je třeba se vyvarovat mechanickému namáhání spoje. Částečnou ochranu proti mechanickým a okolním vlivům tvoří ochranná tubička, která je převlečena nad svar a poté zatavena v píce, která bývá obvykle součástí svářečky. Svářečky nachází uplatnění nejen při budování nových optických tras, ale také při opravách tras stávajících. Svařování se však uplatňuje také v případech, kdy jsou k sobě svařována vlákna s odlišnými vlastnostmi. Například u některých dříve zřízených dálkových tras přidávání úseku vlákna DCF či propojování stávajících systémů. Jsou však i případy, kdy se vlákna svými parametry či materiálovou strukturou natolik liší, že není možné přímý svar provést. V takových případech (pokud je to možné), jsou používány jeden, nebo více úseků vlákna, které postupně snižují rozdíl v parametrech spojovaných vláken. Tyto redukce se používají například v případech, kdy je rozdíl poloměrů vláken příliš velký, vlákna mají příliš rozdílnou NA či tavná teplota vláken je příliš rozdílná.

Podmínkou vytvoření spoje s nízkým vložným útlumem je, aby vlákno ze kterého vstupní signál přichází mělo menší NA, než vlákno kterým signál odchází. Při dodržení této podmínky se bude v navazujícím vlákně šířit stejná energie, i když s nižší výkonovou hustotou. Pokud by se signál šířil ve stejném případě opačným směrem (druhé, nyní zdrojové vlákno má větší poloměr jádra a NA), bude na spoji docházet ke značným ztrátám.

### ■ 2.4.1 Proces sváření optických vláken

Při manipulaci a sváření optických vláken je třeba dbát na čistotu, neboť veškeré nečistoty se mohou podepisovat na kvalitě svaru. U dražších typů svářeček je možné pracovat jak v manuálním tak automatickém režimu, při kterém svářecí stanice řídí celý proces. Před samotným svářením je nutné nejprve odstranit ochranné izolace z vláken, popřípadě podpůrné prvky jako jsou vodící vlákna zvyšující mechanickou pevnost kabelu. Po důkladném očištění je pomocí lamačky vlákno zalomeno tak, aby lom byl kolmý na osu vlákna. Většina svářeček pak dokáže před samotným procesem sváření případný lom zhodnotit a pokud se rovina lomu odchyluje o více než  $1^\circ$ , je nutno opakovat zalomení vlákna. Svářečky před vytvořením hlavního svařovacího oblouku se ještě spouští tzv. očištný oblouk s nižší intenzitou a kratší dobou trvání. Ten má za úkol odstranit drobné nečistoty nacházející se ve svařované oblasti. V dalším kroku již je proveden samotný svar. Mimo svářeček využívajících ohřevu pomocí vysokonapěťového oblouku existují také svářečky u nichž ohřev vláken zajišťuje odporový niklový drát, plynový hořák, či pomocí  $\text{CO}_2$  laseru. Vzniklý spoj je třeba chránit proti okolním vlivům. K těmto účelům jsou

využívané ochranné bužírky se zakomponovaným nosným drátem, které jsou zataveny pomocí pícek a chrání tak spoj. Pícky jsou obvykle součástí svářečky. Tyto bužírky je třeba navléct na jedno ze svařovaných vláken ještě před provedením svaru [6].

## ■ 2.4.2 Taperování vláken

Taperování je velice užitečnou a v praxi používanou metodou. Taperování vlákna je proces, při kterém za přesně definované teploty a tahu dojde k zúžení průměru vlákna. Stejně jako u klasických svářeček existuje i zde několik možností ohřevu např. pomocí plynového hořáku, odporového drátu navinutého na koncích trubice, kterou taperované vlákno prochází, či CO<sub>2</sub> laseru [8]. Oba konce vlákna jsou upevněny a vlákno je podle přesně počítačem definovaných hodnot ohříváno a konstantní silou natahováno. Snahou je, aby bylo vlákno zahříváno co nejrovnoměrněji, tím dosáhneme odpovídající hladkosti struktury a minimalizuje se pnutí v materiálu vlákna. [8]. Výsledná podoba taperu jako je šířka, sklon, délka pasu taperu, délka přechodové oblasti apod. jsou ovlivňovány rychlostí tahu a ohřevovým profilem. Používané jsou dvě struktury taperu, přičemž první struktura spočívá pouze v přechodovém zúžení. Tento typ taperů je používán zejména pro optické senzory. Druhý typ představuje pouze polovinu tohoto zúžení, kdy jeden konec vlákna má větší poloměr než druhý. Taperovaná vlákna mají široké uplatnění v medicíně, chemii, stavebnictví, kde jsou využívána jako senzory pro různé veličiny (pH, tlak, teplota) či detektory chemických látek. V závislosti na použití je obvyklá délka taperu v rozsahu od 1 mm do 100 mm [9]. Využití pak nachází také ve sdělovací technice, kde slouží k úpravě stopy pole při propojování vláken s odlišnými poloměry jader, pro zvýšení či snížení výkonové hustoty, či jako optický filtr. Právě funkce přizpůsobení stopy pole pro spoj vláken s odlišnými rozměry jader je v této práci diskutována.

## Kapitola 3

### Simulační prostředí BeamPROP

Pro získání předpokládaných hodnot bylo v této práci použito simulační prostředí Synopsys BeamPROP, které je integrováno v prostředí RSoft CAD. BeamPROP využívá pro své výpočty výpočetní jádro založené na metodě šíření paprsků BPM (Beam Propagation Method). Ta využívá při svých výpočtech metodu konečných rozdílů pro řešení parabolické či paraxiální aproximace Helmholtzovi rovnice. Tím, že se jedná pouze o aproximaci těchto rovnic, které požadují podmínku paraxiality ve směru šíření, vznikají určitá omezení, která je však možné částečně potlačit použitím několika dalších aproximačních technik (např. Padé aproximací). Druhé omezení vychází z předpokladu skalárních vln, které neuvažují polarizační efekty. Toto omezení BeamPROP řeší pomocí několika technik šíření vektorů paprsků. Třetím zásadním omezením je nemožnost zohlednění zpětných odrazů, neboť BPM algoritmus vychází z jednosměrné vlnové rovnice. BeamPROP proto tyto jevy řeší pomocí vlastního obousměrného algoritmu, který uvažuje také fenomén odrazu. Přínosem BeamPROPu je pak jeho schopnost rychlé implementace základní techniky. Díky svojí charakteristice metoda BPM umožňuje také ve většině případů výpočetní optimalizaci a výpočetní náročnost je obvykle přímo úměrná počtu bodů mřížky, díky své jednoduchosti umožňuje snadno porozumět výsledkům a usnadňuje modelování. Navíc je tato technika velmi flexibilní a rozšiřitelná, čímž umožňuje pokrýt většinu potřeb uživatele (např. uvažování polarizace, nelinearity).

Aby bylo možné výstupy simulace považovat za důvěryhodné, je třeba nastavit správnou velikost mřížky, přičemž by krok této mřížky neměl být větší, než je třetina vlnové délky. Vlnová délka v simulacích, jejichž výsledky jsou prezentovány v této práci byla  $\lambda = 1550$  nm. Dále je možné volit krok simulace. Pokud bude použitý krok simulace větší, než je krok mřížky, dosáhneme tím v přímé úměře zrychlení průběhu simulace, to však může způsobit skrytí potencionálně cenných informací. Proto byl v této práci volen krok simulace o stejné velikosti jako krok mřížky.

Indexy lomu příslušných vláken byly zjišťovány z běžných hodnot pro příslušná vlákna v odborné literatuře [1][10][11] a dále pak z technických dokumentací výrobců vláken. Drobné odchylky mezi jednotlivými udávanými hodnotami jsou s největší pravděpodobností dány drobnými odchylkami v parametrech a výrobních postupech výrobců. Tyto odchylky však neměly

na celkový výsledek simulace zásadní dopad a u všech se rozdíl indexů lomu  $\Delta n$  pohyboval okolo hodnoty 0,005. Hodnoty pro vlákna UHNA byly odvozeny pomocí NA udávané výrobcem a indexu lomu pláště, který je pro oba typy vláken uvažován stejný.



## Kapitola 4

### Nedokonalosti spojů vláken

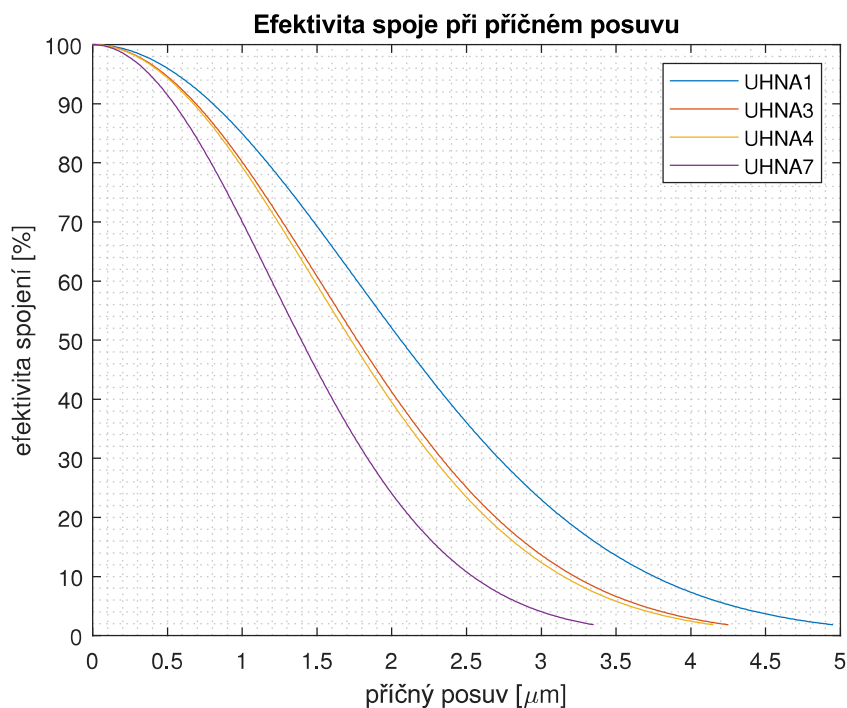
Moderní svářečky disponují funkcí zarovnání vláken, která umožňuje čela vláken proti sobě zarovnat tak, aby výsledný útlum byl co nejmenší. Pokud při zarovnávání resp. před zarovnáním zjistí nevyhovující parametry jednoho resp. obou konců vláken, například že úhel( $\gamma$ ) zalomení je větší, než tolerovaná mez což je obvykle  $1^\circ$ , či zjistí rozdílné poloměry jader, na danou skutečnost svářečka upozorní. Obvykle je možné svar i přes tuto skutečnost provést, ovšem bez záruky na kvalitu svaru. Ačkoliv většina dnešních svářeček pracuje s velkou přesností zarovnání, která je pro většinu aplikací dostačující, jsou zde kvůli úplnosti uvedené i případy chyb zarovnání, kterých by automatický systém svářeček v případě funkčního systému nedopustil.

#### 4.1 Nesouosost vláken

Jedná se o chybu, kdy čela vláken nejsou zarovnána přesně proti sobě. Vlákná UHNA jsou obvykle mnohem méně náchylná na chybu v zarovnání oproti běžným SMF vláknům, což je mimo jiné dáno velkým akceptačním úhlem, díky kterému je vlákno schopno navázat mnohem větší oblast vyzařovanou vstupním vláknem. Procentuální ztrátu je možné určit z následujícího vztahu:[2]

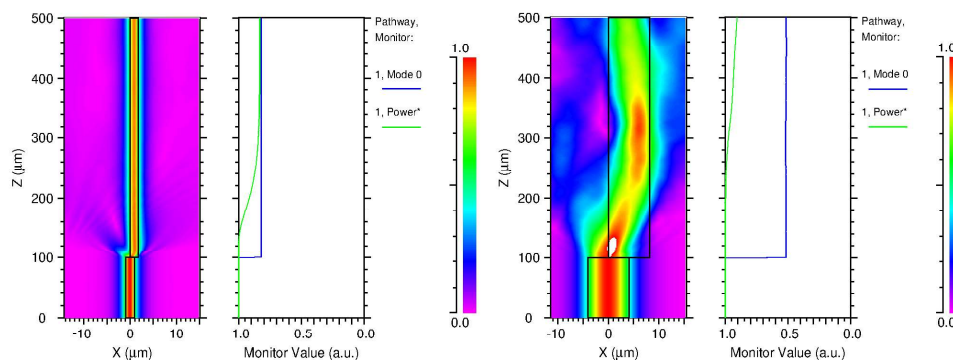
$$\eta = \frac{4w_1^2 w_2^2}{(w_1^2 + w_2^2)^2} e^{-\frac{2(\Delta x)^2}{(w_1^2 + w_2^2)}} \quad (4.1)$$

