



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

## EXPERIMENTÁLNÍ STUDIUM ROZPTYLU SVĚTLA NA TENKÝCH VRSTVÁCH

EXPERIMENTAL STUDY OF LIGHT SCATTERING FROM THIN FILMS

### DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Štěpán Šustek

### ŠKOLITEL

SUPERVISOR

prof. RNDr. Jiří Petráček, Dr.

BRNO 2024



## KLÍČOVÁ SLOVA:

Skaterometr, rozptyl záření na površích pevných látek, optická charakterizace, tenké vrstvy.

## KEYWORDS:

Scatterometer, radiation scattering on the surfaces of solid substances, optical characterization, thin films.

## CITACE:

ŠUSTEK, Štěpán. *Experimentální studium rozptylu světla na tenkých vrstvách*. Brno, 2024. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Školitel prof. RNDr. Jiří Petráček, Dr.



## ABSTRAKT:

Elektromagnetické záření dopadající na povrch pevného tělesa je z části zrcadlově odraženo podle principů geometrické optiky a z části rozptýleno do jiných směrů (tzv. difúzní složka) vlivem drsností povrchu. Z charakteristiky rozptýlené části lze následně určit topografie povrchu na kterém k difúzi dochází. Pro velmi málo drsné povrchy v řádu nanometrů, jaké jsou očekávány u tenkých vrstev, je zapotřebí velmi citlivé a přesné měření difúzní složky. Měřicí systém by měl vykazovat vysoký dynamický rozsah a dostatečné úhlové rozlišení. K tomuto účelu byl navržen, realizován a také upravován skaterometr goniometrického typu. Přístroj byl následně testován a výsledky byly porovnány s nezávislým měřením na jiném pracovišti. Diskutována je také možnost rozšířeného využití přístroje a případné úpravy.

## ABSTRACT:

Electromagnetic radiation incident on the surface of a solid body is partly reflected specularly according to the principles of geometrical optics and partly scattered into other directions (the so-called diffuse component) due to surface roughness. From the characteristics of the scattered part, the topography of the surface where diffusion occurs can be determined. For surfaces with very low roughness on the order of nanometers, as expected in thin films, highly sensitive and precise measurement of the diffuse component is required. The measuring system should exhibit a high dynamic range and sufficient angular resolution. For this purpose, a goniometric-type scatterometer was designed, implemented, and also modified. The instrument was subsequently tested, and the results were compared with independent measurements conducted at another facility. The possibility of extended use of the instrument and potential modifications are also discussed.



## PROHLÁŠENÍ:

Prohlašuji, že jsem předloženou dizertační práci vypracoval samostatně za odborného vedení prof. RNDr. Miloslava Ohlídala, CSc. a dále pak dokončil pod vedením prof. RNDr. Jiřího Petráčka, Dr. Dále prohlašuji, že všechny podklady, ze kterých jsem čerpal jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

.....

Ing. Štěpán Šustek

V Brně dne 31.04.2024



## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl vyjádřit své upřímné poděkování prof. RNDr. Miloslavu Ohlídaloovi, CSc. za jeho odborné vedení, neocenitelné připomínky, inspirativní diskuze a za poskytnutí výzkumného zázemí, které bylo zásadní pro realizaci mé práce.

Dále děkuji prof. RNDr. Jiřímu Petráčkovi, Dr. za jeho následnou pomoc s dokončením této práce po náhlém zesnutí prof. RNDr. Miloslava Ohlídala, CSc.

Poděkování patří také prof. RNDr. Ivanu Ohlídaloovi, DrSc a Mgr. Jiřímu Vohánkovi, Ph.D. za jejich odborné rady a připomínky v oblasti rozptylu záření, jejichž znalosti byly nezbytné pro mé pochopení tématu, a za možnost spolupracovat na výzkumných projektech.



## OBSAH

1. Úvod .....	13
2. Současný stav poznání .....	14
2.1. Popis náhodně drsného povrchu .....	14
2.2. Nejvýznamnější optické techniky určení parametrů povrchu .....	16
3. Cíle .....	21
4. Měření ARS .....	22
4.1. Požadavky na kvalitní skaterometry při měření ARS .....	22
4.2. Kalibrace skaterometru .....	22
4.3. Analýza neurčitosti měření ARS .....	23
4.4. Přístrojové vybavení .....	24
5. Konstrukční úpravy .....	28
5.1. Optická část .....	28
5.2. Úprava goniometru .....	32
5.3. Úprava elektroniky .....	34
5.4. Demonstrace výsledků dosažených pomocí SMII .....	38
6. Úprava pro měření ARS tenkých vrstev .....	42
6.1. Možné příčiny nepřesností .....	43
6.2. Prašnost ve vzduchu .....	44
7. Návrh nového přístroje SM III .....	58
7.1. Základní postup návrhu přístroje: .....	58
8. Detektor .....	60
8.1. Lavinové Diody (APD) .....	60
8.2. Fotonásobiče (PMT) .....	61
8.3. Hlavní požadavky na detektor .....	62
8.4. Řešení .....	62
9. Komora pro přípravu laserového svazku .....	65
9.1. Volba optických komponentů .....	65
10. Komora s detektorem a goniometrem .....	74
10.1. Konstrukční řešení goniometru .....	74
11. Časová stálost přístroje SM III .....	84

11.1. Fluktuace ve výkonu laseru .....	86
11.2. Citlivost elektroniky .....	88
11.3. Druhý kanál .....	89
11.4. Zhodnocení časové stability .....	91
12. Seřízení přístroje .....	93
12.1. Seřízení laseru .....	94
12.2. Seřízení prostorového filtru .....	94
12.3. Seřízení Goniometru.....	94
13. Postup měření .....	96
13.1. Spuštění motorů.....	96
13.2. Spuštění ovládacího softwaru.....	96
13.3. Kalibrační měření .....	98
14. Výsledky měření přístroje.....	103
14.1. Porovnávací měření .....	103
14.2. 3D měření a numerické simulace .....	107
15. ARS a stres rostlin .....	110
16. Přínos pro vědní obor a praxi.....	112
17. Závěr .....	113
18. Publikační činnost.....	115
19. Literatura.....	116
20. Seznam použitých symbolů .....	124
21. Seznam použitých zkratk .....	126
22. Seznam Obrázků .....	127

# 1. ÚVOD

Rozptyl světla z objektů okolního světa hraje v našem životě velmi významnou úlohu. Umožňuje nám získávat informace o pro nás důležitých vlastnostech těchto objektů, a tak zajišťovat naši existenci v tomto světě. Zmíněný rozptyl je silně ovlivňován mikrotopografií rozptylujících povrchů, kterou nazýváme drsností povrchu. Tato drsnost může mít náhodný či kvazináhodný charakter, může také vykazovat určitou nenáhodnou texturu. V každém případě se s drsnými povrchy setkáváme jak v základním či aplikovaném výzkumu tak i v průmyslových aplikacích, kde jejich drsnost výrazně ovlivňuje vlastnosti těchto povrchů. Metody a techniky pro určení drsnosti povrchů, jsou tedy velmi důležité. Technikou budeme v dalším chápat způsob, kterým získáváme experimentální data potřebná k určení charakteristik drsnosti povrchu, metodou potom způsob, kterým určujeme tyto charakteristiky z experimentálních dat. Z našeho pohledu je můžeme rozdělit na metody a techniky optické a neoptické. Nás budou v dalším zajímat metody a techniky optické s důrazem na metody a techniky založené na rozptylu světla ze studovaných povrchů. Vzhledem k cílům disertační práce a skutečnosti, že v naší laboratoři konstruujeme skaterometry goniometrického typu, je v dalším výkladu kladen důraz na experimentální stránku zmíněných technik, a to zejména na měření tzv. rozptylové distribuční funkce *ARS* (scattering distribution function or angle-resolved light scattering), kterou zmíněné skaterometry mohou měřit. Práce se také soustředí jen na náhodně drsné povrchy pevných těles, o nichž budeme předpokládat, že je lze považovat za ergodické (tj. jsou stacionární a jejich střední hodnota podle souboru se rovná střední hodnotě zjištěné z jedné reprezentativní realizace).

## 2. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

### 2.1. Popis náhodně drsného povrchu

K popisu náhodně drsného povrchu se v současné odborné literatuře nejčastěji používají následující statistické charakteristiky nerovností povrchu:

Jednorozměrné rozdělení hustoty pravděpodobnosti výšek nerovností  $w(z)$ , kde  $z$  představuje hodnoty náhodné funkce  $\xi(x, y)$  popisující topografii náhodně drsného povrchu (tj.  $z$  představuje výšky nerovností nad střední rovinou povrchu).

Jednorozměrné rozdělení hustoty pravděpodobnosti sklonů povrchu (viz dále  $\overline{w}(z')$ ), kde  $z'$  značí parciální derivace funkce  $\xi(x, y)$  podle  $x$  nebo  $y$  (předpokládáme, že povrchy jsou drsné homogenně a isotropně, tj. že v každém bodě povrchu i podél každého směru ve střední rovině povrchu vykazuje  $\xi(x, y)$  stejné statistické charakteristiky).

Autokorelační funkce drsného povrchu  $B(\tau)$ , která je definována následujícím způsobem:

$$AF(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} z_1 z_2 w(z_1, z_2, \tau) dz_1 dz_2, \quad (2.1)$$

kde  $z_1$  resp.  $z_2$  značí výšky drsného povrchu ve dvou různých bodech jeho střední roviny, tj. v bodech  $[x_1, y_1]$  a  $[x_2, y_2]$ .  $\tau$  je vzdálenost těchto bodů, tj.

$$\tau = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}. \quad (2.2)$$

Symbol  $w(z_1, z_2, \tau)$  reprezentuje dvojrozměrné rozdělení hustoty pravděpodobnosti výšek nerovností.

Vedle funkce  $B(\tau)$  se často užívá normovaná autokorelační funkce (autokorelační koeficient)

$$C(\tau_x) = \frac{B(\tau_x)}{\sigma^2}. \quad (2.3)$$

Výkonová spektrální hustota  $PSD(f_x, f_y)$  definovaná následovně:

$$PSD(f_x, f_y) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L^2} \left| \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \xi(x, y) e^{-i2\pi(f_x x + f_y y)} dx dy \right|^2, \quad (2.4)$$

kde předpokládáme, že střední hodnota  $\langle \xi(x, y) \rangle = 0$ .  $f_x, f_y$  jsou prostorové frekvence povrchu a  $L$  je délka skenované oblasti povrchu.  $PSD$  udává, jak je výkon rozdělen na jednotlivé prostorové frekvence spektrálního rozkladu povrchu.

Pokud drsnost povrchu je isotropní, je  $PSD$  kruhově symetrická a předchozí vztah lze zapsat ve tvaru

$$PDS(f) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} PSD(f, \psi) d\psi \quad (2.5)$$

s použitím transformace:

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad (2.6)$$

a

$$\psi = \arctan\left(\frac{f_y}{f_x}\right). \quad (2.7)$$

Aplikací předchozího vztahu provádíme zprůměrování lokálních odchylek od reprezentativního charakteru povrchu a potlačujeme odchylky měření, které jsou způsobeny vadami měřicího procesu.

Z výše uvedených charakteristik, které představují deterministické funkce příslušných proměnných, se odvozují charakteristiky „číselné“, které slouží k jednoduššímu, ale současně i hrubšímu posuzování studovaných povrchů. Jsou to:

Rms (root-mean-square) drsnost  $\sigma$ , neboli rms hodnota výšek nerovností povrchu,

$$\sigma = \sqrt{M_z}, \quad (2.8)$$

kde

$$M_z = \int_{-\infty}^{\infty} (z - \langle z \rangle)^2 w(z) dz \quad (2.9)$$

Veličina  $M_z$  se nazývá rozptyl (druhý centrální moment náhodné veličiny  $z$ ). Kde  $z$  opět představuje hodnoty náhodné funkce  $\xi(x, y)$  popisující topografii náhodně drsných povrchů (tj.  $z$  představuje výšky nerovností),  $\langle z \rangle$  je střední hodnota této funkce (tj. výšek

nerovností) a  $w(z)$  je jednorozměrné rozdělení hustoty pravděpodobnosti výšek nerovností. Rms hodnota sklonů  $\tan \beta_0$  nerovností povrchu,

$$\tan \beta_0 = \sqrt{M'_z} \quad (2.10)$$

kde

$$M'_z = \int_{-\infty}^{\infty} z'^2 \bar{w}(z') dz', AF(\tau) = \sigma^2 \exp(-\tau^2/T^2), \quad (2.11)$$

kde  $z'$  opět značí parciální derivace funkce  $\xi(x, y)$  podle  $x$  nebo  $y$  (předpokládáme, že povrchy jsou drsné homogenně a isotropně) a  $\bar{w}(z')$  je jednorozměrné rozdělení hustoty pravděpodobnosti parciálních derivací funkce  $\xi(x, y)$ .

*Autokorelační délka  $T$  povrchu*, která je definována pomocí autokorelační funkce. Nejpřirozeněji je tato vzdálenost definována v případě autokorelační funkce vykazující Gaussův charakter, tj. v případě, kdy je tato funkce vyjádřena následovně:

$$AF(\tau) = \sigma^2 \exp(-\tau^2/T^2). \quad (2.12)$$

Tedy autokorelační vzdálenost  $T$  je vzdálenost ve střední rovině povrchu, při níž autokorelační funkce  $B(\tau)$  nabývá hodnoty  $\frac{\sigma^2}{e}$ .

Vzdálenost  $T$  popisuje „rozlehlost“ nerovností povrchu ve směru ležícím ve střední rovině povrchu, zatímco  $\sigma$  popisuje nerovnosti ve směru kolmém vůči této střední rovině.

## 2.2. Nejvýznamnější optické techniky určení parametrů povrchu

Po výčtu charakteristik nejčastěji používaných k popisu topografie náhodně drsných povrchů se nyní věnujme stručnému výčtu nejvýznamnějších optických technik realizujících optické metody, které slouží k určení výše uvedených charakteristik. Jsou to tyto techniky:

- Interferometrie, resp. interferometrická mikroskopie,
- spektroskopická fotometrie,
- monochromatická i spektroskopická elipsometrie,
- konfokální skenovací laserová mikroskopie,

- techniky využívající jevu koherenční zrnitosti
- techniky založené na rozptylu světla (angle resolved scattering -*ARS*, Total Integrated Scatter *TIS* a Total Scattering -*TS*).

Interferometrie, resp. interferometrické mikroskopie příslušné metody určení charakteristik topografie povrchu využívají měření kontrastu či deformace interferenčních proužků bílého, či monochromatického světla (viz např. [1-5]) způsobené drsností povrchu. Podmnožinou zmíněných metod jsou metody založené na stříhové interferometrii (např. [6-8]), které lze použít i pro zakřivené povrchy.

Fotometrické metody založené na měření spektrální závislosti odrazivosti náhodně drsného povrchu při téměř kolmém dopadu v zrcadlovém směru se užívají většinou pro určení střední kvadratické odchylky výšek nerovností povrchu a jejich jednorozměrného rozdělení (viz např. [9, 10]).

Metody monochromatické a spektroskopické elipsometrie používají elipsometrické parametry změřené v zrcadlovém směru k určení rms hodnoty výšek, rms hodnoty sklonů a autokorelační délky náhodně drsných povrchů. Pro náhodně drsné křemíkové povrchy jsou tyto parametry určovány v např. pracích [11-13].

Samozřejmě výše zmíněné metody lze s výhodou kombinovat, jak je pospáno např. v [11,14-16].

Konfokální laserová mikroskopie poskytuje informaci o topografii diskutovaných povrchů, z nichž lze získat rms hodnotu výšek a také PSD povrchu (viz [17-19]).

Techniky využívající jevu koherenční zrnitosti se aplikují na velmi drsné povrchy. Při tom se vychází z měření parametrů různých vlastností skvrnek. Např. z průměrného kontrastu skvrnek lze určit rms hodnotu výšek i korelační délku povrchů [20,21]. K určení stejných parametrů povrchu lze rovněž užít i úhlové korelace dvou polí koherenční zrnitosti zaznamenaných z téhož povrchu při dvou úhlech dopadu primárního laserového svazku [22, 23].

Z hlediska cílů této doktorské práce jsou nejzajímavější techniky využívající rozptyl světla ze studovaných povrchů. Tyto techniky zaznamenaly v posledních letech velký rozmach. Lze je dělit podle veličiny, kterou měří. Jsou to techniky, které měří

a) Celkový rozptyl TS (Total Scattering) v reflexním či transmisním módu, který je definován následovně:

$$TS = \frac{P_s}{P_i}, \quad (2.13)$$

kde  $P_s$  je výkon světla rozptýleného zpět do celé hemisféry nad povrchem (reflexní mód), resp. do hemisféry za transparentním vzorkem povrchu (transmisní mód),  $P_i$  je výkon světelného svazku na povrch dopadajícího.

b) Celkový integrovaný rozptyl TIS (Total Integrated Scatter) definovaný následovně:

$$TIS = \frac{P_{diffuse}}{P_{diffuse} + P_{specular}}, \quad (2.14)$$

kde  $P_{diffuse}$  je výkon světla difúzně rozptýlený povrchem a  $P_{specular}$  je výkon světla rozptýlený v zrcadlovém směru. Tato veličina odpovídá podílu difúzní odrazivosti  $R_{diffuse}$  a celkové odrazivosti povrchu  $R$ .

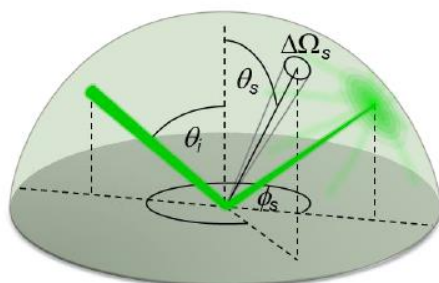
TS i TIS se měří integrační (Ulbrichtovou) resp. Coblenzovou koulí. Měřicí procedura TS je popsána normou ISO 13696. Měřicí procedura TIS je popsána v [24].

Z obou veličin se určuje rms drsnost  $\sigma$  výškových nerovností povrchu.

c) Rozptylová distribuční funkce ARS (scattering distribution function or angle-resolved light scattering) definovaná takto:

$$ARS(\theta_s, \phi_s) = \frac{\Delta P_s(\theta_s, \phi_s)}{\Delta \Omega_s P_i}, \quad (2.15)$$

kde význam symbolů je následující (viz obr. 2.1 - převzato z prezentace k SDZ Ing. Pavla Nádaského, ÚFI FSI VUT v Brně, říjen 2015).



Obrázek 2.1: Význam parametrů při měření  $ARS(\theta_s, \phi_s)$ . Převzato z prezentace k SDZ Ing. Pavla Nádaského, ÚFI FSI VUT v Brně, říjen 2015).

$\Delta P_s(\theta_s, \phi_s)$  výkon rozptýlený ve směru  $\theta_s, \phi_s$  do prostorového úhlu  $\Delta\Omega_s$  (přijímací úhel detektoru),  $P_i$  výkon dopadajícího světelného svazku.

$ARS(\theta_s, \phi_s)$  popisuje, jak rozptýlený výkon závisí na úhlech rozptylu. Pro měření  $ARS(\theta_s, \phi_s)$  se v současnosti připravuje ISO norma.

Pro isotropně rozptylující objekty postačuje in-plane měření (tj. měření v libovolném poledníku hemisféry). Anisotropně rozptylující objekty vyžadují 3D měření (tj. měření po celé hemisféře, u částečně propustných objektů ideálně po celé sféře). Zde je třeba poznamenat, že mnoho objektů (některé optické komponenty, leštěné povrchy, tenké vrstvy, ...) rozptyluje anisotropně, i když se nesprávně považují za isotropně rozptylující.

Pro velmi málo drsné povrchy, které splňují podmínku  $\frac{\sigma}{\lambda} \ll 1$  [25], plyne z Rayleighovy-Riceovy (RR) teorie pro isotropně rozptylující povrchy následující vztah mezi  $ARS(\theta_s)$  a  $PSD(f)$  měřeného povrchu [26]:

$$ASR(\theta_s)_{RR} = \frac{16\pi^2}{\lambda^4} (\cos \theta_i) (\cos \theta_s)^2 \theta_s PSD(f) \cdot Q_{RR}. \quad (2.16)$$

Kde

$$Q_{RR} = \left| \frac{(\varepsilon - 1)}{(\sqrt{1 - \sin^2 \theta_i} + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_i})(\sqrt{1 - \sin^2 \theta_s} + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_s})} \right|^2 \quad (2.17)$$

$\varepsilon$  je dielektrická funkce prostředí pod povrchem.

Pozn.: Pro malé úhly dopadu je  $Q_{RR}$  rovno odrazivosti povrchu.

Vazba mezi prostorovou frekvencí a úhlem rozptylu  $\theta_s$  je dána vztahem

$$f = \frac{|\sin \theta_s - \sin \theta_i|}{\lambda} \quad (2.18)$$

Vztah 2.16 ukazuje, že relace mezi  $ASR(\theta_s)_{RR}$  a  $PSD(f)$  je jednoduchá. Tedy z naměřené  $ASR(\theta_s)_{RR}$  lze snadno určit  $PSD(f)$  a posléze z ní i rms drsnost podle vztahu [17]

$$\sigma^2 = 2\pi \int_{f_{min}}^{f_{max}} PSD(f) f df \quad (2.19)$$

Zde  $f_{max}$  a  $f_{min}$  určují interval prostorových frekvencí, ve kterém lze  $PSD(f)$  podle vztahu (2.16) ze změřené  $ASR(\theta_s)_{RR}$  určit (tyto meze jsou u každého reálného měření dány např. velikostí měřené plochy povrchu a přístrojovým rozlišením).

Právě  $ARS(\theta_s, \phi_s)$  je z hlediska cílů zadané disertační práce pro nás nejzajímavější, neboť v Laboratoři koherenční optiky ÚFI FSI VUT v Brně (LCO) konstruujeme 3D skaterometry goniometrického typu, které umožňují měření této veličiny. Z těchto experimentálních dat lze určit v případě málo drsných povrchů, jakými jsou i rozhraní tenkých vrstev,  $PSD$  a z ní následně rms drsnost  $\sigma$ .

V dalším se tedy budeme zabývat touto veličinou.

### 3. CÍLE

Cílem práce je získat možnost měřit parametry topografie náhodně drsných povrchů s velikostí rms drsnosti řádu řádu  $10^0 - 10^{-1}$  nm a získat tak možnost jejich statistického popisu. Zmíněnou rms drsnost vykazují povrchy tenkých vrstev či jejich rozhraní, pro které se tato měření hlavně zamýšlejí. K dosažení tohoto cíle bude postaven skaterometr další generace – skaterometr SM III.

Při stavbě tohoto přístroje bude použito poznání a zkušenosti ze stavby a úprav předchozí verze přístroje skaterometr SM I a skaterometr SM II.

## 4. MĚŘENÍ ARS

Následující kapitola se bude zabývat měřením ARS pomocí skaterometrů, konstrukčními požadavky těchto přístrojů a dosavadním vybavením Laboratoře koherentní optiky Ústavu fyzikálního inženýrství Fakulty strojního inženýrství.

### 4.1. Požadavky na kvalitní skaterometry při měření ARS

Při měření rozptylu např. z kvalitních optických elementů jsou pro skaterometry požadovány následující parametry [25]:

- Velký dynamický rozsah. Alespoň 11 řádů pro optiku používanou ve viditelném spektru (dále jen VIS optika).
- Linearita přes celý dynamický rozsah.
- Vysoká citlivost a nízký šum (pro VIS optiku hladina šumu  $\leq 10^{-6}$  sr<sup>-1</sup>).
- Malá spektrální pološířka světla.
- Pro anisotropní rozptyl možnost měřit na celé sféře rozptylu.
- V případě měření optiky mít možnost eliminovat defokusaci jí vyvolanou.
- V některých aplikacích možnost měřit velké vzorky.
- Čistá laboratoř (možnost měřit ve vakuu, plynové atmosféře, měřit koncentraci prašných částic ...).

### 4.2. Kalibrace skaterometru

Před měřením (nejlépe před každým měřením) je nutné skaterometr zkalibrovat. Lze použít [25]

a) absolutní kalibraci, kdy se změří přímo dopadající světelný výkon  $P_i$  a výkon  $\Delta P_s$  rozptýlený do přijímacího úhlu  $\Delta\Omega$  detektoru.

b) relativní kalibraci, kdy se změří rozptyl difúzně rozptylujícího standardu se známou  $ARS(\theta_s, \phi_s)$  (Spectralon<sup>TM</sup> pro UV-VIS obor). Její výhodou je skutečnost, že je méně ovlivněna možnou nelineární odezvou skaterometru. Je tedy vhodnější ve srovnání s kalibrací absolutní.

Relativní kalibrační procedura je složena z následujících kroků:

- Přístroj se pečlivě seřídí, tj. všechny jeho osy musejí být správně nastaveny, stejně jako ohnisko dopadajícího světelného svazku, pozice osvětlujícího svazku i zorné pole detektoru.
- Podle příslušné aplikace skaterometru se provede výběr polarizace světelného svazku, úhlů dopadu a rozptylu, rozlišení na měřicí sféře i přijímacího úhlu detektoru.
- Provede se měření rozptylu ze známého referenčního vzorku (difúzně rozptylující etalon).
- Kvalita přístroje se ověří měřením  $ARS(\theta_s, \phi_s)$  bez vzorku („instrument signature“). Tento vliv přístroje se odečte od dat vlastního měření studovaného vzorku
- Následuje nastavení studovaného vzorku a výběr pozice světelné stopy na vzorku (přitom je nutné dát pozor na případnou nehomogenitu povrchu).
- Provede se vlastní měření studovaného vzorku.

### 4.3. Analýza neurčitosti měření ARS

Hlavními zdroji neurčitosti měření  $ARS(\theta_s, \phi_s)$  jsou [25]:

- Fluktuace světelného zdroje.
- Šum detektoru, který závisí na způsobu detekce. Obecně je vyšší pro malé signály.
- Kalibrační chyby.
- Zbytková nelinearita detekčního systému.
- Nedokonalá justace přístroje. Tato nejistota ARS není konstantní v celém rozsahu rozptylového úhlu (největší je pro velké úhly a blízko zrcadlového směru).
- Mechanická nepřesnost goniometru, která způsobuje typicky nejistoty v nastavení polohy až  $0.01^\circ$ . Vliv může mít i gravitací způsobená deformace měřicích ramen.

Relativní neurčitost se pohybuje v rozsahu 10% až (za splnění některých podmínek) 5%.

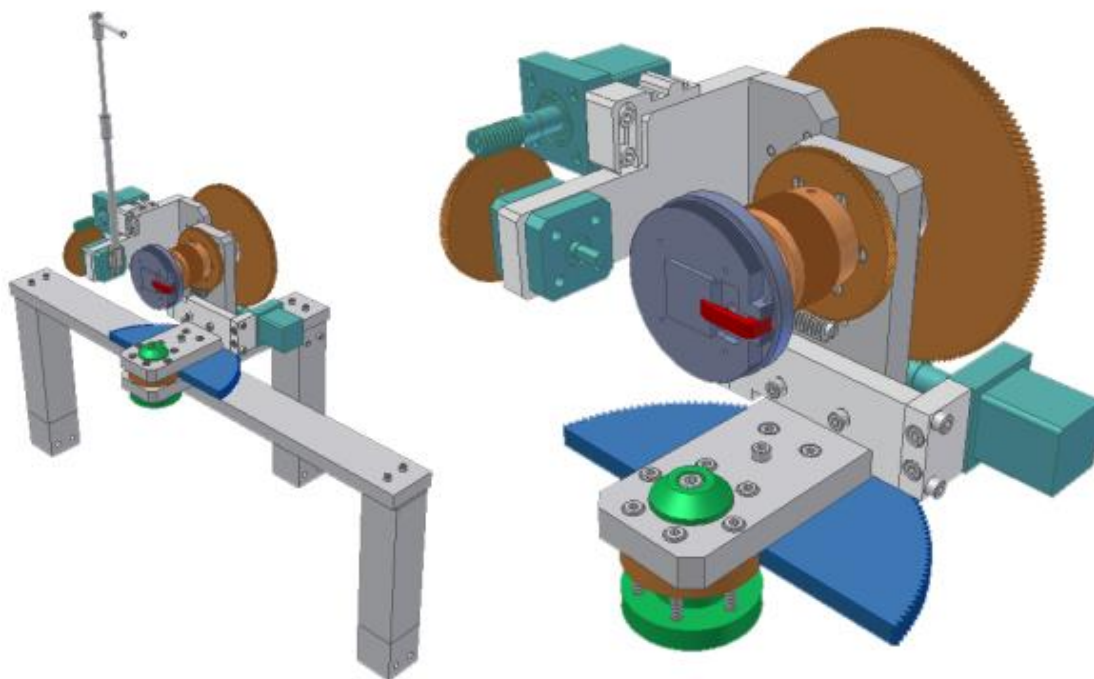
Je vhodné poznamenat, že pro měření  $ARS(\theta_s)$  je výše popsán postup měření postupem doporučeným. Jeho dodržování má zajistit jednoznačné výsledky, které bude možné

srovnávat mezi různými pracovišti. Za tímto účelem se ISO norma pro měření  $ARS(\theta_s)$  teprve připravuje.

#### 4.4. Přístrojové vybavení

Laboratoři koherenční optiky LKO na Ústavu fyzikálního inženýrství VUT v Brně se skupina pod vedením profesora Miloslava Ohlídala zabývá studiem rozptylu elektromagnetického záření okolo 20 let. Mimo jiné se v této oblasti zabývá také konstrukcí optických přístrojů.

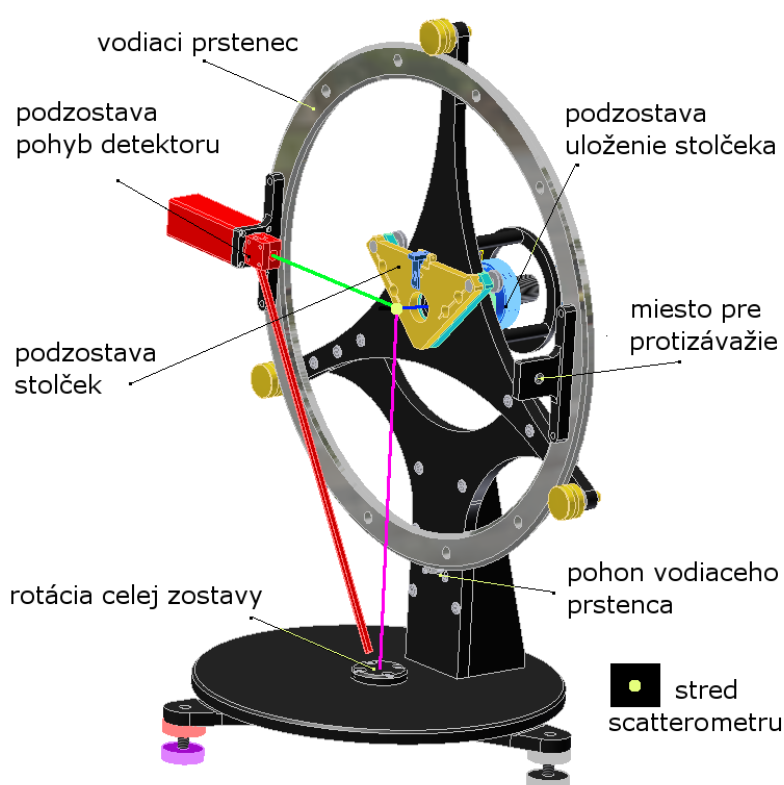
Výzkum byl odstartován prací na projektu MPO (FT-TA3/142) „Analýza optických vlastností solárních článků“ ve spolupráci s firmou Solartec, s.r.o. v letech 2006-2009. Cílem bylo zdokonalit účinnost solárních článků. Na projekt navazovala konstrukce prvního přístroje k měření  $ARS(\theta_s)$  zpracovaná v diplomové práci Vladimíra Gründlinga v roce 2008. Přístroj Scattermeter (zkratka "SM") znázorněn na obrázku 4.1 umožňoval měřit světlo rozptýlené v hemisféře nad povrchem vzorku. Nebylo však možné měřit hemisféru za vzorkem a nebylo možné úhlově naklápět vzorek, tedy měřit různé úhly dopadu laserového svazku.



Obrázek 4.1: 3D model prvního přístroje Scattermeter. Sestaven v LKO v diplomové práci Vladimíra Gründlinga v roce 2008 [25]

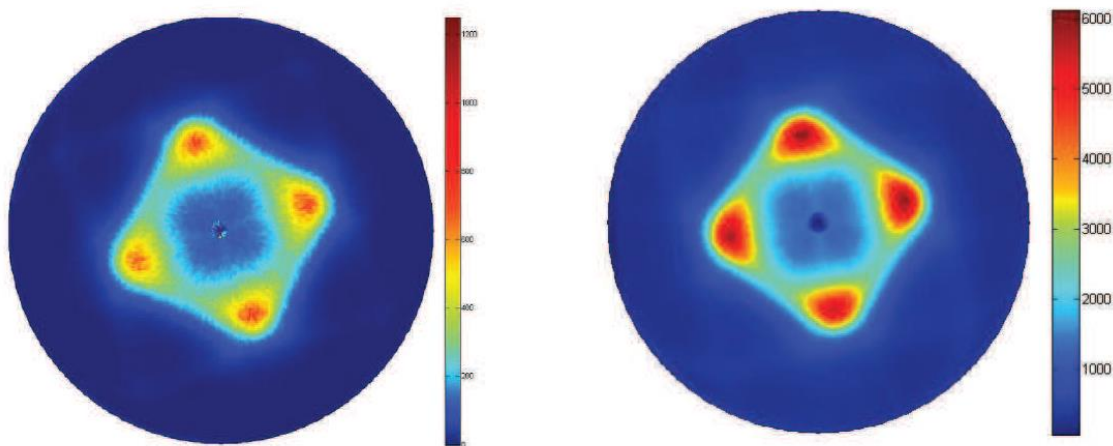
Následně se v laboratoři LKO rozvíjel výzkum rozptylu elektromagnetického záření z povrchů solárních článků.

