

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

**NÁVRH MOTORIZOVANÉHO OPTICKÉHO SYSTÉMU PRO
ZAOSTŘENÍ LASEROVÉHO SVAZKU**

DESIGN OF MOTORIZED OPTICAL SYSTEM USED FOR FOCUSING OF A LASER BEAM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Evžen Zobač

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Novotný, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství
Student: **Bc. Evžen Zobač**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Přesná mechanika a optika
Vedoucí práce: **Ing. Jan Novotný, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh motorizovaného optického systému pro zaostření laserového svazku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vzhledem k charakteru měření metodou spektroskopie laserem buzeného plazmatu (LIBS), je možné provádět měření na vzdálenost několika metrů. K účelu měření v nepřístupném prostoru byl sestrojen přístroj pro dálkovou prvkovou analýzu, který je možné částečně ovládat z počítače.

V současné době je zaostření laseru prováděno manuálně po otevření krytu, navíc hrozí kontaminace optických komponent prachem. Pro dosažení plné automatizace měření je nutné opatřit vybrané optické prvky motorizací. V rámci řešení diplomové práce bude navržen a optimalizován optomechanický systém, který umožní zaostřit laserový svazek z počítače. Řešení bude integrováno do přístroje a bude s ním kompatibilní (mechanicky, elektronicky).

Cíle diplomové práce:

Rešerše problematiky – možnosti řešení motorizace a způsoby zaostření laserového svazku.

Koncepční návrh s ohledem na zástavbové možnosti a použité prvky, výběr vhodné varianty.

Detailní konstrukční návrh a výkresová výrobní dokumentace.

Seznam doporučené literatury:

MIZIOLEK, A. W., PALLESCI, V. a SCHECHTER, I. Laser Induced Breakdown Spectroscopy. 1. vydání. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. ISBN 978-051-1541-261..

SMITH, W. J. Modern optical engineering: the design of optical systems. 4. vydání. New York: McGraw Hill, 2008. ISBN 978-0071476874.

GLÉZL, Š., SLIMÁK, I. a KAMARÁD, J. Presná mechanika. Bratislava: Alfa, 1992. ISBN 80-050-09-2-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem konstrukčního a optomechanického řešení automatizace ostření laserového svazku pro přístroj dálkové laserové spektroskopie. Bylo zvoleno řešení s použitím aktivního dálkoměrného přístroje a rotační jednotky ovládající změnu roviny ostrosti optické soustavy daného přístroje.

Na základě použitých optických prvků byla prakticky změřena závislost změny roviny ostrosti daného optického systému na posuvu čoček v něm. Tato závislost je potřebná pro správné řízení rotační jednotky. Z vytvořené výkresové dokumentace byly vyrobeny konstrukční díly, které byly spolu s nakoupenými součástkami namontovány do stávající sestavy tohoto přístroje. Navržené řešení umožňuje případnou změnu optického systému například k získání vhodnějšího rozsahu rovin ostrosti.

Klíčová slova

Laserová spektroskopie, laserový svazek, dálkoměrné přístroje, krokový motor, LIBS

Summary

This diploma thesis deals with the structural and optomechanical design of automation of focusing laser beam for a remote laser spectroscopy device. The chosen solution uses an active rangefinder and a rotary unit to control the change of the focus plane of the device's optic system.

The dependence of the focus plane's change on the shift of lens in the focus plane was practically measured. For proper control of the rotary unit, this dependency is needed. Structural parts were made based on the created drawing documentation. The structural parts were mounted in the existing assembly of the device together with the purchased components. The proposed solution enables a change of the optical system, for example, in order to obtain a more appropriate range of focal planes.

Keywords

Laser spectroscopy, laser beam, rangefinder, stepper motor, LIBS

ZOBAČ, Evžen *Návrh motorizovaného optického systému pro zaostření laserového svazku*. Brno, 2019, 57 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117129>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav fyzikálního inženýrství. Vedoucí práce Jan Novotný.

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma „Návrh motorizovaného optického systému pro zaostření laserového svazku“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

V Brně dne 23.5.2019

.....

Evžen Zobač

Na tomto místě chci poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Janu Novotnému za věcné připomínky k obsahu této práce a pomoc při montáži. Své rodině, která mě při mém studiu i psaní této práce podporovala. Dále také svým kamarádům a přátelům za občasné rozptýlení myšlenek a v neposlední řadě i celému týmu laserové spektroskopie na ústavu fyzikálního inženýrství za rady a připomínky při návrhu konstručního i optického řešení.

Obsah

Úvod	10
1 Teoretická část	11
1.1 Spektroskopie laserem buzeného plazmatu	11
1.2 Laserový svazek a jeho vlastnosti	14
1.3 Metody automatického ostření používané v technických oborech	17
1.4 Dálkoměrné přístroje a techniky	18
2 Úvod do problému, výpočty a měření	23
2.1 Rozbor problému a původní myšlenka	23
2.2 Optické vlastnosti expandéru svazku	25
2.3 Zvolený dálkoměr a testování jeho použitelnosti	29
2.3.1 Přímé měření vzorků	30
2.3.2 Měření ovlivnitelnosti dálkoměru	30
2.3.3 Měření vzorku za použití soustavy zrcadel	30
2.3.4 Měření rychlosti odezvy dálkoměru	31
2.4 Zvolený krokový rotační motor a jeho vlastnosti	31
3 Mechanický návrh	33
3.1 Deska s optickou větví dálkoměru (V-03103)	33
3.1.1 Uchycení desky	34
3.2 Optické komponenty větve s dálkoměrem a jejich uchycení	34
3.3 Úchyt dálkoměru (V-03104 - V-03107)	35
3.4 Servomotor, zrcadlo a jejich uchycení (V-03110, V-03115, V-03117)	37
3.5 Spojka rotační jednotky expandéru svazku (V-03100, V-03101, V-03116)	39
4 Montáž	43
4.1 Lepené spoje	43
4.2 Úprava páky servomotoru	43
4.3 Montáž optických prvků a úchytů dálkoměru do desky	44
4.4 Umístění motorizované rotační jednotky a servomotoru se zrcadlem	45

4.5 Uchycení dálkoměru	46
5 Simulace statického zatížení	49
Diskuze	51
Závěr	52
Seznam zkratek	53
Literatura	56

Úvod

Cílem této diplomové práce je navrhnout a zkonstruovat řešení automatizace ostření laserového svazku přístroje určeného pro dálkovou spektroskopii, A-trace BB-1. V původním uspořádání byla změna roviny ostrosti laserového svazku měněna manuálně. K tomu bylo nutné otevřít kryt přístroje a mohlo tak dojít ke kontaminaci přístrojového prostoru prachem. Po provedení všech potřebných úprav by měl být přístroj schopen změřit vzdálenost analyzovaného předmětu a podle toho poté nastavit optické součásti laserové i sběrné větve.

V teoretické části práce je stručně popsán princip a použití metody laserové spektroskopie, vlastnosti laserového svazku a metody automatického ostření v technických odvětvích. V dalších kapitolách jsou popsány vlastnosti upravovaného přístroje jako celku a také jeho ostřicího systému, na základě kterých je navrženo možné řešení.

V kapitolách „Mechanický návrh“ a „Montáž“ jsou poté popsány postupy při navrhování konstrukčního řešení a následné instalace všech komponent do přístroje.

Kapitola 1

Teoretická část

1.1 Spektroskopie laserem buzeného plazmatu

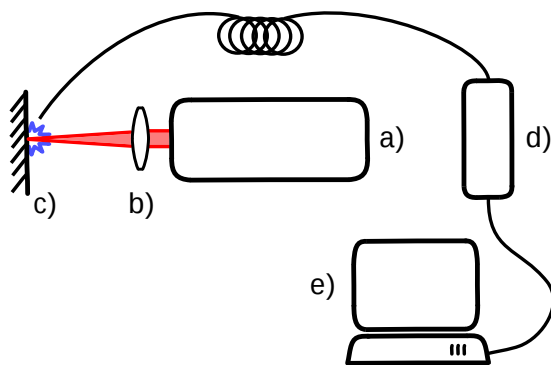
Optická spektroskopie obecně je vědní obor zabývající se zkoumáním látky na základě spektra, které látka vyzařuje, absorbuje nebo odráží. V případě, že se jedná o první z výše jmenovaných kategorií, mluví se o tzv. emisních spektrech. Tyto může látka emitovat po jejím zahřátí, přivedení elektrického proudu, nebo ozářením světlem [1]. Emisní spektra jednotlivých čistých prvků jsou nezaměnitelná a specifická (u sloučenin už to tak jednoznačné není, zejména kvůli tzv. maticovému efektu viz dále v textu).

Jednou z technologií zkoumající látky pomocí jejich emisních spekter, je spektroskopie laserem buzeného plazmatu, neboli LIBS¹ (Laser Induced Breakdown Spectroscopy). Tato metoda je založena na principu ozáření povrchu pozorované látky fokusovaným laserovým svazkem s vysokou hustotou výkonu ($> \frac{\text{GW}}{\text{cm}^2}$), na základě čehož v tomto místě dojde k vytvoření mikrop plazmatu². Charakteristické záření tohoto plazmatu je následně pomocí optických komponent (zrcadla, optická vlákna) sesbírané a analyzované spektrometrem. Takto je možno získat atomové/iontové emisní spektra přítomných prvků [2]. Zjednodušené schéma této metody je zobrazeno na obrázku 1.1.

Podrobnější pohled na vznik mikrop plazmatu je zobrazen na obrázku 1.2. Zde jsou časově rozlišeny jednotlivé fáze tohoto procesu (při použití laseru v pulzním režimu s délkou pulzu v řádech nanosekund), kdy ve fázi (1) dochází k počátečnímu ozáření vzorku fokusovaným laserovým svazem. Do cca 1 ns (2) dochází k přenosu energie z laserového svazku na malou plochu zkoumaného vzorku, který se v této oblasti začíná rychle zahřívat a tát. Od cca 1 ns (3) již dochází k vypařování materiálu, vzniku a expanzi plazmatu z této oblasti. Ve fázi (4) už nedochází k přenosu energie laseru na vzorek, ale pouze do obláčku plazmatu, který obsahuje excitované částice, ionty a atomy původního materiálu vzorku. V dalších fázích (5-7), po skončení laserového pulzu, postupně dochází k prudkému ochla-

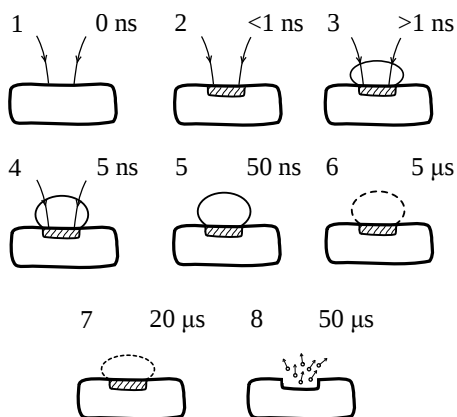
¹Někdy též LIPS (Laser Induced Plasma Spectroscopy)

²Hmotnost částic uvolněných ablací ng - μg , teplota ~ 10000 K

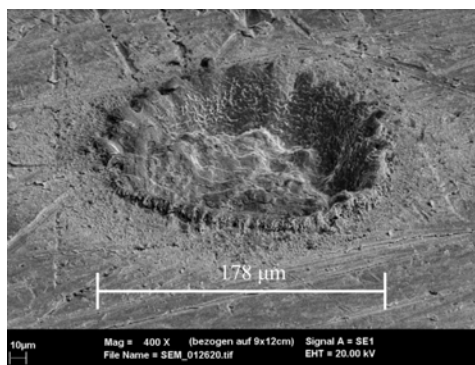


Obrázek 1.1: Zjednodušené schéma metody LIBS: (a) laserový zdroj, (b) fokusační optika, (c) analyzovaný předmět, (d) spektrometr s detektorem, (e) počítač.

zení plazmatu a k emisi charakteristického záření excitovaných iontů a atomů. Po zániku plazmatu (8) jsou v prostoru kolem zasaženého místa obsaženy volné částice uvolněné ze vzorku [3]. Z tohoto diagramu je také patrné, že LIBS je (obecně) destruktivní metoda, ačkoli dochází k zcela minimálnímu odběru původního materiálu (záleží na energii použitého laseru, druhu vzorku, vlastnosti okolního prostředí atd. [4]). Na obrázku 1.3 je zobrazen příklad kráteru, který byl vytvořen při analýze kovového vzorku.



Obrázek 1.2: Diagram vzniku mikrop plazmatu na povrchu zkoumaného vzorku. Překresleno z [5].

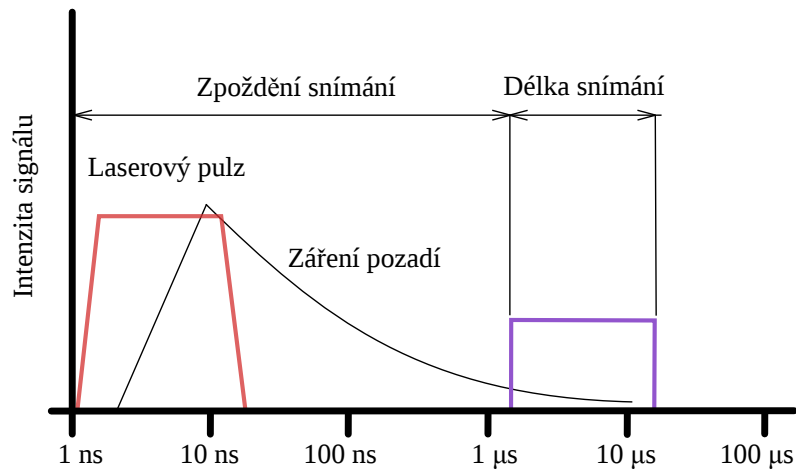


Obrázek 1.3: Kráter vytvořený na povrchu zkoumaného vzorku laserem s energií 140 mJ v nano-sekundovém pulzním režimu [6].

Jedním z komponentů, který nebyl uveden ve zjednodušeném schématu metody LIBS, ale běžně se s ní používá ³, je synchronizační jednotka, pulzní nebo též delay generátor. Toto zařízení řídí zpoždění snímání (gate delay) záření plazmatu oproti výstřelu. Dobu,

³Bez něj se obecně metoda LIBS provozovat dá, ovšem získané výsledky by byl spíše kvalitativní.

po kterou bude toto záření snímáno (gate window) nastavuje detektor. Tato činnost je důležitá, protože v prvních fázích vzniku plazmatu v pozorovaných spektrech dominuje kontinuální brzdné záření a záření způsobené rekombinací elektronů. Pro nano-sekundové lasery jsou zpoždění snímání nastavována na jednotky μs , u femto-sekundových laserů je to pak obecně několik ns. Co se týče doby snímání záření, ta je ovlivněna mnoha faktory (od použitého laseru, po poměr užitečného signálu ku pozadí) a obecně se pohybuje v řádech μs . Na obrázku 1.4 je zobrazeno schéma snímání záření plazmatu v závislosti na čase [7].



Obrázek 1.4: Zobrazení zpoždění snímání po výstřelu a délky snímání záření plazmatu při použití nanosekundového laseru (Překresleno z [3]).

Dalším faktorem, který z velké části ovlivňuje tvar a intenzitu získaných spekter, je tzv. maticový efekt, kdy se do výsledků určitým způsobem promítají vlastnosti daného materiálu jako jsou typ a velikost atomové mřížky, drsnost povrchu, složení látky, tloušťka případné tenké vrstvy, pórovitost materiálu atd. V laboratorním prostředí je možné toto řešit kalibrační přístroje s využitím kalibračních etalonů se stejnou nebo podobnou maticí, jako má měřený vzorek. Takovéto řešení ovšem není zcela ideální pro mimo-laboratorní podmínky, speciálně pak pro dálkové metody. Jedním z řešení toho problému je metoda CF-LIBS (neboli Calibration Free LIBS), která kromě měření intenzity emisní čáry bere v potaz i vlastnosti pozorovaného plazmatu jako jsou hustota elektronů a teplota plazmatu. Matematicky (pomocí Boltzmanova distribučního zákona a Sahovy rovnice) je pak získán kvantitativní výsledek bez nutnosti použití kalibračních křivek. Tato metoda ovšem zatím není zcela bezchybná a na jejím vývoji se stále pracuje [8]. Další možností pak může být multivariační regresní analýza, kdy je zapotřebí velké množ-

ství „učebních“ spektrálních dat známých vzorků. Koncentrace neznámého vzorku je pak vypočtena pomocí kalibračního modelu vytvořeného na základě těchto dat. Obvykle využívané metody jsou regrese hlavních komponent a metoda částečných nejmenších čtverců. V poslední době se v této oblasti začíná testovat i využití nelineárního strojového učení [9].