Kde  $w_1$  a  $w_2$  jsou poloměry jednotlivých stop polí a  $\Delta x$  je příčný posun vláken. Pokud výpočty vztáhneme k situaci z obr. B.2, tj. vlákna jsou posunuta o poloměr svých jader. Pro vlákno UHNA3 nám vychází efektivita spoje 82,9 %, zatím co pro vlákno SMF-28 je při posunutí o polovinu jeho poloměru efektivita přenosu pouze 46,9 %. Výsledky simulací pro posunutí vláken o  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{4}$  a celý poloměr příslušného jádra je možné nalézt v dodatku B. Je však nutné poznamenat, že vztah 4.1 zanedbává vliv Fresnelových odrazů na koncích vláken, který je nutné u optických svarů očekávat. [2]. Právě zanedbání vlivu Fresnelových odrazů je pravděpodobně důvod proč se výsledky simulace a výše uvedeného vztahu (4.1) liší v řádu několika procent. Pro výpočty hodnot efektivit spoje byla použita data z tabulky 1.1. Hodnoty vypočtené pomocí vztahu (4.1) jsou pro jednotlivá UHNA vlákna jsou vyneseny



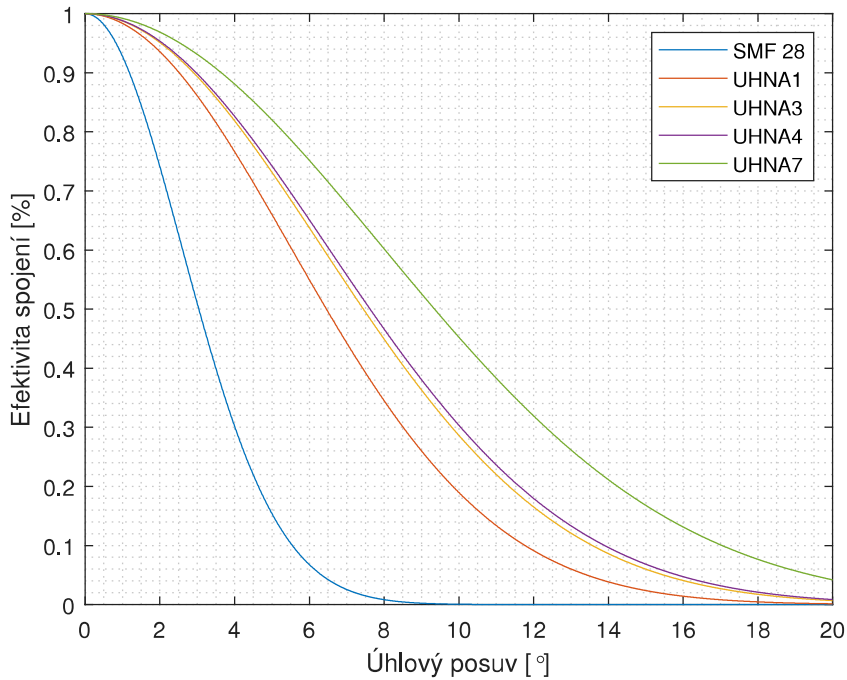
**Obrázek 4.1:** Efektivita spojení při příčném posuvu pro jednotlivá UHNA vlákna

v grafu obr. A.2. Grafy závislosti efektivity spoje na příčném posuvu pro spojení dvou vláken SMF-28 a pro přímý spoj vláken UHNA3 a SMF-28 jsou v dodatku A.1. Efektivita spoje byla vždy určována po posunutí o čtvrtinu poloměru vlákna a poslední hodnota je pro případ, kdy se jádra vláken minou právě o  $\frac{1}{4}$ . Toto není dodrženo pouze u vlákna SMF-28, kde se již vlákno nachází mimo stopu pole a výpočet jako takový by nedával smysl, proto je místo toho použita nejvyšší vypočtená hodnota odpovídající právě posuvu o poloměr stopy pole tohoto vlákna. Stopy pole pro všechny tyto výpočty jsou uvažovány pro vlnovou délku 1550 nm.



**Obrázek 4.2:** Příčné posunutí vlákna při sváření a) UHNA3 b) SMF-28

V následujícím případě je uvažována úhlová chyba zarovnání, kdy osy



**Obrázek 4.3:** Efektivita spoje při chybě v zarovnání v úhlu pro vlákno SMF-28 a vlákna UHNA

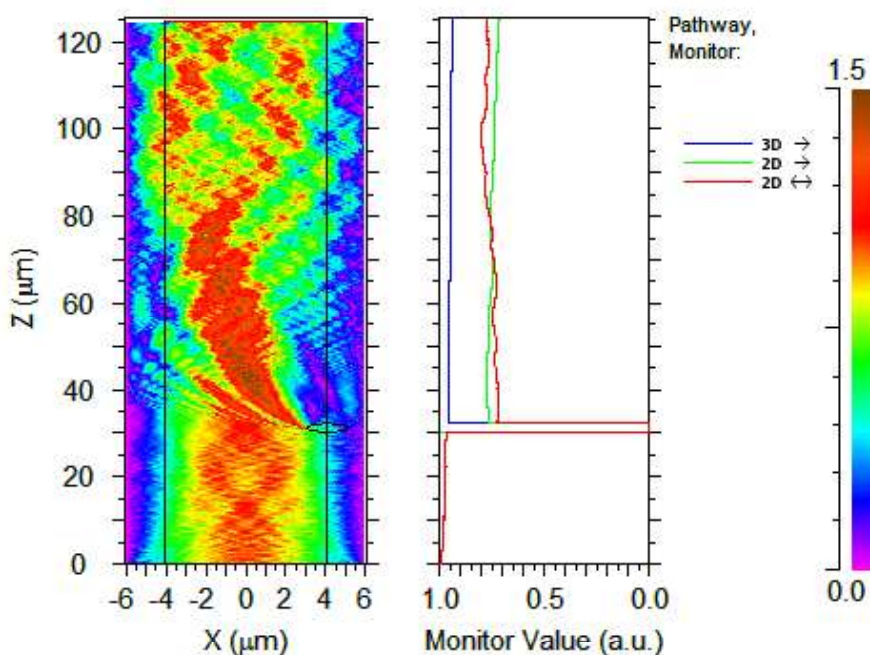
svařovaných vláken spolu svírají úhel různý od nuly. Jak je vidět z grafu na obr. 4.3 jsou vlákna obecně náchylnější na chybu v úhlovém zarovnání, než je tomu při chybě zarovnání v příčném směru. Ze simulovaných dat je patrné, že již při malých úhlech dochází vysokým útlumům. Podstatný faktor, který určuje citlivost vláken na úhlové zarovnání je velikost NA od které se odvíjí úhel akceptace. Což je další důvod, proč jsou vlákna UHNA3 oproti vláknům SMF-28 odolnější proti chybám v zarovnání. Ztráty, které vznikají na spojích s chybou v zarovnání lze určit pomocí vztahu (4.2).

$$\eta = e^{-\left(\frac{\pi \Delta \Theta w}{\lambda / n}\right)^2} \quad (4.2)$$

Kde  $\lambda$  je vlnová délka signálu šířícího se vláknem,  $n$  je index lomu jádra a  $\Delta \Theta$  je úhlová odchylka os vláken. Z grafu, který vychází ze vztahu (4.2), na obr. 4.3 je patrné, že pokud chyba v zarovnání překročí úhel akceptace navazovaná energie do odchozího vlákna limituje k nule. Úhlové odchylky vznikají především při špatném zalomení vlákna. Stejně jako je tomu u vztahu (4.1) i vztah (4.2) předpokládá Gaussovské rozložení energie vidu [12]. Výstupní hodnoty jsou počítány pro  $\lambda=1550$  nm poloměr stop polí  $w$  a indexů lomu jader jednotlivých vláken byl určen pomocí hodnot, které jsou taktéž uvedeny v tabulce 1.1. Výstup monitorů simulací pro jednotlivé simulované odchylky je možné nalézt v dodatku B.1

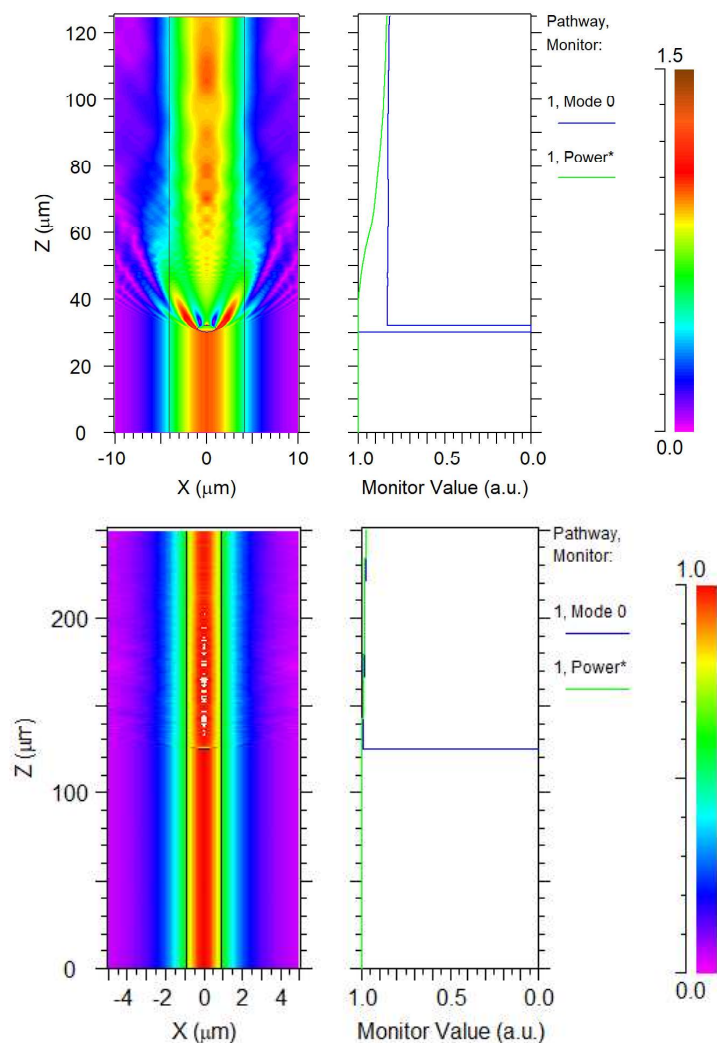
## 4.2 Dutiny a nehomogenity spoje

Jedná se o případ kdy ve spoji vznikne dutina nebo materiálová nehomogenita. Příčinou vzniku těchto nehomogenit může být znečištění vlákna které nebylo možné odstranit např. očištěním obloukem, chybné zalomení či poškození čela vlákna při neopatrné manipulaci. Jelikož se jedná o jev nežádoucí a náhodný byl vliv vzduchové bubliny, s uvažovaným indexem lomu 1 (vzduch), na kvalitu spoje ověřen jen pomocí simulací. Tato problematika uvažuje různým umístěním středu vzduchové bubliny a to a) v ose vlákna, b) v polovině vzdálenosti mezi osou a okrajem jádra, c) na okraji jádra. Poloměry bublin byly voleny jako  $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}$  poloměru jádra. Z výsledků je patrné vlákna UHNA vykazují vyšší odolnost proti kazům a dutinám ve spoji než je tomu u vláken s nižší NA (SMF-28). Protože prostředí BeamPROP podporuje ve svém 3D modelu pouze simulaci s dopředně šířenou vlnou, bylo pro účely zobrazení zpětných odrazů pracováno v 2D režimu. V tomto režimu však je zanedbávána geometrie vlákna model je simulován jako rovinný útvar. Z těchto důvodů se hodnoty monitorů mezi těmito režimy liší (typicky u 2D modelu monitory vykazují větší útlum) Pro srovnání výsledků simulací mezi režimem 2D a 3D slouží graf na obr. 4.4.



Obrázek 4.4: Porovnání výsledků simulačních monitorů

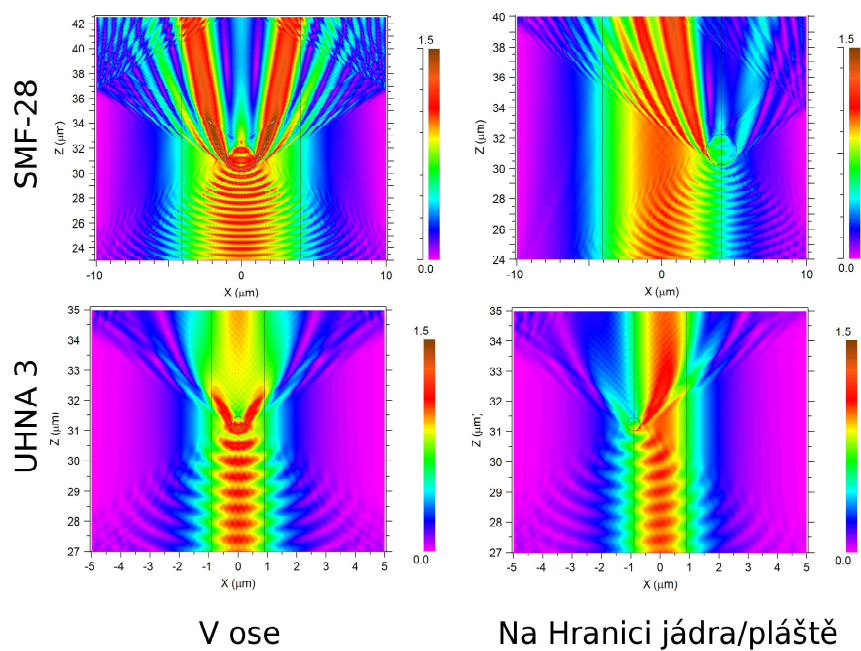
Levý graf znázorňuje simulovanou situaci, pravé části jsou pak porovnávány hodnoty jednotlivých monitorů. Šipky v legendě označují zda se jedná o simulaci s jednocestným šířením vlny (jednoduchá šipka) nebo o simulaci s dopředným u zpětným šířením (obousměrná šipka). Přestože by se dle levé části mohlo zdát že simulovaná vzduchová bublina má elipsovité průřez,



**Obrázek 4.5:** Ukázka vlivu vzduchové dutinky v ose vlákna na velikost útlumu šířeného signálu

je její model definován jako koule. Grafické zobrazení je dáno zobrazovaným poměrem stran, Je automaticky voleno tak aby byla situace vykreslena co nejpřehledněji.

