

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

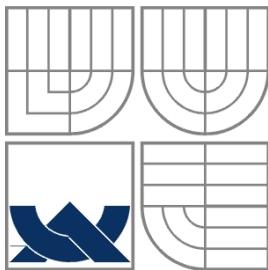
MODEL PLOŠNÉHO ROZLOŽENÍ OPTICKÉ INTENZITY VE SVAZKU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

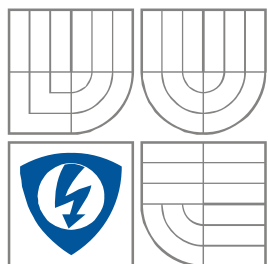
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ALEŠ WINTR

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MODEL PLOŠNÉHO ROZLOŽENÍ OPTICKÉ INTENZITY VE SVAZKU

MODEL OF THE SURFACE OPTICAL INTENSITY DISTRIBUTION IN THE BEAM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Aleš Wintř

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.

BRNO, 2009

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Aleš Wintř
Bytem: tř. gen. Janouška 27, Přerov, 750 05
Narozen/a (datum a místo): 7. února 1982 v Přerově

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☒ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Model plošného rozložení optické intenzity ve svazku

Vedoucí/ školitel VŠKP: prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 5. června 2009

.....
Nabyvatel

.....
Autor

ABSTRAKT

Cílem této práce bylo nejdříve seznámení se s popisem optického svazku, šířícího se volným prostorem a s jeho základními parametry a charakteristikami.

V teoretické části této práce byly vytvořeny programy, které zobrazují modely svazků. Tyto modely na základě daných parametrů znázorňují plošné rozložení optické intenzity v průřezu daných svazků. Jedná se o model zobrazení svazku v grafu rozměru 2D, dále model zobrazení svazku v grafu rozměru 3D a model zobrazení svazku v grafu rozměru 3D s možností zadání úhlu natočení stopy svazku. K tomuto účelu jsem použil program Matlab verze R2007a.

V experimentální části této práce byl sestaven měřicí řetězec a změřena byla optická intenzita vybraných optických vláken. V měřicím řetězci jsem použil laser Promax Prolite 80, optický zdroj LED Promax Prolite 81, dále měřič optického výkonu Exfo 67A, kolimátor Thorlabs F810FC-1550 a optická vlákna různých parametrů. Ze změřených hodnot pro jednotlivá optická vlákna byly sestaveny grafy zobrazující rozložení optické intenzity a tyto grafy byly porovnány s teoretickým počítačovým modelem vytvořeným v předchozí části této práce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optická intenzita, Gaussovský svazek, laser, optické vlákno, kolimátor.

ABSTRACT

The aim of the thesis is first to describe the light beam spreading through free space and its characteristics.

The theoretical part of the thesis developed programs that display models of beams. Given the parameters, theses models depict areal dispersion of optical intensity in the cross-section of beams. More specifically, I developed both a 2-dimensional and 3-dimensional model of beam depiction and a 3-dimensional model with variable angle of rotation of the beam trace. For this purpose I used the software Matlab R2007a.

In the experimental part of the thesis I assembled a measurement chain and measured optical intensity of selected optical fibre. The measurement chain included laser Promax Prolite 80, optical source LED Promax Prolite 81, optic power meter Exfo 67A, collimator Thorlabs F810FC-1550 and optical fibres with various characteristics. The measured values were used to plot graphs depicting aerial dispersion of optical intensity and these graphs were compared with the theoretical computer model developed in the theoretical part of the thesis.

KEYWORDS

Optical intensity, Gaussian Beam, laser, optical fibre, collimator.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

WINTR, A. *Model plošného rozložení optické intenzity ve svazku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 54 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Model plošného rozložení optické intenzity ve svazku jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 5. června 2009

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Prof. Ing. Otakaru Wilfertovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 5. června 2009

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Gaussovský svazek.....	2
2.1	Komplexní amplituda	2
2.2	Parametry Gaussovského svazku	2
3	Vlastnosti Gaussovského svazku	3
3.1	Intenzita.....	3
3.2	Výkon.....	4
3.3	Poloměr svazku	5
3.4	Divergence svazku.....	6
3.5	Ohnisková hloubka.....	6
3.6	Fáze.....	7
3.7	Vlnoplochy	8
4	Počítačové modely Gaussovského svazku	10
4.1	Počítačový model Gaussovského svazku se zobrazením grafu 2D	10
4.1.1	Matematický tvar Gaussovy funkce pro graf 2D.....	10
4.1.2	Výpis zdrojového kódu z programu Matlab pro 2D graf Gaussovy funkce.....	10
4.2	Počítačový model Gaussovského svazku se zobrazením grafu 3D	11
4.2.1	Matematický tvar Gaussovy funkce pro graf 3D.....	11
4.2.2	Výpis zdrojového kódu z programu Matlab pro 3D graf Gaussovy funkce.....	11
4.3	Počítačový model Gaussovského svazku se zobrazením grafu 3D s možností zadání úhlu natočení stopy svazku ω	12
4.3.1	Obecný tvar Gaussovy funkce pro graf 3D s možností zadání úhlu natočení stopy svazku ω	13
4.3.2	Výpis zdrojového kódu z programu Matlab pro 3D graf Gaussovy funkce s možností zadání úhlu natočení stopy svazku ω	13
4.4	Počítačový model Gaussovského svazku se zobrazením grafu 3D s měnící se proměnnou úhlu natočení stopy svazku ω	14
4.4.1	Výpis zdrojového kódu z programu Matlab pro 3D graf Gaussovy funkce s měnící se proměnnou úhlu natočení stopy svazku ω	14
5	Měřicí řetězec pro experimentální stanovení základních charakteristik optických svazků.....	16
5.1	Postup měření optické intenzity	18
5.2	Měření jednomodového optického vlákna SM 9/125 s konektory FC – FC pomocí laseru Promax Prolite 80	19
5.3	Měření mnohomodového optického vlákna GI 50/125 s konektory FC – FC pomocí laseru Promax Prolite 80	27
5.4	Měření mnohomodového optického vlákna GI 62,5/125 s konektory FC – FC pomocí laseru Promax Prolite 80	35
5.5	Měření optického vlákna GI 62,5/125 s konektory FC – FC pomocí optického zdroje LED Promax Prolite 81	43
6	Závěr.....	51
7	Použitá literatura	52

Příloha

Výpis zdrojového kódu z programu Matlab pro vykreslení grafu zobrazujícího rozložení optické intenzity z naměřených hodnot společně s teoretickým počítačovým modelem.....	53
---	----

1 Úvod

Cílem této bakalářské práce bylo seznámení se s popisem optického svazku, šířícího se volným prostorem a stanovení základních parametrů a charakteristik svazku.

V první úvodní části této práce jsem se zabýval světelnými vlnami ve formě paraxiálních optických svazků. Jsou to vlny, jejichž normály k vlnoploše svírají malý úhel s osou šíření. Musí splňovat paraxiální Helmholtzovu rovnici. Důležitým řešením této rovnice je vlna nazývaná Gaussovský svazek, popř. další svazky splňující Helmholtzovu rovnici, Hermite-Gaussovské, Laguerre-Gaussovské, nebo Besselovské svazky, jejichž limitním případem je však opět svazek Gaussovský. Jeho výkon je v podstatě soustředěn uvnitř úzkého kužele. Rozložení intenzity v libovolné příčné rovině je dáno kruhově symetrickou Gaussovskou funkcí s osou v ose svazku. Šířka této funkce je minimální v místě maximálního zúžení svazku – v jeho středu a postupně se zvětšuje na obě strany. Blízko středu jsou vlnoplochy téměř rovinné, dále se postupně zakřivují, až se ve velké vzdálenosti stanou přibližně sférickými. Pro danou šířku svazku poskytuje řešení vlnové rovnice minimální úhlovou divergenci normál k vlnoploše. Tyto normály vytvářejí v prostoru úzký svazek. Záření vystupující z laseru má za jistých ideálních podmínek tvar Gaussovského svazku.

V teoretické části této práce byly vytvořeny programy, které zobrazují modely svazků. Tyto modely na základě daných parametrů znázorňují plošné rozložení optické intenzity v průřezu daných svazků. Jedná se o model zobrazení svazku v grafu rozměru 2D, dále model zobrazení svazku v grafu rozměru 3D a model zobrazení svazku v grafu rozměru 3D s možností zadání úhlu natočení stopy svazku. K tomuto účelu jsem použil program Matlab verze R2007a.

V experimentální části této práce byl sestaven měřicí řetězec a změřena byla optická intenzita vybraných optických vláken. V měřicím řetězci jsem použil laser Promax Prolite 80, optický zdroj LED Promax Prolite 81, dále měřič optického výkonu Exfo 67A, kolimátor Thorlabs F810FC-1550 a optická vlákna různých parametrů. Ze změřených hodnot pro jednotlivá optická vlákna byly sestaveny grafy zobrazující rozložení optické intenzity a tyto grafy byly porovnány s teoretickým počítačovým modelem vytvořeným v předchozí části této práce.

2 Gaussovský svazek

2.1 Komplexní amplituda

Paraxiální vlna je rovinná vlna $\exp(-jkz)$, kde $k = 2\pi/\lambda$ je vlnové číslo a λ je vlnová délka modulovaná komplexní obálkou $A(r)$, která je pomalu proměnnou funkcí polohy v příčných souřadnicích r, φ , tedy pro komplexní amplitudu platí

$$U(r) = A(r) \exp(-jkz) \quad (1)$$

Řešení paraxiální Helmholtzovy rovnice vyhovuje např. paraboloidní vlna [1]

$$A(r) = \frac{A_1}{z} \exp\left(-jk \frac{\rho^2}{2z}\right), \quad \rho^2 = x^2 + y^2, \quad (2)$$

kde A_1 je konstanta. Přitom pro x a y mnohem menší než z je paraboloidní vlna paraxiální aproximací sférické vlny $U(r) = (A_1 / r) \exp(-jkr)$.

Gaussovský svazek je dalším řešením paraxiální Helmholtzovy rovnice. Z paraboloidní vlny ho lze získat jednoduchou aproximací. Vzhledem k tomu, že komplexní obálka paraboloidní vlny je řešením paraxiální Helmholtzovy rovnice, je jejím řešením také obálka posunutá o konstantní hodnotu ξ , tedy [1]

$$A(r) = \frac{A_1}{q(z)} \exp\left[-jk \frac{\rho^2}{2q(z)}\right], \quad q(z) = z - \xi, \quad (3)$$

kde ξ je konstanta. Jedná se vlastně o paraboloidní vlnu v bodě $z = \xi$ namísto v $z = 0$. Pokud je ξ komplexní, je stále řešením paraxiální Helmholtzovy rovnice, avšak získává výrazně odlišné vlastnosti. Zejména, když ξ je ryze imaginární, např. $\xi = -jz_0$, kde z_0 je reálné, (3) definuje komplexní obálku gaussovského svazku [1]

$$A(r) = \frac{A_1}{q(z)} \exp\left[-jk \frac{\rho^2}{2q(z)}\right], \quad q(z) = z + jz_0, \quad (4)$$

Parametr z_0 se nazývá Rayleighova vzdálenost.

Abychom oddělili amplitudu a fázi této komplexní obálky, zapíšeme komplexní funkci $1/q(z) = 1/(z + jz_0)$ pomocí její reálné a imaginární části, přičemž definujeme dvě nové reálné funkce $R(z)$ a $W(z)$ [1]

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - j \frac{\lambda}{\pi W^2(z)} \quad (5)$$

Výraz pro **komplexní amplitudu** $U(r)$ gaussovského svazku získáme dosazením (5) do (4) a využitím (1)

$$U(r) = A_0 \frac{W_0}{W(z)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{W^2(z)}\right] \exp\left[-jkz - jk \frac{\rho^2}{2R(z)} + j\zeta(z)\right] \quad (6)$$

2.2 Parametry Gaussovského svazku

Ve výrazu pro komplexní amplitudu (6) jsou neznámými funkcemi tzv. parametry svazku: [1]

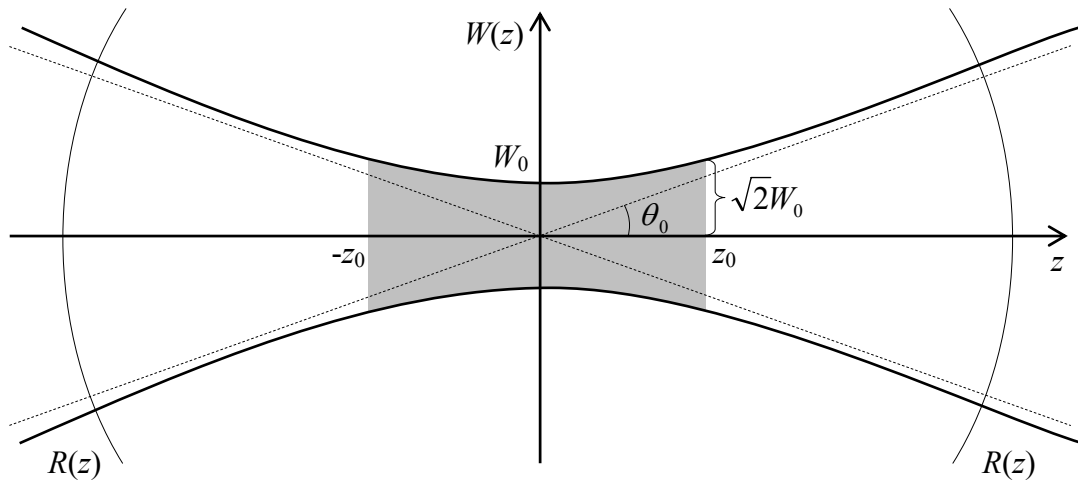
Pološířka (poloměr) svazku $W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2}$ (7)

Poloměr křivosti vlnoplochy $R(z) = z \left[1 + \left(\frac{z_0}{z}\right)^2 \right]$ (8)

Fázové zpoždění $\zeta(z) = \arctan \frac{z}{z_0}$ (9)

Poloměr maximálního zúžení svazku $W_0 = \sqrt{\frac{\lambda z_0}{\pi}}$ (10)

A_0 je konstanta ($A_0 = A_1 / jz_0$).



Obr. 1. Parametry Gaussovského svazku.

Výraz pro komplexní amplitudu Gaussovského svazku obsahuje dva parametry A_0 a z_0 , které jsou určeny okrajovými podmínkami. Všechny ostatní parametry souvisí s Rayleighovou vzdáleností z_0 a s vlnovou délkou λ , vztahy (7) až (10).

3 Vlastnosti Gaussovského svazku

3.1 Intenzita

Intenzita optického záření $I(r) = |U(r)|^2$ je funkcí axiální vzdálenosti z a radiální vzdálenosti $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$,

$$I(\rho, z) = I_0 \left[\frac{W_0}{W(z)} \right]^2 \exp \left[-\frac{2\rho^2}{W^2(z)} \right], \quad (11)$$

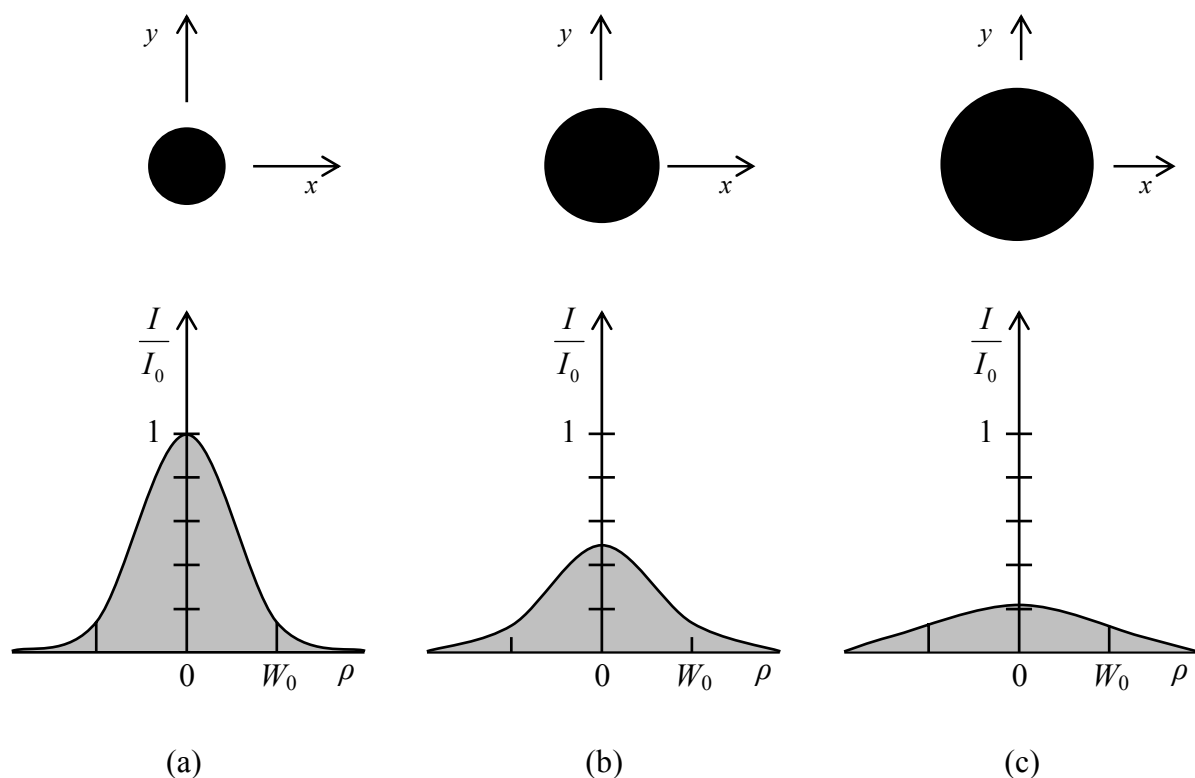
kde $I_0 = |A_0|^2$. Pro každou hodnotu z je intenzita gaussovskou funkcí radiální vzdálenosti ρ . Proto je vlna nazývána gaussovským svazkem. Gaussova funkce dosahuje největší hodnoty

pro $\rho = 0$ (na ose z) a monotónně klesá se vzrůstajícím ρ . Pološířka Gaussovského rozložení $W(z)$ přitom vzrůstá s axiální vzdáleností z , což je znázorněno na obr. 2.

Na ose svazku ($\rho = 0$) má intenzita [1]

$$I(0, z) = I_0 \left[\frac{W_0}{W(z)} \right]^2 = \frac{I_0}{1 + (z/z_0)^2} \quad (12)$$

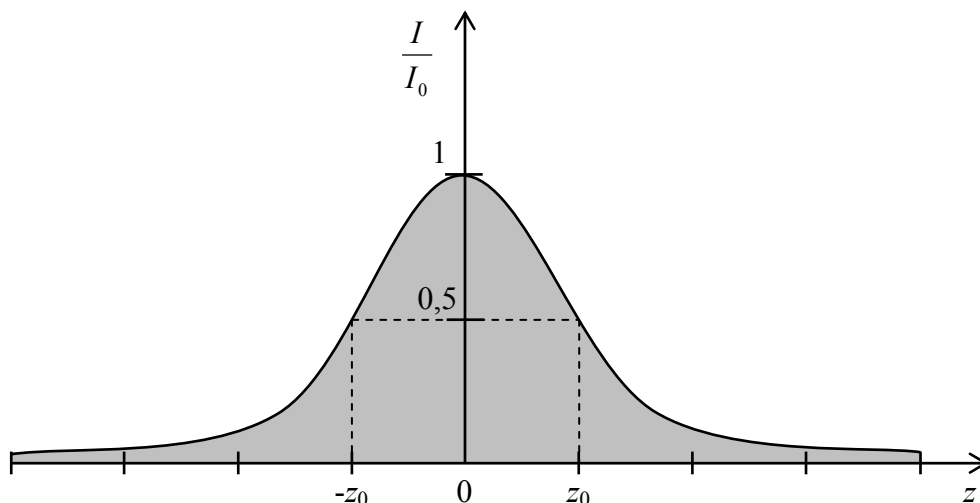
pro $z = 0$ svou maximální hodnotu I_0 a s rostoucím z spojitě klesá, přičemž pro $z = \pm z_0$ dosahuje poloviny maximální hodnoty I_0 (obr. 3). Pro $|z| \gg z_0$ máme $I(0, z) \approx I_0 z_0^2 / z^2$ a intenzita klesá s kvadrátem vzdálenosti z (podobně jako u sférické či paraboloidní vlny). Absolutně nejvyšší hodnota intenzity $I(0, 0) = I_0$ je ve středu svazku ($z = 0, \rho = 0$).