Použití metody LIBS je rozsáhlé, lze zkoumat látky vodivé i nevodivé, pevné, kapalné i plynné. Tenké povlaky a filmy [6], historické dokumenty nebo například radioaktivní materiál a další. Podstatnou výhodou pak je také možnost hloubkového profilování vzorku opakovaným výstřelem do stejného místa [2]. Tato metoda má také vyšší hloubkové rozlišení, než jiné používané analytické metody (např. SIMS, XPS, nebo XRF) [2] [6] [10]. V neposlední řadě pak je velkou výhodou, že pro měření není potřeba vzorek nikterak připravovat a je tedy možné například provozovat tuto metodu dálkově [2] či v přenosné konfiguraci mimo prostory laboratoře. Možnost konfigurovatelnosti této metody je další z výhod. Lze ji provádět i na nejjednodušších sestavách tvořených jen laserem s pevnou ostřicí optikou, optickým vláknem a spektrometrem spojeným s detektorem. Dalšími komponenty přidanými do sestavy je pak možno zlepšit získávané výsledky (generátor pulzů, interakční (například vakuová) komora, odtah vznikajících par atd.), nebo zjednodušit práci se sestavou (manipulátor vzorku, kamera snímající zkoumané místo s přídavným osvětlením atd.).

V poslední době dochází k rozšiřování této metody z čistě technického prostředí také do biologických oblastí, kdy je metoda LIBS používána například ke zkoumání půdy, jejích vlastností, složení a případné kontaminace [11]. Dále například k analýze buněk a mikroorganismů [12]. Ve vývoji metody z technického hlediska, probíhá vývoj dvou-pulzní metody DP-LIBS [13], výše zmíněné metody CF-LIBS [14], zapojení femto-sekundových laserů [11], nebo kombinace s fluorescencí LIFS (Laser Induced Fluorescence Spectroscopy), případně s Ramanovskou spektroskopií [15].

1.2 Laserový svazek a jeho vlastnosti

Na laserový svazek lze nahlížet jako na proud fotonů, který má následující vlastnosti. Šířka pásma vlnových délek jednotlivých fotonů je úzce omezena (monochromaticnost), je koherentní a šíří se prostorem ve tvaru úzkého svazku s malou rozbíhavostí.

Záření vydávané laserem pracujícím v kontinuálním režimu obsahuje frekvenční složky, které leží ve velmi úzkém intervalu frekvencí $< \omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2}, \omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2} >$, kde ω_0 je frekvence záření a $\Delta\omega$ se označuje jako spektrální šířka.

Koherenci lze rozdělit podle dvou různých aspektů na koherenci *časovou* a koherenci *prostorovou*. Časová koherence řeší vzájemnou korelaci dvou vln s časovým odstupem Δt . Jejím parametrem je koherenční délka $\Delta L = (c\Delta t) = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$, která udává maximální rozdíl optických drah, při kterém spolu vlny ještě interferují.

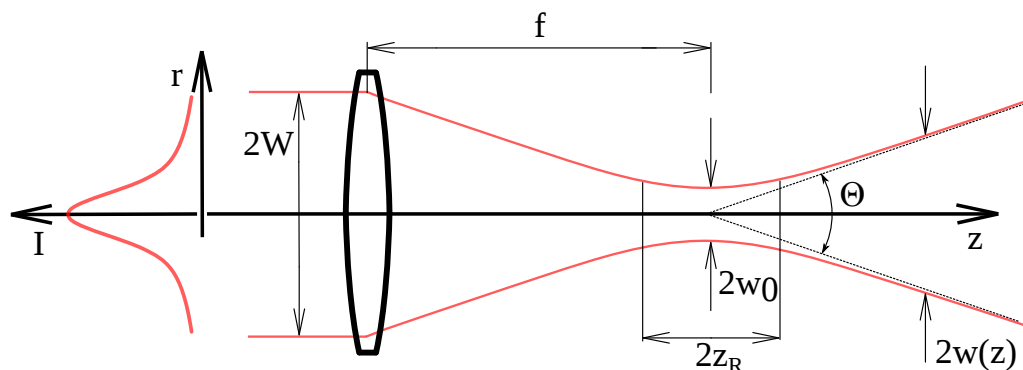
Prostorová koherence řeší korelaci světla ve dvou různých bodech prostoru. Jejím parametrem je koherenční šířka Δx , která udává největší prostorovou vzdálenost, při které světlo ještě interferuje [16].

Základní mod laserového svazku TEM_{00} má vlastnosti světelného svazku s Gaussovým rozdělením intenzity v průřezu svazku [17]. Jelikož optoelektronické přístroje dokáží měřit intenzitu světla, můžeme použít právě závislosti intenzity laserového svazku v závislosti na vzdálenosti od optické osy, která je popsána rovnicí 1.1. Intenzita na ose svazku je tedy popsána rovnicí 1.2. Jednotlivé komponenty těchto rovnic budou popsány níže.

Laserový svazek jako takový nemá v příčném směru ostré ohraničení, jednou z definic poloměru (pološířky) svazku $w(z)$ je taková vzdálenost od osy, ve které poklesne intenzita svazku na $\frac{1}{e^2}$ hodnoty intenzity I_0 na ose. Závislost poloměru svazku na vzdálenosti v osovém směru z je pak dána rovnicí 1.3. Nejmenší hodnoty poloměr svazku podle této rovnice nabývá v rovině $z = 0$ v takzvaném *pasu svazku*, w_0 je pak nazývána poloměrem pasu svazku.

Intenzita laserového svazku v rovině $z = 0$ je tedy dána vztahem 1.4. Poslední nezmíněnou veličinu ze vztahu 1.1 je z_r neboli Rayleighova vzdálenost. Je to osová vzdálenost, podél které je poloměr svazku menší nebo roven hodnotě $\sqrt{2}w_0$ a podél které můžeme považovat svazek za kolimovaný. Její dvojnásobek $2w_0$ se pak označuje jako *konfokální parametr*, nebo také *ohnisková hloubka* [17].

Průchod laserového svazku jednoduchou spojnou čočkou je schematicky zobrazen na obrázku 1.5.



Obrázek 1.5: Schematické zobrazení průchodu laserového svazku spojnou čočkou.

$$I(r, z) = I_0 \left[\frac{w_0}{w(z)} \right]^2 \exp \left[\frac{-2r^2}{w^2(z)} \right] \quad (1.1)$$

$$I(0, z) = I_0 \left[\frac{w_0}{w(z)} \right]^2 \quad (1.2)$$

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2} \quad (1.3)$$

$$I(r, 0) = I_0 \exp \left[\frac{-2r^2}{w_0^2} \right] \quad (1.4)$$

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (1.5)$$

, kde λ je vlnová délka světla.

Gaussovský svazek můžeme také popsat komplexním parametrem $q(z)$, který popisuje změnu příčného rozdělení intenzity v průřezu svazku a změnu křivosti vlnoplochy v rovině kolmé na osu svazku v závislosti na souřadnici z . Je definován jako:

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi w^2(z)} \quad (1.6)$$

, kde $R(z)$ je poloměr křivosti vlnoplochy. V pasu svazku je vlnoplocha rovinná ($R \rightarrow \infty$), dostáváme tedy paramtr q v ryze imaginárním tvaru:

$$q_0 = i \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (1.7)$$

Vlastnosti šíření a transformace gaussovského svazku lze pak popsat v maticovém tvaru následovně:

$$\begin{bmatrix} q' \\ 1 \end{bmatrix} = \xi \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

, kde ξ je normovací konstanta vhodně zvolená tak, aby dtuhá složka sloupcové matice byla rovna jedné [17].

1.3 Metody automatického ostření používané v technických oborech

Nejspíše prvním z technických oborů, ve kterém se začalo používat automatické ostření, byla fotografie. V 60. letech minulého století si svoji verzi automatického ostření nechala patentovat firma Leica [18]⁴. Od té doby se metody jak dosáhnout automaticky zaostření dále vyvíjely a obecně se dají rozdělit do dvou kategorií, na aktivní a pasivní.

Za **aktivní**, nebo také přímé metody automatického ostření jsou označovány ty, které ke své funkci používají vlastní zdroj vlnění (ať už mechanického, viz sonar v modelu Polaroid SX 70 Sonar, [20] nebo elektromagnetického, viz infračervené záření v případě výše uvedeného prototypu přístroje Leica) a detektoru, který toto vlnění po odrazu od měřeného předmětu zpětně detekuje. Na základě toho je systém schopen zjistit vzdálenost měřeného předmětu a dokáže nastavit uspořádání optických členů v přístroji.

Výhodou metod tohoto typu je vysoká rychlost měření (v závislosti na vysílaném vlnění), dále pak schopnost správně ostřit i za zhoršených světelných podmínek. Nevýhodou na druhou stranu pak je nižší přesnost oproti pasivním metodám, omezená měřená vzdálenost (jak nejnižší tak nejvyšší) nutností umístění aktivního zdroje vlnění do těla přístroje a možnost ovlivnění celého systému opticky průhlednými materiály (v případě použití elektromagnetického vlnění.)

Pasivními se v tomto oboru nazývají metody fungující na principu analýzy snímaného obrazu. K ostření je použit buď přímo hlavní sensor nebo speciální ostřicí senzory. Tento sensor poskytuje procesoru obraz k analýze ostrosti, přičemž ostrost se většinou vyhodnocuje na základě kontrastu hran nebo na základě fázového posuvu obrazu [21]. Potom zaostřovací mechanismus posouvá členy v objektivu vpřed a vzad a systém hledá místo maximální ostrosti [22]. Výhodou metod tohoto typu je možnost ostřit v libovolné vzdálenosti od objektivu (teoreticky od 0 do ∞), dále schopnost fungovat skrze průhledné materiály a vyšší přesnost oproti aktivním metodám. Nevýhodou naopak je například neschopnost fungovat bez vnějšího zdroje světla a špatná funkčnost při rozpoznávání homogenního předmětu bez výrazných hran či přechodů barev.

Pro účely této diplomové práce a aplikaci daného přístroje je výhodnější aktivní způsob automatického ostření. Hlavními důvody jsou rychlost měření, možnost měřit i při horších světelných podmínkách, případně také schopnost změřit vzdálenost homogenního předmětu. Následující podkapitola je tedy podrobněji věnována dálkoměrným přístrojům.

⁴Produkčně první přístroj s touto technologií však na trh uvedla firma Minolta (přístroj Maxxum 7000), která tento patent odkoupila [19].

1.4 Dálkoměrné přístroje a techniky

Existuje mnoho optických metod a zařízení, které dokáží změřit vzdálenost předmětu nebo jeho posuv. Obecně je možno je rozdělit na aktivní a pasivní. Pasivní typy, pracující na principech trigonometrie, používané nejvíce ve stavebnictví nebo vojenství [23], se pro účely automatizace nehodí. Aktivní dálkoměrné přístroje (dálkoměry) používají, jak bylo již uvedeno výše, ke zjištění vzdálenosti aktivního členu. Obecně do této kategorie patří SONAR, který vysílá/detekuje zvukové vlny, dále pak RADAR, který vysílá/detekuje rádiové vlny. Rádiové vlny se pro čistě jednodimenzionální měření vzdálenosti nepoužívají, zejména kvůli vyšší divergenci svazku a poměrně vysoké energetické náročnosti zdroje vlnění.

Senzory pracující na principu SONARu mají také problém s vyšší divergencí použité vlny, nicméně díky relativně nízké ceně jsou používány v běžných technických aplikacích. Například tam, kde není nutná až tak vysoká přesnost měření (viz výše zmíněné automatické ostření ve fotoaparátech, parkovací senzory v automobilech, nebo senzory robotického/strojového vidění [24]). Z těchto důvodů se dále budeme bavit o dálkoměrech, které ke svému fungování používají elektromagnetické vlnění s vlnovými délkami v oblasti viditelného spektra a blízké infračervené oblasti (380 - 2500 nm).

Jedním z nich je **triangulační senzor**. U tohoto druhu senzoru se ke zjištění měřené vzdálenosti využívá geometrických vztahů (princip podobných trojúhelníků) ze znalosti vzdálenosti zobrazovací optiky (a jejích vlastností) od senzoru (viz zjednodušené schéma 1.6). Kolimovaný laserový paprsek je pod mírným úhlem namířen na zkoumaný předmět, od kterého se tento paprsek odráží a po průchodu přes zobrazovací optiku je zaznamenán na fotodetektoru. Na základě polohy laserové stopy na detektoru je poté vypočtena vzdálenost měřeného předmětu. Někdy je též místo jednoho paprsku použit linkový laser. V takovém případě je možno měřit více bodů v jedné přímce na vzorku najednou. Rozsah měřených vzdáleností u tohoto typu detektoru se pohybuje od jednotek milimetrů do cca jednoho metru ⁵ [24]. Přesnost měření je pak závislá na průměru stopy laserového svazku, na rozlišení použitého detektoru a také na vzdálenosti měřeného předmětu (s rostoucí vzdáleností se snižuje). Obecně pak dosahuje tato metoda přesnosti řádově desetin μm - mm [25].

Výhodou triangulačních senzorů je rychlost měření a relativně nízká cena. Nevýhodou naopak nízká schopnost měřit transparentní a slabě odrazivé předměty.

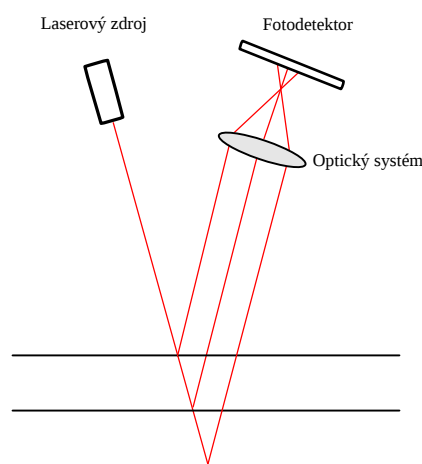
Konfokální snímač vzdálenosti funguje na podobném principu jako konfokální mik-

⁵Maximální měřená vzdálenost je limitována šířkou snímače, pro vyšší vzdálenosti by musel být značně široký.

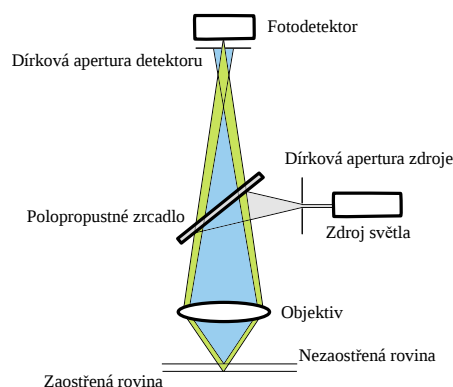
roskop. V tomto případě je užito dvojice konfokálních clon, optiky ostřící světlo na měřený předmět, polopropustného zrcadla, zdroje světla a fotodetektoru (viz reflexní uspořádání na obrázku 1.7. Maximální signál je zaznamenán pouze v případě, kdy je měřený předmět umístěn v obrazové rovině použité optiky. Intenzita zaznamenaného signálu se velmi ostře mění v závislosti na změně profilu povrchu (pološířka zaznamenaného signálu může dosahovat i několika mikrometrů [24]. Tento typ senzoru je sám o sobě spíše vhodný na měření relativní změny vzdálenosti, než měření absolutní vzdálenosti. Obvykle je v takovémto snímači používáno monochromatické osvětlení.

Jednou z modifikací je konfokálně-chromatický senzor. Optika konfokálně-chromatického senzoru sestává ze skupiny čoček, které mají známou výraznou barevnou vadu. Při použití bílého světla je tedy vytvořena jiná rovina ostrosti pro každou vlnovou délku rozloženého světla. V odraženém světle potom dominuje ta vlnová délka, jejíž rovina ostrosti leží na ploše zkoumaného předmětu. Pomocí spektrometru je poté odražené světlo analyzováno a díky znalosti barevné vady systému čoček může být přesně určena vzdálenost měřeného předmětu [26].

Konfokální senzory obecně umožňují provádět přesná měření malých vzdáleností (μm - mm), povrchových nerovností a profilů s přesností v řádu mikrometrů. Většinou tyto přístroje neobsahují mechanicky pohyblivé části, což zvyšuje přesnost a stabilitu měření. Velkou výhodou této metody je také možnost provádět měření skrze transparentní materiály a prostředí, dále také možnost měřit téměř jakýkoli alespoň částečně odrazný povrch.



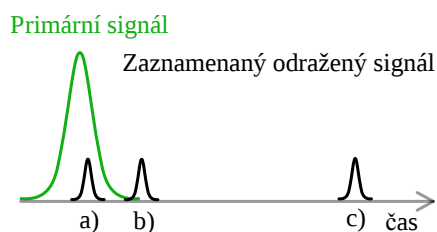
Obrázek 1.6: Schéma triangulační metody měření vzdálenosti (úhel natočení zdroje záměrně zvětšen pro lepší názornost). Překresleno z [25]



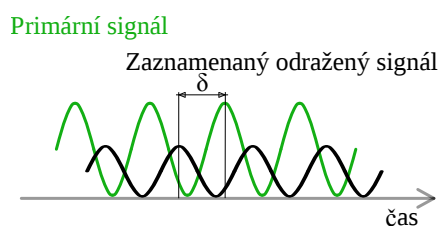
Obrázek 1.7: Schéma metody konfokálního snímače vzdálenosti. Modrou barvou je znázorněn chod paprsků z nezaostřené roviny, zelenou naopak z roviny zaostřené. Překresleno z [27]

Pro běžná měření zejména dlouhých vzdáleností je v současné době nejčastěji používaná metoda **TOF (Time Of Flight)**, neboli metoda měření doby letu paprsku. Tato

metoda funguje na principu měření časového zpoždění paprsku po odrazu od měřeného objektu. Obvykle se jako zdroj světla používá laser nebo laserová dioda pracující v pulzním režimu s vlnovými délkami v oblasti blízkého infračerveného záření. Pro větší vzdálenosti (mnohem větší než je prostorová šířka pulzu, viz obrázek 1.8) je možné TOF měřit s poměrně jednoduchými detektory. Měření vzdáleností menších než desítky centimetrů touto metodou znamená, že přístroj detekuje odražený pulz ještě předtím, než byl vyslán celý pulz primární. V současné době nejrychlejší fotodiody dosahují časového rozlišení v řádu fs. Při použití tohoto druhu diod by byla teoreticky nejkratší měřitelná vzdálenost v rámci jednotek milimetrů [28]. Avšak běžně takto rychlé diody užívány nejsou. Pulzní metoda je, i kvůli tomuto, obvykle používána pro měření spíše vzdáleností delších než 50 m [24] maximální pracovní vzdálenost pak závisí na výkonu laseru, odrazivosti měřeného předmětu, nebo citlivosti senzoru ⁶, obvykle nebývá omezena prostředím jako mlha, déšť atd. [29].



