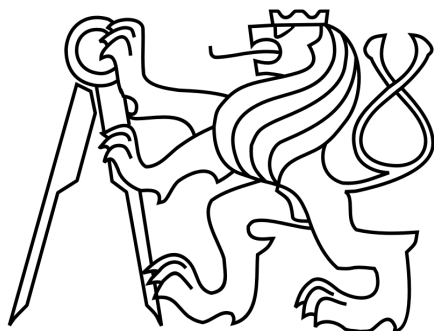


# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra telekomunikační techniky



## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh vazeb zdrojů záření a vláken

Jan Hnaš

Vedoucí práce: Ing. Jan Šístek, Ph.D.

Praha, prosinec 2014

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra telekomunikační techniky

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Jan Hnaš**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika  
Obor: Síťové a informační technologie

Název tématu: **Návrh vazeb zdrojů záření a vláken**

Pokyny pro vypracování:

Pro dva předložené zdroje viditelného záření (HeNe laser a polovodičová laserová dioda) navrhnete účinné vazby do vláken různých geometrií. Využijte optické vybavení (čočky, objektivy, mechanické komponenty) dostupné na katedře.

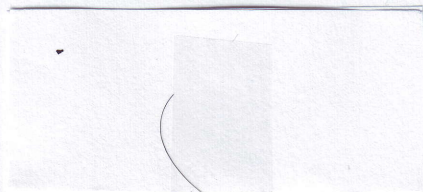
Práce by měla popsat vlastnosti použitých zdrojů, shrnout parametry dostupných zobrazovacích prvků a navrhnout, provést a ověřit účinnou vazbu do křemenných, příp. plastových vláken. Součástí práce je rešerše návrhových postupů.

Seznam odborné literatury:

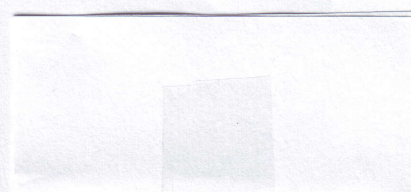
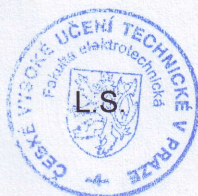
- [1] Novotný, K., Schröfel, J.: Optické vlnovody. Praha, SNTL-ALFA, 1986.
- [2] Novotný, K.: Optická komunikační technika. Praha, Vydavatelství ČVUT, 2007, ISBN: 978-80-01-03920-5.

Vedoucí: Ing. Jan Šístek, Ph.D.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2015/2016



prof. Ing. Boris Šimák, CSc.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 2. 10. 2014

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne .....

Jan Hnaš .....

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Šístkovi, Ph.D. za vedení a trpělivost při psaní této práce a katedře elektromagnetického pole za vypůjčené komponenty a laboratoř, kde jsem mohl provést svá měření.

## **Abstrakt**

Jádrem této bakalářské práce je popis způsobů navazování optického záření do optického vlákna z hlediska návrhu vazební soustavy. Nejprve jsou v práci uvedeny podmínky navázání optického svazku do optického vlákna a následně pomocí vybavení dostupného na katedře elektromagnetického pole ČVUT je praktickou ukázkou pro dva předložené zdroje (He-Ne laser a polovodičová laserová dioda) ověřeno navázání optického svazku do různých typů vláken.

Klíčová slova:

Vazební soustava, optické vlákno, laserová dioda, He-Ne laser

## **Abstract**

The main idea of this bachelor thesis are ways of establishing optical power coupling to an optical fiber. First, we mention the conditions to establish fiber couplings and then using the equipment available at the department of electromagnetic field of CTU is a practical demonstration for two submitted resources (He-Ne laser and laser diode) is verified to establish optical beam into different types of fibers.

Keywords:

Coupling system, optical fiber, laser diode, He-Ne laser

# Obsah

|  |    |
|--|----|
| 1. Úvod .....  | 1  |
| 2. Teorie.....   | 2  |
| 2.1. Optický svazek vystupující z laseru.....                  | 2  |
| 2.2. Podmínky akceptance záření optickým vláknem.....          | 4  |
| 2.3. Vazební soustava .....                                    | 6  |
| 2.4. Transformace Gaussova svazku přes tenkou čočku.....       | 8  |
| 3. Použité komponenty pro vazební soustavu .....               | 11 |
| 3.1. Zdroje laserového záření a jejich parametry .....         | 11 |
| 3.2. Dostupná optická vlákna a jejich parametry .....          | 17 |
| 3.3. Dostupné čočky.....                                       | 18 |
| 3.4. Dostupné sady stavebnic.....                              | 18 |
| 4. Návrh vazební soustavy.....                                 | 21 |
| 4.1. Postup měření .....                                       | 26 |
| 4.2. Výsledek měření .....                                     | 29 |
| 5. Závěr.....  | 31 |
| Seznam literatury.....   | 32 |
| Příloha 1 – Katalogový list LLL-2 He-Ne laser .....            | 33 |
| Příloha 2 – Katalogový list RVM665T-101 str.2 .....            | 34 |
| Příloha 3 – Katalogový list RVM665T-101 str.4 .....            | 35 |
| Příloha 4 – Katalogový list USB Silicon CCD Cameras str.2..... | 36 |
| Příloha 5 – LEOK-3 Optics Experiment Kit str.5 .....           | 37 |
| Příloha 6 – Thorlabs DT12-Manual str.2 .....                   | 38 |

## Seznam použitých zkratk

|       |   |   |
|-------|---|---|
| CCD   | Charge-coupled Device                     | Elektronická součástka pro snímání obrazu           |
| GI    | Graded-index                              | Gradientní profil indexu lomu                       |
| LD    | Laser Diode                               | Laserová dioda                                      |
| MMF   | Multi Mode Fiber                          | Vícevidové vlákno                                   |
| OM    | Optical Multimode                         | Označení optického standardu pro vícevidové vlákno  |
| OS    | Optical Singlemode                        | Označení optického standardu pro jednovidové vlákno |
| SI    | Step-index                                | Skokový profil indexu lomu                          |
| SMA   | Subminiature A                            | Typ konektoru pro optické vlákno                    |
| ST    | Straight Tip                              | Typ konektoru pro optické vlákno                    |
| SMF   | Single Mode Fiber                         | Jednovidové vlákno                                  |
| VCSEL | Vertical-cavity<br>Surface-emitting Laser | Vertikálně vyzařující laserová dioda                |

## Seznam použitých symbolů

|                |  |
|----------------|--|
| $a$            | poloměr jádra vlákna                       |
| $f$            | ohnisková vzdálenost                       |
| $M$            | příčné zvětšení                            |
| $n$            | index lomu                                 |
| $NA$           | numerická apertura                         |
| $R(z)$         | poloměr křivosti svazku ve vzdálenosti $z$ |
| $w(z)$         | poloměr svazku ve vzdálenosti $z$          |
| $w_0$          | poloměr krčku                              |
| $z_0$          | Rayleighova vzdálenost                     |
| $\vartheta$    | úhel divergence                            |
| $\lambda$      | vlnová délka                               |
| $\Theta_{AKC}$ | úhel akceptance                            |

# 1. Úvod

Optoelektronické spoje mají tři nejdůležitější součásti: zdroj (vysílač), vlákno a detektor (přijímač). Pro dosažení velké délky spoje je důležitá účinná vazba vysílací součástky (nejčastěji laserové diody či LED) a vlákna. Problematice vazby dioda-vlákno je věnována tato bakalářská práce.

První kapitola je věnována teorii laserového zdroje, jehož svazek lze popsat pomocí Gaussových svazků. Na druhé straně optické vlákno je schopno přijmout (akceptovat) svazek jen určitých parametrů. Popisu podmínek akceptance je věnována další část a třetí část se zabývá popisem vazební optiky, kdy svazek ze zdroje upravujeme do podoby akceptovatelné vláknem.

V následující praktičtější zaměřené části jsou provedeny návrhy vazebních soustav pro dva předložené zdroje optického záření (He-Ne laser a polovodičová laserová dioda). Budou změřeny a ověřeny jejich parametry pomocí profiloměru svazků a optického wattmetru, následně budou zmíněna dostupná optická vlákna a jejich parametry, dále dostupné čočky a nakonec budou navrženy a proměřeny účinnosti různých vazebních soustav pomocí optických stavebnic nacházejících se na katedře.

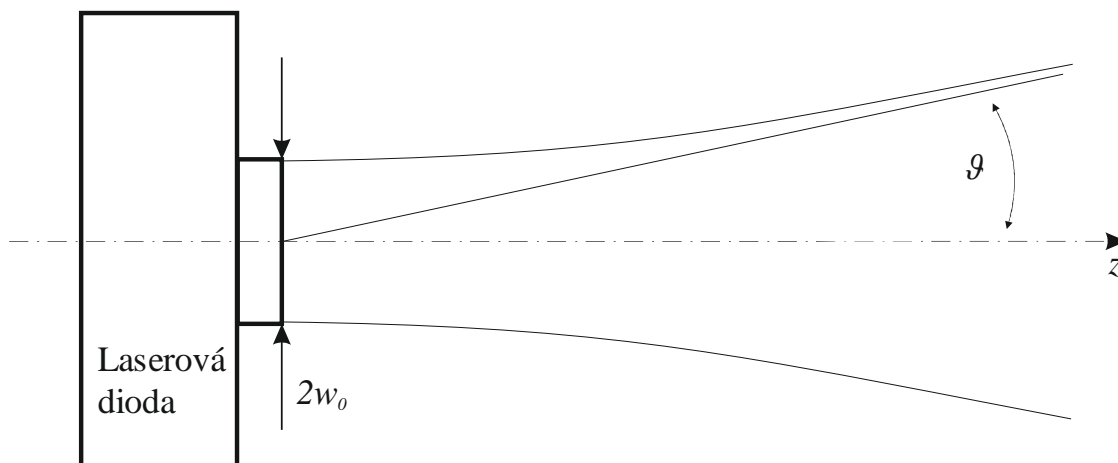


## 2. Teorie

K popisu většiny zdrojů optického záření můžeme využít Gaussových svazků. Jejich základním parametrem bude proto věnována následující kapitola, kde bude nejprve popsán optický svazek vystupující z laseru. V dalších částech budou vytyčeny podmínky pro akceptanci záření optickým vláknem a dále budou zmíněny různé varianty vazebních soustav a bude popsána jednoduchá vazební soustava s tenkou čočkou.

### 2.1. Optický svazek vystupující z laseru

Svazek vystupující z laseru lze dobře popsat pomocí teorie Gaussových svazků. V ideálním případě má svazek kruhově symetrický tvar záření a lze ho popsat pomocí šířky svazku, např. v místě krčku  $2w_0$  a úhlu divergence  $\vartheta$ , což zachycuje obrázek 2.1.1., zde je uvažován svazek, který má nejužší místo (krček) v místě, kde opouští zdroj záření.



Obr.2.1.1. – Ilustrace vystupujícího svazku z laserové diody

V každém příčném průřezu na ose  $z$  dosahuje intenzita maxima. A protože se většina výkonu šíří v oblasti o poloměru  $w(z)$ , tak v souladu s [1] definujeme poloměr svazku  $w(z)$  (známo také jako pološířka nebo šířka svazku) vztahem:

$$w(z) = w_0 \sqrt{\left[1 + \frac{z^2}{z_0^2}\right]} = w_0 \sqrt{\left[1 + \frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right]}, \quad (2.1.1)$$

kde  $z_0$  je Rayleighova vzdálenost,  $w_0$  pološířka krčku a  $\lambda$  je vlnová délka svazku.

Gaussův svazek lze proložit hyperbolou a ve větších vzdálenostech ( $z \gg z_0$ ) svírá tečna k hyperbole s osou  $z$  úhel  $\vartheta$  (viz obrázek 2.1.1.), kterému říkáme divergenční úhel (nebo také úhel rozbíhavosti), je dán vztahem dle [1]:

$$\operatorname{tg} \vartheta \approx \frac{w(z)}{z} = \frac{\lambda}{\pi w_0}. \quad (2.1.2)$$

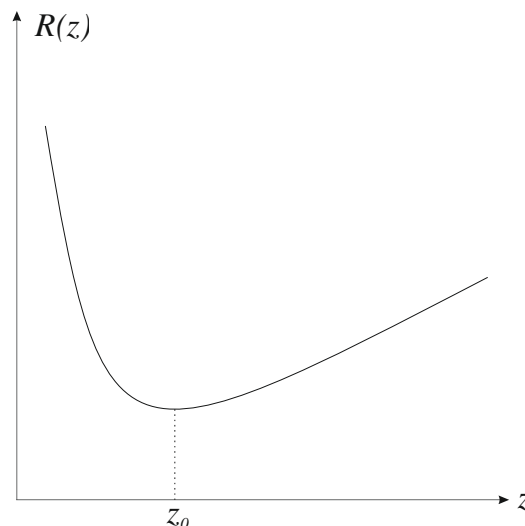
Již výše zmíněná Rayleighova vzdálenost označená jako  $z_0$  je pro popis dalších vlastností svazku velmi důležitá. Pokud budeme uvažovat  $z = z_0$  a dosadíme do rovnice (2.1.1), tak získáme:

$$w(z_0) = w_0 \sqrt{2}. \quad (2.1.3)$$

Jedná se tedy o vzdálenost od nejužšího místa svazku, do místa, kde se poloměr svazku zvětší  $\sqrt{2}$  krát. Tato vzdálenost je klíčová i při určování poloměru křivosti vlnoplochy, což je další důležitý parametr Gaussova svazku. Poloměr křivosti vlnoplochy je matematicky vyjádřit dle [1] rovnicí:

$$R(z) = z \left[ 1 + \frac{z_0^2}{z^2} \right] = z \left[ 1 + \left( \frac{\pi w_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right], \quad (2.1.4)$$

jejíž řešení ilustruje obrázek 2.1.2.