Dle předpokladů měly největší útlum vlákna u nichž byla bublina umístěna v ose vlákna a při umísťování směrem k okrajům její vliv klesal. To je způsobeno Gaussovým rozložením energie vidu, a tedy největším rozptylem a zpětným odrazem v části, ve které je výkonová hustota při šíření paprsku nejvyšší. Na obr. 4.5 je uveden příklad srovnání vlákna UHNA3 a vlákna SMF-28 s bublinou jejíž průměr vždy odpovídá  $\frac{1}{4}$  průměru příslušného jádra. Bublíny o velikosti  $\frac{1}{8}$  již měli na monitory u vlákna UHNA3 minimální vliv a u vlákna SMF-28 způsobili pokles energie o 4 %. Výpočty však nepočítají s odraženou vlnou která způsobuje další útlum. Změnu v energii modu je možné za použití obousměrné polarizace pozorovat na obr. 4.4 (2D struktura)



**Obrázek 4.6:** Šíření signálu a zpětné odrazy v okolí dutiny

Ovšem i při malé nehomogenitě v barevné mapě ve všech případech znatelné narušení původního Gaussovského rozložení energie.

Aby byl patrný vliv dutinky v prostoru jádra vlákna, bylo na obr. 4.6 vykresleno pouze její bezprostřední okolí tak, aby vyniklo stojaté vlnění vzniklé odrazem od ní. V širším okolí pak tyto vlny mezi sebou navzájem interagují.

## Kapitola 5

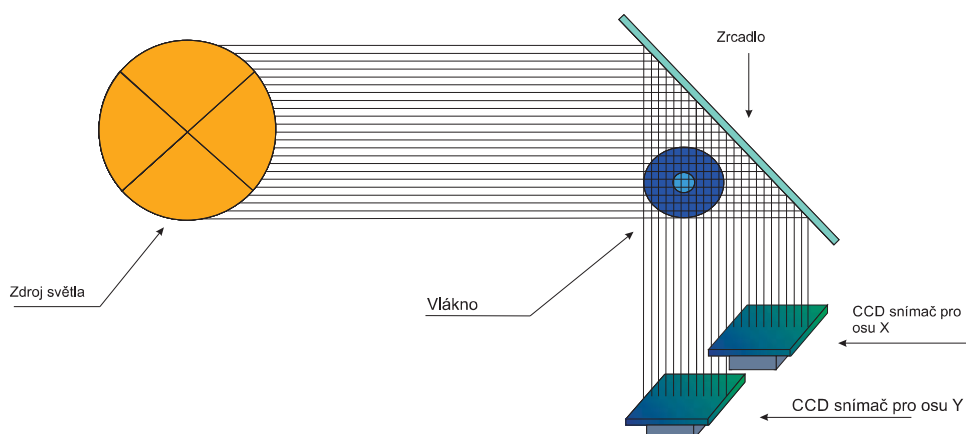
### Měřicí metody

#### 5.1 Metody pro odhad útlumu u svářecích stanic

Většina svářecích stanic po provedení svaru odhaduje útlum vzniklý na daném spoji, pomocí tří základních metod. Obvykle je odhad útlumu odhadnut na základě zarovnání vláken. Skutečný útlum spoje však záleží i na vlastnostech šířeného signálu a dalších vlastnostech vlákna. Skutečný útlum tak může být i o několik dB vyšší nebo i nižší.

##### 5.1.1 Metoda PAS

Metoda PAS (Profile Alignment System) je metoda založena na principu kolimovaného paprsku, který osvětluje konce vláken ve dvou na sebe kolmých rovinách. Pomocí CCD snímačů je obraz obou rovin vyhodnocován a poté je pomocí něj určen offset jader vláken. Tuto metodu používají například svářecí stanice Japonského výrobce Fujikura. Princip této metody je zobrazen na obr. 5.1 [13].



Obrázek 5.1: Princip pro odhad útlumu savářecích stanic Fujikura

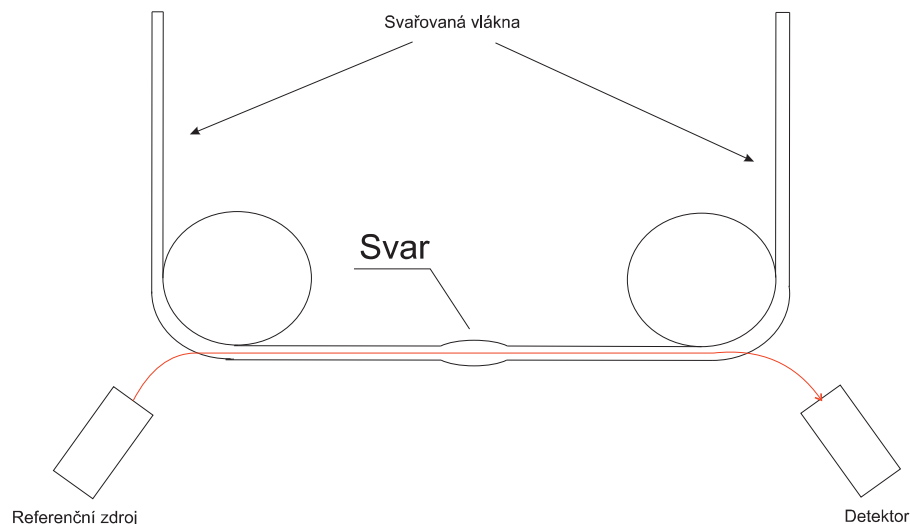
### ■ 5.1.2 Metoda RTC

Metoda RTC (Real Time Control) je používána zejména ve svařecích stanicích firmy Ericsson. Výhodou této metody je, že je možné kontrolovat pozici jader vláken i v průběhu svaření vláken. Princip spočívá ve snímání teploty zahříváných konců vláken. Protože jádro při zahřívání absorbuje jiné množství energie než plášť, dosahuje také jiné teploty a tedy vyzařuje lehce odlišné vlnové délky. Tím je při snímání možné odlišit jádro od pláště. Jelikož je snímána pouze tepelná energie vyzařovaná vláknem, je možné zarovnání vláken sledovat i během procesu svaření [14].

### ■ 5.1.3 Metoda LID

U této metody je vlákno z každé strany svaru ohnuto pod malým poloměrem oblouku a je možné do něj navázat měřící paprsek

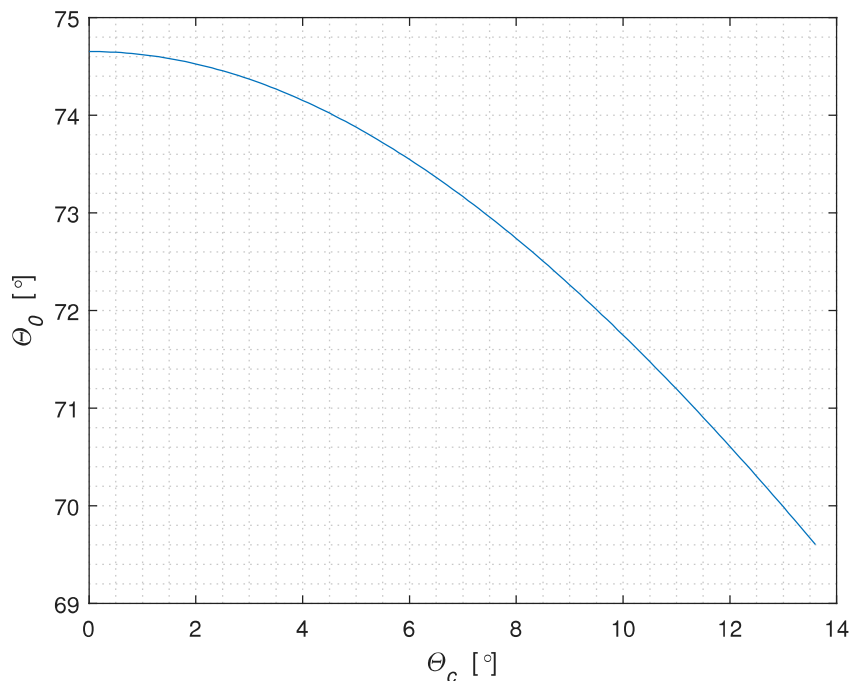
U této metody (Light Injection and Detection) je s malým poloměrem oblouku (v řádu milimetrů) vlákno ohnuto a je možné do něj navázat referenční měřící signál. V úseku za vláknem je toto vlákno pod stejným poloměrem oblouku opět ohnuto a vyvážaná energie je snímána. Tímto způsobem je tak přímo možné zjistit velikost útlumu na svaru. Tento princip používají například svařečky Corning Siecor M90. Princip této metody je naznačen na obr. 5.2.



Obrázek 5.2: Princip metody LID

Na obr. 5.3 je Zobrazena závislost pro úhel dopadu na rozhraní UV pláště vlákna  $\Theta_0$  (úhel je svírán mezi kolmicí na jádro vlákna a navazovacím měřícím signálem) a úhlem odrazu na rozhraní jádra a pláště vlákna  $\Theta_c$  ( $\max=13^\circ 38'$  pro vlákno SMF-28) [15].





**Obrázek 5.3:** Závislost mezi úhlem navázání a úhlem odrazu od rozhraní jádra pláště

## 5.2 Měření útlumu na svařovaných spojích

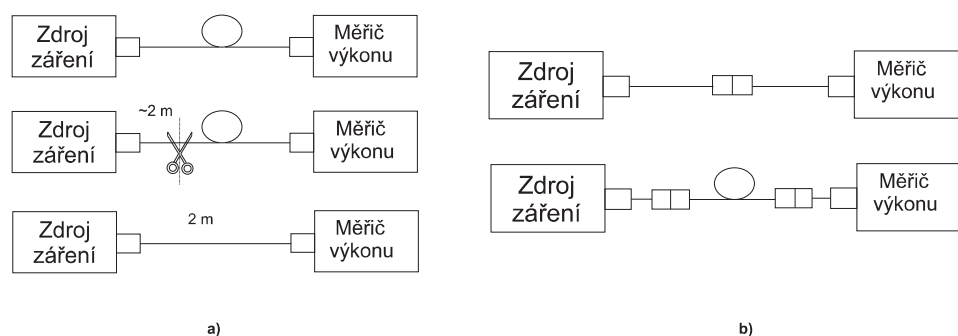
Jak bylo zmíněno výše, hodnota útlumu spoje, kterou určují svářečky, je obvykle spíše orientační. Pokud je potřeba útlum spoje určit přesněji, lze využít některou z metod popsané v této podkapitole.

Nejpřesnější metodou určení útlumu optické trasy je tzv metoda dvou délek. Její princip spočívá v zapojení měřeného úseku mezi detektor a zdroj signálu s úzkou spektrální čarou. Po změření hodnoty je vlákno přibližně 2 m od vstupního konce vlákna připojeného k referenčnímu zdroji odstřiženo a poté je opětovně na tomto úseku změřen útlum. Výsledný útlum vlákna pak určíme dle známého vzorce pro útlum (5.1)

$$\alpha(\lambda) = 20 \log \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \quad (5.1)$$

Jak je z výše uvedeného popisu zřetelné, tato metoda má značnou nevýhodu ve své destruktivnosti a zároveň je nezbytný přístup k oběma koncům optické trasy. Proto se tato metoda využívá spíše pro laboratorní účely.