Obr. 2. Normovaná intenzita svazku I/I_0 jako funkce radiální vzdálenosti ρ pro různé axiální vzdálenosti z : (a) $z = 0$, (b) $z = z_0$, (c) $z = 2z_0$

3.2 Výkon

Celkový výkon přenášený svazkem je dán integrálem ze součinu intenzity záření a plochy příčného průřezu svazku (např. ve vzdálenosti z)



Obr. 3. Závislost normované intenzity I/I_0 v ose svazku ($\rho = 0$) na podélné souřadnici z .

$$P = \int_0^{\infty} I(\rho, z) 2\pi\rho d\rho \quad (13)$$

odkud

$$P = \frac{1}{2} I_0 (\pi W_0^2) \quad (14)$$

Výsledek tedy nezávisí na z . Výkon svazku je dán poloviční hodnotou součinu maximální intenzity s plochou kruhu o poloměru rovnajícím se středové pološířce svazku. Vzhledem k tomu, že gaussovske svazky jsou často charakterizovány přenášeným výkonem P , je užitečné prostřednictvím (14) vyjádřit I_0 jako funkci P a vztah (11) přepsat do tvaru [1]

Intenzita svazku
$$I(\rho, z) = \frac{2P}{\pi W^2(z)} \exp\left[-\frac{2\rho^2}{W^2(z)}\right] \quad (15)$$

3.3 Poloměr svazku

V každém příčném průřezu svazku dosahuje intenzita největší hodnoty na ose z a v radiální vzdálenosti $\rho = W(z)$ poklesne na $1/e^2 \approx 0,135$ největší hodnoty. Protože 86% výkonu se šíří oblastí o poloměru $W(z)$, bereme $W(z)$ jako poloměr svazku (také nazývaný pološířkou, někdy šířkou svazku). Střední kvadratická odchylka rozložení intenzity (rms – šířka) je $\sigma = \frac{1}{2} W(z)$.

Závislost poloměru svazku na z je dána vztahem (7)

Poloměr svazku
$$W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2} \quad (16)$$

V rovině $z = 0$ nabývá minimální hodnoty W_0 . Toto místo se nazývá **místem maximálního zúžení – středem svazku** a W_0 je jeho poloměr. Průměr $2W_0$ je označován jako velikost stopy. Poloměr svazku s rostoucím z postupně vzrůstá, pro $z = z_0$ dosahuje hodnoty $\sqrt{2}W_0$

a dále pro zvětšující se z monotónně roste. Pro $z \gg z_0$ můžeme první člen pravé strany (16) zanedbat. Pak dostaneme lineární vztah [1]

$$W(z) \approx \frac{W_0}{z_0} z = \theta_0 z, \quad (17)$$

kde $\theta_0 = W_0 / z_0$. Pomocí (10) můžeme také psát [1]

$$\theta_0 = \frac{\lambda}{\pi W_0} \quad (18)$$

3.4 Divergence svazku

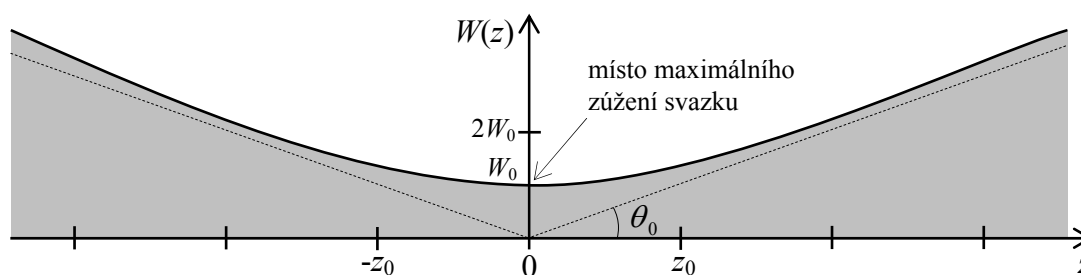
Daleko od středu svazku ($z \gg z_0$) vzrůstá jeho poloměr přibližně lineárně s rostoucím z a vytváří kužel s vrcholovým úhlem $2\theta_0$. Tímto kuzelem se šíří asi 86% celkového výkonu. Divergence svazku je tedy dána úhlem [1]

Divergenční úhel
$$\theta_0 = \frac{2}{\pi} \frac{\lambda}{2W_0} \quad (19)$$

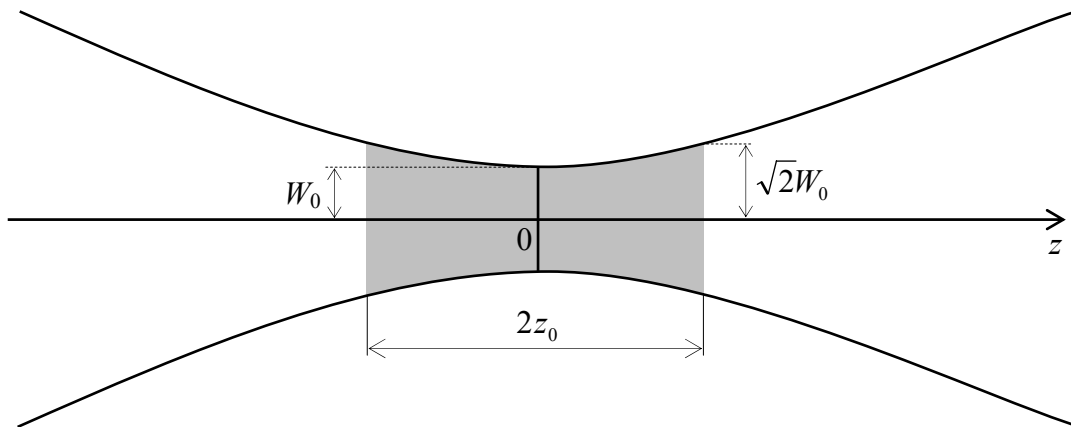
Divergence svazku je tedy přímo úměrná podílu vlnové délky λ a středového průměru $2W_0$. Menší středový poloměr vyžaduje větší divergenci. Chceme-li získat dobře kolimovaný svazek, musíme pracovat s kratší vlnovou délkou a větším středovým poloměrem.

3.5 Ohnisková hloubka

Z obr. 4 je zřejmé, že svazek je nejužší v $z = 0$. V této rovině má tedy nejlepší “ohnisko”. Od něj na obě strany se svazek postupně rozšiřuje. Axiální vzdálenost, podél které je poloměr svazku roven, nebo menší než $\sqrt{2}W_0$ (tj. tam, kde je plocha průřezu svazku rovna nebo menší než dvojnásobek plochy minimálního průřezu), je označována jako **ohnisková hloubka** nebo také **konfokální parametr** (obr. 5).



Obr. 4. V místě maximálního zúžení ($z = 0$) má poloměr svazku $W(z)$ minimální hodnotu W_0 , pro $z = \pm z_0$ dosahuje hodnoty $\sqrt{2}W_0$ a pro velká $|z|$ lineárně roste.



Obr. 5. Ohnisková hloubka Gaussovského svazku

Ze vztahu (16) můžeme vidět, že ohnisková hloubka je rovna dvojnásobku Rayleighovy vzdálenosti,

Ohnisková hloubka
$$2z_0 = \frac{2\pi W_0^2}{\lambda} \quad (20)$$

Ohnisková hloubka je přímo úměrná ploše průřezu svazku v místě maximálního zúžení a nepřímo úměrná vlnové délce. Fokussujeme-li svazek do menší stopy, získáme kratší ohniskovou hloubku. To má za následek větší požadavky na přesnost nastavení ohniskové roviny. Pro větší vlnové délky nemůžeme současně dosáhnout malé stopy a velké ohniskové hloubky. Např. pro $\lambda = 633 \text{ nm}$ (vlnová délka laseru He-Ne) a stopu o velikosti $2W_0 = 2 \text{ cm}$ dostaneme ohniskovou hloubku $2z_0 \approx 1 \text{ km}$. Mnohem menší stopa o velikosti $20 \mu\text{m}$ odpovídá mnohem kratší ohniskové hloubce 1 mm .

3.6 Fáze

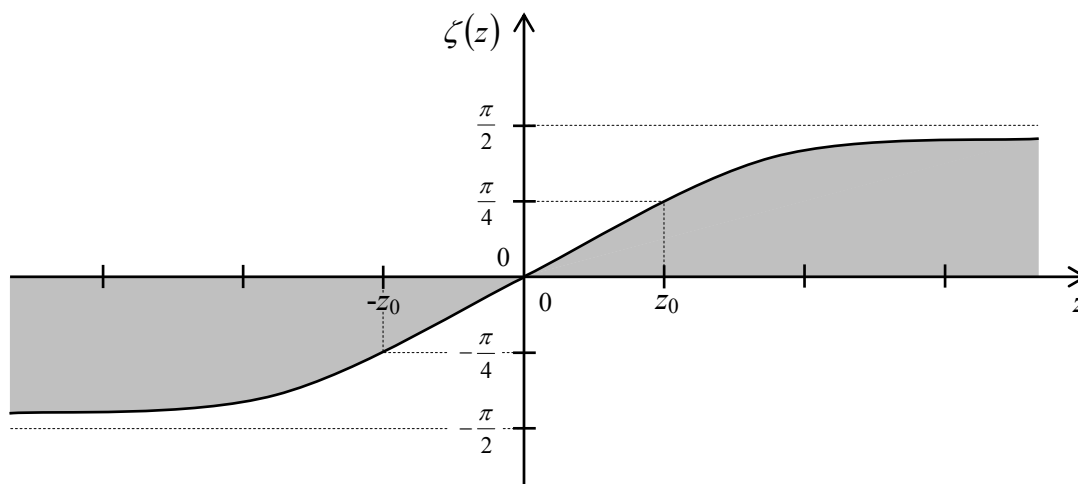
Ze vztahu (6) dostaneme pro fázi gaussovského svazku výraz [1]

$$\phi(\rho, z) = kz - \zeta(z) + \frac{k\rho^2}{2R(z)} \quad (21)$$

Na ose svazku ($\rho = 0$) obsahuje fáze dva členy:

$$\phi(0, z) = kz - \zeta(z) \quad (22)$$

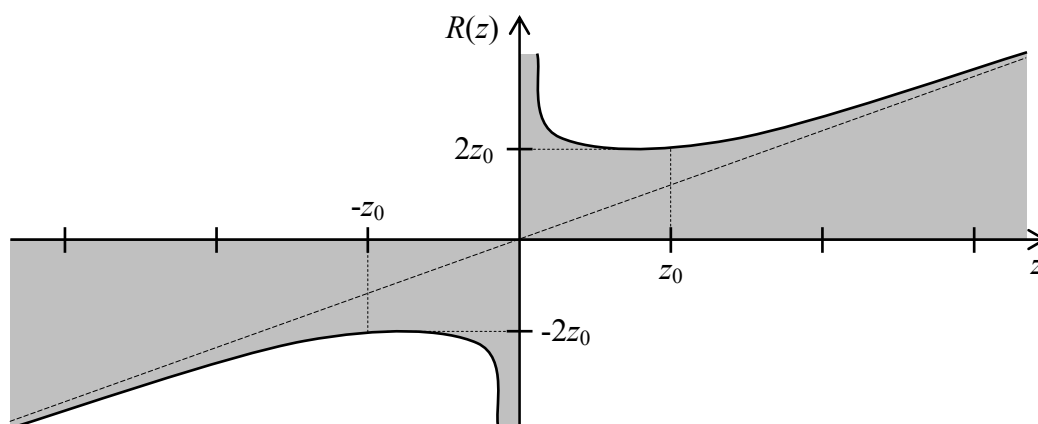
První člen kz je fází rovinné vlny. Druhý reprezentuje fázové zpoždění $\zeta(z)$ dané vztahem (9) a měnící se od $-\pi/2$ pro $z = -\infty$ do $+\pi/2$ pro $z = \infty$, viz obr. 6. Toto fázové zpoždění odpovídá zpoždění vlnoplochy svazku vzhledem k rovinné či sférické vlně. Celkové zpoždění podél osy svazku (od $z = -\infty$ do $z = \infty$) je tedy π . Tento jev je označován jako Guoyův efekt.



Obr. 6. Fázové zpoždění $\zeta(z)$ podél osy gaussovského svazku vztažené k rovinné vlně.

3.7 Vlnoplochy

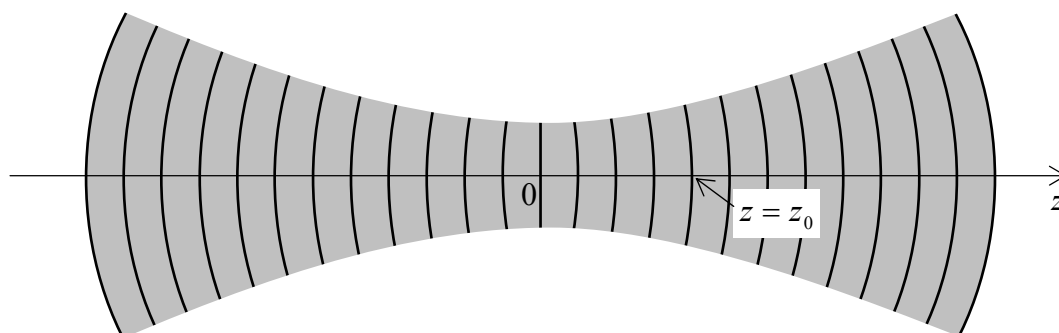
Třetí člen pravé strany (21) určuje zakřivení vlnoplochy. Reprezentuje odchylku fáze mimoosových bodů vlnoplochy od fáze rovinné vlny tečné v ose svazku k této vlnoploše. Plochy konstantní fáze jsou dány rovnicí $k[z + \rho^2 / 2R(z)] - \zeta(z) = 2\pi q$. Vzhledem k tomu, že $\zeta(z)$ a $R(z)$ jsou pomalu proměnné funkce svých argumentů, můžeme je na každé vlnoploše považovat za přibližně konstantní. Potom dostaneme $z + \rho^2 / 2R = q\lambda + \zeta(\lambda) / 2\pi$, kde $R = R(z)$ a $\zeta = \zeta(z)$. To je přesně rovnice plochy paraboloidu o poloměru křivosti R . Tedy $R(z)$ vynesené na obr. 7 má význam poloměru křivosti vlnoplochy podél osy svazku.



Obr. 7. Poloměr křivosti $R(z)$ vlnoplochy Gaussovského svazku. Čárkovaná přímka odpovídá poloměru sférické vlny.

Jak je znázorněno na obr. 7, poloměr křivosti $R(z)$ je v $z = 0$ nekonečný, což odpovídá rovinné vlnoploše. Při rostoucím z nejprve klesá a v $z = z_0$ dosáhne minimální hodnoty $2z_0$. V tomto bodě má vlnoplocha největší křivost. Dále se zvětšujícím se z poloměr křivosti

postupně roste, až pro $z \gg z_0$ dostaneme $R(z) \approx z$. Vlnoplochy jsou téměř sférické. Pro záporná z je závislost $R(z)$ až na znaménko stejná.



Obr. 8. Vlnoplochy Gaussovského svazku.

4 Počítačové modely Gaussovského svazku

Úkolem této části práce je vytvořit počítačové modely Gaussovského svazku, které na základě daných parametrů ukážou plošné rozložení optické intenzity v průřezu svazku. K vytvoření těchto modelů jsem použil program Matlab R2007a. Jedná se o model zobrazení svazku v grafu rozměru 2D, dále model zobrazení svazku v grafu rozměru 3D a ještě model zobrazení svazku v grafu rozměru 3D s možností zadání úhlu natočení stopy svazku.

4.1 Počítačový model Gaussovského svazku se zobrazením grafu 2D

4.1.1 Matematický tvar Gaussovy funkce pro graf 2D

Gaussova funkce pro 2D graf je matematicky popsána tvarem

$$f(x) = A \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2}}, \quad (23)$$

kde A je amplituda funkce

x_0 je hodnota na ose x , kde dosahuje funkce maxima

σ_x je směrodatná odchylka

4.1.2 Výpis zdrojového kódu z programu Matlab pro 2D graf Gaussovy funkce

```
clear all
close all

% definuj amplitudu gaussovske funkce
A = 1;

% definuj sigma_x (směrodatnou odchylku)
sigma_x = 1;

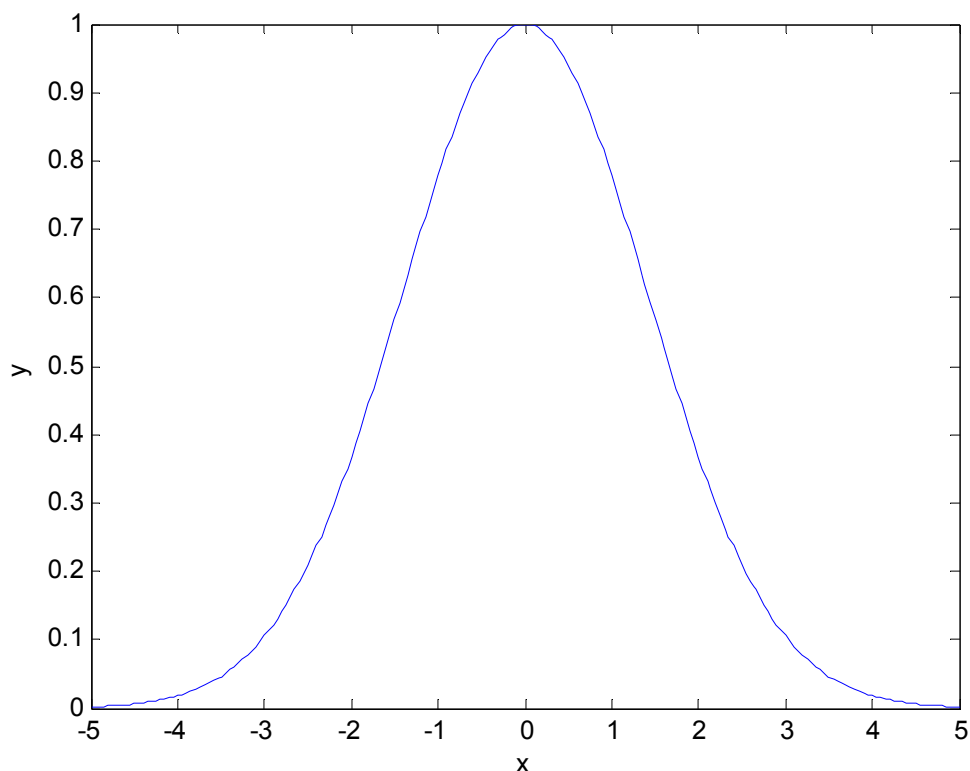
% definuj x0 (hodnotu na ose x, kde dosahuje funkce maxima)
x0 = 0;

% definuj meritko osy x v 2D grafu (min, krok, max)
x = -5 : 0.05 : 5;

% definice gaussovy funkce pro 2D graf
z=A*exp(-((x-x0)/(2*sigma_x)).^2);

% zobrazení grafu
plot(x,z);

% popisy os
xlabel('x');
ylabel('y');
```



Obr. 9. 2D graf Gaussovy funkce $y = f(x)$ ukazující názorně plošné rozložení optické intenzity v průřezu svazku.

4.2 Počítačový model Gaussovského svazku se zobrazením grafu 3D

4.2.1 Matematický tvar Gaussovy funkce pro graf 3D

Gaussova funkce pro 3D graf je matematicky popsána tvarem

$$f(x, y) = A \cdot e^{-\left(\frac{(x-x_0)^2}{2 \cdot \sigma_x^2}\right) - \left(\frac{(y-y_0)^2}{2 \cdot \sigma_y^2}\right)}, \quad (24)$$

kde A je maximální hodnota intenzity

x_0 je hodnota na ose x , kde dosahuje funkce maxima

y_0 je hodnota na ose y , kde dosahuje funkce maxima

σ_x je směrodatná odchylka ve směru osy x

σ_y je směrodatná odchylka ve směru osy y

4.2.2 Výpis zdrojového kódu z programu Matlab pro 3D graf Gaussovy funkce

```
clear all
close all
```

```
% definuj maximální hodnotu intenzity
```

```
A = 5;
```

```
% definuj sigma_x a sigma_y (směrodatne odchylky v ose x a y)
```

```
sigma_x = 1; sigma_y = 2;
```

```

% definuj x0 a y0 (hodnotu na ose x a y, kde dosahuje funkce maxima)
x0 = 0; y0 = 0;

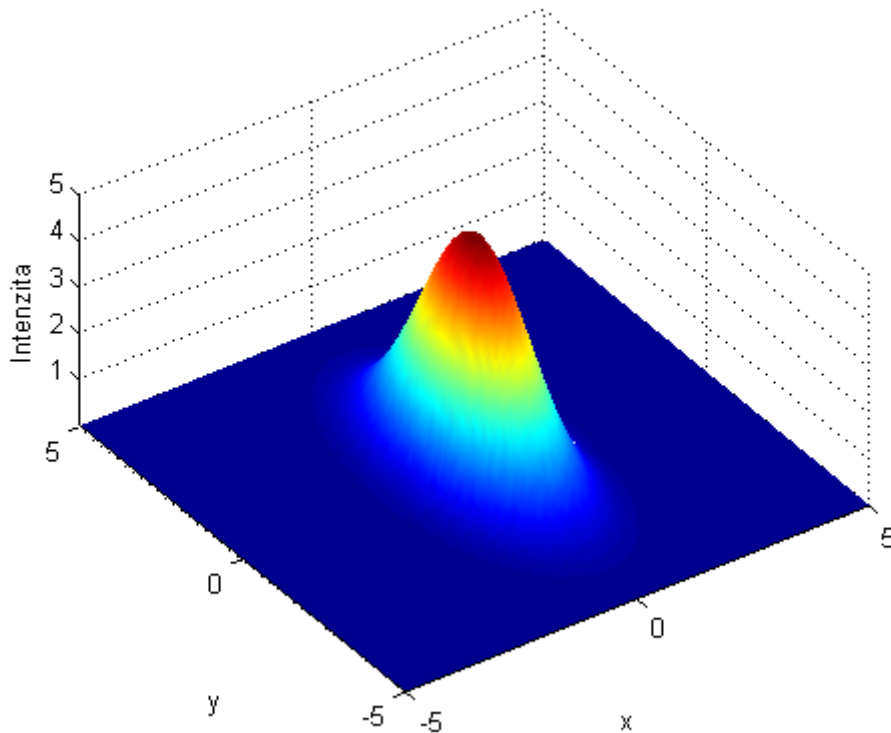
% definuj meritko osy x a y ve 3D grafu (min, krok, max)
[X, Y] = meshgrid(-5:.1:5, -5:.1:5);

% definice gaussovy funkce pro 3D graf
Z = A*exp( - ((X-x0)/sigma_x).^2 - ((Y-y0)/sigma_y).^2);

% zobrazeni grafu
surf(X,Y,Z);shading interp;view(-35,35);axis equal;drawnow

% popisy os
xlabel('x');
ylabel('y');
zlabel('Intenzita');

```



Obr. 10. 3D graf Gaussovy funkce zobrazující plošné rozložení optické intenzity v průřezu svazku dle zadaných parametrů (pro relativní veličiny v grafu platí: maximální hodnota intenzity $A = 5$, směrodatná odchylka $\sigma_x = 1$, $\sigma_y = 2$, hodnoty na ose x a y , kde dosahuje funkce maxima, jsou $x_0 = 0$, $y_0 = 0$).