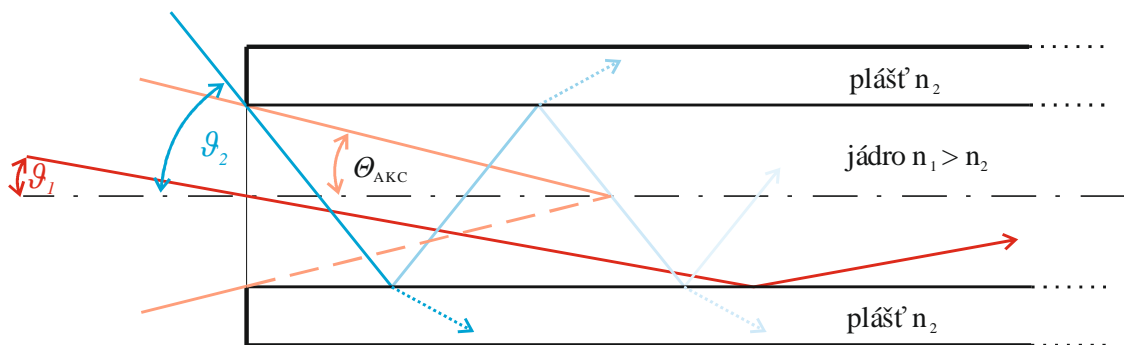
Obr.2.1.2. – Závislost poloměru křivosti vlnoplochy na vzdálenosti  $z$

Z obrázku 2.1.2. je patrné, že poloměr křivosti vlnoplochy se blíží nekonečnu pro  $z = 0$  (odpovídá rovinné vlnoploše) a  $z \rightarrow \infty$  ( $R(z) \approx z \Rightarrow$  vlnoplochy jsou téměř sférické). Závislost  $R(z)$  je pro záporná  $z$  až na znaménko stejná. Minimum závislosti  $R(z)$  nastává v místě kde  $dR/dz = 0$ , což určíme z rovnice (2.1.4) a získáme tak vztah pro Rayleigho vzdálenost:

$$z = z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}. \quad (2.1.5)$$

## 2.2. Podmínky akceptance záření optickým vláknem

Svazek vyzářený zdrojem má být navázán do vlákna. To je možné buď umístěním čela vlákna ke zdroji (třeba čipu laserové diody), anebo mnohem častěji vazební optikou (bude popsána dále). V obou případech však musíme znát podmínky, za jakých se energie do vlákna účinně naváže.



Obr.2.2.1. – Ilustrace úhlu akceptance optického vlákna

Prvním důležitým parametrem dopadajícího svazku je jeho rozbíhavost, resp. spíše sbíhavost, protože za vazební optikou se jedná o svazek sbíhavý. Optické vlákno je schopno vést jen ty paprsky, jejichž odklon od osy je menší než tzv. úhel akceptance. Na obrázku 2.2.1. si lze všimnout, že paprsek označený červeně má odklon od osy menší, než je úhel akceptance (označen oranžovým kuželem), takže se paprsek šíří dále vláknem. Paprsek označený modře má úhel svírající s osou větší než úhel akceptance, takže se při každém odrazu vláknem část jeho energie ztratí v plášti, až paprsek zanikne. Úhel akceptance svázaný s numerickou aperturou je vyjádřen dle [1] matematicky:

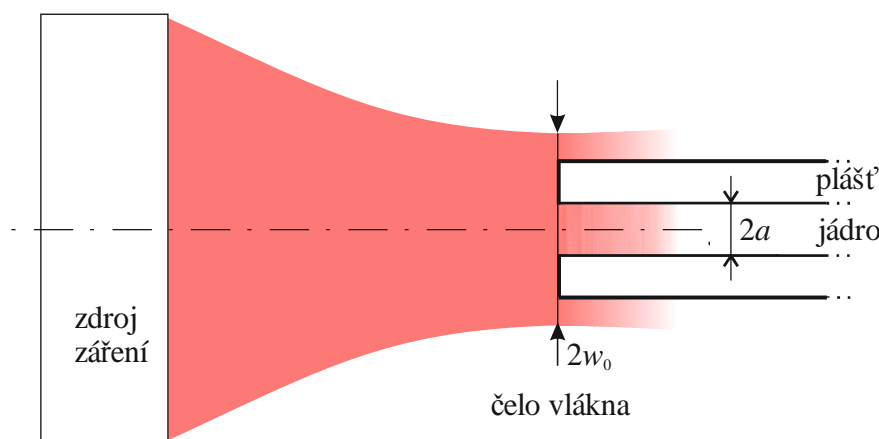
$$NA = n_0 \sin \theta_{AKC} = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}, \quad (2.2.1)$$

kde  $n_0$  je index lomu prostředí (nejčastěji vzduchu), ze kterého paprsek vstupuje do vlákna a  $\Theta_{AKC}$  je úhel akceptance ve stupních, který svírá sbíhající svazek s osou vlákna. Numerickou aperturu lze vypočítat také pomocí indexů lomu materiálu vlákna, kde  $n_1$  je index lomu jádra a  $n_2$  je index lomu pláště. Numerická apertura nabývá hodnot od 0 do 1, čemuž odpovídá úhel akceptance ve stupních od  $0^\circ$  do  $90^\circ$ . Používané typy vláken a jejich základní parametry jsou uvedeny v tabulce 2.2.1.

| Typ vlákna  | NA [-] | Průměr jádra [ $\mu\text{m}$ ] | Profil indexu lomu |
|-------------|--------|--------------------------------|--------------------|
| OS1/OS2     | 0,13   | 9                              | SI                 |
| OM1         | 0,28   | 62,5                           | GI                 |
| OM2/OM3/OM4 | 0,2    | 50                             | GI                 |

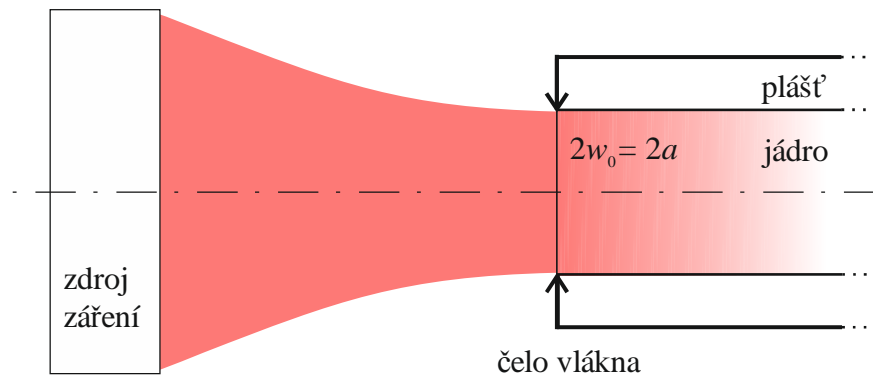
Tab.2.2.1. – Parametry hlavních skupin vláken

Dalším důležitým parametrem je průměr jádra. Průměr svazku v místě čela vlákna nesmí být větší, než průměr jádra, jinak dojde k přezáření jádra a část energie se ztratí např. v plášti nebo dopadne mimo vlákno viz. obrázek 2.2.2.



Obr.2.2.2. – Přezářené čelo vlákna

Správná situace nastává, pokud má dopadající svazek v místě čela vlákna šířku, která je menší nebo rovna šířce jádra. Limitní situaci, kdy je šířka svazku a šířka jádra stejná, zobrazuje obrázek 2.2.3.



Obr.2.2.3. – Limitní situace – stejná šířka svazku a jádra v místě čela vlákna

Pro akceptanci svazku vláknem pak musí platit, z celé kapitoly vyplývající, dvě podmínky:

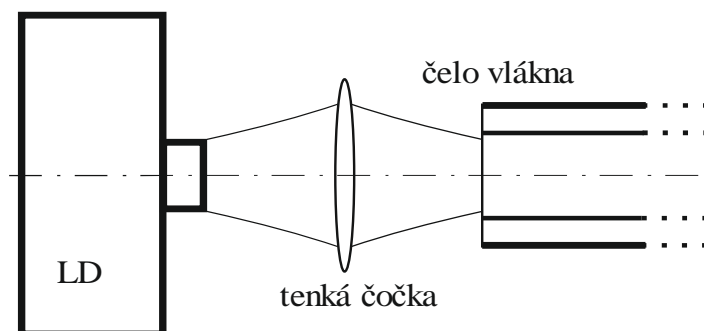
$$2w_0 \leq 2a, \quad (2.2.2)$$

$$\vartheta \leq \Theta_{AKC}, \quad (2.2.3)$$

kde  $a$  je poloměr jádra vlákna.

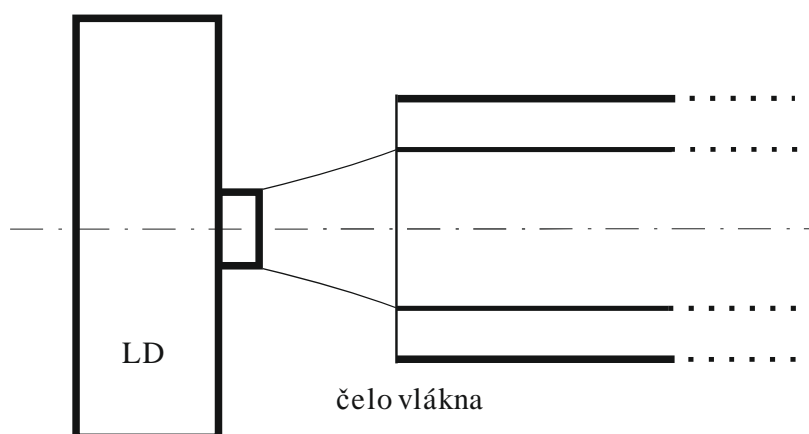
## 2.3. Vazební soustava

Z předchozích kapitol již známe parametry vystupujícího svazku ze zdroje záření a podmínky, kdy je optické záření akceptováno a vedeno optickým vláknem. Zbývá už jen upravit svazek tak, aby při výstupu z vazební optiky měl potřebné vlastnosti pro navázání do optického vlákna. Následující části jsou nejprve věnovány popisu různých metod řešení vazebních soustav v souladu s [4] a následně bude delší část věnována popisu jednoduchého řešení vazební soustavy s tenkou čočkou, což je zachyceno na obrázku 2.3.1. Tyto metody se týkají vazby polovodičové diody a vlákna.



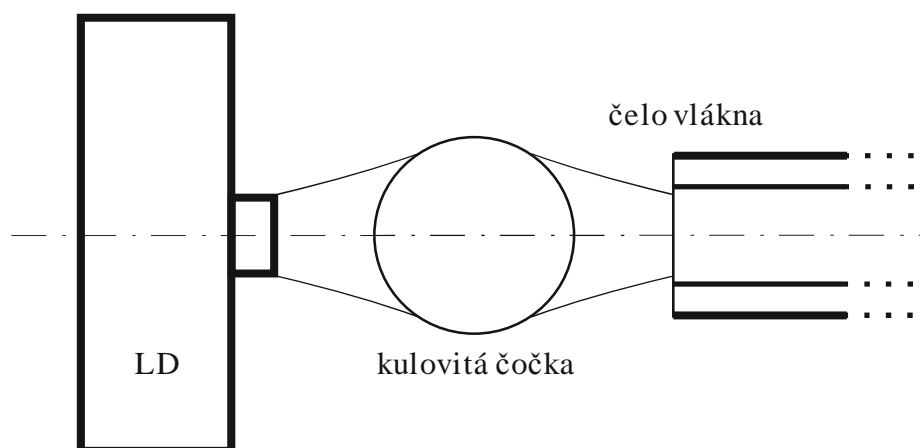
Obr.2.3.1. – Přizpůsobení šířky svazku přes vazební čočku

Přímá vazba zdroj - vlákno, v našem případě laserová dioda a vlákno, se používá v aplikacích, kde lze docílit šířky optického svazku v místě čela vlákna menší nebo rovnu šířce jádra vlákna (obrázek 2.3.2.). Je nezbytně nutné zajistit vždy co nejmenší vzdálenost mezi místem vyústění svazku (čipem – u laserových diod) a vláknem, aby vzhledem k rozbíhavosti svazku nedošlo přezáření jádra. Přímá vazba zdroj – vlákno je účinná zejména pro vícevidová vlákna, která mají větší průměr jádra než vlákna jednovidová.



Obr.2.3.2. – Přímá vazba zdroj - vlákno

Lepší způsob, jak docílit větší účinnosti vazby, je použití čočky nebo mikročočky, což zachycuje obrázek 2.3.3. V praxi se nejčastěji používá kulovitá mikročočka (zejména pro jednovidová vlákna), která se umísťuje přímo na emitující vrstvu a dioda se většinou zhotovuje už s „pigtailem“ nebo je zabudována do zařízení pro připojení konektoru jak je uvedeno v [2].

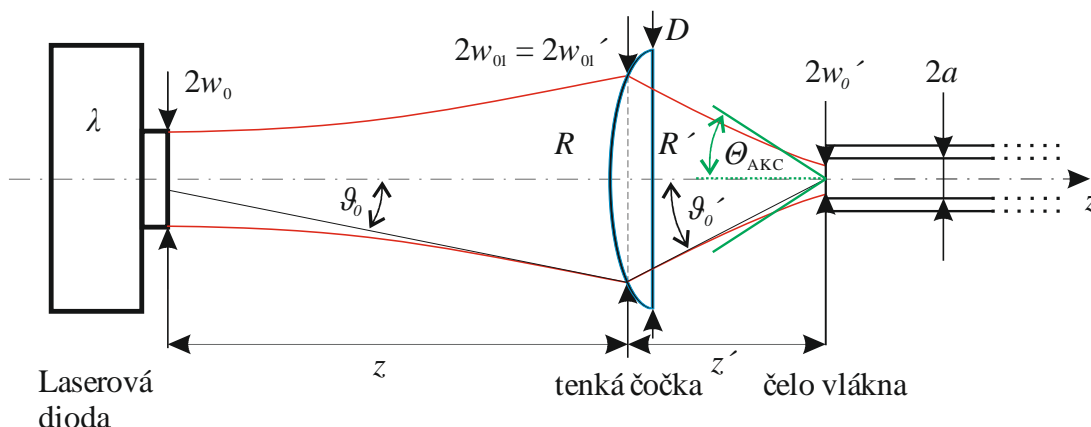


Obr.2.3.3. – Vazební soustava s kulovitou čočkou

Další možností vazby, je už výše zmíněné, použití čočky. Oproti variantě s kulovitou čočkou je tato metoda méně účinná, ale vzhledem k vybavení na katedře (byla použita i v experimentu) je dostupná a je možné si vybrat z většího množství čoček. Abychom byli schopni určit vliv čočky na svazek, je třeba analyzovat průchod svazku čočkou. V následující podkapitole bude popsána transformace Gaussova svazku přes související tenkou čočku, kdy je pro zjednodušení zanedbatelná tloušťka čočky.

## 2.4. Transformace Gaussova svazku přes tenkou čočku

Při průchodu optického svazku tenkou čočkou je třeba uvažovat vlnový charakter Gaussova svazku. V souladu s [6] dojde ke změně křivosti poloměru vlnoplochy, šířka svazku se však nezmění, celou situaci ilustruje obrázek 2.4.1. Parametry prošlého svazku budou označeny čárkou ( $w_{01}'$ ,  $R'$  apod.).



Obr.2.4.1. – Vazební soustava s tenkou čočkou

Prošlý optický svazek je i nadále Gaussovým svazkem se šířkou  $2w_{01}' = 2w_{01}$ , přičemž pro poloměry křivosti  $R'$  a  $R$  platí dle [6] vztah:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{R} - \frac{1}{R'}, \quad (2.4.1)$$

kde  $f$  je ohnisková vzdálenost tenké čočky.