V roce 2010 navazuje Pavol Brilla svoji diplomovou prací zaměřenou na návrh nové konstrukce přístroje. Jak je znázorněno na obrázku 4.2, umožňuje měření přední, nebo zadní hemisféry. Lepší nastavení polohy vzorku vůči přicházejícímu laserovému svazku a rozšiřuje měření na dvě vlnové délky 635 nm a 1550 nm. Přístroj v rozsahu práce nebyl plně dokončen a zprovozněn. Dokončení nového skaterometru SM2 realizoval až Pavel Nádaský ve své diplomové práci zaměřené na experimentálnímu studiu rozptylu světla z po vrchů solárních článků.



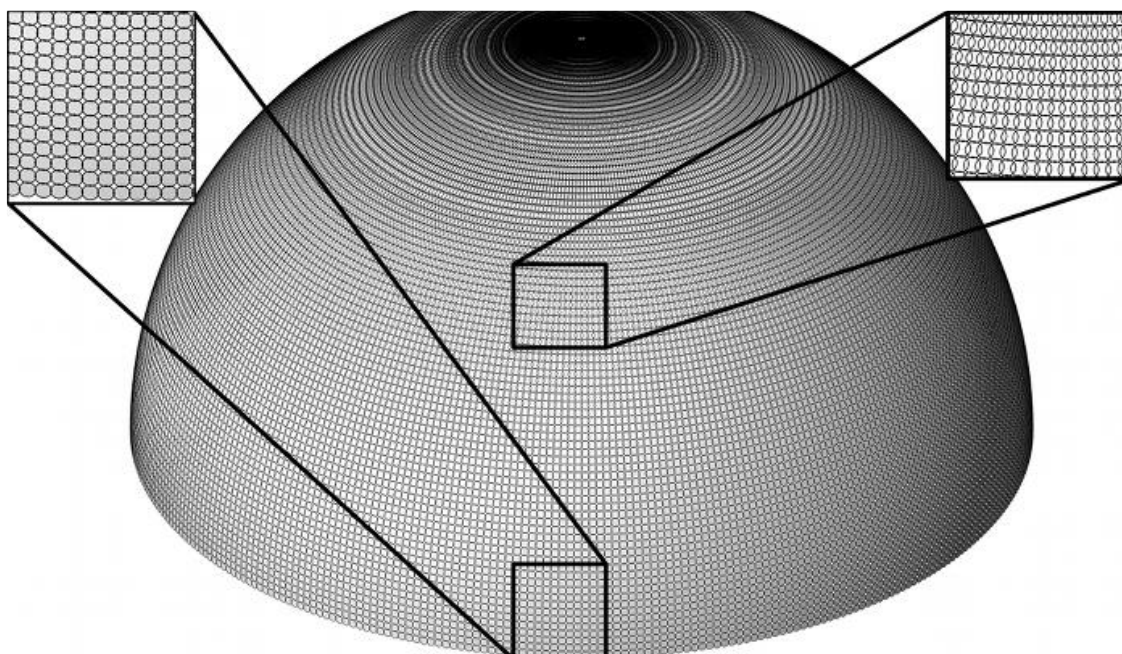
Obrázek 4.2: Konstrukční návrh nového skaterometru SM2 z diplomové práce, P. Brilla 2010 [27]

Funkčnost přístroje byla ověřena na známém vzorku v diplomové práci Pavla Nádaského [28] (Obrázek 4.3 znázorňuje výsledek měření) a dalšími měřeními publikovanými v [29].



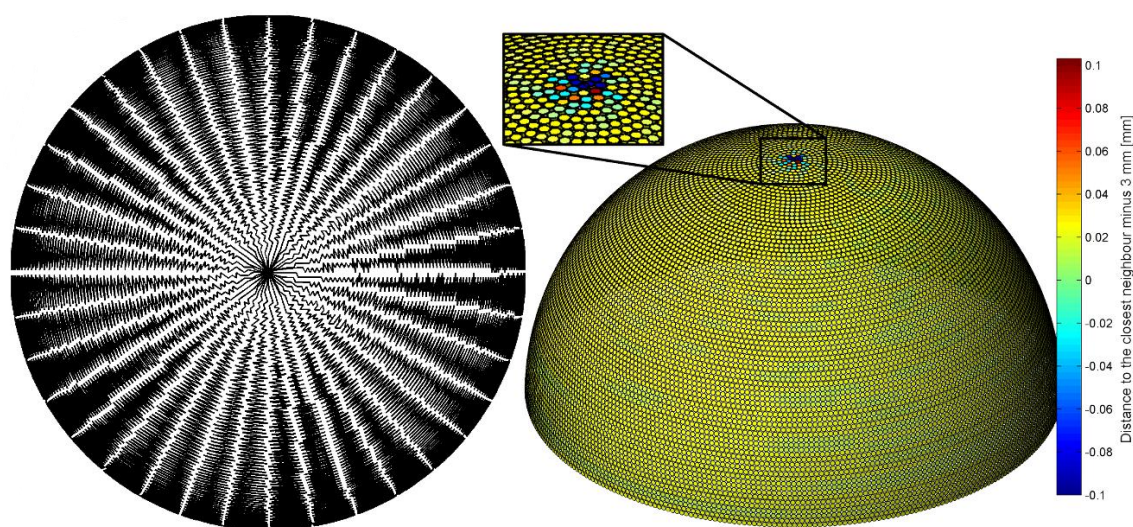
Obrázek 4.3: Scattergram vzorku IPA-1B změřený na SM I (vlevo) a scattergram vzorku IPA-1B změřený na SM II (vpravo) [27]. Barevná škála zobrazuje výkon rozptýlený povrchem vzorku v hemisféře nad povrchem vzorku.

Dále v diplomové práci Jakuba Kluse byla na přístroj SM2 navržena nová měřicí procedura zaměřená na ideální rozmístění měřících pozic detektoru na hemisféře. V původní proceduře docházelo k překrytí pozic měření, které byly blíže k pólu jak je znázorněno na obrázku 4.4.



Obrázek 4.4: Vizualizace konfigurace bodů staré měřicí procedury. Detail v levém horním rohu ukazuje nepřekrývající se polohy detektoru umístěné poblíž rovníku. Detail v pravém horním rohu ukazuje překryv poloh detektoru s klesajícím úhlem směrem k pólu [30].

Také byla optimalizována dráha detektoru uloženého v goniometru tak aby detektor urazil nejkratší možnou vzdálenost. Cílem této optimalizace bylo snížit celkovou dobu měření na celé hemisféře. Dráha detektoru v původní proceduře byla po jednotlivých polednicích. V novém modelu rozložení pozic detektoru je úhlech bližších k pólu méně měřených pozic než kolem rovníku. Při původním způsobu pohybu detektoru by detektor vykonával hodně zbytečných drah a měření by se prodlužovalo. Nová trajektorie je znázorněna na obrázku 4.5. Při modelování nebyla brána v úvahu rozdílná rychlost pohybu v poledníku nebo azimutu. Pro pohon azimutu je v konstrukci přístroje SM2 použit silnější motor, což je dáno nutností pohybovat s násobně větší hmotností při otáčení celého prstence.



Obrázek 4.5: Pozice detektoru. V levé části obrázku vizualizace trajektorie detektoru při měření hemisféry. Znázorněno černou čarou. V pravé části obrázku vizualizace spirálová konfigurace pozic detektoru s 35296 body

Přístroje SM a SMII byly původně navrženy na měření rozptylu z leptaných povrchů solárních článků. Tenké vrstvy, na které se tato dizertační práce zaměřuje, mají drsnost povrchů o 3 až 4 řády nižší než leptané povrchy původně zkoumaných solárních článků. Na měření takto velmi málo drsných povrchů nebyly přístroje SM a SMII při své konstrukci zamýšleny a velmi nízký výkon rozptýlený těmito tenkými vrstvami leží za hranou citlivosti těchto přístrojů. Pro měření ARS z povrchů tenkých vrstev bude potřeba konstrukčních úprav pro zvýšení citlivosti i dynamického rozsahu.

## 5. KONSTRUKČNÍ ÚPRAVY

V rámci zadané disertační práce jsme upravili skaterometr SMII (skaterometr druhé generace, který navazuje na předchozí v LKO zkonstruovaný skaterometr SMI). Jde o 3D skaterometr goniometrického typu. Během doktorského studia jsme skaterometr SMII zdokonalili a současně upravili na stolní verzi tohoto přístroje.

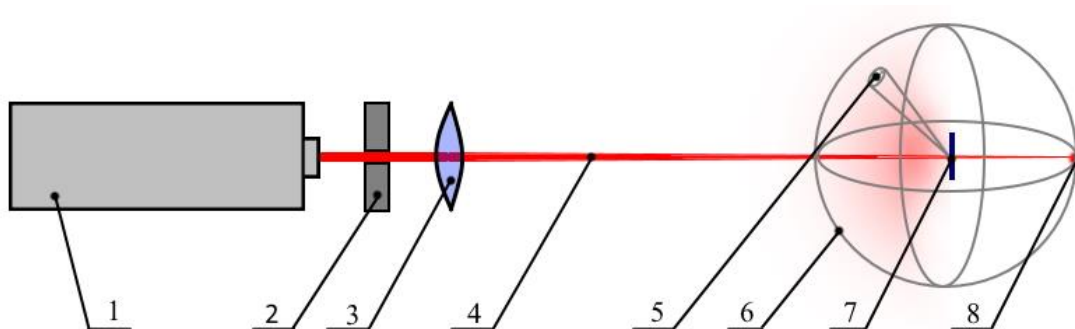
Úpravy

1. optika k přípravě laserového svazku
2. úprava goniometru
3. úprava elektroniky pro snížení šumu

V následujících kapitolách bude krátce nastíněna každý s těchto úprav.

### 5.1. Optická část

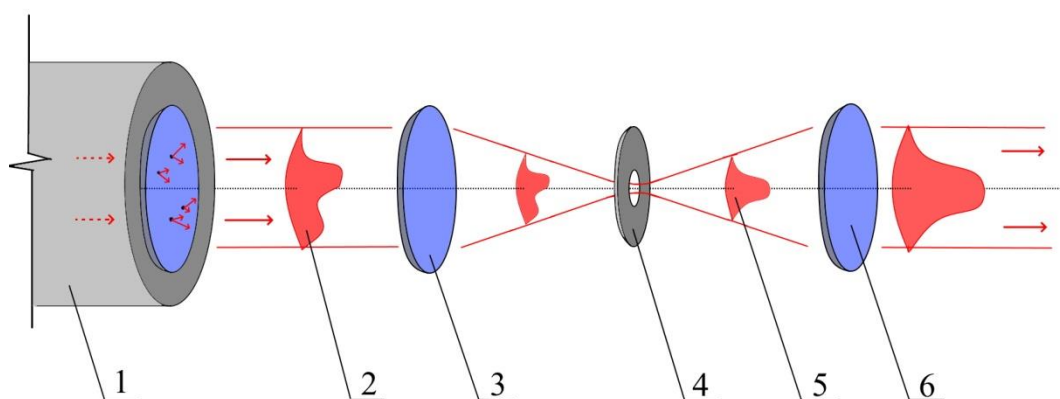
Původní verze přístroje scattermeter SM2 využívala jako zdroj laserového svazku helium neonový laser. Ten byl fokusován čočkou tak, aby ohnisko leželo na zadní části povrchu sféry, po které se pohyboval detektor v goniometru (znázorněno na obrázku 5.1). V této sestavě byla začleněna clona pro odstranění parazitních světelných jevů vycházejících z laseru. Pro měření solárních článků byla tato sestava dostačující, jak je vidět z výsledků dosažených [29]. Pro větší citlivost přístroje potřebnou pro měření drsnosti povrchů, která je plánovaná, toto řešení není dostačující.



Obrázek 5.1: Schéma původního skaterometru SMII: 1 He-Ne laser, 2 apertura eliminující parazitní světlo kolem laserového svazku, 3 fokusační čočka, 4 laserový svazek, 5 vybraná možná pozice detektoru (fotodiody), 6 sféra po které se pohybuje detektor, 7 měřený vzorek, 8 bod F do kterého čočka fokusuje laserový svazek v případě, kdy vzorek není přítomen,

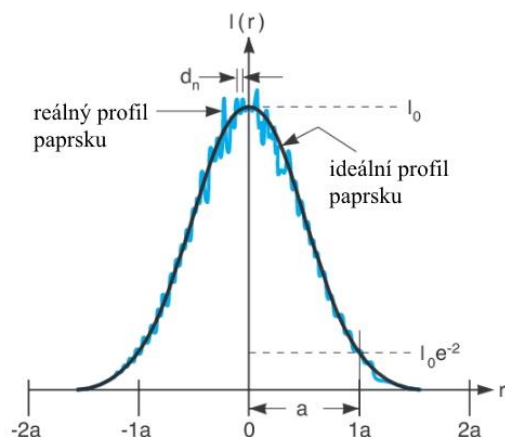
Cílem je získat přesně vydefinovaný laserový svazek s gaussovským rozložením intenzity (nebo jemu co nejbližšímu) fokusovaný na plochu měřené sféry. Při využití čočky a jednoduché clony se odstraní nejhrubší "nečistoty". Drobné nehomogenity na optických prvcích laseru případně i prach který se na laseru i jeho zrcadlech usazuje vytváří i "jemnější" změny v rozložení intenzity laserového svazku, které jsou pro principy našeho měření ve své intenzitě srovnatelné s rozptýlenou intenzitou elektromagnetického záření vyvolanou povrchem s nízkou drsností.

Takové úpravy laserového svazku je možné dosáhnout pomocí prostorového filtru. Grafické znázornění je na obrázku 5.2. Mikroskopový objektiv (případně jiný optický prvek) fokusuje laserový svazek s negaussovským rozložením intenzity. V rovině ohniska mikroskopového objektivu je uložena módová clona.



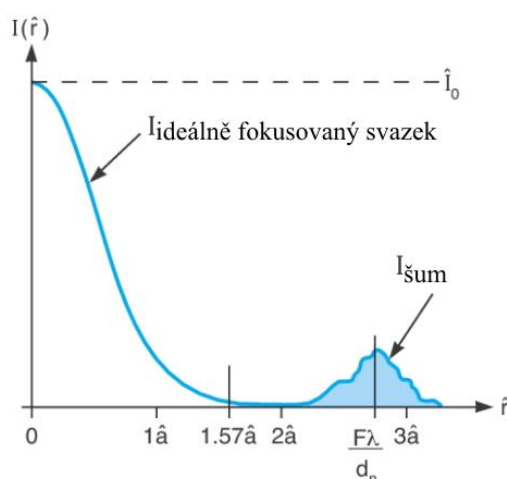
Obrázek 5.2: Schéma prostorového filtru. 1 laser s usazenými prachovými částicemi či jinými nečistotami, 2 svazek vycházející z laseru s jiným než gaussovským rozložením intenzity, 3 mikroskopový objektiv, 4 módová clona, 5 laserový svazek s gaussovským rozložením i

Na obrázku 5.3 je znázorněno rozložení intenzity laserového svazku vycházejícího z laseru. Ideální gaussovský profil je kontaminován fluktuacemi  $\delta I$  způsobenými rozptylem na nečistotách a optických vadách. Tyto fluktuace  $\delta I$  se mění rapidně na vzdálenostech  $d_n$ , které jsou násobně menší než průměr svazku vycházejícího z laseru. Tato vzdálenost je nazývána jako průměrná prostorová vlnová délka šumu laserového svazku.



Obrázek 5.3: Znázornění rozložení intenzity v laserovém svazku. Vzdálenost  $2a$  je průměr laserového svazku v hodnotě intenzity  $I_0 e^{-2}$ . Vzdálenost od optické osy vyjadřuje  $r$ . [31]

Při zobrazení laserového svazku pomocí mikroskopového objektivu se v rovině ohniska vytvoří invertní mapa prostorových vlnových délek. Jak je znázorněno na obrázku 5.4 fluktuace  $\delta I$  s krátkých vlnových délek se zobrazí dále od středu. Dlouhá vlnová délka ideálního gaussova rozložení intenzity se zobrazí v okolí středu optické osy.



Obrázek 5.4: Znázornění rozložení intenzity laserového svazku rovině ohniska mikroskopového objektivu.  $\hat{r}$  znázorňuje vzdálenost od optické osy v rovině ohniska mikroskopového objektivu.  $\lambda$  je vlnová délka laserového svazku,  $F$  ohnisková vzdálenost mikroskopového objektivu.  $d_n$  je průměrná vzdálenost na které se mění fluktuace intenzity  $\delta I$ . [31]

Módová clona s vhodně zvoleným průměrem otvoru tak může propustit jen dlouhou vlnovou délku gaussova rozložení, zatím co krátké prostorové vlnové délky dopadnou na prstenec modové clony, kterým neprosvítí.

Vhodný průměr apertury v modové cloně  $d_a$  můžeme spočítat pomoví rovnic

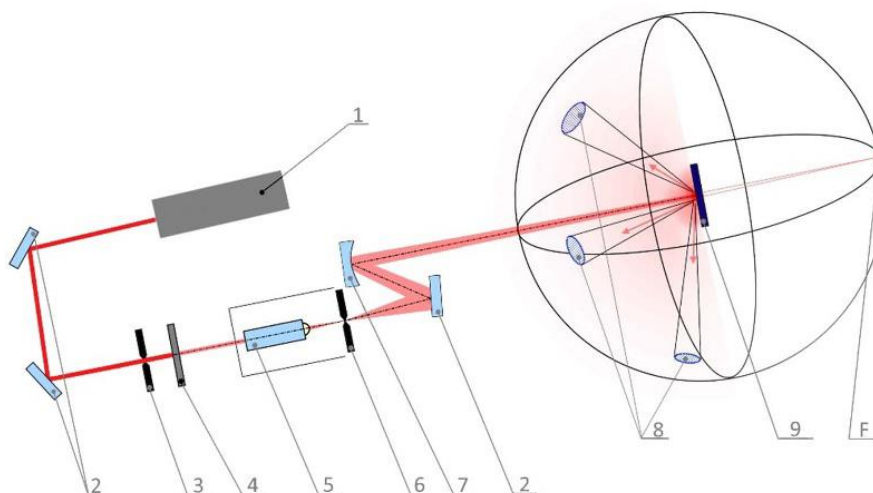
$$\frac{d_a}{2} = 1,57\hat{a}$$

$$\hat{a} = \frac{\lambda F}{\pi a},$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka laserového svazku,  $F$  je ohnisková vzdálenost mikroskopového objektivu,  $a$  je průměr laserového svazku vycházející z laseru v hodnotě intenzity  $I_0 e^{-2}$ .

Je zřejmé že vypočtený průměr apertury modové clony pravděpodobně nepůjde mezi sériově vyráběnými clonami najít. Pokud bude zvolena menší apertura dojde k difrakci která následně znehodnotí výsledky měření. Volen musí být nejbližší vyšší možný průměr. Neměl by však přesáhnout hodnotu  $4\hat{a}$ . Proto je vhodné při návrhu prostorového filtru přistupovat k volbě mikroskopového objektivu s uvědoměním že jeho ohnisková vzdálenost bude určovat průměr apertury a volit tak vhodnou kombinaci těchto dvou optických prvků.

Po propočtu vhodné kombinace objektivu a modové clony byl navržen prostorový filtr a za něj dvě zrcadla. Jedno justovací a druhé fokusační, které fokusuje laserový svazek na povrch sféry po které se pohybuje detektor jak je znázorněno na obrázku 5.5



Obrázek 5.5: Schéma skaterometru SMII: 1 He-Ne laser, 2 justovací zrcadla současně zajišťující kompaktnost přístroje, 3 apertura eliminující parazitní světlo kolem laserového svazku, 4 šedý filtr (atenuátor svazku), 5 mikroskopový objektiv, 6 módová clonka, 7 sférické zrcadlo fokusující laserový svazek do bodu F v případě, kdy vzorek není přítomen, 8 vybrané možné pozice detektoru (fotodiody), 9 měřený vzorek (převzato z [32])

## 5.2. Úprava goniometru

jak bylo zmíněno již v kapitole 4.4 a znázorněno na obrázku 4.5 procedura polohování detektoru byla navržena tak aby byla trajektorie detektoru při vystřídání všech pozic na sféře co nejkratší. Původní konstrukce SM2 nebyla navrhována s touto myšlenkou. Na přístroji SM2 je tedy optimální trasa detektoru, nejsou k ní ale optimálně navrženy i motory. Zejména motor pro pohyb v poledníku, který otáčí celým prstencem a v průběhu měření na hemisféře vykonává s celým goniometrem oscilační pohyb nebyl na takovouto zátěž dimenzován. Při původním návrhu se počítalo s postupným projetím všech poledníků v řadě po sobě.

První krok úpravy byla výměna elektromotoru za silnější a rychlejší. Nový motor má kromě většího výkonu také větší rozměry a produkuje více tepla. Byla tedy přepracována celá oblast kolem elektromotoru. Teplo generované elektromotorem při neustálém oscilačním pohybu by se mohlo začít kumulovat v uzavřené měřicí komoře a je nutné jej odvést pryč. Detektor který je v goniometru využit je citlivý na teplo a změnou teploty dochází ke změně účinnosti. Na obrázku 5.6 je nová nosná část goniometru, vyrobená z měděných I profilů, které z bočních stran mají žebrování pro lepší odvod tepla. Ze zadní strany bylo nainstalováno měděné chlazení doplněné i o aktivní chladicí prvek v podobě ventilátoru.

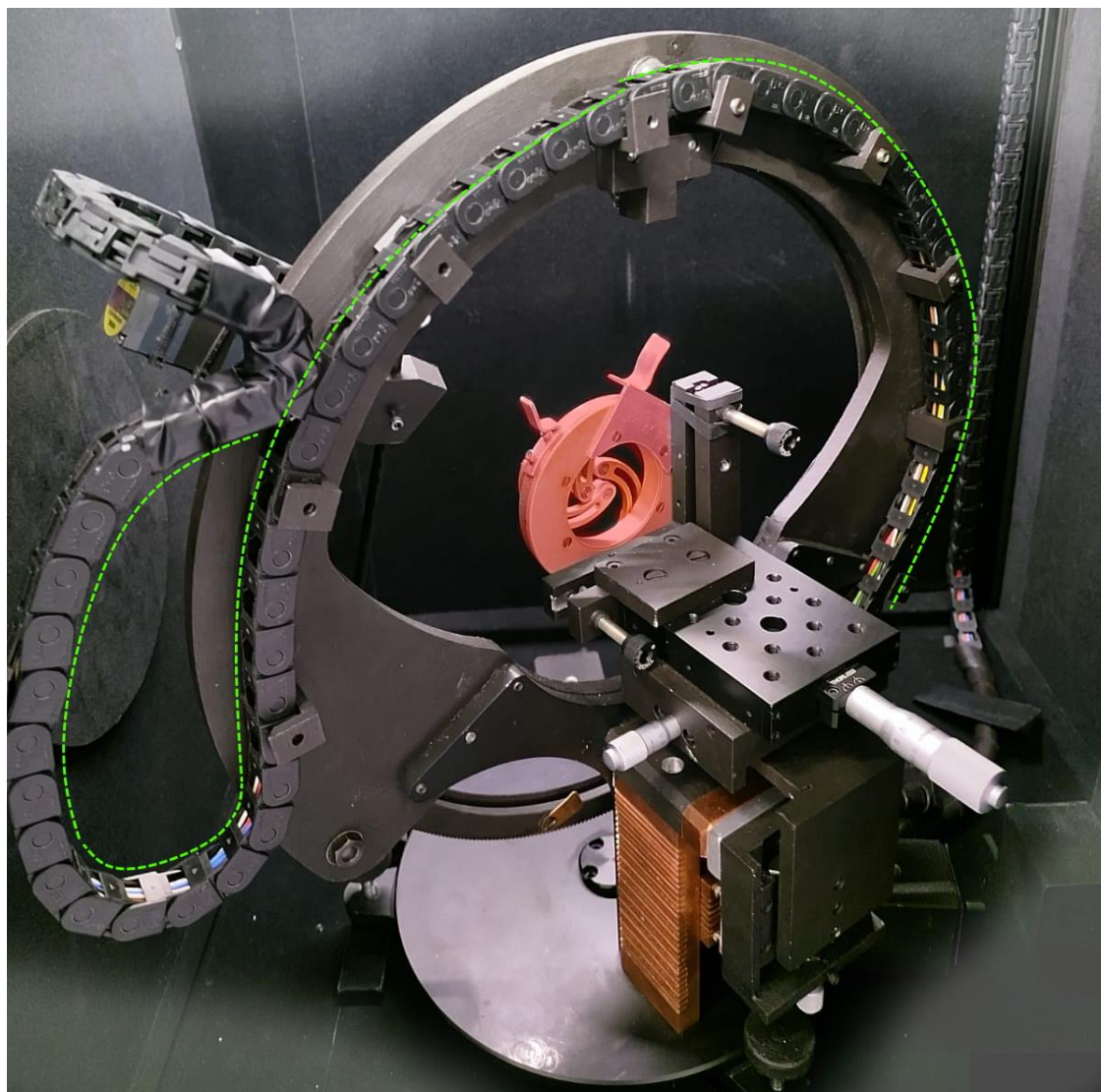


Obrázek 5.6: Fotografie zadní části goniometru. Měděná nosná část goniometru s novým motorem a justací ve směrech X, Y a Z uložení vzorku

K této části byl připevněn i nový mechanismus pro uchycení a justaci vzorků. V původním mechanismu byl možnost posunu pouze v ose Y. Pro měření více bodů na stejném vzorku a vyhodnocování větších ploch vzorku (vhodné například pro určení homogenity povrchu) je potřeba i justace ve zbylých osách.

Společně s nosnou částí byla vyměněn i nosič otočného ozubeného prstence a na něj uchycený držák vzorků, znázorněno na obrázku 5.7. V návrhu nosiče byly zohledněny dva nové parametry. Více místa v oblasti držáku vzorků a možnost uložení elektrického vedení k detektoru a motoru nastavujícímu azimut měření. Držák vzorků byl upraven tak, aby při uchycení vzorku došlo rovnou k automatickému uložení ve středu goniometru a zároveň aby úchyty vzorku nezasahovaly do měřené hemisféry nad vzorkem. Konstrukce je znázorněna na obrázku 5.7. Elektrické vedení bylo uloženo

do energetického řetězu, který zabraňuje ohnutí vedení do příliš malého poloměru a tím jej chrání proti přelomení i v opakovaných ohybech, ke kterým během měření dochází.



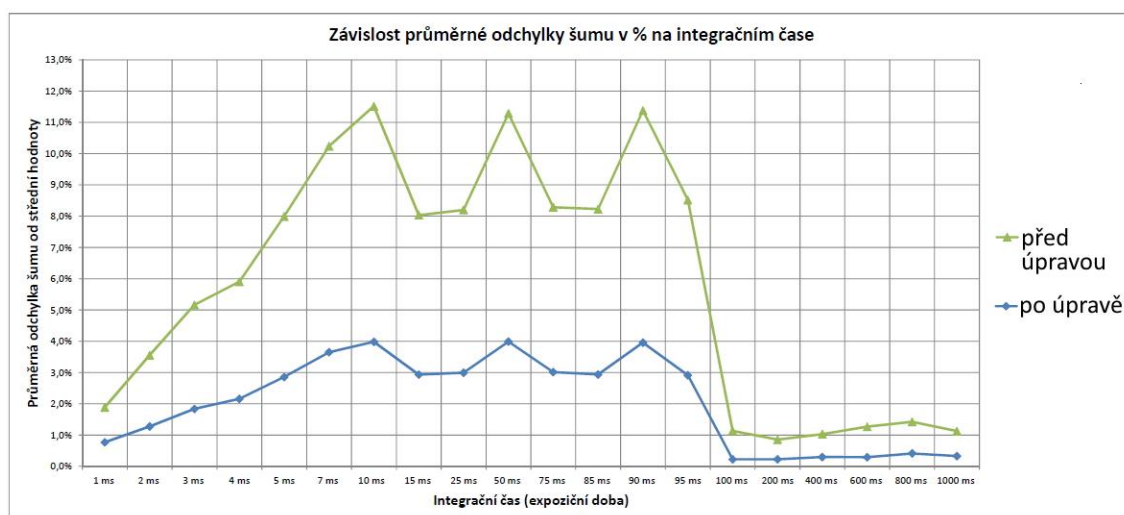
Obrázek 5.7: Fotografie upraveného goniometru. Červeně znázorněn nový držák vzorků pro soustředné uložení vzorků. Zelenou přerušovanou čarou je zvýrazněn energetický řetěz chránící elektrické vedení před přelomením při opakovaném ohybu do malých poloměrů. Řetěz je uchycen k novému nosiči v podpěrách ve tvaru U a může se v nich volně odmotávat.

### 5.3. Úprava elektroniky

Po konstrukční úpravě se při měření vzorků začal projevovat šum a rušení v signálu z detektoru. Po důkladném testování bylo zjištěno že s novými elektromotory s větším proudovým odběrem vznikaly nejen v řídicí jednotce SM2 ale i v částech elektrických obvodů různé interference a tím se zvyšoval šum v měření.

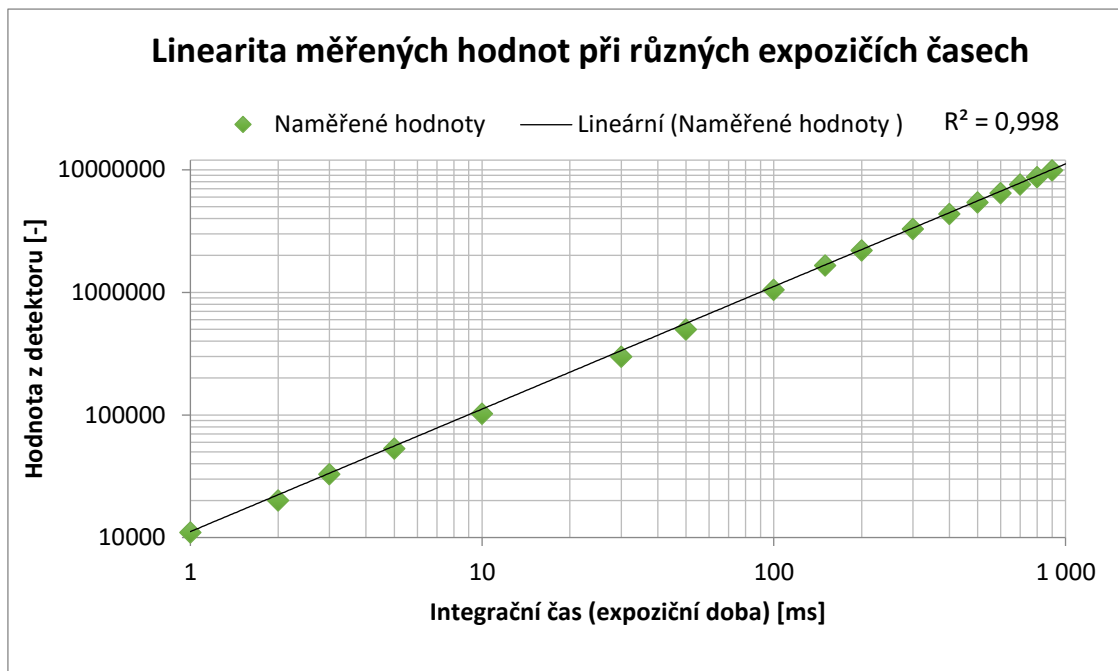
S pomocí kolegů z laboratoře LIBS (Jakub Klus, Lukáš Novák) na ústavu fyzikálního inženýrství FSI VUT byl sestaven a zapojen nový mikrokontroler na ovládání

skaterometru SM2. Goniometr je ovládán pomocí kontroléru Arduino UNO, který přímo řídí motory a Arduino Mega, který ovládá detektor. Pro zvýšení dynamického rozsahu a možnost měřit i nižší intenzity rozptýleného světla byl využit princip tzv. integračního času. Napětí z detektoru bylo přivedeno na kondenzátory. Ty pak byly nabíjeny napětím podle zvoleného integračního času a po jeho uplynutí se změnila velikost náboje na kondenzátorech. Kontrolér pak volil integrační časy vzestupným způsobem. Tedy začal od nejkratšího času a pokud hodnota ležela v dolních 10% měřicího rozsahu zvedl se integrační čas o jeden krok. Hodnota integračního času pro jednotlivé kroky byla předem nadefinována, tyto hodnoty jsou vidět na obrázku 5.8. Na tomto obrázku je také znázorněna průměrná odchylka od střední hodnoty šumu v závislosti na integračním čase.