4.3 Počítačový model Gaussovského svazku se zobrazením grafu 3D s možností zadání úhlu natočení stopy svazku ω

Dalším úkolem této práce je vytvořit model Gaussovského svazku s možností zadání úhlu natočení stopy svazku ω . K tomuto účelu nám už nestačí matematický tvar Gaussovy funkce, jak v předchozím případě, protože tam není parametr umožňující zadání úhlu natočení stopy

svazku. Proto zde musíme použít obecný tvar Gaussovy funkce umožňující zadání tohoto úhlu ω .

4.3.1 Obecný tvar Gaussovy funkce pro graf 3D s možností zadání úhlu natočení stopy svazku ω

Gaussova funkce pro 3D graf s možností zadání úhlu natočení stopy svazku je vyjádřena jako

$$f(x, y) = A \cdot e^{\left\{ -\left[a \cdot (x-x_0)^2 + 2 \cdot b \cdot (x-x_0) \cdot (y-y_0) + c \cdot (y-y_0)^2 \right] \right\}}, \quad (25)$$

kde

$$a = \left(\frac{\cos \omega}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{\sin \omega}{\sigma_y} \right)^2, \quad (26)$$

$$b = -\frac{\sin 2\omega}{\sigma_x^2} + \frac{\sin 2\omega}{\sigma_y^2}, \quad (27)$$

$$c = \left(\frac{\sin \omega}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{\cos \omega}{\sigma_y} \right)^2, \quad (28)$$

kde A je maximální hodnota intenzity

x_0 je hodnota na ose x , kde dosahuje funkce maxima

y_0 je hodnota na ose y , kde dosahuje funkce maxima

σ_x je směrodatná odchylka ve směru osy x

σ_y je směrodatná odchylka ve směru osy y

ω je úhel natočení stopy svazku

4.3.2 Výpis zdrojového kódu z programu Matlab pro 3D graf Gaussovy funkce s možností zadání úhlu natočení stopy svazku ω

```
clear all
close all

% definuj maximální hodnotu intenzity
A = 5;

% definuj x0 a y0 (hodnotu na ose x a y, kde dosahuje funkce maxima)
x0 = 0; y0 = 0;

% definuj uhel natoceni stopy svazku omega
omega = pi/2;

% definuj sigma_x a sigma_y (smerodatne odchylky v ose x a y)
sigma_x = 1; sigma_y = 2;

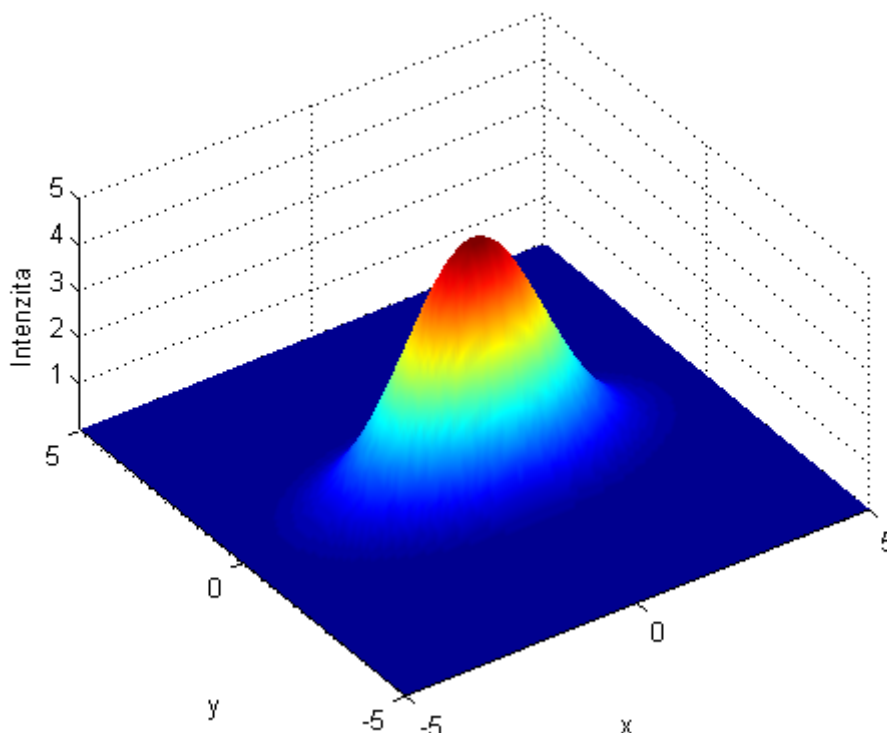
% parametry a, b, c pouzity v gaussove funkci
a = (cos(omega)/sigma_x)^2 + (sin(omega)/sigma_y)^2;
b = -sin(2*omega)/(sigma_x)^2 + sin(2*omega)/(sigma_y)^2 ;
c = (sin(omega)/sigma_x)^2 + (cos(omega)/sigma_y)^2;

% definuj meritko osy x a y ve 3D grafu (min, krok, max)
[X, Y] = meshgrid(-5:.1:5, -5:.1:5);

% definice gaussovy funkce pro 3D graf s moznosti zadani uhlu natoceni
Z = A*exp( - (a*(X-x0).^2 + b*(X-x0).*(Y-y0) + c*(Y-y0).^2)) ;
```

```
% zobrazení grafu
surf(X,Y,Z); shading interp; view(-35,35); axis equal; drawnow

% popisy os
xlabel('x');
ylabel('y');
zlabel('Intenzita');
```



Obr. 11. 3D graf Gaussovy funkce zobrazující plošné rozložení optické intenzity v průřezu svazku dle zadaných parametrů (pro relativní veličiny v grafu platí: maximální hodnota intenzity $A = 5$, úhel natočení stopy svazku $\omega = \pi/2$, směrodatná odchylka $\sigma_x = 1$, $\sigma_y = 2$, hodnoty na ose x a y , kde dosahuje funkce maxima, jsou $x_0 = 0$, $y_0 = 0$).

4.4 Počítačový model Gaussovského svazku se zobrazením grafu 3D s měnící se proměnnou úhlu natočení stopy svazku ω

Posledním modelem je Gaussovský svazek s měnící se proměnnou úhlu natočení stopy svazku ω . Z tohoto modelu je zřejmé otáčení Gaussovského svazku bez zadávání úhlu natočení ω . Jedná se o úpravu předchozího modelu, kde úhel ω je nahrazen cyklem, který způsobuje otáčení stopy svazku.

4.4.1 Výpis zdrojového kódu z programu Matlab pro 3D graf Gaussovy funkce s měnící se proměnnou úhlu natočení stopy svazku ω

```
clear all
close all

% definuj maximalni hodnotu intenzity
A = 5;
% definuj x0 a y0 (hodnotu na ose x a y, kde dosahuje funkce maxima)
x0 = 0; y0 = 0;
```

```

% cyklus, který způsobuje otáčení svazku
for omega = 0:pi/100:4*pi

% definuj sigma_x a sigma_y (směrodatné odchylky v ose x a y)
sigma_x = 1; sigma_y = 2;

% parametry a, b, c použity v gaussove funkci
a = (cos(omega)/sigma_x)^2 + (sin(omega)/sigma_y)^2;
b = -sin(2*omega)/(sigma_x)^2 + sin(2*omega)/(sigma_y)^2 ;
c = (sin(omega)/sigma_x)^2 + (cos(omega)/sigma_y)^2;

% definuj mřížku osy x a y ve 3D grafu (min, krok, max)
[X, Y] = meshgrid(-5:.1:5, -5:.1:5);

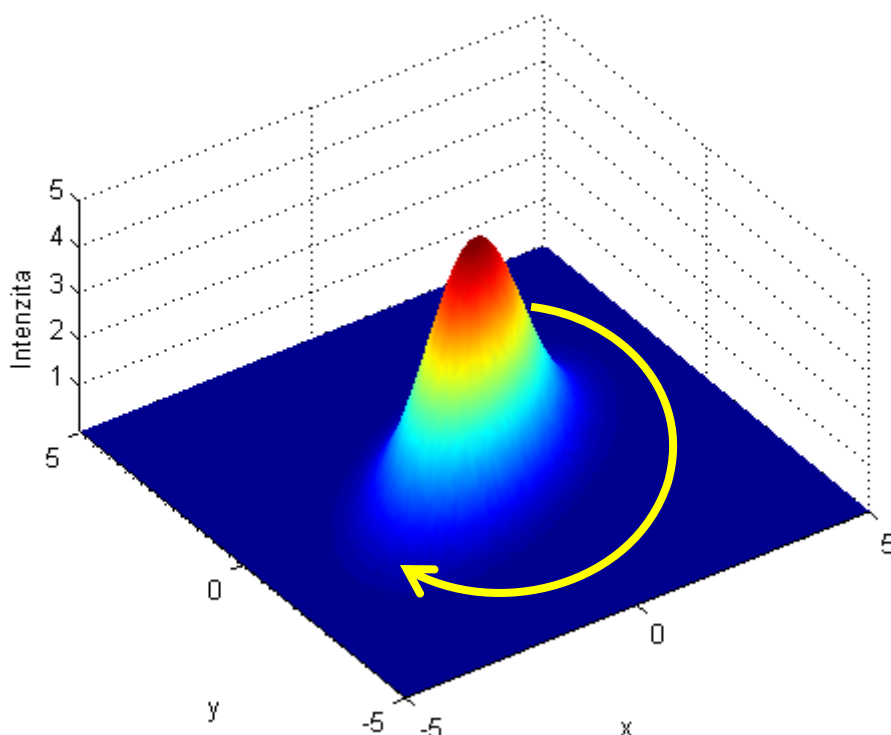
% definice gaussovy funkce pro 3D graf s možností zadání úhlu natočení
Z = A*exp( - (a*(X-x0).^2 + b*(X-x0).*(Y-y0) + c*(Y-y0).^2)) ;

% zobrazení grafu
surf(X,Y,Z);shading interp;view(-35,35);axis equal;drawnow

% ukončení cyklu
end

% popisy os
xlabel('x');
ylabel('y');
zlabel('Intenzita');

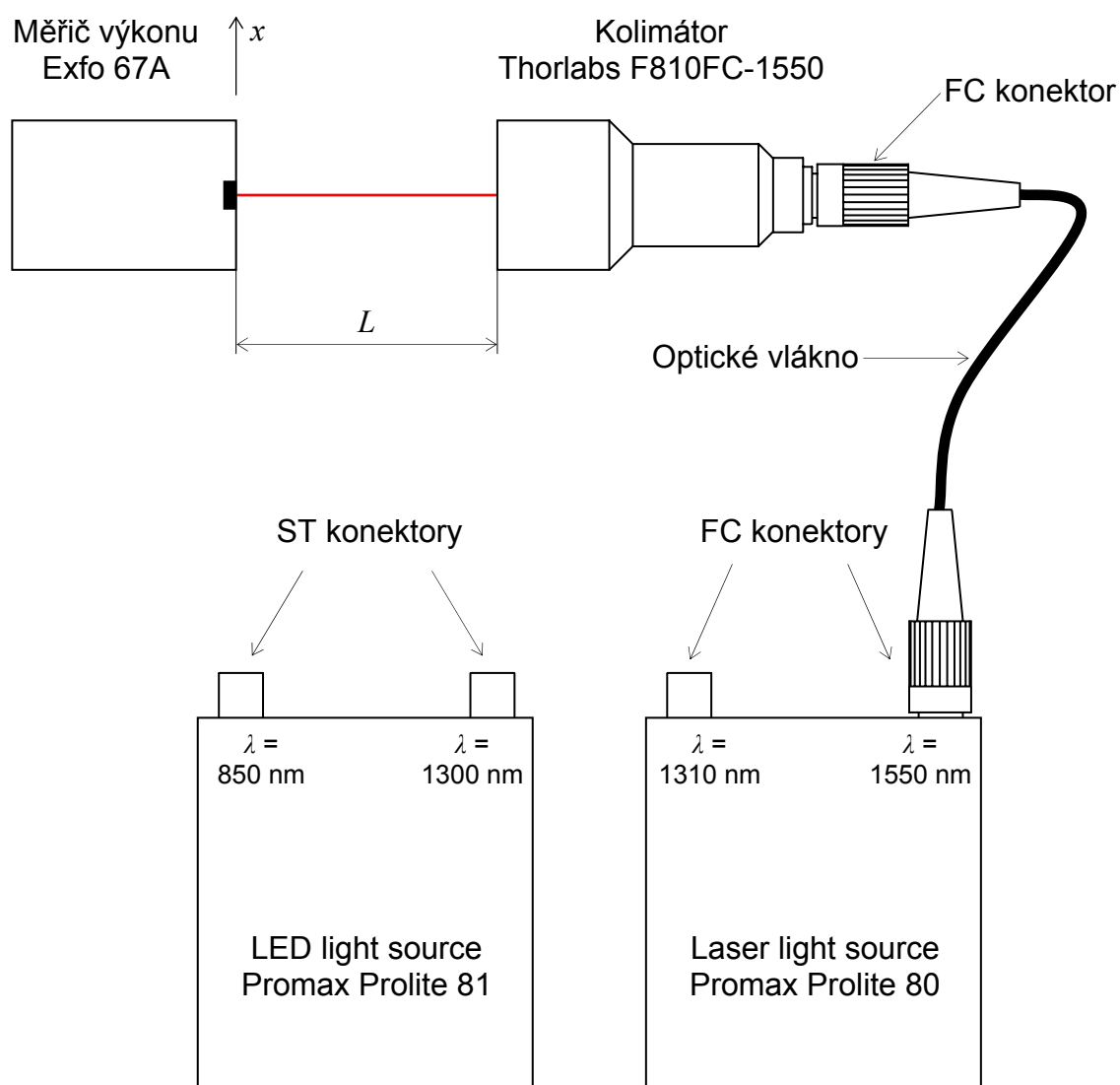
```



Obr. 12. 3D graf Gaussovy funkce s měnící se proměnnou úhlu natočení stopy svazku ω (pro relativní veličiny v grafu platí: maximální hodnota intenzity $A = 5$, směrodatná odchylka $\sigma_x = 1$, $\sigma_y = 2$, hodnoty na ose x a y , kde dosahuje funkce maxima, jsou $x_0 = 0$, $y_0 = 0$).

5 Měřicí řetězec pro experimentální stanovení základních charakteristik optických svazků

V experimentální části této práce byl sestaven měřicí řetězec a změřena byla optická intenzita vybraných optických vláken. V měřicím řetězci jsem použil laser Promax Prolite 80, optický zdroj LED Promax Prolite 81, dále měřič optického výkonu Exfo 67A, kolimátor Thorlabs F810FC-1550 a optická vlákna různých parametrů. Ze změřených hodnot pro jednotlivá optická vlákna byly sestrojil grafy zobrazující plošné rozložení optické intenzity a tyto grafy byly porovnány s teoretickým počítačovým modelem vytvořeným v předchozí části této práce.



Obr. 13. Schéma zapojení měřicího pracoviště.

Jak je znázorněno na obr. 13, v měřicím pracovišti je použit měřič výkonu Exfo 67A, který slouží jako detektor optického svazku. K vytvoření rovnoběžného optického svazku jsem použil kolimátor Thorlabs F810FC-1550. Parametry tohoto kolimátoru jsou zobrazeny na obr. 14. Pro posuv kolimátoru mi posloužil posuvný blok s mikrometrickým šroubem. Jako

zdroj záření jsem použil laser Promax Prolite 80 pro optická vlákna s konektory FC – FC a optický zdroj LED Promax Prolite 81 pro optická vlákna s konektory FC – ST. Měření jsem prováděl pro vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6 \text{ cm}$ a $L = 84 \text{ cm}$.

14012

Passive Components

Collimation Packages

FiberBench

Optical Switches

Rackbox Systems

Connectors/
Termination Tools

Single Mode Fiber

Rare Earth Doped

Polarization
Maintaining Fiber

Photonic
Crystal Fiber

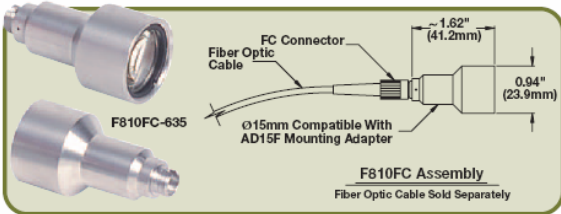
Multimode Fiber:
Graded Index

Multimode Fiber:
Step Index

Plastic Optical Fiber

Fiber Optics

FC and SMA Low Divergence, Large Beam Fixed Collimators



F810FC-635

~1.62" (41.2mm)

0.04" (23.9mm)

Fiber Optic Cable

FC Connector

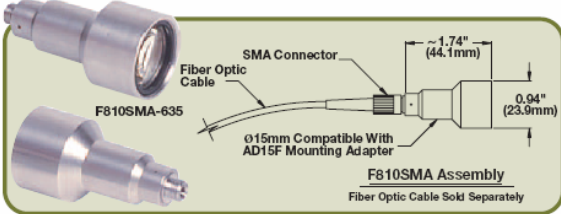
Ø15mm Compatible With AD15F Mounting Adapter

F810FC Assembly

Fiber Optic Cable Sold Separately

- Multi-Element Lens Design for Diffraction-Limited Performance
- Popular SMA and FC Connector Options
- Simplifies Fiber-Coupled Detection Systems

Our fiber collimation packages are designed to collimate a laser beam propagating out of the end of an optical fiber. Each fiber collimator package is factory aligned for a lens that is one focal length away from the output end of the fiber. These packages can also be used to couple a free-space laser beam into an optical fiber.