Obrázek 1.8: Záznam signálu u metody TOF v pulzním režimu pro dobu letu a) kratší než je šířka pulzu b) podobná šířce pulzu c) mnohem delší než šířka pulzu. Překresleno z: [24].



Obrázek 1.9: Záznam signálu AM-TOF, kde δ značí zkoumaný fázový posuv. Překresleno z [24].

Alternativou k pulzní metodě TOF je použití amplitudové modulace laserového svazku v kontinuálním režimu laseru (metoda AM-CW TOF). Před výstupem primárního svazku z dálkoměru je tento svazek rozdělen do dvou větví, jedna vystupuje z dálkoměru a odráží se na měřeném předmětu, druhá je mezitím amplitudově modulována. Poté co odražený svazek dorazí opět do dálkoměru, je zkombinován s modulovaným signálem. Změřený fázový posuv těchto dvou větví je pak úměrný době letu svazku od měřeného předmětu zpět [24].

U další varianty této techniky je místo amplitudové modulace užita modulace frekvenční, tedy FM-CW TOF. Kdy je průběžně lineárně měněna frekvence původního laserového

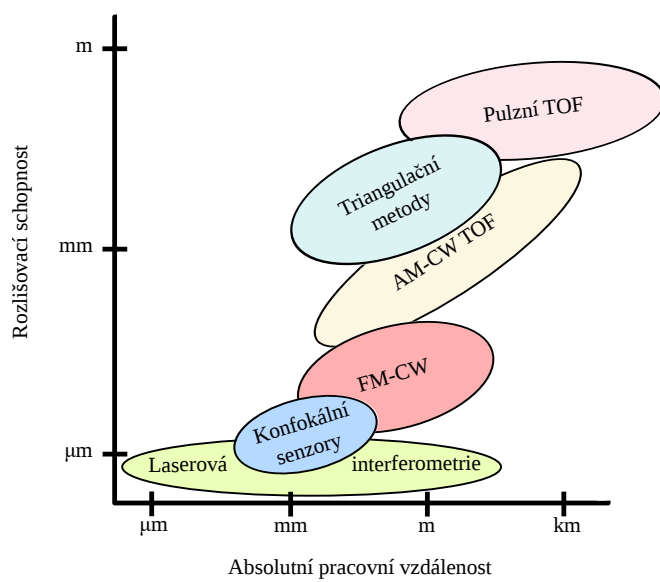
⁶Pulzní metodou byla například změřena vzdálenost Měsíce od Země (384 402 km).

svazku. Oproti amplitudové modulaci má frekvenční větší šířku pásma modulace, tedy i lepší rozlišení měření. Nejčastěji se při modulaci užívá pilový, nebo sinusový profil. U obou typů modulace je pak nejkratší měřitelná vzdálenost v řádech jednotek mm, maximální měřitelná vzdálenost pak v řádech desítek km.

Pro velmi přesná délková měření jsou také používány **interferometry**, a to buď při použití vysoce koherentního laserového světla, nebo naopak nízko-koherentního světla. V prvním případě jsou interferometry schopny měřit změny polohy měřeného předmětu ve zlomcích vlnové délky použitého světla na základě interference světelných vln z dvou různých větví interferometru a pozorování změn v interferenčním obrazci. Obecně jsou interferometry pracující s vysoce koherentním světlem spíše vhodné pro (velice přesné) měření změny polohy. Pro získání absolutní hodnoty vzdálenosti měřeného předmětu je možno využít více-vlnové interferometrie (MWLI - MultipleWaveLenght Interferometry), kdy je užito dvou světelných vln s podobnými vlnovými délkami a je porovnávána záznějová frekvence měřící a referenční větve [24] [30].

Interferometrie s použitím nízko-koherentního světla, též nazývána interferometrie bílého světla (WLI - White Light Interferometry) naopak využívá krátké koherenční délky, díky čemuž dochází k interferenci jen při malých rozdílech optických drah. Tohoto se opět využívá k přesnému měření drahových rozdílů [24].

Na obrázku 1.10 je zobrazeno porovnání pracovních vzdáleností a rozlišení jednotlivých metod měření vzdálenosti zmíněné výše v textu.



Obrázek 1.10: Přehled porovnání pracovní vzdálenosti a rozlišení jednotlivých měřících optických metod. Překresleno z [24]

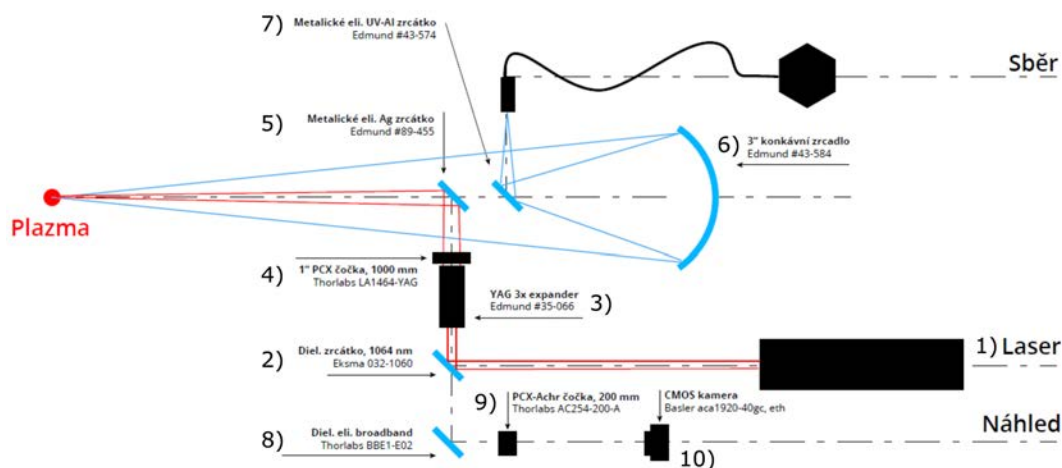
Kapitola 2

Úvod do problému, výpočty a měření

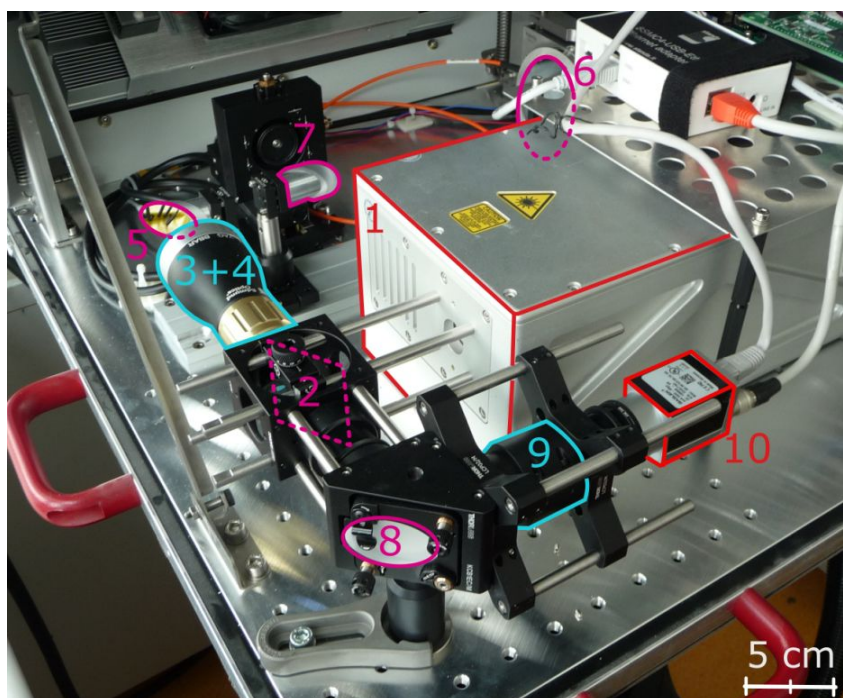
2.1 Rozbor problému a původní myšlenka

Tato diplomová práce se zabývá automatizací ostření laserového svazku stávajícího optického systému přístroje určeného pro dálkovou laserovou spektroskopii A-trace BB-1 (Atomtrace a.s.). Přístroj je vybaven dvojicí Nd:YAG laserů Bernoulli (Litron Lasers) pracujícím na vlnové délce 1064 nm [31], optikou, umožňující fokusovat laserový paprsek a spektrometrem IRIS typu Echelle (Spectral Industries) [32]. Mezi další součásti pak patří kamera umožňující pozorovat zkoumaný objekt, nebo lineární krokový motor (Standa), který se stará o ostření sběru záření plazmatu. Schéma tohoto přístroje je zobrazeno na obrázku 2.1, reálný stav pak na obrázku 2.2.

V původním stavu umožňoval ostřit laserový svazek pouze manuálně, pomocí expandéru svazku (#35-066 [33], Edmund Optics). Změna polohy roviny ostrosti je u tohoto systému prováděna pomocí otáčení prstence na těle expandéru, čímž dochází ke změně vzájemné polohy čoček uvnitř expandéru. Hloubka ostrosti tohoto systému je udávána na 10 mm. O vnitřním uspořádání optických komponent v tomto expandéru je více uvedeno v následující podkapitole. Níže je nastíněno možné řešení zadaného problému.



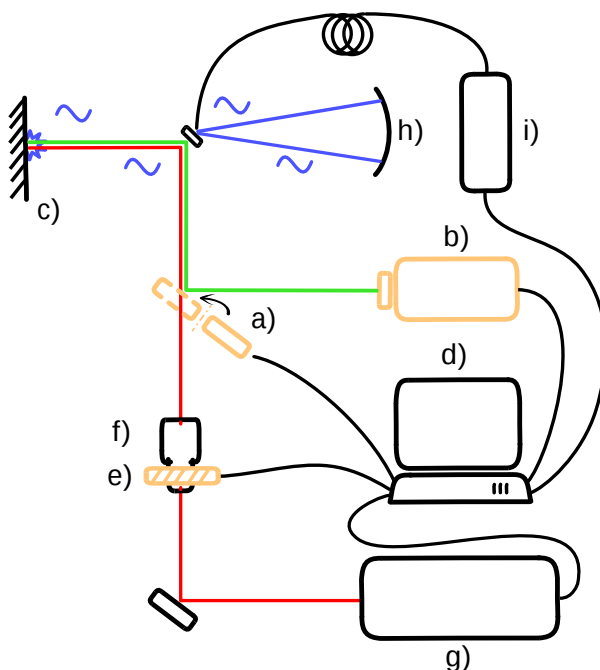
Obrázek 2.1: Původní schéma přístroje BB-1. Převzato se svolením Ing. Jana Novotného, PhD.



Obrázek 2.2: Vnitřní uspořádání přístroje BB-1. 1) Laser 2) Dichroické zrcadlo 3) Expandér svazku 4) Spojná čočka 5) Výstupní zrcátko 6) Sběrné konkávní zrcadlo 7) Sekundární zrcátko sběru záření 8) Zrcátko náhledové větve 9) Čočka náhledové větve 10) Kamera.

Na obrázku 2.3 je zobrazeno navržené schéma automatizace ostření svazku z počítače. V první fázi se pomocí servomotoru sklopí zrcátko větve s dálkoměrem (*a*), čímž propojí optickou trasu dálkoměr - vzorek. Poté se spustí dálkoměr (*b*) a změří vzdálenost měřeného předmětu (*c*). Tuto hodnotu poté pošle do počítače (*d*), který poté dá příkaz rotačnímu krokovému motoru (*e*) o kolik a na kterou stranu otočit prstencem expandéru (*f*), ke kterému je připevněn. Poté se opět sklopí zrcátko (*a*) a umožní laseru (*g*) skrze optiku (*f*) ozářit povrchu vzorku (*c*). Záření vzniklého plazmatu je potom pomocí zrcadla

(*h*) sesbírané a odvedené optickým vláknem do spektrometru (*i*).

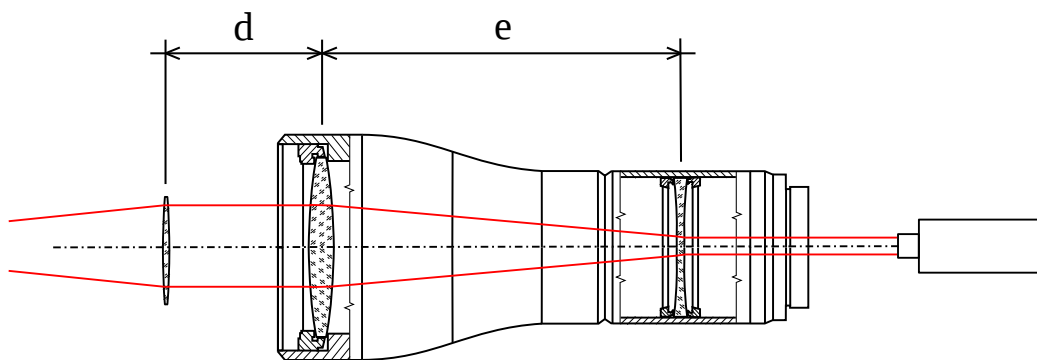


Obrázek 2.3: Schéma návrhu automatizace ostření laserového svazku. Přidané komponenty barevně odlišeny.

2.2 Optické vlastností expandéru svazku

Předtím než byl zvolen vhodný motor přeastřování, bylo nutné zjistit optické vlastnosti použitého expandéru, které jsou potřebné pro správné řízení tohoto motoru (viz níže). Jedná se o soustavu dvou čoček spojně a rozptylně v Galileově uspořádání s možností posuvu rozptylky vůči spojce. Na stránkách výrobce, ani v dokumentaci k tomuto expandéru nebyly uvedeny ani ohniskové délky použitých čoček ani rozsah posuvu. Veškeré tyto hodnoty bylo nutné získat pokusně nebo měření. Expandér jako takový disponuje trojnásobným zvětšením. Pro zjištění zbylých hodnot potřebných k dalším výpočtům byla navržena testovací sestava viz obrázek 2.4.

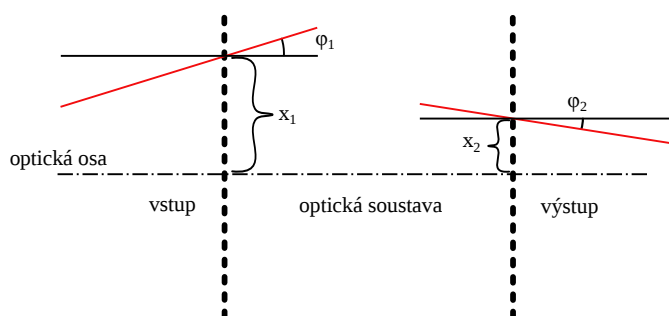
Za tělo expandéru byla umístěna pomocná spojná čočka o známé ohniskové délce. Takováto sestava může být popsána pomocí zobrazovací matice. Průchod laserového svazku optickou soustavou je obvykle řešen pomocí matice 1.8. V tomto případě nás však zcela nezajímají parametry daného svazku po průchodu soustavou, jako spíše celková obrazová ohnisková délka takovéto soustavy a její vzdálenost od posledního členu soustavy. Do roviny tohoto ohniska je potom ostřen procházející laserový svazek.



Obrázek 2.4: Schéma pokusu měření optických vlastností expandéru svazku.

Průchod paprsku obecnou optickou soustavou je pak popsán rovnicí (2.1). Kde x_1 a x_2 je vstupní resp. výstupní výška paprsku a y_1 a y_2 je tangens úhlu vstupujícího resp. vystupujícího paprsku viz obrázek 2.5. Zobrazovací matice této sestavy je pak vypsána v rovnici (2.2)¹, kde f_p je ohnisková délka pomocné čočky, f_s je ohnisková délka spojné čočky expandéru a f_r je ohnisková délka rozptylné čočky expandéru. Vzdálenost mezi pomocnou čočkou a spojnou čočkou je d a vzdálenost mezi spojnou a rozptylnou čočkou je e .

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$



Obrázek 2.5: Vysvětlující grafika k rovnici (2.1) (Překresleno z [34].)