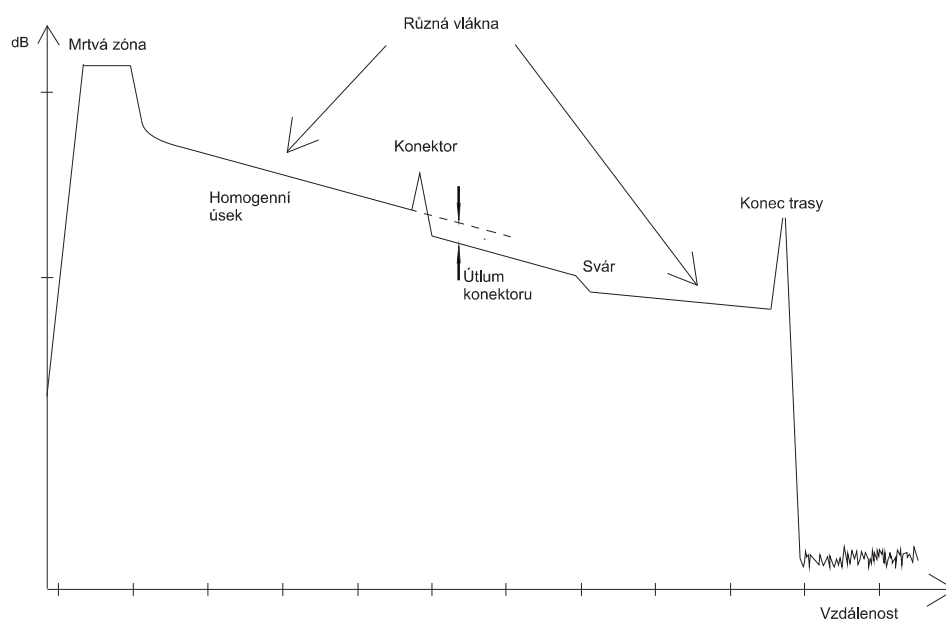
V případě, že požití destruktivní metody není vhodné a máme k dispozici oba konce optické trasy, je možné použít metodu vložných ztrát. Při této metodě jsou nejprve přístroje zkalibrovány pomocí referenčního úseku vlákna s obvyklou délkou 2 m. Po zkalibrování přístrojů je vložen úsek vlákna, jehož



**Obrázek 5.4:** Metody měření útlumu a) metoda dvou délek b) metoda vložitých ztrát

útlum je předmětem měření. Výsledný útlum je možné opět získat pomocí vztahu (5.1). Nevýhodou této metody je její nižší přesnost oproti metodě dvou délek z důvodu více přechodů tvořených obvykle konektory, které mají obecně nižší stabilitu. Schématický náčrt uspořádání pro měření metody dvou délek a metody vložitného útlumu je na obr. 5.4 [16]

OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) je jedna n nejčastěji používaných nedestruktivních metod. Výhodou této metody je možnost změření ztrát i bez dostupnosti druhého konce optické trasy. Toho je s výhodou využíváno například u dálkových tras. Optické reflektometry se uplatňují v širokém spektru diagnostiky sítí, jsou schopny měřit odrazivost, odhadovat ztráty či provádět analýzu událostí v optických trasách, bez nutnosti připojování jakéhokoliv zařízení na na druhém konci trasy. Při požití metody OTDR je možné vytvořit celkový profil trasy a sledovat v něm její problematická místa či místo poruchy optického vedení. Princip reflektometru je založen na principu odrazu způsobeného Raylovým rozptylem a dále pak odrazy od jednotlivých rozhraní tvořených například konektory či optickými svary, které tvoří drobné nehomogenity v optické trase. Zařízení vysílá určitý počet pulzů o nastavitelné délce. U odraženého pulzu přicházejícího zpět do detektoru je poté hodnocena jeho amplituda a časové zpoždění. Detekce příchozího pulzu je obvykle řešena pomocí lavinové fotodiody. Ty mají oproti dříve používaným P-I-N diodám větší citlivost a ve specifických zapojeních dokáží pracovat i jako čítač jednotlivých fotonů. Oproti P-I-N diodám však také vykazují vyšší kvantizační šum. U OTDR testeru pak citlivost detekční diody určuje jeho celkový dynamický rozsah. Jako příklad jsou uvedeny hodnoty pro OTDR reflektometr MaxTester 715B od společnosti EXFO, který byl použit v praktické části této bakalářské práce. Dynamický rozsah tohoto přístroje je 30/28 dB, přičemž jsou obvykle tyto rozsahy udávány pro nejdelší pulz který je zařízení schopno vysílat. Bývá také dobrým pravidlem zvolit přístroj s dynamickým rozsahem o 5–8 dB vyšším než je maximální útlum trasy [o][p]. Šířku vysílaného pulzu je možné v přístroji nastavit, a to obvykle v rozsazích od desítek nanosekund po desítky mikrosekund (MaxTester 715B od 5 ns do 20 ms). Při nastavení kratší doby vysílání je vysílán větší počet pulzů a pomocí průměrování je možné přesněji určit polohu události na trase



**Obrázek 5.5:** Možný profil optické trasy vytvořené pomocí optického reflektometru

(například vadné komponenty). Kratší pulzy však v sobě nesou také méně energie a z důvodů vlivu útlumu se nehodí pro delší optické trasy. K tomuto faktu je nutné v průběhu měření přihlížet. Při použití delší doby trvání pulzu se však může vyskytnout tzv. mrtvá zóna, způsobená dočasným přesycením laserové diody od méně utlumených odrazů na počátku trasy. Popis výstupního grafu OTDR je na obr. 5.5

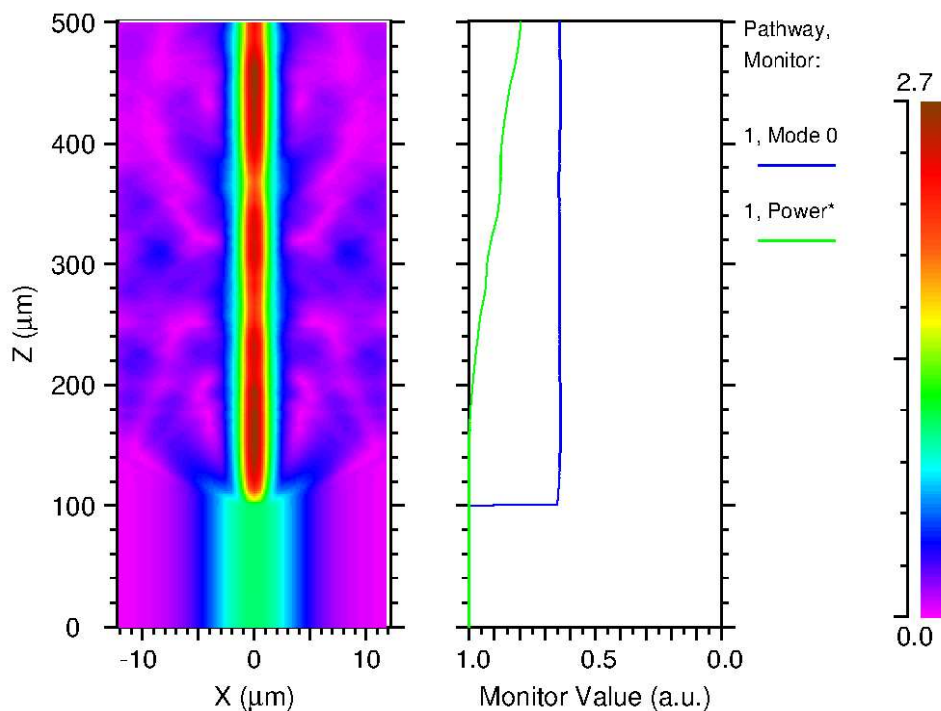


## Kapitola 6

### Návrh a postup měření

#### 6.1 Navrhované řešení

Protože mají UHNA vlákna obecně velkou schopnost navazování optického paprsku a při dodržení postupů dokáží při připojování k SMF vláknům zvětšit po zahřátí poloměr jádra, dochází při dodržení všech doporučených nastavení udávané výrobcem k útlumu o méně než 1,5 dB. [q] Což představuje útlum signálu o  $\frac{1}{3}$ . Této hodnotě také plně odpovídá výstup simulace, ve kterém je modelováno přímé napojení vlákna SMF-28 a vlákna UHNA3. Výsledek simulace je zachycen na obr. 6.1



**Obrázek 6.1:** Simulovaný model přímého napojení UHNA3 vlákna na vlákno SMF-28

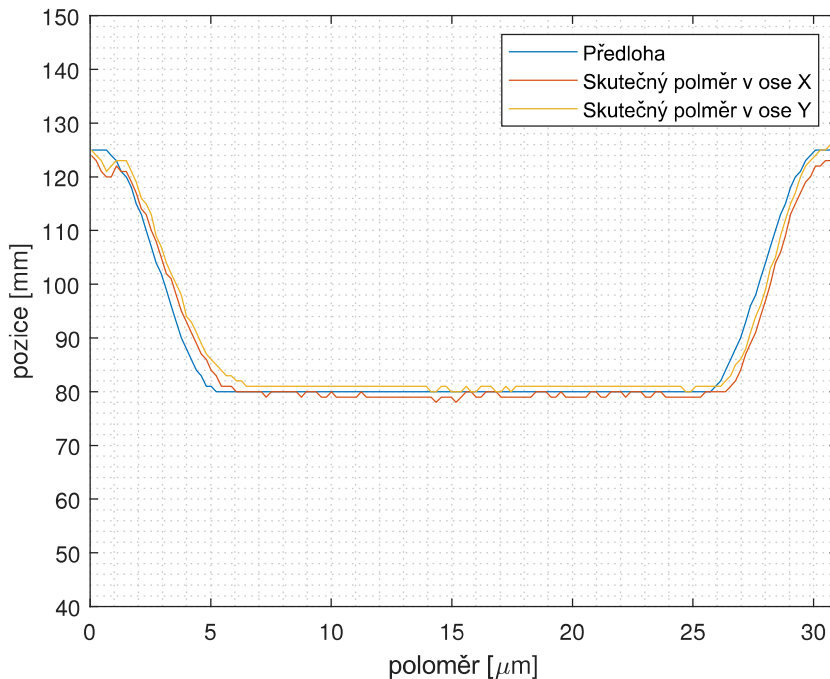
Pro účely snížení útlumu takovýchto spojů je v této práci vytvořeno experimentální taperované vlákno, které umožňuje ztráty na těchto přechodech dále snižovat. Taperovaný kus je připravován z vlákna SMF-28. Významem taperovaného úseku je přizpůsobení stopy pole ze vstupního vlákna SMF-28  $MFD = 10,4 \pm 0,5 \mu\text{m}$  na velikost  $4,1 \pm 0,3 \mu\text{m}$  u vlákna UHNA3 resp.  $3,2 \pm 0,3 \mu\text{m}$  u vlákna UHNA7, při vlnové délce  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ . Z důvodů technických limitů svářecích stanic byly vyrobeny tapery o šířce pasu  $80 \mu\text{m}$  (použitý  $\text{CO}_2$  laser není schopen vytvářet tapery s šířkou pasu užší než  $80 \mu\text{m}$ ), což je přibližně o  $\sim 35 \mu\text{m}$  více, než jaká šířka pro ideální přizpůsobení stopy pole pro použitý typ vlákna UHNA7 resp. o  $12,5 \mu\text{m}$  více pro UHNA3. Šířka pasu taperu je určena skutečností, že plášť, jádro a MDF se při taperování zmenšují ve stejném poměru. Vlákno UHNA3 je tak v ideálním případě třeba taperovat na  $\sim 46 \%$  původní šířky což odpovídá  $\sim 57,5 \mu\text{m}$  resp. pro UHNA7 vlákno na  $\sim 36 \%$  původní šířky což odpovídá  $\sim 45 \mu\text{m}$ .

Cílem praktické části bylo vytvořit taperovaný úsek vlákna pro připojení vlákna UHNA3 a UHNA 7 a porovnat ho s přímým propojením svarem, které za dodržení doporučených nastavení a postupů dle výrobce UHNA vláken (Nufern) dosahuje útlumu spoje maximálně 1,5 dB.

Pro výrobu taperů byla použita svářecí a taperovací stanice LMZ-100 od firmy Fujikura. Ta požívá pro ohřev vlákna  $\text{CO}_2$  laser o výkonu 30 W. Princip ohřevu je založen na absorpčním pásmu křemenných optických vláken tj.  $8,5\text{--}13 \mu\text{m}$ . Použitý  $\text{CO}_2$  laser pak vyzářuje na vlnové délce  $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ , která se nachází právě v polovině absorpčního pásma křemíku. Pro kontrolu pozice vláken během svařování je u této stanice používána metoda RTC v kombinaci s metodou PAS v době mimo svařování [r] [s].

Před vlastní výrobou taperu je třeba nejprve svářecí stanici LZM-100 nechat přibližně 10 zahřívát. Poté je třeba provést kalibraci ladění čoček, přičemž je třeba nastavit maximální kontrast při co nejmenším možném výkonu. U těchto svářecích stanic bývá použitý absolutní výkon udáván v bitech, přičemž maximální nastavitelný výkon laseru odpovídá 900 bitů. Pro výrobu taperů bývá obvykle nastavována hodnota  $\sim 600$  bitu. V našem případě byla hodnota výkonu při kalibraci nastavena 607 bitů. Po úspěšné kalibraci se provádí testovací svar. Ovládání a nastavování svářečky je možné pomocí ovládacího panelu umístěného na těle svářecí soupravy nebo pomocí připojeného počítače. Pomocí softwarového rozhraní je možné nastavit potřebné rozměry taperů, a dále tah a výkon laseru při jeho výrobě. Data získaná z měření skutečných rozměrů lze zpracovat v grafické podobě což nám umožní porovnat skutečné geometrické vlastnosti taperu s námi nadefinovanou geometrickou předlohou, dle které svářecí systém taper zhotovuje. Porovnání skutečných rozměrů jednoho z vyrobených taperu a jeho předlohy se sinusovým profilem zobrazeno na obrázku v dodatku A.5. Závislosti rozměrů v délce taperu všech použitých taperů je možné nalézt v dodatku A.4.