F810SMA-635

~1.74" (44.1mm)

0.04" (23.9mm)

Fiber Optic Cable

SMA Connector

Ø15mm Compatible With AD15F Mounting Adapter

F810SMA Assembly

Fiber Optic Cable Sold Separately

P/N SUFFIX	ALIGNMENT WAVELENGTH	ALIGNMENT FIBER
-543	543nm	460HP
-635	635nm	SM600
-780	780nm	780HP
-1064	1064nm	SM940
-1310	1310nm	SMF-28E
-1550	1550nm	SMF-28E

See Page 190 for AD15F Mounting Adapter

FC/PC Air-Spaced Doublet Collimators

ITEM#	\$	£	€	RMB	AR COATING	D*	θ ²	NA _{LES}	F (mm)
F810FC-543	\$ 201.90	£ 127.20	€ 187.80	¥ 1,928.10	420-650nm	6.8mm	0.006°	0.26	34.7
F810FC-635	\$ 201.90	£ 127.20	€ 187.80	¥ 1,928.10	420-650nm	6.6mm	0.007°	0.25	35.3
F810FC-780	\$ 201.90	£ 127.20	€ 187.80	¥ 1,928.10	650-1050nm	7.1mm	0.008°	0.25	35.9
F810FC-1064	\$ 201.90	£ 127.20	€ 187.80	¥ 1,928.10	1050-1620nm	8.5mm	0.009°	0.25	36.5
F810FC-1310	\$ 201.90	£ 127.20	€ 187.80	¥ 1,928.10	1050-1620nm	6.6mm	0.014°	0.24	36.8
F810FC-1550	\$ 201.90	£ 127.20	€ 187.80	¥ 1,928.10	1050-1620nm	7.0mm	0.016°	0.24	37.0

SMA Air-Spaced Doublet Collimators

ITEM#	\$	£	€	RMB	AR COATING	D*	θ ²	NA _{LES}	F (mm)
F810SMA-543	\$ 201.90	£ 127.20	€ 187.80	¥ 1,928.10	420-650nm	6.8mm	0.006°	0.26	34.7
F810SMA-635	\$ 201.90	£ 127.20	€ 187.80	¥ 1,928.10	420-650nm	6.6mm	0.007°	0.25	35.3
F810SMA-780	\$ 201.90	£ 127.20	€ 187.80	¥ 1,928.10	650-1050nm	7.1mm	0.008°	0.25	35.9
F810SMA-1064	\$ 201.90	£ 127.20	€ 187.80	¥ 1,928.10	1050-1620nm	8.5mm	0.009°	0.25	36.5
F810SMA-1310	\$ 201.90	£ 127.20	€ 187.80	¥ 1,928.10	1050-1620nm	6.6mm	0.014°	0.24	36.8

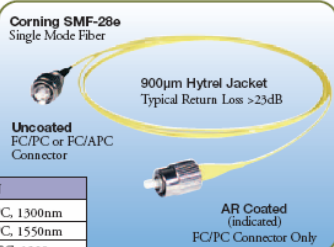
FC/APC Air-Spaced Doublet Collimators

ITEM#	\$	£	€	RMB	AR COATING	D*	θ ²	NA _{LES}	F (mm)
F810APC-780	\$ 232.80	£ 146.70	€ 216.50	¥ 2,223.20	650-1050nm	7.1mm	0.008°	0.25	35.9
F810APC-842	\$ 232.80	£ 146.70	€ 216.50	¥ 2,223.20	650-1050nm	7.0mm	0.008°	0.25	35.9
F810APC-1310	\$ 232.80	£ 146.70	€ 216.50	¥ 2,223.20	1050-1620nm	6.6mm	0.014°	0.24	36.8
F810APC-1550	\$ 232.80	£ 146.70	€ 216.50	¥ 2,223.20	1050-1620nm	7.0mm	0.016°	0.24	37.0

1) See data on AR Coatings at www.thorlabs.com
2) Measured 1/e² diameter at 1 focal length from lens; fibers: 460HP (A), SM600 (B), SMF-28e (C and -1550)
3) Calculated full angle of divergence; fibers: 460HP (A), SM600 (B), SMF-28e (C and -1550)

AR Coated (One End) Fiber Patch Cables

- Ideal for use With Our Collimation Packages to Minimize Fresnel Losses
- SMF-28e Fiber, 1m Length (Cutoff Wavelength <1260nm)
- AR Coated FC/PC Connector (One End):
R < 0.5%, 1300nm ± 100nm or 1550nm ± 100nm
- Uncoated FC/PC or FC/APC Input Connector



Corning SMF-28e Single Mode Fiber

900µm Hytrel Jacket
Typical Return Loss >23dB

Uncoated FC/PC or FC/APC Connector

AR Coated (indicated)
FC/PC Connector Only

ITEM#	\$	£	€	RMB	DESCRIPTION
P1-SMF28-FC-1-13	\$ 82.40	£ 51.90	€ 76.60	¥ 786.90	FC/PC AR Coated to FC/PC, 1300nm
P1-SMF28-FC-1-15	\$ 82.40	£ 51.90	€ 76.60	¥ 786.90	FC/PC AR Coated to FC/PC, 1550nm
P5-SMF28-FC-1-13	\$ 94.40	£ 59.50	€ 87.80	¥ 901.50	FC/PC AR Coated to FC/APC, 1300nm
P5-SMF28-FC-1-15	\$ 94.40	£ 59.50	€ 87.80	¥ 901.50	FC/PC AR Coated to FC/APC, 1550nm

Obr. 14. Parametry kolimátoru Thorlabs F810FC-1550. [5]

17

5.1 Postup měření optické intenzity

Po sestavení měřicího pracoviště dle obr. 13 jsem nejdříve zvolil vzdálenost mezi měřičem výkonu a kolimátorem $L = 6$ cm. Jako první jsem připojil optické vlákno SM 9/125 s konektory FC – FC a laser Promax Prolite 80 nastavil na vlnovou délku $\lambda = 1310$ nm. Potom jsem nastavil mikrometrický šroub posuvného bloku s kolimátorem do krajní polohy (vzdálenost $x = 0$ mm) a odečetl odpovídající hodnotu výkonu P [dBm] pomocí měřiče výkonu Exfo 67A. Dále jsem posouval mikrometrický šroub posuvného bloku s kolimátorem po vzdálenosti $x = 0,5$ mm a odečítal odpovídající hodnoty výkonu P [dBm] pomocí měřiče výkonu Exfo 67A. Následně jsem změnil vzdálenost mezi měřičem výkonu a kolimátorem L na 84 cm a provedl stejné měření. Toto měření jsem provedl také pro vlnovou délku $\lambda = 1550$ nm. Stejným způsobem měření jsem postupoval u optických vláken GI 50/125 s konektory FC – FC a GI 62,5/125 s konektory FC – FC. Nakonec jsem použil optické vlákno 62,5/125 s konektory FC – ST s optickým zdrojem LED Promax Prolite 81. Zde jsem prováděl měření stejným způsobem pro vlnové délky $\lambda = 850$ nm a $\lambda = 1300$ nm. Naměřené hodnoty výkonu P [dBm] jsem následně přepsal do programu Excel, který jsem využil pro převod na hodnoty výkonu P [mW] pomocí vztahu

$$P \text{ [dBm]} = 10 \cdot \log P \text{ [mW]} \quad (29)$$

odkud

$$P \text{ [mW]} = 10^{0,1 \cdot P \text{ [dBm]}} \quad (30)$$

Potom jsem hodnoty vzdálenosti x [mm] a výkonu P [mW] načetl z Excelu do vytvořeného programu v Matlabu, který je uveden v příloze této práce. Program vykreslil graf zobrazující rozložení optické intenzity z naměřených hodnot společně s grafem teoretické Gaussovy funkce a provedl jejich optimální překrytí.

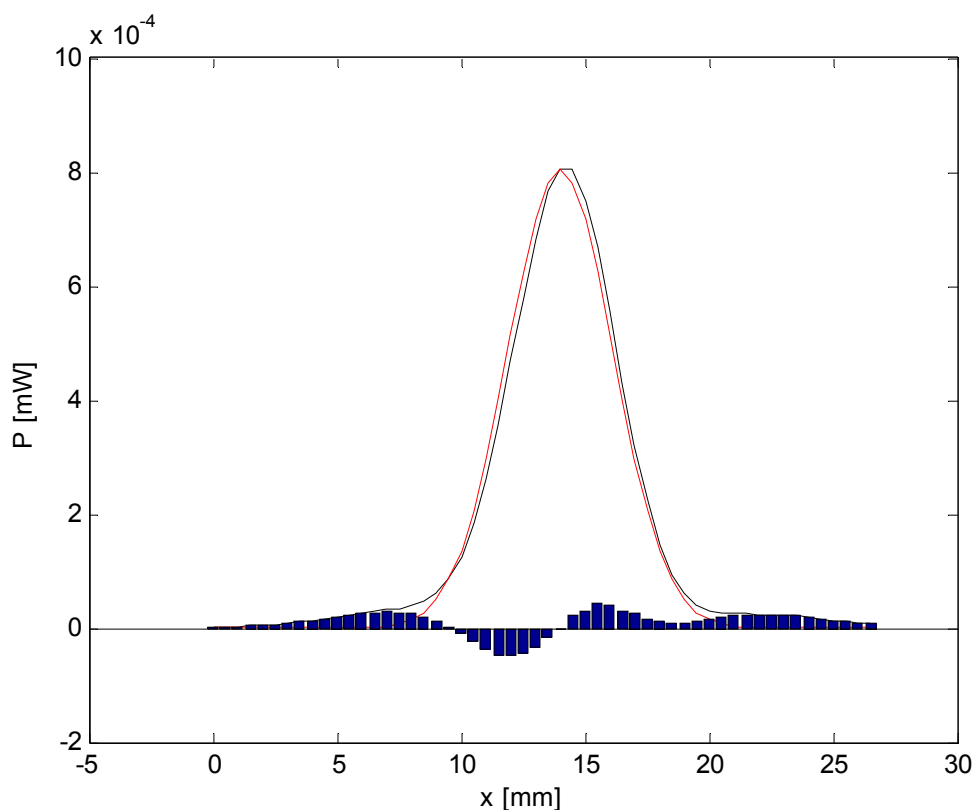
5.2 Měření jednomodového optického vlákna SM 9/125 s konektory FC – FC pomocí laseru Promax Prolite 80

Měření jednomodového optického vlákna SM 9/125 s konektory FC – FC jsem prováděl pomocí laseru Promax Prolite 80 pro vlnové délky $\lambda = 1310$ nm, dále $\lambda = 1550$ nm ve vzdálenostech měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm a $L = 84$ cm.

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
0,0	-58,50	1,413E-06
0,5	-56,50	2,239E-06
1,0	-55,50	2,818E-06
1,5	-54,00	3,981E-06
2,0	-52,80	5,248E-06
2,5	-51,70	6,761E-06
3,0	-50,65	8,610E-06
3,5	-49,60	1,096E-05
4,0	-48,60	1,380E-05
4,5	-47,70	1,698E-05
5,0	-46,95	2,018E-05
5,5	-46,25	2,371E-05
6,0	-45,75	2,661E-05
6,5	-45,30	2,951E-05
7,0	-44,90	3,236E-05
7,5	-44,55	3,508E-05
8,0	-44,05	3,936E-05
8,5	-43,30	4,677E-05
9,0	-42,10	6,166E-05
9,5	-40,60	8,710E-05
10,0	-39,00	1,259E-04
10,5	-37,35	1,841E-04
11,0	-35,85	2,600E-04
11,5	-34,50	3,548E-04
12,0	-33,30	4,677E-04
12,5	-32,35	5,821E-04
13,0	-31,65	6,839E-04

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
13,5	-31,15	7,674E-04
14,0	-30,95	8,035E-04
14,5	-30,95	8,035E-04
15,0	-31,25	7,499E-04
15,5	-31,75	6,683E-04
16,0	-32,55	5,559E-04
16,5	-33,65	4,315E-04
17,0	-34,95	3,199E-04
17,5	-36,55	2,213E-04
18,0	-38,35	1,462E-04
18,5	-40,30	9,333E-05
19,0	-42,20	6,026E-05
19,5	-43,95	4,027E-05
20,0	-45,15	3,055E-05
20,5	-45,80	2,630E-05
21,0	-45,90	2,570E-05
21,5	-46,00	2,512E-05
22,0	-46,10	2,455E-05
22,5	-46,30	2,344E-05
23,0	-46,50	2,239E-05
23,5	-46,75	2,113E-05
24,0	-47,15	1,928E-05
24,5	-47,80	1,660E-05
25,0	-48,70	1,349E-05
25,5	-49,70	1,072E-05
26,0	-49,80	1,047E-05
26,5	-49,85	1,035E-05

Tab. 1. Naměřené hodnoty výkonu pro jednomodové optické vlákno SM 9/125 pro $\lambda = 1310$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm.



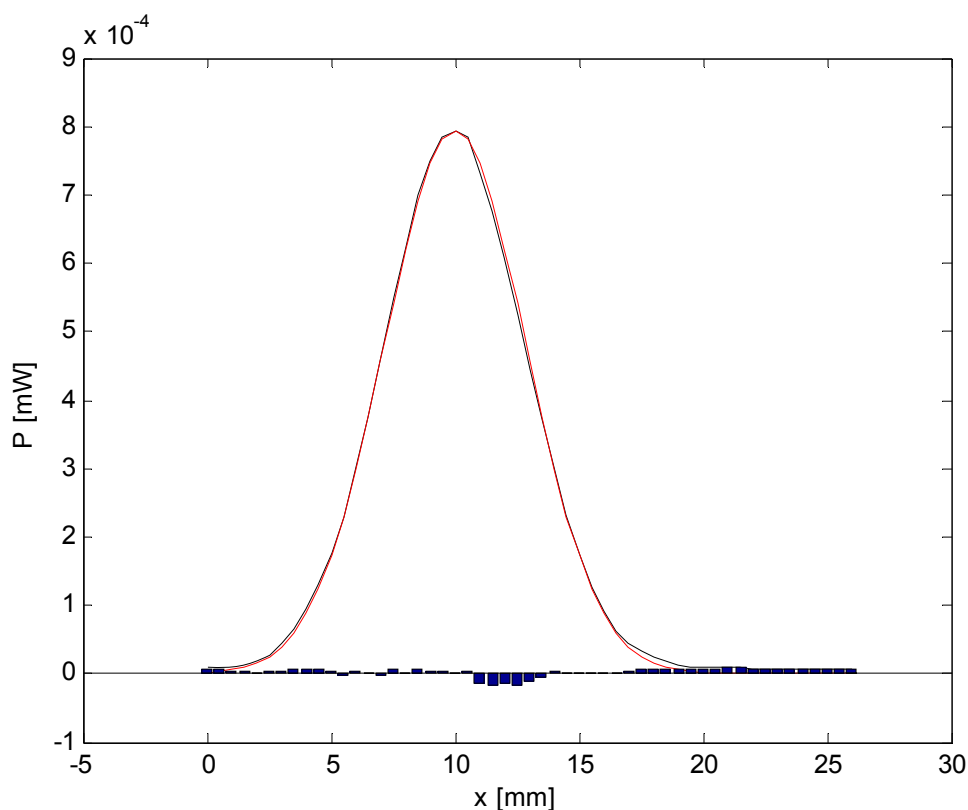
Obr. 15. Graf zobrazující rozložení optické intenzity na ose x (viz obr. 13) pro jednomodové optické vlákno SM 9/125, pro $\lambda = 1310$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm v porovnání s teoretickým grafem Gaussovy funkce (červená křivka – teoretický graf, černá křivka – naměřené hodnoty, modré sloupce – graf odchylek).

Jak je znázorněno na obr. 15, graf z naměřených hodnot zobrazený černou křivkou se velmi blíží grafu teoretické Gaussovy funkce zobrazenému červenou křivkou. Odchylky jsou zde znázorněny pomocí sloupcového grafu odchylek, který je zobrazen modrou barvou. Maximální intenzita zde byla změřena ve vzdálenosti $x = 14$ mm a dosáhla hodnoty výkonu $P = 8,035 \cdot 10^{-4}$ mW. Počátek osy x byl zvolen v souladu s krajní polohou mikrometrického posuvu. Optimální překrytí grafu z naměřených hodnot s grafem teoretické Gaussovy funkce řeší samotný program uvedený v příloze.

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
0,0	-50,50	8,913E-06
0,5	-50,25	9,441E-06
1,0	-50,00	1,000E-05
1,5	-48,90	1,288E-05
2,0	-47,50	1,778E-05
2,5	-45,55	2,786E-05
3,0	-43,60	4,365E-05
3,5	-41,80	6,607E-05
4,0	-40,25	9,441E-05
4,5	-38,85	1,303E-04
5,0	-37,55	1,758E-04
5,5	-36,40	2,291E-04
6,0	-35,20	3,020E-04
6,5	-34,25	3,758E-04
7,0	-33,40	4,571E-04
7,5	-32,60	5,495E-04
8,0	-32,05	6,237E-04
8,5	-31,55	6,998E-04
9,0	-31,25	7,499E-04
9,5	-31,05	7,852E-04
10,0	-31,00	7,943E-04
10,5	-31,05	7,852E-04
11,0	-31,35	7,328E-04
11,5	-31,70	6,761E-04
12,0	-32,15	6,095E-04
12,5	-32,80	5,248E-04
13,0	-33,50	4,467E-04

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
13,5	-34,30	3,715E-04
14,0	-35,20	3,020E-04
14,5	-36,35	2,317E-04
15,0	-37,60	1,738E-04
15,5	-39,00	1,259E-04
16,0	-40,45	9,016E-05
16,5	-42,10	6,166E-05
17,0	-43,55	4,416E-05
17,5	-44,85	3,273E-05
18,0	-46,30	2,344E-05
18,5	-47,55	1,758E-05
19,0	-49,05	1,245E-05
19,5	-49,95	1,012E-05
20,0	-50,35	9,226E-06
20,5	-50,40	9,120E-06
21,0	-50,40	9,120E-06
21,5	-50,70	8,511E-06
22,0	-51,20	7,586E-06
22,5	-51,80	6,607E-06
23,0	-52,00	6,310E-06
23,5	-52,30	5,888E-06
24,0	-52,20	6,026E-06
24,5	-52,40	5,754E-06
25,0	-52,10	6,166E-06
25,5	-52,50	5,623E-06
26,0	-52,70	5,370E-06

Tab. 2. Naměřené hodnoty výkonu pro jednomodové optické vlákno SM 9/125 pro $\lambda = 1310$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 84$ cm.



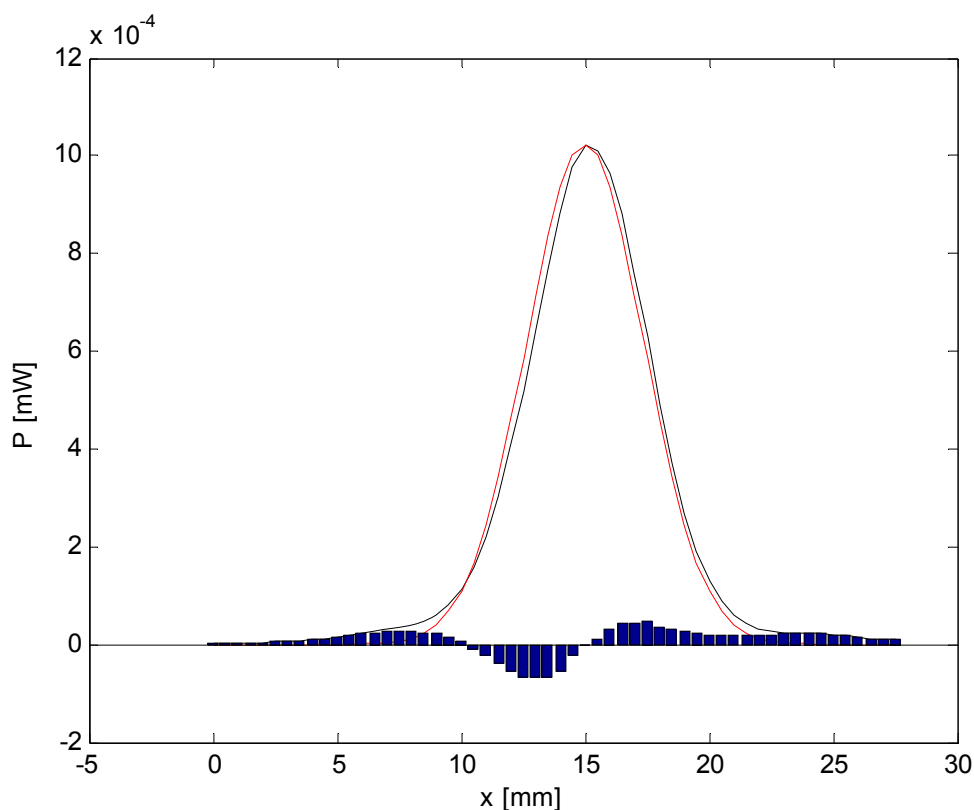
Obr. 16. Graf zobrazující rozložení optické intenzity na ose x (viz obr. 13) pro jednomodové optické vlákno SM 9/125, pro $\lambda = 1310$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 84$ cm v porovnání s teoretickým grafem Gaussovy funkce (červená křivka – teoretický graf, černá křivka – naměřené hodnoty, modré sloupce – graf odchylek).

Na obr. 16 je zřejmé, že graf závislosti výkonu na souřadnici x získaný z naměřených hodnot (viz. černá křivka) je téměř shodný s grafem teoretické Gaussovy funkce (viz. červená křivka). Odchytky jsou zde jen velmi malé a v porovnání s grafem na obr. 15 je zřejmé, že se zvýšením vzdálenosti měřiče výkonu od kolimátoru L došlo k většímu sblížení zmíněných grafů. Maximální intenzita zde byla změřena ve vzdálenosti $x = 10$ mm a dosáhla hodnoty výkonu $P = 7,943 \cdot 10^{-4}$ mW. Počátek osy x byl zvolen v souladu s krajní polohou mikrometrického posuvu. Optimální překrytí grafu z naměřených hodnot s grafem teoretické Gaussovy funkce řeší samotný program uvedený v příloze.

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
0,0	-59,50	1,122E-06
0,5	-58,00	1,585E-06
1,0	-56,50	2,239E-06
1,5	-55,30	2,951E-06
2,0	-54,10	3,890E-06
2,5	-53,20	4,786E-06
3,0	-52,10	6,166E-06
3,5	-51,10	7,762E-06
4,0	-49,95	1,012E-05
4,5	-49,00	1,259E-05
5,0	-48,10	1,549E-05
5,5	-47,25	1,884E-05
6,0	-46,55	2,213E-05
6,5	-45,85	2,600E-05
7,0	-45,30	2,951E-05
7,5	-44,70	3,388E-05
8,0	-43,95	4,027E-05
8,5	-43,20	4,786E-05
9,0	-42,10	6,166E-05
9,5	-40,90	8,128E-05
10,0	-39,45	1,135E-04
10,5	-38,00	1,585E-04
11,0	-36,55	2,213E-04
11,5	-35,20	3,020E-04
12,0	-33,95	4,027E-04
12,5	-32,85	5,188E-04
13,0	-31,90	6,457E-04
13,5	-31,15	7,674E-04

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
14,0	-30,55	8,810E-04
14,5	-30,10	9,772E-04
15,0	-29,90	1,023E-03
15,5	-29,95	1,012E-03
16,0	-30,15	9,661E-04
16,5	-30,55	8,810E-04
17,0	-31,20	7,586E-04
17,5	-32,00	6,310E-04
18,0	-33,10	4,898E-04
18,5	-34,30	3,715E-04
19,0	-35,70	2,692E-04
19,5	-37,20	1,905E-04
20,0	-38,90	1,288E-04
20,5	-40,60	8,710E-05
21,0	-42,30	5,888E-05
21,5	-43,75	4,217E-05
22,0	-44,95	3,199E-05
22,5	-45,65	2,723E-05
23,0	-46,05	2,483E-05
23,5	-46,10	2,455E-05
24,0	-46,35	2,317E-05
24,5	-46,50	2,239E-05
25,0	-46,90	2,042E-05
25,5	-47,50	1,778E-05
26,0	-48,55	1,396E-05
26,5	-49,60	1,096E-05
27,0	-49,70	1,072E-05
27,5	-49,80	1,047E-05

Tab. 3. Naměřené hodnoty výkonu pro jednomodové optické vlákno SM 9/125 pro $\lambda = 1550$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm.