¹Kvůli nemožnosti fyzicky proměřit čočky v expandéru svazku byla zvolena aproximace tenkými čočkami.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f_p} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f_s} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & e \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f_r} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Nejprve byl proveden pokus zjistit optické vlastnosti expandéru svazku pomocí výpočtů. Protože zvětšení expandéru je trojnásobné, můžeme říct, že $f_s = -3 \cdot f_r$. Pokud pak uvažujeme, že vstupní úhel vstupního svazku φ_1 je blízký, nebo roven nule, a dále že poměr $|\frac{x_2}{y_2}|$, který označme F' , je roven vzdálenosti obrazu od posledního optického členu, pak po dosazení rovnice (2.2) do (2.1) a několika úpravách dostaneme rovnici (2.3). Jelikož ohniskovou délku pomocné čočky známe, její vzdálenost od spojně čočky expandéru také a vzdálenost F' dokážeme změřit, jediné dvě neznáme v této rovnici jsou vzdálenost mezi spojnou a rozptylnou čočkou e a ohniskovou délku spojně čočky expandéru f_s . Pokud však provedeme dvě měření s dvěma a více různými pomocnými čočkami pro neměnnou polohu čoček v expandéru (tedy pro konstantní e získáme soustavu dvou rovnic pro dvě neznámé e a f_s). Jelikož e je pro obě měření konstantní a vystupuje na levé straně o samotě, můžeme tyto dvě rovnice od sebe odečíst, čímž získáme jednu rovnici pro jednu neznámou f_s ve tvaru 2.4.

$$e = \frac{1 - \frac{2d}{3f_s} - F' \left\{ -\frac{1}{f_p} - \frac{2}{f_s} \left[1 - \frac{d}{f_p} \right] \right\}}{F' \frac{1}{3f_s} \left[\frac{d-f_p-f_s}{f_p f_s} \right] - \frac{1}{3f_s} \left[1 - \frac{d}{f_s} \right]} \quad (2.3)$$

$$\frac{1 - \frac{2d}{3f_s} - F'_1 \left\{ -\frac{1}{f_{p1}} - \frac{2}{f_s} \left[1 - \frac{d}{f_{p1}} \right] \right\}}{F'_1 \frac{1}{3f_s} \left[\frac{d-f_{p1}-f_s}{f_{p1} f_s} \right] - \frac{1}{3f_s} \left[1 - \frac{d}{f_s} \right]} - \frac{1 - \frac{2d}{3f_s} - F'_2 \left\{ -\frac{1}{f_{p2}} - \frac{2}{f_s} \left[1 - \frac{d}{f_{p2}} \right] \right\}}{F'_2 \frac{1}{3f_s} \left[\frac{d-f_{p2}-f_s}{f_{p2} f_s} \right] - \frac{1}{3f_s} \left[1 - \frac{d}{f_s} \right]} = 0 \quad (2.4)$$

Pro toto měření byly zvoleny spojně čočky ohniskové délky 35, 75 a 100 mm. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.1. Závislost získaná po dosazení těchto hodnot do rovnice 2.4 má ovšem obecně více kořenů. Bylo zjištěno, že tyto kořeny jsou silně závislé na změně parametru d . Kvůli tomu nebylo možno touto metodou jednoznačně určit optické parametry daného expandéru a tedy ani celou zobrazovací matici systému.

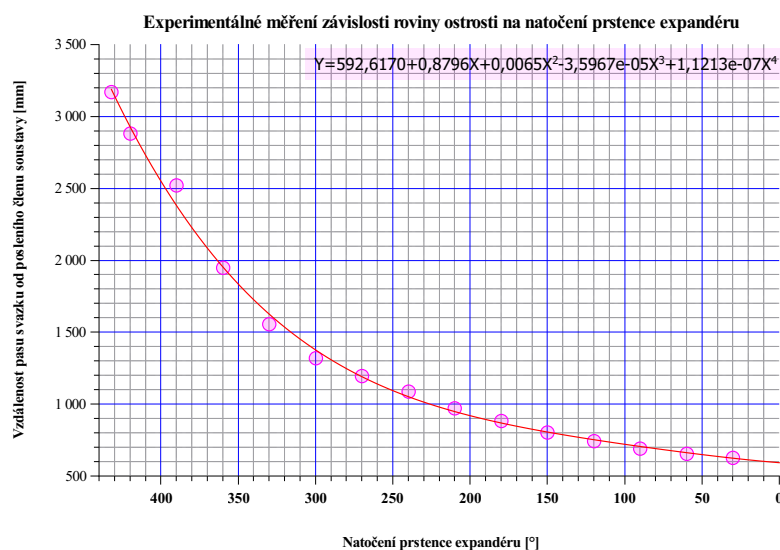
Další možností, jak zjistit závislost polohy roviny ostrosti na vzdálenosti čoček takového systému, je získat ji empiricky. Pro tento experiment lze použít uspořádání z předchozího odstavce. V tomto případě ovšem stačí použít jednu pomocnou čočku a postupným otáčením prstence expandéru měnit polohu čoček v něm a zaznamenávat polohu roviny ostrosti takového systému. Následně tyto hodnoty vynést do grafu, případně je proložit vhodnou křivkou.

Pro tento pokus byla zvolena pomocná spojná čočka s ohniskovou délkou 1000 mm. Jako

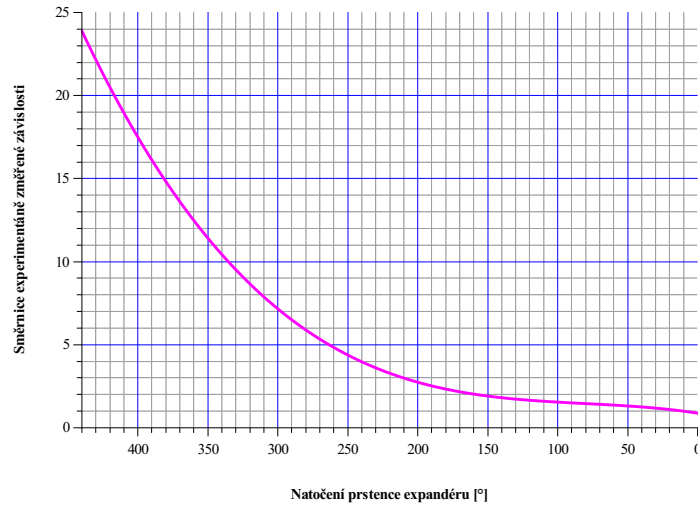
Tabulka 2.1: Naměřené hodnoty při testování optických vlastností expandéru svazku

Ohnisková délka čočky [mm]	Úhel natočení prstence [°]	Změřené poloha obrazové ohniskové roviny soustavy [mm]
35	0	33,2
	432	38,5
75	0	66,4
	432	94,1
100	0	85,7
	432	135,6

zdroj světla byla použita laserový modul CPS532 (Thorlabs) s průměrem svazku 3,5 mm pracující na vlnové délce 532 nm. Hodnoty získané tímto měřením jsou zobrazeny na obrázku 2.6. Naměřené body byly proloženy polynomem 4. stupně, jehož funkční závislost je uvedena v pravém horním rohu tohoto grafu. Derivací této závislosti pak získáme graf 2.7. Tento graf nám říká o kolik milimetrů se rovina ostrosti v jednotlivých polohách natočení (0 - 440°) posune pokud v této poloze otočíme prstencem expandéru o 1°. V poloze 440° je to 24 mm, tedy pro posuv roviny ostrosti o polovinu Rayleighovy délky ², (5 mm) je potřeba otočit prstencem expandéru o 12,5'. Tato závislost byla brána jako orientační k zjištění potřebné jemnosti kroku otočení.

**Obrázek 2.6:** Graf závislosti polohy roviny ostrosti soustavy expandér + spojná čočka na natočení prstence expandéru.

²Pokud je nejmenší realizovatelný krok posuvu obrazové ohniskové roviny menší, než je Rayleighova délka, můžeme říct, že jsme schopni zaostřit laserový svazek v celém rozsahu posuvu.



Obrázek 2.7: Velikost směrnice proložené funkce z grafu 2.6 na natočení prstence expandéru.

2.3 Zvolený dálkoměr a testování jeho použitelnosti

Předpokládaná měření by měla probíhat ve vzdálenostech v jednotkách metrů od přístroje BB-1. Potřebná přesnost měření, na základě znalosti Rayleighovy délky, je pak v jednotkách milimetrů. Těmto podmínkám nejlépe vyhovuje některá z metod měření TOF. Pro tuto aplikaci byl zvolen optický dálkoměr ILR 1182 (Micro-Epsilon) [35]. Parametry dálkoměru jsou vypsány zde:

- Vlnová délka používaného paprsku: 650 nm
- Rozlišení senzoru: 0,1 mm
- Průměr svazku: <11 mm ve vzdálenosti 10 m
- Divergence svazku: 0,6 mrad
- Maximální měřitelná vzdálenost: 50 m (pro rozptýlné povrchy)
- Čas odezvy: až 20 ms
- Systém detekce vzdálenosti: Detekce rozdílů fáze (FM-CW TOF)
- Výška×šířka×délka: 51×99×210 mm
- Hmotnost: 980 g

Nejprve byly experimentálně otestovány jeho funkce. Byla zjišťována minimální a maximální vzdálenost vzorku od dálkoměru na kterou je schopen dálkoměr změřit, dále pak bylo testováno, jestli dálkoměr nebude ovlivňován průhledovým sklem na opláštění systému, pod jakým úhlem vystupuje paprsek z dálkoměru, přesnost měření s danými vzorky a nakonec odezva dálkoměru na změnu vzdálenost vzorku. Při měřeních byl použit, mimo

výše zmíněného dálkoměru, RS422/USB konvertor IF2001/USB sloužící k převodu signálu z dálkoměru do USB paketů a software zobrazující naměřená data DAQ Tool ve verzi 3.4.5 (oboje od firmy Micro-Epsilon [36]). Ve všech následujících měřeních byly použity vzorky keramických brusiv o rozměru $30 \times 30 \times 20$ mm s obdobnou strukturou povrchu, lišily se pouze barvou (černá, červená, bílá).

2.3.1 Přímé měření vzorků

V této části byla měřena minimální a maximální měřitelná vzdálenost při přímém umístění vzorku do osy před dálkoměr. Co se týče maximální měřitelné vzdálenosti, technická dokumentace dálkoměru uvádí maximální měřitelnou vzdálenost 50-150 m (v závislosti na vlastnostech měřeného objektu). Pro uvažované použití s daným optickým systémem je nutná maximální měřitelná vzdálenost v jednotkách metrů. Při testování nebyl problém změřit vzdálenost všech tří vzorků, které byly umístěny 10 m od dálkoměru.

Minimální potřebná měřitelná vzdálenost je omezena navrženým optickým systémem. Nejkratší vzdálenost polohy vzorku od čočky umístěné za expandérem svazku je 320 mm. Naměřené minimální vzdálenosti výše zmíněných vzorků byly: 103 mm pro bílý vzorek, 396 mm pro červený a 462 mm pro černý vzorek.

2.3.2 Měření ovlivnitelnosti dálkoměru

V reálné situaci bude mezi dálkoměrem a měřeným materiálem umístěna minimálně jedna částečně odrazná plocha, a to průhledové a krycí sklo na opláštění, skrze které je vyveden laserový svazek a kterým je následně sbíráno záření plazmatu. Bylo tedy testováno, zda hodnoty naměřené tímto dálkoměrem nebudou ovlivněny umístěním takového povrchu do prostoru před měřený vzorek. Při testování bylo použito rovinné borosilikátové sklo s tabulkovou odrazivostí 5 % pro vlnovou délku použitého dálkoměru. Ať bylo toto sklo umístěno kdekoli a pod jakýmkoli úhlem k optické ose, měřené hodnoty tímto ovlivněny nebyly.

2.3.3 Měření vzorku za použití soustavy zrcadel

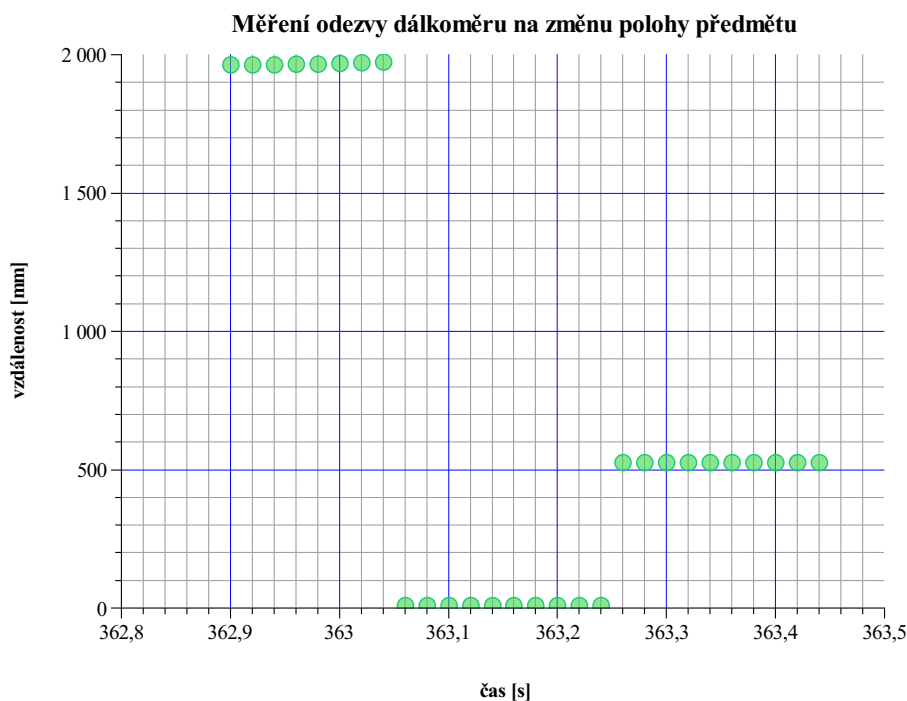
Zdroj primárního paprsku dálkoměru není umístěn přímo v optické ose ale je posunut (viz obrázek ??). Dálkoměr nebude na měřený objekt mířit přímo, ale jeho paprsek bude zaveden do výstupní optické větve přístroje pomocí soustavy zrcadel. Pro testování byla použita zrcadla o průměru jednoho palce (BBE1-E02 Thorlabs), která paprsek odkláněla tak jak je znázorněno na obrázku 3.2. Test prokázal, že dálkoměr je schopen fungovat i

ve spojení s takovou soustavou zrcadel.

2.3.4 Měření rychlosti odezvy dálkoměru

Testování probíhalo podle následujícího schématu. Do jedné řady za sebou v optické ose dálkoměru byly umístěny dva vzorky stejných vlastností. Odstraněním a opětovným vložením prvního ze vzorků z řady byla simulována změna vzdálenosti vzorku. Na obrázku 2.8 jsou zobrazeny výsledky tohoto měření. Odezva na změnu vzdálenosti měřeného vzorku je tedy v rámci několika desetin sekundy, což je pro tuto aplikaci plně dostačující.

Všechna výše zmíněná měření tedy prokázala, že zvolený dálkoměr je pro použití v tomto systému vhodný.



Obrázek 2.8: Odezva dálkoměru při změně vzdálenosti měřeného předmětu z 2000 mm na 500 mm.

2.4 Zvolený krokový rotační motor a jeho vlastnosti

Jedno z nejpodstatnějších kritérií pro výběr rotačního krokového motoru do této sestavy bylo vypočteno v předcházející kapitole, jedná se o minimální úhlový posuv a byl vypočten na 12,5'. Dalším kritériem pak byly rozměry daného motoru a to jak vnější, aby bylo možno tento motor jednoduše zakomponovat do sestavy celého přístroje, tak vnitřní, aby

bylo možno jej spojit s použitými optickými komponenty. Posledním z kritérií pak byla kompatibilita s již použitým driverem ovládající lineární krokovou jednotku 8MT173-25 (Standa), která se stará o ostření sběru záření plazmatu. Tento driver 8SMC5-USB (Standa) [37], umožňuje ovládání dvou nezávislých os krokových motorů. Výstup na jednu osu je již výše zmíněnou jednotkou 8MT173-25. Primárně tedy byly zvažovány rotační krokové motory a jednotky od této firmy. V tabulce 2.2 jsou vypsány jednotky, které byly zvažovány pro aplikaci sestavě automatizace ostření.

Tabulka 2.2: Tabulka možných rotačních jednotek.

Název	8MR151-30	8MR-190-2	8MR-170-190	8MR-190-90-59
Průměr apertury [mm]	30	50,8	84	89
Jemnost kroku [$^{\circ}$]	0,6	0,6	0,1	0,9
Hmotnost [kg]	0,6	1,0	3,2	6,6

Maximální průměr expandéru svazku je 46 mm, minimální pak 31 mm. Jako podstatnější byl zvolen maximální průměr tohoto expandéru, aby bylo možné při tento motor instalovat přes expandér s čočkou (3+4) a nemuset jej odmontovat od zbylého optického systému (2) viz obrázek 2.2. Jedním z přístrojů splňující všechny výše vypsané parametry je motorizovaná rotační jednotka 8MR190-2 (Standa) [38] ovládaná krokovým motorem 28 stejného výrobce [39], která byla nakonec vybrána. Níže jsou vypsány i zbylé parametry tohoto přístroje.

- Rozsah rotace: 360°
- Rozlišení jednoho (celého) kroku: $0,6'$
- Rozlišení $1/8$ kroku: $4,5''$
- Maximální rychlost rotace: 8 ot/min
- Vůle záběru mezi motorem a rotační jednotkou: 0
- Maximální výkyv v příčném směru: $0,5'$
- Přípustné zatížení: horizontální 10kg, vertikální 2 kg
- Maximální vyvinutý moment: 1 Nm
- Hmotnost: 1 kg

Kapitola 3

Mechanický návrh

V této kapitole je popsán postup při návrhu potřebných konstrukčních částí, čísla v závorce (V-xxxxx) odkazují na označení výkresů jednotlivých dílů.