Vzhledem k tomu, že je dopadající vlna na tenkou čočku divergentní (rozbíhavá), tak si lze všimnout, že je kladné znaménko u  $R$ , zatímco u konvergentní (sbíhavé) prošlé vlny

je u  $R'$  znaménko záporné. Z vypočteného příkladu, který je uveden v [6] lze určit pološířku transformovaného svazku vztahem (2.4.2):

$$w_0' = \frac{w_{01}}{\sqrt{\left[1 + (\pi w_{01}^2 / \lambda R')^2\right]}}, \quad (2.4.2)$$

přičemž se tato pološířka nachází (vpravo od čočky – znaménko mínus) ve vzdálenosti

$$-z' = \frac{R'}{1 + (\lambda R' / \pi w_{01}^2)^2}. \quad (2.4.3)$$

Dosazením rovnic (2.1.1) a (2.1.4) z předchozích kapitol do (2.4.1) a (2.4.3), získáme v souladu s [6] hned několik vztahů pro dopadající a prošlý svazek. Zde budou zmíněny jen ty nejdůležitější pro náš experiment, který bude proveden v dalších kapitolách.

Pološířka v krčku:

$$w_0' = M w_0, \quad (2.4.4)$$

poloha krčku:

$$(z' - f) = M^2 (z - f), \quad (2.4.5)$$

úhlová divergence:

$$2g_0' = \frac{2g_0}{M}, \quad (2.4.6)$$

příčné zvětšení:

$$M = \frac{M_r}{\sqrt{1 + r^2}}, \quad (2.4.7)$$

kde,

$$r = \frac{z_0}{z - f}, \quad (2.4.8)$$

$$M_r = \left| \frac{f}{z - f} \right|. \quad (2.4.9)$$

Příčné zvětšení  $M$  hraje velmi důležitou roli při určování parametrů prošlého optického svazku. Jak si lze všimnout ze vztahu (2.4.8), hodnota  $M$  je závislá na parametrech



optického zdroje záření (šířky optického svazku v místě vyústění svazku a vlnové délce), na vzdálenosti mezi zdrojem záření a čočkou a na ohniskové vzdálenosti použité čočky. Parametry optického zdroje záření ovlivnit nelze (s variantou jednočočkové vazební soustavy), při návrhu vazební soustavy je tedy tato možnost vyloučena.

Shrnutí podmínek výběru vazební čočky pro navázání transformovaného optického svazku do vlákna:

$$w_0' \leq a, \quad (2.4.10)$$

pološířka svazku  $w_0'$  v místě čela vlákna musí být menší nebo rovna poloměru jádra vlákna  $a$ , dle (2.2.2),

$$2w_{01} \leq D, \quad (2.4.11)$$

šířka svazku  $2w_{01}$  v místě čočky musí být menší nebo rovna průměru čočky  $D$ , jinak by došlo k přezáření čočky a část energie optického svazku by byla vyzářena do okolí,

$$\vartheta_0' \leq \Theta_{AKC}, \quad (2.4.12)$$

úhel divergence  $\vartheta_0'$  za čočkou musí být menší nebo roven úhlu akceptance  $\Theta_{AKC}$  vlákna, do kterého je optický svazek navazován, tato podmínka vychází z (2.2.3).

### 3. Použité komponenty pro vazební soustavu

Po předchozím uvedení všech potřebných teoretických znalostí a vytyčení podmínek pro účinnou vazební soustavu budou následující kapitoly praktičtěji zaměřeny. V první části budou popsány, změřeny a ověřeny parametry dvou dostupných laserů. Následně budou zmíněna dostupná optická vlákna s různými průměry jader a vlastnostmi a seznam dostupných čoček na katedře, a nakonec budou představeny dostupné sady stavebnic.

#### 3.1. Zdroje laserového záření a jejich parametry

Pro vhodnou konfiguraci a uspořádání vazební soustavy je nezbytné znát parametry vystupujícího svazku ze zdroje optického záření. Pro tyto účely bude stačit popis pomocí šířky svazku v místě vyústění svazku dle vztahu (2.1.1), úhlu divergence dle (2.1.2) a vyzářeného výkonu. Tyto parametry byly změřeny u dvou dostupných laserů pomocí USB CCD profiloměru typu SP620U od firmy Spiricon a wattmetru PM100D od firmy Thorlabs a následně ověřeny dle katalogových údajů udané výrobcem.

##### He-Ne laser

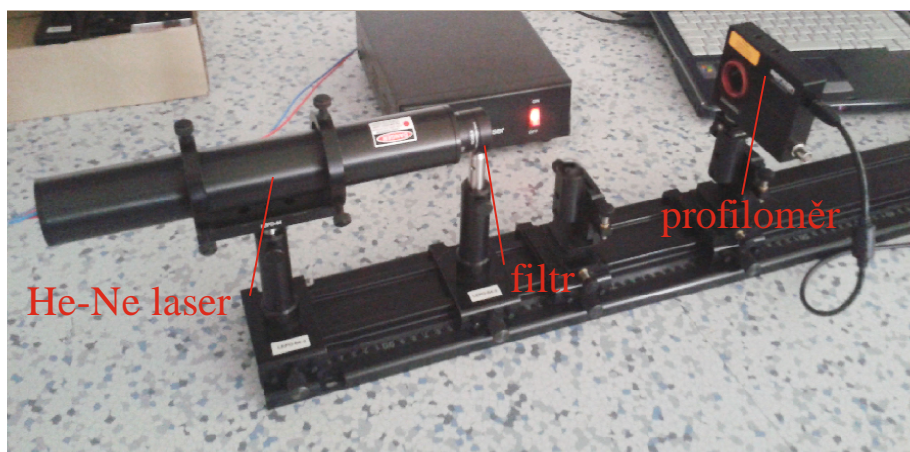
Helium-neonový laser generující červené světlo o vlnové délce  $632\text{ nm}$  od firmy Lambda Scientific, patří mezi nejznámější plynové lasery. Vyzařující paprsek se u tohoto laseru vyznačuje vysokou stabilitou frekvence a velice malou rozbíhavostí. Tento laser se využívá primárně pro studijní účely.



*Obr.3.1.1. – He-Ne laser se stabilizovaným zdrojem*

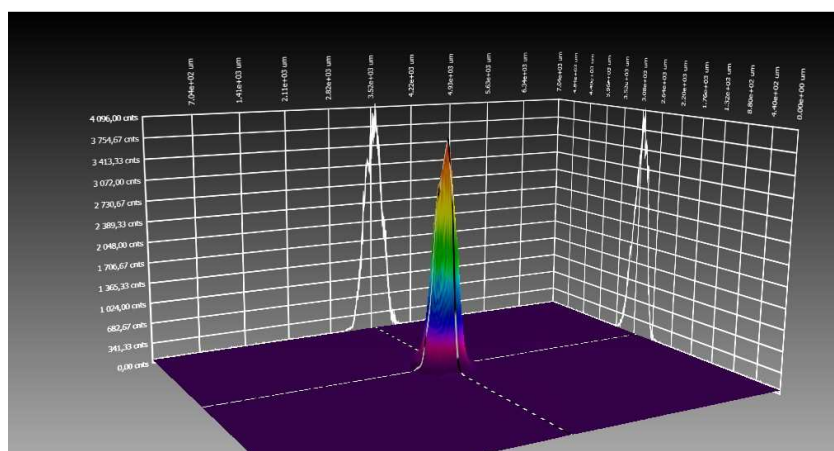
## Ověření parametrů optického svazku He-Ne laseru

He-Ne laser je určen pro měření se stavebnicemi od firmy Lambda Scientific, proto byla zvolena sada LEOK. Laser byl upevněn na kolejnici a před něj byl na pojezd umístěn CCD profiloměr. Vzhledem k velkému vyzařujícímu výkonu laseru byl mezi komponenty vložen ještě 30 dB filtr ze stavebnice Thorlabs, kvůli ochraně čipu profiloměru. Rozmístění prvků zobrazuje obrázek 3.1.2.

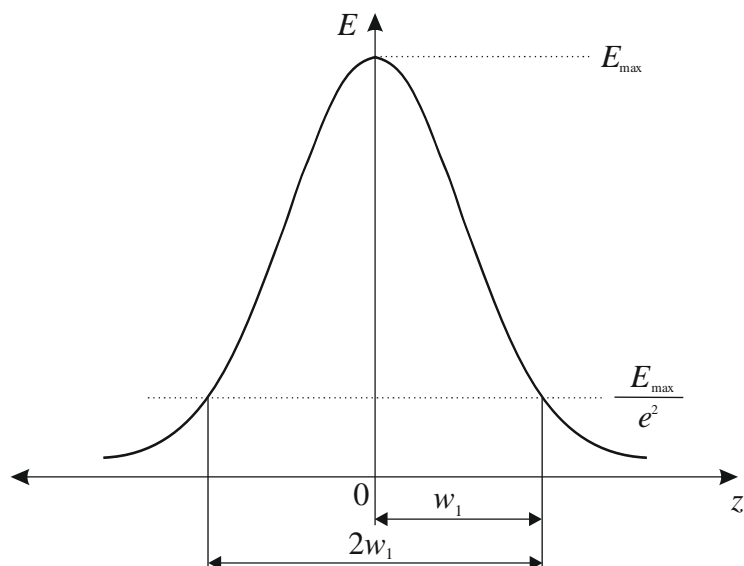


Obr.3.1.2. – Měření parametrů He-Ne laseru

Nejprve byla proměřena šířka svazku ve dvou vzdálenostech od laseru. Na obrázku 3.1.3. je zachycen 3D svazek ze softwaru BeamGage dodávaného k profiloměru. Teplejší barvy reprezentují vyšší hladiny výkonové hustoty, zatímco barvy studenější hladiny nižší. Obrázek zachycuje i průměty svazku vyznačeného ve dvou rovinách, ze kterých lze změřit šířky svazku. Šířka svazku se měří pro pokles maximální hodnoty energie na hodnotu  $1/e^2$  viz. obrázek 3.1.4.

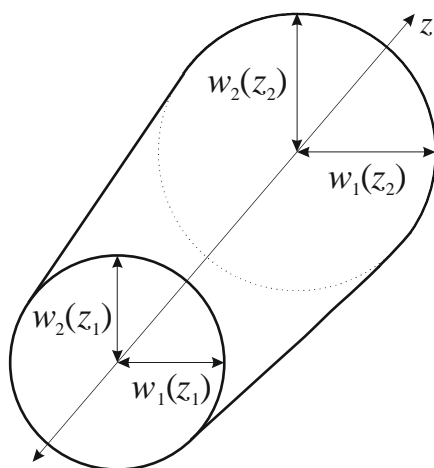


Obr.3.1.3. – Ilustrativní profil svazku ze softwaru BeamGage zachycený profiloměrem



Obr.3.1.4. – Měření šířky Gaussova svazku v řezu v jedné rovině

Vzhledem k velikosti předřadného filtru bylo možné umístit profiloměr nejbližší k laseru do vzdálenosti  $z_1 = 22 \text{ mm}$  a v tomto místě byla změřena pološířka svazku  $w_1$  v jedné rovině, a ve druhé rovině pološířka svazku  $w_2$  viz. obrázek 3.1.5. Výsledky se lišily zhruba o  $2 \mu\text{m}$  (zanedbatelné vzhledem k rozlišení CCD čipu profiloměru viz. příloha [4]), tedy výsledná hodnota pološířky svazku byla průměrem změřených hodnot a zároveň byla označena jako pološířka krčku  $w_0$  pro návrh vazební soustavy v dalších kapitolách.



Obr.3.1.5. – Ilustrace měření pološířky svazku ve dvou rovinách ve vzdálenostech  $z_1$  a  $z_2$

Protože měl laser malou rozbíhavost, tak byl profiloměr odsunut do vzdálenosti  $z_2 = 198 \text{ mm}$ , kde bylo stále zaručeno, že čip profiloměru nebude přezářen, opět byla

změřena šířka svazku stejným způsobem. Úhel divergence byl vypočten podle vztahu (2.1.2) následovně:

$$\operatorname{tg} \vartheta \approx \frac{w(z)}{z} = \frac{w(z_2) - w(z_1)}{z_2 - z_1}. \quad (3.1.1)$$

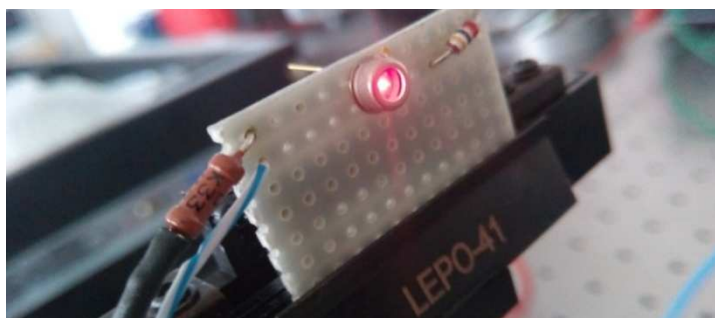
Na závěr byl místo filtru co nejlíže k laseru umístěn senzor wattmetru PM100D a byl změřen vyzářený optický výkon. V tabulce 3.1.1 jsou uvedeny naměřené a vypočtené hodnoty, společně s hodnotami udané výrobcem, v příloze [1].

|                      | $z$ [mm] | $w_1$ [ $\mu\text{m}$ ] | $w_2$ [ $\mu\text{m}$ ] | $\bar{w}$ [ $\mu\text{m}$ ] | $\vartheta$ [mrad] | $P$ [mW] |
|----------------------|----------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------|----------|
| Změřené parametry    | 22       | 299                     | 301                     | 300                         | 0,2                | 2,3      |
|                      | 198      | 335                     | 333                     | 334                         |                    |          |
| Parametry od výrobce | -        | -                       | -                       | -                           | < 0,65             | 1-2,5    |

Tab.3.1.1. – Srovnání naměřených a výrobcem udaných parametrů HeNe laseru

## Laserová dioda RVM665T-101

Červená laserová dioda RVM665T-101 s vlnovou délkou 665  $\mu\text{m}$ , je typu VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers), což znamená, že vyzářující paprsek je rovnoběžný s aktivní vrstvou. Dioda je určena na vysokorychlostní komunikace po vícevidových křemenných či plastových vláknech. Důležité parametry diody vyjmuté z katalogového listu jsou uvedeny v příloze [2].