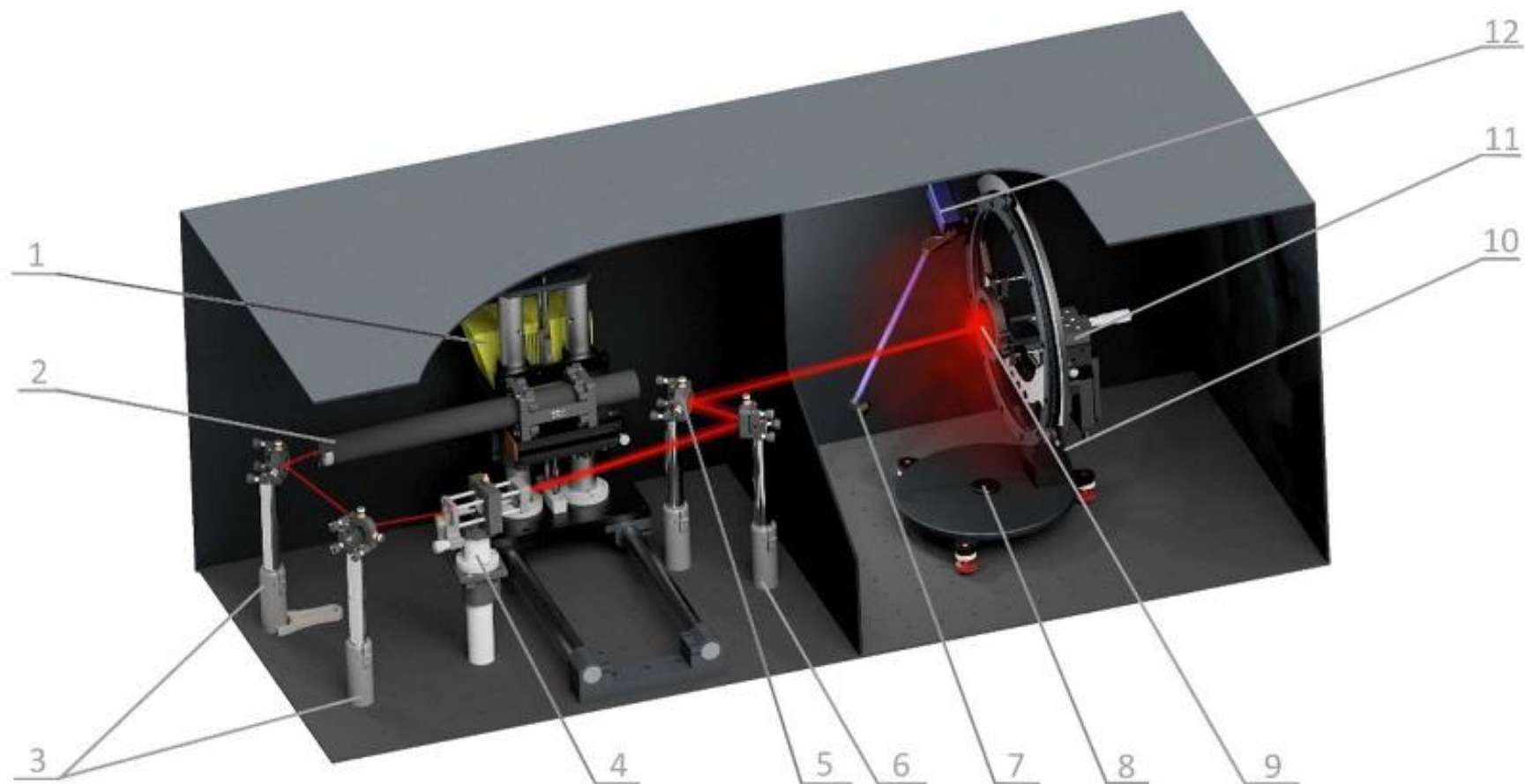
Obrázek 5.8: Závislost šumu na integračním čase. Srovnání šumu před úpravou řídicí jednotky a po úpravě. S výměnou motoru a řídicí jednotky byly také vyměněny všechny rozvody, včetně kabelů detektoru a motorů. U všech byli použity stíněné kabely.

Dalším krokem bylo ověřit lineární závislost hodnot měřených detektorem na integračním čase. Bylo provedeno měření kde se měřily hodnoty v jedné pozici detektoru na kalibračním vzorku Spectralon (viz kapitola 13.3 Kalibrační měření) při různých integračních časech. Výsledek měření je znázorněn na obrázku 5.9.



Obrázek 5.2: Výsledek měření lineární závislosti hodnot detektoru na integračním čase. Z hodnot jde vidět, že závislost můžeme prohlásit za lineární.

Po všech těchto úpravách byl zkompletován přístroj SM2 upravený na měření rozptylu elektromagnetického záření z povrchu tenkých vrstev. Jeho počítačem generované zobrazení SMII je uvedeno na obrázku 5.10.



Obrázek 5.10: počítačem vytvořené zobrazení SMII: 1 napájecí zdroj, 2 He-Ne laser, 3 justovací zrcadla, 4 prostorový filtr, 5 fokusační zrcadlo, 6 justovací zrcadlo, 7 detektor, 8 otočná podstava goniometru, 9 vzorek, 10 motor pro azimutální rotaci, 11 nastavitelný držák vzorku, 12 motor pro elevační rotaci (převzato z [32])

Skaterometr SMII je uzavřen ve světlotěsném boxu (viz obr. 3). Jako světelný zdroj je použit He-Ne laser s vlnovou délkou  $\lambda = 632,8\text{nm}$ . Jeho svazek je upraven prostorovým filtrem tvořeným mikroskopovým objektivem a vhodnou módovou clonkou a poté zfokusován sférickým zrcadlem. Jako detektor slouží fotodioda s přijímacím úhlem  $3,8 \times 10^{-4}$  sr, která se pohybuje pomocí krokových motorů po hemisféře se středem v osvětlené stopě na vzorku a poloměrem 160 mm. Může být nastavena prakticky do libovolné pozice na měřicí hemisféře (viz Obrázek 5.5). Tato pozice je určena vzhledem k normále ke vzorku a rovině dopadu polárním úhlem  $\theta_s$  a azimutálním úhlem  $\phi_s$ . Dopadající svazek je transformován tak, že zrcadlový odraz od vzorku má ohnisko na měřicí hemisféře. Měřený vzorek je umístěn v nastavitelném držáku, úhel dopadu laserového svazku na vzorek je nejčastěji volen rovný  $0^\circ$  (kolmý dopad na vzorek). Světelná stopa na vzorku má přibližně tvar elipsy velikosti 5 x 9 mm.

#### 5.4. Demonstrace výsledků dosažených pomocí SMII

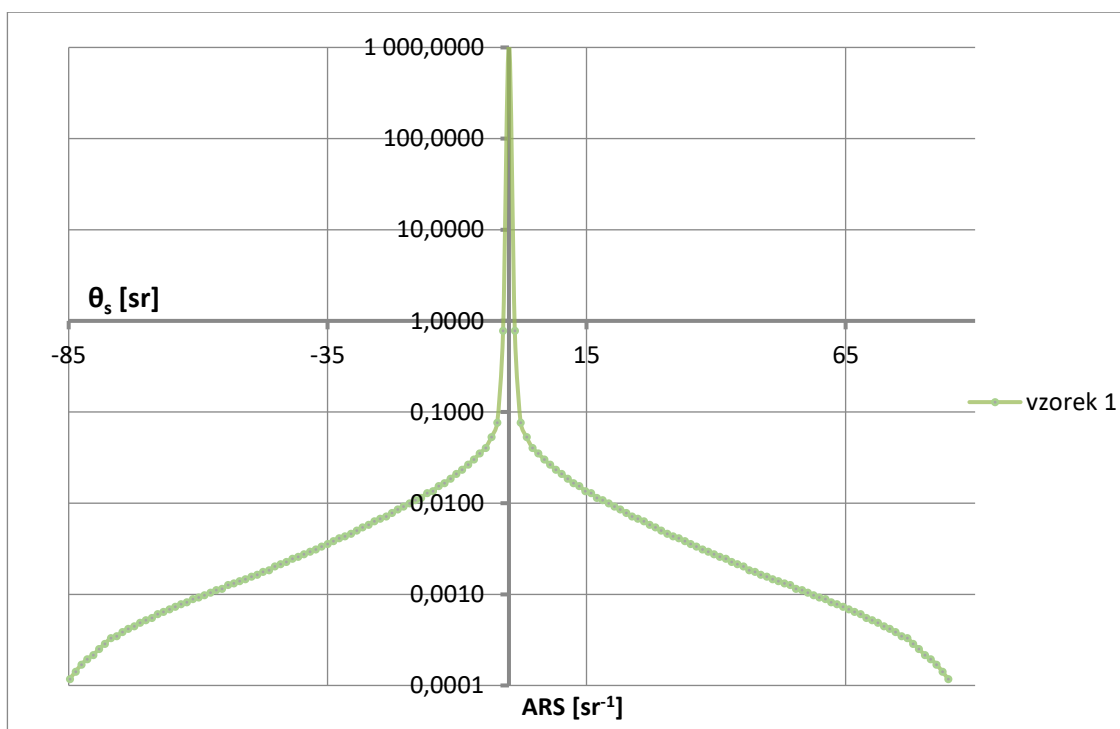
Jako demonstrační příklad uvedeme konkrétní měření 3 vzorků křemíkových desek připravených anodickou oxidací při konstantním přiloženém napětí a následným odstraněním na povrchu vzorků vzniklé tenké oxidové vrstvy ve směsi vody a kyseliny fluorovodíkové. Volbou různých napětí použitých při anodické oxidaci při přípravě vzorků bylo dosaženo náhodně drsných isotropních relativně homogenních povrchů s různými statistickými parametry. Vzorky byly připraveny v Českém metrologickém institutu, Oddělení primární metrologie a technické délky.

Samotné měření *ARS* popsaných vzorků probíhalo následovně:

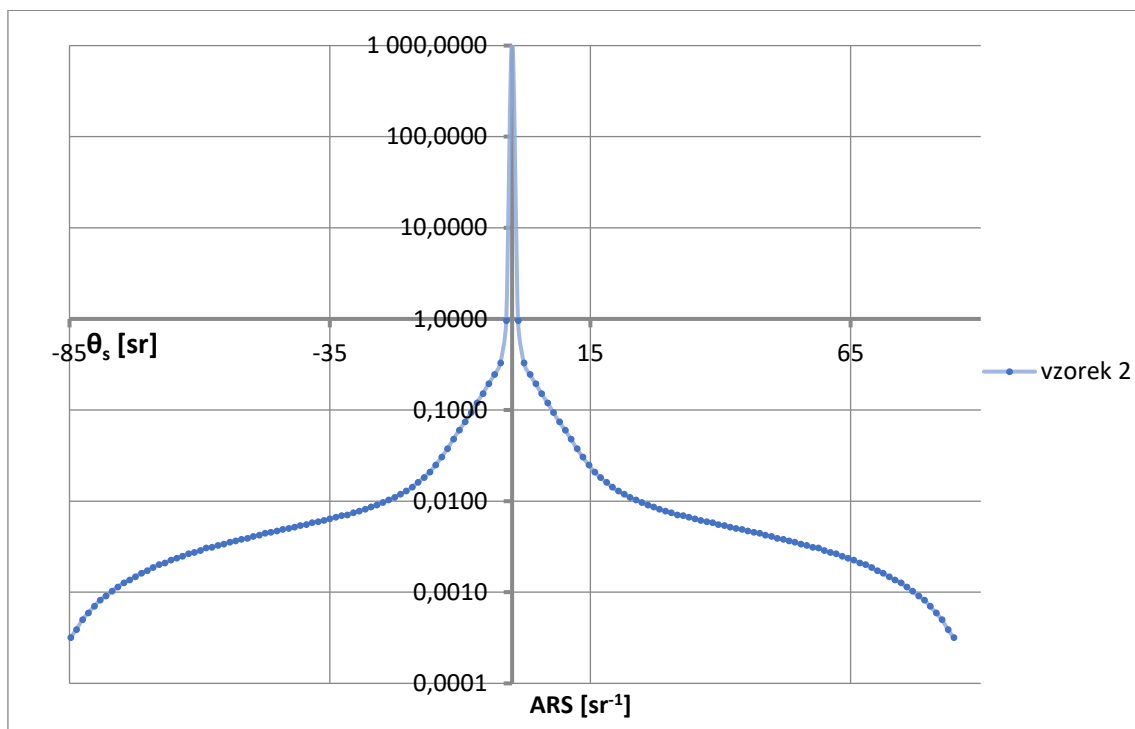
- Skaterometr byl nejdříve pečlivě zjustován.
- Poté byl výkon laserového svazku zeslaben vhodným šedým filtrem tak, aby fotodioda pokryla potřebný dynamický rozsah velikosti *ARS*.
- Následně bylo měřeno pozadí bez vzorku (instrument signature) k opravě experimentálních dat.
- Dalším krokem bylo proměření difúzně rozptylujícího etalonu Spectralon® Diffuse Reflectance Standards firmy Labsphere, u něhož známe závislost absolutních hodnot rozptýleného světelného výkonu na úhlu rozptylu  $\theta_s$  (laskavě poskytl Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering, Jena). V důsledku dostatečné stability SMII není nezbytné toto měření provádět pro každý vzorek z proměřované série.

- Následovalo vlastní měření  $ARS(\theta_s)$  vzorku s krokem  $1^\circ$ . Měření se provedlo postupně ve 12 azimutálních úhlech  $\phi_s = 0^\circ, 30^\circ, \dots, 330^\circ$ . Celý měřicí cyklus se opakoval 5x, tj. každá hodnota  $ARS(\theta_s)$  v příslušných úhlech  $\theta_s, \phi_s$  byla změřena 5x. Souhlas hodnot odpovídajících hodnot  $ARS(\theta_s)$  potvrdil předpoklad, že studované vzorky rozptylovaly isotropně.
- Výsledná hodnota  $ARS(\theta_s)$  odpovídající dané hodnotě  $\theta_s$  byla vypočtena z 5x12 hodnot (12 úhlů  $\phi$  a 5 opakování)

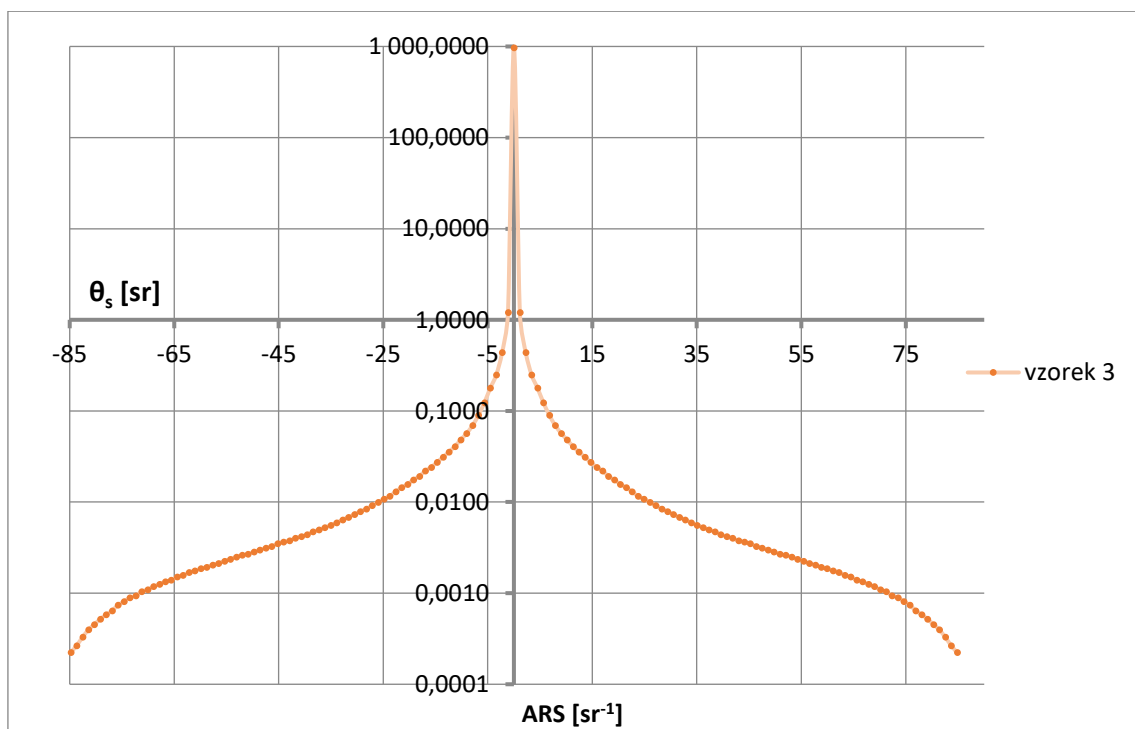
Takto získané závislosti  $ARS(\theta_s)$  [ $\text{sr}^{-1}$ ] jsou vyneseny v obr 5.11 – 5.13



Obrázek 5.11: vzorek 1, závislost ARS na úhlu  $\theta_s$  v rovině  $\phi_s = 0$



Obrázek 5.12: vzorek 2, závislost ARS na úhlu  $\theta_s$  v rovině  $\phi_s = 0$



Obrázek 5.13: vzorek 3, závislost ARS na úhlu  $\theta_s$  v rovině  $\phi_s = 0$

Z uvedených závislostí  $ARS(\theta_s)$  byly pomocí vztahů (2.4) a (2.16) určeny příslušné  $PSD$  jednotlivých vzorků a podle vztahu (2.19) potom rms drsnost  $\sigma$ .

Studované vzorky byly rovněž proměřeny pomocí mikroskopu atomové síly (AFM) Dimension Icon firmy Bruker. Toto měření byl provedeno za účelem kontroly správnosti výsledků získaných pomocí SMII. Byly použity sondy RTESPA v tapping módu. Topografie (výšky) povrchu vzorků byly proměřeny v oblasti  $50 \times 50 \mu\text{m}$  s rozlišením  $1024 \times 1024$  bodů. Měření i jeho vyhodnocení byly provedeny v Českém metrologickém institutu, Oddělení primární nanometrologie a technické délky. Zde byly z odpovídajících experimentálních dat rovněž určeny  $PSD$  jednotlivých vzorků a následně hodnoty rms drsnosti jednotlivých vzorků.

Srovnání  $\sigma$  získaných pomocí SMII a z AFM měření je uvedeno v tab. 1.

Tabulka 5.1: Srovnání hodnot rms drsnosti  $\sigma$  získaných pomocí SMII a z AFM měření

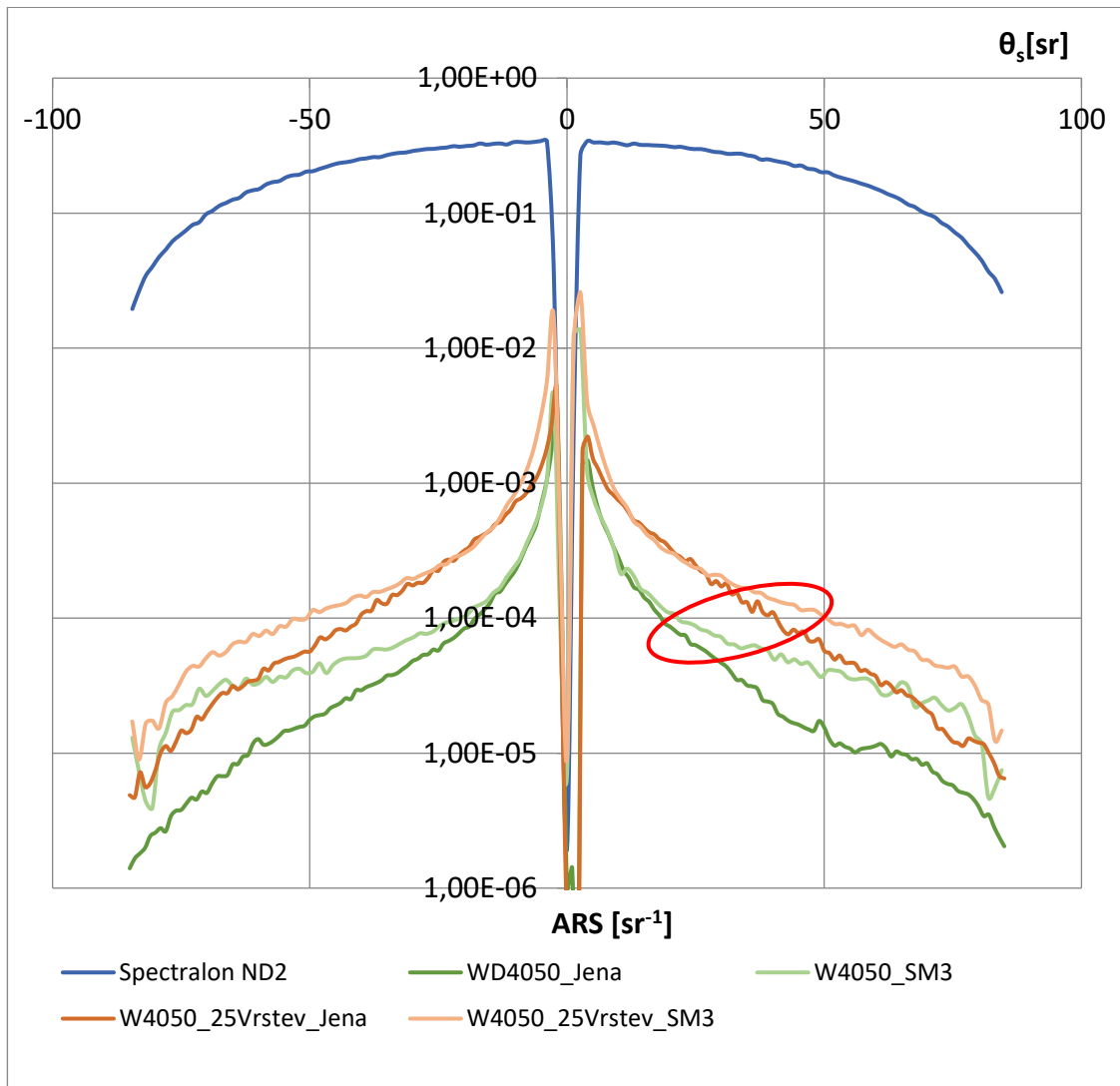
Vzorek	$\sigma_{ARS}$ (nm)	$\sigma_{AFM}$ (nm)
1	10,7	10,8
2	14,6	14,2
3	15,8	16,8

Lze konstatovat dobrý souhlas mezi výslednými hodnotami rms drsnosti získanými pomocí SMII a AFM.

## 6. ÚPRAVA PRO MĚŘENÍ ARS TENKÝCH VRSTEV

Skaterometr SMII po našich úpravách měří ARS spolehlivě. Výsledky uvedené v závěru předchozí kapitoly ukazují že jeho dynamický rozsah je nedostatečný pro měření drsných povrchů s velikostí rms drsnosti řádu  $10^0 - 10^{-1}$  nm (např. povrchy rozhraní tenkých vrstev). Povrchy těchto vrstev rozptylují o 1 až 3 řády méně než povrchy vzorků, které jsou měřeny na obrázcích 5.11 až 5.13. U hodnot ARS  $10^{-4}$  a menších se začíná projevovat nedostatečná citlivost přístroje. Na obrázku 6.1 je analyzováno chování přístroje při měření multivrstevného systému 25 tenkých vrstev naneseného na podložce z optického skla N-BK7. Tento vzorek byl zároveň pro porovnání změřen na Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering v Jeně na přístroji Albatros TT.

Je vidět že kolem hodnoty ARS  $10^{-4}$  se výsledky z přístroje Albtaros TT a SMII začínají rozcházet. Také jde vidět trend že čím do menších hodnot ARS se v měření dostáváme tím k větší neshodě dochází. Přístroj SMII vyčítá větší hodnotu, než by měl a vykazuje tendenci větší relativní chyby v závislosti na snižujících se hodnotách ARS i na snižujících se hodnotách elektromagnetického záření dopadajícího na detektor.



Obrázek 6.1: Srovnávací měření SMII s přístrojem Albatros TT multivrstevného systému na podložce N-BK7. Závislost ARS na úhlu  $\theta_s$  v rovině  $\phi_s = 0$

## 6.1. Možné příčiny nepřesností

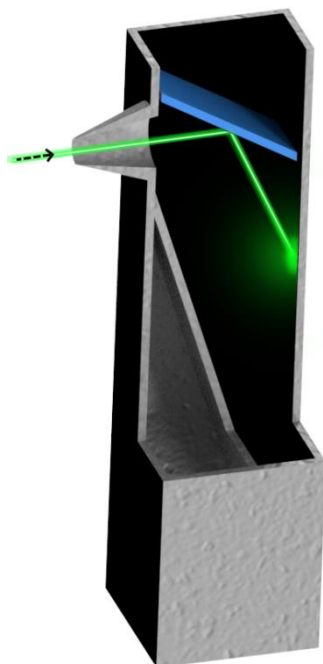
Po delší rozvaze byli identifikovány následující potenciální příčiny:

- Prašnost ve vzduchu
- rozptyl na optických komponentech
- nedostatečná citlivost detektoru
- šum v elektronice používané pro vyčítání detektoru

Prašnost vzduchu je vlastnost prostředí a je možné ji vyřešit nezávisle na přístroji jako takovém. Zbývající tři příčiny jsou už vlastností přístroje a pro odstranění jejich vlivu na výsledky měření je potřeba nového přístroje, který bude navrhován přímo za účelem měření rozptylu z povrchů tenkých vrstev a tím s dostatečnou citlivostí, přesností i dynamickým rozsahem.

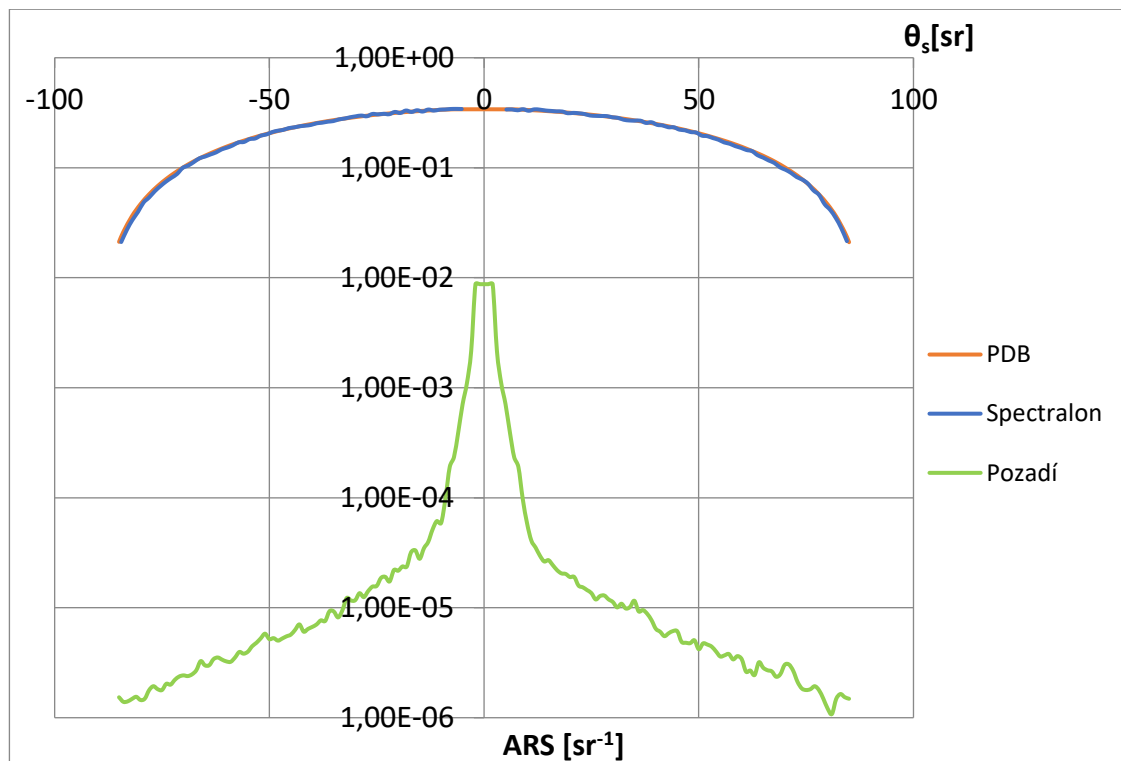
## 6.2. Prašnost ve vzduchu

Při práci se silnějšími lasery jde vidět rozptyl laserového světla na mikroskopických částicích prachu ve vzduchu i pouhým okem. Intenzita takto rozptýleného laserového světla závisí na velikosti a hustotě částic obsažených ve vzduchu a liší se tedy dle prostředí. V běžných podmínkách je o několik řádu nižší než intenzita laserového svazku. Pro určení, jak se může projevit při měření v přístroji SMII bylo provedeno měření pozadí. Přístroj je schopen měřit buď hemisféru před vzorkem nebo také hemisféru za vzorkem. Pro měření rozptylu na částicích ve vzduchu byl přístroj nastaven do polohy měření hemisféry za vzorkem. Nebyl do něj uložen žádný vzorek, laserový svazek tak jen procházel goniometrem. Do zadní části komory goniometru byl navržen a uložen beam damper. Zařízení, které laserový svazek odkloní způsobem, aby nedocházelo k rozptylu laserového světla o zadní stěnu komory s goniometrem a nemohlo se tedy stát, že detektor zachytí světlo rozptýlené o zadní část komory a mylně bude vyhodnoceno jako světlo rozptýlené na částicích ve vzduchu. Zařízení je znázorněno na obrázku 6.2.



Obrázek 6.2: Beam damper. Laserový paprsek přichází ve směru znázorněném černou šipkou. Kolem vstupního otvoru beam damperu je dutý kužel, tím paprsek projde směrem na zrcadlo. Světlo rozptýlené na částicích ve vzduchu do vyších úhlů (takových že už nesměřují do otvoru v kuželu) dopadají na vnější povrch kuželu pod úhlem okolo  $165^\circ$ . Intenzita světla která se při tomto úhlu může rozptýlit zpět k detektoru je tak malá, že ji detektor už nemůže zachytit. Od zrcadla se dále odrazí do vnitřních uzavřených prostor beam damperu. Konstrukce je navržena tak aby všechny dopady laserového svazku byly pod úhly přesahující  $90^\circ$ . Tím se snižuje množství světla, které se při dopadu rozptýlí od povrchu a směřuje ven z beam damperu, Všechny povrchy jsou potaženy černou absorpční látkou navrženou pro práci s laserovým světlem.

Detektor tedy mohl zachytit jen světlo laserového svazku anebo světlo rozptýlené na prachových částicích ve vzduchu, případně jiných součástech přístroje. Výsledek měření je znázorněn na obrázku 6.3.



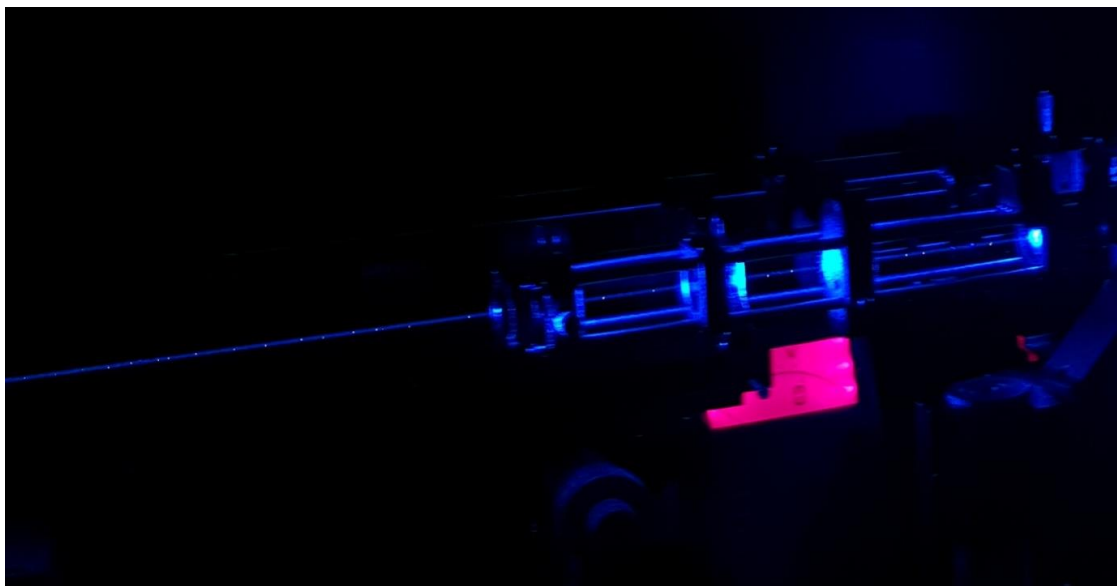
Obrázek 6.3: Výsledek měření vlivu rozptylu laserového svazku na prachových částicích ve vzduchu a komponentech přístroje. Závislost ARS na úhlu  $\theta_s$  v rovině  $\phi_s = 0$

Výsledek měření není uspokojivý pro měření rozptylu světla z povrchů tenkých vrstev. Prvním krokem úpravy přístroje byla instalace vzduchového systému skládajícího se ze sady filtrů, potrubního ventilátoru a dvou přívodů odprašněného vzduchu, pro každou komoru přístroje jeden. Instalace je znázorněna na obrázku číslo 6.4.

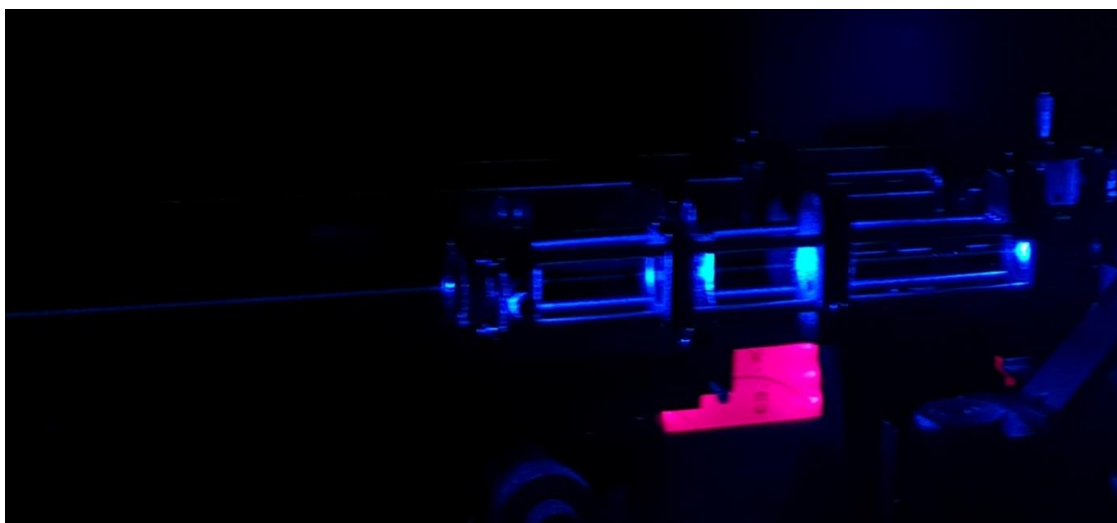


Obrázek 6.4: Instalace vzduchového systému pro čištění vzduchu od mikročástic prachu. Systém je na horní části přístroje.