3.1 Deska s optickou větví dálkoměru (V-03103)

Z důvodu nedostatku prostoru na optické desce přístroje BB-1 byla navržena pomocná deska na kterou byl umístěn dálkoměr i zrcadla navádějící paprsek do výstupní větve přístroje. Při návrhu tohoto dílu bylo nutno brát v potaz zástavbové možnosti celého systému. Zejména pak možnost použití pouze omezeného počtu závitových děr, které odpovídají bodům, ve kterých je tato deska podepíraná. Hlavní problémem bylo zvolit tloušťku desky tak:

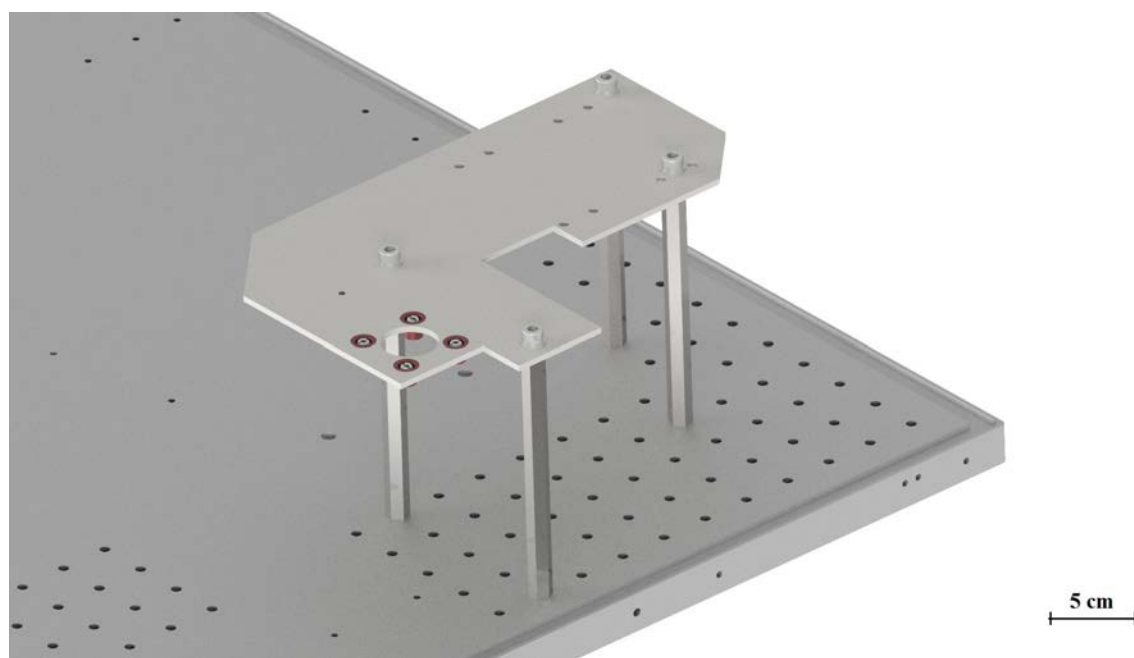
- Aby nedocházelo k přílišnému průhybu na okrajích desky pod váhou zrcadel a jejich upevnění v místech, kde není možné umístit podporu přímo pod ně, ale zároveň tak, aby na nepodepřených okrajích nedocházelo k průhybu desky vlastní vahou.
- Aby bylo do ní možno nalisovat zápusťné lisovací matice. Do těchto matic se poté našrouboval redukční šroub převádějící UNC závit 4-40 použitý v tyčích klecového systému Thorlabs na metrický závit M6 ¹.

Jako nejlepší kompromis mezi všemi výše popsány parametry byla na základě simulace (viz níže) zvolena tloušťka desky 3 mm. Materiálem na výrobu pak byla zvolena korozi vzdorná ocel 1.4301 bez povrchové úpravy. Render návrhu této desky je zobrazen na obrázku 3.1, simulace průhybu desky při působení statického zatížení je pak zobrazena v kapitole simulace 5.2.

¹Tomuto řešení byla dána přednost před prostým uchycením šroubem přes díru v desce z důvodu přesnějšího upevnění do desky a také kvůli možnému pozicování optických komponent ve svislém směru. Zápusťnou lisovací matici s vnitřním závitem M6 lze zalisovat do plechu tloušťky minimálně 1,5 mm (dáno výškou hlavy této matice).

3.1.1 Uchycení desky

Desku samotnou bylo třeba uchytit k základní optické desce přístroje (viz obrázek 3.1). K tomuto účelu byly vybrány ocelové distanční sloupky tloušťky 10 mm a délky 130 mm. Tyto se na spodní straně pomocí závitů M6 upevnilly do základní desky a na horní straně pak pomocí šroubů přichytily k desce nesoucí dálkoměr. Umístění těchto tyčí bylo kompromisem mezi volnými závitovými otvory v základní desce a co nejvhodnějším podepřením desky s dálkoměrem. Výška těchto sloupků a tedy u svislé umístění desky s dálkoměrem, bylo ze spodu omezeno zvolenou rotační krokovou jednotkou obsluhující expandér svazku. Shora potom tím, aby se dalo víko přístroje BB1 zavřít přes tělo (a kabeláž) zvoleného dálkoměru.

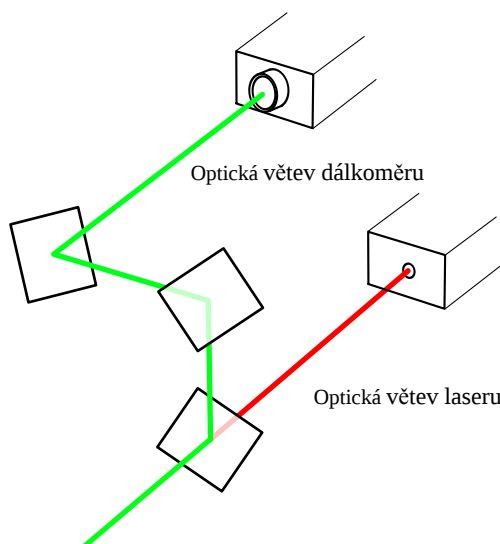


Obrázek 3.1: Render desky dálkoměru a navrženého uchycení.

3.2 Optické komponenty větve s dálkoměrem a jejich uchycení

Jednou z částí, která se přichytává do desky zmíněné v předchozí podkapitole je optická soustava sloužící k navedení větve dálkoměru do výstupní větve přístroje. V ideálním případě by stačilo jediné zrcadlo, které by sklápělo paprsek z dálkoměru o 90° směrem dolů, kde by se pomocí sklopného zrcadla napojil do výstupní větve přístroje. To by

znamenal, že celá deska i dálkoměr samotný by musela být umístěna až nad krokovým rotačním motorem. Takovéto uspořádání však nebylo možné realizovat kvůli případné kolizi při zavírání krytu. Z toho důvodu bylo třeba umístit osu dálkoměru mimo optickou osu a přístroje použít ještě jedno zrcadlo k napojení do výstupní větve (viz obrázek 3.2. K tomuto účelu byly použity pár eliptických zrcadel ² o šířce jednoho palce. K jejich uchycení byl použit klecový systém pro úchyt optických prvků od firmy Thorlabs. Konkrétně pro uchycení zrcadel byly použity držáky KCB1E/M (Thorlabs), které byly vzájemně propojeny čtyřmi tyčemi délky jednoho palce (ER1), pomocí stejných tyčí pak byl první z úchytů připevněn k desce s dálkoměrem, druhý úchyt byl pak upevněn jedním ocelovým distančním sloupkem, který byl pak opět upevněn k desce dálkoměru.



Obrázek 3.2: Návrh zavedení paprsku z dálkoměru do osy větve laseru.

3.3 Úchyt dálkoměru (V-03104 - V-03107)

Výše zmíněný dálkoměr disponuje na těle umístěnými úchytnými drážkami tvaru "V" (po dvou na každé straně umístěné vodorovně a po jedné svisle), které se dají použít ke snadnému uchycení tohoto dálkoměru. V balení byly již výrobcem dodávány ocelové úchytné prvky (ocelové tyče obdélníkového průřezu se závitovými otvory), které ovšem nebyly dostačující pro důsledné uchycení v této aplikaci. Na základě těchto tyčí byly navrženy

²Při použití kruhových apertur eliptická zrcadla (při pravoúhlém odrazu) přenášejí oproti kruhovým, či čtvercovým zrcadlům více informací při stejné odrazné ploše.

vodící tyče obdobné, ovšem s větším počtem závitových otvorů a větší roztečí otvorů (toto řešení by mělo zajistit rovnoměrnější rozložení tlaku na plochu desky dálkoměru a také momentů působících na nohy úchytu dálkoměru.). Původní tyče byly k tělu dálkoměru jištěny pouze jedním stavěcím šroubem na každé straně. Toto řešení je však nedostačující v případě manipulace s přístrojem BB-1 ve kterém by byl dálkoměr umístěn, mohlo by dojít k jeho uvolnění z úchytů a poškození optických či mechanických prvků přístroje. Na základě toho jsou navrženy tyče navíc osazené z obou stran čely (z jedné strany pevné, z druhé strany upevněné dvěma šrouby) zabraňující tyči vyjet z drážky. Díky tomu je již umožňuje manipulovat s celým přístrojem, aniž by hrozilo riziko poškození vnitřních součástí při případném uvolnění dálkoměru. Na obrázku 3.3 je zobrazeno porovnání původní a navržené tyče.



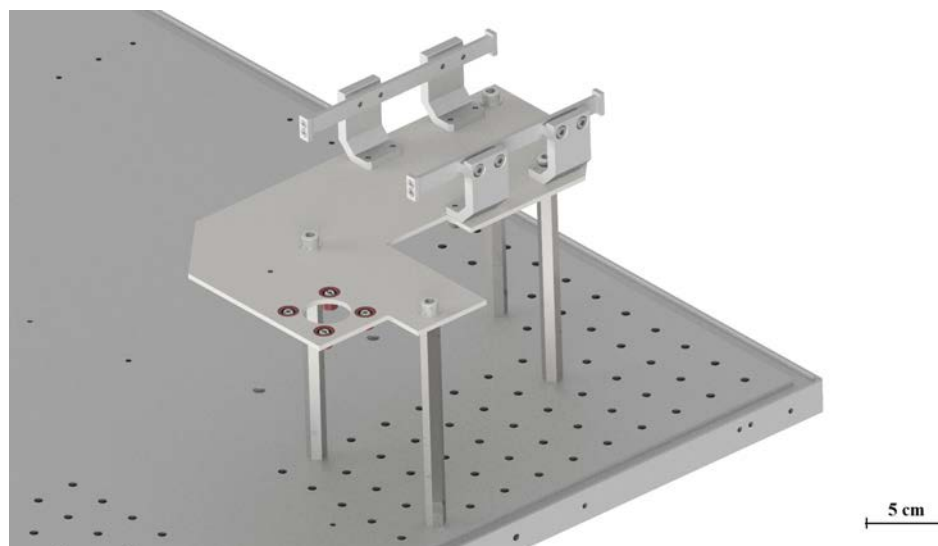
Obrázek 3.3: Porovnání původní úchytné tyče (vepředu) s navrženou (vzadu).

Dále bylo třeba dálkoměr uchytit k desce zmíněné na začátku této sekce. Při návrhu takového úchytu byly podstatné dva faktory. Zaprvé to, že výška optické osy větve s dálkoměrem je definována použitým úchytným klecovým systémem (zmíněným v předcházející sekci). Zadruhé bylo třeba zvolit dostatečně lehký, a současně dostatečně pevný a stabilní prvek. Nízká hmotnost byla vyžadována z hlediska zatížení nepodepřených okrajů desky s dálkoměrem, pevnost a stabilita pak kvůli hmotnosti celého dálkoměru. Simulace statického zatížení těchto úchytů je zobrazena na obrázku 5.3. U jednoho z těchto úchytů bylo nutné v jeho podstavě navrhnout otvor, do kterého je umístěn šroub spojující distanční podpěrný sloupek a desku dálkoměru, viz obrázek 3.4.

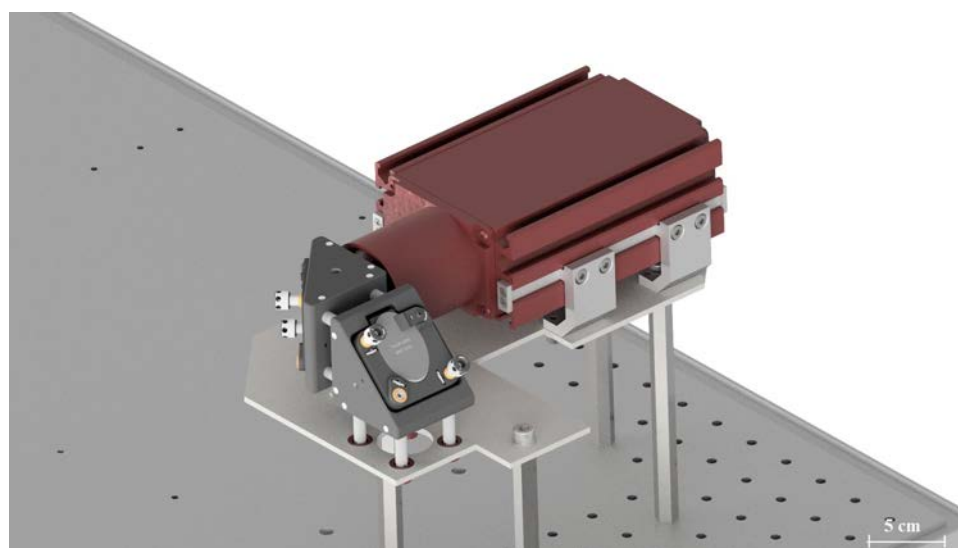
Jak pomocné vodící tyče, tak úchyty dálkoměru, byly vyrobeny z hliníkového materiálu AW-6082 (vysoká pevnost, dobrá obrobiteľnosť, možnosť eloxování³), jako povrchová

³Eloxování je elektrolytický proces, při kterém dochází k vytvoření tenké oxidové vrstvy na povrchu

úprava bylo zvoleno eloxování (barva přírodní, tloušťka 20 μm).



Obrázek 3.4: Render navrženého uchycení dálkoměru.



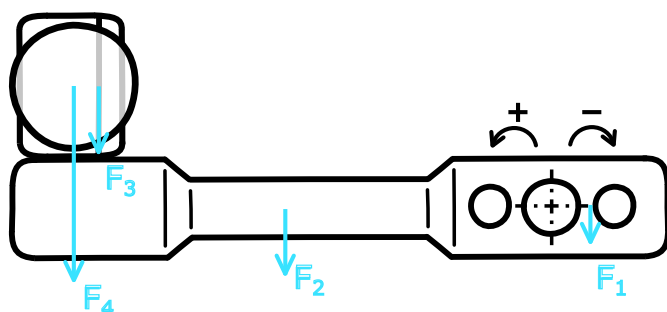
Obrázek 3.5: Render navrženého uchycení dálkoměru s dálkoměrem a zrcadly.

3.4 Servomotor, zrcadlo a jejich uchycení (V-03110, V-03115, V-03117)

Jako poslední prvek propojující větev dálkoměru s výstupním zrcadlem přístroje byla zvažována sestava servomotoru a zrcadla, která by v případě měření vzdálenosti přerušila hliníkové součásti. Zvyšuje tvrdost, korozivzdornost a oděruvzdornost.

laserovou větev a následně se po změření vzdálenosti sklopila do počáteční polohy. Při navrhování této sestavy bylo třeba brát v potaz, že tato sestava nesmí ve sklopené poloze svým průřezem stínit sběrnému zrcadlu, protože by tím docházelo ke snížení aktivní plochy sběru záření.

Vhodný servomotor byl vybrán na základě dvou podmínek. První z nich byly rozměry servomotoru, z důvodů omezeného zástavbového prostoru, druhým pak byl točivý moment daného servomotoru. Zvolený servomotor HS-77BB (Hitec) je vhodný díky svému nízkému profilu (23 mm) a je schopen vyvinout točivý moment 0,4 Nm (viz tabulka 3.1. Působení sil obrobků uchycujících zrcadlo a zrcadla samotného na servomotor je zobrazen na obrázku 3.6. V tabulce 3.1 jsou zapsány momenty jednotlivých částí a celkový moment. Z této tabulky je patrné, že i tuto podmínku servomotor splňuje.



Obrázek 3.6: Schematické zobrazení působišť a velikostí tíhových sil úchytů zrcadla a zrcadla samotného.