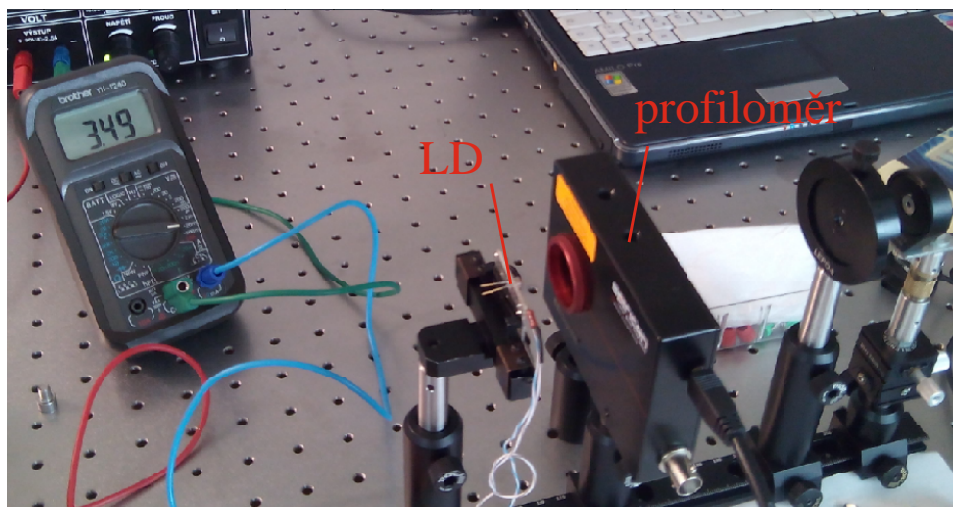


Obr.3.1.6. – Polovodičová laserová dioda typu RVM665T-101

## Ověření parametrů optického svazku laserové diody

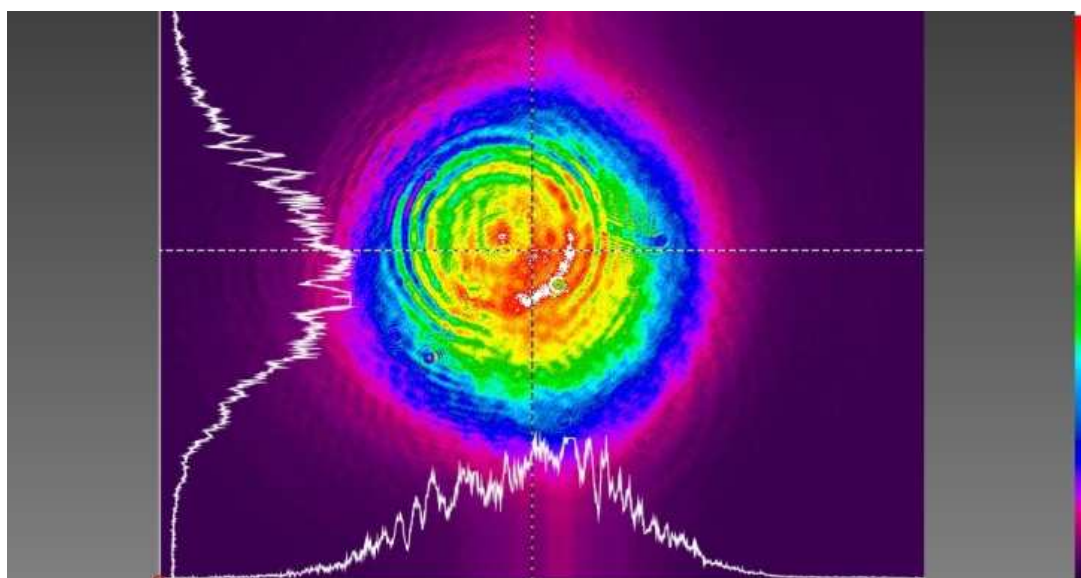
Proud diodou by měl být větší než prahový a i přesto, že je dioda opatřena ochranným rezistorem, by měl být menší než maximální možný. V souladu s katalogovými listy v příloze [2], byl zvolen proud  $I_d = 3,50 \text{ mA}$ . Nejprve byla změřena úhlová divergence

a to tak, že vzhledem k velké divergenci svazku byla dioda umístěna do těsné blízkosti společně s profiloměrem, což zachycuje obrázek 3.1.7.



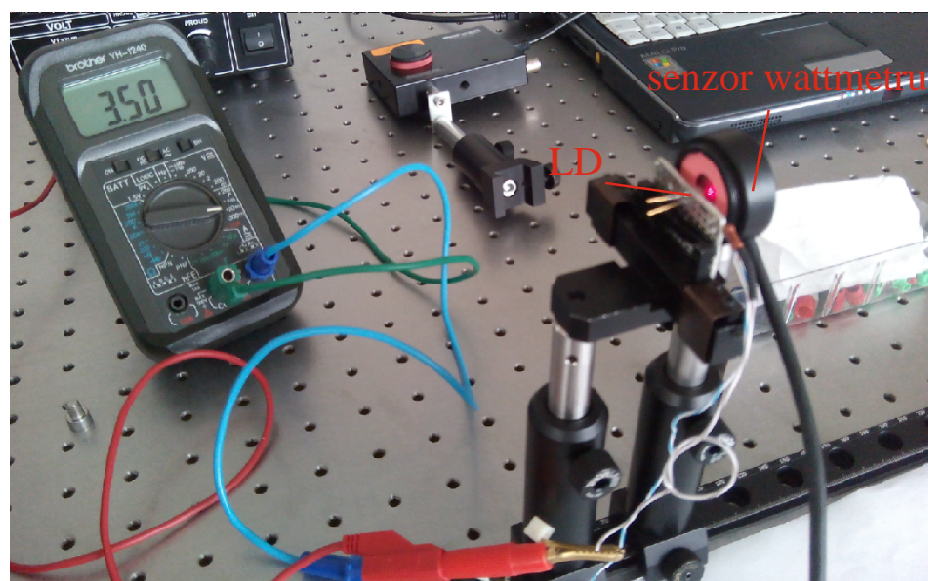
*Obr.3.1.7. – Měření úhlové divergence polovodičové diody*

Posuvným měřítkem byla změřena vzdálenost mezi diodou a čipem profiloměru  $z_1 = 10,2 \text{ mm}$  a tomuto místu odpovídá už zprůměrovaná hodnota pološířky svazku  $w_1 = 1200 \mu\text{m}$ . Následně byl profiloměr posunut tak, aby vzhledem k velké divergenci nedošlo k přezáření čipu profiloměru, jehož rozměry jsou dle katalogových listů uvedeny v příloze [4]  $7,1 \text{ mm Š} \times 5,4 \text{ mm V}$ , umístěn byl do vzdálenosti  $z_2 = 20,2 \text{ mm}$ , svazek v tomto místě, s pološířkou  $w_2 = 2590 \mu\text{m}$ , je znázorněn na obrázku 3.1.8.



*Obr.3.1.8. – Stopa svazku polovodičové laserové diody ve vzdálenosti od laseru  $z_2 = 20,2 \text{ mm}$*

Na obrázku 3.1.8. lze vidět 2D svazek, kde jsou zachyceny průměty svazku do dvou rovin, ze kterých lze změřit šířku. Teplejší barvy opět symbolizují vyšší hodnoty výkonové hustoty, studenější hodnoty nižší. Na obrázku si lze všimnout, že pokles od maxima k minimu není monotónní, ale hustota výkonu klesá s určitým zvlněním. To je dáno vysoce monochromatickým charakterem zdroje záření, kdy útlumové filtry na profiloměru kvůli neúplné rovnoběžnosti obou ploch (čelní a zadní) vytvářejí interferenční obrazce. Úhlová divergence polovodičové laserové diody byla určena stejným způsobem jako u He-Ne laseru podle vztahu (3.1.1). Pro měření výkonu vyzařujícího svazku bylo nutné opět umístit senzor wattmetru PM100D co nejbližže k laserové diodě viz. obrázek 3.1.9. Při zapnutí laserové diody bylo nutné počkat určitou dobu, než dojde k ustálení teploty a proudu diodou na  $I_d = 3,50 \text{ mA}$ , teprve pak bylo možné měřit výkon svazku. Tento krok byl opakován celkem čtyřikrát, vždy s dobou ustálení 3 minuty, výsledky byly pro všechna opakování shodné.



Obr.3.1.9. – Měření výkonu polovodičové laserové diody

Z rozbíhavosti svazku podle vztahu (2.1.2) byla určena minimální pološířka  $w_0 = 1,5 \mu\text{m}$ . Všechny změřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.1.2., kde jsou uvedeny i údaje z katalogových listů od výrobce, viz. příloha [2].

|                      | $z$ [mm] | $w_1$ [ $\mu\text{m}$ ] | $w_2$ [ $\mu\text{m}$ ] | $\bar{w}$ [ $\mu\text{m}$ ] | $\vartheta$ [rad] | $P$ [mW]  |
|----------------------|----------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------|-----------|
| Změřené parametry    | 10,2     | 1195                    | 1205                    | 1200                        | 0,14              | 1,15      |
|                      | 20,2     | 2586                    | 2594                    | 2590                        |                   |           |
| Parametry od výrobce | -        | -                       | -                       | -                           | 0,09-0,14         | 0,6 - 1,2 |

Tab.3.1.2. – Srovnání naměřených a výrobcem udaných parametrů laserové diody

### 3.2. Dostupná optická vlákna a jejich parametry

Pro účinné navázání optického svazku do vlákna je nutné znát parametry dostupných vláken. Na katedře je k dispozici několik typů optických vláken různých délek a vlastností. Snažili jsme se vybrat vlákna delších délek (s výjimkou vláken s jádry nad 200  $\mu\text{m}$ ) tak, aby eventuální vidy v plášti vymizely, čímž bude ověřena skutečná vazební účinnost. Bylo vybráno celkem 6 vláken s průměry jader 9, 50, 62,5, 200, 600 a 975  $\mu\text{m}$  a konektory typu ST/PC nebo SMA. U vícevidových vláken s průměry jader 50 a 62,5  $\mu\text{m}$ , které byly dlouhé několik desítek metrů, což by mohlo negativně ovlivnit výsledek měření, byl změřen útlum pomocí výše zmíněného wattmetru PM100D a následně byl touto hodnotou v další kapitole výsledek korigován. V tabulce 3.2.1. je seznam dostupných použitých optických vláken a jsou zde uvedeny jejich důležité parametry.

| Průměr jádra [ $\mu\text{m}$ ] | Průměr pláště [ $\mu\text{m}$ ] | NA [-] | Délka [m] | Útlum [dB] | Typ vlákna              | Profil jádra |
|--------------------------------|---------------------------------|--------|-----------|------------|-------------------------|--------------|
| 9                              | 125                             | 0,14   | 100       | < 0,1      | SMF, SMF-28             | SI           |
| 50                             | 125                             | 0,2    | 30        | 0,3        | MMF, OM3                | SI           |
| 62,5                           | 125                             | 0,28   | 100       | 1,1        | MMF, OM1                | GI           |
| 200                            | 210                             | 0,22   | 2         | < 0,1      | MMF (pro spec. použití) | SI           |
| 600                            | 630                             | 0,22   | 2         | < 0,1      | MMF (pro spec. použití) | SI           |
| 975                            | 1000                            | 0,5    | 1         | 0,2        | MMF, POF                | GI           |

Tab.3.2.1. – Seznam dostupných optických vláken a jejich parametry



### 3.3. Dostupné čočky

Pro transformaci optického svazku bylo k dispozici několik čoček, které mají různé ohniskové vzdálenosti a geometrické vlastnosti. Dostupné čočky od firmy Thorlabs jsou typu plano-konvexní s antireflexní úpravou pro viditelnou oblast optického záření. Čočky od firmy Lambda Scientific jsou typu bikonvexní bez antireflexní úpravy. Seznam všech dostupných čoček, s jejich průměry  $D$  a ohniskovými vzdálenostmi  $f$ , je v tabulce 3.3.1.

|                   |          |      |      |      |      |      |     |       |     |      |      |
|-------------------|----------|------|------|------|------|------|-----|-------|-----|------|------|
| Thorlabs          | $f$ [mm] | +300 | +200 | +150 | +100 | +50  | +30 | +25,4 |     |      |      |
|                   | $D$ [mm] | 25,4 | 25,4 | 25,4 | 25,4 | 25,4 | 6   | 25,4  |     |      |      |
| Lambda Scientific | $f$ [mm] | +300 | +225 | +190 | +150 | +70  | +50 | +45   | +15 | +6,2 | +4,5 |
|                   | $D$ [mm] | 36   | 36   | 36   | 36   | 36   | 36  | 36    | 36  | 6    | 6    |

Tab.3.3.1. – Seznam dostupných čoček - jejich průměry a ohniskové vzdálenosti

### 3.4. Dostupné sady stavebnic

Na katedře jsou k dispozici dvě sady stavebnic, díky kterým lze realizovat různá optická měření. Základním prvkem každé sady je kolejnice, na které je zakreslena měřící osa s rozlišením 1 mm. Na kolejnici se umísťují pojezdy, do kterých lze uložit různé optické a mechanické komponenty např. čočky, zrcadla, polovodičové lasery, optická vlákna apod. Při kombinaci obou sad je nutné použít redukce ve šroubení, protože v tomto ohledu nejsou sady kompatibilní.

#### Thorlabs

Sada od firmy Thorlabs je díky malým rozměrům pojezdů vhodná pro komponenty umístěné blízko sebe např. pro čočky velmi malých ohniskových vzdáleností. Proto byla tato sada zvolena pro měření rozbíhavosti svazku polovodičové laserové diody RVM665T-101, kterou bylo nutné vzhledem k velké rozbíhavosti svazku, umístit co nejbližší k CCD profiloměru. Pro měření byla použita 300 mm optická kolejnice (typ RLA300/M) viz obrázek 3.1.7. z předchozí podkapitoly 3.1. Před umístěním komponent na kolejnici je nutné sestavit pojezd s držákem (k dispozici jsou libovolné délky držáků) nebo pojezd spolu s držákem a prvkem, který zajišťuje posuv do určitého směru i více směrů, a teprve pak nasadit na kolejnici. V této sadě je k dispozici lineární posuvník, který umožňuje

posuv do všech třech os XYZ. Jinak konstrukčně upravený, než na obrázku 3.4.1., byl v experimentu využit při umístění čela vlákna do nejužšího místa prošlého optického svazku.



*Obr.3.4.1. – XYZ lineární posuvník ze sady Thorlabs – převzato z přílohy [6]*

## **LEOK**

Stavebnice LEOK od firmy Lambda Scientific slouží spíše studijním účelům a oproti sadě Thorlabs je více robustnější a hodí se pro umístění komponent větších rozměrů. V experimentu byla použita 1 m dlouhá optická kolejnice viz. obrázek 3.4.2.