Byl proveden porovnávací snímek z komory přístroje, zda vzduchotechnika potenciálně snižuje prašnost v přístroji. Na dalším obrázku č. 6.5 je snímek před instalací a na obrázku č. 6.6 po instalaci. V obou případech byl snímek pořízen způsobem stejnou expozicí 0,5 sekundy v zavřené komoře. Po instalaci vzduchotechniky byl fotoaparát vložen do komory přístroje a samospoušť nastavena na 10 minut. Po vložení fotoaparátu se komora přístroje uzavřela a 10 minut čistila vzduch vzduchotechnika. Ta byla navržena tak, aby během minuty vyměnila celý objem vzduchu komory 5x.



Obrázek 6.5: Fotografie rozptylu laserového svazku na částicích prachu ve vzduchu bez vzduchotechniky



Obrázek 6.6: Fotografie rozptylu laserového svazku na částicích prachu ve vzduchu s instalovanou vzduchotechnikou

Při porovnání obrázků jde vidět, že nejhrubší nečistoty ze vzduchu byly odstraněny. Jemnější prach ale byl stále přítomen a laserový svazek se pořád rozptyloval na drobnějších prachových částicích ve vzduchu. Ověřovací měření bez vzorku (tzv. instrument signature) bylo bez výrazných změn oproti předchozímu znázorněném na obrázku 6.1. Je tedy potřeba komplexnějšího řešení odprašnění obou komor přístroje. To bude provedeno využitím lepšího filtračního systému a postavením bezprašné buňky okolo celého přístroje.

### 6.2.1. Návrh filtrace vzduchu

Filtrace vzduchu a filtrační materiály popisuje od roku 2017 norma ČSN ISO 16890.

Tato norma stanovuje rozdělení do tříd filtrace podle velikosti částic, které jsou jednotlivými třídami zachycovány. Jsou definovány 4 základní třídy s písmenným označením a každá tato třída má několik podmnožin které jsou číselně rozlišovány.

Aby byla filtrace efektivní a filtrační systém měl dostatečnou životnost, je zapotřebí jej sestavit z více filtrů. Pokud by byl použit pouze filtr na nejjemnější částice, byl by rychle zanesen (ucpán) hrubšími nečistotami ve vzduchu. V návrhu je tedy vhodné začít požadovaným stupněm čistoty prostor podle normy ISO 14644-1, podle něj zvolit třídu koncového filtru a podle něj zvolit třídu předřazených filtrů.

Norma ISO 14644-1 definuje 9 tříd čistoty prostor. Nejvyšší třída, tedy číslo 9, je třída čistoty běžného městského vzduchu. Ten obsahuje zhruba 35 000 000 částic do velikosti 0.5  $\mu\text{m}$  a zhruba 300 000 částic do velikosti 5  $\mu\text{m}$ . Rozdělení jednotlivých tříd je znázorněno na obrázku 6.7.

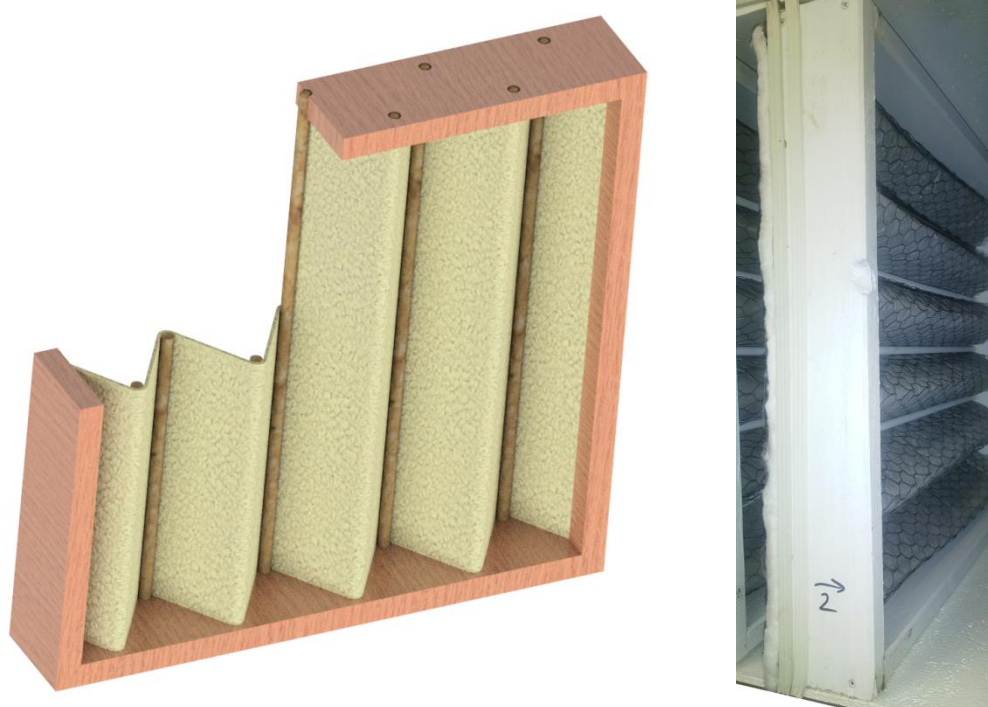
ISO klasifikace tříd čistoty	Maximální přípustné koncentrace (částice/m <sup>3</sup> ) pro částice o velikosti rovné a větší než velikosti uvedené níže					
	$\geq 0.1\mu\text{m}$	$\geq 0.2\mu\text{m}$	$\geq 0.3\mu\text{m}$	$\geq 0.5\mu\text{m}$	$\geq 1\mu\text{m}$	$\geq 5.0\mu\text{m}$
ISO třídy 1	10					
ISO třídy 2	100	24	10			
ISO třídy 3	1,000	237	102	35		
ISO třídy 4	10,000	2,370	1,020	352	83	
ISO třídy 5	100,000	23,700	10,200	3,520	832	
ISO třídy 6	1,000,000	237,000	102,000	35,200	8,320	293
ISO třídy 7				352,000	83,200	2,930
ISO třídy 8				3,520,000	832,000	29,300

Obrázek 6.1: přepis normy ISO 14644-1, převzato z [33]

Filtr použitý v řešení znázorněném na obrázku 6.4 filtroval 99% od velikosti 0.5  $\mu\text{m}$  a výše. Tedy odpovídal třídě 6. Tato třída nebyla dostatečná. Mířit na filtraci do třídy 1 není smysluplné. Pokud by filtrační systém byl sestaven s takto výkonných filtrů, aby prostory měli tuto třídu, vyžadovali by speciálního provozu jako například uzavřené obleky pro obsluhující personál, speciální pomůcky, dvojitá přetlaková přechodová komora a další. Takto udržované prostory jsou velice nákladné na provoz a z hlediska měření zbytečné. Z hlediska normy ISO 14644-1 byla vybrána třída číslo 4. V této třídě jsou všechny částice o velikosti 5  $\mu\text{m}$  ze vzduchu odstraněny. Počet částic ve velikosti

do  $0,5 \mu\text{m}$  je snížen o 5 řádů a počet částic menších než  $0,1 \mu\text{m}$  je snížen o 3 řády. Oproti třídě 6 která byla předchozím řešením tak úplně eliminuje větší částice a navíc významně snižuje počet nejmenších částic které původní filtr vůbec nefiltroval. Této třídě čistých prostor odpovídá podle normy ČSN ISO 16890 koncový filtr s označením H13. Zároveň z této normy můžeme odvodit i jednotlivé předřazené filtry (jak je znázorněno na obrázku 6.9), kdy předstupeň pro H13 je F9 a pro něj je předstupeň M5.

Filtr hepa H13 byl objednan od externího dodavatele jako celek. Pro dva předfiltry byla navržena dřevěná konstrukce znázorněná na obrázku 6.8 a objednan jen filtrační materiál, který byl do konstrukce vložen.



Obrázek 6.8: Vlevo model konstrukce dvou předfiltrů. Základní konstrukce je tvořena s lakovaného dřeva (nalakováno latexovou barvou do čistých prostor), do ní jsou vloženy lakované dřevěné tyče o průměru 10mm. mezi ně je uložen filtrační materiál. Vpravo je fotografie vyrobeného filtru. Jako opora pro filtrační materiál bylo doplněno jemné pletivo

Po výběru filtračních materiálů je možné pokračovat k výběru ventilátoru.

Skupina filtru	Třída filtrace	Vlastnosti na příkladu od-loučených látek	Doporučení pro použití vz-duchových filtrů
<b>F</b> Filtry pro jemný prach Účinné pro částice $\geq 1 \mu\text{m}$ <i>EN 779</i>	<b>M5</b>	Výtusy, cementový prach. Částice, které způsobují skvrny nebo usazování prachu.	Filtry venkovního vzduchu pro prostory s nejnižšími požadavky (např. dílenské haly, skladovací prostory, garáže). Předfiltry pro třídy filtrace F8 a F9
	<b>F8</b> <b>F9</b>	Tabákový kouř (hrubé frakce). Kouř kyslíčnicků kovů (hrubé frakce), olejový kouř, bakterie	Koncové filtry v klimatizačních zařízeních pro vyšší nároky, např. kanceláře, výrobní prostory, rozvodné centrály, laboratoře. Zařízení vnějšího vzduchu v nemocnicích. Centrály výpočetní techniky. Předfiltry pro třídy filtrace H13, H14. Předfiltry pro adsorpční filtry (např. filtry s aktivním uhlím). Předfiltry ve farmaceutickém průmyslu (dbát na certifikační předpisy). Předfiltry pro třídy filtrace E11 a E12
<b>H</b> Filtry pro mikročástice Účinné pro částice $\geq 0,01 \mu\text{m}$ <i>EN 1822</i>	<b>E12</b> <b>H13</b>	Olejový kouř ve stavu vzniku. Aerosol – mikročástice, radioaktivní aerosol, zbytky výparů z mořské soli.	Koncové filtry pro nemocnice s vyššími požadavky, avšak bez předpisu o zkoušce netěsností. Koncové filtry pro prostory v potravinářském, elektronickém, farmaceutickém průmyslu. Filtry odvodního vzduchu v zařízeních jaderné techniky. Koncové filtry pro „čisté prostory“ tříd $\geq$ ISO 5. Koncové filtry v civilních ochranných zařízeních.

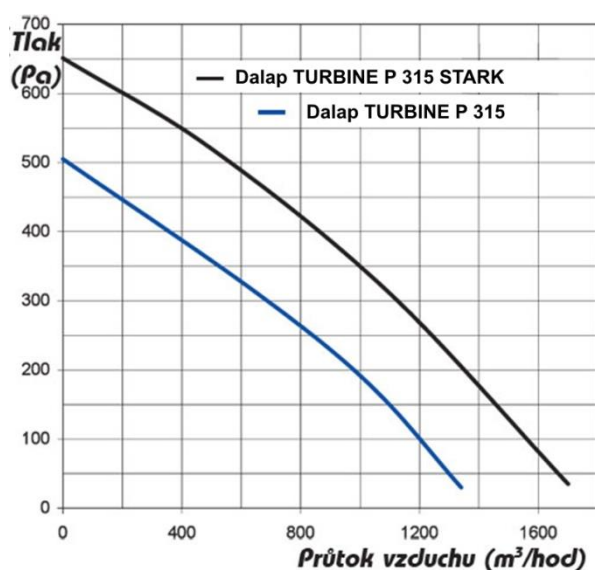
Obrázek 6.9: Výňatek z normy ČSN ISO 16890 popis jednotlivých tříd filtrace

Obecné doporučení je, aby se vzduch v místnosti nebo prostoru, který má být udržován čistým nebo bezprašným vyměnil v celém objemu 6 -12 x za minutu. Je tedy potřeba napočítat tlakové ztráty jednotlivých filtračních stupňů a výkon ventilátoru tak aby byla filtrace dostatečná. Byly zvoleny filtry, které mají podle výrobce parametry uvedené v tabulce Tabulka 6.1.

Tabulka 6.1: Tlakové ztráty jednotlivých filtrů. Počáteční tlaková ztráta je ztráta, kterou způsobuje čistý, nový filtr. Koncová tlaková ztráta je ztráta co způsobuje zanesený filtr na konci své životnosti.

Filtrační třída	Počáteční tlaková ztráta [Pa]	Koncová tlaková ztráta [Pa]
M5	40	100
F9	90	200
H13	160	350
Celkem	290	650

Celková tlaková ztráta se tedy bude pohybovat v rozmezí 290 až 650 Pa. Pro tlakovou zátěž v určeném rozsahu odpovídá radiální ventilátor s označením Dalap TURBINE P 315 STARK. Výrobce poskytuje charakteristiku průtoku vzduchu ventilátorem při zatížení tlakovými ztrátami, která je znázorněna na obrázku 6.10. Z této charakteristiky můžeme snadno určit kolik vzduchu systémem proteče.



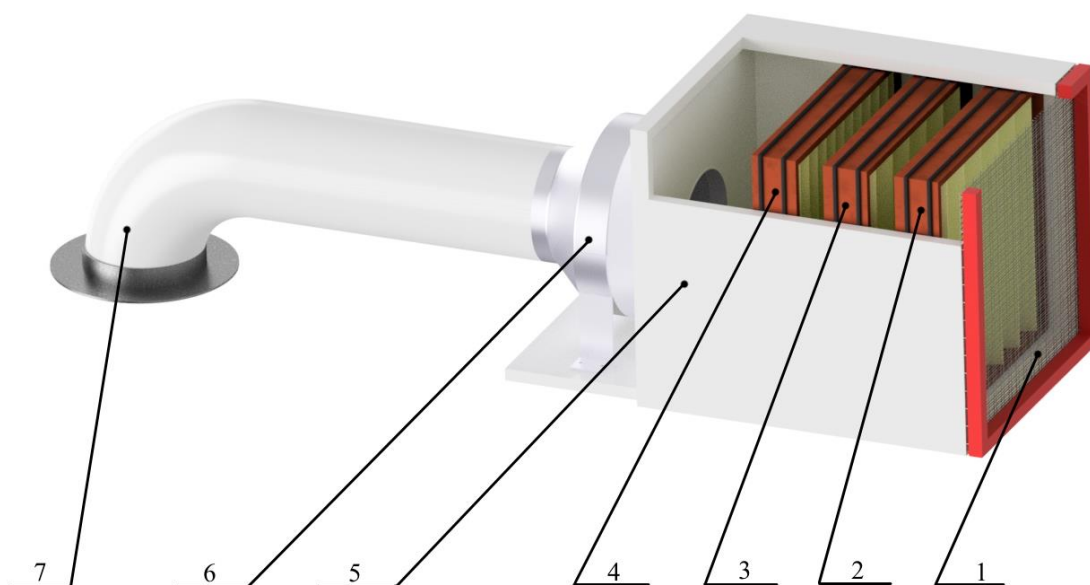
Obrázek 6.10: Charakteristiky ventilátoru Dalap TURBINE P 315 STARK z katalogu výrobce [34]

Z počátku, kdy jsou použity nové filtry jsou tlakové ztráty 290 Pa. Tomu odpovídá průtok zhruba 1100 m<sup>3</sup>. Na konci životnosti filtrů jsou celkové tlakové ztráty rovny 650 Pa a tomu odpovídá průtok 0 m<sup>3</sup>. Použití výkonnějšího ventilátoru by znamenalo přejít do vyšší třídy ventilátorů kde je razantní skok nejen ve výkonu a průtoku ale také v ceně. Navrženo je tedy ekonomičtější řešení, kdy budeme systém používat dokud tlakové ztráty nedosáhnou 600 Pa. V takovém případě se o jedná využití 92 % životnosti filtrů

a v této fázi má navržený systém průtok  $200 \text{ m}^3$ . Aby bezprašná buňka měla dostatek prostoru pro pohyb kolem přístroje a jeho potenciální úpravy měla by mít rozměry zhruba  $3,2 \text{ m} \times 2,6 \text{ m} \times 2,2 \text{ m}$ . Tedy objem zhruba  $17 \text{ m}^3$  což znamená že vzduch se v ní vymění 11,8 krát pro filtry ke konci životnosti a 70 krát pro nové filtry. Je vidět že pro nové filtry je výkon příliš velký. proto je ventilátor ještě opatřen regulátorem výkonu kterým lze jeho výkon plynule snížit. Díky tomu se zvedne životnost filtrů, která je dána průtokem vzduchu za jednotku času.

### 6.2.2. Filtrační jednotka

pro soustavu 3 filtrů a radiální ventilátor byla navržena a vyhotoveno uložení, aby tato sestava mohla být provozována jako celek. Konstrukční návrh je znázorněn na obrázku 6.11 a je vyhotoven z dřevěných desek natřenými bílou latexovou omyvatelnou barvou která je navržena pro použití do čistých prostor.



Obrázek 6.2: Filtrační jednotka. 1 ochranná síť, 2 filtr z materiálu M5, 3 filtr z materiálu F9, 4 hepa filtr H13, 5 box na uložení filtrů, 6 radiální ventilátor, 7 přívodní potrubí o průměru 200 mm.

### 6.2.3. Bezprašná buňka

Základní požadavky na konstrukci bezprašné buňky

#### 1. Rozložitelnost

V případě přemístění nebo stěhování přístroje je důležité, aby buňka šla jednoduše rozložit, přenést po částech a zase jednoduše složit.

#### 2. Prostornost

Přístroj se nachází a vývojové a experimentální fázi. Dochází k častým konstrukčním úpravám, případně implementaci nových konstrukčních částí sloužící pro měření nových druhů vzorků. Je tedy potřeba, aby kolem přístroje bylo dostatek prostoru nejen na měření, ale i na práci na úpravách.

### 3. Údržba

Buňka musí být navržena tak aby, byla snadno čistitelná případně omyvatelná. Povrchy materiálů by měly být takové, aby neuvolňovaly mikročástice nebo prach které by prostory znečišťovaly.

Konstrukci můžeme rozdělit na dvě hlavní části. První je nosná kostra, druhá je výplňový materiál.

#### Nosná kostra

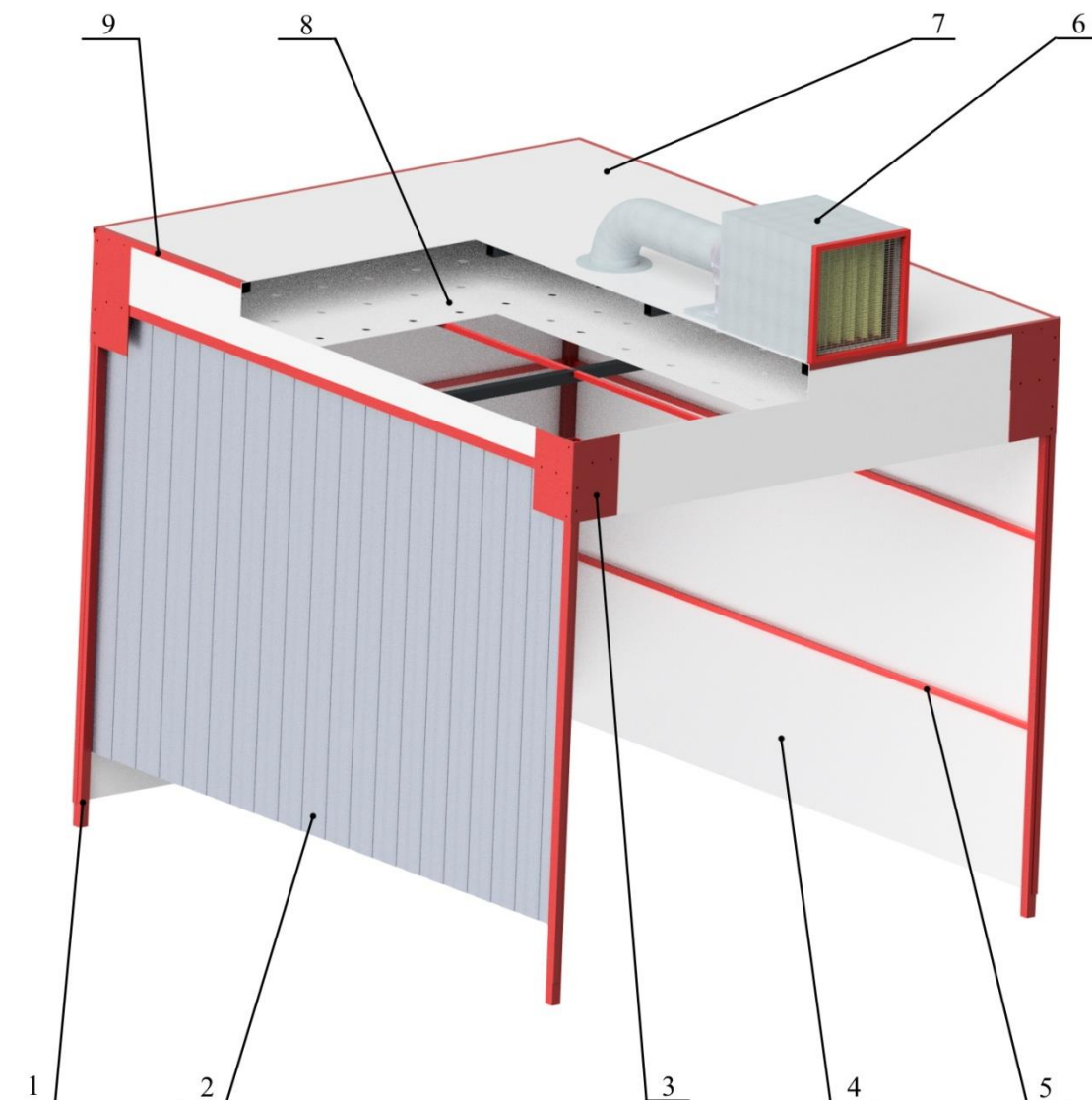
Nabízí se několik variant materiálů nebo polotovarů ze kterých je možné kostru zhotovit. Dřevěné trámy, kde mezi výhody patří lehkost a snadnost opracování, krácení polotovarů a práce s nimi. Nevýhodou je obtížnost navrhnout konstrukci tak, aby byla jednoduše skládatelná a rozkládatelná. Vruty, hřeby a kolíky si dají roztlouct a konstrukce takto smontovaná jde rozložit, při opakovaném skládání ale dochází rychle k opotřebení a následné nesložitelnosti. Tato varianta tedy není vhodná. Druhou variantou jsou hliníkové profily. Oproti ocelovým mají výhodu ve váze a o něco snadnější opracování. Nevýhoda je v ceně. Váha pro tento konkrétní případ nehraje roli. Bezprašná buňka nebude takové hmotnosti, aby přesáhla nosnost podlahy v budově, nebude se přenášet v celku. Rozdíl váhy jednotlivých samostatných profilů není velký. Ocelové profily jsou tedy ekonomičtější variantou, která bude trochu náročnější na obrábění. Jediné obráběcí úkony budou jen navrtání děr na šrouby a to je v případě tenkostěnných profilů snadný úkon. Na základě předchozích úvah byla jako materiál nosné konstrukce zvolena ocel. Konkrétně pak duté ocelové profily podle normy EN 10219 se čtvercovým průřezem rozměru 50x50 mm a tloušťky stěny 2 mm.

#### Výplňový materiál

I zde se nabízí několik možných variant jako jsou OSB desky, plech nebo sololitové desky. Plechové desky mají hlavní výhodu v pevnosti. Tu ale u výplňového materiálu vůbec nepožadujeme. Nevýhoda je pak komplikované opracování a nesnadné dělení při velkých rozměrech. Také vysoká cena v porovnání s ostatními možnostmi. Sololitové desky mají oproti OSB deskám v tomto případě jen výhody. Mají hladší a savější povrch,

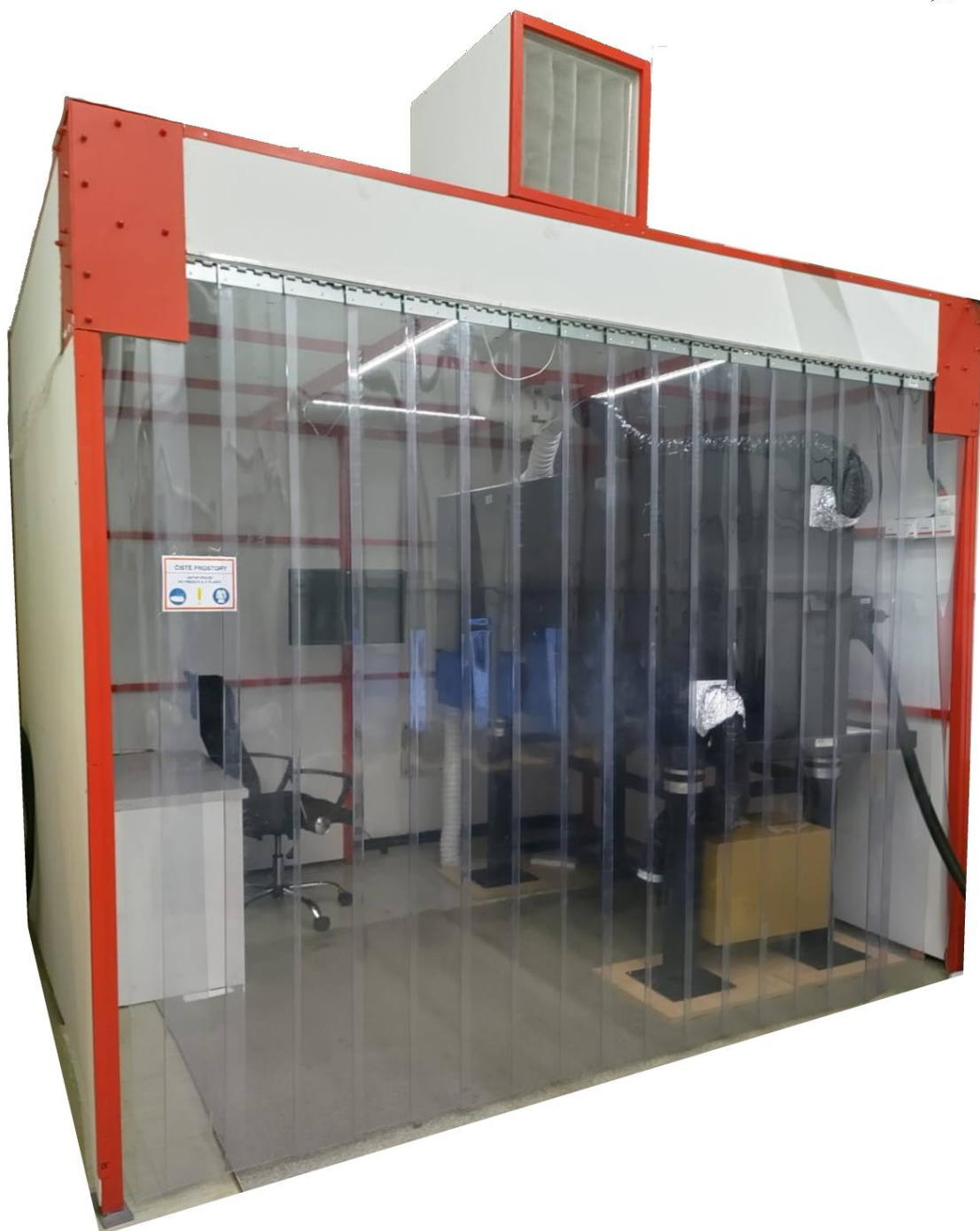
tedy je snadnější aplikace nátěru, který by byl v obou případech nutný. Jsou mnohem jednodušeji řezatelné na potřebné rozměry (do 3mm tloušťky je možné i nožem). Ve velkoformátových rozměrech mají značně menší hmotnosti. Cena těchto desek je také nižší. Pro výplňový materiál jsou tedy zvoleny sololitové desky.

Bezprašná buňka funguje na principu přetlaku a laminárního proudění v jejím pracovním prostoru. Pro splnění těchto požadavků bude mít dvoustupňový strop. Spodní strop je navrtán mnoha menšími dírami z důvodů rozložení proudění čistého vzduchu. Na vrchní stropní desku se umístí filtrační jednotka. Návrh celé konstrukce je znázorněn na obrázku 6.12. Vstup do buňky bude z širší strany a bude vyřešen pomocí závěsných PVC lamelových clon. Nosná konstrukce bude šroubovaná. V horních rozích se ocelové profily uchyť pomocí šroubů k ocelovým deskám. Každá z neprůchozích stran se doplní mezi hlavními nosnými profily dvojicí podpůrných profilů EN 10219 rozměru 25x25 mm a tloušťky stěny 1,5 mm. Tyto profily slouží jako výztuha a podpora pro sololitové stěny. Ty se následně připevní pomocí šroubů do předvrtaných děr. Všechny ocelové profily budou natřeny latexovou červenou barvou. Sololitové stěny budou natřeny bílou latexovou barvou. Obě barvy jsou vhodné do čistých prostor, mají antistatické vlastnosti proti usazování prachu a jsou omyvatelné vodou. Po připevnění sololitových stěn a stropních desek se rohy zakryjí ocelovými L profily EN10025 o rozměru 25x25 mm a tloušťce 2 mm. Profily budou opět natřeny červenou latexovou barvou vhodnou pro čisté prostory.



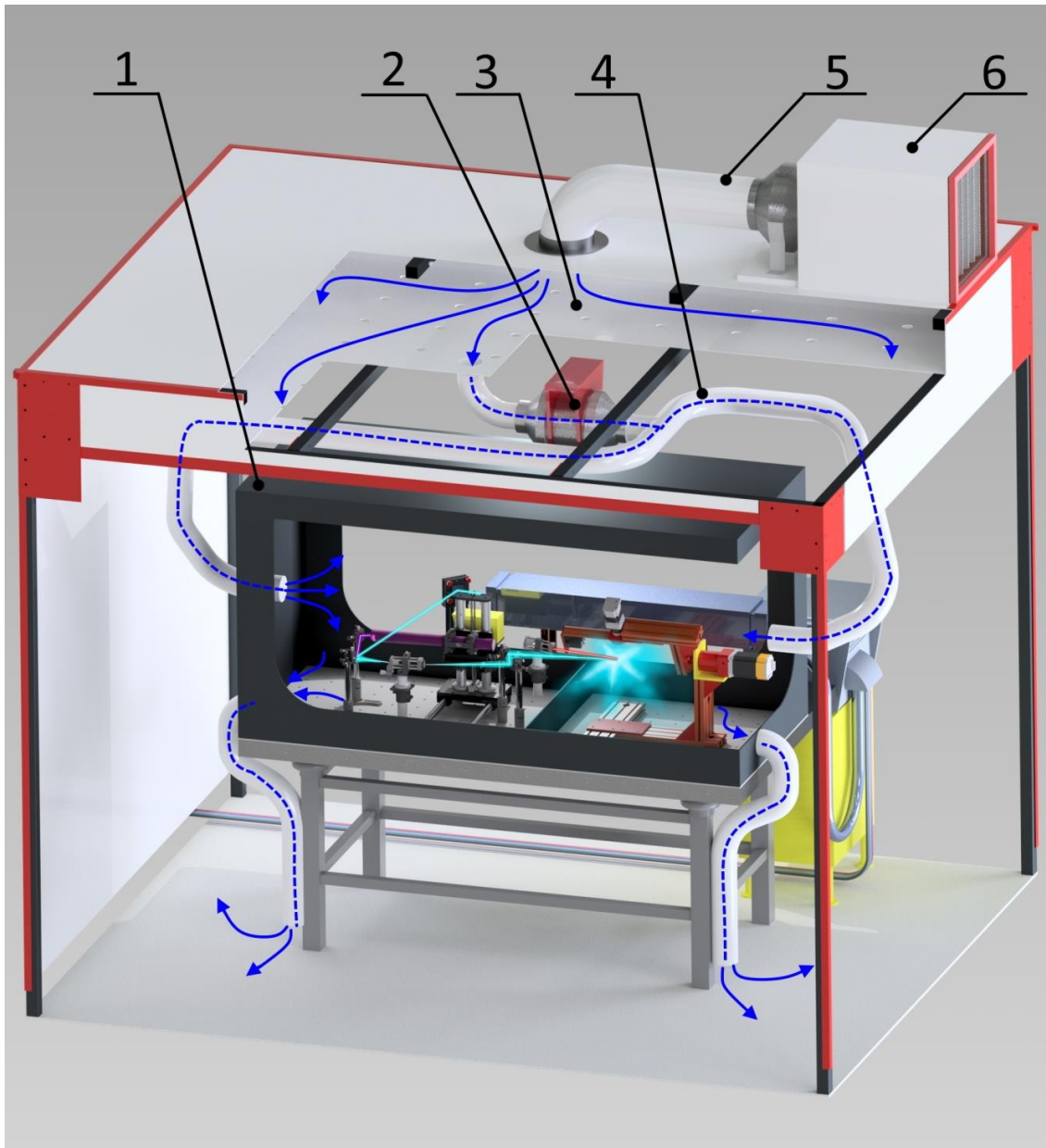
Obrázek 6.3: Model konstrukce bezprašné buňky. 1 ocelové profily podle normy EN 10219 se čtvercovým průřezem rozměru 50x50 mm a tloušťky stěny 2 mm, 2 čiré PVC lamelové clony, 3 ocelový plech S235 válcovaný za tepla, 4 sololitová deska tloušťky 3 mm, 5 podpůrné ocelové profily podle normy EN 10219 rozměru 25x25 mm a tloušťky stěny 1,5 mm, 6 filtrační jednotka, 7 vrchní deska dvoustupňového stropu, 8 spodní deska dvoustupňového stropu s otvory pro proudění čistého vzduchu, 9 ocelové L profily podle normy EN10025 o rozměru 25x25 mm tloušťce 2 mm

Bezprašná buňka byla podle kontrakčního návrhu sestavena v laboratoři koherentní optiky, jak lze vidět na obrázku 6.13 byla doplněna o elektrorozvody, led pásové osvětlení a ovládání filtrační jednotky. Všechny rozvody a hlavní systémy buňky i přístroje mají hlavní vypínače hned u vstupu do buňky.