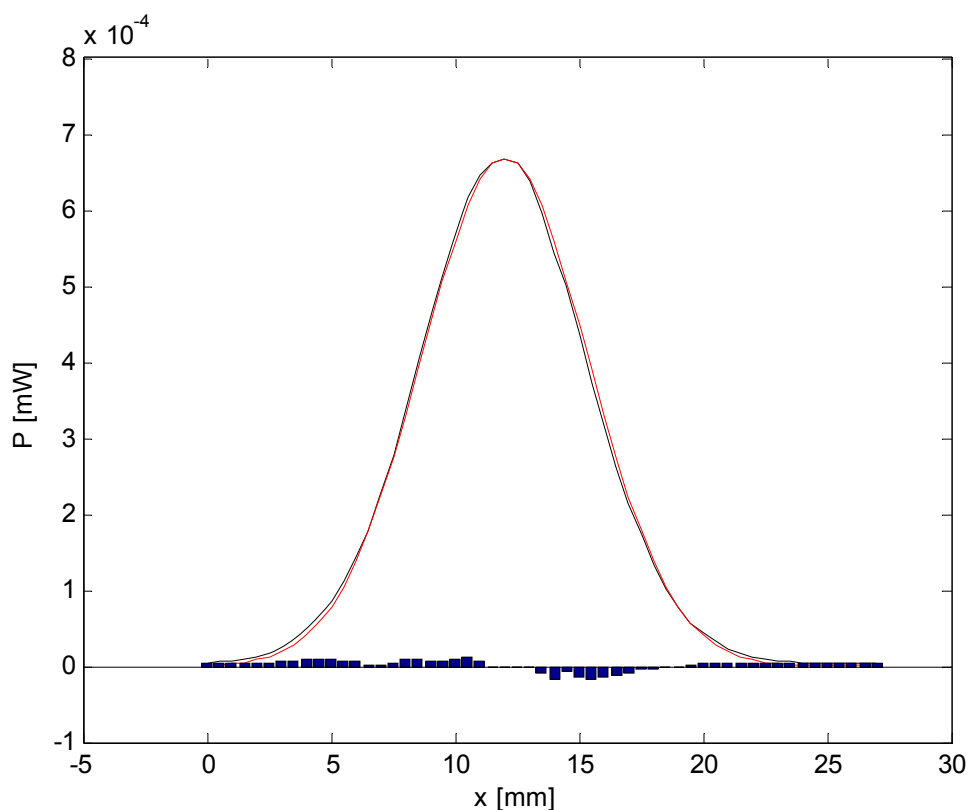
Obr. 17. Graf zobrazující rozložení optické intenzity na ose x (viz obr. 13) pro jednomodové optické vlákno SM 9/125, pro $\lambda = 1550$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm v porovnání s teoretickým grafem Gaussovy funkce (červená křivka – teoretický graf, černá křivka – naměřené hodnoty, modré sloupce – graf odchylek).

Jak je znázorněno na obr. 17, změřený graf optické intenzity pro vlnovou délku $\lambda = 1550$ nm je velmi podobný grafu na obr. 15, kde byla vlnová délka $\lambda = 1310$ nm a stejná vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm. Z toho lze usoudit, že změna vlnové délky λ nemá výraznější vliv na přesnost grafu. Došlo zde pouze ke zvýšení maximální hodnoty výkonu na $P = 1,023 \cdot 10^{-3}$ mW ve vzdálenosti $x = 15$ mm. Počátek osy x byl zvolen v souladu s krajní polohou mikrometrického posuvu. Optimální překrytí grafu z naměřených hodnot s grafem teoretické Gaussovy funkce řeší samotný program uvedený v příloze.

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
0,0	-53,00	5,012E-06
0,5	-52,25	5,957E-06
1,0	-51,30	7,413E-06
1,5	-50,25	9,441E-06
2,0	-49,00	1,259E-05
2,5	-47,50	1,778E-05
3,0	-45,90	2,570E-05
3,5	-44,55	3,508E-05
4,0	-43,15	4,842E-05
4,5	-41,90	6,457E-05
5,0	-40,65	8,610E-05
5,5	-39,55	1,109E-04
6,0	-38,40	1,445E-04
6,5	-37,50	1,778E-04
7,0	-36,50	2,239E-04
7,5	-35,55	2,786E-04
8,0	-34,70	3,388E-04
8,5	-34,00	3,981E-04
9,0	-33,40	4,571E-04
9,5	-32,90	5,129E-04
10,0	-32,45	5,689E-04
10,5	-32,10	6,166E-04
11,0	-31,90	6,457E-04
11,5	-31,80	6,607E-04
12,0	-31,75	6,683E-04
12,5	-31,80	6,607E-04
13,0	-31,95	6,383E-04
13,5	-32,25	5,957E-04

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
14,0	-32,65	5,433E-04
14,5	-33,00	5,012E-04
15,0	-33,60	4,365E-04
15,5	-34,30	3,715E-04
16,0	-35,00	3,162E-04
16,5	-35,80	2,630E-04
17,0	-36,70	2,138E-04
17,5	-37,65	1,718E-04
18,0	-38,75	1,334E-04
18,5	-39,90	1,023E-04
19,0	-41,15	7,674E-05
19,5	-42,40	5,754E-05
20,0	-43,65	4,315E-05
20,5	-44,95	3,199E-05
21,0	-46,30	2,344E-05
21,5	-47,60	1,738E-05
22,0	-48,95	1,274E-05
22,5	-50,30	9,333E-06
23,0	-51,40	7,244E-06
23,5	-52,35	5,821E-06
24,0	-53,50	4,467E-06
24,5	-54,00	3,981E-06
25,0	-54,10	3,890E-06
25,5	-53,90	4,074E-06
26,0	-54,10	3,890E-06
26,5	-55,00	3,162E-06
27,0	-55,00	3,162E-06

Tab. 4. Naměřené hodnoty výkonu pro jednomodové optické vlákno SM 9/125 pro $\lambda = 1550$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 84$ cm.



Obr. 18. Graf zobrazující rozložení optické intenzity na ose x (viz obr. 13) pro jednomodové optické vlákno SM 9/125, pro $\lambda = 1550$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 84$ cm v porovnání s teoretickým grafem Gaussovy funkce (červená křivka – teoretický graf, černá křivka – naměřené hodnoty, modré sloupce – graf odchylek).

Na obr. 18 je zřejmé, že graf závislosti výkonu na souřadnici x získaný z naměřených hodnot (viz. černá křivka) je téměř shodný s grafem teoretické Gaussovy funkce (viz. červená křivka). Podobného výsledku bylo dosaženo u grafu na obr. 16, který byl měřen pro vlnovou délku $\lambda = 1310$ nm a se stejnou vzdáleností měřiče výkonu od kolimátoru $L = 84$ cm. Odchylky jsou zde jen velmi malé, Maximální intenzita zde byla změřena ve vzdálenosti $x = 12$ mm a dosáhla hodnoty výkonu $P = 6,683 \cdot 10^{-4}$ mW. Počátek osy x byl zvolen v souladu s krajní polohou mikrometrického posuvu. Optimální překrytí grafu z naměřených hodnot s grafem teoretické Gaussovy funkce řeší samotný program uvedený v příloze.

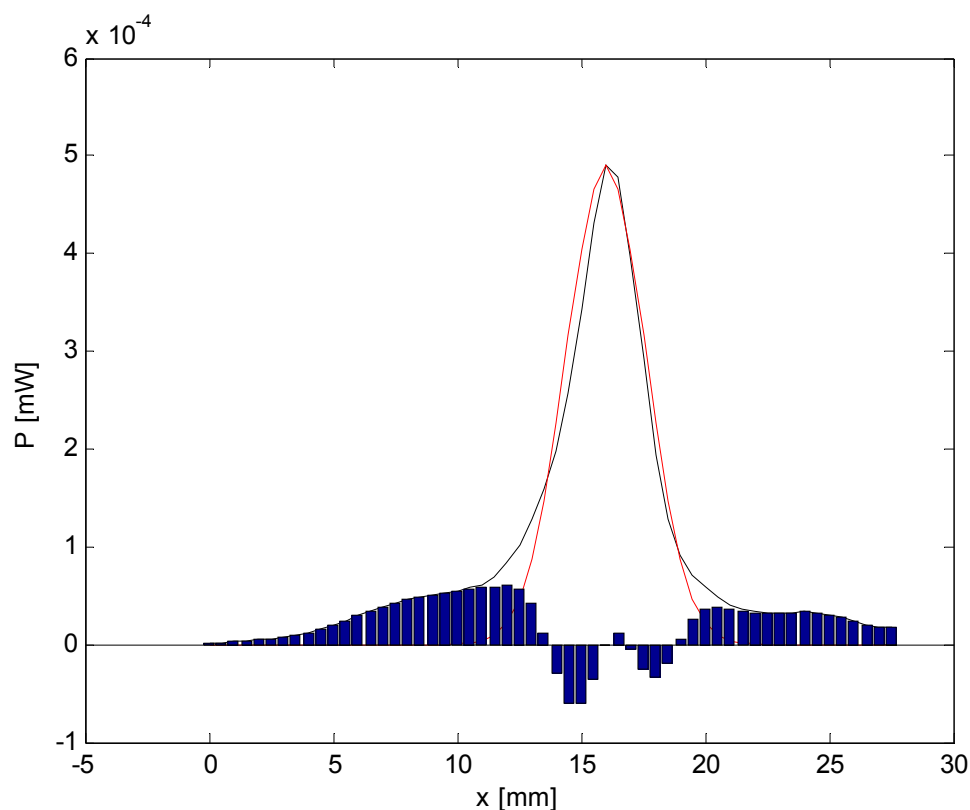
5.3 Měření mnohomodového optického vlákna GI 50/125 s konektory FC – FC pomocí laseru Promax Prolite 80

Měření mnohomodového optického vlákna GI 50/125 s konektory FC – FC jsem prováděl pomocí laseru Promax Prolite 80 pro vlnové délky $\lambda = 1310$ nm, dále $\lambda = 1550$ nm ve vzdálenostech měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm a $L = 84$ cm.

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
0,0	-57,50	1,778E-06
0,5	-56,50	2,239E-06
1,0	-55,00	3,162E-06
1,5	-54,10	3,890E-06
2,0	-53,10	4,898E-06
2,5	-52,30	5,888E-06
3,0	-51,25	7,499E-06
3,5	-50,20	9,550E-06
4,0	-49,10	1,230E-05
4,5	-48,00	1,585E-05
5,0	-47,00	1,995E-05
5,5	-46,05	2,483E-05
6,0	-45,30	2,951E-05
6,5	-44,60	3,467E-05
7,0	-44,10	3,890E-05
7,5	-43,75	4,217E-05
8,0	-43,40	4,571E-05
8,5	-43,20	4,786E-05
9,0	-42,95	5,070E-05
9,5	-42,75	5,309E-05
10,0	-42,60	5,495E-05
10,5	-42,35	5,821E-05
11,0	-42,10	6,166E-05
11,5	-41,60	6,918E-05
12,0	-40,85	8,222E-05
12,5	-39,90	1,023E-04
13,0	-38,90	1,288E-04
13,5	-38,00	1,585E-04

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
14,0	-37,05	1,972E-04
14,5	-35,90	2,570E-04
15,0	-34,65	3,428E-04
15,5	-33,65	4,315E-04
16,0	-33,10	4,898E-04
16,5	-33,20	4,786E-04
17,0	-34,00	3,981E-04
17,5	-35,35	2,917E-04
18,0	-37,15	1,928E-04
18,5	-38,95	1,274E-04
19,0	-40,35	9,226E-05
19,5	-41,45	7,161E-05
20,0	-42,35	5,821E-05
20,5	-43,20	4,786E-05
21,0	-43,90	4,074E-05
21,5	-44,40	3,631E-05
22,0	-44,75	3,350E-05
22,5	-44,85	3,273E-05
23,0	-44,90	3,236E-05
23,5	-44,85	3,273E-05
24,0	-44,80	3,311E-05
24,5	-44,85	3,273E-05
25,0	-45,15	3,055E-05
25,5	-45,60	2,754E-05
26,0	-46,35	2,317E-05
26,5	-47,25	1,884E-05
27,0	-47,35	1,841E-05
27,5	-47,35	1,841E-05

Tab. 5. Naměřené hodnoty výkonu pro mnohomodové optické vlákno GI 50/125 pro $\lambda = 1310$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm.



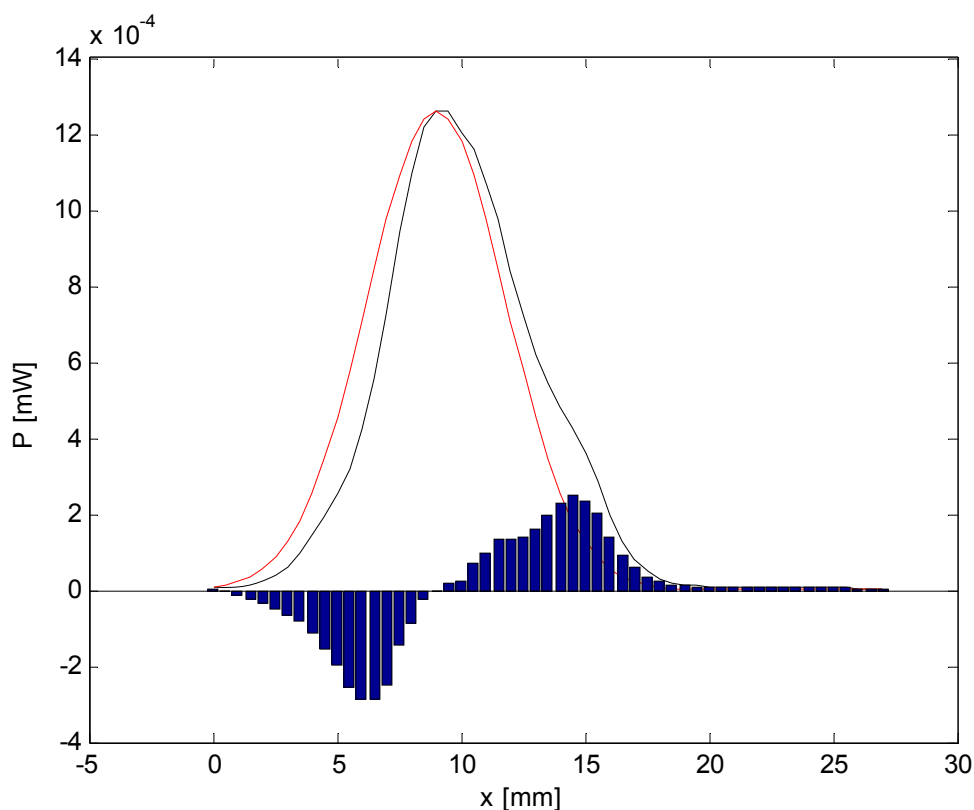
Obr. 19. Graf zobrazující rozložení optické intenzity na ose x (viz obr. 13) pro mnohomodové optické vlákno GI 50/125, pro $\lambda = 1310$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm v porovnání s teoretickým grafem Gaussovy funkce (červená křivka – teoretický graf, černá křivka – naměřené hodnoty, modré sloupce – graf odchylek).

Jak je znázorněno na obr. 19, graf z naměřených hodnot zobrazený černou křivkou se dost liší od grafu teoretické Gaussovy funkce, který je zobrazen červenou křivkou. Odchylky jsou zde velké zejména v počátku a ke konci grafu. V porovnání s grafy optického vlákna SM 9/125 jsou zde mnohem vyšší odchylky grafu naměřených hodnot od grafu teoretické Gaussovy funkce. To je způsobeno tím, že optické vlákno GI 50/125 je mnohomodové. Maximální intenzita zde byla změřena ve vzdálenosti $x = 16$ mm a dosáhla hodnoty výkonu $P = 4,898 \cdot 10^{-4}$ mW. Počátek osy x byl zvolen v souladu s krajní polohou mikrometrického posuvu. Optimální překrytí grafu z naměřených hodnot s grafem teoretické Gaussovy funkce řeší samotný program uvedený v příloze.

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
0,0	-51,00	7,943E-06
0,5	-50,80	8,318E-06
1,0	-50,10	9,772E-06
1,5	-48,65	1,365E-05
2,0	-46,50	2,239E-05
2,5	-44,25	3,758E-05
3,0	-42,10	6,166E-05
3,5	-40,05	9,886E-05
4,0	-38,45	1,429E-04
4,5	-37,15	1,928E-04
5,0	-35,95	2,541E-04
5,5	-34,95	3,199E-04
6,0	-33,75	4,217E-04
6,5	-32,55	5,559E-04
7,0	-31,40	7,244E-04
7,5	-30,25	9,441E-04
8,0	-29,60	1,096E-03
8,5	-29,15	1,216E-03
9,0	-29,00	1,259E-03
9,5	-29,00	1,259E-03
10,0	-29,20	1,202E-03
10,5	-29,35	1,161E-03
11,0	-29,70	1,072E-03
11,5	-30,10	9,772E-04
12,0	-30,75	8,414E-04
12,5	-31,45	7,161E-04
13,0	-32,10	6,166E-04
13,5	-32,65	5,433E-04

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
14,0	-33,15	4,842E-04
14,5	-33,65	4,315E-04
15,0	-34,40	3,631E-04
15,5	-35,45	2,851E-04
16,0	-37,05	1,972E-04
16,5	-38,90	1,288E-04
17,0	-40,90	8,128E-05
17,5	-43,10	4,898E-05
18,0	-45,35	2,917E-05
18,5	-47,15	1,928E-05
19,0	-48,50	1,413E-05
19,5	-49,35	1,161E-05
20,0	-50,05	9,886E-06
20,5	-50,35	9,226E-06
21,0	-50,65	8,610E-06
21,5	-50,95	8,035E-06
22,0	-51,20	7,586E-06
22,5	-51,65	6,839E-06
23,0	-52,20	6,026E-06
23,5	-52,40	5,754E-06
24,0	-52,10	6,166E-06
24,5	-52,40	5,754E-06
25,0	-52,10	6,166E-06
25,5	-52,70	5,370E-06
26,0	-53,40	4,571E-06
26,5	-53,60	4,365E-06
27,0	-53,70	4,266E-06

Tab. 6. Naměřené hodnoty výkonu pro mnohomodové optické vlákno GI 50/125 pro $\lambda = 1310$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 84$ cm.



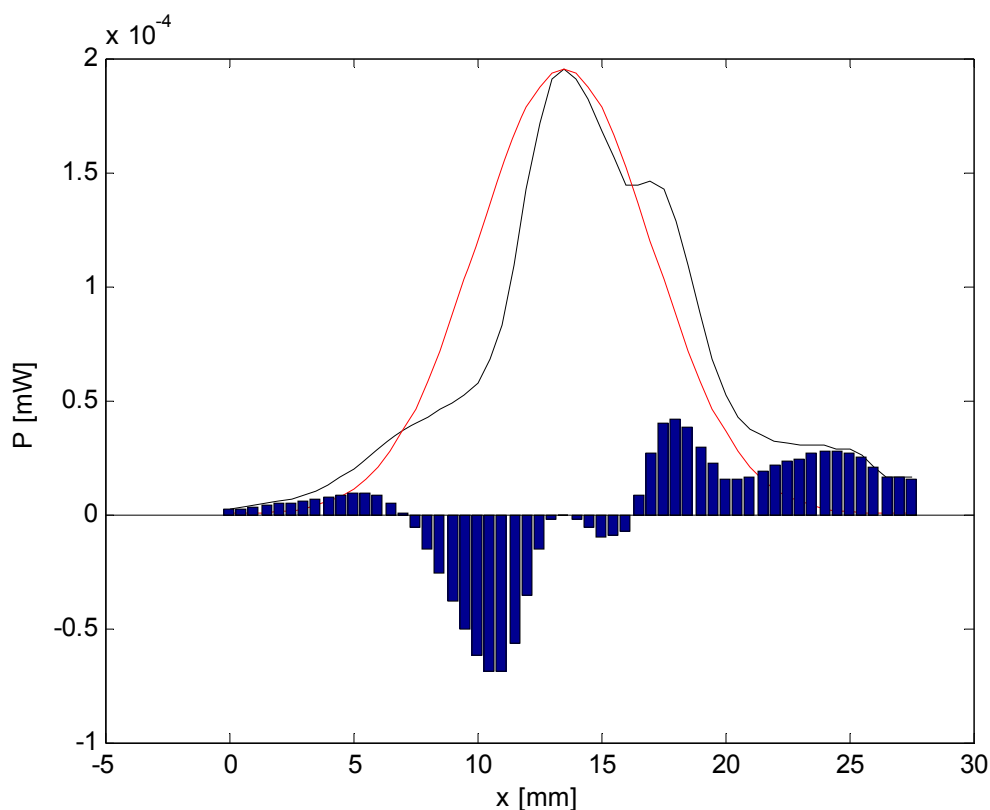
Obr. 20. Graf zobrazující rozložení optické intenzity na ose x (viz obr. 13) pro mnohomodové optické vlákno GI 50/125, pro $\lambda = 1310$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 84$ cm v porovnání s teoretickým grafem Gaussovy funkce (červená křivka – teoretický graf, černá křivka – naměřené hodnoty, modré sloupce – graf odchylek).