*Obr.3.4.2. – Optická kolejnice ze sady LEOK – převzato z přílohy [5]*

Na kolejnici se umisťují většinou už zabudované držáky (různých délek) v pojezdu, do kterých se vkládají sloupky s optickými komponenty. V sadě jsou 3 typy držáků, prvním je statický držák, který slouží pouze k uchycení sloupek pomocí šroubku, tím se dá

nastavit poloha ve vertikálním směru, ale velice nepřesně. Další typ držáku umožňuje kromě uchycení, lineární posuv v ose kolmé na osu směru pohybu pojezdů. Třetí typ držáku, který je na obrázku 3.4.3. na rozdíl od předešlého, umožňuje navíc lineární posuv ve vertikální poloze a vzhledem k nejvíce možnostem pohybu, byl použit v experimentu pro uchycení čočky a konce optického vlákna. Celý katalogový list sady LEOK lze nalézt v příloze [5].



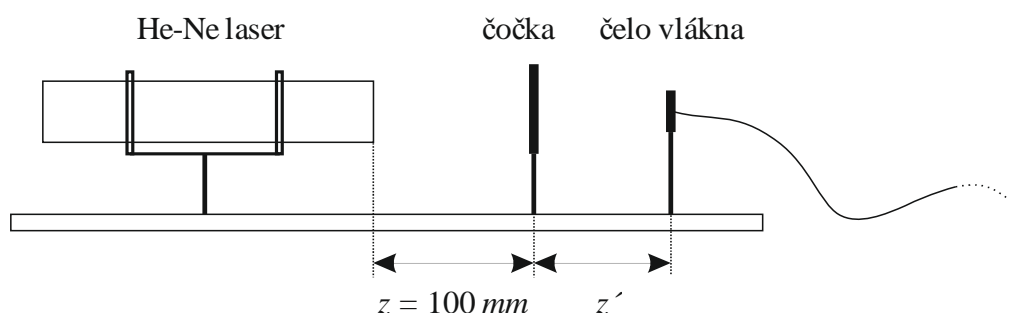
*Obr.3.4.3. – Pojezd s držákem umožňující pohyb do dvou směrů – převzato z přílohy [5]*

## 4. Návrh vazební soustavy

Parametry optického svazku vycházejícího ze zdroje záření jsou již známy, stejně jako i parametry optického vlákna a podmínky, za kterých je do něj svazek navázán, je tedy nutné vybrat z dostupných čoček tu nejvhodnější. Nejprve budou pro oba zdroje optického záření navrženy a následně proměřeny různé varianty vazebních soustav.

### Návrh vazební soustavy s He-Ne laserem

Vzhledem k malé divergenci ( $\vartheta_0 = 0,2 \text{ mrad}$ ) He-Ne laseru a pro lepší manipulaci s vazební čočkou, v souladu s podmínkou (2.4.11), byla určena konstantní vzdálenost  $z = 100 \text{ mm}$ , mezi laserem a čočkou viz. obrázek 4.1. Následně byly určeny parametry prošlého svazku pro všechny dostupné čočky pomocí vytvořeného výpočetního aparátu v Excelu podle rovnic (2.4.4) až (2.4.9) a z těchto výsledků bylo možné určit, která čočka je vhodná pro konkrétní vlákno. Pro optický svazek z He-Ne laseru s pološířkou krčku  $w_0 = 300 \mu\text{m}$ , bude na následujících řádcích proveden ukázkový výpočet parametrů prošlého svazku čočkou o ohniskové vzdálenosti  $f = 150 \text{ mm}$ .



Obr.4.1. – Návrh vazební soustavy s He-Ne laserem

Stěžejním parametrem pro určení vlastností prošlého svazku je příčné zvětšení  $M$ , které se vypočítá podle vztahu (2.4.7), k tomu je ale potřeba nejprve určit vztahy (2.1.5), (2.4.8) a (2.4.9). Z počátku určíme Rayleighovu vzdálenost podle (2.1.5):

$$z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} = \frac{\pi \cdot (300 \cdot 10^{-6})^2}{632 \cdot 10^{-9}} \approx 0,447 \text{ m}, \quad (4.1.)$$

dosadíme do rovnice (2.4.8) a získáme:

$$r = \frac{z_0}{z - f} = \frac{0,447}{0,1 - 0,15} = -8,94, \quad (4.2)$$

následně vypočítáme rovnicí (2.4.9):

$$M_r = \left| \frac{f}{z-f} \right| = \left| \frac{0,15}{0,1-0,15} \right| = 3, \quad (4.3)$$

nyní výsledky z rovnic (4.2) a (4.3) dosadíme do rovnice příčného zvětšení (2.4.7):

$$M = \frac{M_r}{\sqrt{1+r^2}} = \frac{3}{\sqrt{1+(-8,94)^2}} \approx 0,333, \quad (4.4)$$

z rovnice (4.4) lze nyní určit důležité parametry prošlého svazku pro navázání do optického vlákna. Po dosazení do rovnice (2.4.4) je určena pološířka krčku:

$$w_0' = M w_0 = 0,333 \cdot 300 \cdot 10^{-6} = 99,96 \mu\text{m}, \quad (4.5)$$

který se nachází ve vzdálenosti od čočky podle (2.4.5):

$$z' = M^2(z-f) + f = 0,333^2 \cdot (0,1-0,15) + 0,15 \approx 144,46 \text{ mm}, \quad (4.6)$$

a podle vztahu (2.4.6) má tento svazek úhel divergence:

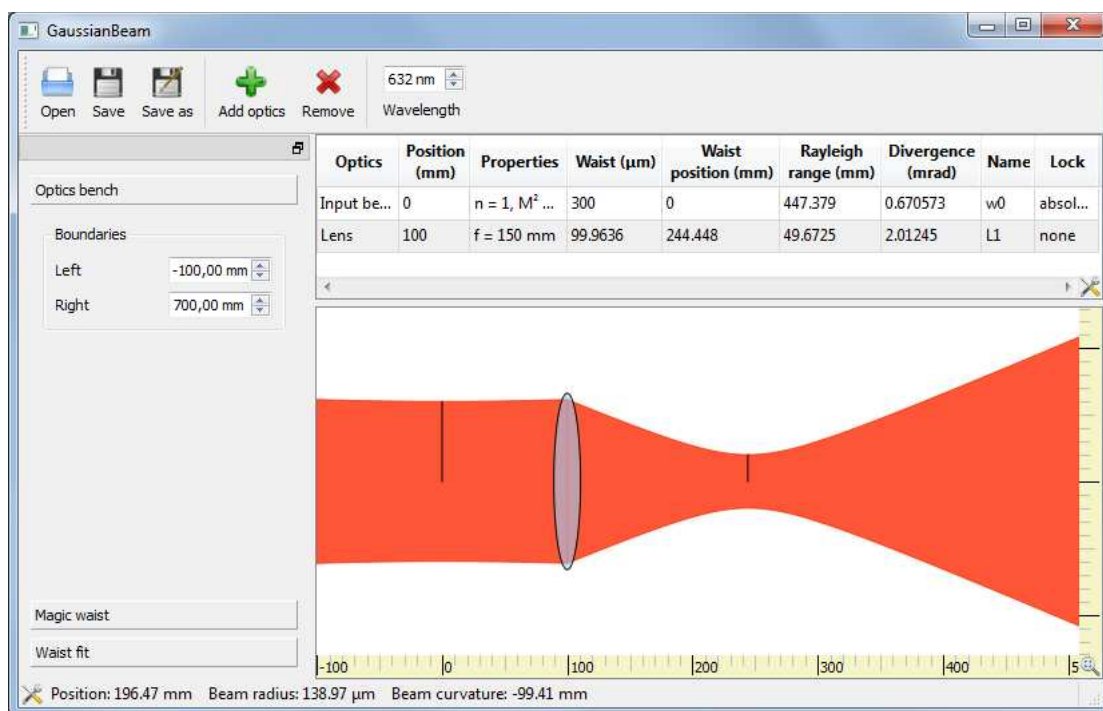
$$g_0' = \frac{g_0}{M} = \frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{0,333} \approx 0,6 \text{ mrad}. \quad (4.7)$$

Pro jednodušší a přesnější výpočet byl v Excelu vytvořen výpočetní aparát (je umístěn na příloženém CD), do kterého se zadaly vstupní parametry svazku a parametry vazební čočky a následně byly zobrazeny všechny potřebné údaje o poloze a pološířce krčku a úhlu divergence. Výpočetní aparát je zachycen na obrázku 4.2.

| Výpočet parametrů svazku po transformaci tenkou čočkou |             |                                     |     |                                  |
|--|-------------|-------------------------------------|-----|----------------------------------|
| Zadejte:   |             | Výpočet divergence:                 |     | → $\vartheta$ [rad] = 0,00019318 |
| $\lambda$ [nm] =                                       | 632         | $\Delta x$ [mm] =                   | 176 | $\vartheta$ [°] = 0,0110685      |
| $w_0$ [ $\mu\text{m}$ ] =                              | 300         | $w_0 x$ [ $\mu\text{m}$ ] =         | 334 | V místě čočky má svazek:         |
| $f$ [mm] =   | 150         | → Ohnisková vzdálenost čočky        |     |                                  |
| $z$ [mm] =   | 100         | → Vzdálenost od zdroje k čočce      |     | $w_0 z$ [mm] = 0,31931818        |
| $\vartheta$ [rad] =                                    | 0,000193182 | → Úhel divergence před transformací |     |                                  |
| $z_0$ [m] =  | 0,447378701 | → Rayleighova vzdálenost            |     |                                  |
| $M$ [-] =  | 0,333211835 | → Příčné zvětšení                   |     |                                  |
| $w_0'$ [ $\mu\text{m}$ ] =                             | 99,96355035 | → Šířka svazku - krček              |     |                                  |
| $2w_0'$ [ $\mu\text{m}$ ] =                            | 199,9271007 |                                     |     |                                  |
| $z'$ [mm] =  | 144,4484937 | → Vzdálenost od čočky ke krčku      |     |                                  |
| $\vartheta'$ [rad] =                                   | 0,000579757 |                                     |     |                                  |
| $\vartheta'$ [°] =                                     | 0,033217616 | → Úhel divergence po transformaci   |     |                                  |

Obr.4.2. – Výpočetní aparát v Excelu pro určení parametrů prošlého svazku čočkou o  $f=150\text{mm}$  pro He-Ne laser

Správnost výsledky lze ověřit i pomocí software GaussianBeam, který je volně ke stažení viz. [7]. Velkou výhodou tohoto softwaru je, že lze vidět i grafickou simulaci Gaussova svazku po různých transformacích při průchodu optickými prvky. Okno softwaru GaussianBeam se stejnými zadanými údaji jako bylo zadáno do Excelu, lze vidět na obrázku 4.3.



Obr.4.3. – Ověření parametrů svazku po průchodu čočkou o  $f=150 \text{ mm}$  pomocí softwaru GaussianBeam pro He-Ne laser

V horní části je pole *Wavelength*, do kterého byla zadána vlnová délka He-Ne laseru 632 nm. Následuje okénko, kde bylo do řádku k *Input Beam* do pole *Waist* zadána hodnota 300  $\mu\text{m}$ , a automaticky byly dopočítány hodnoty Rayleighovy vzdálenosti a úhlu divergence, který je nutné vydělit dvěma, ale bohužel i tak vzniká určitá softwarová nepřesnost způsobená tím, že byl z předchozích kapitol, určen krček v místě vyústění svazku z He-Ne laseru. V dalším řádku je kolonka *Lens*, kam se zadalo umístění čočky v okénku *Position* a její ohnisková vzdálenost  $f$ . Software pak následně automaticky dopočítal pozici krčku, pološifku krčku a divergenci transformovaného svazku. V tabulce 4.1. v souladu s podmínkami (2.4.10 – 12), jsou uvedeny navržené vazební soustavy s vybranými čočkami (pro lepší uchycení byla zvolena sada LEOK) pro konkrétní optická vlákna, spolu s parametry po průchodu optického svazku těmito čočkami. Pro optické vlákno o průměru 975  $\mu\text{m}$ , je zvolena, pro nejúčinnější způsob navázání energie do vlákna, přímá vazba, protože je šířka svazku v místě vyústění svazku menší než průměr jádra tohoto vlákna.

| Vlákno                 | Čočka               | Svazek po průchodu        |                                  | Úhel akceptance vlákna                  | Poloha čočky vůči laseru | Poloha čela vlákna vůči čočce |
|------------------------|---------------------|---------------------------|----------------------------------|---|--------------------------|-------------------------------|
| $2a$ [ $\mu\text{m}$ ] | $f$ [ $\text{mm}$ ] | $2w_0'$ [ $\mu\text{m}$ ] | $\vartheta_0'$ [ $\text{mrad}$ ] | $\Theta_{\text{AKC}}$ [ $\text{mrad}$ ] | $z$ [ $\text{mm}$ ]      | $z'$ [ $\text{mm}$ ]          |
| 975                    | -                   | 600                       | 0,2                              | 523,6                                   | 0                        | 0                             |
| 600                    | 150                 | 199,93                    | 0,6                              | 221,8                                   | 100                      | 144,45                        |
| 200                    | 50                  | 66,64                     | 1,7                              | 221,8                                   | 100                      | 50,62                         |
| 62,5                   | 45                  | 59,9                      | 1,9                              | 283,8                                   | 100                      | 45,55                         |
| 50                     | 15                  | 19,76                     | 5,8                              | 201,4                                   | 100                      | 15,1                          |
| 9                      | 6,2                 | 8,14                      | 14,2                             | 140,5                                   | 100                      | 6,22                          |

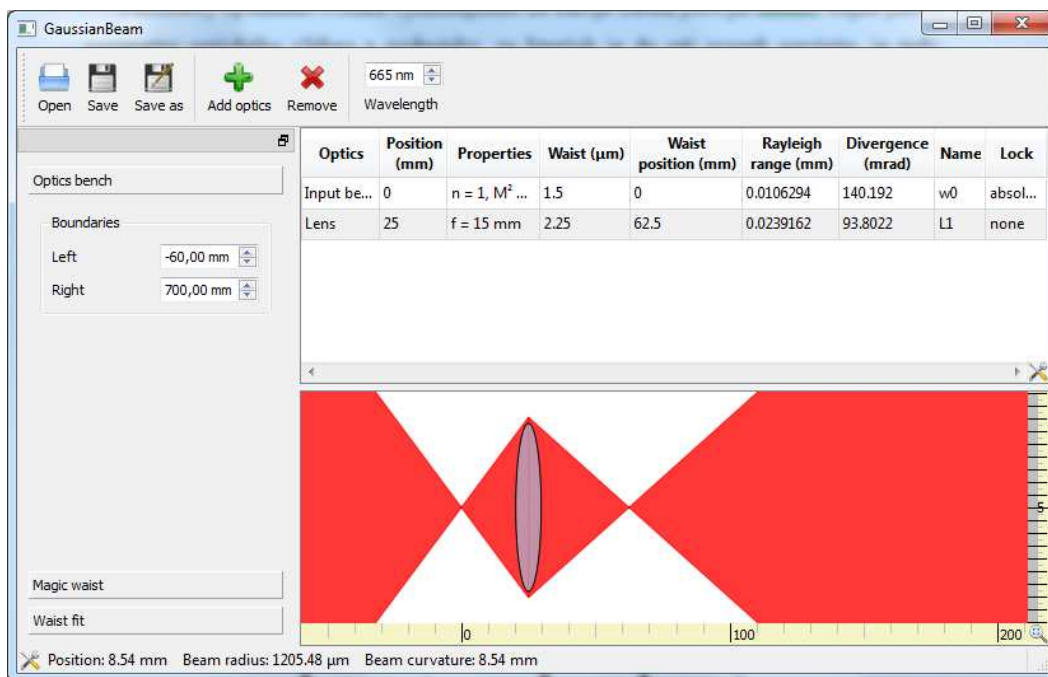
Tab.4.1. – Navržené vazební soustavy s parametry optických vláken pro He-Ne laser