Obrázek 6.13: Fotografie postavené bezprašné buňky s filtrační jednotkou v horní části.

Při experimentech se často vyměňují nejen vzorky ale také optické komponenty případně další části přístroje. Tím se vnáší různé prachové částice a další nečistoty přímo do boxu přístroje, které mohou ovlivnit přesnost měření i případně i způsobit poškození optických komponent v případě jejich následného čištění. Na obrázku 6.14 je znázorněno přidání pomocného ventilátoru a potrubí, které vhání čistý vzduch přímo do obou komor boxu přístroje. Dvojce odvodních potrubí pak směřuje vzduch z boxu k podlaze.



Obrázek 6.14: Počítačem vytvořené zobrazení bezprašné buňky kolem celého přístroje: 1 box s přístrojem, 2 ventilátor vhánějící čistý vzduch do boxu přístroje, 3 dvojitý strop buňky s otvory pro proudění vzduchu, 4 přívod čistého vzduchu do SMIII, 5 hlavní ventilátor a přívod čistého vzduchu do celé buňky, 6 hepa filtry, modré šipky znázorňují proudění vzduchu buňkou a přístrojem (čárkovaná znázorňuje proudění v potrubí)

Částice prachu, které se vnesou do vnitřní části boxu přístroje, budou proudícím čistým vzduchem vyneseny z boxu ven. Takto navržený systém bude zajišťovat dostatečně čisté prostředí pro měření i obsluhu celého přístroje.

## 7. NÁVRH NOVÉHO PŘÍSTROJE SM III

Pro zajištění měření pouze rozptýleného světla z měřených povrchů je třeba odstínit veškeré jiné elektromagnetické záření, které by mohlo na detektor dopadat. Jedná se nejen o okolní osvětlení laboratoře, ale i násobné odrazy které mohou vznikat od optických komponent nebo i konstrukčních prvků přístroje. Je tedy nutné, aby přístroj byl uložen ve stíněném boxu a zároveň, aby tento box byl rozdělen na dvě komory. Jedna, kde bude docházet k úpravě laserového svazku, druhá kde bude uložen vzorek a kde zároveň bude probíhat jeho měření.

### 7.1. Základní postup návrhu přístroje:

1. Výběr detektoru s dostatečnou citlivostí.
2. Návrh optické sestavy pro přípravu laserového svazku.
3. Konstrukční návrh celého přístroje.
4. Sestavení SM III v Laboratoři koherenční optiky ÚFI.
5. Prověření funkčnosti SM III pomocí etalonů (Spektralon) a známých vzorků (tj. proměřených jinými spolehlivými technikami kompatibilními s měřením ASR).
6. Stanovení nepřesností měření pomocí SM III.

Jako hlavní zdroj elektromagnetického záření je vhodný laser s vysokým výkonem a v ideálním případě schopný vyzařovat i více vlnových délek, avšak každou jednotlivě. Důležité je aby zdroj vyzařoval nepolarizované elektromagnetické záření. Tyto základní požadavky splňuje laser, který je současné době ve vybavení laboratoře koherentní optiky na ÚFI FSI VUT.

Jako zdroj tedy bude použit laser Coherent INNOVA 70C. Následující tabulka Tabulka 7.1 poskytuje přehled vlnových délek a příslušných výkonů.

Tabulka 7.1: Vlnové délky laseru INNOVA 70C. Tučným písmem jsou označeny vlnové délky, které jsou primárně plánovány na měření.

Vlnová délka [nm]	Výkon [mW]
Multiline bílá	2 500
752,5	30
<b>647,1</b>	<b>250</b>
568,2	150
530,9	130
520,8	130
<b>514,5</b>	<b>250</b>
488	250
<b>476,5</b>	<b>100</b>
457	30
<b>Multiline UV</b>	<b>500</b>

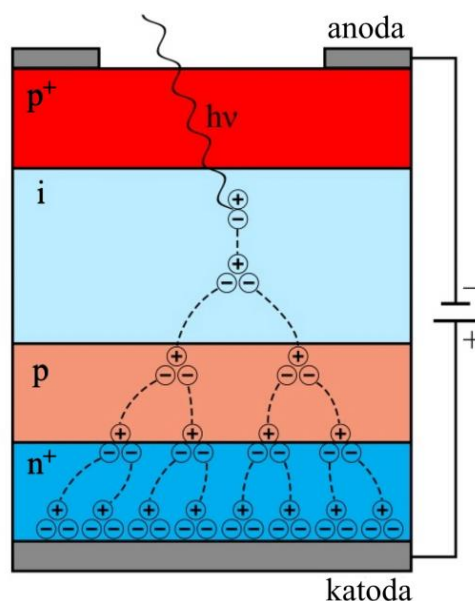
Tučně zvýrazněné vlnové délky byli vybrány na základě možnosti porovnání funkčnosti přístroje jinými kompatibilními technikami měření ARS, které jsou dostupné pro srovnání. Multiline UV není dostatečně monochromatické záření pro to, aby bylo možné uvažovat ARS za správně změřené. Nicméně tato možnost laseru je zajímavá z hlediska návrhu a testování přístroje pro principiální funkcionalitu i v UV oblasti a může dát ilustrativní výsledky.

## 8. DETEKTOR

Při výběru vhodného detekčního prvku pro přístroj mohou být vhodné dva základní typy detektorů: lavinové diody (APD) a fotonásobiče (PMT). Následující kapitola si klade za cíl komplexně analyzovat výhody a nevýhody obou detektorů, zahrnující aspekty jako jsou citlivost na světlo, odolnost, spektrální rozsah a signál-šum poměr (SNR).

### 8.1. Lavinové Diody (APD)

Lavinové diody jsou vysoce citlivá polovodičová zařízení, které přeměňují světlo na elektrický signál díky fotoelektrickému efektu. Mohou být považovány za fotodetektory poskytující interní zesílení prostřednictvím efektu lavinového násobení. Lavinové diody jsou citlivější než jiné polovodičové fotodetektory, což umožňuje jejich použití pro zachycení extrémně nízkých světelných výkonů. Hlavní rozdíl mezi lavinovou diodou a konvenční fotodiodou spočívá v interním zesílení signálu založeném na lavinovém násobení elektronů signálu. Pokud má vrstevnatá struktura konvenční fotodiody formu  $p^+-i-n^+$ , pak k APD je přidána  $p$ -vrstva ( $p^+-i-p-n^+$ ) jak je znázorněno na obrázku 8.1. Navíc je profil rozložení dopantů zvolen tak, aby  $p$ -vrstva měla největší odpor a tak vykazovala nejvyšší hodnotu intenzity elektrického pole. Když je  $i$ -vrstva vystavena světlu, tvoří se páry elektron – díra. V důsledku malého pole se nosiče pohybují směrem k odpovídajícím pólům (anoda nebo katoda). Když volné elektrony z  $i$ -vrstvy vstoupí do  $p$ -vrstvy, jejich zrychlení se stane výraznějším díky silnému elektrickému poli v  $p$ -vrstvě. Takové elektrony zrychlující se v  $p$ -vodivé vrstvě, akumulují energii dostatečnou k excitaci dalších elektronů z valenčního pásma do vodivé pásma. Tento proces se nazývá lavinové zesílení nebo násobení primárního fotoelektrického proudu.



Obrázek 8.1: Schéma vrstev v lavinové diodě (převzato s úpravami [35])

Jednou z nejvýznamnějších výhod APD je jejich velmi dobrý signál-šum poměr, který je klíčový pro aplikace vyžadující vysokou přesnost a citlivost. Díky internímu zesílení mohou APD efektivně detekovat fotony s nízkou energií, což z nich činí výkonný nástroj pro širokou škálu vědeckých experimentů.

Další významnou výhodou APD je jejich robustnost a odolnost vůči poškození způsobenému vysokou intenzitou světla. Na rozdíl od PMT, APD mohou být vystaveny poměrně silnému světlu bez rizika poškození, což výrazně zvyšuje jejich použitelnost v různých světelných podmínkách. Tato odolnost rovněž snižuje potřebu složitých ochranných opatření, což může vést k redukci nákladů a zjednodušení experimentálního uspořádání.

## 8.2. Fotonásobiče (PMT)

PMT jsou založeny na principu fotoelektrického efektu a následného zesílení pomocí sekundární emise elektronů na řetězci elektrod. Tyto detektory jsou vysoce citlivé a schopné detekovat jednotlivé fotony. Nicméně, jejich citlivost na vyšší intenzitu světla představuje významnou nevýhodu, jelikož mohou být snadno poškozeny při expozici intenzivnímu osvětlení. Tento faktor limituje jejich použití v aplikacích, kde není možné striktně kontrolovat světelné podmínky a intenzitu světla dopadajícího na detektor.

Dalším omezením PMT je jejich citlivost na teplotu a užší spektrální rozsah. Tyto charakteristiky mohou ovlivnit výkon a přesnost v aplikacích vyžadujících široké spektrální pokrytí nebo stabilní provozní podmínky v různých teplotách. Naproti tomu, APD mají tendenci být stabilnější s širším spektrálním rozsahem, což umožňuje jejich využití v širší škále vědeckých a technologických aplikací.

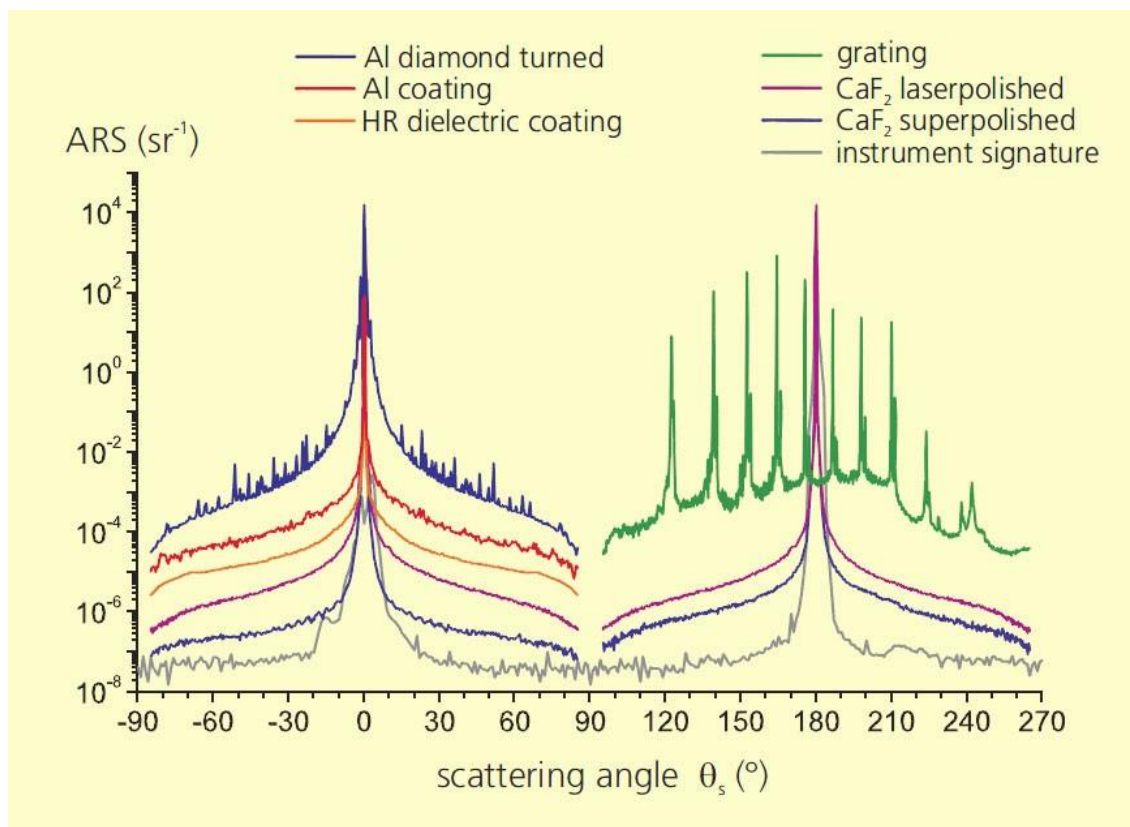
### 8.3. Hlavní požadavky na detektor

Přístroj slouží k experimentálnímu měření. Tenké vrstvy, které budou měřeny budou často v experimentální fázi vývoje, dopředu nemusí být znám jejich průběh ARS a nelze tedy očekávat, jaká intenzita v jakém úhlu bude naměřena. Je tedy potřeba detektor s velkým dynamickým rozsahem, který nejen měří velmi nízkou intenzitu elektromagnetického záření, ale dokáže také vydržet bez poškození i vyšší intenzitu elektromagnetického záření, které u některých vzorků může být vystaven. U fotonásobiče by mohlo dojít k poškození, nebo zničení vlivem větší intenzity. To by se dalo předcházet třeba způsobem, že každé měření v daném bodě by začínalo s ND filtrem, který by snížil intenzitu laseru o několik řádů, a postupně by se filtr měnil za více propustné. Každý bod by tak musel být měřen s několika filtry v několika krocích. Pro měření celé hemisféry by takové měření trvalo i několik dní. To je velmi nepraktické řešení. Oproti tomu lavinové diody mají větší odolnost proti poškození intenzitou světla. Kromě úhlů velmi blízkých úhlu geometrického odrazu paprsku, kde jsou intenzity v ARS vysoké, je odolnost lavinové diody dostatečně vysoká, aby nedošlo k jejímu poškození. Většina hemisféry se tedy může měřit bez postupného nastavování ND filtrů pro každý bod. Jedno měření hemisféry proběhne za významně kratší dobu. Z praktického hlediska je tedy lepší využít lavinovou diodu jako detektor.

### 8.4. Řešení

Při výběru detektoru je nutné nejdříve vycházet z rozsahu, který chceme měřit. Pro základní odhad v jakých řádech se hodnoty budou pohybovat vyjdeme z výkonu využitého zdroje a přibližného očekávaného výkonu rozptýleného povrchem tenkých vrstev. Nejnižší výkon dle vlnových délek podle tabulky Tabulka 7.1 je 100mW.

Pro odhad v jakých řádech můžeme očekávat rozptýlený výkon můžeme vyjít z grafu na obrázku 8.2.



Obrázek 8.2: ARS pro různé povrchy, měřeno v Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF [36]. Závislost ARS na úhlu  $\theta_s$  v rovině  $\phi_s = 0$ . Křivky s označením Al coating a HR dielectric coating ukazují v jakých řádech mohou být očekávány hodnoty ARS pro povrchy tenkých vrstev

Jde vidět, že rozptyl na tenkých vrstvách se pohybuje až v řádu  $10^{-6}$ . Pokud dáme tyto dvě informace do souvislosti, můžeme spočítat jaký výkon bude zhruba dopadat na plochu, která pak bude odpovídat jedné poloze měření detektoru.

Pro přístroj byl zvolen detektor od výrobce Thorlabs s označením APD410A2/M (obrázek 8.3). Je teplotně kompenzovaný a kombinuje vysokou citlivost lavinové fotodiody se speciálně navrženým ultra-nízkošumovým tranzistorovým zesilovačem. Rychlost detekce optických signálů je až do frekvence 10 MHz. Hranice poškození příliš velkou intenzitou světla je 1 mW, pro plánované využití víc než dostačující. Spektrální rozsah detektoru 200 - 1000 nm je ideální i pro potenciální rozšíření přístroje v oblasti UV vlnových délek.



Obrázek 8.3: Detektor s lavinovou diodou [37]

Konstrukce přístroje scatterometr SM3 lze rozdělit na dvě hlavní části.

1. Komora pro přípravu a přesné vydefinování laserového svazku.
2. Komora s detektorem pro měření rozptylu povrchu vzorků.

Při přípravě laserového svazku je potřeba použít různých optických komponent. Každý z těchto optických prvků vytváří rozptyl světla na svém povrchu a u transmisních prvků i ve svém objemu. Tenké vrstvy, na jejichž měření je přístroj navrhován, se často používají v optickém průmyslu, a jejich kvalita a rozptyl na površích tedy odpovídá optickým komponentům. Rozptyl na optických komponentech přístroje může snížit přesnost, případně až zcela zastínit měření vzorku. Tyto dvě komory by měli být odděleny a umožňovat průchod pouze vydefinovaného připraveného laserového svazku směřovaného na povrch vzorku a odstínit všechno parazitně vzniklé rozptýlené světlo.

## 9. KOMORA PRO PŘÍPRAVU LASEROVÉHO SVAZKU

Cílem je připravit konvergentní laserový svazek s ohniskem ležícím na sférické ploše, po které obíhá detektor. Střed sférické plochy je místem, kde je uložen vzorek. Laserový svazek má mít gausovské rozložení intenzity v průřezu. Povrchy tenkých vrstev mají velmi nízkou drsnost. S tím souvisí i velmi nízký výkon, který je těmito povrchy rozptýlen. Při návrhu optické sestavy pro přípravu laserového svazku je důležité, aby samotné optické prvky co nejméně snižovaly výkon laserového svazku při jeho úpravě, tedy aby co největší výkon dopadal na vzorek. Jakákoliv ztráta výkonu laserového svazku bude zároveň úbytkem v rozptýleném výkonu. Snadno se může stát že při snížení výkonu laserového svazku vyšším počtem optických komponent (žádný optický prvek nemá 100% účinnost a při své interakci s laserovým svazkem sníží výkon laserového svazku) bude rozptýlený výkon tak malý, že již nebude měřitelný. Neoptimálnější řešení je takové, které obsahuje co nejmenší počet optických prvků (případně ploch, které interagují s laserovým svazkem).

Metodika postupu konstrukčního řešení:

1. Volba druhu optických prvků, transmisní nebo reflektivní způsob.
2. Geometrické trasování a rozložení optických prvků.
3. Konstrukční uložení.

### 9.1. Volba optických komponentů

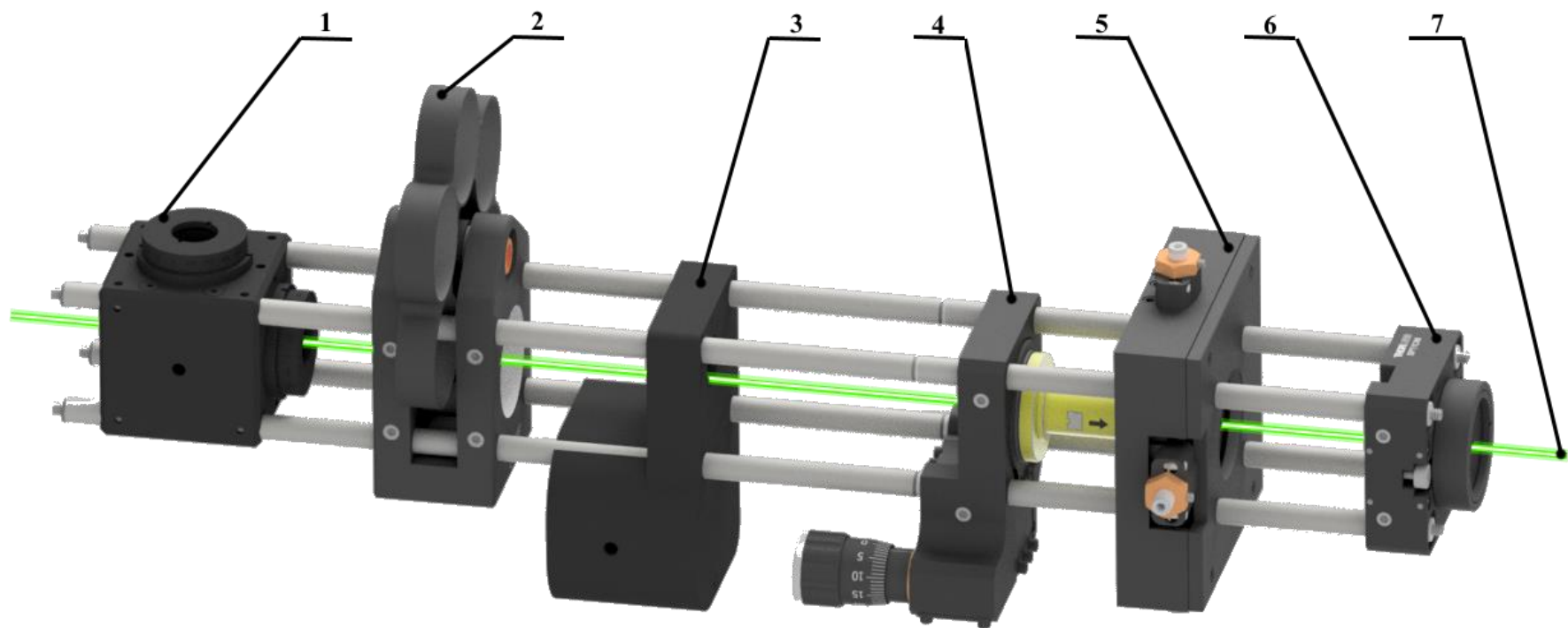
Pro přípravu laserového svazku se nabízí dva základní principy optických komponentů. Pro potřeby SMIII jsou to z reflexní kategorie zrcadla a z transmisní jsou to čočky a hranoly.

#### 9.1.1. Řešení pomocí transmisní optiky

Využití soustavy čoček má oproti zrcadlům hned několik výhod. První významnou výhodou je značně jednodušší uložení a justace. Soustavy čoček lze navrhnout tak, aby byly všechny ve stejné ose, takové řešení je z konstrukčního hlediska přijatelnější pro přené uložení komponent. Mnoho výrobců justačních systémů pro uložení optických prvků jako je Thorlabs nebo Edmund optics nabízí systémy pro jednoduché osové uložení

optických prvků. Stejně tak pro návrh případné sériově vyráběné varianty přístroje je uložení optických prvků v ose značně jednodušší na replikovatelnost a výrobu. Další velkou výhodou je rozměrově nižší náročnost. Komponenty jsou uloženy v ose za sebou a při jejich vhodném návrhu mohou být i poměrně blízko u sebe. Menší rozměry jsou pak velkou výhodou nejen při skladování ale i případném přemísťování přístroje. Poslední velkou výhodou je robustnost a tuhost osového uložení. Všechny komponenty mohou být připevněny k jedné kolejnici nebo nosnému profilu s vysokou tuhostí. V případě různých otřesů z prostředí, přepravě přístroje, nebo práci v přístroji samotném, je snížena pravděpodobnost, že dojde k rozhození uložení nebo k změně rozměrů mezi jednotlivými komponenty. Díky tomu se zvyšuje spolehlivost v replikovatelnosti jednotlivých měření a snižuje se náročnost na obsluhu při měření.

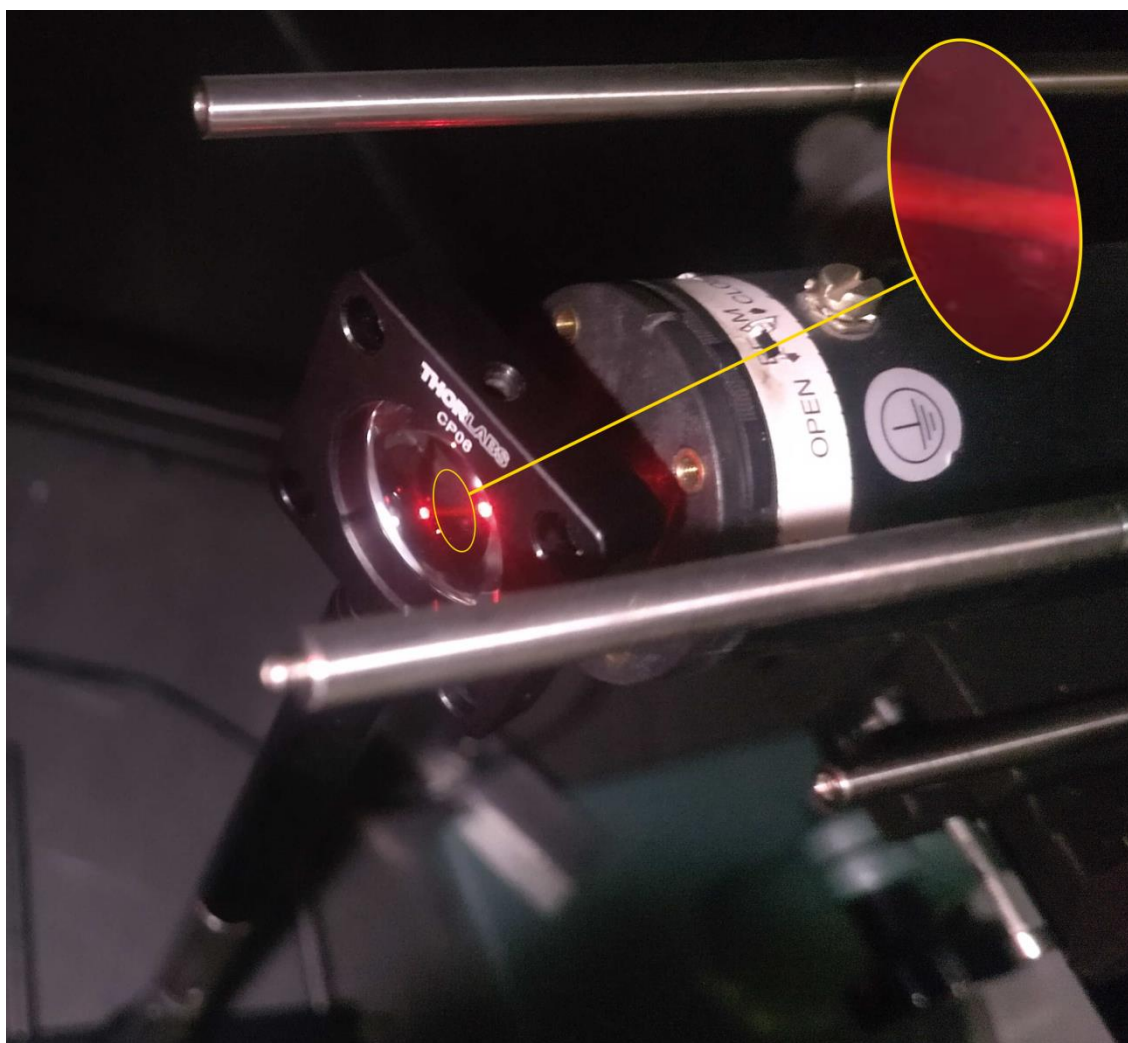
Možné konstrukční uspořádání je na znázorněno na obrázku 9.1 včetně trajektorie laserového svazku.



Obrázek 9.1: 3D model návrhu konstrukčního řešení za pomoci transmisní optiky: 1 uchycení beamsplitteru pro druhý kanál, 2 karusel pro uchycení šedých filtrů, 3 automatický shutter, 4 uchycení mikroskopového objektivu, 5 uchycení modové clony, 6 uchycení kolimátoru

Potenciální nevýhodou tohoto návrhu je větší počet optických rozhraní. Za každou použitou čočku jsou v trajektorii laserového svazku dvě rozhraní. První je vzduch/čočka, druhé čočka/vzduch, jak je vidět na obrázku 9.2. V případě použití mikroskopového objektivu pak do trajektorie vstupuje rozhraní více. Další nevýhodou je rozptyl vznikající v objemu materiálu. I přes využití vysoce kvalitních a čistých optických skel se rozptyl v nich může blížit právě těm hodnotám, které chceme měřit.

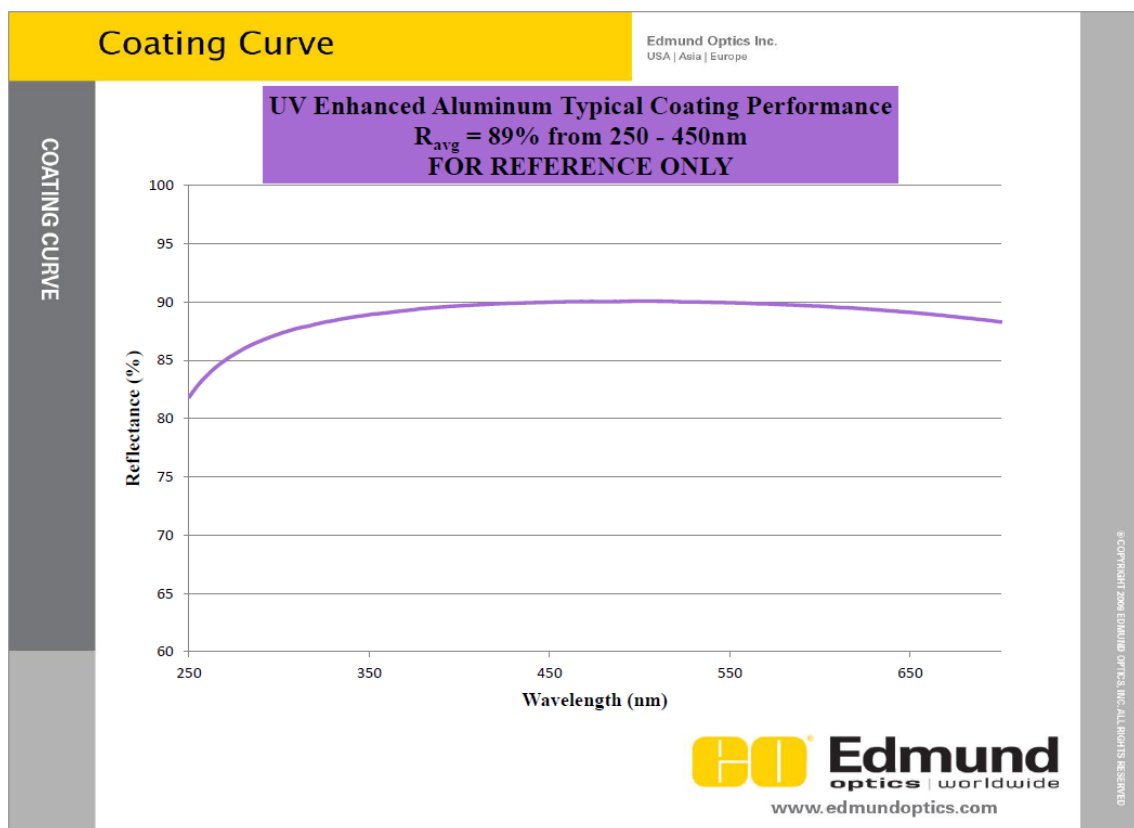
Významnou nevýhodou osového uspořádání je, že všechny rozptyly na komponentech, nebo případné světelné nečistoty, které do systému vstoupí, už jim pokračují dále a není možné je odstínit.



Obrázek 9.2: rozptyl na rozhraních čočky s detailem na rozptyl v objemu materiálu čočky. Výrobce udává použití antireflexních vrstev na obou rozhraních pro vlnovou délku 400 - 700 nm. Pro demonstraci byl použit He-Ne laser Lasos - LGK 7653-8 s vlnovou délkou 632,8 nm a výkonem 10 mW.

### 9.1.2. Řešení pomocí reflexní optiky

Využití zrcadel má výhodu v menším počtu rozhraní v trase laserového svazku. Zrcadla se také dají zakoupit v superleštěných variantách, které minimalizují nežádoucí rozptyl světla na jejich površích. Další značnou výhodou je spektrální nezávislost ohniskové vzdálenosti u používaných vlnových délek spektra a jen malý rozdíl v celkové odrazivosti, jak lze vidět na obrázku 9.3.

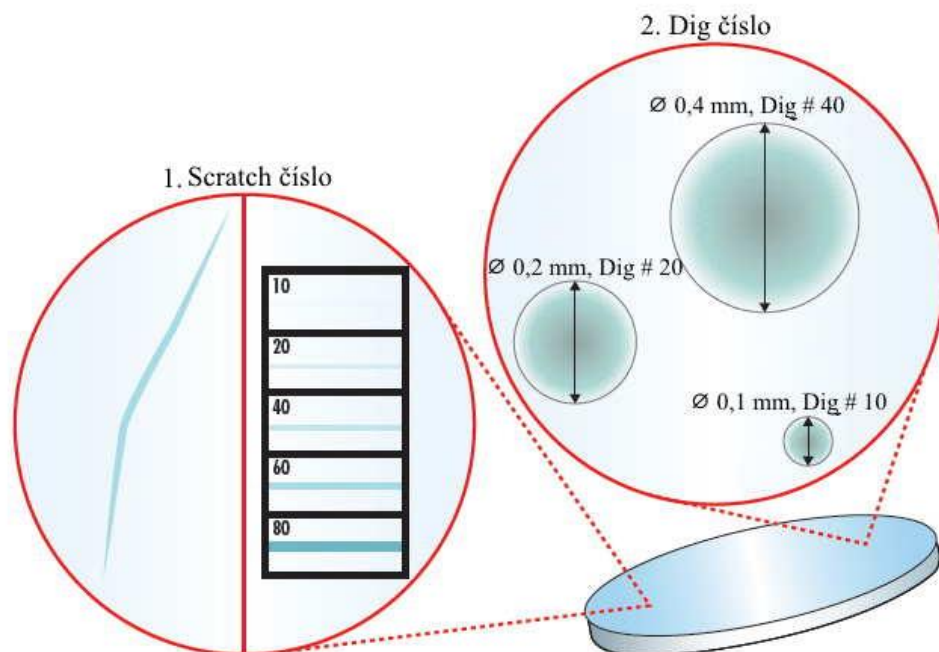


Obrázek 9.3: Spektrální závislost odrazivosti leštěných hliníkových zrcadel s vrstvou pro zvýšení odrazivosti v oblasti UV [38].