Na obr. 20 je zřejmé, že změřený graf optické intenzity pro vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 84$ cm je opět dost nepřesný oproti teoretickému grafu Gaussovy funkce, podobně jak tomu bylo v grafu na obr. 19 pro vzdálenost $L = 6$ cm. Odchyly jsou zde velké v průběhu celého grafu. Maximální intenzita zde byla změřena ve vzdálenosti $x = 9$ mm a dosáhla hodnoty výkonu $P = 1,259 \cdot 10^{-3}$ mW, což je mnohem více oproti vzdálenosti $L = 6$ cm, jak tomu bylo v grafu na obr. 19. Počátek osy x byl zvolen v souladu s krajní polohou mikrometrického posuvu. Optimální překrytí grafu z naměřených hodnot s grafem teoretické Gaussovy funkce řeší samotný program uvedený v příloze.

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
0,0	-56,00	2,512E-06
0,5	-55,50	2,818E-06
1,0	-54,40	3,631E-06
1,5	-53,40	4,571E-06
2,0	-52,60	5,495E-06
2,5	-51,80	6,607E-06
3,0	-50,90	8,128E-06
3,5	-49,90	1,023E-05
4,0	-48,85	1,303E-05
4,5	-47,90	1,622E-05
5,0	-47,00	1,995E-05
5,5	-46,15	2,427E-05
6,0	-45,40	2,884E-05
6,5	-44,85	3,273E-05
7,0	-44,40	3,631E-05
7,5	-43,95	4,027E-05
8,0	-43,70	4,266E-05
8,5	-43,35	4,624E-05
9,0	-43,10	4,898E-05
9,5	-42,80	5,248E-05
10,0	-42,40	5,754E-05
10,5	-41,70	6,761E-05
11,0	-40,80	8,318E-05
11,5	-39,60	1,096E-04
12,0	-38,45	1,429E-04
12,5	-37,65	1,718E-04
13,0	-37,20	1,905E-04
13,5	-37,10	1,950E-04

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
14,0	-37,20	1,905E-04
14,5	-37,40	1,820E-04
15,0	-37,75	1,679E-04
15,5	-38,05	1,567E-04
16,0	-38,40	1,445E-04
16,5	-38,40	1,445E-04
17,0	-38,35	1,462E-04
17,5	-38,45	1,429E-04
18,0	-38,90	1,288E-04
18,5	-39,60	1,096E-04
19,0	-40,55	8,810E-05
19,5	-41,65	6,839E-05
20,0	-42,85	5,188E-05
20,5	-43,70	4,266E-05
21,0	-44,30	3,715E-05
21,5	-44,65	3,428E-05
22,0	-44,95	3,199E-05
22,5	-45,10	3,090E-05
23,0	-45,25	2,985E-05
23,5	-45,20	3,020E-05
24,0	-45,25	2,985E-05
24,5	-45,40	2,884E-05
25,0	-45,50	2,818E-05
25,5	-45,90	2,570E-05
26,0	-46,80	2,089E-05
26,5	-47,85	1,641E-05
27,0	-47,95	1,603E-05
27,5	-48,00	1,585E-05

Tab. 7. Naměřené hodnoty výkonu pro mnohomodové optické vlákno GI 50/125 pro $\lambda = 1550$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm.



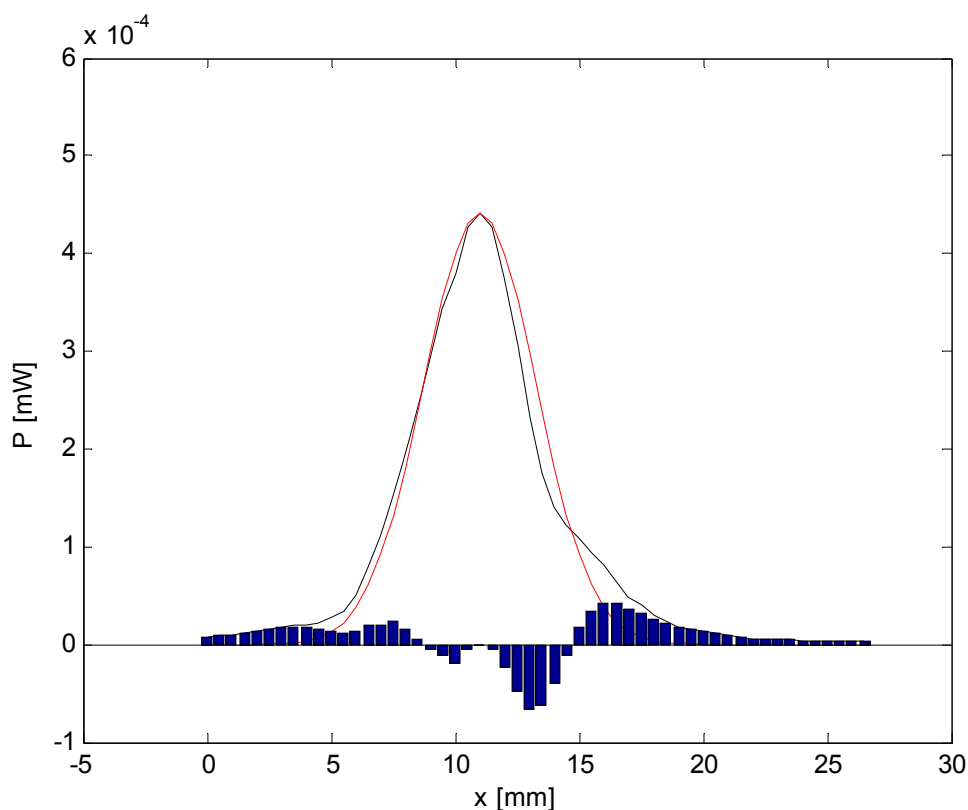
Obr. 21. Graf zobrazující rozložení optické intenzity na ose x (viz obr. 13) pro mnohomodové optické vlákno GI 50/125, pro $\lambda = 1550$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm v porovnání s teoretickým grafem Gaussovy funkce (červená křivka – teoretický graf, černá křivka – naměřené hodnoty, modré sloupce – graf odchylek).

Z grafu na obr. 21 je zřejmé, že změřený graf optické intenzity je značně odlišný oproti teoretickému grafu Gaussovy funkce. Odchylky jsou zde podstatně vyšší než u grafu na obr. 19, který byl měřen pro vlnovou délku $\lambda = 1310$ nm a se stejnou vzdáleností měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm. Tato nepřesnost mohla být způsobena změnou světelných podmínek během měření v laboratoři. Maximální intenzita zde byla změřena ve vzdálenosti $x = 13,5$ mm a dosáhla hodnoty výkonu $P = 1,950 \cdot 10^{-4}$ mW, což je mnohem méně oproti výkonu který byl dosažen pro vlnovou délku $\lambda = 1310$ nm na obr. 19, jehož hodnota byla $P = 4,898 \cdot 10^{-4}$ mW. Počátek osy x byl zvolen v souladu s krajní polohou mikrometrického posuvu. Optimální překrytí grafu z naměřených hodnot s grafem teoretické Gaussovy funkce řeší samotný program uvedený v příloze.

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
0,0	-51,30	7,413E-06
0,5	-50,60	8,710E-06
1,0	-49,80	1,047E-05
1,5	-49,45	1,135E-05
2,0	-48,75	1,334E-05
2,5	-48,00	1,585E-05
3,0	-47,50	1,778E-05
3,5	-47,05	1,972E-05
4,0	-46,85	2,065E-05
4,5	-46,45	2,265E-05
5,0	-45,70	2,692E-05
5,5	-44,65	3,428E-05
6,0	-42,90	5,129E-05
6,5	-41,05	7,852E-05
7,0	-39,60	1,096E-04
7,5	-38,10	1,549E-04
8,0	-37,05	1,972E-04
8,5	-36,15	2,427E-04
9,0	-35,35	2,917E-04
9,5	-34,65	3,428E-04
10,0	-34,20	3,802E-04
10,5	-33,70	4,266E-04
11,0	-33,55	4,416E-04
11,5	-33,70	4,266E-04
12,0	-34,25	3,758E-04
12,5	-35,15	3,055E-04
13,0	-36,35	2,317E-04

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
13,5	-37,55	1,758E-04
14,0	-38,50	1,413E-04
14,5	-39,15	1,216E-04
15,0	-39,65	1,084E-04
15,5	-40,25	9,441E-05
16,0	-40,95	8,035E-05
16,5	-41,90	6,457E-05
17,0	-43,10	4,898E-05
17,5	-44,05	3,936E-05
18,0	-45,30	2,951E-05
18,5	-46,40	2,291E-05
19,0	-47,30	1,862E-05
19,5	-48,05	1,567E-05
20,0	-48,80	1,318E-05
20,5	-49,65	1,084E-05
21,0	-50,65	8,610E-06
21,5	-51,65	6,839E-06
22,0	-52,40	5,754E-06
22,5	-52,90	5,129E-06
23,0	-52,90	5,129E-06
23,5	-53,00	5,012E-06
24,0	-53,60	4,365E-06
24,5	-54,00	3,981E-06
25,0	-54,20	3,802E-06
25,5	-54,20	3,802E-06
26,0	-54,50	3,548E-06
26,5	-54,60	3,467E-06

Tab. 8. Naměřené hodnoty výkonu pro mnohomodové optické vlákno GI 50/125 pro $\lambda = 1550$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 84$ cm.



Obr. 22. Graf zobrazující rozložení optické intenzity na ose x (viz obr. 13) pro mnohomodové optické vlákno GI 50/125, pro $\lambda = 1550$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 84$ cm v porovnání s teoretickým grafem Gaussovy funkce (červená křivka – teoretický graf, černá křivka – naměřené hodnoty, modré sloupce – graf odchylek).

Jak je znázorněno na obr. 22, graf optické intenzity z naměřených hodnot zobrazený černou křivkou se liší od grafu teoretické Gaussovy funkce zejména v počátku a ke konci grafu. Z měřených grafů pro mnohomodové optické vlákno GI 50/125 je přesto tento graf nejpresnější. Z toho vyplývá, že se zvýšením vzdálenosti měřiče výkonu od kolimátoru L je výsledek přesnější, stejně jak tomu bylo u optického vlákna SM 9/125. Maximální intenzita zde byla změřena ve vzdálenosti $x = 11$ mm a dosáhla hodnoty výkonu $P = 4,416 \cdot 10^{-4}$ mW. Počátek osy x byl zvolen v souladu s krajní polohou mikrometrického posuvu. Optimální překrytí grafu z naměřených hodnot s grafem teoretické Gaussovy funkce řeší samotný program uvedený v příloze.

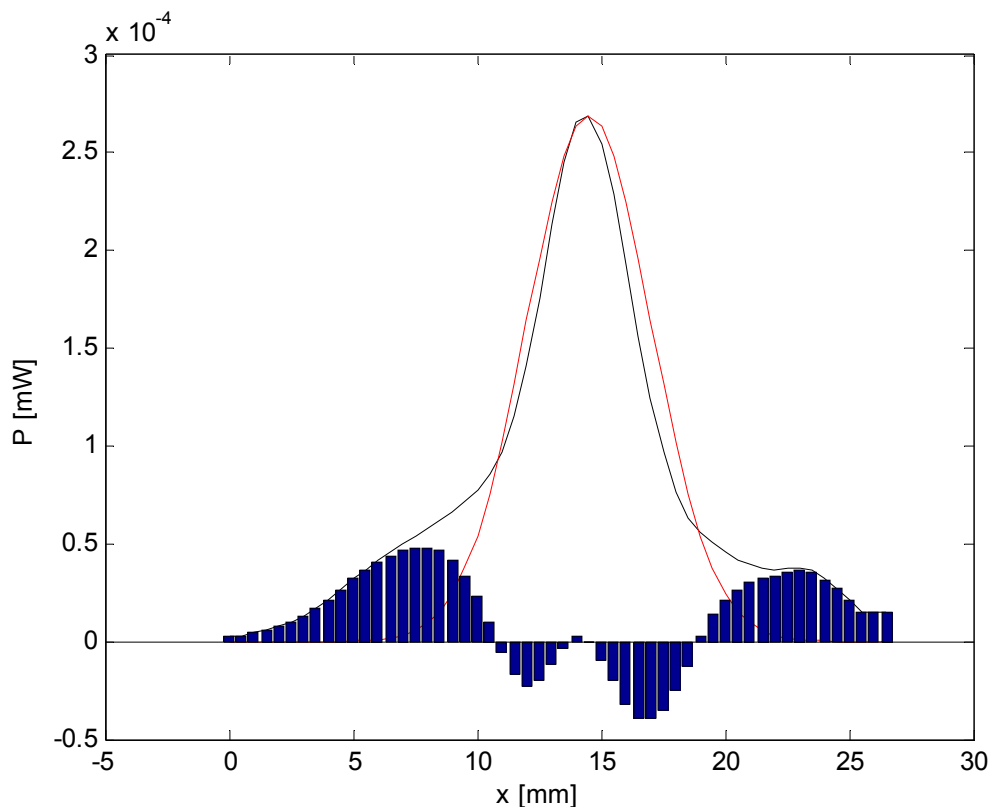
5.4 Měření mnohomodového optického vlákna GI 62,5/125 s konektory FC – FC pomocí laseru Promax Prolite 80

Měření mnohomodového optického vlákna GI 62,5/125 s konektory FC – FC jsem prováděl pomocí laseru Promax Prolite 80 pro vlnové délky $\lambda = 1310$ nm, dále $\lambda = 1550$ nm ve vzdálenostech měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm a $L = 84$ cm.

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
0,0	-56,50	2,239E-06
0,5	-55,00	3,162E-06
1,0	-53,60	4,365E-06
1,5	-52,50	5,623E-06
2,0	-51,20	7,586E-06
2,5	-50,00	1,000E-05
3,0	-48,90	1,288E-05
3,5	-47,70	1,698E-05
4,0	-46,65	2,163E-05
4,5	-45,75	2,661E-05
5,0	-44,90	3,236E-05
5,5	-44,35	3,673E-05
6,0	-43,80	4,169E-05
6,5	-43,45	4,519E-05
7,0	-43,00	5,012E-05
7,5	-42,70	5,370E-05
8,0	-42,40	5,754E-05
8,5	-42,05	6,237E-05
9,0	-41,80	6,607E-05
9,5	-41,50	7,079E-05
10,0	-41,10	7,762E-05
10,5	-40,70	8,511E-05
11,0	-40,15	9,661E-05
11,5	-39,40	1,148E-04
12,0	-38,50	1,413E-04
12,5	-37,55	1,758E-04
13,0	-36,70	2,138E-04

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
13,5	-36,10	2,455E-04
14,0	-35,75	2,661E-04
14,5	-35,70	2,692E-04
15,0	-35,95	2,541E-04
15,5	-36,40	2,291E-04
16,0	-37,15	1,928E-04
16,5	-38,05	1,567E-04
17,0	-39,05	1,245E-04
17,5	-40,15	9,661E-05
18,0	-41,15	7,674E-05
18,5	-42,00	6,310E-05
19,0	-42,50	5,623E-05
19,5	-42,95	5,070E-05
20,0	-43,40	4,571E-05
20,5	-43,80	4,169E-05
21,0	-44,05	3,936E-05
21,5	-44,25	3,758E-05
22,0	-44,35	3,673E-05
22,5	-44,30	3,715E-05
23,0	-44,25	3,758E-05
23,5	-44,40	3,631E-05
24,0	-44,95	3,199E-05
24,5	-45,65	2,723E-05
25,0	-46,75	2,113E-05
25,5	-48,15	1,531E-05
26,0	-48,25	1,496E-05
26,5	-48,30	1,479E-05

Tab. 9. Naměřené hodnoty výkonu pro mnohomodové optické vlákno GI 62,5/125 pro $\lambda = 1310$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm.



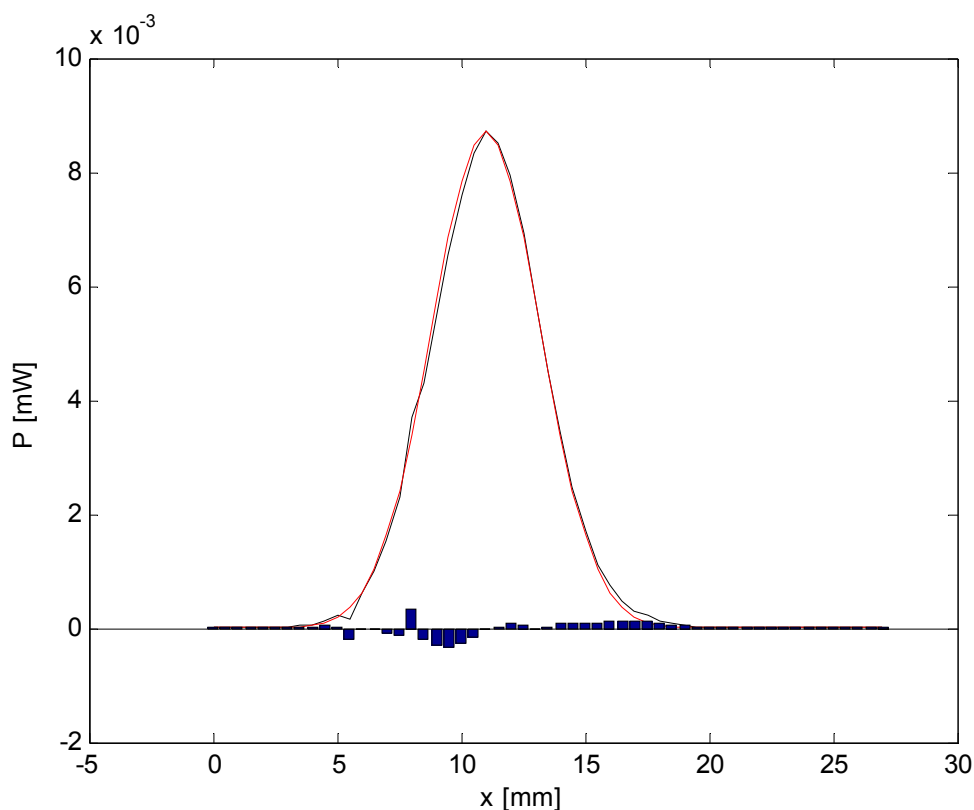
Obr. 23. Graf zobrazující rozložení optické intenzity na ose x (viz obr. 13) pro mnohomodové optické vlákno GI 62,5/125, pro $\lambda = 1310$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm v porovnání s teoretickým grafem Gaussovy funkce (červená křivka – teoretický graf, černá křivka – naměřené hodnoty, modré sloupce – graf odchylek).

Z grafu na obr. 23 je zřejmé, že největší odchylky naměřeného grafu optické intenzity oproti grafu teoretické Gaussovy funkce jsou zejména v počátku a ke konci grafu. Obdobného výsledku bylo dosaženo u optického vlákna GI 50/125 pro $\lambda = 1310$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm, který je na obr.19. Maximální intenzita zde byla změřena ve vzdálenosti $x = 14,5$ mm a dosáhla hodnoty výkonu $P = 2,692 \cdot 10^{-4}$ mW. Počátek osy x byl zvolen v souladu s krajní polohou mikrometrického posuvu. Optimální překrytí grafu z naměřených hodnot s grafem teoretické Gaussovy funkce řeší samotný program uvedený v příloze.

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
0,0	-50,25	9,441E-06
0,5	-49,90	1,023E-05
1,0	-49,80	1,047E-05
1,5	-49,25	1,189E-05
2,0	-48,85	1,303E-05
2,5	-47,60	1,738E-05
3,0	-45,55	2,786E-05
3,5	-43,20	4,786E-05
4,0	-41,65	6,839E-05
4,5	-38,55	1,396E-04
5,0	-36,40	2,291E-04
5,5	-37,95	1,603E-04
6,0	-32,10	6,166E-04
6,5	-30,00	1,000E-03
7,0	-28,20	1,514E-03
7,5	-26,40	2,291E-03
8,0	-24,30	3,715E-03
8,5	-23,65	4,315E-03
9,0	-22,65	5,433E-03
9,5	-21,85	6,531E-03
10,0	-21,20	7,586E-03
10,5	-20,80	8,318E-03
11,0	-20,60	8,710E-03
11,5	-20,70	8,511E-03
12,0	-21,00	7,943E-03
12,5	-21,60	6,918E-03
13,0	-22,45	5,689E-03
13,5	-23,45	4,519E-03

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
14,0	-24,60	3,467E-03
14,5	-26,05	2,483E-03
15,0	-27,70	1,698E-03
15,5	-29,50	1,122E-03
16,0	-31,30	7,413E-04
16,5	-33,25	4,732E-04
17,0	-35,10	3,090E-04
17,5	-36,75	2,113E-04
18,0	-38,60	1,380E-04
18,5	-40,65	8,610E-05
19,0	-42,90	5,129E-05
19,5	-44,90	3,236E-05
20,0	-46,60	2,188E-05
20,5	-47,90	1,622E-05
21,0	-48,85	1,303E-05
21,5	-49,15	1,216E-05
22,0	-49,85	1,035E-05
22,5	-50,50	8,913E-06
23,0	-50,70	8,511E-06
23,5	-51,30	7,413E-06
24,0	-50,80	8,318E-06
24,5	-51,10	7,762E-06
25,0	-51,80	6,607E-06
25,5	-52,10	6,166E-06
26,0	-53,00	5,012E-06
26,5	-53,00	5,012E-06
27,0	-53,10	4,898E-06

Tab. 10. Naměřené hodnoty výkonu pro mnohomodové optické vlákno GI 62,5/125 pro $\lambda = 1310$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 84$ cm.