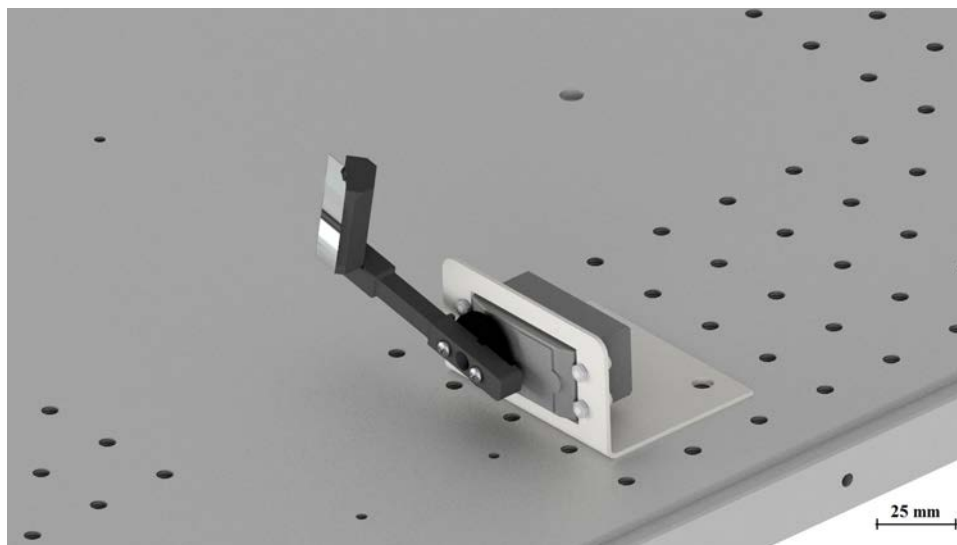
Tabulka 3.1: Moment působící na servomotor

	m(g)	r(mm)	M(Nmm)
1	2,22	-10,35	-0,23
2	7,81	32,87	2,52
3	8,53	51,05	4,27
4	30,00	55,87	16,44
Celkový moment			23,00
Moment vyvinutý servomotorem			431,63

Zrcadlo do této sestavy bylo zvoleno stejné, jaká jsou uchycena na desce spolu s dálkoměrem. K propojení servomotoru a zrcadla byly navrženy dva díly. První z nich, rameno,

zajišťuje správné umístění zrcadla ve svislém směru. Druhý z nich, úchyt zrcadla pak zajišťoval správné úhlové umístění zrcadla 45° k optické ose laseru. Připevnění zrcadla k úchytu bylo provedeno pomocí dvousložkového epoxidového lepidla (viz kapitola Montáž), k přesnému umístění zrcadla na obrobek pomáhala vyfrézovaná drážka v jeho úchytu. Obě tyto součástky byly vyrobeny z materiálu AW-6082, povrchová úprava eloxování (barva černá, tloušťka $20\text{ }\mu\text{m}$).

K uchycení celého kompletu servomotoru s úchytem zrcadla k základní desce přístroje byla navržena plechová konzola, která se k základní desce připevnila šrouby. Konzola byla vyrobena z nerezového plechu (ocel 1.4301) bez povrchové úpravy (viz obrázek 3.7). Simulace statického zatížení této konzoly je zobrazeno na obrázku 5.1.

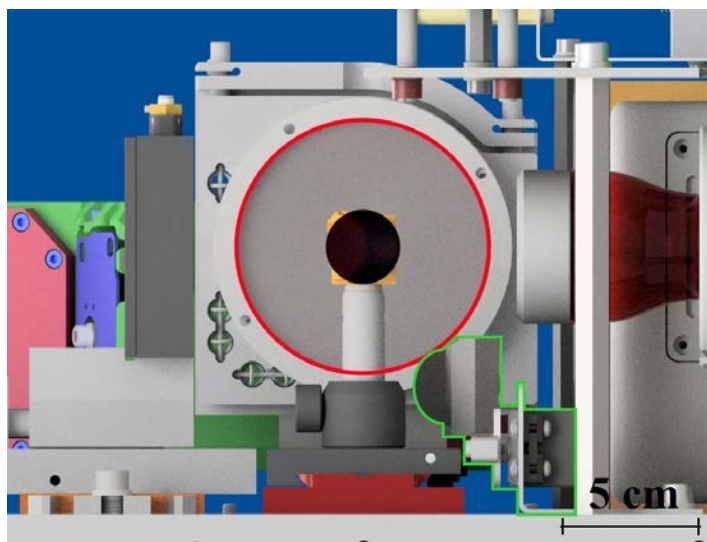


Obrázek 3.7: Render návrhu uchycení servomotoru.

Na obrázku 3.8 je zobrazena sestava zrcadla, uchycení zrcadla a servomotoru ve sklopeném stavu. Je patrné, že nijak nestíní sběru záření mikroplazmatu.

3.5 Spojka rotační jednotky expandéru svazku (V-03100, V-03101, V-03116)

Jedním z nejdůležitějších komponent při vytváření modifikace původní sestavy je prvek spojující krokový rotační motor a expandér laserového svazku. Tato spojka má za úkol přenést dostatečně přesně otáčky motoru na prstenec expandéru. Kvůli jednodušší montáži a případné demontáži byl tento díl rozdělen na dva kusy. První část, tělo spojky, je napevno spojena s prstencem expandéru lepeným spojem (popis tohoto spoje je uveden

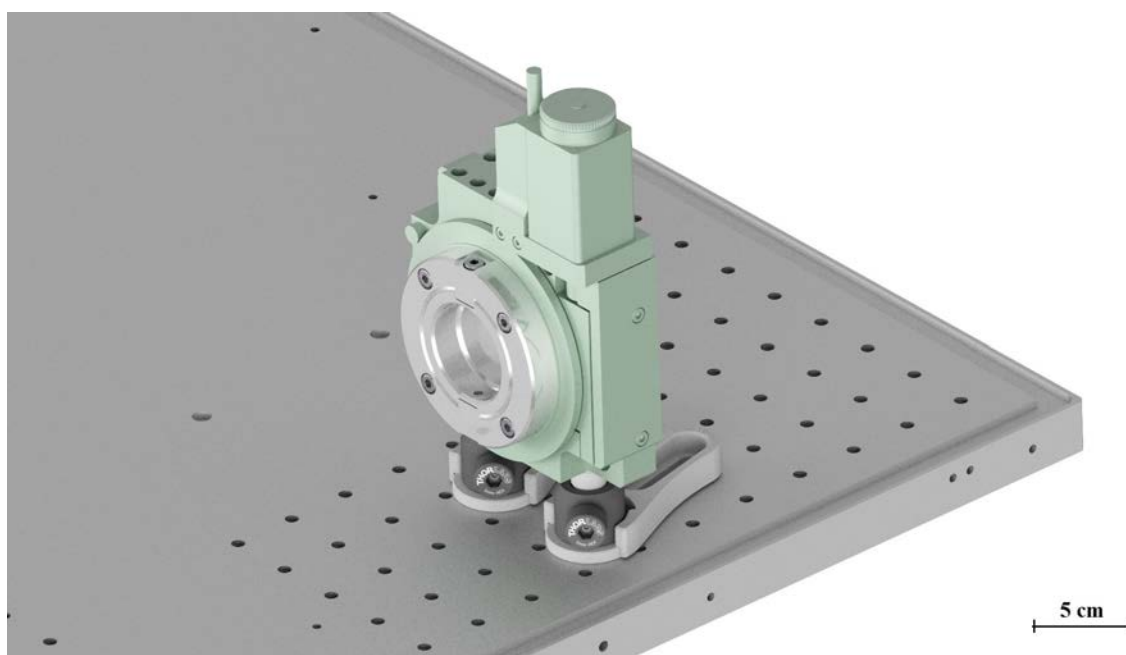


Obrázek 3.8: Render zobrazující systém ve stavu, kdy je rameno se zrcátkem (zelený obrys) sklopeno. Je patrné, že sběr záření zrcadlem (červený obrys) není touto sestavou zastíněn.

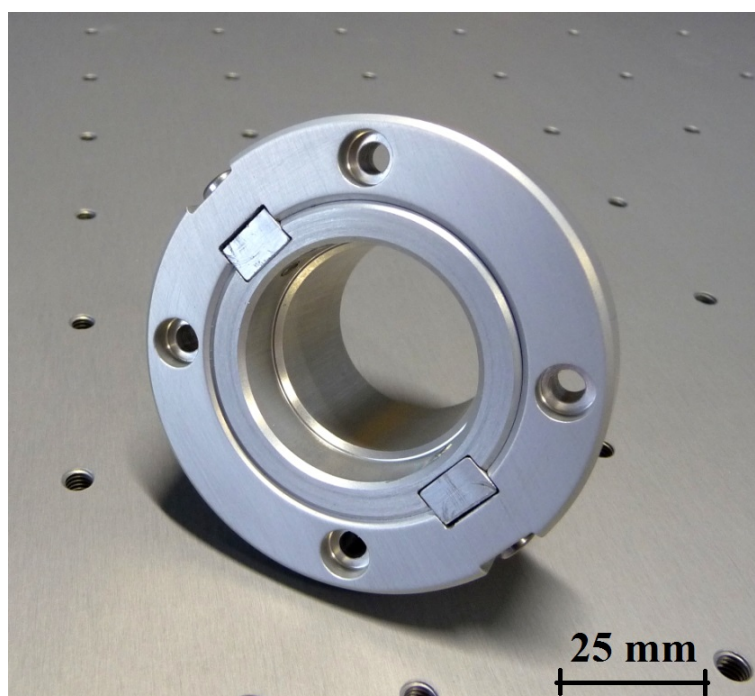
v kapitole Montáž). Druhá část, čelo spojky, je k tělu připevněno pomocí dvou naproti sobě umístěných per. Čelo spojky je pak k motoru připevněna čtyřmi šrouby M4. Při navrhování této spojky bylo důležité řídit se rozměry použitého expandéru. A to tak, aby se čelo dalo nasadit na expandér z jeho širší strany a zároveň bylo namontovatelné na motorizovanou rotační jednotku Standa. Dále pak bylo potřeba, aby vnitřní průměr těla spojky byl co nejblíže průměru šroubovacího prstence na expandéru z důvodu co nejmenší nutné vrstvy lepidla. Všechny tři spoučásky byly vyrobeny z hliníkového materiálu AW-6082, jako povrchová úprava bylo zvoleno eloxování (barva přítodní, tloušťka $20\ \mu\text{m}$). Celý komplet spojky je zobrazen na obrázku 3.10

Pro uchycení samotné rotační základny byly zvoleny distanční tyče (RS25/M) a její držák (RSH1.5/M) Thorlabs, které se do základny našrubují přes závity M4. Tyto nohy jsou pak přichyceny pomocí upínací vidlice (PF175) stejné firmy (viz obrázek 3.9).

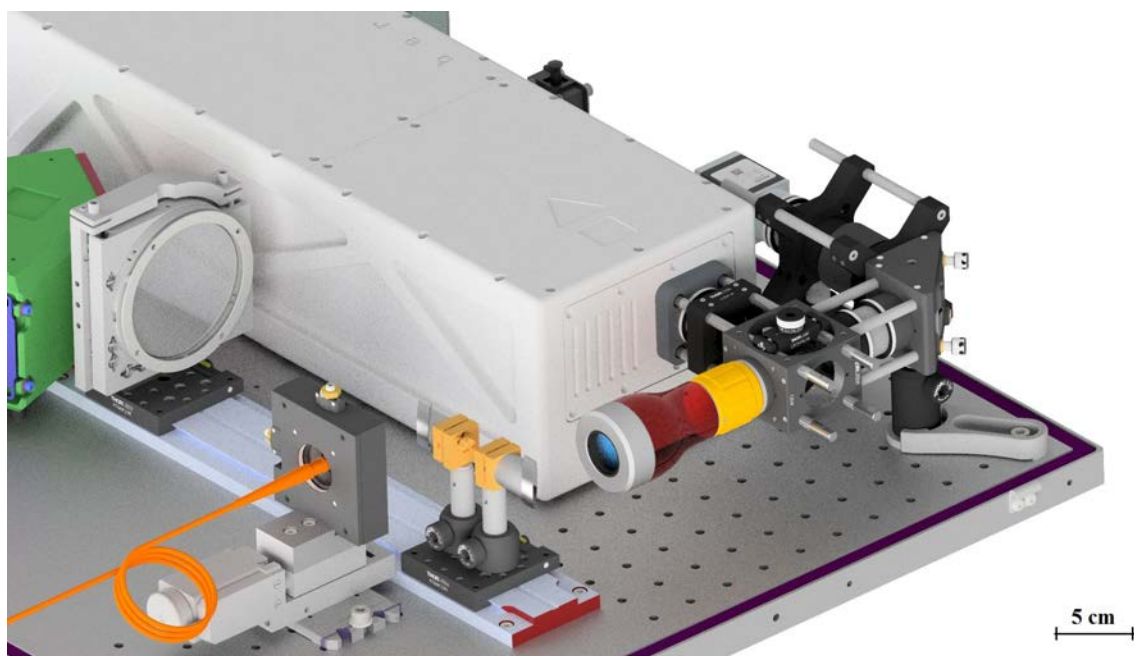
Veškerá zhotovená výkresová dokumentace je přiložena v příloze.



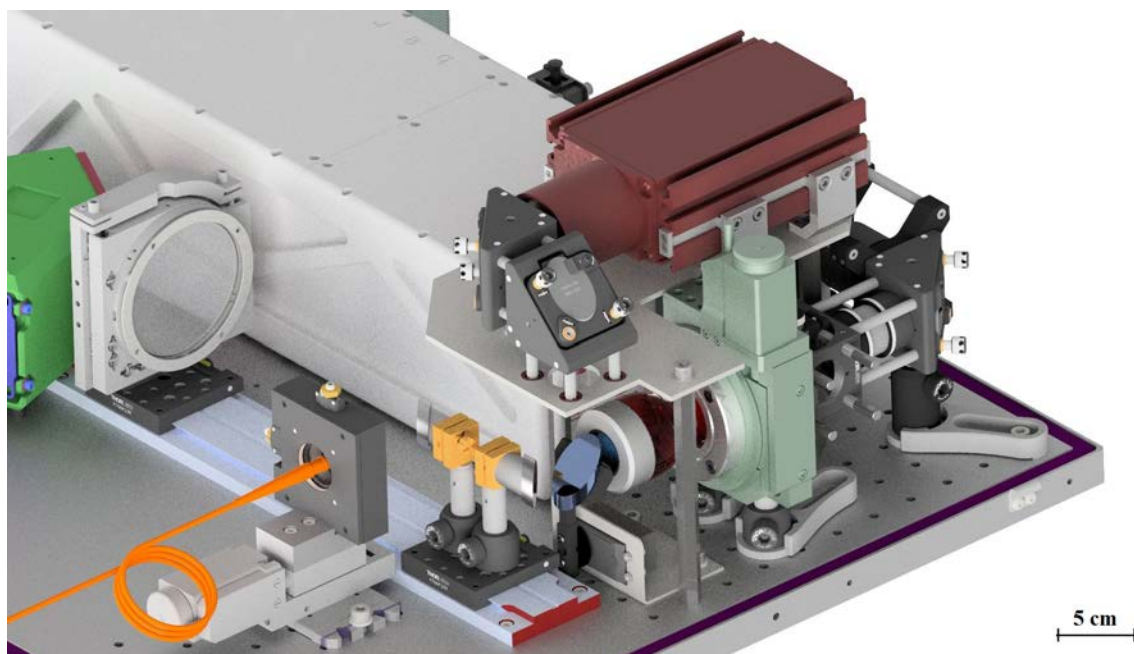
Obrázek 3.9: Render návrhu uchycení servomotoru.



Obrázek 3.10: Fotografie zkompletovaného celku spojky



Obrázek 3.11: Render původního prostorového uspořádání.



Obrázek 3.12: Render návrženého řešení umístěného do přístroje BB-1.

Kapitola 4

Montáž

Před samotnou montáží bylo potřeba provést několik přípravných postupů. Ty jsou popsány v následujících dvou podkapitolách.

4.1 Lepené spoje

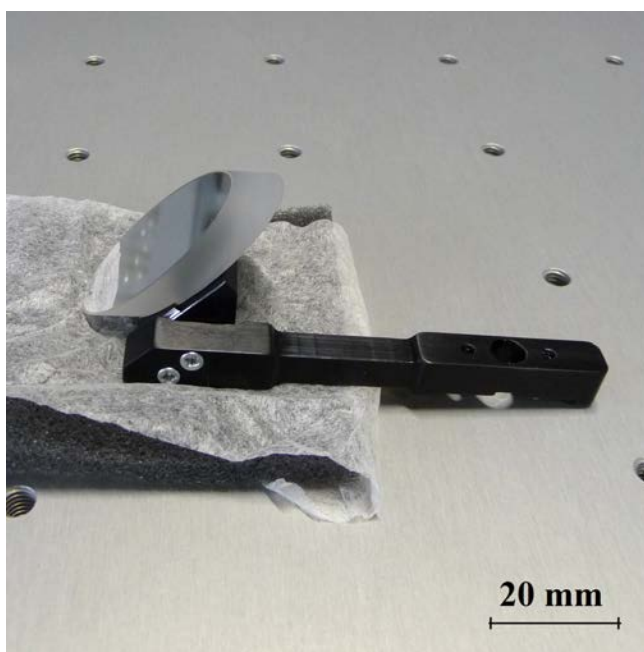
Ke spojení těla spojky a expandéru svazku a také ke spojení úchytu zrcadla k zrcadlu samotnému bylo zvoleno lepených spojů. Co se týče spojky a expandéru, nenabízelo se v tomto případě mnoho jiných možností. V případě uchycení zrcadla je další z možností mechanické uchycení pomocí úpinek, nebo podobných prvků [40]. Avšak vezme-li se v potaz, že toto zrcadlo nebylo zamýšleno jako vyměnitelné a dále také jeho malou velikost a hmotnost, byl i v tomto případě zvolen lepený spoj. Pro tyto účely bylo zvoleno dvojsložkové epoxidové lepidlo vhodné na kovové materiály.