Díky tomu je možné zrcadla nastavit do jedné polohy a napevno zafixovat. Jejich vzájemná pozice je pak pro všechny vlnové délky stejná. Celý přístroj tedy stačí nastavit a seřídít jednou pro všechny vlnové délky na rozdíl od transmisní optiky, kde by bylo potřeba pro každou vlnovou délku znovu justovat optiku vlivem mírné změny ohniskových vzdáleností. Nevýhodou je však prostorově rozměrnější konstrukce. Náchylnost na nepřesnosti v justaci a nesouososti.

Většina výrobců kvalitních optických komponent využívá pro definování kvality povrchů optických zrcadel a čoček normu U.S. Standard MIL-PRF-13830B. Tato norma definuje kvalitu povrchu pomocí dvou parametrů s označením “scratch” a “dig”. Oba

tyto parametry mají číselné vyjádření. Následující odstavec bude věnován krátkému popisu těchto parametrů které jsou znázorněny i na obrázku 9.4



Obrázek 9.4: Znázornění dvou parametrů kvality povrchů podle normy MIL-PRF-13830B. převzato s úpravami z [39]

Scratch číslo je jedno z následujících čísel: 10, 20, 40, 60 nebo 80, kde jas poškrábání vzrůstá od 10 do 80. Toto číslo není přesné měření, pouze naznačuje nejlepší shodu jasu poškrábání komponentu s kalibrovaným standardem jasu poškrábání. Kontrola probíhá za stanovených podmínek temného pole osvětlení, ale kvůli subjektivní vizuální kontrole se výsledky mohou lišit od inspektora k inspektorovi.

Dig číslo je měřitelná veličina, průměr největšího poškrábání na komponentě, udávaný v jednotkách 1/100 milimetrů. Například komponent s průměrem 0,4 mm poškrábání je reprezentován číslem pro hloubku 40 a komponent s průměrem 0,2 mm je reprezentován číslem pro hloubku 20.

Jakmile jsou všechny rýhy a poškrábání vyhodnoceny, je třeba určit počet povolených vad. Tento počet se určuje následovně:

### Rýhy

Pokud je na optice přítomna největší povolená rýha, pak celková délka největších rýh nesmí překročit  $\frac{1}{4}$  průměru optiky. Pro nekruhové optiky by měl být použit průměr kruhu s plochou rovnající se ploše optiky.

## Poškrábání

Jsou prohlubně na povrchu optiky, bubliny nebo nečistoty. Počet takto definovaných poruch nesmí překročit dvakrát číslo pro poškrábání. Na každých 20 mm průměru by měla být pouze jedna dírka největší velikosti. Pokud jsou dvě dírky největší velikosti odděleny méně než 20 mm, část nesplňuje specifikaci. Kromě toho musí být všechny dírky s hodnotou specifikace 10 odděleny alespoň 1 mm. Dírky menší než 2,5  $\mu\text{m}$  v průměru by měly být ignorovány.

Pro příklad: Laserová optika s průměrem 100 mm a specifikovanou kvalitou povrchu 10-5, vycházející z výše uvedených omezení, může mít několik rýh s jasem 10, jejichž celková délka nepřesáhne 25 mm. Nesmí mít více než 5 poškrábání maximální velikosti o průměru 0,05 mm (5 Dig číslo) a součet průměrů všech poškrábání nesmí přesáhnout 0,5 mm.

Specifikace pro rýhy a poškrábání 40-20 jsou považovány za standardní kvalitu pro mnoho optických aplikací. Přesné laserové aplikace obvykle vyžadují specifikaci 20-10, zatímco nejnáročnější laserové aplikace, jako jsou optické komponenty laserů uvnitř dutiny, obvykle vyžadují specifikaci 10-5. Vzhledem k tomu, že vliv povrchových nedokonalostí závisí na vlnové délce, UV laserové aplikace často vyžadují kvalitu povrchu 10-5, i když by to bylo přespecifikované a zbytečně drahé použití optiky s kvalitou 10-5 s 10,6  $\mu\text{m}$  CO2 laserem. [39]

Vzhledem k zájmu o použití přístroje i v oblasti UV je nejlépe zvolit specifikaci kvality povrchu 10-5. Kvalita povrchu 10-5 zaručuje minimální množství rýh a poškrábání, což je klíčové pro udržení vysoké přesnosti a efektivity optického systému nejen v oblasti UV spektra. Snížení rozptylu na rozhraních optických komponentů je klíčovým faktorem pro dosažení optimálního fungování přístroje v celém spektru včetně UV oblasti.

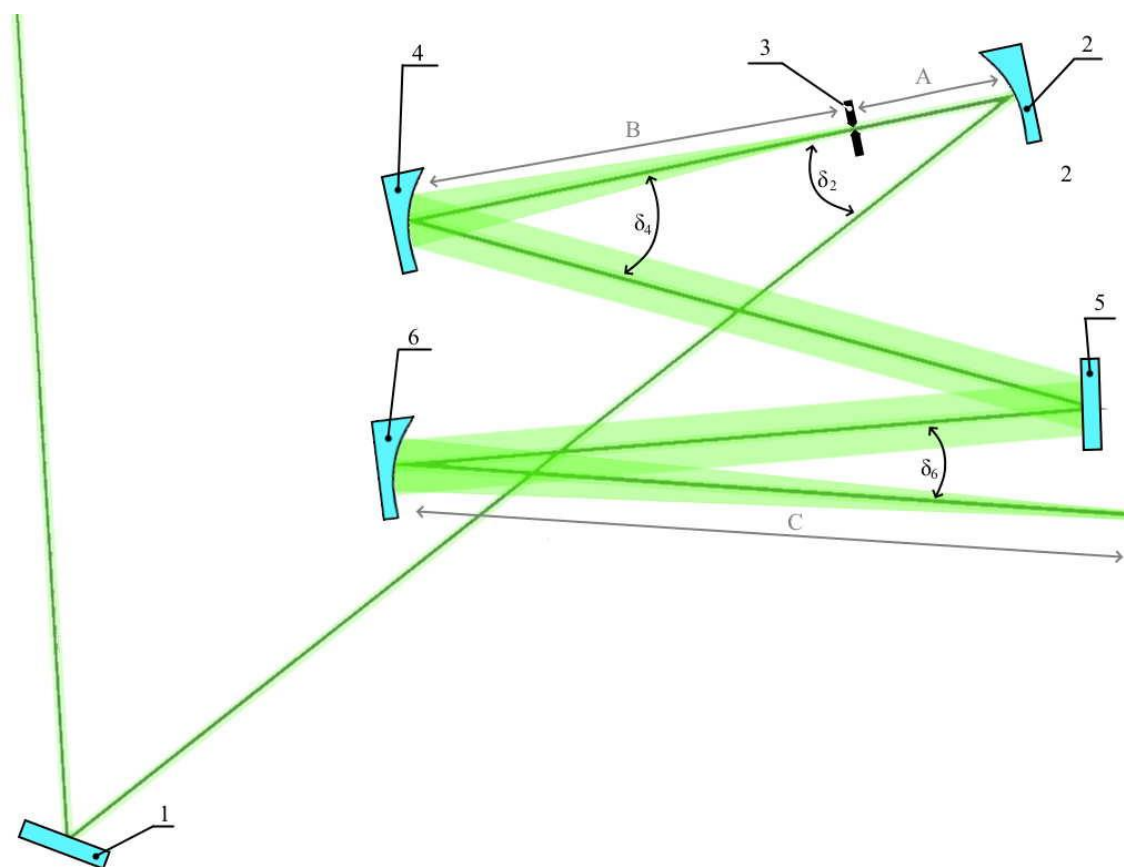
Cílem tedy bude navrhnout uspořádání s dostupných sériově vyráběných mimoosých parabolických zrcadel s parametrem povrchu 10-5. Dalším důležitým faktorem při návrhu je osvětlená plocha vzorku. Je vhodné, aby byla dostatečně velká a mohla být považována za reprezentativní pro celý povrch vzorku. Zároveň by neměla překračovat průměr 5 mm z důvodů, že potenciálně zkoumané vrstvy mohou být při vývoji nanášeny na rozměrově menší substráty z důvodů využití experimentálních depozičních komor, které jsou svou konstrukcí často menší než průmyslové.

Jako optické komponenty byly vybrány zrcadla od výrobce Edmund Optics která jsou detailněji popsány v Tabulka 9.1.

Tabulka 9.1: Popis zrcadel a jejich pozice na obrázku 9.5.

pozice	Typ zrcadla	úhel	Ohnisková vzdálenost [mm]	Průměr [mm]
1 a 5	Rovinné	-	-	25,4
2	Mimoosé parabolické	30°	54.4	25,4
4	Mimoosé parabolické	15°	387.6	25,4
6	Mimoosé parabolické	15°	646	25,4

Následné navržené uspořádání optických komponent je schématicky znázorněno na obrázku 9.5.

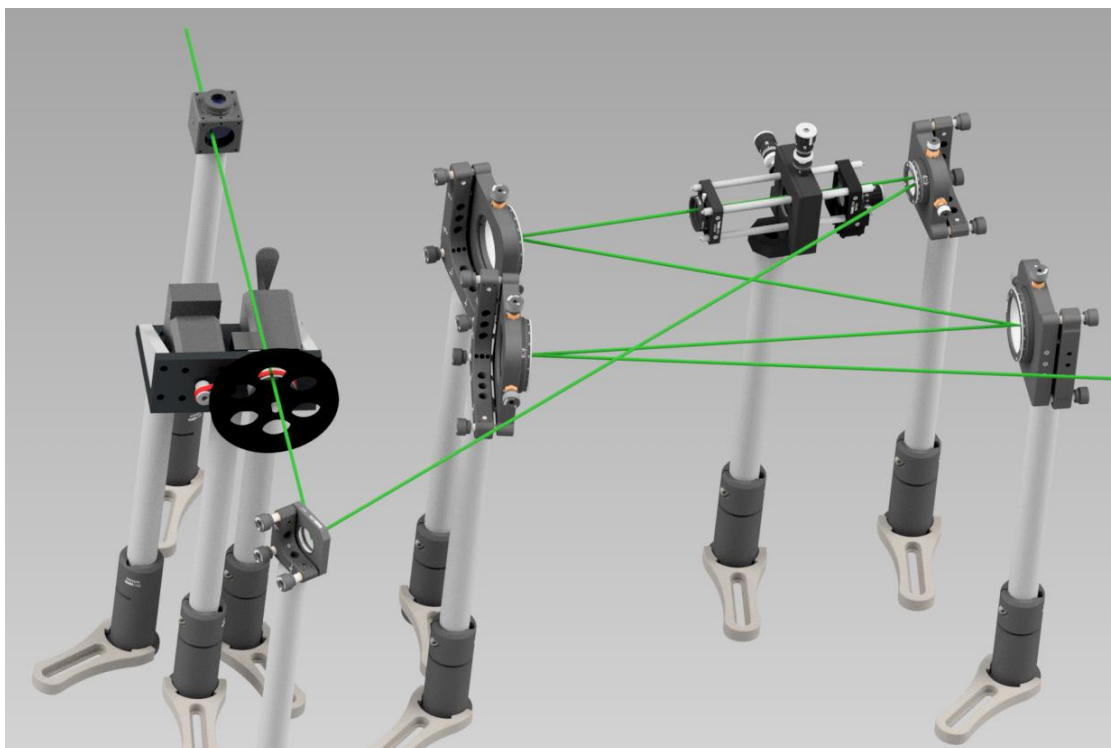


Obrázek 9.5: Schématické uspořádání optických komponent pro přípravu laserového svazku. 1 kolimační zrcadlo, 2 parabolické mimoosé zrcadlo, 3 módová clona, 4 parabolické mimoosé zrcadlo, 5 kolimační zrcadlo, 6 parabolické mimoosé zrcadlo. Úhel  $\delta_2$  je úhel dopadu laserového svazku na zrcadlo 2 a je roven 15°. Úhel  $\delta_4$  je úhel dopadu laserového svazku na zrcadlo 4 a je roven 30°. Úhel  $\delta_6$  je úhel dopadu laserového svazku na zrcadlo 6 a je roven 15°. Vzdálenost A je vzdálenost modové clony od zrcadla a je rovna 54,4 mm. Vzdálenost B je vzdálenost mezi modovou clonou a zrcadlem 4 a je rovna 387,6 mm. Vzdálenost C je vzdálenost mezi zrcadlem 6 a povrchem sféry po které se pohybuje detektor a je rovna 646 mm.

Poměr vzdáleností A a B udává průměr laserového svazku dopadajícího na zrcadlo 6. Poměr ohniskové vzdálenost zrcadla 6 a průměru sféry, po které se pohybuje detektor, pak udává o kolik se zmenší tento průměr v rovině dopadu na vzorek.

Využitý laser Innova spectrum 70C má podle katalogu výrobce v 1/e průměr laserového svazku 1,5 mm. Po propočtu poměrů vzdáleností vyjde v 1/e průměr osvětlené plochy na vzorku 2,7 mm. To je plocha splňující všechny předem stanovené požadavky.

Návrh konstrukčního uložení optiky 9.6

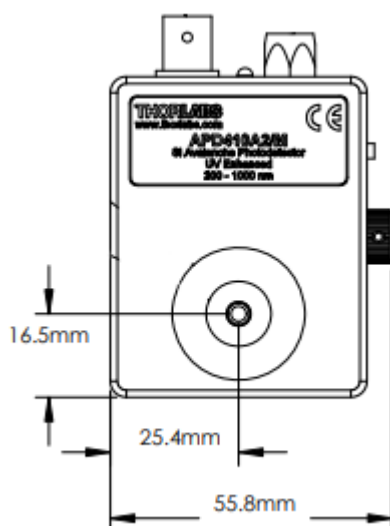


Obrázek 9.1: Konstrukční uložení optiky

## 10. KOMORA S DETEKTOREM A GONIOMETREM

### 10.1. Konstrukční řešení goniometru

Goniometr slouží k polohování detektoru. Pro měření je cílem, abychom měřili intenzitu světla rozptýlenou do jednotlivých prostorových úhlů. Detektor se tedy buď přímo pohybuje po hemisféře, nebo je potřeba konstrukce optického nadstavce, který světlo dopadající na elementární plochy hemisféry přivede na detektor. Varianta, kde se po hemisféře pohybuje přímo detektor, byla použita u předchozích verzí přístroje. Tato konstrukce má limity v pevně daném úhlovém rozlišení při měření. Zároveň rozměry detektoru, které jsou znázorněné na obrázku 10.1, neumožní měřit dostatečný rozsah úhlů blízkých úhlu odrazu. Detektor sám zastíní přicházející laserový svazek.

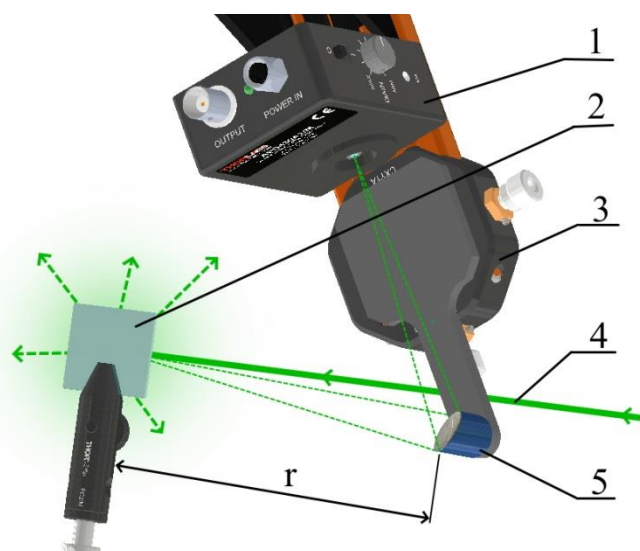


Obrázek 10.1: Rozměry detektoru (převzato z katalogu výrobce) [40]

Do konstrukce goniometru je tedy potřeba přidat vhodný optický nadstavec. Možné jsou dvě konstrukční řešení. První je založeno na zrcadle, které je umístěno na hemisféře, po které probíhá měření a odráží paprsky do detektoru. Druhé je založeno na optickém vlákně, do kterého je čočkou fokusováno světlo a přivedeno do detektoru.

#### 10.1.1. Zrcadlový optická nadstavec

Protože apertura detektoru je velmi malá, je potřeba využít parabolického zrcadla. Tím se světelné paprsky dopadající na plochu pomyslné hemisféry nasměrují do apertury detektoru. Před zrcadlo je možné vložit různě velké apertury a tím měnit úhlové rozlišení přístroje. Jednoduché schéma je znázorněno na obrázku 10.2.



Obrázek 10.2: schéma optického nadstavce se zrcadlem, 1 detektor, 2 vzorek (zobrazen zezadu), 3 posuvný justační prvek, 4 laserové světlo dopadající na vzorek, 5 pravoúhlé parabolické zrcadlo,  $r$  je poloměr hemisféry, na které probíhá měření.

Tato konstrukce má výhodu ve velkém spektrálním rozsahu. Pravoúhlá parabolická zrcadla se dají běžně sehnat pro rozsah vlnových délek stejných jaké má detektor. Při změně vlnové délky zdroje tedy není potřeba žádných kontrakčních úprav ani dodatečných kalibrací přístroje. Tato varianta byla volena jako první konstrukce. V praxi však musela být neustále justována. Apertura detektoru (aktivní měřicí plocha) má průměr jen 0,5 mm. Při provozu přístroje však není zajištěná dokonalá souosost či kolmost jednotlivých os rotací. I při velmi přesném seřízení celého goniometru a přicházejícího svazku není možné dodržení úhlů s přesností v řádech setin úhlového stupně.

Vzorek má být v přístroji uložen tak, že jeho měřená plocha je ve středu goniometru a je kolmý k přicházejícímu laserovému svazku. Protože střed goniometru je geometrický bod (ve smyslu že není reprezentován ničím hmotným) i při použití zaměřovacích laserů není možné vzorek uložit s přesností na setiny milimetru.

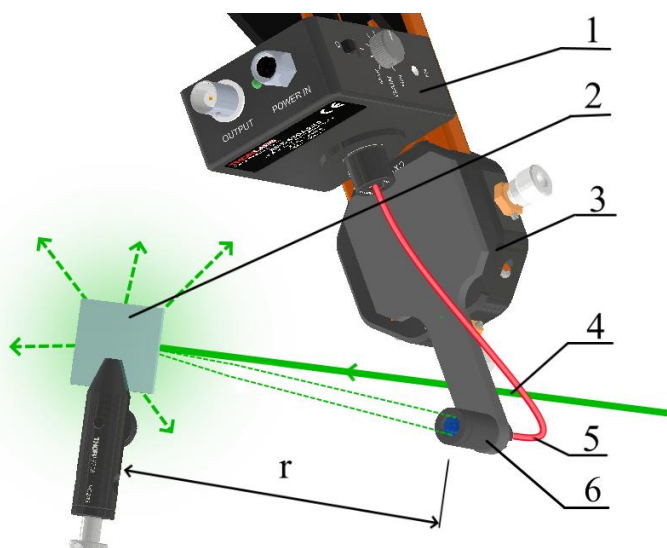
Pravoúhlé parabolické zrcadlo je optický prvek velmi citlivé na přesnost justace, převážně pak v ose ohniska a ose přicházejícího laserového svazku (tedy ose na které leží zobrazovaný objekt).

Zrcadlo je tedy možné seřídit tak aby perfektně fokusovalo všechny paprsky v jedné poloze. Při pohybu goniometru ale dojde k tomu, že místo vzorku ze kterého se světlo rozptyluje už neleží přesně na ose zrcadla, místo se zobrazí rovněž mírně mimo osu. Tím vzniká úbytek zaznamenané intenzity světla dopadajícího na aktivní plochu detektoru.

Při měření rozptylu z povrchů pevných těles byla tato změna zaznamenané intenzity nedetekovatelná. Byla příliš malá ve srovnání s velikostí měřené intenzity. Při měření tenkých vrstev, kde je rozptýlená intenzita v krajních úhlech  $\theta_s$  výrazně menší, se tato změna začala projevovat. Pro měření rozptylu z povrchů tenkých vrstev je tedy potřeba jiná konstrukce nadstavce.

### 10.1.2. Nadstavec s optickým vláknem

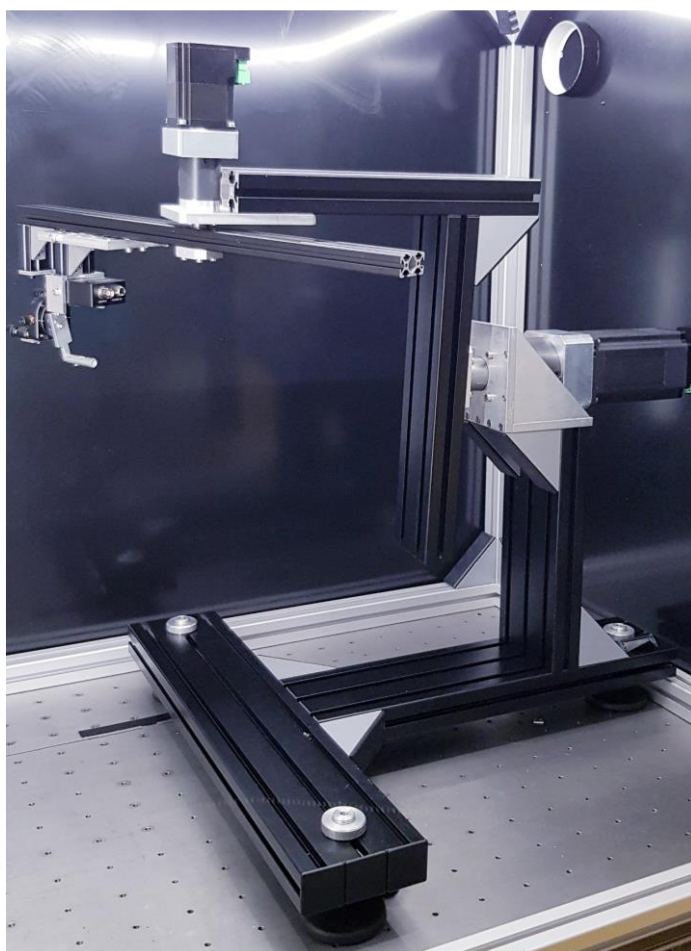
Nevýhodou tohoto nadstavce jeho užší spektrální závislost. Je potřeba dvou různých optických vláken pro UV oblast a pro oblast viditelného světla. Pro měření je tak potřeba při přechodu z UV oblasti na viditelnou optické vlákno vyměnit. Podstatnou a rozhodující výhodou tohoto uspořádání je, že není citlivé na vzájemné mikroskopické pohyby fokusačního prvku vůči měřenému vzorku, které vznikají při pohybu detektoru vlivem nedokonalostí v kolmosti os goniometru a uložení vzorku. Při pohybech goniometru se zakřivení optického vlákna nemění tak, aby způsobilo změnu "vodivosti" světla, která je detekovatelná při experimentálním měření. Kolimátor, který fokusuje světlo vycházející z optického vlákna, je pevně uchycen přímo na přírubu detektoru, jak je znázorněno na obrázku 10.3. Konstrukce se dá navrhnut tak, aby optické vlákno bylo vyměnitelné i bez pohybu s kolimátory. Nedá se měřit plynule přechod z UV oblasti do viditelné. Po výměně vlákna však není nutné pro přechod přístroj znovu kalibrovat nebo justovat v oblasti detektoru.



Obrázek 10.3: schéma optického nadstavce s optickým vláknem, 1 detektor, 2 vzorek (zobrazen zezadu), 3 posuvný justační prvek, 4 laserové světlo dopadající na vzorek, 5 optické vlákno, 6 kolimátor, r je poloměr hemisféry na které probíhá měření.

### 10.1.3. Goniometr a polohování detektoru

Základní konstrukce goniometru pro nové zařízení SM3 byla zpracována v diplomové práci [41], jak je znázorněno na obrázku 10.4. Konstrukce brala v úvahu nutnost přesného polohování detektoru i rychlost jeho polohování. Oba použité krokové elektromotory mají 2000 kroků na jednu otáčku (tedy jeden krok odpovídá úhlu  $0,18^\circ$ ). Přesnost ustavení na zadaném kroku je podle katalogu výrobce  $\pm 0,09^\circ$  [41]. K elektromotorům byli přidány planetové převodovky s převodovým poměrem 1:20. Přesnost polohy detektoru teoreticky dosahuje  $\pm 0,0045^\circ$ . Tato hodnota je určitě dostačující. Při konstrukci ale nebyla zohledněn tzv. backlash použitých převodovek. Backlash je způsoben nepatrnou vůlí mezi zuby jednotlivých ozubených kol v převodovce a vytváří i vůli v natočení výstupního hřídele převodovky. V navržené konstrukci se to následně projevuje i vůlí v natočení ramena a tedy i nepřesností pozice detektoru. V katalogu výrobce [41] je uveden backlash pro použité planetové převodovky s označením GPL40-2S-20-F56a. Pro obě je hodnota backlash stejná a to  $\pm 0,32^\circ$ . Nejčastějším krokem při měření je pozicováním detektoru po  $1^\circ$ . To znamená že jednotlivé pozice detektoru se mohou vzájemně překrývat až o  $0,64^\circ$  (pokud na předchozí pozici dojde k posunutí o + a v následující o -). To může vyvolat nepřesnost až 64% v pozicování detektoru což je pro měření jistě nepřijatelné.



Obrázek 10.4: Sestavená konstrukce goniometru navržená v diplomové práci [41].

Goniometr tedy musí být upraven, aby se tato vůle neprojevovala. Nejjednodušším řešením je goniometr dovybavit vymezením vůle v podobě předpětí. Ramena detektoru jsou vyvážená díky použití protizávaží. Samotná váha ramen tedy ve statické poloze nevytváří žádný krouticí moment v ose výstupního hřídele planetové převodovky. Krouticí moment je vyvoláván jen momentem setrvačnosti.

Při návrh velikosti předpětí je nutné nepřekročit celkový krouticí moment, kterým jsou zatěžovány elektromotory.

S analýzy v práci [41], která vycházela z úvahy, že úhlová dráha  $\varphi$ , resp. natočení, je dáno tímto vztahem

$$\varphi = \frac{1}{2} \varepsilon_u t^2 \quad (10.1)$$

kde  $\varepsilon_u$  je úhlové zrychlení a  $t$  je čas. Vyjádřením úhlového zrychlení z tohoto vztahu a dosazením do rovnice vyjadřující kroučící moment motoru  $M_k$  dostaneme vztah:

$$M_k = \varepsilon_u \times I_g \quad (10.2)$$

kde  $I_g$  je moment setrvačnosti k ose otáčení motoru. Během celého měření je měřeno celkem zhruba 30 000 různých pozicích detektoru. Aby celé měření bylo časově do jedné hodiny je čas potřebný k pootočení o jeden úhlový stupeň 0,12 s.

Hodnota momentu setrvačnosti  $I$  pro jednotlivá ramena byla získána pomocí modelu v programu Inventor. Po dosazení těchto hodnot byly vypočítány potřebné kroučící momenty menšího motoru na cca 24 Nm a většího motoru na cca 190 Nm [41].

Z rozdílu těchto potřebných kroučících momentů k pohonu goniometru a maximálních kroučících momentů, které elektromotory s převodovkami zvládnou vyvinout, je možné určit maximální kroučící moment pro předpětí. Pro zjištění maximálních kroučících momentů je možné využít tabulku Tabulka 10.1:

Tabulka 10.1: Parametry motorů a planetových převodovek [42]; [43].

motor	maximální $M_k$ motoru	Převodový poměr
PD4	1,87 Nm	20
PD6	9,93 Nm	20

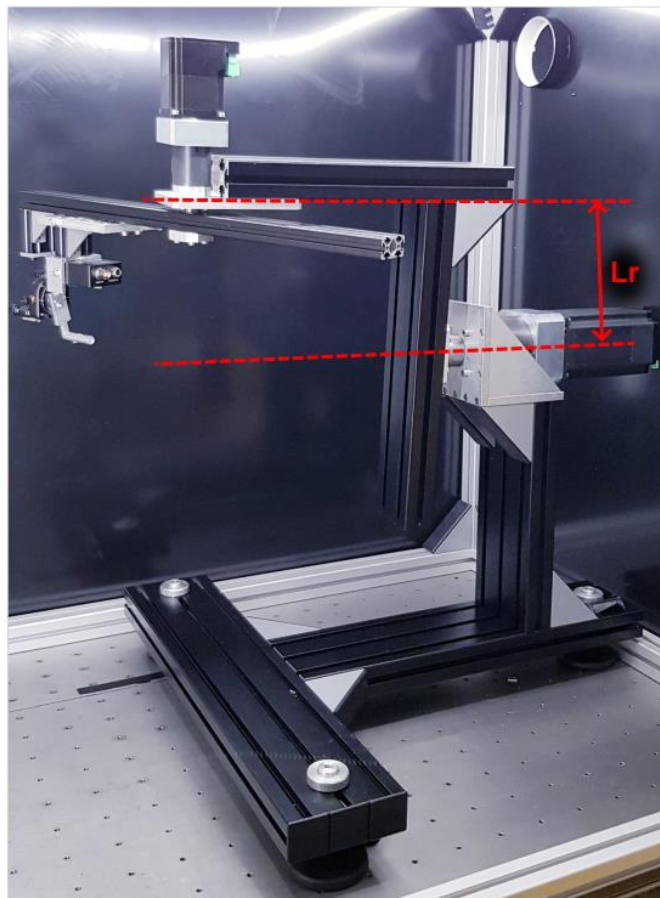
výpočtem dostaneme následující hodnoty:

Tabulka 10.2: určení hodnoty maximálního kroučícího momentu pro předpětí [42].

motor	PD4	PD6
maximální $M_k$ motoru s převodovkou	37 Nm	198 Nm
maximální $M_k$ převodovky	32 Nm	192 Nm
maximální $M_k$ pro předpětí	8 Nm	2 Nm

Jak je vidět v tabulce Tabulka 10.2 zátěž většího elektromotoru je velmi blízko jeho maximu. Je nutné tedy zátěž elektromotoru snížit a vytvořit tím větší prostor pro předpětí.

Jednoduchým řešením může být zkrácení ramena (zvýrazněno na obrázku 10.5) na kterém je uchycen druhý motor s převodovkou a detektorem.



Obrázek 10.5: délka ramena  $L_r$  ovlivňuje velikost momentu setrvačnosti  $I$ . Ten pak ovlivňuje velikost kroutícího momentu působícího na elektromotor při pohybu goniometru.

Tím dojde ke snížení momentu setrvačnosti a tedy i kroutícího momentu při pohybu. Výhodné v tomto případě je, že moment setrvačnosti je závislý na druhé mocnině vzdálenosti hmotnosti od osy. Tedy při zkrácení o 2 centimetry se moment setrvačnosti sníží na 80% původní hodnoty. Při úpravě modelu goniometru v programu Inventor bylo zkráceno rameno o 2 cm a znovu určen moment setrvačnosti. Následně bylo pomocí vztahů (10.2) přepočítán kroutící moment potřebný k pohonu, který nově vychází na 155 Nm. Po této konstrukční úpravě je rozdíl mezi kroutícím momentem potřebným k pohonu goniometru a maximálním kroutícím momentem, kterým může být elektromotor s převodovkou zatížen 37 Nm.

#### 10.1.4. Návrh předpětí pro převodovky

Výchozí hodnotou pro konstrukci systému na zatížení goniometru předpětím je maximální kroutící moment tohoto předpětí. Jsou dvě základní varianty, jak přepětí

dosáhnout. Buď torzní pružinou nebo tažnou pružinou opatřenou o mechanismus, který z tažné síly vytvoří kroučící moment. Tohoto převodu jde dosáhnout velmi snadno například namotáváním tažného lana na kladku či buben.