### Návrh vazební soustavy s laserovou diodou RVM665T-101

Stejným způsobem jako u He-Ne laseru až na různé vzdálenosti  $z$ , byly provedeny návrhy vazebních soustav i pro laserovou diodu RVM665T-101. Z předchozí kapitoly při ověřování parametrů této laserové diody, byla vypočtena pološířka svazku v místě krčku  $w_0 = 1,5 \mu\text{m}$  o úhlové divergenci svazku  $\vartheta_0 = 0,14 \text{ rad}$ . Vzhledem k velké divergenci optického svazku byl kladen požadavek na vazební čočky s co nejmenší ohniskovou vzdáleností. Ukázkový výpočet a ověření parametrů prošlého svazku pomocí výpočetního aparátu a softwaru GaussianBeam pro  $f = 15 \text{ mm}$  je na obrázcích 4.4 a 4.5.

| Výpočet parametrů svazku po transformaci tenkou čočkou |             |   |      |                                 |            |
|--|-------------|---|------|---------------------------------|------------|
| Zadejte:   |             | Výpočet divergence:                             |      | $\rightarrow \vartheta$ [rad] = | 0,13796787 |
| $\lambda$ [nm] =                                       | 665         | $\Delta x$ [mm] =                               | 10   | $\vartheta$ [°] =               | 7,90497669 |
| $w_0$ [ $\mu\text{m}$ ] =                              | 1,5         | $w_{0x}$ [ $\mu\text{m}$ ] =                    | 1390 | V místě čočky má svazek:        |            |
| $f$ [mm] =   | 15          | $\rightarrow$ Ohnisková vzdálenost čočky        |      | $w_{0z}$ [mm] =                 | 3,47275    |
| $z$ [mm] =   | 25          | $\rightarrow$ Vzdálenost od zdroje k čočce      |      |                                 |            |
| $\vartheta$ [rad] =                                    | 0,137967871 | $\rightarrow$ Úhel divergence před transformací |      |                                 |            |
| $z_0$ [m] =  | 1,06294E-05 | $\rightarrow$ Rayleighova vzdálenost            |      |                                 |            |
| $M$ [-] =  | 1,499999153 | $\rightarrow$ Příčné zvětšení                   |      |                                 |            |
| $w_0'$ [ $\mu\text{m}$ ] =                             | 2,249998729 | $\rightarrow$ Šířka svazku - krček              |      |                                 |            |
| $2w_0'$ [ $\mu\text{m}$ ] =                            | 4,499997458 | $\rightarrow$ Šířka svazku - krček              |      |                                 |            |
| $z'$ [mm] =  | 37,49997458 | $\rightarrow$ Vzdálenost od čočky ke krčku      |      |                                 |            |
| $\vartheta'$ [rad] =                                   | 0,091978632 | $\rightarrow$ Úhel divergence po transformaci   |      |                                 |            |
| $\vartheta'$ [°] =                                     | 5,269987437 | $\rightarrow$ Úhel divergence po transformaci   |      |                                 |            |

Obr.4.4. – Výpočetní aparát v Excelu pro určení parametrů prošlého svazku čočkou o  $f=15 \text{ mm}$  pro laserovou diodu RVM665T-101



Obr.4.3. – Ověření parametrů svazku po průchodu čočkou o  $f=15\text{mm}$  pomocí softwaru *GaussianBeam* pro laserovou diodu RVM665T-101

Vzhledem k horší vyzářovací charakteristice laserové diody oproti He-Ne laseru, a také na základě zkušeností z předchozího projektu, kdy už byla tato laserová dioda použita v měření, bylo nutné zajistit co nejmenší vzdálenost  $z + z'$ , a proto byly zvoleny jen dvě varianty čoček. V tabulce 4.2. jsou uvedeny nejvhodnější varianty vazebních soustav pro laserovou diodu RVM665T-101 a jsou zde také uvedeny parametry prošlých svazků vazební čočkou (vybrána sada LEOK).

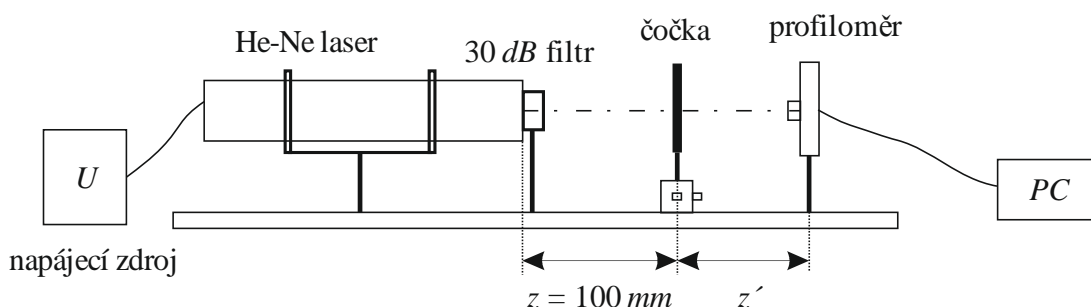
| Vlákno                 | Čočka               | Svazek po průchodu        |                                  | Úhel akceptance vlákna                  | Poloha čočky vůči laseru | Poloha čela vlákna vůči čočce |
|------------------------|---------------------|---------------------------|----------------------------------|---|--------------------------|-------------------------------|
| $2a$ [ $\mu\text{m}$ ] | $f$ [ $\text{mm}$ ] | $2w_0'$ [ $\mu\text{m}$ ] | $\vartheta_0'$ [ $\text{mrad}$ ] | $\Theta_{\text{AKC}}$ [ $\text{mrad}$ ] | $z$ [ $\text{mm}$ ]      | $z'$ [ $\text{mm}$ ]          |
| 975                    | 15                  | 4,5                       | 92                               | 523,6                                   | 25                       | 37,5                          |
| 600                    | 6,2                 | 2,95                      | 140                              | 221,8                                   | 12,5                     | 12,3                          |
| 200                    | 6,2                 | 2,95                      | 140                              | 221,8                                   | 12,5                     | 12,3                          |
| 62,5                   | 6,2                 | 2,95                      | 140                              | 283,8                                   | 12,5                     | 12,3                          |
| 50                     | 6,2                 | 2,95                      | 140                              | 201,4                                   | 12,5                     | 12,3                          |
| 9                      | 6,2                 | 2,95                      | 140                              | 140,5                                   | 12,5                     | 12,3                          |

Tab.4.2. – Navržené vazební soustavy s parametry optických vláken pro laserovou diodu RVM665T-101



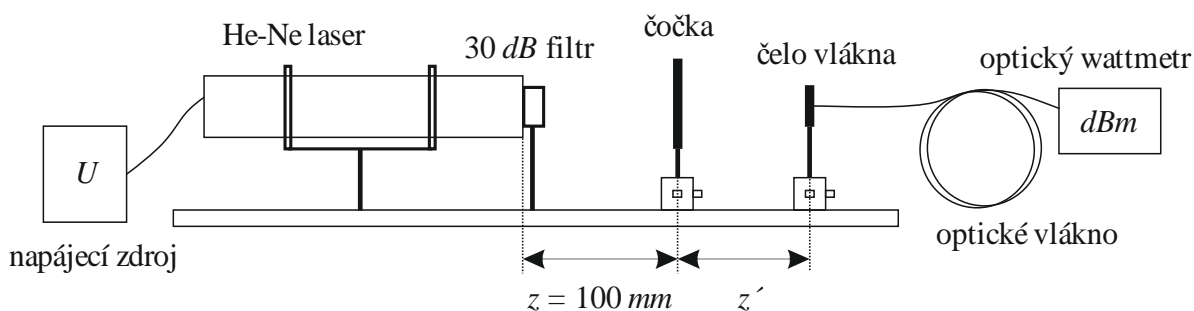
## 4.1. Postup měření

Nejprve bylo provedeno měření vazebních soustav s He-Ne laserem na stavebnici ze sady LEOK. Opět bylo nutné umístit před He-Ne laser 30 dB filtr, aby nebyl poškozen čip profiloměru při vycentrování celé soustavy. Měřicí aparatura s umístěnou vazební čočkou do vzdálenosti  $z = 100 \text{ mm}$  od laseru, byla sestavena podle obrázku 4.1.1. a pomocí softwaru BeamGage, kdy byl profiloměr oddalován a přibližován (nutno vidět 2D svazek v jednom konkrétním místě na čipu profiloměru), proběhlo vycentrování celé soustavy lineárním posuvníkem, na kterém byla umístěna čočka, spolu s jemným dotahováním He-Ne laseru do úchyťů, dále proběhlo ověření parametrů, už konkrétní navržené vazby, optického svazku v místě krčku ve vzdálenosti  $z'$ .



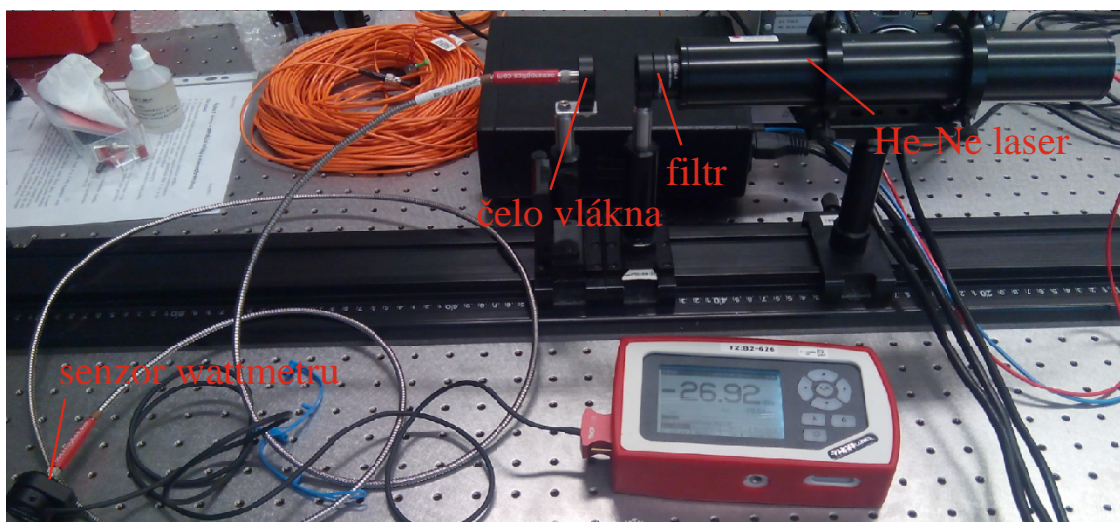
Obr.4.1.1. – Vycentrovaná vazební soustava s He-Ne laserem

Následně byl profiloměr nahrazen optickým vláknem, také umístěným na lineárním posuvníku s wattmetrem Thorlabs PM100D nebo wattmetrem Tempo 557B (podle typu konektoru) a proběhlo měření navržené varianty vazební soustavy viz. obrázek 4.1.2. Jemným nastavováním výšky upevněného optického vlákna a doladováním celé soustavy do jedné osy, byla zaznamenána nejvyšší hodnota výkonu navázaného optického svazku. Pro každou navrženou variantu vazební soustavy proběhlo nové vycentrování celé soustavy.



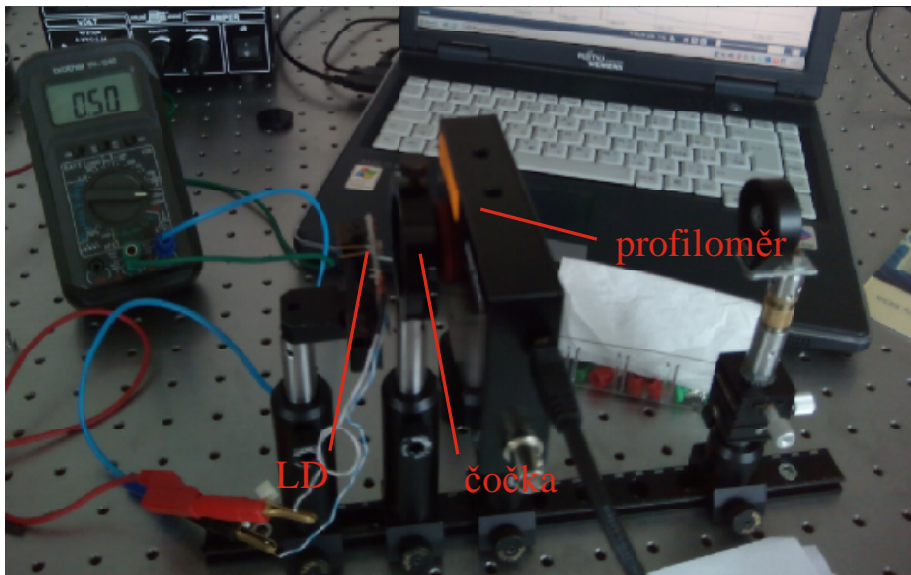
Obr.4.1.2. – Sestavená měřicí aparatura vazebních soustav pro He-Ne laser

Pro měření přímé vazby mezi laserem a optickým vláknem o průměru  $975 \mu\text{m}$ , bylo čelo vlákna umístěno co nejbližší k filtru a opět jemným doladěním do jedné osy, byla zaznamenána nejvyšší hodnota výkonu navázaného optického svazku. Na obrázku 4.1.3. je zobrazeno měření přímé vazby mezi He-Ne laserem s filtrem a optickým vláknem o průměru  $600 \mu\text{m}$ .