Nejprve byly lepené plochy pomocí ethylalkoholu odmaštěny a očištěny. Po jeho vyprchání byla na jednu z lepených ploch (úchyt v případě spoje zrcadlo-úchyt, spojka; v případě expander-spojka) nanесena vrstva lepidla. Poté se 24 h nechal spoj vytvrdit.

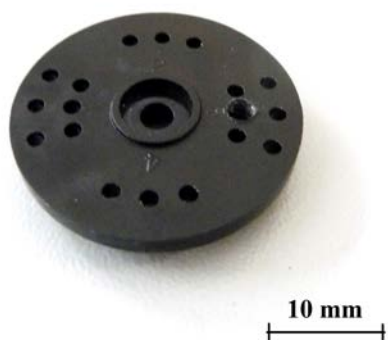
Již slepený komplet zrcadla a jeho držáku je zobrazen na obrázku 4.1.

4.2 Úprava páky servomotoru

Použitý servomotor obsahoval v balení řadu nástavců na výstupní hřídel, které mohly být použity k přichycení ramena se zrcadlem. Z těchto všech byla vybrána kruhová servo páka (viz obrázek 4.2), kterou bylo ovšem ještě potřeba před samotnou montáží upravit. Tento nástavec v původním stavu obsahuje 12 průchozích děr rovnoměrně rozmístěných kolem středu ve čtyřech skupinách, do dvou z těchto děr (díry z prostředního okruhu vzájemně symetrické přes střed) byl vyvrtán závit M2. Poté mohla být tato sestava zkompletována (viz foto 4.3).



Obrázek 4.1: Sklápěné zrcadlo přilepené k úchytu, který je již připevněn k rameni.



Obrázek 4.2: Kruhová servo páka s jedním vyvrtaným závitem M2.

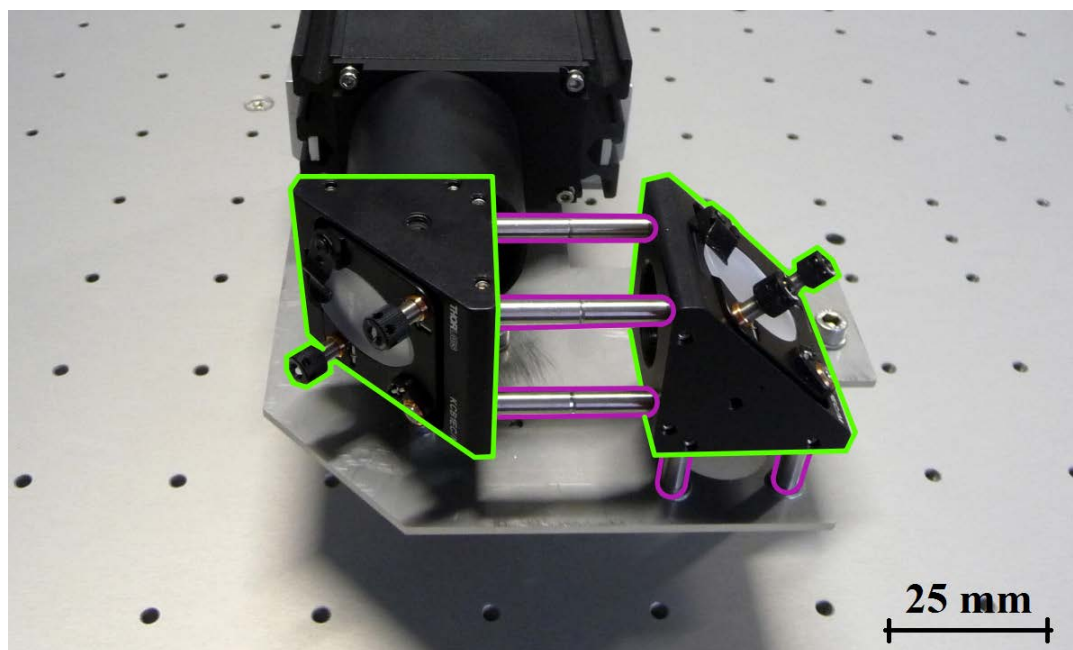


Obrázek 4.3: Nástavec s připevněným ramenem.

4.3 Montáž optických prvků a úchytů dálkoměru do desky

Prvním krokem při montáži této části bylo upevnit zrcátka (BBE1-E02) do úchytů (KCB1E/M). Potom se oba úchyty vzájemně spojily pomocí k tomu určených tyčí (ER1). Dále pak byla takto získaná sestava připevněna k desce dálkoměru. K tomuto účelu byl použit redukční adaptér (AE4E6M vše Thorlabs), který se pomocí vnějšího závitu M6

uchytil do matic nalisovaných v desce. Vnitřním závitem 4-40 UNC pak byly připevněny tyče uchycující soustavu optiky. Takto poskládaná sestava je zobrazena na obrázku 4.4.



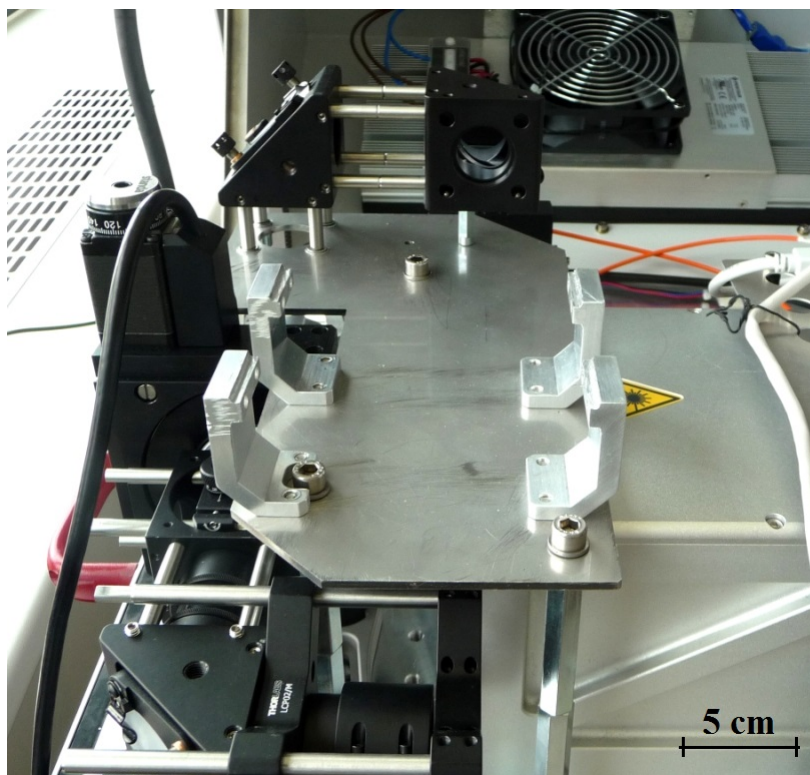
Obrázek 4.4: Uchycení optické části k desce s dálkoměrem. Zeleným obrysem jsou vyznačeny úchyty zrcadel, fialovým pak spojovací tyče.

Nakonec byly pomocí šroubů M4 (8x) k desce připevněny úchyty dálkoměru. Před úplným dotažením je nutné srovnat plochy dosedající do drážky dálkoměru do roviny a vzájemně rovnoběžně (viz obrázek 4.5).

4.4 Umístění motorizované rotační jednotky a servomotoru se zrcadlem

Po přilepení sklápěného zrcadla k jeho úchytu a připevnění ke kruhové servo páce, bylo možné je připevnit k servomotoru. Dalším krokem tedy bylo umístění celé této sestavy do přístroje BB1 (zobrazeno na obrázku 4.6, což bylo uskutečněno pomocí dvou šroubů M6x10.

Do úchytu dichroického zrcadla (součást 2 v obrázku 2.2) byl pak našroubován expandér s již přilepeným tělem spojky. Přes tyto části byla nasazena rotační základna a nastavena výška jejích úchytných nožek. Na tělo spojky pak bylo následně nasazeno čelo a pomocí dvou per a šroubů (M4×10) byly tyto součástky přichyceny k sobě. Nakonec byl tento komplet čtyřmi šrouby (M4×8) upevněn do rotační základny. Umístění této části



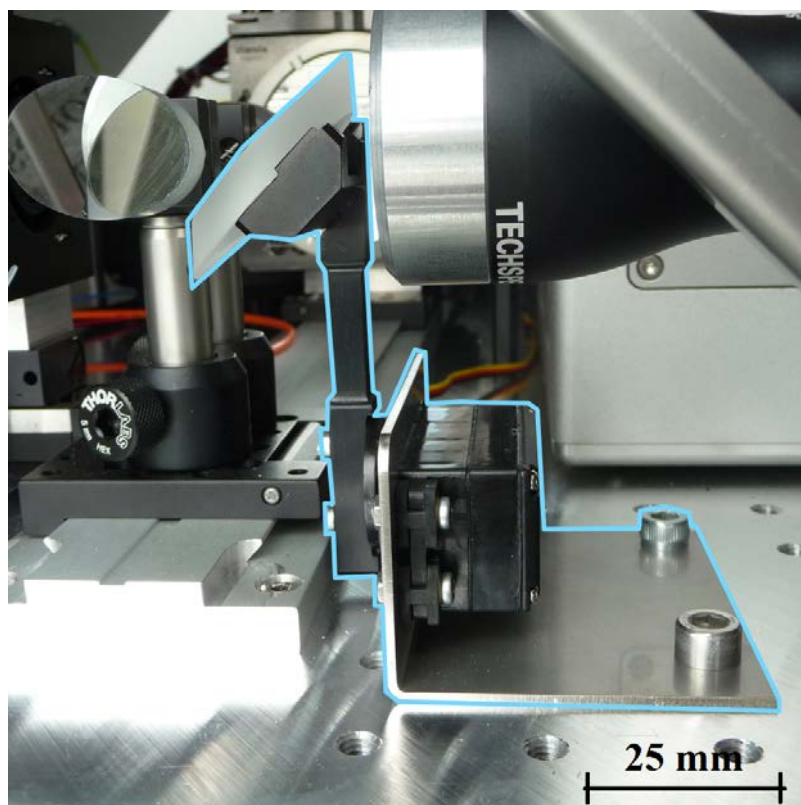
Obrázek 4.5: Deska dálkoměru s upevněnou optikou a úchyty dálkoměru.

sestavy je zobrazeno na obrázku 4.7.

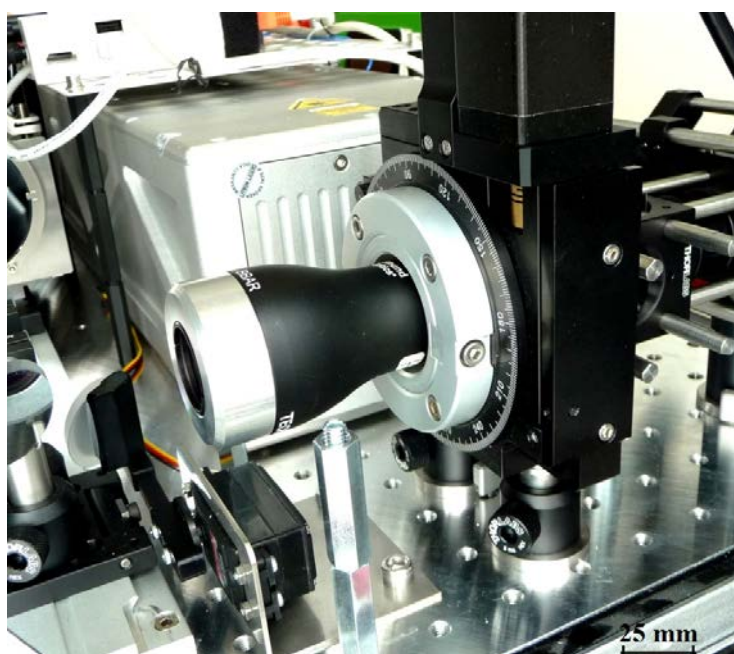
Po dokončení tohoto kroku mohla být umístěna do přístroje i celá deska s optikou a úchyty pro dálkoměr. Jak už bylo uvedeno výše, k upevnění této desky bylo použito ocelových distančních sloupků, které je do desky přichytily pomocí šroubů (M6x12) viz obrázek 4.5.

4.5 Uchycení dálkoměru

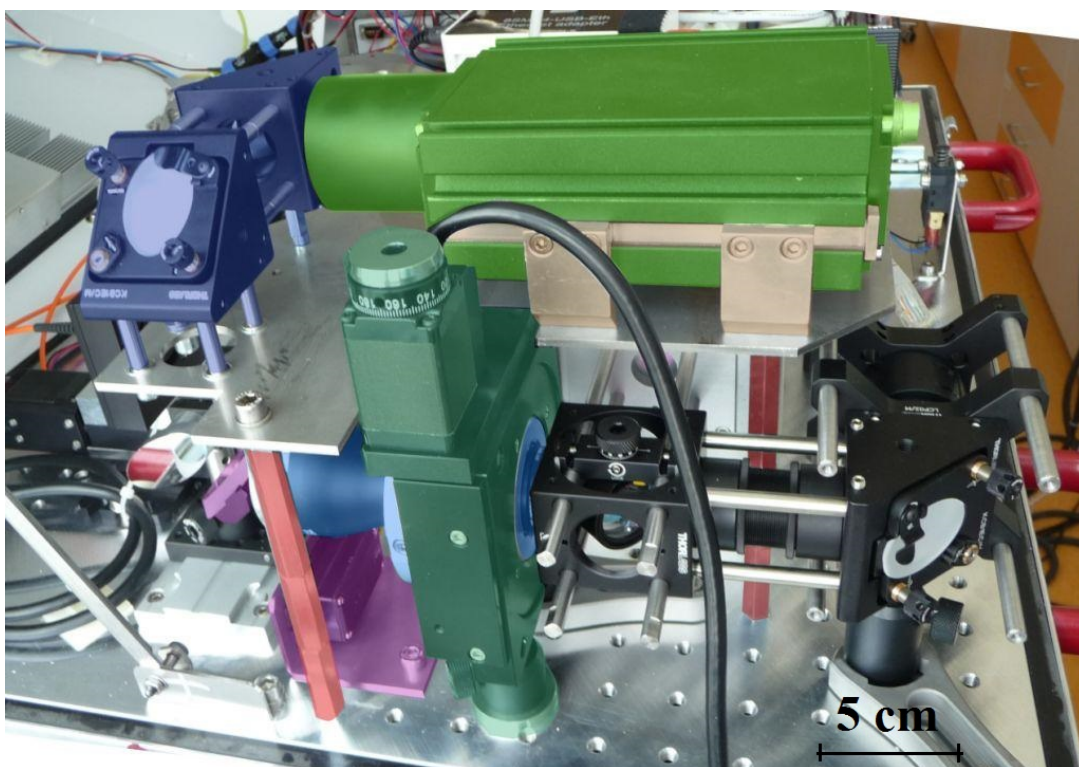
Posledním krokem montáže bylo uchycení samotného dálkoměru. Do drážek na boku dálkoměru byly umístěny vyrobené vodící tyče, které se připevnilly šrouby ($M4 \times 10$) k jednotlivým držákům dálkoměru. Po dotažení bylo na konec obou vodících tyčí přichyceno druhé čelo, které zabraňuje případnému vyjetí dálkoměru z tyčí a poškození optiky. Na fotografii 4.8 je zobrazen finální stav po montáži všech mechanických prvků.



Obrázek 4.6: Umístění sestavy servomotoru s ramenem a zrcadlem do přístroje BB1 (zvýrazněný obrys).



Obrázek 4.7: Umístění sestavy motorizovaného expandéru svazku do přístroje BB1.



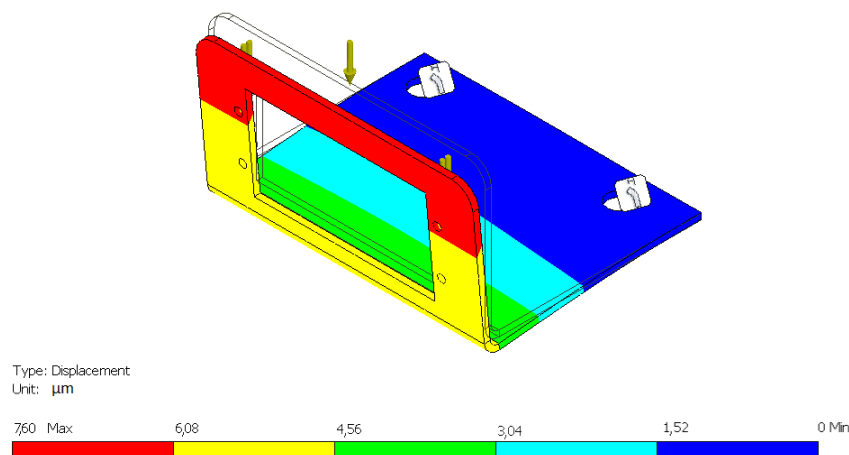
Obrázek 4.8: Kompletní sestava po montáži, jednotlivé komponenty barevně odlišeny.