Původní konstrukce neobsahuje žádné úchyty pro aplikaci ani jednoho řešení. Torzní pružiny by se uchycovaly přímo mezi přírubu, co drží pohyblivé ramena, kde je velmi málo prostoru. Oproti tomu napínací lano se může namotávat přímo na přírubu a není nutno v této oblasti žádných konstrukčních úprav. Byl tedy navržen a nainstalován systém kladek, napínacích pružin a lan, které vytvářejí požadovaný kroučící moment předpětí. Konstrukce systému pro vytvoření předpětí je znázorněna na obrázku 10.6 pro menší motor PD4 a na obrázku 10.7 pro větší motor PD6. Pro stanovení správné tuhosti tažné pružiny můžeme vycházet z rovnic

$$F_p = k \times \Delta l \quad (10.3)$$

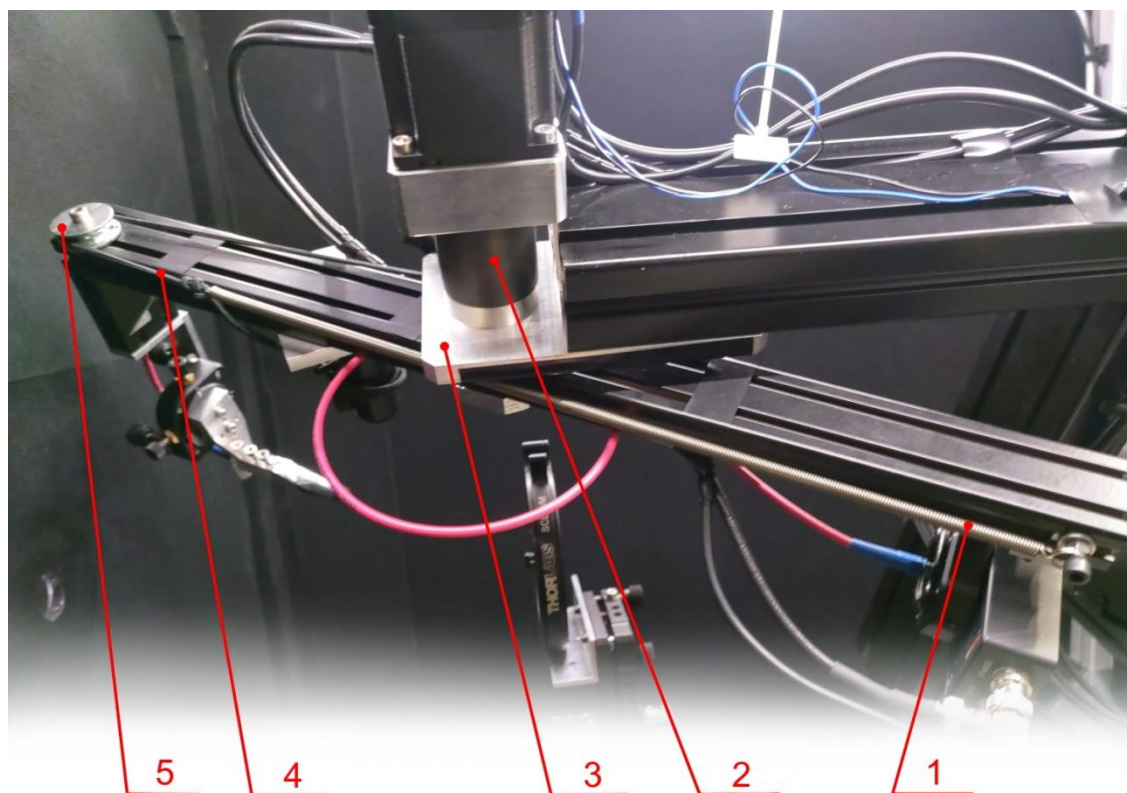
a

$$M_{kp} = F_p \times \frac{d_p}{2} \quad (10.4)$$

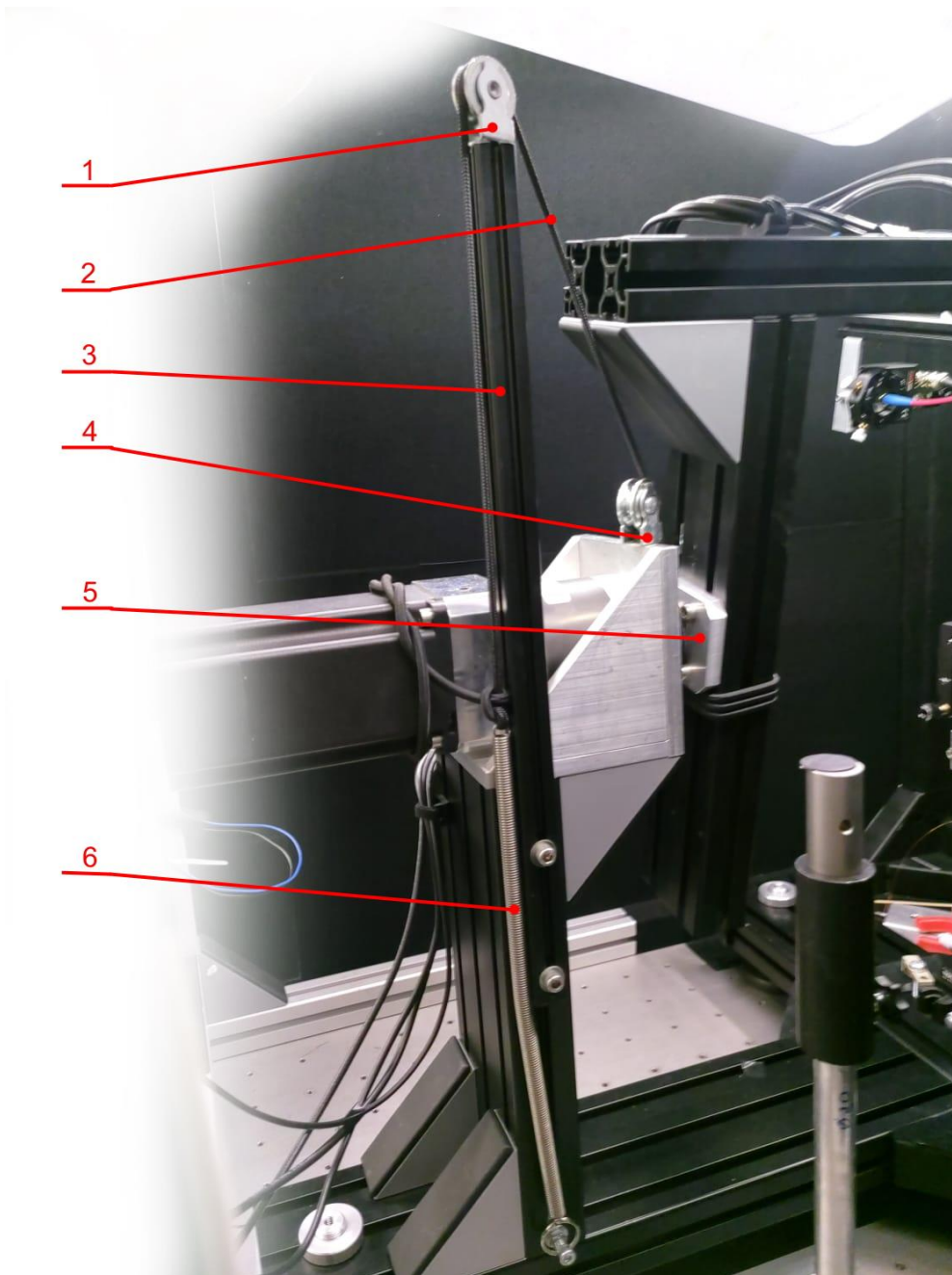
kde  $F_p$  je síla od pružiny která vyvolává předpětí,  $k$  je tuhost této pružiny,  $\Delta l$  je prodloužení této pružiny,  $M_{kp}$  je kroučící moment vyvolán touto pružinou a  $d_p$  průměr příruby na kterou se namotává tažné lano od této pružiny.

Funkčnost návrhu může být jednoduše ověřena pomocí tlakového testu. Pokud je rameno chyceno ruko na svém konci a je sním mírně pohnuto v rámci vůle planetové převodovky, po puštění by se mělo vrátit vždy do původní polohy a tuto vůli tak vymežit. Tento test byl aplikován ve více polohách obou ramen a vždy po puštění se obě ramena vždy vrátí do krajní polohy vymežované tažným lanem a pružinou. Zároveň při pohybu detektoru nedochází k žádnému prokluzu kroků motorů nebo zastavení, kdy by motory nedokázaly překonat kroučící moment setrvačných hmot a kroučící moment předpětí. Konstrukce tedy splňuje účel zvýšení přesnosti polohy detektoru a nepřináší žádné nové omezení z výjimkou zkrácení ramena polohujícího poledník o 2 cm. Toto zkrácení má za příčinu zmenšení prostoru, ve kterém se ukládá vzorek. Prostor je i tak dostatečný. Aby se vzorek do přístroje nevešel, musel by rozměrově přesahovat 260 mm. Pro tak velký vzorek by musel být kompletně předělán držák vzorků. Dříve, je tak v současné

podobě přístroje limitem ve velikosti vzorků držák vzorků, nikoliv úprava pro vytvoření předpětí.



Obrázek 10.6: fotografie ramena polohující azimut. Na fotografii je konstrukce pro vytvoření předpětí a odstranění vlivu vůle v planetové převodovce na polohu detektoru. 1 pružina vytvářející sílu předpětí, 2 převodovka 3, příruba na kterou je uchyceno zespolu tažné lano, 4 napínací lano, 5 kladka.



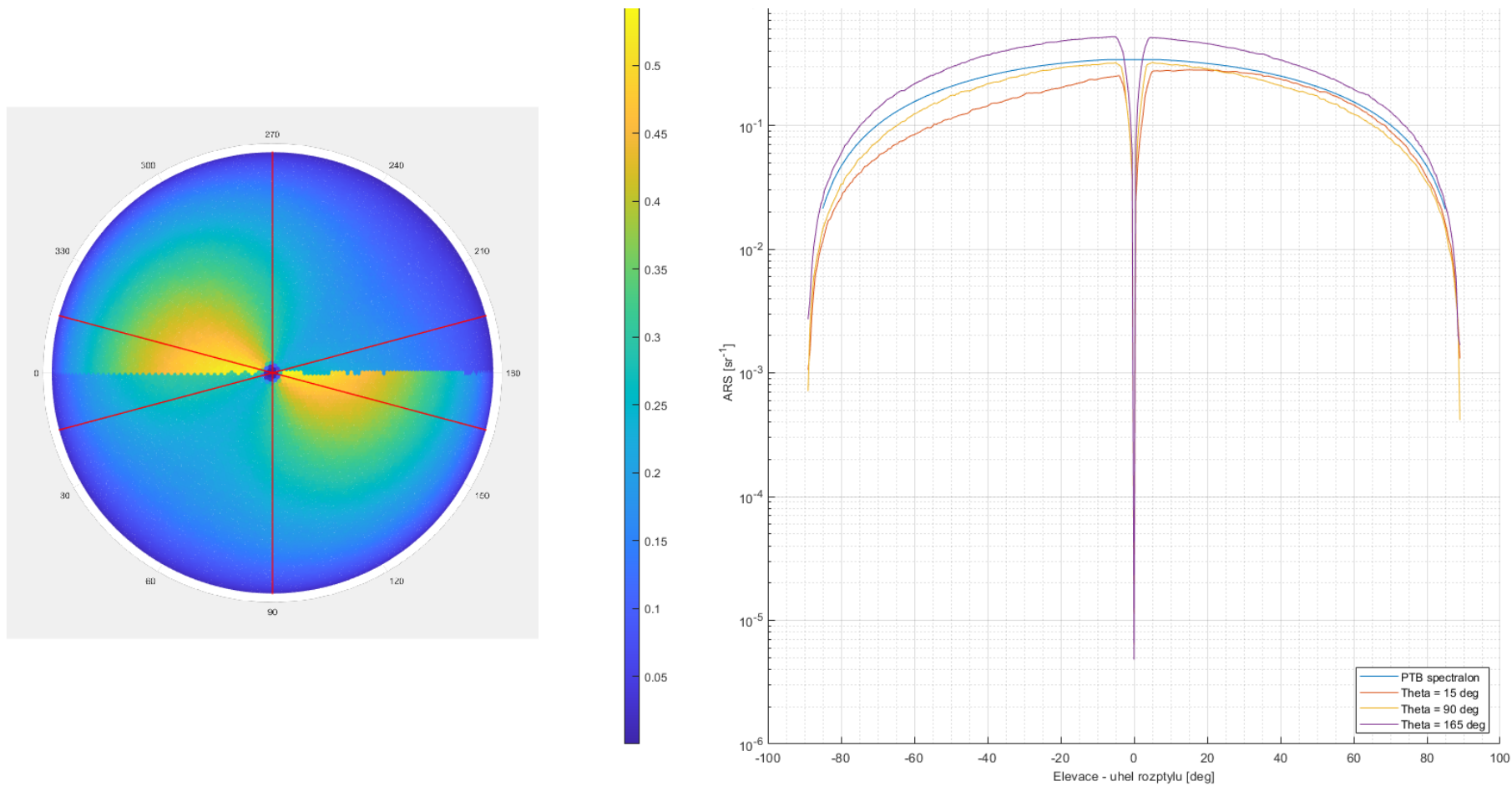
Obrázek 10.1: fotografie ramena polohující poledník. Na fotografii je konstrukce pro vytvoření předpětí a odstranění vlivu vůle v planetové převodovce na polohu detektoru. 1 kladka pro vytvoření delší dráhy lana a možnost více napnout pružinu, 2 napínací lano, 3 nosný profil kladky, 4 kladka směřující napínací lano k přírubě, 5 příruba na kterou se napínací lano namotává, 6 pružina vytvářející sílu předpětí.

## 11. ČASOVÁ STÁLOST PŘÍSTROJE SM III

Pro opakovatelnost měření a možnost prohlásit přístroj za spolehlivě měřící je potřeba, aby po spuštění a první kalibraci byly výsledky měření shodné jak na počátku, tak po několika hodinách. Měření celé hemisféry trvá zhruba 20 hodin. Na obrázku 11.1 je graficky znázorněna intenzita rozptýleného světla na měřené hemisféře. Je patrná ostrá linie, tedy významný rozdíl v intenzitě dvou sousedních směrů rozptylu. Vzhledem typologii povrchu vzorku by rozptyl neměl být závislí na úhlu  $\theta_s$ .

Zároveň je tato ostrá změna v místě, kdy končilo měření. Tedy je patrný významný rozdíl mezi hodnotami měřenými na začátku měření a hodnotami naměřenými o zhruba 20 hodin později ke konci měření. V průběhu měření žádný ostrý viditelný rozdíl mezi dvěma sousedními směry  $\theta_s$  není. Naopak je patrný pozvolný nárůst hodnot v jednotlivých po sobě s časem jsoucích měření ve směrech  $\theta_s$ .

Výrazná změna je způsobena časovou nestabilitou ve výkonu laseru, případně časovou nestálostí v citlivosti detektoru, případně kombinací těchto dvou aspektů. Při testování byly odhaleny příčiny, které jsou popsány v následující kapitole. Přístroj byl postupně upravován tak, aby se všechny příčiny odstranily a získal tak dostatečnou časovou stabilitu i pro časově dlouhé měření.

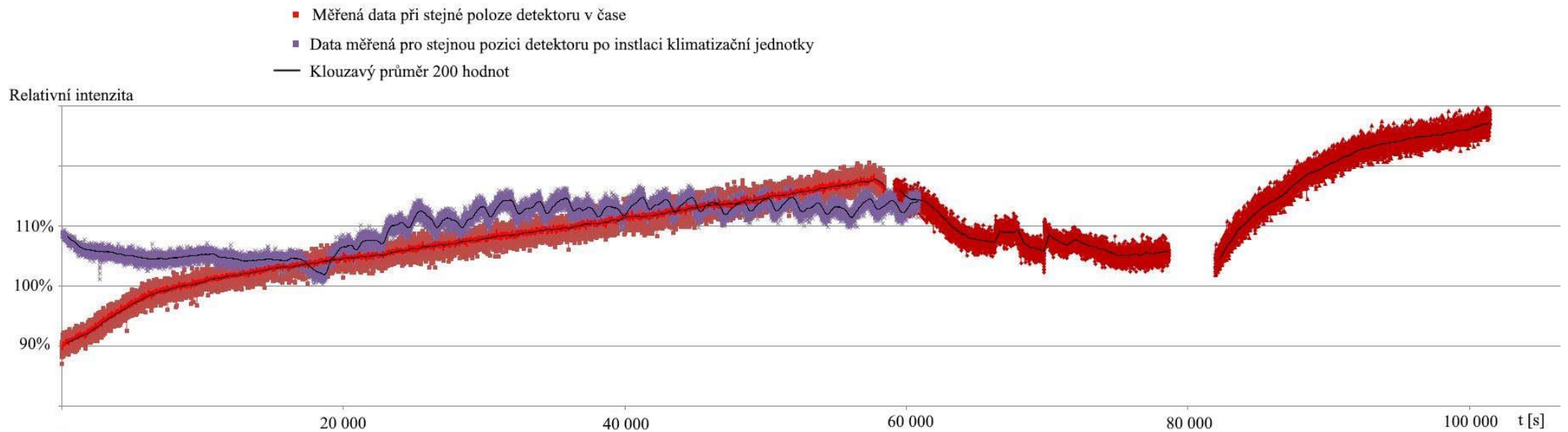


Obrázek 11.1: Měření ARS na hemisféře nad vzorkem Spectralon. V levé části mapa hemisféry s barevnou škálou hodnot ARS. V pravé části jsou řezy v různých úhlech poledníků  $\theta_s$ . Očekávané ARS vzorku Spectralon je izotropní ve směru úhlu  $\theta_s$ .

## 11.1. Fluktuace ve výkonu laseru

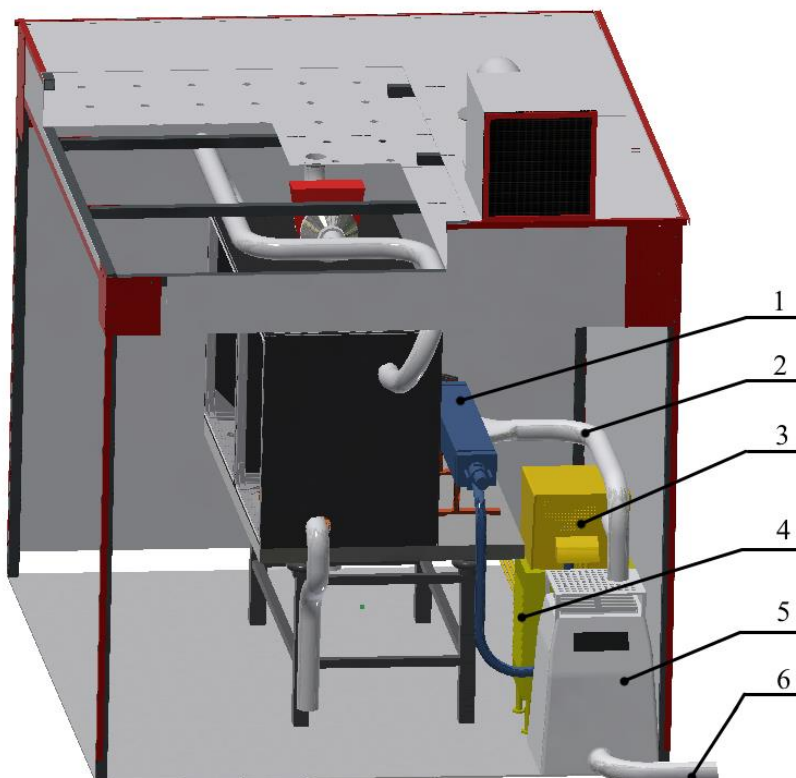
Použitý laser INOVA je chlazen vodou, požadovaný průtok přívodu vody je  $8 \text{ ls}^{-1}$ . Průtok v přívodu byl změřen na  $10 \text{ ls}^{-1}$ . Přívod chlazení byl napojen na potrubí v budově fakulty. V této části rozvodu vlivem zvýšeného odběru vody, zejména v dopoledních hodinách, docházelo během měření k poklesu tlaku natolik, že některých časových úsecích průtok klesl i na hranici  $8 \text{ ls}^{-1}$ . Pod touto hranicí bezpečnostní systém laseru laser automaticky vypne. Lehce nad hranicí  $8 \text{ ls}^{-1}$  laser zůstává v provozu, chladicí schopnosti jsou ale sníženy. S tím se laser zahřívá a dochází k fluktuacím výkonu. Problém byl odstraněn přepojením na dostatečně stabilní část rozvodu a přebudováním potrubí k laseru tak, aby mělo co nejmenší tlakové ztráty.

Další fluktuace výkonu byly způsobeny zdrojem. Součástí laseru INOVA je i velká řídicí jednotka a transformátor vysokého napětí. Řídicí jednotka měla své vlastní chlazení, pouze vzduchem. Celá tato sestava generuje tolik tepla, že po pár hodinách provozu zvedla teplotu v bezprašné buňce i celé laboratoři o několik stupňů. V prostředí se zvýšenou teplotou nebylo chlazení vzduchem dostačující. Zahřátí řídicí jednotky se projevilo na změně výkonu laseru, znázorněno na grafu na obrázku 11.2.



Obrázek 11.2: Měření změny výkonu laseru v závislosti na čase. Měření probíhalo ve stejném prostorovém úhlu při rozptylu ze spectralonu. Červená znázorňuje měření před instalací vzduchové chladicí jednotky. Fialová znázorňuje měření po instalaci vzduchové chladicí jednotky s termostatem. Oscilace kolem hodnoty 100% jsou způsobené vypínáním a zapínáním chlazení. Výpadek době kolem 8 000 sekund byl způsoben vypnutím laseru z důvodu snížení průtoku ve vodním chlazení.

Nestabilita byla vyřešena přidáním vzduchové chladicí jednotky, která byla připojena na vzduchové chlazení řídicí jednotky tak, aby přiváděla vzduch o teplotě 18°C přímo do sání vzduchu. Uložení je znázorněno na obrázku 11.3. Díky tom byla řídicí jednotka chlazena vzduchem o stále teplotě a tedy i pracovala za stejné teploty, nehledě na teplotní výkyvy v laboratoři. Pro zamezení srážení vody na površích chladnějších, než je teplota okolního vzduchu, byla vybrána chladicí jednotka s funkcí vysoušení vzduchu.



Obrázek 11.3: Zobrazení přístroje z boku s detailem na chladicí jednotku. 1 laser, 2 přívod studeného vzduchu k laseru a jeho řídicí jednotce, 3 řídicí jednotka laseru Inova, 4 transformátor vysokého napětí, 5 chladicí jednotka, 6 odvod teplého vzduchu pryč z laboratoře

## 11.2. Citlivost elektroniky

Použitý detektor od firmy Thorlabs je podle výrobce konstruován tak, aby dokázal sám kompenzovat vliv teploty v rozmezí 18°C – 28°C na jeho měření.

Jedna chladicí jednotka nemůže kompenzovat teplotu řídicí jednotky laseru a zároveň teplotu detektoru uvnitř přístroje. Pokud by termostat byl nastaven na sepínání a vypínání podle teploty u detektoru, zároveň by se vypínalo a zapínalo chlazení zdroje laseru. Na obrázku 11.2 lze vidět, že závislost výkonu laseru na teplotě řídicí jednotky je velmi

citlivá. Zároveň klimatizační jednotka sama o sobě nemá hepa filtr a tedy není zaručena dostatečná čistota studeného vzduchu. Pro připojení hepa filtru nemá ventilátor klimatizační jednotky dostatečný tlak. K detektoru je přivádět vzduch přes sadu hepa filtrů a ventilátorem uloženým na střeše buňky. Tedy přímo k detektoru je přivádět vzduch o teplotě vzduchu v laboratoři. Pokud se teplota laboratoře nesníží pod 18°C nebo nezvýší nad 28°C detektor dokáže tepelné výkyvy sám kompenzovat. Po přidání klimatizační jednotky, která teplo generované laserem a jeho řídicí jednotkou odvádí ven z laboratoře se teplota v laboratoři stabilně drží okolo 22°C s odchylkou kolem 1°C. Při případné instalaci přístroje v nové místnosti je však doporučeno ověřit teplotní stabilitu prostředí.

### 11.3. Druhý kanál

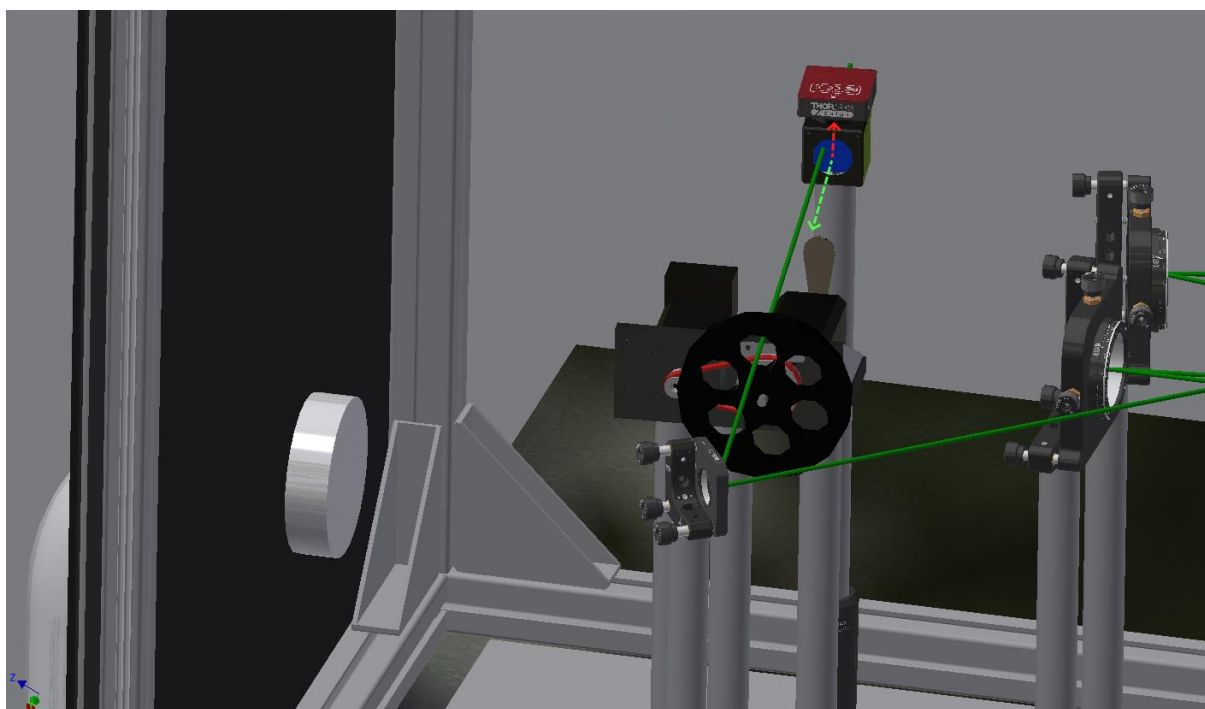
Laser Innova 70C, který je použit jako zdroj, je kontinuální argon kryptonový laser. Jeho hlavní kvality jsou v širším spektru vlnových délek a dostatečném výkonu pro potřeby měření rozptylu na površích tenkých vrstev. Výrobce u laseru garantuje stabilitu výkonu na 30minutového intervalu, kdy by se výkon neměl změnit o více než:

- 0,5 % pokud je laser v módu regulace světelného výkonu
- 3 % pokud je laser v módu maximálního výkonu.

O změně výkonu na delších časových intervalech neuvádí žádné informace.

Měření na celé hemisféře bude určitě přesahovat časový interval 30 minut. Je potřeba tedy konstrukčně aplikovat řešení pro měření výkonu laseru, které bude opravovat naměřené hodnoty v daném čase o relativní změnu ve výkonu laseru. Do komory pro přípravu laserového svazku bude vložen druhý měřicí kanál, který bude sloužit jako referenční pro výkon laseru.

Realizace byla vložением děliče laserového svazku (cube beamsplitter) viz obrázek 11.4 který, dělí intenzitu v poměru 90:10. Tedy 90 % propouští dále a 10 % směřuje na detektor. Poměr byl volený tak, aby co největší část intenzity byla použita na měření rozptylu a pokračovala dále na vzorek.



Obrázek 11.4: Detailnější pohled na druhý kanál uvnitř přístroje. Tmavě zelená znázorňuje trajektorii laserového svazku. Modrou je cube beamsplitter. Tmavě červeno je zvýrazněn detektor. Světle zelená šipka znázorňuje směr svazku za beamsplitterem který pokračuje pře optické prvky dále na vzorek a světle červená šipka znázorňuje směr laserového svazku dopadajícího na sekundární detektor druhého kanálu.

Pro měření reprezentativní hodnoty detektoru v každé jednotlivé poloze detektoru  $HD$  se nejdříve změří  $i$  hodnot na primárním detektoru při zacloněném laserového svazku. Vypočte se z nich průměrná hodnota  $\overline{HD}_D$ . Dále se změří  $i$  hodnot na sekundárním detektoru druhého kanálu, jejich průměr  $\overline{HD}_S$  se odečte od průměru  $\overline{HD}_P$  získaného z měření  $i$  hodnot primárního detektoru při osvětleném vzorku. Proměnná  $i$  vyjadřuje počet vyčtení detektoru v ovládacím softwaru. Je libovolně volitelným parametrem. Pro většinu měření volíme hodnotu  $i = 100$ , která je ideálním poměrem mezi časem potřebným k změření hodnoty pro jednu polohu detektoru a přesností. Výsledná hodnota pro daný prostorový úhel je pak dána vztahy:

$$\overline{HD_P} = \frac{\sum_{i=1}^n HD_{Pi}}{n} \quad (11.1)$$

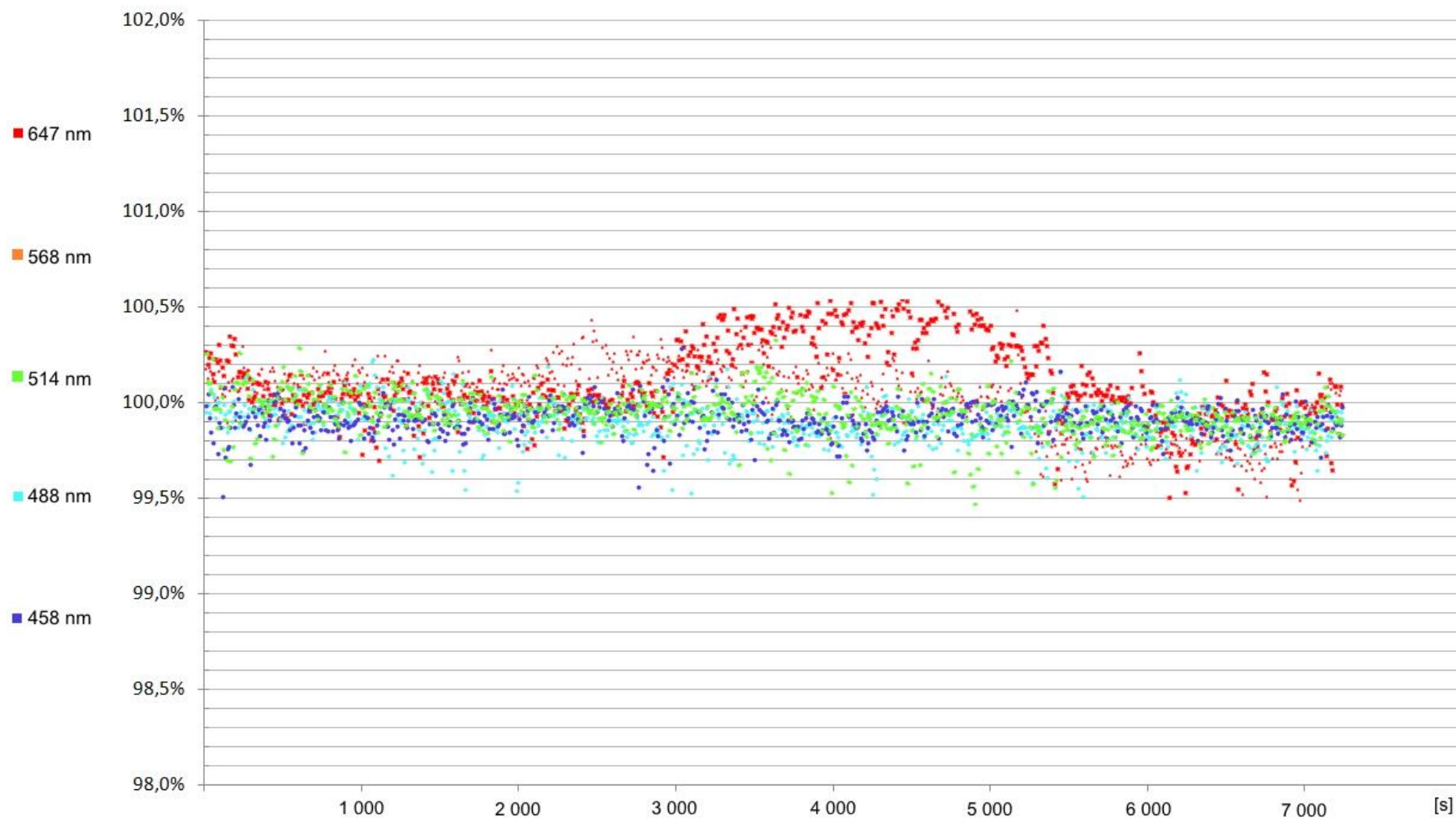
$$\overline{HD_S} = \frac{\sum_{i=1}^n HD_{Si}}{n} \quad (11.2)$$

$$\overline{HD_D} = \frac{\sum_{i=1}^n HD_{Di}}{n} \quad (11.3)$$

$$HD = \frac{\overline{HD_P} - \overline{HD_D}}{\overline{HD_S}} \quad (11.4)$$

#### 11.4. Zhodnocení časové stability

Po aplikaci konstrukčních řešení z bodů 11.2 a 11.3 se snížil efekt výkyvu výkonu laseru v čase během měření na méně než 0,5 % jak lze vidět na grafu na obrázku 11.5 kde je měřena hodna hodnota z detektoru v druhém kanále, tedy hodnota  $\overline{HD_S}$  po dobu 7 200 sekund (dvojnásobná doba nejdelšího měření).



Obrázek 11.5: Relativní změna intenzity laserového svazku v čase

## 12. SEŘÍZENÍ PŘÍSTROJE

Pro dostatečně přesné měření je zapotřebí precizního seřízení celého přístroje. Každý nepřesně uložený optický komponent bude přinášet zobrazovací vady a tím snižovat kvalitu laserového svazku používaného při měření.

Celý přístroj je postaven na mramorové desce, která je zavěšena na vzduchových polštářích. Díky velké váze a způsobu zavěšení mramorové desky je takto přístroj izolován od vibrací z okolního prostředí. Jednotlivé vzduchové vaky (zvýrazněny na obrázku 12.1) se dají samostatně nafouknout, tím se zvedá nebo snižuje výška uložení desky v příslušném rohu. Díky tomu je možné desku ustavit způsobem, aby její vrchní plocha byla vodorovná. Ověřit lze vodováhou. Vodorovnost vrchní plochy stolu je velmi důležitá, tím vznikne přesně vydefinovaná referenční rovina, vůči které se budou ustalovat jednotlivé optické komponenty a zdroj. Na mramorové desce je uložena deska s nerezové oceli, která má v sobě navrtány otvory v po celé ploše, které jsou od sebe vzdáleny 50 mm. Ocelová deska je zároveň magnetická a slouží pro pevné uchycení držáků optických komponent.



Obrázek 12.1: nafukovatelné vzduchové měchy na kterých je uložena mramorová deska.

## 12.1. Seřízení laseru

Po vytvoření referenční roviny je jako první ustálen laser. Jeho ustálení probíhá způsobem, kdy se po stole pohybuje terčík, na který laser svítí. Terčík je uchycen v držáku s nohou ve výšce, která odpovídá výšce středové osy goniometru. Laser musí vždy svítit do středu zaměřovacího kříže terčíku nehledě na to, jak daleko je terčík od laseru umístěn. Tím se zajistí rovnoběžnost laserového svazku vůči referenční rovině a laserový svazek se šíří v rovině, která prochází středem goniometru.