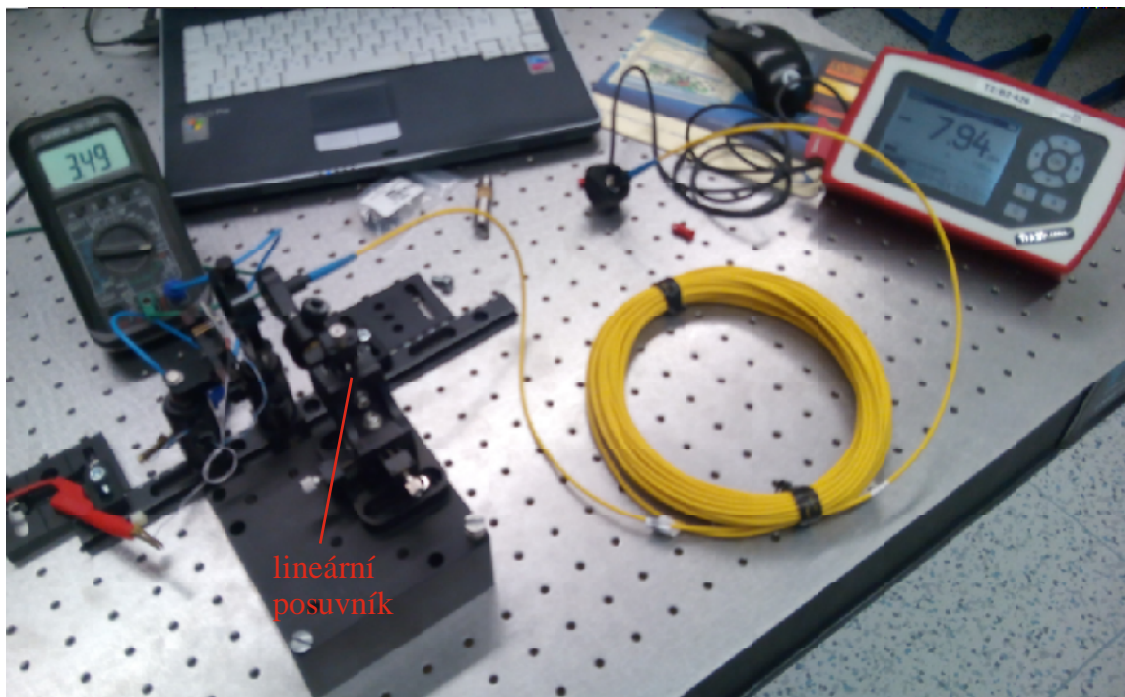
*Obr.4.1.3. – Měření přímé vazby mezi He-Ne laserem s 30 dB filtrem a optickým vláknem s průměrem jádra  $600 \mu\text{m}$*

Po změření navržených vazebních soustav pro He-Ne laser bylo nutné měřící aparaturu rozebrat, a pro měření s polovodičovou laserovou diodou RVM665T-101, nahradit kolejnici a komponenty ze sady Thorlabs, se kterou bylo možné dosáhnout co nejmenších vzdáleností mezi komponenty. Vazební soustava byla sestavena podle obrázku 4.1.1. s tím rozdílem, že byla zvolena jiná vzdálenost  $z$ , vzhledem k velké rozbíhavosti svazku nemohl být k diodě zařazen útlumový filtr, proto byl při měření profiloměrem nastaven proud na  $I_d = 0,50 \text{ mA}$ , což je těsně nad prahovým proudem. Pak bylo nutné opět celou soustavu řádně vycentrovat a ověřit parametry v místě krčku, jako v předchozím případě. Vše zachycuje obrázek 4.1.4.



*Obr.4.1.4. – Vycentrování vazební soustavy s polovodičovou laserovou diodou*

Po vycentrování soustavy a ověření parametrů svazku profiloměrem v místě krčku ve vzdálenosti  $z'$ , byl profiloměr nahrazen optickým vláknem, proud diodou byl nastaven na  $I_d = 3,50 \text{ mA}$ , nejvyšší výkon zaznamenan, a stejným způsobem jako při měření vazebních soustav s He-Ne laserem byla celá měřící aparatura po výměně vazební čočky opět vycentrována. Na obrázku 4.1.5. lze vidět měření vazební soustavy pro jednovidové vlákno s lineárním posuvníkem, který umožňuje jemný posuv do všech tří os.



*Obr.4.1.5. – Měření vazební soustavy mezi polovodičovou laserovou diodou a jednovidovým optickým vláknem s průměrem jádra  $9\mu\text{m}$ , umístěným na posuvníku XYZ*

## 4.2. Výsledek měření

Celkem byla změřena účinnost třinácti různých variant vazebních soustav s He-Ne laserem a polovodičovou laserovou diodou RVM665T-101. Většinu naměřených výsledků  $P_{\text{měr}}$  bylo nutné zkorigovat vzhledem k délce vlákna o jeho útlum, a při měření s He-Ne laserem také o přidaný 30 dB filtr. Součet těchto hodnot útlumu bude označen jako  $P_{\text{ú}}$ . Tedy pro korigovanou hodnotu výkonu  $P_{\text{K}}$  bude platit následující vztah:

$$P_{\text{K}} = P_{\text{měr}} + P_{\text{ú}}. \quad (4.2.1)$$

Všechny změřené výsledky a účinnost vazební soustavy pro He-Ne laser zachycuje tabulka 4.2.1 a pro polovodičovou laserovou diodu RVM665T-101 tabulka 4.2.2.

| Průměr<br>jádra<br>[μm] | Návrh       |             |                 | Změřeno         |                           | Korekce             | Korigovaná<br>hodnota |                            |
|-------------------------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|---------------------------|---------------------|-----------------------|----------------------------|
|                         | Typ vazby   | $f$<br>[mm] | $2w_0'$<br>[μm] | $2w_0'$<br>[μm] | $P_{\text{měr}}$<br>[dBm] | $P_{\text{ú}}$ [dB] | $P_{\text{K}}$ [dBm]  | Vazební<br>účinnost<br>[%] |
| 975                     | přímá vazba | -           | 600             | 600             | -27,96                    | 30,2                | 2,24                  | 73                         |
| 600                     | přímá vazba | -           | 600             | 600             | -26,80                    | 30                  | 3,2                   | 91                         |
|                         | s čočkou    | 150         | 199,93          | 220             | -26,69                    | 30                  | 3,31                  | 93                         |
| 200                     | s čočkou    | 50          | 66,64           | 85              | -26,78                    | 30                  | 3,22                  | 92                         |
| 62,5                    | s čočkou    | 45          | 59,9            | 70              | -32,77                    | 31,1                | -1,67                 | 30                         |
| 50                      | s čočkou    | 15          | 19,76           | 46              | -28,36                    | 30,3                | 1,94                  | 54                         |
| 9                       | s čočkou    | 6,2         | 8,14            | -               | -48,00                    | 30                  | -18                   | 1                          |
| Výkon He-Ne laseru:     |             |             |                 |                 | 3,6 [dBm]                 |                     |                       |                            |

Tab.4.2.1. – Výsledek měření navržených vazebních soustav pro He-Ne laser

| Průměr<br>jádra [ $\mu\text{m}$ ] | Návrh     |             |                              | Změřeno                      |                           | Korekce             | Korigovaná<br>hodnota |                            |
|-----------------------------------|-----------|-------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------|-----------------------|----------------------------|
|                                   | Typ vazby | $f$<br>[mm] | $2w_0'$<br>[ $\mu\text{m}$ ] | $2w_0'$<br>[ $\mu\text{m}$ ] | $P_{\text{měr}}$<br>[dBm] | $P_{\text{ú}}$ [dB] | $P_{\text{K}}$ [dBm]  | Vazební<br>účinnost<br>[%] |
| 975                               | s čočkou  | 15          | 4,5                          | 40                           | -0,7                      | 0,2                 | -0,5                  | 77                         |
| 600                               | s čočkou  | 6,2         | 2,95                         | 26                           | -0,2                      | 0                   | -0,2                  | 83                         |
| 200                               | s čočkou  | 6,2         | 2,95                         | 26                           | -0,52                     | 0                   | -0,52                 | 77                         |
| 62,5                              | s čočkou  | 6,2         | 2,95                         | 26                           | -2,86                     | 1,1                 | -1,76                 | 58                         |
| 50                                | s čočkou  | 6,2         | 2,95                         | 26                           | -2,8                      | 0,3                 | -2,5                  | 49                         |
| 9                                 | s čočkou  | 6,2         | 2,95                         | 26                           | -7,94                     |                     | -7,94                 | 14                         |
| Výkon laserové diody:             |           |             |                              |                              | 0,6 [dBm]                 |                     |                       |                            |

Tab.4.2.2. – Výsledek měření navržených vazebních soustav pro polovodičovou laserovou diodu RVM665T-101

Všechny naměřené pološířky svazku v místě krčku se liší od vypočtených hodnot u He-Ne laseru až o 30%, u laserové diody až od 90%. Tato odchylka mohla být způsobena tím, že mikrometrický lineární posuv nebyl ve směru osy vazební soustavy umožněn, po směru kolejnice se dalo pohybovat pouze ručním posuvem, tím mohla být chybně odhadnuta vzdálenost zapuštěného CCD čipu v profiloměru, který měl být v pouzdře ve hloubce 4,5 mm. Další možností je, že vzhledem k celkem hrubému rozlišení jednoho pixelu na čipu profiloměru, dle přílohy [3] jsou rozměry jednoho pixelu 4,40  $\mu\text{m}$  x 4,40  $\mu\text{m}$ , mohla být odchylka naměřených hodnot průměru optického svazku navýšena o 2-krát 4,40  $\mu\text{m}$ , další možnou příčinou chybně naměřených hodnot mohlo být nepatrné vychýlení celé soustavy. Oba zdroje optického záření mají téměř podobné účinnosti vazebních soustav, až na případy navázání energie svazku do vícevidového vlákna s průměrem jádra 62,5  $\mu\text{m}$  a vlákna jednovidového s průměrem jádra 9  $\mu\text{m}$ . Pokud budou uvažovány výše zmíněné odchylky, tak v případě vazby do vícevidového vlákna 62,5  $\mu\text{m}$  s He-Ne laserem, byla navržena téměř limitní situace dle (2.4.10), což mohlo mít za následek tak malou účinnost celé vazby. V případě vazby optického svazku z He-Ne laseru do jednovidového vlákna 9  $\mu\text{m}$  (účinnost 1%), je příčinou použitá stavebnice LEOK, která neumožňovala přiblížit čelo optického vlákna do potřebné vzdálenosti 6,22 mm, tak nebyla splněna podmínka (2.4.10) a došlo k přezáření vlákna viz. obrázek 2.2.2. (podkapitola Podmínky akceptance záření optickým vláknem).

## 5. Závěr

V rámci bakalářské práce se podařilo nastínit problematiku navazování optického svazku do optického vlákna z pohledu teorie Gaussových svazků. Byl podán výčet možných řešení vazebních soustav a byla popsána transformace svazku přes tenkou čočku, která byla využita při navrhování vazebních soustav.

V další části se podařilo změřit parametry a shrnout vlastnosti dvou předložených zdrojů (He-Ne laseru a polovodičové diody) a optických vláken. Pomocí výpočtů se podařilo navrhnout a následně s optickými stavebnicemi a komponenty dostupnými na katedře, proměřit vazební soustavy. Se zmenšujícím se průměrem jádra optického vlákna klesala i účinnost celé vazby, což mohlo být způsobeno:

- navázáním energie do pláště vlákna,
- nepatrným vychýlením cele soustavy.

V případě jednovidových vláken si musíme uvědomit, že by bylo třeba dosáhnout polohování s rozlišením do 1 mikrometru, což s použitými komponentami prakticky nebylo možné. Navíc se v takových případech používají spíše kulové mikročočky, což je vybavení, které nebylo v době měření k dispozici.

## Seznam literatury

- [1] Novotný, K., Martan, T., Šístek, J.: Systémy pro optické komunikace. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2007, ISBN 978-80-01-02810-0.
- [2] Novotný, K.: Optická komunikační technika. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2007, ISBN 978-80-01-03920-5.
- [3] Novotný, K., Schröfel, J.: Optické vlnovody. Praha, SNTL, 1986.
- [4] Pyshkin, S. L., Ballato, J. M.: Optoelectronics - Advanced Materials and Devices, Chapter 17. Publisher: InTech, Chapters published January 16, 2013 under CC BY 3.0 license, ISBN 978-953-51-0922-8.
- [5] Saruwatari, M., Nawata, K.: Semiconductor Laserto Single-mode Fiber Coupler. Applied Optics, 1979, 18(11):1847-1856.
- [6] B. E. A. Saleh, M. C. Teich: "Fundamentals of fotonics", překl. Matfyzpress, vydavatelství Matematicko-fyzikální fakulty UK, 1991, ISBN 80-85863-00-6.
- [7] GaussianBeam [online]. Jérôme Lodewyck. [vid. 21.12.2014]. Dostupné z: <http://gaussianbeam.sourceforge.net/>

## Příloha 1 – Katalogový list LLL-2 He-Ne laser

# LLL-2 Helium-Neon Laser



A Helium-Neon laser tube is a glass cylinder filled with low-pressure gas. A pair of mirrors are attached at the ends of the cylinder. It is a general component in a variety of applications and the most practical choice of economical gas lasers for beginners.

They are ideal for alignment and education applications. It can be used in geometric optics, interference, diffraction and polarization experiments.