Celkově bylo zhotoveno 11 taperů se snahou dosáhnout co nejpřesněji požadovaného tvaru. Nejlépe provedené (viz obr. A.3 a obr. A.5) tapery byly použity pro další postup. Pro snazší zlomení taperů byla u taperů se sinusovitým profilem (C,D) zvolena délka pasu o 10 mm větší, než tomu



**Obrázek 6.2:** Taper D se sinusovým profilem

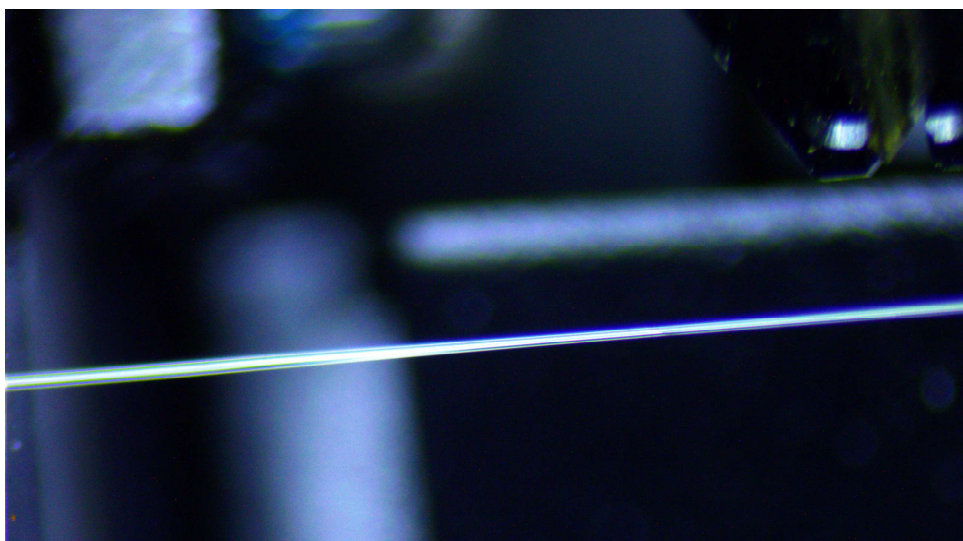
bylo u předchozích taperů s lineárním profilem (A, B). Jádru vlákna SMF-28 v pase taperu má průměr  $\sim 5,2 \mu\text{m}$ . Pro ideální případ zmenšení poloměru pláště na  $45 \mu\text{m}$  by velikost stopy pole na konci taperu byla  $\sim 3,3 \mu\text{m}$  což odpovídá velikostí stopám pole u vláken UHNA7. V následující tabulce jsou zaznamenány některé základní hodnoty, nastavené při výrobě použitých taperů (A, B, C, D). Délky pravých i levých taperů mají délku 5 mm. Rychlost tahu taperu byla pro všechny použité vzorky  $0,5 \text{ mm/s}$ . Pro vzorky C a D byla hodnota relativního výkonu nastavena na  $-100$  bitů.

V dalším kroku byl pomocí laboratorního mikroskopu nalezen pas taperu a pomocí lámačky bylo v tomto místě vlákno zalomeno. Obraz vlákna byl zároveň nasnímán CCD kamerou. Stejným způsobem bylo v místě lomu zkontrolován poloměr taperu viz obr. 6.3

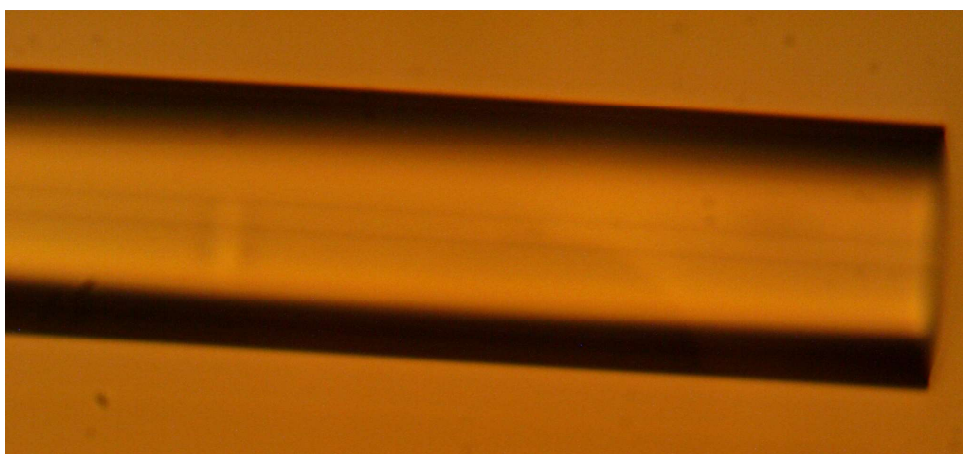
kde je snímek taperu v lamačce před zalomením vpravo nahoře je vidět čepel lámačky. Vlákna bylo nutné před zalomením dodatečně upevnit, neboť z důvodu menších poloměrů v taperovaných úsecích nedokázaly použité úchytky vlákno plně zafixovat, což způsobilo přetržení vlákna. Snímek mikroskopu při kontrole lomu a rozměru vlákna je na obr. 6.4.

V posledním kroku bylo zalomeno vlákno UHNA7 a pomocí svařecí stanice Fujikura LZM-100 svařeno s taperem. Výsledný úsek byl změřen pomocí metody dvou délek. Na základě změřených útlumů, jsme se pokoušeli proces navařování taperů pomocí ladění svařovacího výkonu a definovaného přítlaku postupně optimalizovat.

Souběžně s přípravou taperů, bylo provedeno i několik experimentálních



**Obrázek 6.3:** Taperované vlákno připravené na zalomení



**Obrázek 6.4:** Kontrola rozměrů a zalomení taperu

svarů s přímým napojením vláken UHNA3 a UHNA7 s vláknem SMF-28. Tyto svary byly provedeny pomocí svařovací stanice Fitel s178. Před provedením těchto přímých svarů bylo nutné stanici nejprve nastavit dle doporučení výrobce UHNA vláken pro přímý svar s UHNA vláknem. Nastavení svářečky je uvedeno v tabulce 6.1.

Bylo provedeno 5 svarů vláken SMF-28 s vláknem UHNA7. Experimentálně bylo pomocí tohoto profilu vytvořeno také 5 svarů SMF-28 a UHNA3 vláken pro ověření univerzálnosti svářecího profilu. Jak je možné vidět v tabulce 6.1 význačnost tohoto profilu spočívá v dlouhé aktivní době prvního svařovacího oblouku. Tím dojde u vláken UHNA k pro tyto vlákna typické tepelné expanzi jádra vlákna. Tento jev umožňuje snižovat ztráty spoje, než by tomu bylo při využití standardního profilu pro dvě vlákna SMF-28.

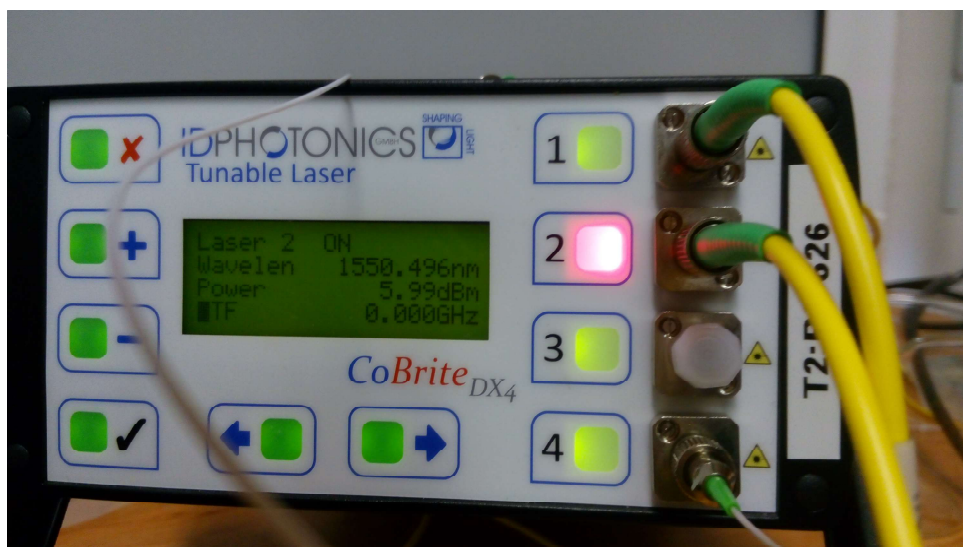


Align: Core	Focus: Auto
ECF: Off	Auto Power: Off
Cleave Limit: 1°	Core Angle Limit: 1°
Cleaning Arc: 150 ms	Gap: 15 $\mu\text{m}$ ,
Gapset Position: Center	Prefuse Power: 20 bit
Prefuse Time: 180 ms	Overlap: 10 $\mu\text{m}$
Arc1 Power: 20 bit	Arc Time: 18000 ms
Arc2: Off	Rearc Time: 800 ms
Taper Splice: Off	

**Tabulka 6.1:** Parametry pro přímé svaření vlákna UHNA7 a SMF-28 [q]

## 6.2 Výsledky měření

K měření výkonu byl použit zdroj optického signálu CoBrite DX 4 firmy ID Photonics obr. 6.5



**Obrázek 6.5:** Laserový zdroj použitý o určení útlumu spojů

Pro účely měření byla na tomto laseru nastavena vlnová délka  $\lambda=1550$  nm a absolutní úroveň výkonu na hodnotu 5,00 dBm ( $\sim 3$  mW). Skutečný vysílaný výkon byl určen pomocí referenčního úseku vlákna připojeného měřiči výkonu PM100D společnosti Thorlab. Hodnotu, kterou jsme takto změřili, považujeme za referenční. V průběhu měření je však nutné tuto hodnotu kontrolovat a popřípadě tuto změnu zohlednit u dalších výpočtů. Pro hodnoty v následující tabulce 6.2 byla naměřena referenční absolutní hodnota výkonu 4,9 dBm, která po dobu měření hodnot zaznamenaných v této tabulce zůstala neměnná.

Tabulka 6.2 mj. dokazuje nepřesnost odhadů v pro ní méně očekávaných situacích. Zatím co u vláken UHNA7 se odhad od skutečných liší maximálně o 10 % u vláken UHNA3 dosahovala chyba odhadu přes 90 %. Další skutečnost,



**Obrázek 6.6:** Měřič výkonu výstupního signálu PM100D (vlevo) a detektor s fotodiodou (v pravo)

Číslo vzorku	UHNA7			UHNA3		
	Odečtený výkon [dBm]	Útlum spoje [dB]	Útlum dle PAS [dB]	Odečtený výkon [dBm]	Útlum spoje [dB]	Útlum dle PAS [dB]
1	3,72	1,18	-	4,40	0,50	0,14
2	3,77	1,13	2,40	4,44	0,46	0,13
3	3,85	1,05	2,63	4,40	0,50	0,22
4	3,83	1,07	2,33	4,41	0,49	0,23
5	3,85	1,05	2,16	4,28	0,62	0,23

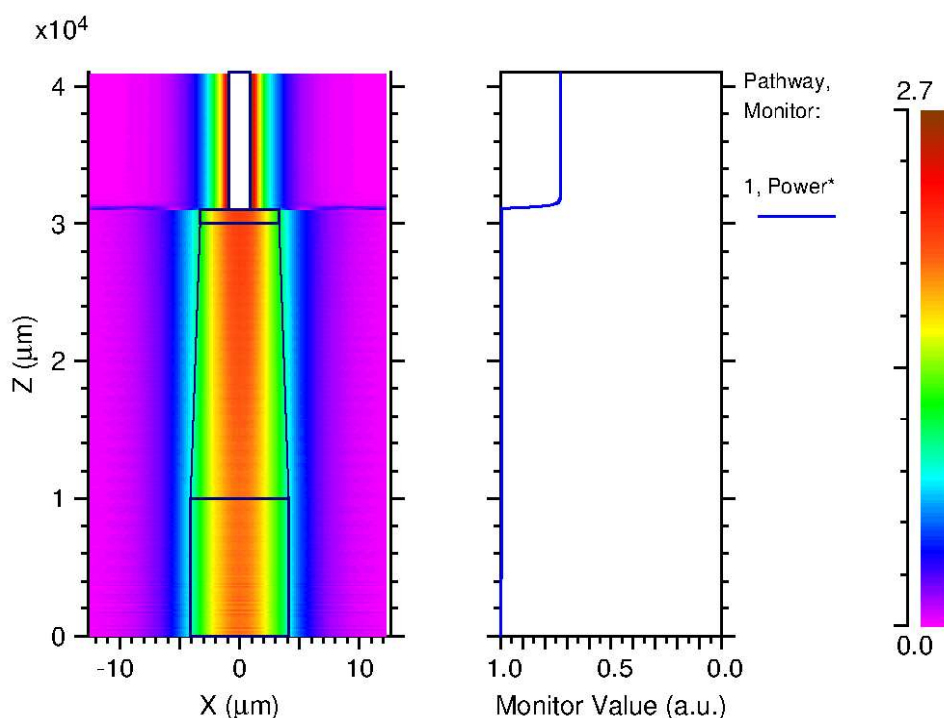
**Tabulka 6.2:** Měřené výkony, vypočítané útlumy, a odhady útlumů svářecích systémů

která z tabulky vyplývá je, že se nám podařilo ve všech případech vytvořit spoj, který vykazoval dle deklarace výrobce nižší útlum než 1,5 dB. V nejlepších případech až o 0,45 dB. Zároveň zde byla ověřena univerzálnost nastavení mezi svářecími stanicemi, neboť výrobce definoval parametry z tabulky 6.1 pro svářecí stanice Fujikura FSM-40S. Změřené hodnoty pro vytvořená tapery A, B, C, D jsou zaznamenány v tabulce 6.3.