Kapitola 5

Simulace statického zatížení

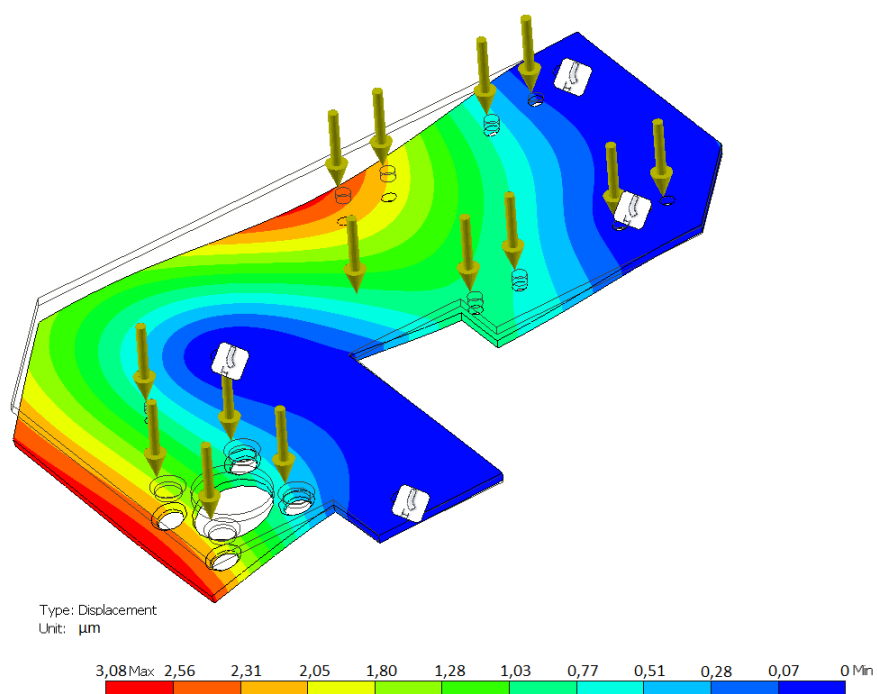
Celé řešení automatizace ostření laserového svazku bylo navrženo a vymodelováno v programu Autodesk Inventor 2019. Ten mimo jiné umožňuje provádět simulace k analýze působení napětí na vytvořených dílech nebo sestavách. V této kapitole jsou zobrazeny výsledky simulací uvažovaného statického zatížení (ve většině případů tíha součástí upevněných k dílu u něhož byla prováděna tato simulace) na vybrané navržené díly.

Ze všech výsledných vizuálních výsledků simulací bylo vybráno zobrazení deformace těchto dílů daným zatížením vyjádřená dislokací jednotlivých oblastí v délkových jednotkách. Pro simulaci byly vybrány modely úchytů dálkoměru 5.3 a servomotoru 5.1 dále pak také deska pro uchycení dálkoměru 5.2. Z úchytů dálkoměru je zobrazen úchyt s vyfrézovaným otvorem, protože bylo předpokládáno že při stejném zatížení bude deformován více, než úchyt bez otvoru (ve výsledku rozdíl nebyl až tak velký).

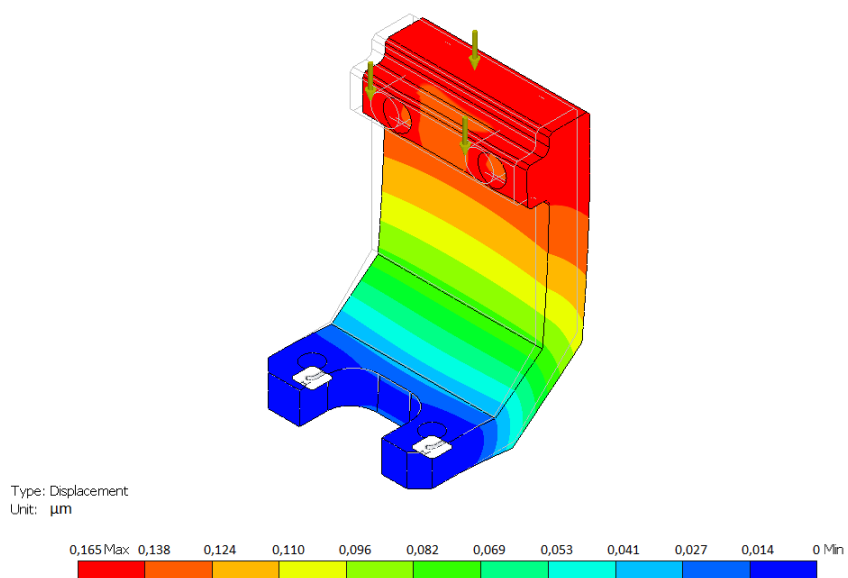


Obrázek 5.1: Simulace deformace úchytu servomotoru.

Z výše uvedených vizuálních zobrazení výsledků simulací je patrné, že navržené díly jsou schopné zvládat předpokládané zatížení. Maximální deformace nabývají desetin až jednotek μm .



Obrázek 5.2: Simulace deformace desky uchycující dálkoměr. Je patrné, že je největší na nepodé-
přených okrajích.



Obrázek 5.3: Simulace deformace úchyty dálkoměru.

Diskuze

Montáž ukázala, že vypracované konstrukční návrhy jsou vhodné pro dané zástavbové možnosti. Pro plně automatickou funkčnost tohoto přístroje bude ještě potřeba udělat několik úprav v elektronice:

- Vyrobit a naprogramovat desku s napájením a ovládáním servomotoru
- Upravit datovou a napájecí kabeláž dálkoměru (originálně dodávaná je příliš dlouhá)
- Vyrobit kabeláž ovládající oba krokové motory (1 vstup - 2 výstupy)

Poté se bude moci, na základě postupného krokování obou motorů, sestavit závislost pomocí které budou tyto motory řízeny s ohledem na naměřenou vzdálenost analyzovaného předmětu.

Jako případný další krok v úpravách tohoto přístroje bych zvolil výměnu použitého expandéru svazku za optickou soustavu se známými optickými parametry (ať už komerčně dostupnou, nebo vlastní výroby). Závislost pozice obrazové ohniskové roviny na vzájemné poloze čoček zjištěná experimentálně nemusí dát potřebně přesnou závislost pro řízení krokovým motorů a tím může být ovlivněna kvalita naměřených spekter, či schopnost spektra vůbec získat. Dále se nabízí možnosť přidání osvětlovací soustavy pro zlepšení pozorovaného obrazu kamerou.

Závěr

Tato diplomová práce se zabývala konstrukčním a optomechanickým návrhem ostření laserového svazku v přístroji určeném pro dálkovou spektroskopii A-Trace BB-1. Na základě vnitřního uspořádání přístroje byly vytipovány a otestovány komerčně dostupné elektrické a optické komponenty použitelné pro řešení zadaného problému.

Byla provedena měření s cílem zjistit vnitřní uspořádání optických komponent v expandéru laserového svazku a zobrazovací vlastnosti. Ze zobrazovací matice byla odvozena rovnice a navržena testovací sestava pro získání těchto hodnot. Po praktickém dosazení ovšem byly kořeny takto získané rovnice silně závislé i na menších změnách vstupních parametrů. Výpočetní metodou tedy nebylo dosaženo potřebného výsledku.

Prakticky, na základě přímého měření polohy ohniskové roviny optické sestavy expandéru a spojné čočky, byla zaznamenána závislost této polohy na natočení ostřicího prstence expandéru. Tato závislost byla použita pro zjištění potřebné minimální jednotky natočení krokové rotační jednotky ovládající expandér laserového svazku.

V programu Autodesk Inventor byl následně proveden konstrukční návrh a simulace statického zatížení vybraných prvků. Zvolené materiály a případné povrchové úpravy jsou uvedeny u každého dílu zvlášť. Na základě výkresové dokumentace byly tyto díly vyrobeny a následně spolu s nakoupenými komponenty instalovány do přístroje BB-1, čímž bylo dosaženo cílů této diplomové práce.

V rámci diskuze byly nastíněny další postupy a navrženy případné další úpravy.

Seznam zkratek

LIBS Laser Induced Breakdown Spectroscopy

SIMS Secondary Ion Mass Spectroscopy

XPS X-ray Photoelectron Spectroscopy

XRF X-ray Fluorescence

LASER Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

SONAR Sound Navigation Ranging

RADAR Radio Detection And Ranging

LIDAR Light Detection And Ranging

TOF Time of Flight

A/F M-CF Amplitude/Frequency Modulated Continuous Wave

Literatura

- [1] F. van der Meer, “Near-infrared laboratory spectroscopy of mineral chemistry: A review”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 65, no. 1, pp. 71-78, 2018.
- [2] J. J. Laserna and F. J. Fortes, “The development of fieldable laser-induced breakdown spectrometer: No limits on the horizon”, *Spectrochimica Acta Part B*, vol. 1, no. 54, pp. 975-990, 2010.
- [3] P. Pořízka and J. Kaiser, *Laser-Induced breakdown spectroscopy: theory and applications*, [přednáška]. Vysoké učení technické v Brně, 2018.
- [4] “Laser-Induced Breakdown Spectroscopy”, *Applied Photonics*, 2016. [Online]. Available: http://www.appliedphotonics.co.uk/libs/about_libs.htm. [Accessed: 05-Mar.-2019].
- [5] R. Noll, *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*, 1st ed. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
- [6] V. Vodičková, *Metody charakterizace nanomateriálů II - LIBS*, [přednáška]. Technická univerzita v Liberci, 2018.
- [7] F. Anabitarte, A. Cobo, and J. M. Lopez-Higuera, “Laser-Induced Breakdown Spectroscopy: Fundamentals, Applications, and Challenges”, *ISRN Spectroscopy*, vol. 2012, pp. 1-12, 2012.
- [8] K. K. Herrera, E. Tognoni, N. Omenetto, B. W. Smith, and J. D. Winefordner, “Semi-quantitative analysis of metal alloys, brass and soil samples by calibration-free laser-induced breakdown spectroscopy: recent results and considerations”, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, vol. 24, no. 4, 2009.
- [9] T. Takahashi and B. Thornton, “Quantitative methods for compensation of matrix effects and self-absorption in Laser Induced Breakdown Spectroscopy signals of solids”, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, vol. 138, pp. 31-42, 2017.
- [10] Z. Haidder, Y. Munajat, and R. Kamarulzaman, “Review: Laser-Induced Breakdown Spectroscopy a promising technique, its limitations and a proposed method”, *Jurnal Teknologi*, vol. 57, no. 1, pp. 45-56, 2012.
- [11] G. Nicolodelli, J. Cabral, C. R. Menegatti, B. Marangoni, and G. S. Senesi, “Recent advances and future trends in LIBS applications to agricultural materials and their food derivatives: An overview of developments in the last decade (2010–2019). Part I. Soils and fertilizers”, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 115, pp. 70-82, 2019.

- [12] J. Kaiser, K. Novotný, M. Z. Martin, A. Hrdlička, R. Malina, M. Hartl, V. Adam, and R. Kizek, "Trace elemental analysis by laser-induced breakdown spectroscopy -Biological applications" , Surface Science Reports, vol. 67, no. 11-12, pp. 233-243, 2012.
- [13] J. Scaffidi, S. M. Angel, and D. A. Cremers, "Emission Enhancement Mechanisms in Dual-Pulse LIBS", Analytical Chemistry, vol. 78, no. 1, pp. 24-32, 2006.
- [14] D. W. Hahn and N. Omenetto, "Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS), Part II: Review of Instrumental and Methodological Approaches to Material Analysis and Applications to Different Fields", Applied Spectroscopy, vol. 66, no. 4, pp.347-419, 2012.
- [15] L. Pezzati, P. Targowski, V. Detalle, X. Bai, E. Bourguignon, M. Menu, and I. Pallot-Frossard, "LIBS-LIF-Raman: a new tool for the future E-RIHS", p. 103310N-, 2017.
- [16] Z. Bouchal, *Svazková optika*, [přednáška]. Univerzita Palackého v Olomouci, 2017.
- [17] M. Liška, *Inženýrská optika*, [přednáška]. Vysoké učení technické v Brně, 2018.
- [18] J. Súkeník, "Historické okénko: Dějiny automatického ostření", *Fotoaparát*, 2016. [Online]. Available: <https://www.fotoaparát.cz/clanek/1255/historicke-okenko-dejiny-automatickeho-ostreni-11468/>. [Accessed: 20-Feb-2019].
- [19] D. Pierini, "Leica invented autofocus, then abandoned it", *Cult of mac*, -. [Online]. Available: <https://www.cultofmac.com/383779/leica-invented-autofocus-then-abandoned-it/>. [Accessed: 21-Mar-2019].
- [20] "Polaroid SX-70 Sonar AutoFocus", *Polagraph*, 2018. [Online]. Available: <https://www.polagraph.cz/shop/polaroid-sx-70-af/>. [Accessed: 19-Mar-2019].
- [21] A. Gibson, "Phase detection vs Contrast detection autofocus", *Creative Photographer*, 2015.[Online]. Available: <https://www.creative-photographer.com/phase-detection-contrast-detection-autofocus/>. [Accessed: 05-Apr-2019].
- [22] R. Pihan, "Ostření a hloubka ostrosti - 1. Zaostrování", *Foto Roman*, 2008.[Online]. Available: <http://fotoroman.cz/tech2/focus1.htm>. [Accessed: 16-Mar-2019].
- [23] "Rangefinder", *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 2018. [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Rangefinder&oldid=890199769>. [Accessed:23-Apr-2019].
- [24] G. Berkovic and E. Shafir, "Optical methods for distance and displacement measurements", *Advances in Optics and Photonics*, vol. 4, no. 4, 2012.
- [25] "Laserové snímače polohy", *Micro - Epsilon*, 2017. [Online]. Available: <https://www.micro-epsilon.cz/displacement-position-sensors/laser-sensor/>. [Accessed: 15-Mar-2019].
- [26] "Konfokální snímač vzdálenosti měří mezery ve vícevrstvých fotovoltaiických panelech", *Automa*, 2013. [Online]. Available: http://automa.cz/cz/casopis-cislo/automa-2013_03/. [Accessed: 13-Apr-2019].

- [27] A. Vojáček, Konfokální princip optického měření vzdálenosti, Automatizace HW, 2015. [Online]. Available: <https://automatizace.hw.cz/komponenty-mereni-a-regulace/konfokalni-princip-opti-keho-mereni.html>. [Accessed: 21-May-2019].
- [28] R. Horák, Fyzikální základy laserových dálkoměrů a gyroskopů, 1st ed. Olomouc: Chlup.net, 2012.
- [29] “Optical distance measurement”, Fraunhofer IPM, 2017. [Online]. Available: <https://www.ipm.fraunhofer.de/en/bu/object-shap--detection/expertise/optical-distance-measurement.html>. [Accessed: 20-Apr-2019].
- [30] Absolute Distance Measurements using fiberoptic Multiple-Wavelength-Interferometer”, Institut für Angewandte Physik Technische Universität Darmstadt, 2015.[Online]. Available: http://www.iap.tu-darmstadt.de/lto/omt/forschung/absolut_interf_e.htm. [Accessed: 18-Apr-2019].
- [31] “The Bernoulli PIV”, Litron Lasers, 2017. [Online]. Available: http://www.litronlasers.com/pages/bernoulli_piv.html. [Accessed: 28-Apr.-2019].
- [32] “Iris Spectrometer”, *Spectral Industries*, - [Online]. Available: <https://www.spectralindustries.com/products/>. [Accessed: 26-Apr-2019].
- [33] “3X YAG BBAR Fixed Broadband Beam Expander”, *Edmund Optics*, 2016. [Online]. Available: <https://www.edmundoptics.com/p/3x-yag-bbar-broadband-beam-expander/4107/>. [Accessed: 27-Jan-2019].
- [34] M. Příbylová, *Maticová optika*, [přednáška]. Masarykova Univerzita Brno, 2011.
- [35] “8SMC5-USB - Stepper and DC Motor Controller”, *Standa Ltd.*, 2017. [Online]. Available: http://www.standa.lt/products/catalog/motorised_positioners?item=525. [Accessed: 03-Apr-2019].
- [36] “Motorized Positioners”, *Standa Ltd.*, 2017. [Online]. Available: http://www.standa.lt/products/catalog/motorised_positioners?item=244&prod=motorized_rotation_stage. [Accessed: 20-Mar-2019].
- [37] “Motor Information”, *Standa Ltd.*, 2016. [Online]. Available: http://www.standa.lt/products/catalog/motorised_positioners?item=346&prod=ordering_info. [Accessed: 15-Mar.-2019].
- [38] “State of art sensor with high precision”, *Micro - Epsilon*, 2017. [Online]. Available: https://www.micro-epsilon.com/displacement-position-sensors/laser-distance-sensor/optoNCDT_ILR_1181_1182_1183/. [Accessed: 12-Apr-2019].
- [39] “RS422/USB Converter IF2001/USB”, *Micro - Epsilon*, 2018. [Online]. Available: <https://www.micro-epsilon.com/accessories/IF2001USB/?sr=4&zsc=4&st=if2001>. [Accessed: 10-Apr-2019].
- [40] J. Bliedtner and R. Hector, *Optical Technology*, 1st ed.: McGraw-Hill Education, 2011