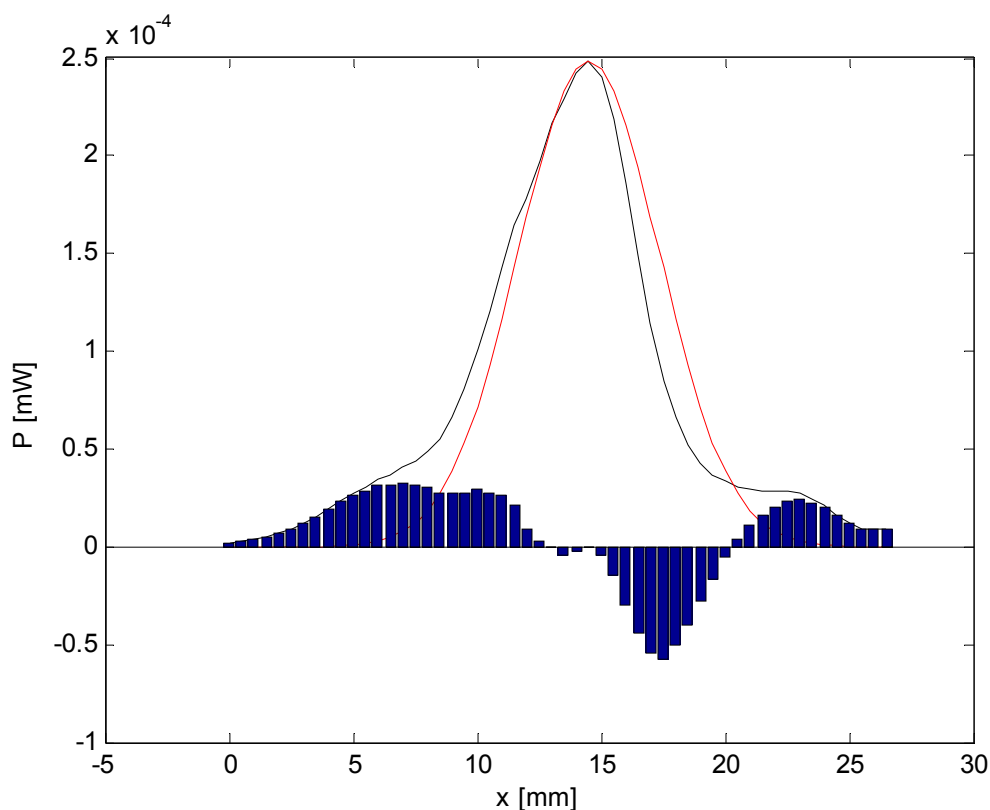
Obr. 24. Graf zobrazující rozložení optické intenzity na ose x (viz obr. 13) pro mnohomodové optické vlákno GI 62,5/125, pro $\lambda = 1310$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 84$ cm v porovnání s teoretickým grafem Gaussovy funkce (červená křivka – teoretický graf, černá křivka – naměřené hodnoty, modré sloupce – graf odchylek).

Na obr. 24 je zřejmé, že graf závislosti výkonu na souřadnici x získaný z naměřených hodnot (viz. černá křivka) je téměř shodný s grafem teoretické Gaussovy funkce (viz. červená křivka). Podobného výsledku bylo dosaženo u optického vlákna SM 9/125 pro stejnou vlnovou délku $\lambda = 1310$ nm a stejnou vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 84$ cm, jak je zřejmé z grafu na obr. 16. Odchytky jsou zde jen velmi malé a výsledek je mnohem přesnější oproti grafu na obr. 23, který byl měřen pro vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm. Maximální intenzita zde byla změřena ve vzdálenosti $x = 11$ mm a dosáhla hodnoty výkonu $P = 8,710 \cdot 10^{-3}$ mW. Počátek osy x byl zvolen v souladu s krajní polohou mikrometrického posuvu. Optimální překrytí grafu z naměřených hodnot s grafem teoretické Gaussovy funkce řeší samotný program uvedený v příloze.

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
0,0	-56,50	2,239E-06
0,5	-55,20	3,020E-06
1,0	-54,10	3,890E-06
1,5	-52,70	5,370E-06
2,0	-51,50	7,079E-06
2,5	-50,30	9,333E-06
3,0	-49,20	1,202E-05
3,5	-48,25	1,496E-05
4,0	-47,05	1,972E-05
4,5	-46,25	2,371E-05
5,0	-45,65	2,723E-05
5,5	-45,15	3,055E-05
6,0	-44,60	3,467E-05
6,5	-44,35	3,673E-05
7,0	-43,90	4,074E-05
7,5	-43,55	4,416E-05
8,0	-43,15	4,842E-05
8,5	-42,60	5,495E-05
9,0	-41,80	6,607E-05
9,5	-40,95	8,035E-05
10,0	-39,95	1,012E-04
10,5	-39,20	1,202E-04
11,0	-38,45	1,429E-04
11,5	-37,85	1,641E-04
12,0	-37,50	1,778E-04
12,5	-37,05	1,972E-04
13,0	-36,65	2,163E-04

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
13,5	-36,40	2,291E-04
14,0	-36,15	2,427E-04
14,5	-36,05	2,483E-04
15,0	-36,20	2,399E-04
15,5	-36,60	2,188E-04
16,0	-37,30	1,862E-04
16,5	-38,25	1,496E-04
17,0	-39,40	1,148E-04
17,5	-40,70	8,511E-05
18,0	-41,80	6,607E-05
18,5	-42,80	5,248E-05
19,0	-43,65	4,315E-05
19,5	-44,35	3,673E-05
20,0	-44,80	3,311E-05
20,5	-45,10	3,090E-05
21,0	-45,35	2,917E-05
21,5	-45,45	2,851E-05
22,0	-45,45	2,851E-05
22,5	-45,50	2,818E-05
23,0	-45,70	2,692E-05
23,5	-46,15	2,427E-05
24,0	-46,75	2,113E-05
24,5	-47,80	1,660E-05
25,0	-49,10	1,230E-05
25,5	-50,50	8,913E-06
26,0	-50,60	8,710E-06
26,5	-50,60	8,710E-06

Tab. 11. Naměřené hodnoty výkonu pro mnohomodové optické vlákno GI 62,5/125 pro $\lambda = 1550$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm.



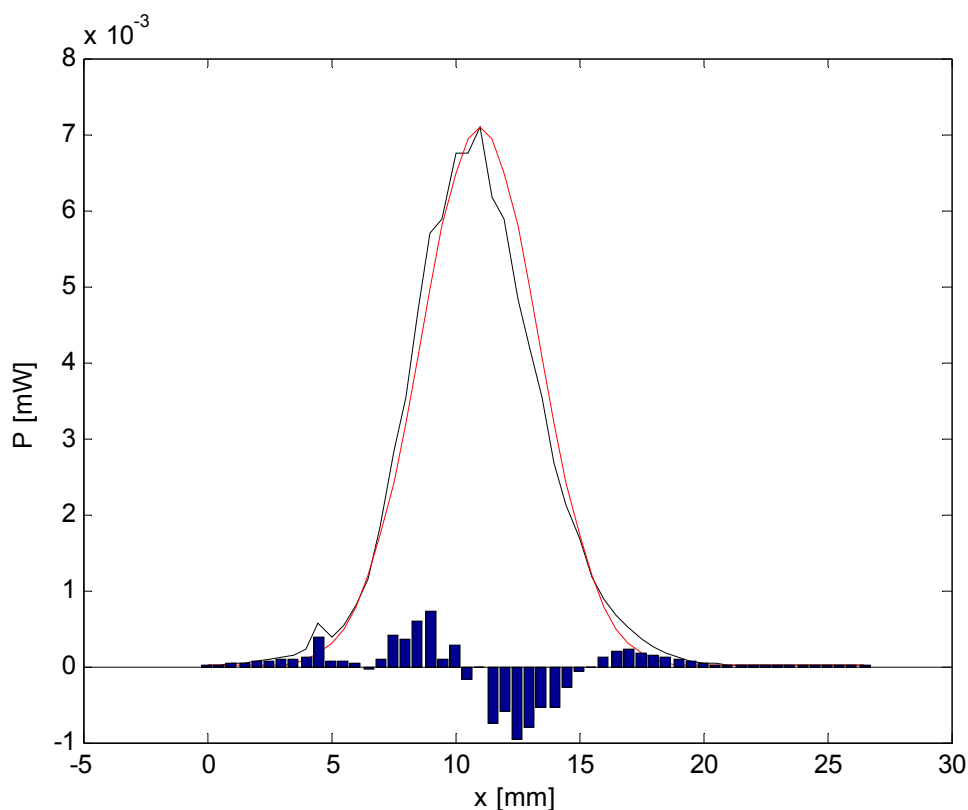
Obr. 25. Graf zobrazující rozložení optické intenzity na ose x (viz obr. 13) pro mnohomodové optické vlákno GI 62,5/125, pro $\lambda = 1550$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm v porovnání s teoretickým grafem Gaussovy funkce (červená křivka – teoretický graf, černá křivka – naměřené hodnoty, modré sloupce – graf odchylek).

Jak je znázorněno na obr. 25, graf závislosti výkonu na souřadnici x získaný z naměřených hodnot pro vlnovou délku $\lambda = 1550$ nm je podobný grafu na obr. 23, který byl měřen pro vlnovou délku $\lambda = 1310$ nm a stejnou vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm. Nedošlo zde ani k výraznější změně maximální hodnoty výkonu, $P = 2,483 \cdot 10^{-4}$ mW ve vzdálenosti $x = 14,5$ mm. U grafu na obr. 23 byla maximální hodnota výkonu $P = 2,692 \cdot 10^{-4}$ mW. Z toho vyplývá, že změna vlnové délky nemá v tomto případě výraznější vliv na změnu přesnosti grafu. Počátek osy x byl zvolen v souladu s krajní polohou mikrometrického posuvu. Optimální překrytí grafu z naměřených hodnot s grafem teoretické Gaussovy funkce řeší samotný program uvedený v příloze.

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
0,0	-48,10	1,549E-05
0,5	-46,30	2,344E-05
1,0	-45,10	3,090E-05
1,5	-43,10	4,898E-05
2,0	-42,20	6,026E-05
2,5	-40,60	8,710E-05
3,0	-39,65	1,084E-04
3,5	-38,55	1,396E-04
4,0	-36,60	2,188E-04
4,5	-32,55	5,559E-04
5,0	-34,30	3,715E-04
5,5	-32,60	5,495E-04
6,0	-30,90	8,128E-04
6,5	-29,40	1,148E-03
7,0	-27,40	1,820E-03
7,5	-25,50	2,818E-03
8,0	-24,50	3,548E-03
8,5	-23,30	4,677E-03
9,0	-22,45	5,689E-03
9,5	-22,30	5,888E-03
10,0	-21,70	6,761E-03
10,5	-21,70	6,761E-03
11,0	-21,50	7,079E-03
11,5	-22,10	6,166E-03
12,0	-22,30	5,888E-03
12,5	-23,15	4,842E-03
13,0	-23,80	4,169E-03

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
13,5	-24,50	3,548E-03
14,0	-25,75	2,661E-03
14,5	-26,75	2,113E-03
15,0	-27,80	1,660E-03
15,5	-29,30	1,175E-03
16,0	-30,50	8,913E-04
16,5	-31,65	6,839E-04
17,0	-32,90	5,129E-04
17,5	-34,65	3,428E-04
18,0	-36,00	2,512E-04
18,5	-37,80	1,660E-04
19,0	-39,65	1,084E-04
19,5	-41,70	6,761E-05
20,0	-43,80	4,169E-05
20,5	-45,70	2,692E-05
21,0	-47,75	1,679E-05
21,5	-49,50	1,122E-05
22,0	-51,10	7,762E-06
22,5	-51,80	6,607E-06
23,0	-52,10	6,166E-06
23,5	-52,25	5,957E-06
24,0	-52,60	5,495E-06
24,5	-53,20	4,786E-06
25,0	-54,40	3,631E-06
25,5	-54,60	3,467E-06
26,0	-54,60	3,467E-06
26,5	-54,10	3,890E-06

Tab. 12. Naměřené hodnoty výkonu pro mnohomodové optické vlákno GI 62,5/125 pro $\lambda = 1550$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 84$ cm.



Obr. 26. Graf zobrazující rozložení optické intenzity na ose x (viz obr. 13) pro mnohomodové optické vlákno GI 62,5/125, pro $\lambda = 1550$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 84$ cm v porovnání s teoretickým grafem Gaussovy funkce (červená křivka – teoretický graf, černá křivka – naměřené hodnoty, modré sloupce – graf odchylek).

Na obr. 26 je zřejmé, že graf závislosti výkonu na souřadnici x získaný z naměřených hodnot (viz. černá křivka) se velmi blíží grafu teoretické Gaussovy funkce (viz. červená křivka). Odchylka je zde vyšší než u grafu na obr. 24, který byl měřen pro vlnovou délku $\lambda = 1310$ nm, ale oba grafy byly měřeny pro vzdálenost $L = 84$ cm a výsledky jsou mnohem přesnější než u grafů na obr. 23 a obr. 25, které byly měřeny pro vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm. Maximální intenzita zde byla změřena ve vzdálenosti $x = 11$ mm a dosáhla hodnoty výkonu $P = 7,079 \cdot 10^{-3}$ mW. Počátek osy x byl zvolen v souladu s krajní polohou mikrometrického posuvu. Optimální překrytí grafu z naměřených hodnot s grafem teoretické Gaussovy funkce řeší samotný program uvedený v příloze.

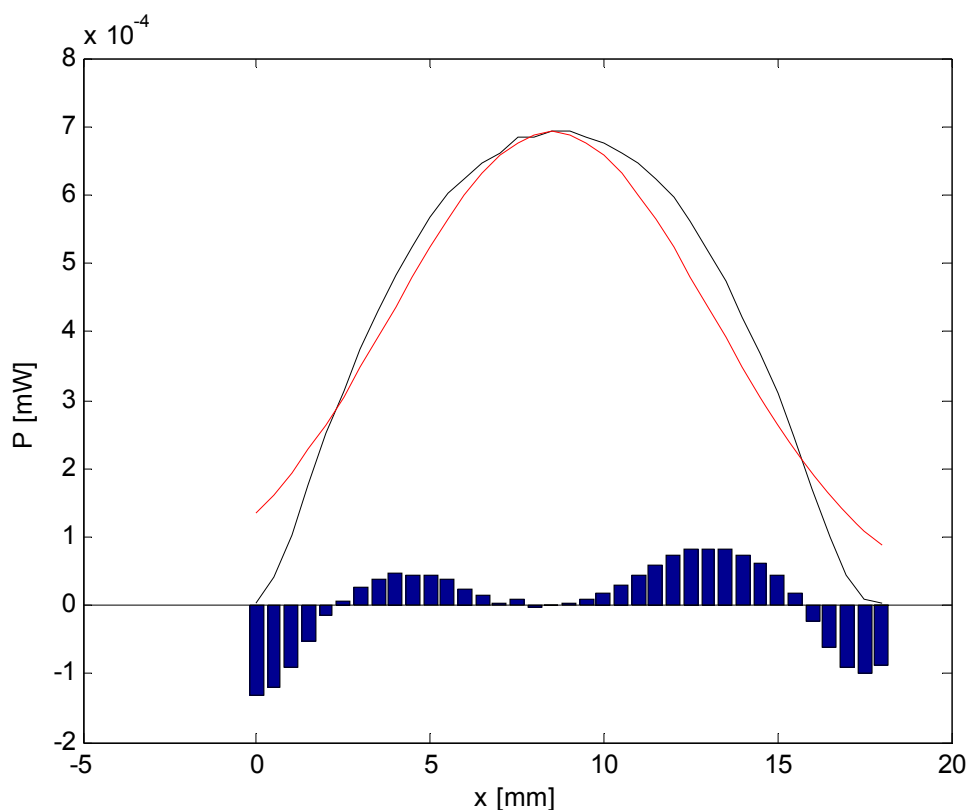
5.5 Měření optického vlákna 62,5/125 s konektory FC – ST pomocí optického zdroje LED Promax Prolite 81

Měření optického vlákna 62,5/125 s konektory FC – ST jsem prováděl pomocí optického zdroje LED Promax Prolite 81 pro vlnové délky $\lambda = 850$ nm, dále $\lambda = 1300$ nm ve vzdálenostech měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm a $L = 84$ cm.

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
0,0	-56,50	2,239E-06
0,5	-43,85	4,121E-05
1,0	-39,90	1,023E-04
1,5	-37,55	1,758E-04
2,0	-36,00	2,512E-04
2,5	-35,05	3,126E-04
3,0	-34,25	3,758E-04
3,5	-33,65	4,315E-04
4,0	-33,15	4,842E-04
4,5	-32,80	5,248E-04
5,0	-32,45	5,689E-04
5,5	-32,20	6,026E-04
6,0	-32,05	6,237E-04
6,5	-31,90	6,457E-04
7,0	-31,80	6,607E-04
7,5	-31,65	6,839E-04
8,0	-31,65	6,839E-04
8,5	-31,60	6,918E-04
9,0	-31,60	6,918E-04

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
9,5	-31,65	6,839E-04
10,0	-31,70	6,761E-04
10,5	-31,80	6,607E-04
11,0	-31,90	6,457E-04
11,5	-32,05	6,237E-04
12,0	-32,25	5,957E-04
12,5	-32,50	5,623E-04
13,0	-32,85	5,188E-04
13,5	-33,25	4,732E-04
14,0	-33,75	4,217E-04
14,5	-34,35	3,673E-04
15,0	-35,10	3,090E-04
15,5	-36,10	2,455E-04
16,0	-37,70	1,698E-04
16,5	-39,95	1,012E-04
17,0	-43,50	4,467E-05
17,5	-50,30	9,333E-06
18,0	-56,50	2,239E-06

Tab. 13. Naměřené hodnoty výkonu pro optické vlákno 62,5/125 pro $\lambda = 850$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm.



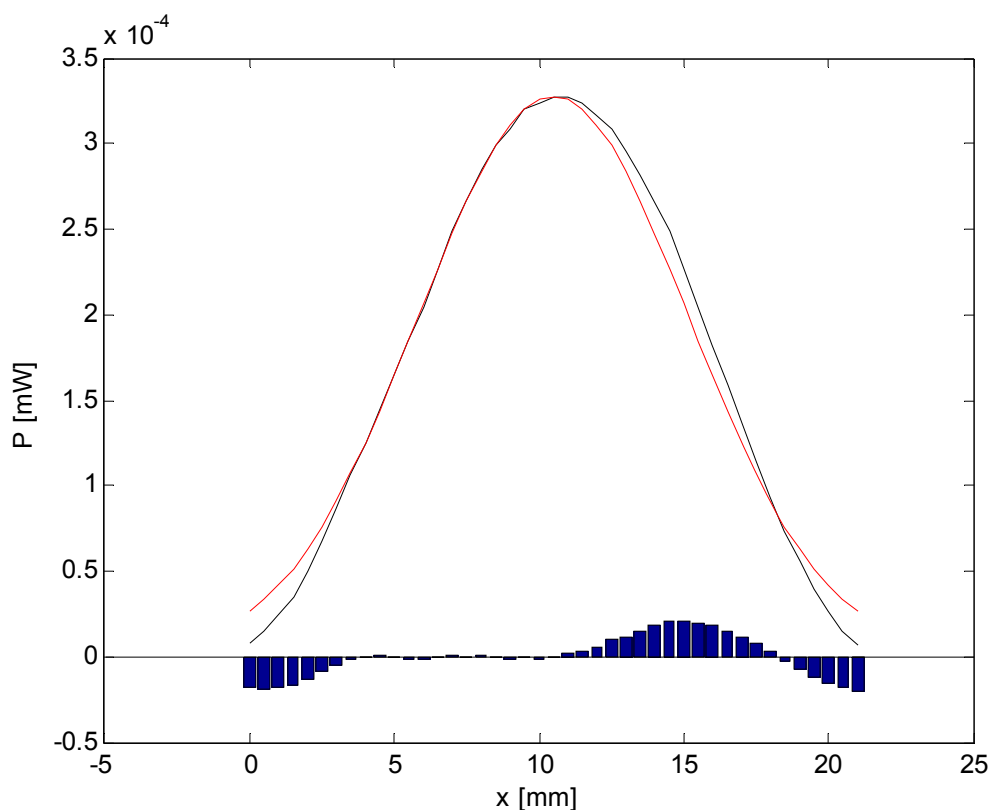
Obr. 27. Graf zobrazující rozložení optické intenzity na ose x (viz obr. 13) pro optické vlákno 62,5/125, pro $\lambda = 850$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm v porovnání s teoretickým grafem Gaussovy funkce (červená křivka – teoretický graf, černá křivka – naměřené hodnoty, modré sloupce – graf odchylek).