Tapery	A	B	C	D
Reference [dBm]	4,9	5,5	4,83	4,83
Změřený výkon [dBm]	2,65	3,46	4,2	4,25
útlum taperovaného spoje [dB]	2,25	1,59	0,63	0,58

**Tabulka 6.3:** Naměřené hodnoty výkonu a spočítané útlumy taperů

Při měření se prokázalo, že tapery jsou velice citlivé na pohyb, proto byl před každým měřením měřený úsek vláken pečlivě zafixován. Hodnoty taperů C a D vykazují útlum o přibližně o 1 dB nižší než je maximální deklarovaná ztráta spoje při přímém napojení bez použití taperu. Hodnoty více povedených taperů (C a D) se od výsledků simulace liší o 14 % v případě taperu C resp. 15 % v případě taperu D. Je však důležité si uvědomit, že BeamPROP u 3D modelů nepočítá se zpětnými odrazy, které se v místě spoje

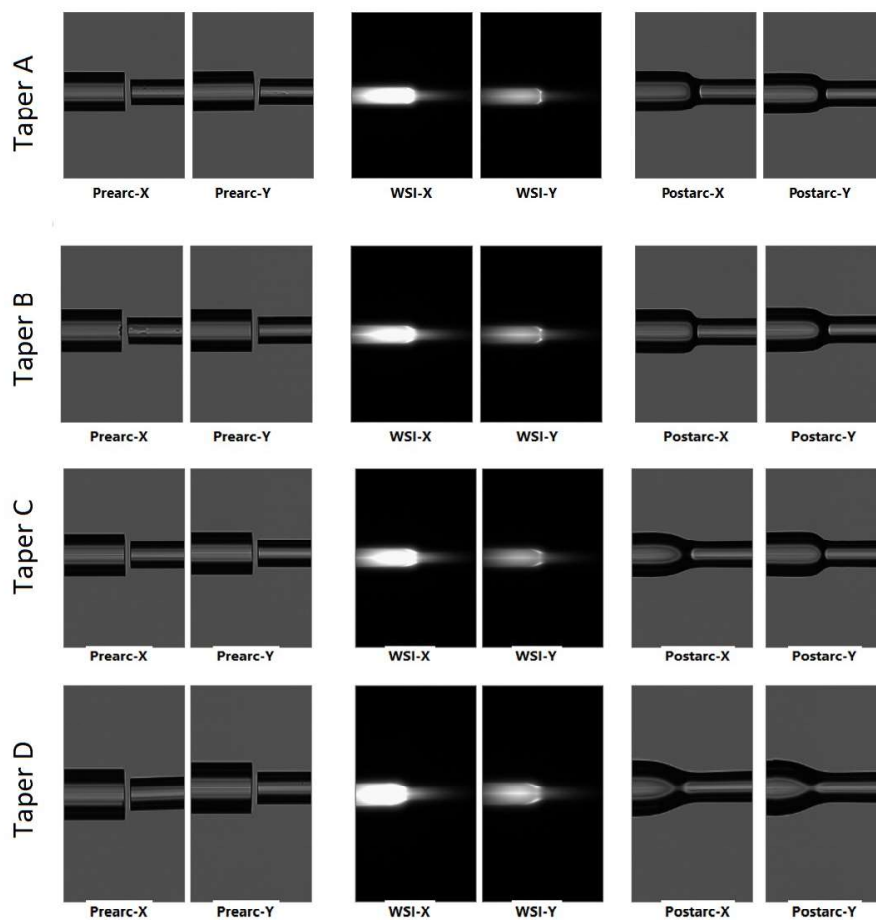


**Obrázek 6.7:** Výstupní graf pro model taperovaného spoje

vlákna UHNA7 a vlákna SMF-28 silně projevují. Výstupní grafy simulovaného taperovaného spoje jsou na obr. 6.7, kde je možné vidět propad energie šířeného signálu způsobeného odrazem od rozhraní na spoji s UHNA vláknem. Vstupní parametry zadávané do simulace byly voleny tak, aby model co nejvíce odpovídal skutečnosti. Při porovnání s metodou přímého napojení využívající tepelnou expanzi jádra vláken UHNA7 bylo dosaženo přibližně stejných hodnot útlumu i v případě taperů. Zatímco proces svařování dle doporučení je ze své podstaty již plně optimalizován. Z důvodů časové náročnosti výroby taperovaných spojů nebylo možné svařecí proces dostatečně optimalizovat. Proto je možné předpokládat, že v navazujících pracích se podaří vytvořit taperované spoje s ještě nižšími útlumy.

Detail spoje konce taperu a vlákna UHNA7 pro jednotlivé tapery je možné vidět na obr. 6.8.

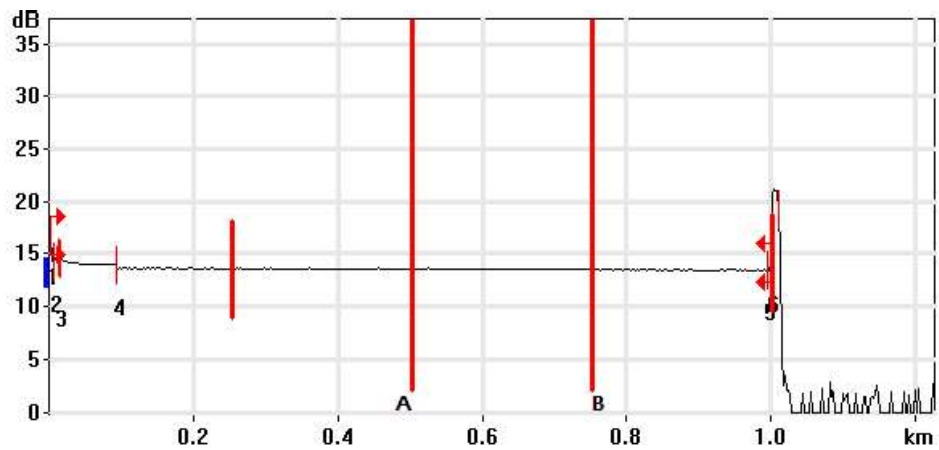
Mimo výše popsaných experimentů byl vytvořen také testovací úsek, u kterého byla k oběma koncům 9 m úseku vlákna UHNA3 přivařena vlákna SMF-28 zakončena konektory. Úsek byl nejprve proměřen metodou vložných ztrát a poté pomocí metody OTDR. K měření pomocí OTDR bylo použito zařízení MaxTester 715B od společnosti EXFO. Pro měření byla nastavena délka pulzu 10 ns, doba průměrování 30 sekund a předpokládaná vzdálenost 1,3 km (nejkratší možné nastavení vzdálenosti). Nastavená vlnová délka byla 1550 nm. Útlum trasy naměřený metodou ve směru AB byl 1,116 dB a ve směru BA pak 1,515 dB. Útlum zjištěný pomocí přímé metody byl ve směru AB 1,15 dB a ve směru BA 1,28 dB. Rozdíl výsledků ve směru BA



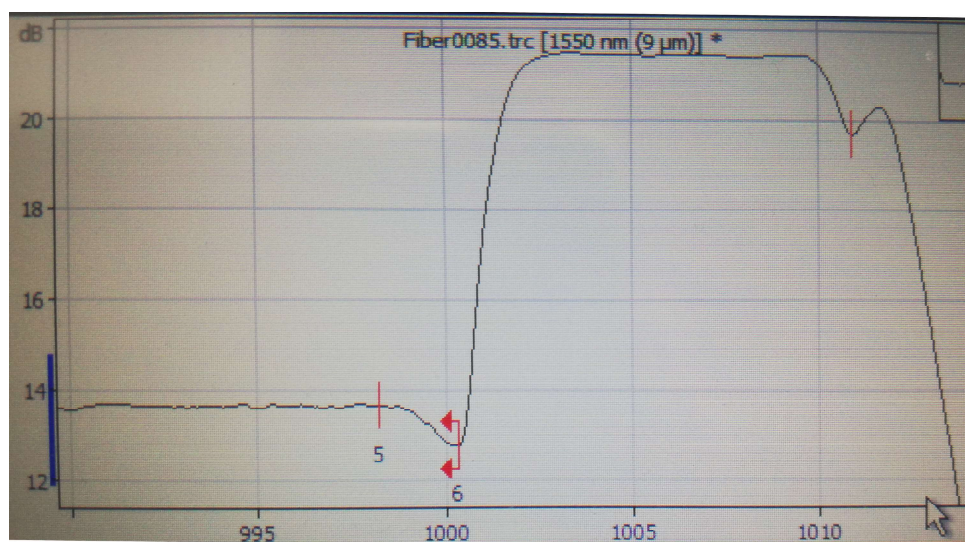
**Obrázek 6.8:** Detaily vláken během procesu svařování

je způsoben saturací lavinové diody což se v grafu OTDR projeví plochým vrcholem špičky signálu, která zvyšuje nejistotu měření. Saturovaná šipčka optického signálu je zobrazena na obr. 6.10.

Úroveň výkonu odraženého prvního od svaru vláken UHNA3 a SMF-28 je ve směru AB 0,617 dB a ve směru BA 0,593 dB



Obrázek 6.9: Výstupní exportovaný graf z OTDR reflektometru pro směr AB



Obrázek 6.10: Detail saturované signálové špičky ve výstupním grafu OTDR





## Zhodnocení a závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo na základě teoretických znalostí navrhnout a v praktické části ověřit způsoby propojení konvenčních jednovlákových vláken a vláken s vysokou numerickou aperturou. Byly zde zkoumány vláknové tapery jako alternativní řešení napojení vláken řady UHNA, které zároveň vykazuje nižší útlum oproti přímému spojení. Dále zde byla ověřena částečná univerzálnost, svařovacího profilu, vytvořeného na základě doporučení výrobce i pro ostatní vlákna řady UHNA. U výsledných vzorků byl poté měřen útlum a jednotlivé varianty byly mezi sebou porovnávány. Přesto, že proces svařování vlákna UNHA7 s taperem nebyl z důvodu časové náročnosti plně optimalizován, naměřené útlumy vytvořených vzorků dosahovaly v případě vláken UHNA7 o přibližně 0,5 dB nižšího útlumu, než je tomu u přímých napojení, u vláken UHNA3 pak byl tento útlum srovnatelný. Nakonec byla pomocí metody OTDR určen útlum trasy s 9 metrovým úsekem vlákna UHNA3, jehož obě strany byly navařeny na vlákno SMF-28. Pro každou použitou metodu spojení SMF-28 a UHNA vláken byl vytvořen pomocí programu BeamPROP simulační model a jeho hodnoty byly porovnány s teoretickými předpoklady a skutečnými naměřenými hodnotami. Modely navíc naznačovaly, že jedním z důvodů útlumu spoje jsou odrazy na pomezí vláken z důvodu jejich rozdílné NA. Navíc bylo vytvořeno i několik modelů zkoumajících chyby svárů a jejich vliv na efektivitu spoje. V případě chyb svárů v zarovnání byly výstupní hodnoty simulace porovnávány s vypočtenými hodnotami z uvedených vztahů. Předmětem pro další zkoumání může být další optimalizace v nastavení v procesu vytváření taperů a svařování.







## Literatura

- [1] R.Hui, M.O'Sullivan and I.Books24x7, *Fiber Optic Measurement Techniques* (1st ed.) 2009. DOI: 10.1016/B978-0-12-373865-3.X0001-8.
- [2] D. Marcuse, "Loss analysis of single-mode fiber splices," *The Bell System Technical Journal*, vol. 56, (5), pp. 703-718, 1977;1976;.
- [3] Y. Namihira and Y. Namihira, "Relationship between nonlinear effective area and modefield diameter for dispersion shifted fibres," *Electronics Letters*, vol. 30, (3), pp. 262-264;263;, 1994.
- [4] C. D. Hussey et al, "APPROXIMATE ANALYTIC FORMS FOR THE PROPAGATION CHARACTERISTICS OF SINGLE-MODE OPTICAL FIBRES," *Electronics Letters*, vol. 21, (23), pp. 1103-1104, 1985
- [5] P. Ciačka et al, "Dispersion measurement of ultra-high numerical aperture fibers covering thulium, holmium, and erbium emission wavelengths," *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*, vol. 35, (6), pp. 1301-1307, 2018;2017;.
- [6] BUBNÍK, Lukáš, Jiří Klajbl, Petr Mazuch,201, *Optoelektrotechnika*, [online] Code Creator, s.r.o. 978-80-88058-20-5 [citováno: 20. 4. 2019] Dostupné z: <https://publi.cz/eknihy/?book=185-optoelektrotechnika&search=Optoelektrotechnika>
- [7] Horizon House Publications, Inc "Technician's Guide to Fiber Optics by Donald J. Sterling, Jr," *Telecommunications*, vol. 28, (3), pp. 82, 1994.
- [8] S. Xue, M. A. van Eijkelenborg, G. W. Barton and P. Hambley, "Theoretical, Numerical, and Experimental Analysis of Optical Fiber Tapering," *in Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, no. 5, pp. 1169-1176, May 2007. doi: 10.1109/JLT.2007.893028
- [9] A. Azari, A. Bananej and A. A. Belgabad, "Theoretical analysis of optimum adiabatic tapering length and pulse shape modulation along tapered multimode fiber," *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 127, (14), pp. 5663-5669, 2016.