### Specifications

|               |                   |                   |
|---------------|-------------------|-------------------|
| Model         | LLL-2             | LLL-2A            |
| Wavelength    | 632.8 nm          | 632.8 nm          |
| Output power  | 1.0 to 2.5 mW     | 0.7 to 1.0 mW     |
| Mode          | TEM <sub>00</sub> | TEM <sub>00</sub> |
| Polarization  | Random            | Random            |
| Cavity length | 260 mm            | 180 mm            |
| Divergence    | <1.3 mrad         | <1.3 mrad         |



## Příloha 2 – Katalogový list RVM665T-101 str.2

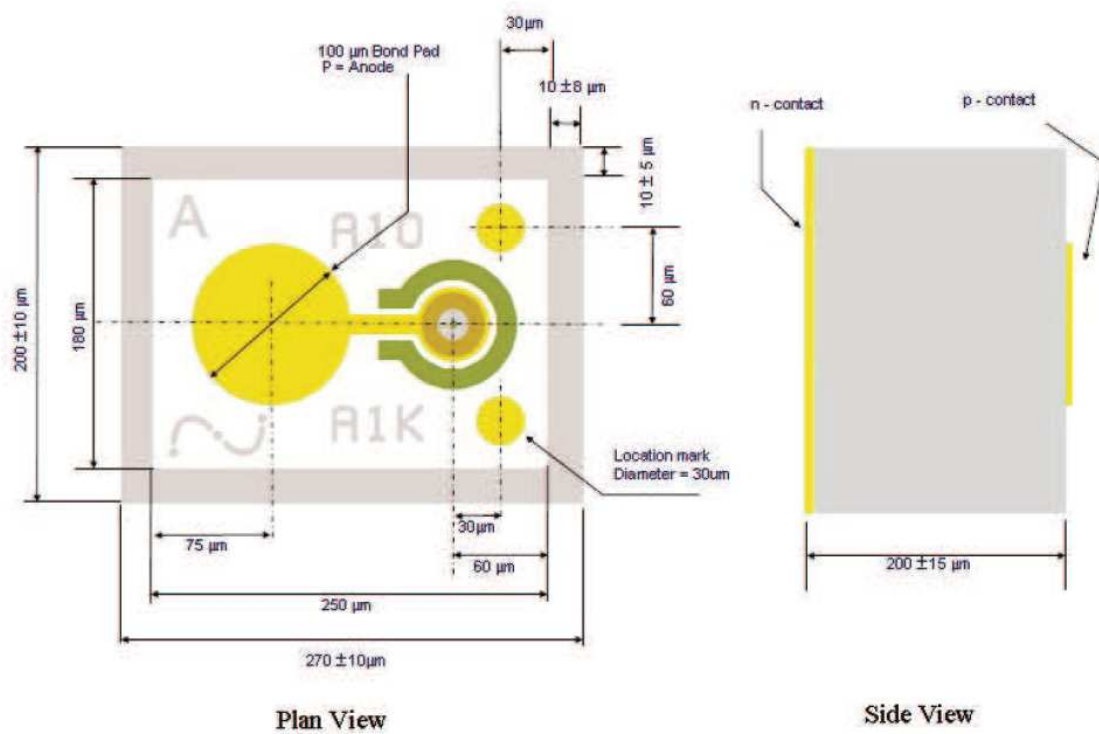
### OPTICAL AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS

| Parameter                          | Symbol                 | Minimum | Typical | Maximum | Unit  | Test Condition        |
|------------------------------------|------------------------|---------|---------|---------|-------|-----------------------|
| Beam Divergence, FWHM              | $\Theta$               | 10      | 14      | 16      | °     | $I_f < I_{peak}$ , mA |
| Peak Wavelength                    | $\lambda$              | 655     | 665     | 675     | nm    | At peak power         |
| Spectral Bandwidth                 | $\Delta\lambda_{-3dB}$ |         | 1       |         | nm    | At peak power         |
| Peak Optical Power                 | $P_{op}(25)$           | 0.6     | 0.9     | 1.2     | mW    | 25°C                  |
| Polarization Extinction Ratio(1)   | $X_{pol}$              | 14      |         |         | dB    |                       |
| Wavelength Temperature Coefficient | $d\lambda/dT$          |         | 0.04    |         | nm/°C |                       |
| Wavelength Current Coefficient     | $d\lambda/dI$          |         | 0.4     |         | nm/mA |                       |
| Forward Voltage                    | $V_f$                  | 2.8     | 3.0     | 3.5     | V     | $I_{peak}$ , 25°C     |
| Drive Current at Peak Power        | $I_{peak}$             | 4.0     | 5.0     | 6.0     | mA    | 25°C                  |
| Threshold Current                  | $I_{th}$               | 0.3     | 0.6     | 0.8     | mA    | 25°C                  |
| Bandwidth (3dB)                    | $f_{-3dB}$             |         | 3       |         | GHz   | $I_f \sim 5mA$        |

# Příloha 3 – Katalogový list RVM665T-101 str.4

## MECHANICAL SPECIFICATIONS

| MECHANICAL DIMENSIONS |        |           |           |               |
|-----------------------|--------|-----------|-----------|---------------|
| Parameter             | Symbol | Value     | Tolerance | Units         |
| Die Size              | L x W  | 270 x 200 | $\pm 10$  | $\mu\text{m}$ |
| Die Thickness         | T      | 200       | $\pm 15$  | $\mu\text{m}$ |
| Bond Pad Diameter     | D      | 100       | $\pm 1$   | $\mu\text{m}$ |





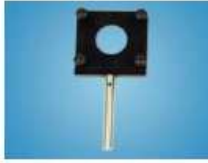





# Příloha 4 – Katalogový list USB Silicon CCD Cameras

## str.2


### USB Cameras for use with Laptop or Desktop PC

| Item                                    | Specification  |   |
|---|--|---|
| Model                                   | SP503U   | SP620U  |
| Application                             | ½" format, slim profile, wide dynamic range, CW & pulsed lasers  | 1/1.8" format, high resolution, wide dynamic range, pulsed lasers, CW YAG, adjustable ROI |
| Spectral Response                       | 190 - 1100nm <sup>(2)</sup>  | 190 - 1100nm <sup>(2)</sup>   |
| Active Area                             | 6.3mm W x 4.7mm H  | 7.1mm W x 5.4mm H   |
| Pixel spacing                           | 9.9µm x 9.9µm  | 4.40µm x 4.40µm   |
| Number of effective pixels              | 640 x 480  | 1600 x 1200   |
| Minimum system dynamic range            | 64 dB  | 62 dB   |
| Linearity with Power                    | ±1%  | ±1%   |
| Accuracy of beam width                  | ±2%  |   |
| Frame rates: In 12 bit mode             | 30 fps at full resolution<br>60 fps at 320x240   | 7.5 fps at full resolution<br>28 fps at 640x480<br>44 fps at 320x240                      |
| Shutter duration                        | 30us to multiple frame times   |   |
| Gain control                            | 43:1 automatic or manual control   | 29:1 automatic or manual control  |
| Trigger                                 | 1. BNC connector accepts positive or negative trigger. LED on camera indicates triggering. Will synchronize with laser repetition rates up to 1KHz. Built in pre-trigger allows synchronization to even sub-nanosecond pulses<br>2. Same connector can provide trigger out to synch laser. Supports programmable delay on Strobe Out<br>3. Same connector accepts photodiode trigger (see below) |   |
| Photodiode trigger                      | Optional photodiode trigger available: P/N SPZ17005  |   |
| Saturation intensity <sup>(1)</sup>     | 1.3µW/cm <sup>2</sup> 2.2µW/cm <sup>2</sup>  | 2.2µW/cm <sup>2</sup>   |
| Lowest measurable signal <sup>(1)</sup> | 0.5nW/cm <sup>2</sup>  | 2.5nW/cm <sup>2</sup>   |
| Damage threshold                        | 50W/cm <sup>2</sup> / 0.1J/cm <sup>2</sup> with all filters installed for <100ns pulse width <sup>(3)</sup>  |   |
| Dimensions and CCD recess               | 96mm x 76mm x 16mm<br>CCD recess: 4.5mm below surface  | 96mm x 76mm x 23mm<br>CCD recess: 4.5mm below surface                                     |
| Image quality at 1064nm                 | Pulsed with trigger sync - excellent<br>Pulsed with video trigger - good<br>CW - poor  | Pulsed with trigger sync - excellent<br>Pulsed with video trigger - good<br>CW - good     |
| Operation mode                          | Interline transfer progressive scan CCD  |   |
| Software supported                      | BeamGage   |   |
| PC interface                            | USB 2.0  |   |

## Příloha 5 – LEOK-3 Optics Experiment Kit str.5

|   |  |   |   |
|---|--|---|---|
| <p><b>Optical Goniometer (LEPO-49)</b><br/>Used for polarization caused by reflection and refraction, measuring Brewster angle at accuracy of 0.5°.</p> <p><i>1 piece</i></p> |   | <p><b>Iceland Crystal Rotary Holder (LEPO-50)</b><br/>Used for crystal birefringence experiment.</p> <p><i>1 piece</i></p>  |  |
| <p><b>Paper Clip (LEPO-51)</b><br/>Used for Abbe's theory of image formation and experiment of space filtering.</p> <p><i>1 piece</i></p>                                     |   | <p><b>Polaroid Holder (LEPO-52)</b><br/>Used for polarized light experiment.</p> <p><i>2 pieces</i></p>   |  |
| <p><b>Carrier with Holder (LEPO-54-2)</b><br/>Used with optical rail</p> <p><i>3 piece</i></p>  |   | <p><b>X-Adj. Carrier with Holder (LEPO-55-3)</b><br/>Used with optical rail</p> <p><i>2 piece</i></p>   |  |
| <p><b>X-Z Adj. Carrier with Holder (LEPO-54-4)</b><br/>Used with optical rail</p> <p><i>2 piece</i></p>   |  | <p><b>Optical Rail with Carriers (LEPO-54)</b><br/>1.0 meter long dovetail rail (LEPO-54-1) used with carriers</p>  |   |

### 2.3 Optical Components

|   |  |
|---|--|
| <p>Mounted Lenses: <math>f = 4.5, 6.2, 15, 45, 50, 70, 150, 190, 225, 300, -100\text{mm}</math>, <i>1 piece each</i></p> <p>Mounted Cemented Lenses: <math>f = 34, 105\text{mm}</math>, <i>1 piece each</i></p> <p>Mounted Flat Mirrors: <math>\Phi 36\text{mm}</math>, <i>2 pieces</i></p> <p>Mounted Beam Splitter: <math>\Phi 30\text{mm}</math>, 5:5 and 7:3, <i>1 piece each</i></p> <p>Mounted Flaring Grating (at 500nm): 1200 l/mm, <math>30 \times 30\text{mm}</math>, <i>1 piece</i></p> <p>Mounted Transmission Grating: 20 l/mm, <i>1 piece</i></p> <p>Mounted 2-Dimensional Grating: 20 l/mm, <i>1 piece</i></p> <p>Mounted Waveplates: <math>\frac{1}{4}\lambda, \frac{1}{2}\lambda</math> @632.8nm, <math>\Phi 10\text{mm}</math>, <i>1 piece each</i></p> <p>Equilateral Prism: 60°, <i>1 piece</i></p> <p>Mounted Reticules: 1/5, 1/10mm, <i>1 piece each</i></p> <p>Mounted Millimetre Ruler: 30mm long, <i>1 piece</i></p> |  |
|---|--|

# Příloha 6 – Thorlabs DT12-Manual str.2

## 1.1 Introduction

The DT12 dovetail translation stage is a miniature, entry level positioner, ideal for use in applications where space is limited. It is 1.0" (25.4mm) square yet provides a travel length of 0.5" (12.7mm). The design uses a precision rolled M3 x 0.35mm pitch lead screw for smooth linear positioning along the entire range of travel. The moving platform is lockable (hexagon key supplied) to guard against accidental movement. The modular design allows them to be assembled into 2 or 3 axis configurations. The 3 axis versions are supplied preconfigured with a right angled bracket (DT12A). Options for mounting to a work surface comprise either a slotted baseplate (DT12B), or two mounting clamps (CL6) shown below.

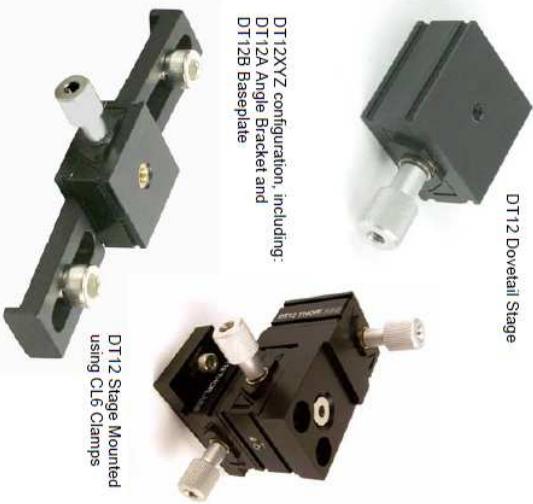


Fig. 1.1 DT12 Dovetail Stage and Accessories

The DT12RA enables a rotational axis to be added to other DT12 stage configurations, providing 360 degrees of movement in pitch, roll, or yaw.  
If desired, another DT12 stage can be mounted to the rotation adapter as shown opposite. In this case, the rotation adapter must be removed from the configuration before the extra stage can be fixed to it.

The complete assembly can then be refitted.



Fig. 1.2 DT12XYZ with DT12RA and extra DT12 stage, fitted to an RC1 Rail Carrier

For attachment to other stages or fittings, please contact Tech Support.

## 1.2 Specification

- Travel Range: 12.7mm (0.5")
- Load Capacity: 1.2kg (2.5lb)
- Actuator Travel: 0.35mm per revolution
- Construction: Aluminum with Precision Steel Leadscrew
- Dimensions: 25.4 x 45 x 14.5mm (1 x 1.8 x 0.57 in.) (including actuator)

## 1.3 Precautions

**Caution**  
When bolting accessories to the moving platform, do not exceed a screw Insertion length of 3.5mm (9/64"). Do not apply excessive pressure or force to the moving platform.

### Notes

The DT12A/DT12B mounting brackets and the CL6 clamps are compatible with both imperial and metric stage versions, and are supplied with all necessary fixings and tools.  
The DT12B baseplate is compatible with both imperial and metric work surfaces.

## 1.4 Dimensions

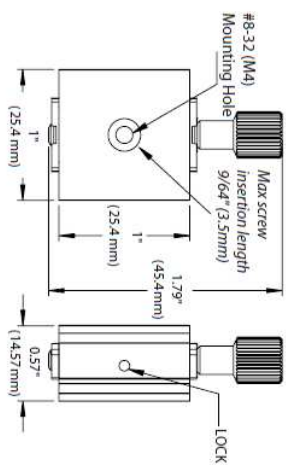


Fig. 1.3 DT12 Dimensions

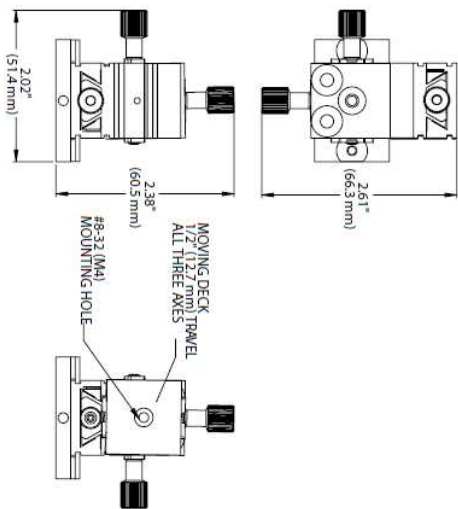


Fig. 1.4 DT12XYZ Dimensions



Thorlabs Inc.  
435 Route 206 North  
Newton, NJ07860  
USA  
Tel: +1 973 579 7227  
Fax: +1 973 300 3600  
www.thorlabs.com

Thorlabs Ltd.  
Saint Thomas Place, Ely  
Cambridge CB7 4EX,  
UK  
Tel: +44 (0) 1353 654440  
Fax: +44 (0) 1353 654444  
www.thorlabs.com