Na obr. 27 je zřejmé, že naměřený graf optické intenzity zobrazený černou křivkou se tvarem odlišuje od grafu teoretické Gaussovy funkce, který je zobrazen červenou křivkou. Tvar grafu je celkově rozdílný od předchozích grafů optických vláken s konektory FC – FC, které byly měřeny pomocí laseru Promax Prolite 80. Při měření grafu na obr. 27 byl použit optický zdroj LED Promax Prolite 81 a proto je graf naměřených hodnot rozdílný od předchozích grafů optických vláken, kde byl k měření použit laser. Maximální intenzita zde byla změřena ve vzdálenosti $x = 8,5$ mm a dosáhla hodnoty výkonu $P = 6,918 \cdot 10^{-4}$ mW. Počátek osy x byl zvolen v souladu s krajní polohou mikrometrického posuvu. Optimální překrytí grafu z naměřených hodnot s grafem teoretické Gaussovy funkce řeší samotný program uvedený v příloze.

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
0,0	-50,90	8,128E-06
0,5	-48,40	1,445E-05
1,0	-46,20	2,399E-05
1,5	-44,60	3,467E-05
2,0	-43,05	4,955E-05
2,5	-41,70	6,761E-05
3,0	-40,65	8,610E-05
3,5	-39,75	1,059E-04
4,0	-39,05	1,245E-04
4,5	-38,40	1,445E-04
5,0	-37,85	1,641E-04
5,5	-37,35	1,841E-04
6,0	-36,90	2,042E-04
6,5	-36,45	2,265E-04
7,0	-36,05	2,483E-04
7,5	-35,75	2,661E-04
8,0	-35,45	2,851E-04
8,5	-35,25	2,985E-04
9,0	-35,10	3,090E-04
9,5	-34,95	3,199E-04
10,0	-34,90	3,236E-04
10,5	-34,85	3,273E-04

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
11,0	-34,85	3,273E-04
11,5	-34,90	3,236E-04
12,0	-35,00	3,162E-04
12,5	-35,10	3,090E-04
13,0	-35,30	2,951E-04
13,5	-35,50	2,818E-04
14,0	-35,75	2,661E-04
14,5	-36,05	2,483E-04
15,0	-36,45	2,265E-04
15,5	-36,90	2,042E-04
16,0	-37,40	1,820E-04
16,5	-38,00	1,585E-04
17,0	-38,65	1,365E-04
17,5	-39,40	1,148E-04
18,0	-40,30	9,333E-05
18,5	-41,35	7,328E-05
19,0	-42,55	5,559E-05
19,5	-44,00	3,981E-05
20,0	-45,80	2,630E-05
20,5	-48,20	1,514E-05
21,0	-52,00	6,310E-06

Tab. 14. Naměřené hodnoty výkonu pro optické vlákno 62,5/125 pro $\lambda = 850$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 84$ cm.



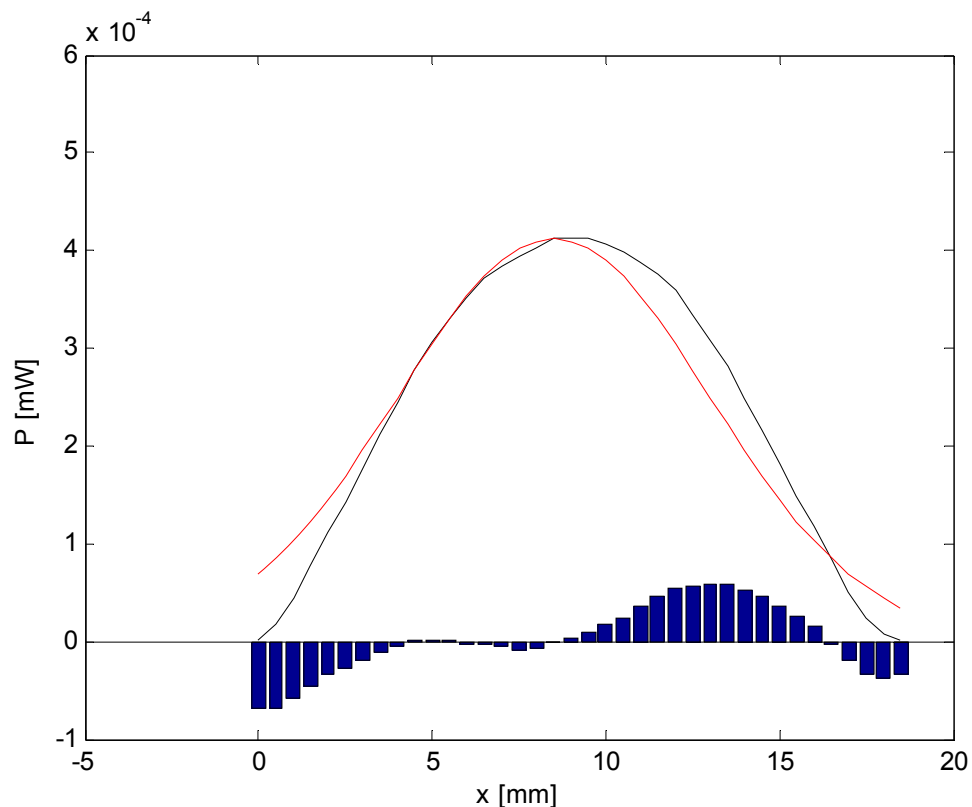
Obr. 28. Graf zobrazující rozložení optické intenzity na ose x (viz obr. 13) pro optické vlákno 62,5/125, pro $\lambda = 850$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 84$ cm v porovnání s teoretickým grafem Gaussovy funkce (červená křivka – teoretický graf, černá křivka – naměřené hodnoty, modré sloupce – graf odchylek).

Jak je znázorněno na obr. 28, graf závislosti výkonu na souřadnici x získaný z naměřených hodnot (viz. černá křivka) se velmi blíží grafu teoretické Gaussovy funkce (viz. červená křivka) i přesto, že zde byl použit optický zdroj LED Promax Prolite 81. Ve srovnání s grafem na obr. 27 zde byla změřena mnohem nižší hodnota maximálního výkonu $P = 3,273 \cdot 10^{-4}$ mW ve vzdálenosti $x = 10,5$ mm. U grafu na obr. 27, který se liší vzdáleností měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm, byla změřená hodnota maximálního výkonu více než dvojnásobná $P = 6,918 \cdot 10^{-4}$ mW. Počátek osy x byl zvolen v souladu s krajní polohou mikrometrického posuvu. Optimální překrytí grafu z naměřených hodnot s grafem teoretické Gaussovy funkce řeší samotný program uvedený v příloze.

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
0,0	-59,50	1,122E-06
0,5	-47,70	1,698E-05
1,0	-43,55	4,416E-05
1,5	-41,10	7,762E-05
2,0	-39,55	1,109E-04
2,5	-38,45	1,429E-04
3,0	-37,55	1,758E-04
3,5	-36,75	2,113E-04
4,0	-36,10	2,455E-04
4,5	-35,55	2,786E-04
5,0	-35,15	3,055E-04
5,5	-34,80	3,311E-04
6,0	-34,55	3,508E-04
6,5	-34,30	3,715E-04
7,0	-34,15	3,846E-04
7,5	-34,05	3,936E-04
8,0	-33,95	4,027E-04
8,5	-33,85	4,121E-04
9,0	-33,85	4,121E-04

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
9,5	-33,85	4,121E-04
10,0	-33,90	4,074E-04
10,5	-34,00	3,981E-04
11,0	-34,10	3,890E-04
11,5	-34,25	3,758E-04
12,0	-34,45	3,589E-04
12,5	-34,75	3,350E-04
13,0	-35,10	3,090E-04
13,5	-35,50	2,818E-04
14,0	-36,05	2,483E-04
14,5	-36,65	2,163E-04
15,0	-37,40	1,820E-04
15,5	-38,25	1,496E-04
16,0	-39,30	1,175E-04
16,5	-40,85	8,222E-05
17,0	-43,05	4,955E-05
17,5	-46,35	2,317E-05
18,0	-51,60	6,918E-06
18,5	-59,50	1,122E-06

Tab. 15. Naměřené hodnoty výkonu pro optické vlákno 62,5/125 pro $\lambda = 1300$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm.



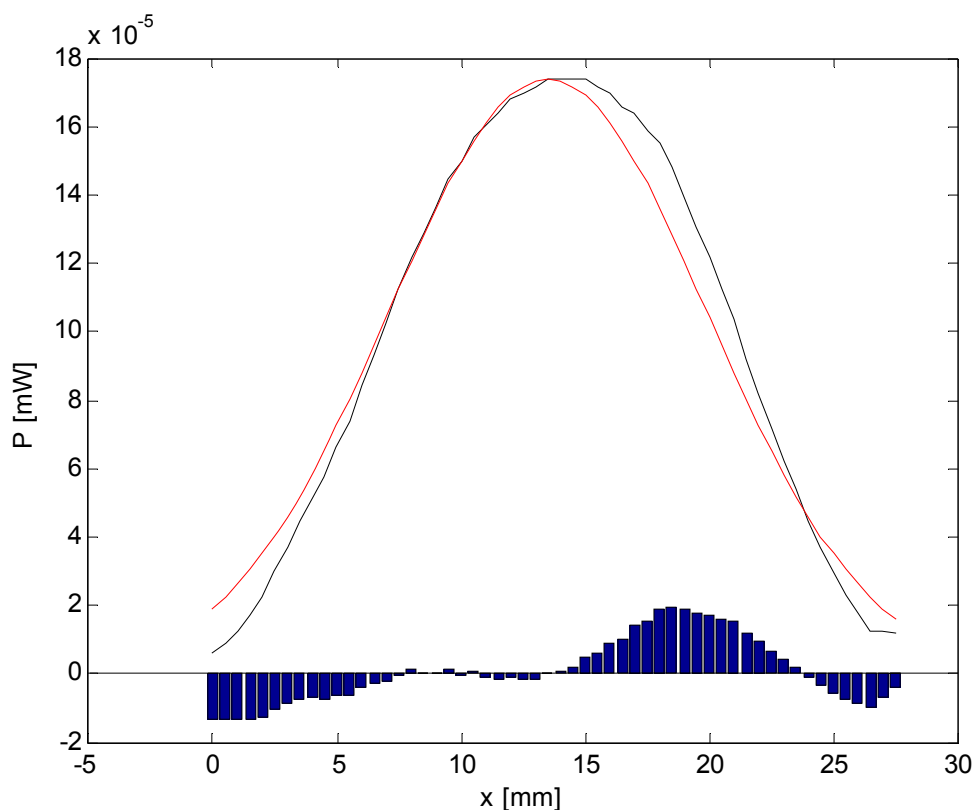
Obr. 29. Graf zobrazující rozložení optické intenzity na ose x (viz obr. 13) pro optické vlákno 62,5/125, pro $\lambda = 1300$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm v porovnání s teoretickým grafem Gaussovy funkce (červená křivka – teoretický graf, černá křivka – naměřené hodnoty, modré sloupce – graf odchylek).

Z grafu na obr. 29 je zřejmé, že změřený graf optické intenzity pro vlnovou délku $\lambda = 1300$ nm je velmi podobný grafu na obr. 27, kde byla vlnová délka $\lambda = 850$ nm a stejná vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm. Změna vlnové délky λ nemá v tomto případě výraznější vliv na přesnost grafu. Došlo zde pouze ke snížení maximální hodnoty výkonu na $P = 4,121 \cdot 10^{-4}$ mW ve vzdálenosti $x = 9$ mm. Počátek osy x byl zvolen v souladu s krajní polohou mikrometrického posuvu. Optimální překrytí grafu z naměřených hodnot s grafem teoretické Gaussovy funkce řeší samotný program uvedený v příloze.

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
0,0	-52,20	6,026E-06
0,5	-50,40	9,120E-06
1,0	-48,95	1,274E-05
1,5	-47,70	1,698E-05
2,0	-46,45	2,265E-05
2,5	-45,25	2,985E-05
3,0	-44,30	3,715E-05
3,5	-43,50	4,467E-05
4,0	-42,90	5,129E-05
4,5	-42,40	5,754E-05
5,0	-41,80	6,607E-05
5,5	-41,30	7,413E-05
6,0	-40,75	8,414E-05
6,5	-40,30	9,333E-05
7,0	-39,90	1,023E-04
7,5	-39,50	1,122E-04
8,0	-39,15	1,216E-04
8,5	-38,90	1,288E-04
9,0	-38,65	1,365E-04
9,5	-38,40	1,445E-04
10,0	-38,25	1,496E-04
10,5	-38,05	1,567E-04
11,0	-37,95	1,603E-04
11,5	-37,85	1,641E-04
12,0	-37,75	1,679E-04
12,5	-37,70	1,698E-04
13,0	-37,65	1,718E-04
13,5	-37,60	1,738E-04

x [mm]	P [dBm]	P [mW]
14,0	-37,60	1,738E-04
14,5	-37,60	1,738E-04
15,0	-37,60	1,738E-04
15,5	-37,65	1,718E-04
16,0	-37,70	1,698E-04
16,5	-37,80	1,660E-04
17,0	-37,85	1,641E-04
17,5	-38,00	1,585E-04
18,0	-38,10	1,549E-04
18,5	-38,30	1,479E-04
19,0	-38,55	1,396E-04
19,5	-38,85	1,303E-04
20,0	-39,15	1,216E-04
20,5	-39,50	1,122E-04
21,0	-39,85	1,035E-04
21,5	-40,35	9,226E-05
22,0	-40,85	8,222E-05
22,5	-41,45	7,161E-05
23,0	-42,05	6,237E-05
23,5	-42,70	5,370E-05
24,0	-43,50	4,467E-05
24,5	-44,30	3,715E-05
25,0	-45,30	2,951E-05
25,5	-46,35	2,317E-05
26,0	-47,50	1,778E-05
26,5	-48,95	1,274E-05
27,0	-49,05	1,245E-05
27,5	-49,15	1,216E-05

Tab. 16. Naměřené hodnoty výkonu pro optické vlákno 62,5/125 pro $\lambda = 1300$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 84$ cm.



Obr. 30. Graf zobrazující rozložení optické intenzity na ose x (viz obr. 13) pro optické vlákno 62,5/125, pro $\lambda = 1300$ nm a vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 84$ cm v porovnání s teoretickým grafem Gaussovy funkce (červená křivka – teoretický graf, černá křivka – naměřené hodnoty, modré sloupce – graf odchylek).

Jak je znázorněno na obr. 30, změřený graf optické intenzity zobrazený černou křivkou je dost podobný grafu zobrazenému na obr. 28, který byl měřen pro vlnovou délku $\lambda = 850$ nm a stejnou vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 84$ cm. V grafu na obr. 30 je vyšší odchylka oproti grafu na obr. 28. Maximální intenzita zde dosáhla hodnoty výkonu $P = 1,738 \cdot 10^{-4}$ mW a byla změřena ve vzdálenosti $x = 14$ mm. U grafu na obr. 28 byla změřená maximální hodnota výkonu téměř dvojnásobná $P = 3,273 \cdot 10^{-4}$ mW. Počátek osy x byl zvolen v souladu s krajní polohou mikrometrického posuvu. Optimální překrytí grafu z naměřených hodnot s grafem teoretické Gaussovy funkce řeší samotný program uvedený v příloze.

6 Závěr

V první úvodní části této práce jsem se zabýval světelnými vlnami ve formě paraxiálních optických svazků. Jsou to vlny, jejichž normály k vlnoploše svírají malý úhel s osou šíření. Musí splňovat paraxiální Helmholtzovu rovnici. Důležitým řešením této rovnice je vlna nazývaná Gaussovský svazek, popř. další svazky splňující Helmholtzovu rovnici, Hermite-Gaussové, Laguerre-Gaussové, nebo Besselovské svazky, jejichž limitním případem je však opět svazek Gaussovský.

V teoretické části této práce byly vytvořeny programy, které zobrazují modely svazků. Tyto modely na základě daných parametrů znázorňují plošné rozložení optické intenzity v průřezu daných svazků. Jedná se o model zobrazení svazku v grafu rozměru 2D, dále model zobrazení svazku v grafu rozměru 3D a model zobrazení svazku v grafu rozměru 3D s možností zadání úhlu natočení stopy svazku. K tomuto účelu jsem použil program Matlab verze R2007a.

V experimentální části této práce byl sestaven měřicí řetězec a změřena byla optická intenzita vybraných optických vláken. Ze změřených hodnot pro jednotlivá optická vlákna byly sestaveny grafy zobrazující rozložení optické intenzity. Tyto grafy byly porovnány pomocí vytvořeného programu v Matlabu s teoretickým počítačovým modelem Gaussovy funkce. Program je uveden v příloze této práce. Z naměřených grafů je zřejmé, že nejpresnějšího výsledku bylo dosaženo u jednomodového optického vlákna SM 9/125 s konektory FC – FC, které bylo měřeno pomocí laseru Promax Prolite 80. Zde se naměřené grafy průběhu optické intenzity nejvíce blížily teoretickému grafu Gaussovy funkce. Nejpresnějších výsledků bylo dosaženo pro vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 84$ cm. Snížením vzdálenosti měřiče výkonu od kolimátoru L došlo ke zvýšení odchylek naměřených grafů od grafu teoretické Gaussovy funkce. Změny vlnových délek λ zde neměly výraznější vliv na přesnost grafů. Nižší přesnost byla změřena u mnohomodového optického vlákna GI 62,5/125. Zde se projevila větší odchylka zejména u grafů měřených pro vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 6$ cm. Pro vzdálenost $L = 84$ cm byly výsledky podstatně přesnější, stejně jak tomu bylo u optického vlákna SM 9/125. Nejnížší přesnost byla změřena u mnohomodového optického vlákna GI 50/125. Zde byla nejvyšší odchylka u grafu na obr. 21, což bylo zřejmě způsobeno změnou světelných podmínek během měření v laboratoři. Při měření optického vlákna 62,5/125, kde byl použit optický zdroj LED Promax Prolite 81, již grafy z naměřených hodnot dosahovaly jiných tvarů oproti grafům optických vláken měřených pomocí laseru Promax Prolite 80. Přesto u grafu na obr. 28, který byl měřen pro vzdálenost měřiče výkonu od kolimátoru $L = 84$ cm, byly odchylky od teoretické Gaussovy funkce dost malé.

7 Použitá literatura

- [1] SALEH, B. E. A. *Základy fotoniky*. 1. vyd. Praha: Matfyzpress, 1995. 1055 s. ISBN 80-85863-05-7
- [2] WILFERT, O. *Optoelektronika. Skriptum*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2002. 120 s. ISBN 80-214-2264-5
- [3] SOCHOR, V. *Lasery a koherentní svazky*. Praha: Academia, 1990
- [4] Gaussian function. In *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. [2007] [cit. 2007-10-15]. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Gaussian_function&oldid=180368691>.
- [5] *Internetové stránky společnosti Thorlabs*. [online]. [2009] [cit. 2009-04-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.thorlabs.com>>.

Příloha

Výpis zdrojového kódu z programu Matlab pro vykreslení grafu zobrazujícího rozložení optické intenzity z naměřených hodnot společně s teoretickým počítačovým modelem

```
clear all
close all

% nacti namerene hodnoty vzdálenosti x [mm] z Excelu
x = xlsread('C:\Opticka_vlakna\SM_9_125_L=6cm_1310nm.xls', 'List1',
'A4:A57');
% nacti namerene hodnoty výkonu P [mW] z Excelu
mer1 = xlsread('C:\Opticka_vlakna\SM_9_125_L=6cm_1310nm.xls', 'List1',
'C4:C57');

% cerna krivka v grafu = namerene hodnoty
plot(x,mer1);
set(findobj(gca, 'Type', 'line', 'Color', [0 0 1]), 'Color', 'black')
hold on;

%Zvol hodnoty parametru

% definuj amplitudu gaussovske funkce
[A,I] = max(mer1)
%A = max(mer1);

% definuj x0 (hodnotu na ose x, kde dosahuje funkce maxima)
x0 = x(I);

% Definuj sigma_x (smerodatnou odchylku)
% Cyklus, který vypocita soucet ctvercu odchylek pro sigma_x od 1 do 5 s
% krokem 0.01
row = 1;
for sigma_x = 1:0.01:5

    % definice gaussovy funkce pro 2D graf
    z=A*exp(-.5*((x-x0)/sigma_x).^2);

    % odchylka namerene od teoreticke hodnoty
    error = mer1-z;
    % soucet ctvercu odchylek je ulozen do 2. sloupce matice RSS
    RSS(row,2) = sum(error.^2);
    RSS(row,1) = sigma_x;
    row=row+1;
end

[mRSS,sI] = min(RSS);
% hodnota sigma_x pro kterou je soucet ctvercu odchylek nejmensi
Fsigma_x = RSS(sI(2));

% Hodnoty z s parametrem Fsigma_x, který minimalizuje soucet ctvercu
% odchylek
Fz=A*exp(-.5*((x-x0)/Fsigma_x).^2);

% cervena krivka v grafu: teoreticke hodnoty
plot(x,Fz);
set(findobj(gca, 'Type', 'line', 'Color', [0 0 1]), 'Color', 'red')
hold on;
```

```
% odchylky merenych hodnot od optimalizovanych teoretickych hodnot
Error = mer1-Fz;
bar(x,Error);

% popisy os
xlabel('x [mm]');
ylabel('P [mW]');
```