- [10] N. Lindenmann, *"Photonic Wire Bonding as a Novel Technology for Photonic Chip Interfaces."*, Karlsruhe, 2017; 2018;
- [11] G. L. Pedrola, *Beam Propagation Method for Design of Optical Waveguide Devices.* 2016; 2015
- [12] E. Neumann, T. Tamir and H. K. V. Lotsch, *Single-Mode Fibers : Fundamentals.* 1977.
- [13] T. Yamada et al, *"Arc fusion splicer with profile alignment system for high-strength low-loss optical submarine cable,"* Journal of Lightwave Technology, vol. 4, (8), pp. 1204-1210, 1986.
- [14] W. Zheng, *"Real time control of arc fusion for optical fiber splicing,"* Journal of Lightwave Technology, vol. 11, (4), pp. 548-553, 1993.
- [15] M. Shimizu et al, *"Optical fiber local-light injection and detection coupling system for identification of fiber transmission operation lines,"* Electronics and Communications in Japan, Part II: Electronics (English Translation of Denshi Tsushin Gakkai Ronbunshi), vol. 75, (4), pp. 43-51, 1992.
- [16] M. Kucharski, *Měření Přenosových Parametrů Optických Vlákien, Kabelů a Tras.* (1. vyd. ed.) Praha: MIKROKOM, 1994.



## Technické dokumentace

[a]. Thorlabs *Ultra-High NA Waveguide Splice Fiber* [online] Thorlabs © 2019 [citováno: 20. 4. 2019] Dostupné z:  
<https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup-id=340>

[b]. Plastic Fiber Cable *HFBR-RXXYYYYZ Series (POF)*, leden 2016 [online] Broadcom © [citováno: 20.4.2019] Dostupné z:  
<https://docs.broadcom.com/docs/AV02-1508EN>

[c]. SMF-28 © Ultra Optical Fiber, leden 2017 [online] Corning Incorporated ©2018 [citováno: 25. 4. 2019] Dostupné z:  
[http://www.corning.com/content/dam/corning/media/worldwide/coc/documents/Fiber/PI1468\\_1.16.pdf](http://www.corning.com/content/dam/corning/media/worldwide/coc/documents/Fiber/PI1468_1.16.pdf)

[d]. Ultra-High NA Select Cutoff Single-Mode Fiber, [online] Nufern © 2016 [citováno: 25. 4. 2019] Dostupné z:  
[https://www.nufern.com/pam/optical\\_fibers/spec/id/984/?8336](https://www.nufern.com/pam/optical_fibers/spec/id/984/?8336)

[e]. UHNA7 Ultra-High NA Select Cutoff Single-Mode Fiber © 2016 [online] Nufern © 2016 [citováno: 25. 4. 2019] Dostupné z:  
[https://www.nufern.com/pam/optical\\_fibers/988/UHNA7/](https://www.nufern.com/pam/optical_fibers/988/UHNA7/)

[f]. ClearCurve© Multimode optical fiber, Datasheet, leden 2017 [online] Corning Incorporated ©2018 [citováno: 25. 4. 2019] Dostupné z:  
[http://www.corning.com/content/dam/corning/media/worldwide/coc/documents/Fiber/PI1468\\_1.16.pdf](http://www.corning.com/content/dam/corning/media/worldwide/coc/documents/Fiber/PI1468_1.16.pdf)

[g]. GIF625 – Graded-index Multimode Fiber, Datasheet [online] THORLABS ©2018 [citováno: 25. 4. 2019] Dostupné z:  
<https://www.thorlabs.com/drawings/c42afda0b8cbcf2-94A6E411-A068-F40C-054DF0B2779C2679/GIF625-SpecSheet.pdf>

[h]. ESM-12B – ESM Large Mode Area Photonic Crystal Fiber, Datasheet [online] THORLABS ©2018 [citováno: 25. 4. 2019] Dostupné z:  
<https://www.thorlabs.com/drawings/4c598c6ed97b13ea-97A58F93-D8C1-6E7B-F471CFCB1A3A5EB7/ESM-12B-MFGSpec.pdf>

[i]. DCF38 – Dispersion Compensating Fibers for SM-28e+, Datasheet [online] THORLABS ©2018 [citováno: 25. 4. 2019] Dostupné z:  
[https://www.thorlabs.com/\\_sd.cfm?fileName=23057-S01.pdf&partNumber=DCF38](https://www.thorlabs.com/_sd.cfm?fileName=23057-S01.pdf&partNumber=DCF38)

[j]. LEAF© Non-zero dispersion shifted fibers, Datasheet, leden 2017 [online] Corning Incorporated ©2018 [citováno: 25. 4. 2019] Dostupné z:  
[http://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/PI1107\\_07-14\\_English.pdf](http://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/PI1107_07-14_English.pdf)

[k]. ER30-4/125 Erbium Doped Fiber, Datasheet [online] THORLABS ©2018 [citováno: 25. 4. 2019] Dostupné z:  
[https://www.thorlabs.com/drawings/c42afda0b8cbcf2-94A6E411-A068-F40C-054DF0B2779C2679/ER30-4\\_125-SpecSheet.pdf](https://www.thorlabs.com/drawings/c42afda0b8cbcf2-94A6E411-A068-F40C-054DF0B2779C2679/ER30-4_125-SpecSheet.pdf)

[l]. Spojka mechanická gelová FIBRLOK II 2529, Datasheet [online] 3M<sup>TM</sup> Fibrlok<sup>TM</sup> II ©2019 <https://www.alternetivo.cz/img.asp?attid=25952>

[m]. 3M FIBRLOK 2529 - podrobný technický datasheet.pdf Datasheet [online] 3M<sup>TM</sup> Fibrlok<sup>TM</sup> II ©2019 <https://www.alternetivo.cz/img.asp?attid=26380>

[n]. AAATesters.com - M90 Fusion Splicer Series 6000, Datasheet [online] AAATesters.com ©2019, Dostupné z  
[https://www.aaatesters.com/Corning\\_M90\\_6000\\_Fusion\\_Splicer\\_Model\\_M-90\\_6000\\_Corning\\_90\\_6000.html](https://www.aaatesters.com/Corning_M90_6000_Fusion_Splicer_Model_M-90_6000_Corning_90_6000.html)

[o]. Exfo Inc©2016, MaxTester 715B - last-mile OTDR, Specific Sheet [online], [https://www.profiber.eu/files/produkty/meracia%20technika\\_opticke\\_komunikacie/opticke\\_reflektometre\\_OTDR/Last\\_Mile-OTDR\\_MaxTester\\_715B/EXFO\\_spec-sheet\\_MaxTester-715B\\_v5\\_en.pdf](https://www.profiber.eu/files/produkty/meracia%20technika_opticke_komunikacie/opticke_reflektometre_OTDR/Last_Mile-OTDR_MaxTester_715B/EXFO_spec-sheet_MaxTester-715B_v5_en.pdf)

[p]. EXFO glossary – Optical Time-Domain Reflectometer (OTDR), [online] ©2018 EXFO Inc., Dostupné z:  
<https://www.exfo.com/en/resources/glossary/optical-time-domain-reflectometer-otdr/>

[q]. NUFERN ©2016, UHNA Fiber – Efficient Coupling to Silicon Waveguides, Publikováno: 10. 3. 2016 Dostupné:

*<http://www.nufern.com/library/getpdf/id/485/>*

[r]. FUJIKURA Ltd. ©2016, Fujikura LZM-100, Datasheet, [online]

Publikováno 16. 8. 2016, Dostupné z:

*[https://www.fujikura.co.uk/media/135942/fujikura\\_europe\\_lzm-100.pdf?iframe=true](https://www.fujikura.co.uk/media/135942/fujikura_europe_lzm-100.pdf?iframe=true)*

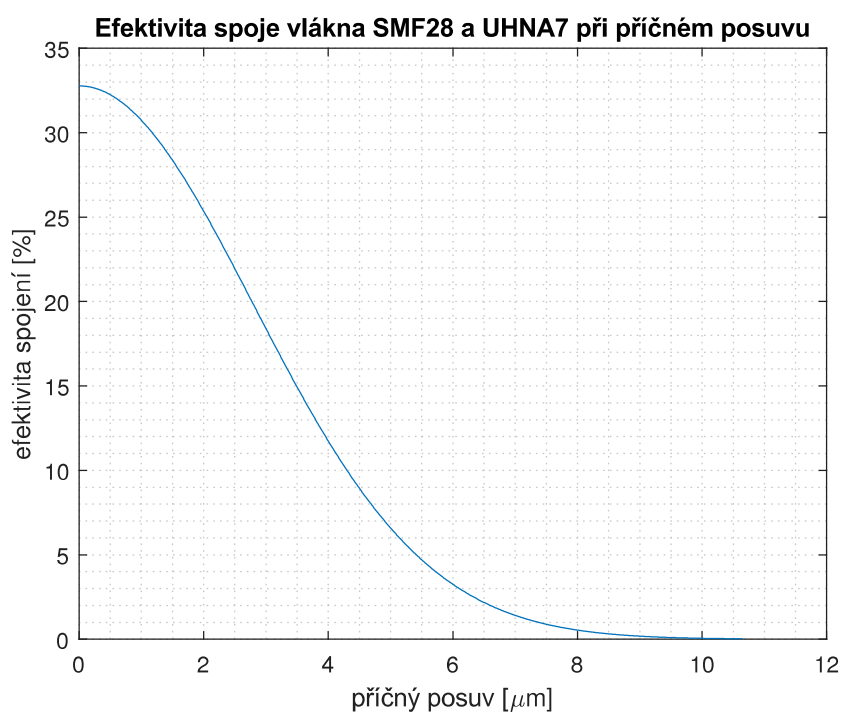
[s]. FUJIKURA Ltd. ©2016, Fujikura LZM-100, Propagační prezentace, [online] Publikováno 26. 6. 2014, Dostupné z:

*<https://www.fia-online.co.uk/wp-content/uploads/2017/10/Laser-source-glass-processing-system-Fujikura.pdf>*

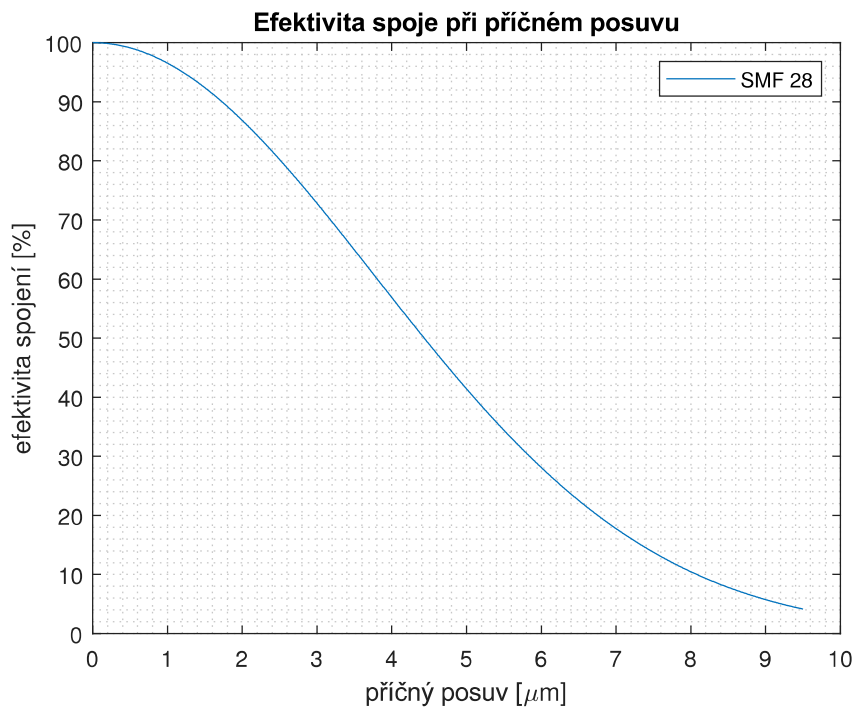


# Příloha A

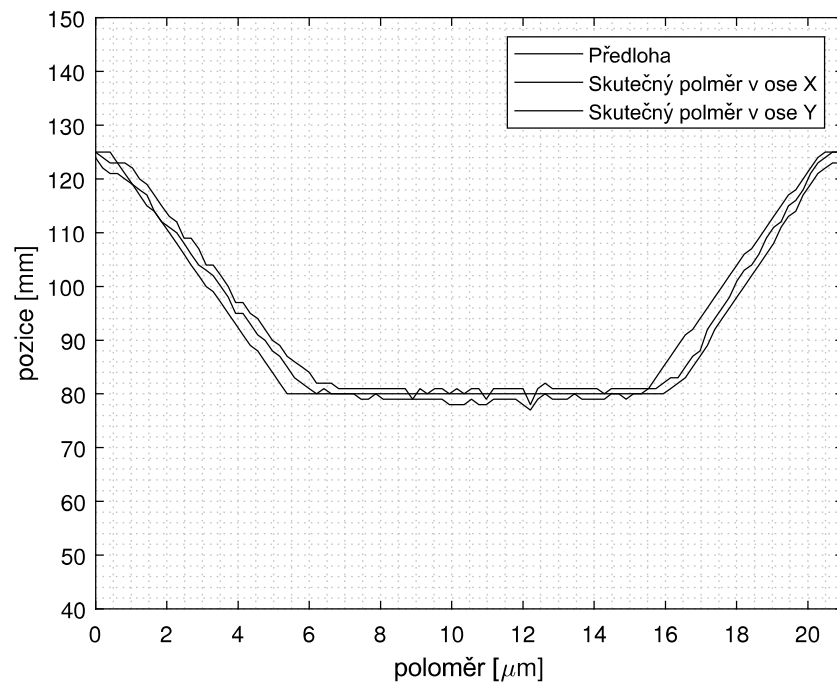
## Grafy



**Obrázek A.1:** Efektivita spojení vlákna SMF-28 a UHNA3

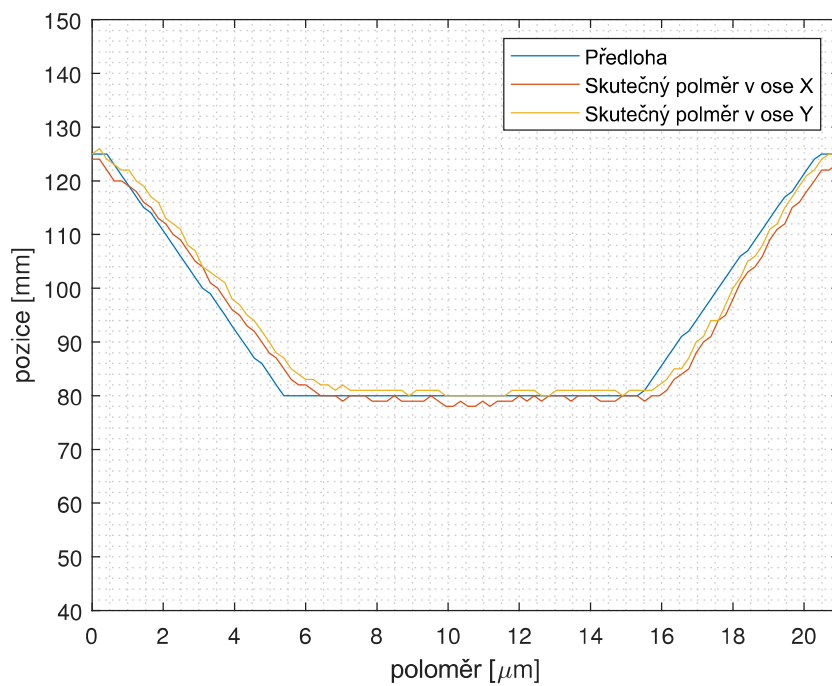


**Obrázek A.2:** Efektivita spoje vlákna SMF-28 při příčném posuvu

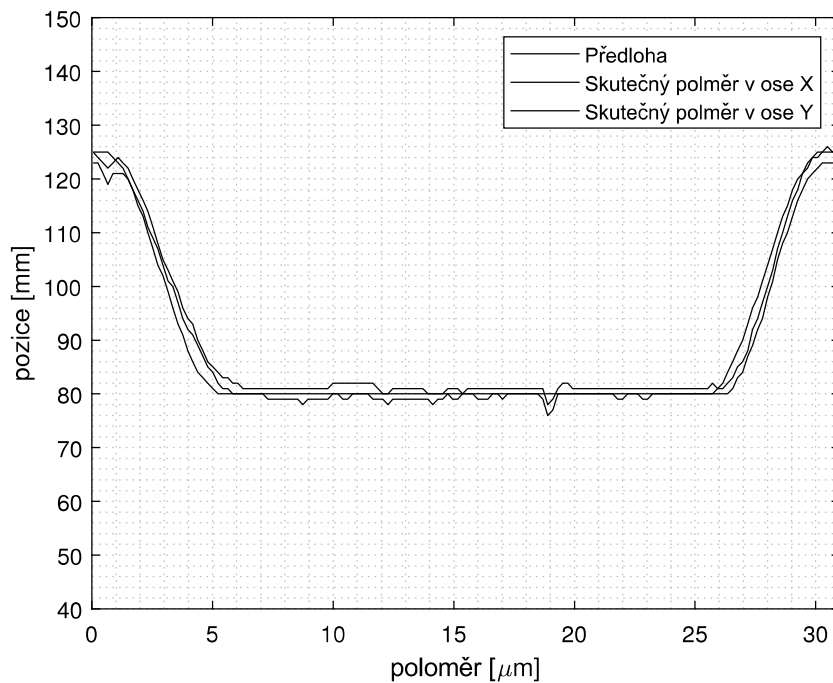


**Obrázek A.3:** Tapery A s lineárním profilem

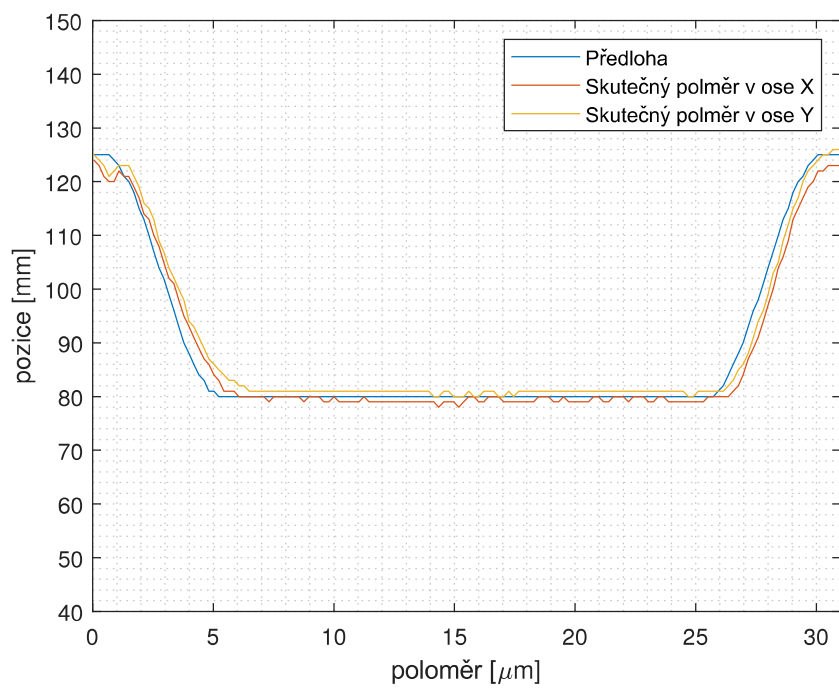




**Obrázek A.4:** Taper B s lineárním profilem



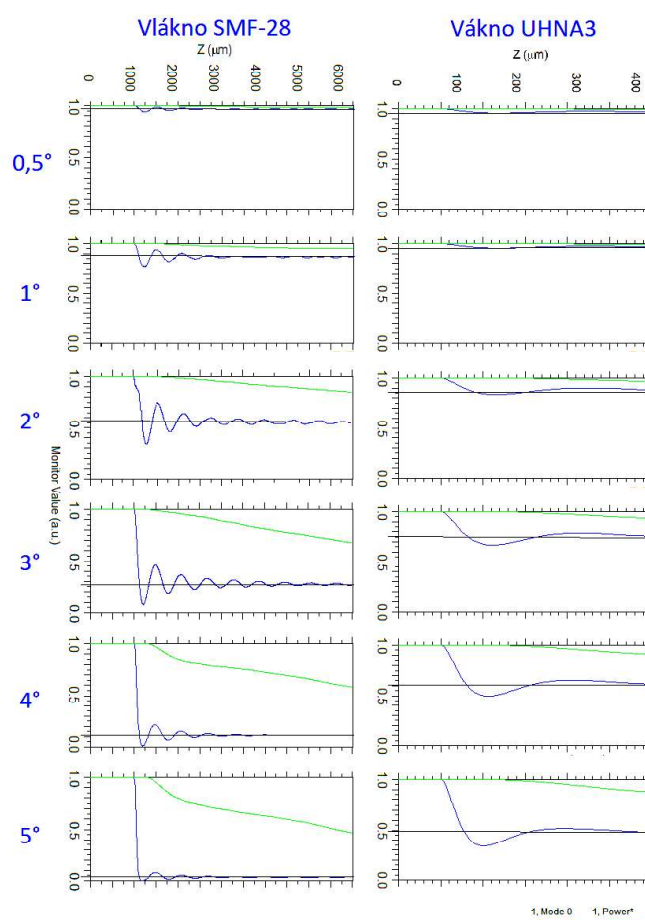
**Obrázek A.5:** Taper C se sinusovým profilem



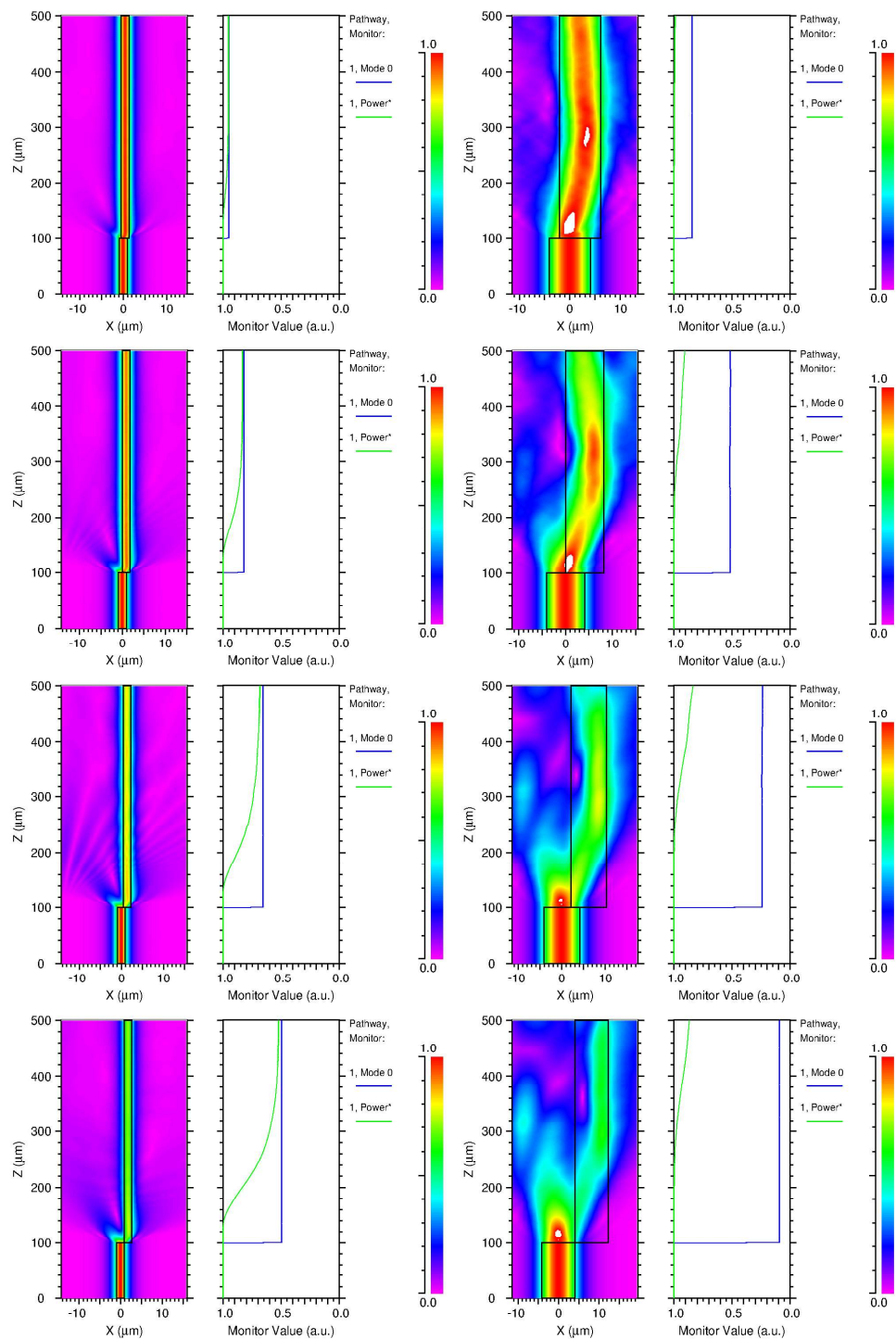
**Obrázek A.6:** Taper D se sinusovým profilem

## Příloha B

### Simulace



**Obrázek B.1:** Srovnání útlumů signálů při úhlové chybě zarovnání pro vlákna UHNA3 a vlákna SMF-28



**Obrázek B.2:** Příčné posunutí vlákna při sváření vlevo UHNA3 vpravo SMF-28 pro posunutí vláken o  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{4}$  a celý poloměr příslušného jádra