## 12.2. Seřízení prostorového filtru

Za laser se umístí dvě kolimační zrcadla. Jedno je zobrazeno na schématu na obrázku 9.5, druhé je hned za laserem a směřuje laserový svazek na první kolimační zrcadlo. Druhé je umístěno z důvodů velkých rozměrů laseru a jeho podélného uložení (je vidět naobrázku 11.3. U obou je opět potřeba zkontrolovat rovnoběžnost laserového svazku s referenční rovinou způsobem popsáním v předchozím odstavci. Místo uložení jednotlivých zrcadel prostorového filtru bylo přesně odměřeno a zakresleno na nerezovou desku. Zrcadla prostorového filtru jsou mimoosá parabolická zrcadla, ty jsou velmi náchylné na drobné nepřesnosti v uložení. Pro jejich přesné seřízení je vhodné použít druhý laser. Laser je opět seřízen, aby se jeho laserový svazek šířil v rovině rovnoběžné s referenční ve výšce středu goniometru. Laserový svazek druhého laseru dopadá na parabolické zrcadlo pod jiným úhlem, tak může být kontrolováno jeho natočení v ose. Následně step by step metodou pomocí mikrometrických šroubů je seřízeno uložení zrcadla tak, aby laserový svazek zdrojového laseru byl odražen pod úhlem  $30^\circ$  a byl fokusován v rovině uložení modové clony. Pro přesné uložení druhého parabolického zrcadla stačí postup opakovat.

## 12.3. Seřízení Goniometru

Použité krokové motory mají enkodér, dokáží tedy rozpoznat v jaké jsou pozici. Tuto informaci nemají při zapnutí. Poloha, ve které se nacházejí při zapnutí je označena jako 0. Je potřeba vydefinovat přesně nulový poledník a azimut přístroje, tak aby při každém zapnutí byly stejné a aby na sebe byly tyto nulové pozice u jednotlivých ramen kolmé. Polohu ramena pro nulový poledník je možné nalézt pomocí vodováhy, pokud rameno bude vodorovně, je rovnoběžné s referenční rovinou v podobě povrchu desky stolu. Nulovou pozici pro elevaci je možné seřídit společně s pozicí  $180^\circ$ . Při nulové pozici

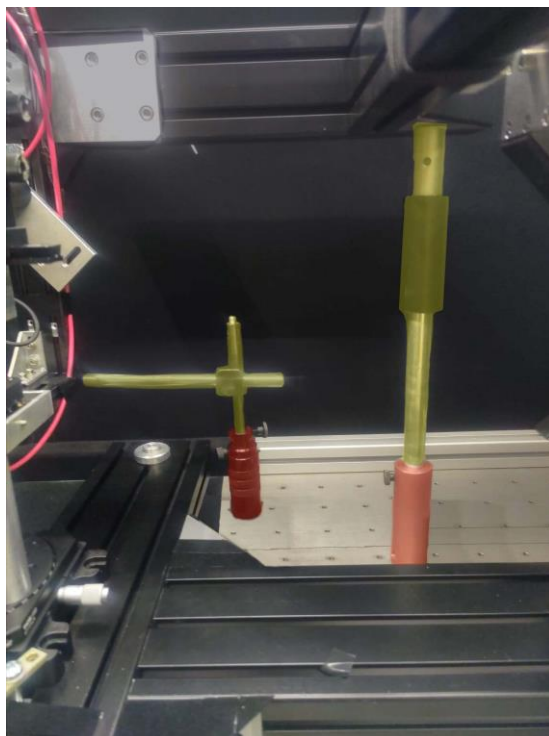
laserový svazek dopadá na zadní část držáku kolimátoru optického vlákna, při pozici  $180^\circ$  pak laserový svazek dopadá přímo do kolimátoru optického vlákna. Tento proces je zdlouhavý pro to, aby byl aplikován při každém zpuštění přístroje. K jednoduchému vymezení nulových poloh je docíleno pomocí instalace "dorazů" rozsahu pohybu. Do oblasti goniometru jsou uloženy mechanické dosedací plochy, o které se ramena opřou při vypnutých motorech. Tím je vydefinována nulová poloha. Po zapnutí elektromotorů se mechanický doraz vyjme. Tyto mechanické dorazy jsou vytvořeny pomocí jednoduché konstrukce zásuvných tyčí. Dutý válec, do kterého se tyč zasouvá, je šrouby připevněn k nerezové desce. Do něj se zasouvá tyč o takové délce, aby se o ni opřelo rameno v nulové poloze. Válec je krátký, takže po vysunutí tyče nezasahuje do prostoru kde se pohybují ramena goniometru.

## 13. POSTUP MĚŘENÍ

Pro obsluhu přístroje je naprogramován software, který je zpuštěn v kompilátoru QT Command. Pro úspěšné měření je potřeba dodržet následující sekvenci při spuštění a kalibrování přístroje pro měření.

### 13.1. Spuštění motorů.

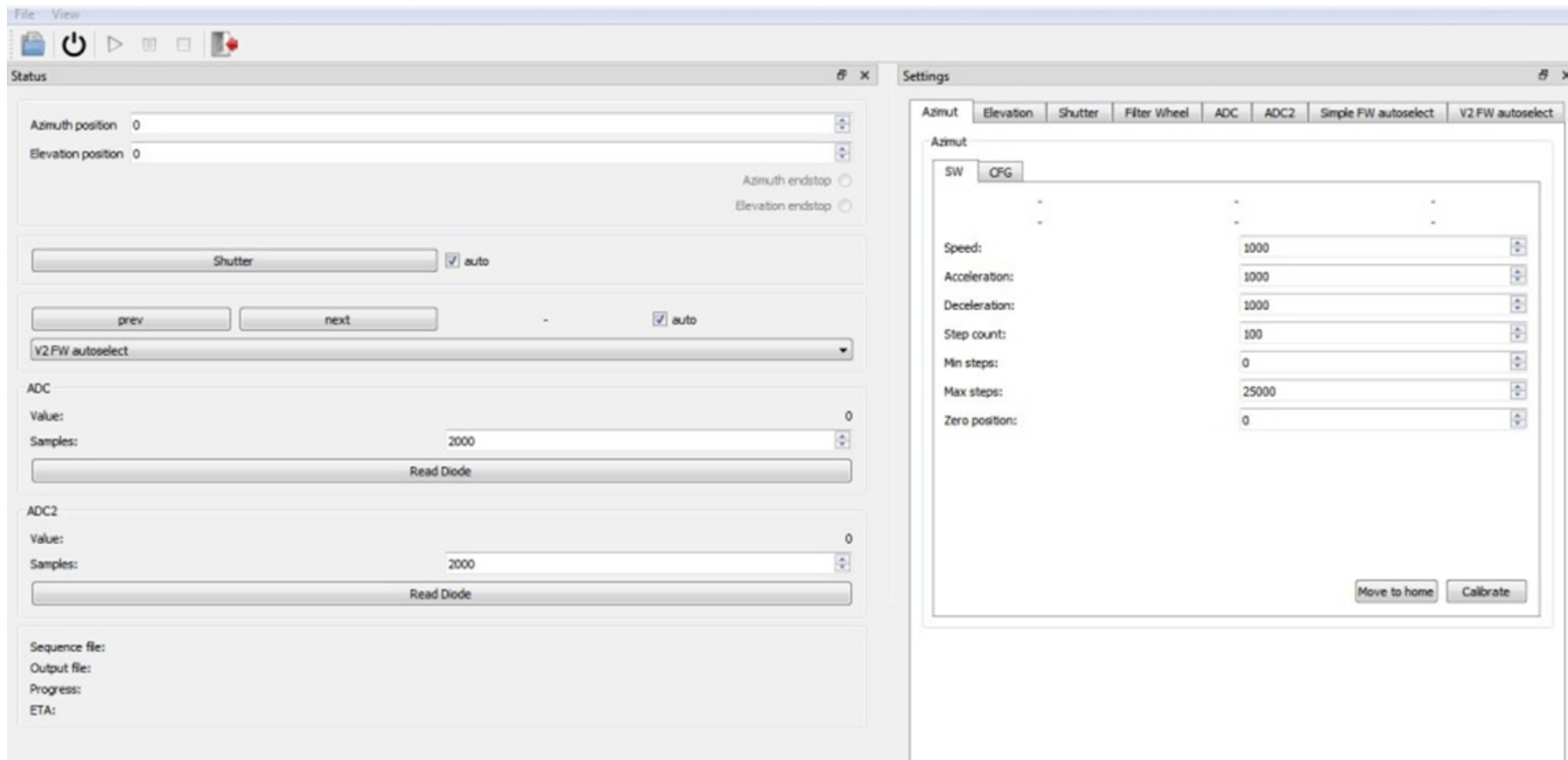
Prvním krokem je umístění tyčí pro vymezení mechanického dorazu a přitlačení obou ramen goniometru k těmto dorazům. Tyče jsou zvýrazněny na obrázku 13.1. Následuje zapnutí motorů. Řídící elektronika je uložena v boxu pro přípravu laserového svazku. Jejím zapnutím se zapnou i motory. Motory jsou vybaveny enkodérem a po zapnutí řídicí jednotky jsou drženy v pevné pozici.




Obrázek 13.1: Mechanické dorazy ramen goniometru. Žlutě zvýrazněny zásuvné tyče. Červeně zvýrazněny pevně uchycené nohy, do kterých se tyče zasouvají

### 13.2. Spuštění ovládacího softwaru.

V kompilátoru QT Command je spuštěn skript, který vyvolá ovládací software a spustí se okno na obrázku 13.2



Obrázek 13.2: software pro ovládání SM3

V levé horní části je dlaždice:  . Po jejím stisknutí se software připojí k elektromotorům. Následně je možné projít ovládání jednotlivých elektromotorů, upravit parametry jako je rychlost, zrychlení, rozsah pohybu apod. pokud je potřeba (doporučení je nechat tyto základní). Následně zmáčknutím dlaždice Calibrate se pozice, na které se motory aktuálně nacházejí, označí na pozici nula (při této kalibraci motorů musí být umístěny tyče vymežující mechanický doraz obou ramen). Po kalibraci motorů goniometru následuje kalibrace motorů pro filter wheel a shutter. Tedy filter wheel je natočen tak, aby laserový svazek procházel pozicí pro filtr č. 6 (na karuselu jsou vepsána čísla jednotlivých pozic a filtrů). Následně se shutter umístí do polohy, kdy zacloní přicházející laserový svazek. Po tomto nastavení se zmáčkne dlaždice Calibrate i v záložkách Shutter a Filter Wheel. Následně se ramena goniometru umístí do polohy tak aby bylo možné odebrat tyče vymežující mechanický doraz. K ovládání ramen goniometru slouží dvě pole v levé horní části, do nich se vepíše příslušné hodnoty

- Azimuth position: 12 500
- Elevation position: 10 000

Následuje odebrání tyčí pro vymezení mechanického dorazu.

### 13.3. Kalibrační měření

Data ARS (úhlově rozlyšený rozptyl) vycházejí z poměru rozptýleného výkonu vůči výkonu dopadajícímu na vzorek. Aby bylo měření opakovatelné, musíme zajistit pokaždé stejné podmínky. To u dopadajícího výkonu dostatečně zajistit nelze. Proto je před prvním měřením vzorku po spuštění přístroje rutinou měření etalonu zvaného Spectralon (znázorněn na obrázku 13.3)



Obrázek 13.3: Etalon používaný pro kalibraci přístroje před měřením [44]

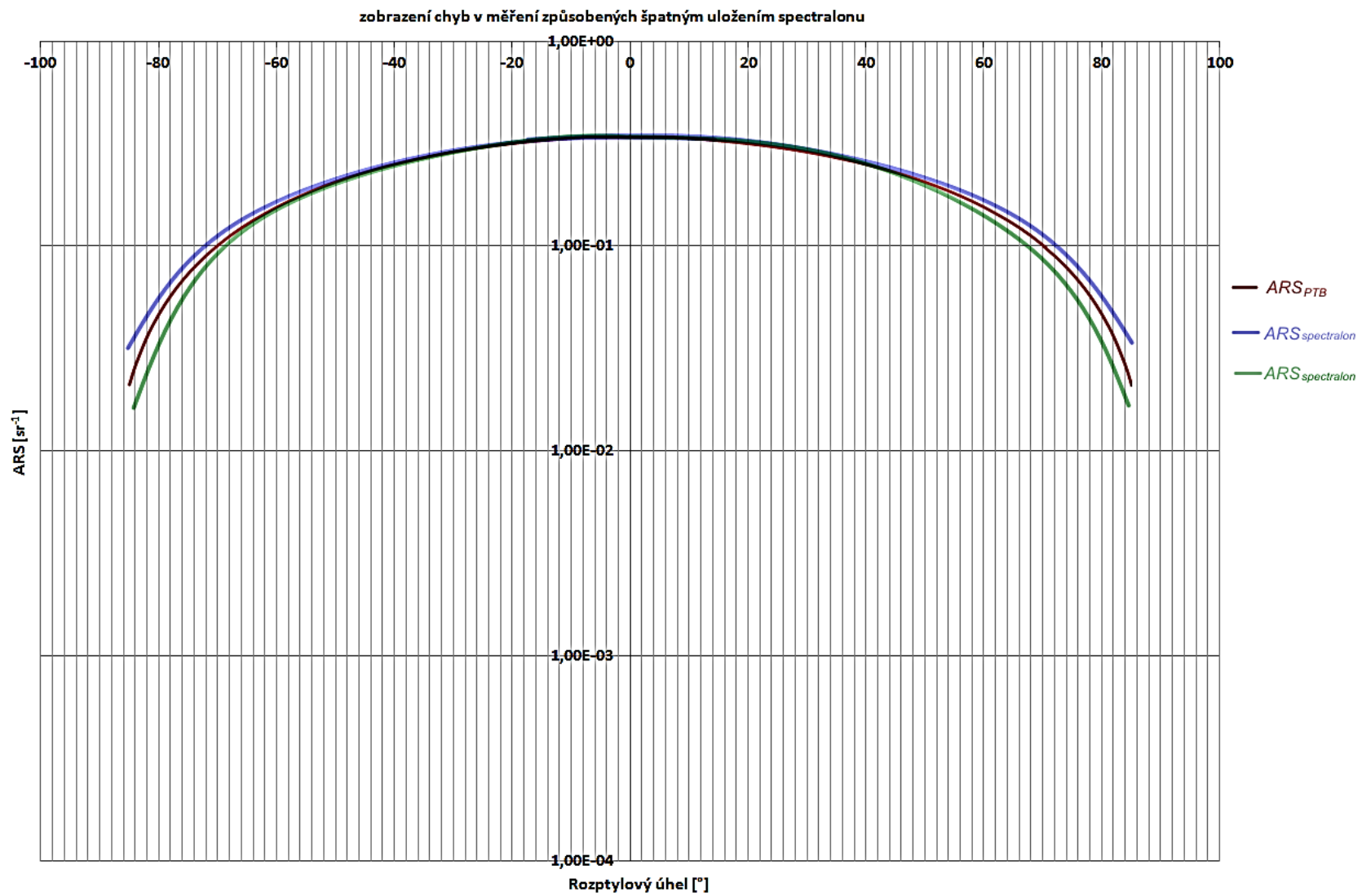
Spectralon je difúzní odrazivý standart s odrazivostí  $> 99\%$  v spektrální oblasti 250-2500 nm a charakteristikou vysoce difúzního povrchu, která se blíží lambertovsky rozptylujícímu povrchu [94]. Přesné hodnoty ARS tohoto etalonu byly změřeny na certifikované metrologické laboratoři.

Hodnoty ARS získané měřením Spectralonu pomocí SM3 se porovnají s hodnotami naměřenými certifikovanou laboratoři. Z tohoto porovnání je dopočítán koeficient  $K_{cal}$  tak aby si naměřená data co nejvíce odpovídala.

$$ARS_{PTB}(\theta_i = 0, \theta_s) = K_{cal} ARS_{spectralon}(\theta_i = 0, \theta_s) \quad (13.1)$$

Každé následující měření je pak násobeno tímto koeficientem  $K_{cal}$ . Tím je dosaženo konzistence v opakovaných měřeních.

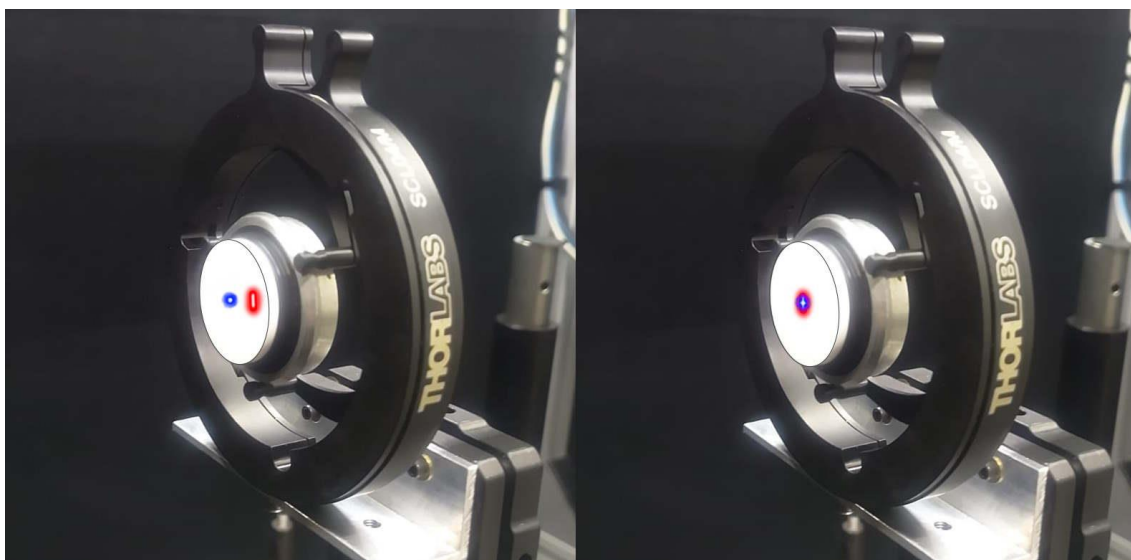
V případě že dojde k neshodě mezi naměřenými daty  $ARS_{spectralon}$  a  $ARS_{PTB}$  je Spectralon uložen špatně v držáku vzorků. Na obrázku 13.4 je graf, kde je znázorněno, jak se při kalibračním měření projeví špatně uložen spectralon .



Obrázek 13.4: ARS Spectralonu. Porovnání dat špatně uloženého vzorku.

Červenou barvou je měření z certifikované laboratoře  $ARS_{PTB}$ . Pokud se naměřené  $ARS_{spectralon}$  "zavírá" více než  $ARS_{PTB}$ , jak je znázorněno zelenou barvou, pak je Spectralon uložen před osou goniometru, je potřeba jej posunout o kousek dozadu. Pokud se  $ARS_{spectralon}$  "otvírá" více než  $ARS_{PTB}$ , jak je znázorněno modrou barvou, pak je Spectralon uložen za osou goniometru. Je potřeba jej posunout dopředu. Pokud se bude  $ARS_{spectralon}$  v hodnotách úhlů  $0^\circ$  až  $90^\circ$  otvírat a c hodnotách úhlů  $0^\circ$  až  $-90^\circ$  zavírat, povrch Spectralonu není uložen kolmo k přicházejícímu laserovému svazku (na grafu již není zobrazeno). K přesnému kolmému uložení Spectralonu slouží zrcadlová plocha, která je na víčku Spectralonu a měřením byla ověřena její rovnoběžnost s povrchem Spectralonu.

Pro přesnou justaci měřeného vzorku do polohy, kdy jeho povrch leží v ose goniometru, slouží druhý zaměřovací diodový laser. Jeho laserový svazek dopadá na vzorek pod úhlem  $45^\circ$  (měřeno od osy laserového svazku hlavního laseru). Princip je znázorněn na obrázku 13.5. Pokud laserový svazek zaměřovacího laseru a laserový svazek zdrojového laseru dopadají do stejného bodu, povrch vzorku je v ose goniometru



Obrázek 13.5: Vlevo znázorněno mimoosé uložení spectralonu. V pravo je povrch spectralonu v ose goniometru, oba laserové svazky dopadají do stejného bodu.

Zaměřovací laser musí být během měření vypnutý. Pro jednoduchost ovládání byl do měřicí komory nainstalován vypínač zaměřovacího laseru. Při výměně vzorku a justaci nového není nutné otevírat komoru pro přípravu laserového svazku.

Pro přesný posun vzorku i jeho natočení lze využít posuv mikrometrickými šrouby. Držák vzorku je posuvný ve třech kolmých osách a je naklápěcí ve dvou osách. V ose rotace, která je totožná s osou zdrojového laserového svazku, není třeba natáčení vzorku. Goniometr dokáže měřit po celé sféře.

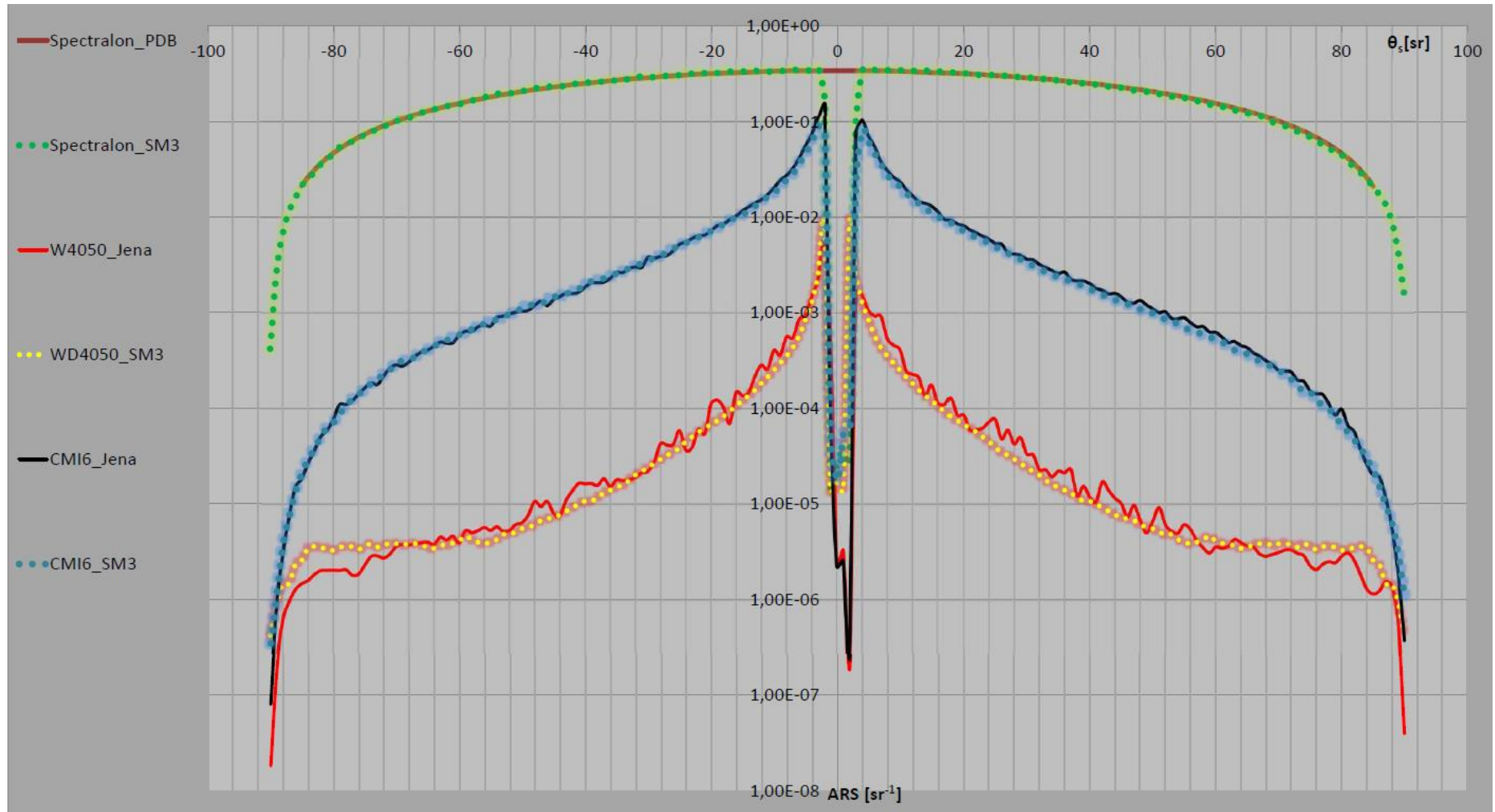
## 14. VÝSLEDKY MĚŘENÍ PŘÍSTROJE

### 14.1. Porovnávací měření

Následně po sestavení celého přístroje a jeho kalibraci bylo provedeno porovnávací měření. Jako porovnávací vzorky pro měření sloužily tři následující vzorky shrnuté v tabulce

Označení	Typ
Spectralon	Etalon
ČMI 6	Leptaný křemík
WD4050	Multivrstevný systém

Výsledky porovnávacích měření jsou shrnuty na následujícím grafu na obrázku 14.1.



Obrázek 14.1: Srovnání naměřených dat na SM3 a v Jeně

Zároveň bylo provedeno měření pozadí a šumu v přístroji. Měření bylo provedeno způsobem, že byl nejdříve změřen spectralon s největší možným nastavením GAIN na detektoru (nastavení detektoru, které udává k jak velkému zesílení signálu dojde) a následně proběhlo měření poledníku bez uloženého vzorku a se zacloněným laserovým svazkem. Měření nebo pořízení snímku při zacloněném zdroji se běžně v praxi používá pro určení šumu nejen u kamer, ale také u přístrojů. Výsledný snímek nebo měření se nazývá Dark frame.

Ideální měření tzv. instrument signature by proběhlo bez zacloněného laserového svazku. Nicméně v této konfiguraci by stejně nebyl změřen instrument signature. Laserový svazek by dopadal na rameno goniometru a od něj se rozptyloval. Byl by tak měřen rozptyl ramena goniometru nikoliv instrument signature.

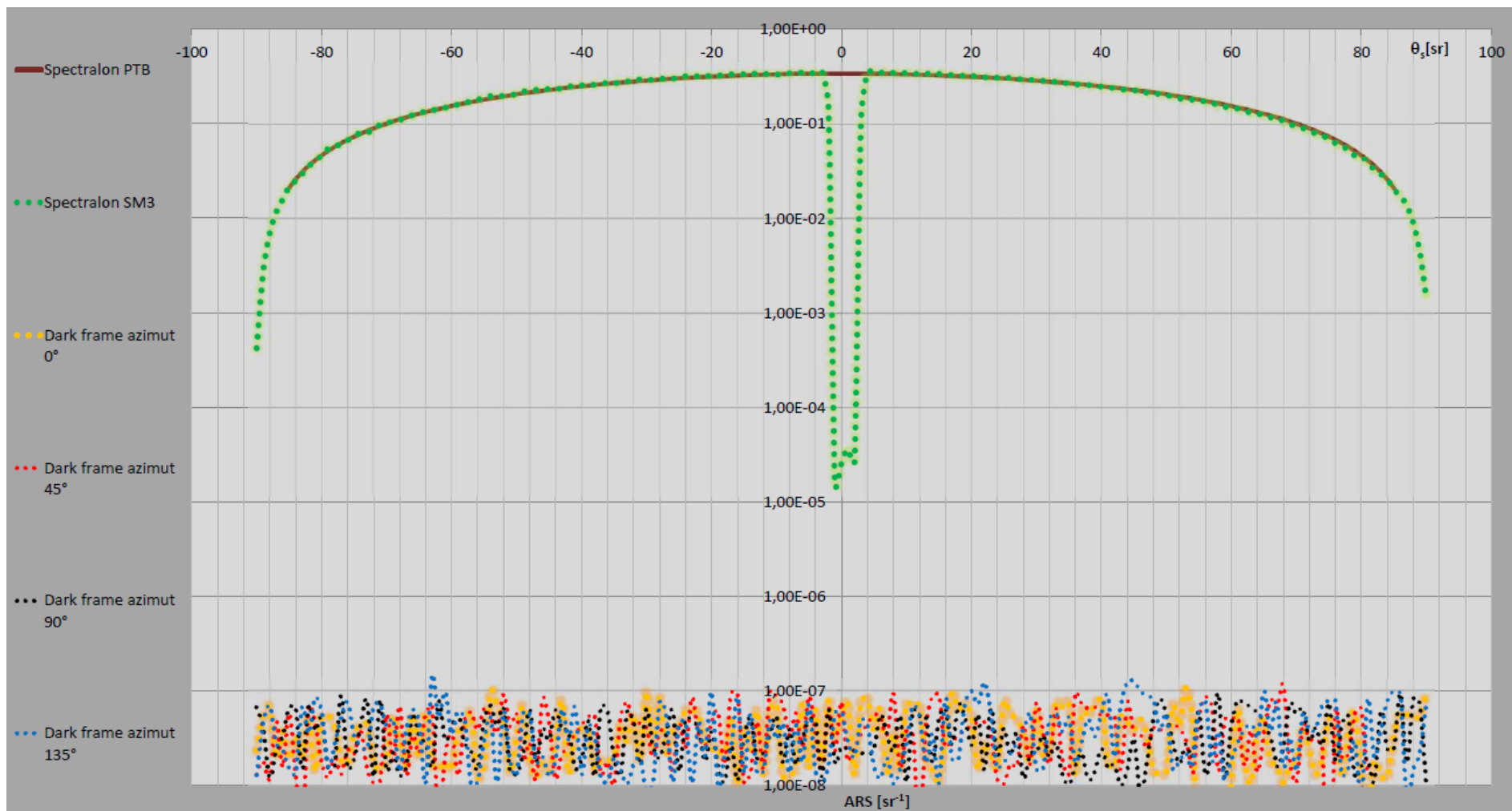
Řešením by bylo před rameno goniometru uložit beam dumper který by efektivně pohltil dopadající laserový svazek. V konstrukci goniometru není prostor pro takové uložení beam dumperu. Jedinou variantou by bylo vyfrézovat otvor v rameni goniometru, beam dumper uložit do vzniklého otvoru a následně rameno vyztužit, aby nepřišlo o potřebnou tuhost a pevnost. Tak velký zásah do konstrukce přístroje by byl realizován pouze pokud by bylo nezbytné instrument signature precizně změřit.

Taková potřeba by mohla vzniknout, pokud by v porovnání dat vznikaly nějaké nesrovnalosti nebo pokud by v měření rozptylu vzorků docházelo k měření hodnot blízkých hodnot šumu.

Pokud do budoucna vznikne potřeba takového měření konstrukce bude upravena. Do té doby postačuje změření šumu, které ukazuje že šum v detektoru a elektronice je minimálně o řád níže, než data, která jsou měřena jako rozptyl na povrchu tenkých vrstev.

Na následujícím grafu na obrázku 14.2 je vykreslen výsledek právě takového měření. Zelenou barvou je označeno kalibrační měření spectralonu a srovnáno s tmavě červenou ideální křivkou spectralonu. Ostatní barvy označují měření dark frame u různých poledníků.

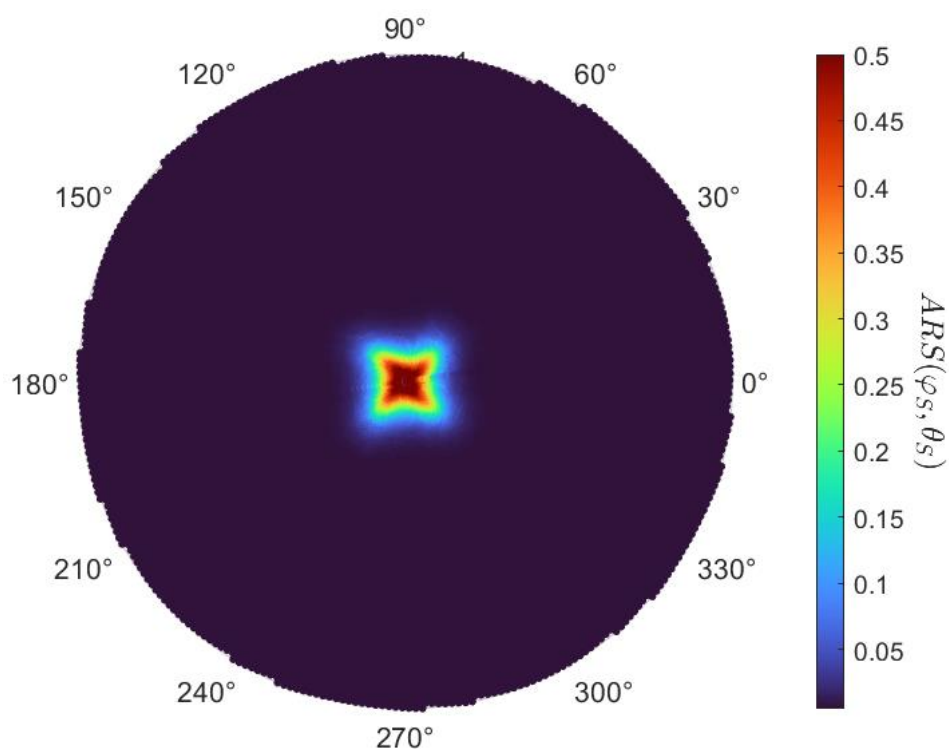
Jak je vidět hodnoty šumu se pohybují v rozmezí  $10^{-8}$  až  $10^{-7}$  se střední hodnotou  $5 \times 10^{-8}$ . Tedy hodnoty šumu se pohybují v rozmezí o dva řády níže, než hodnoty rozptylu na tenkých vrstvách pro jejichž měření byl přístroj primárně navržen.



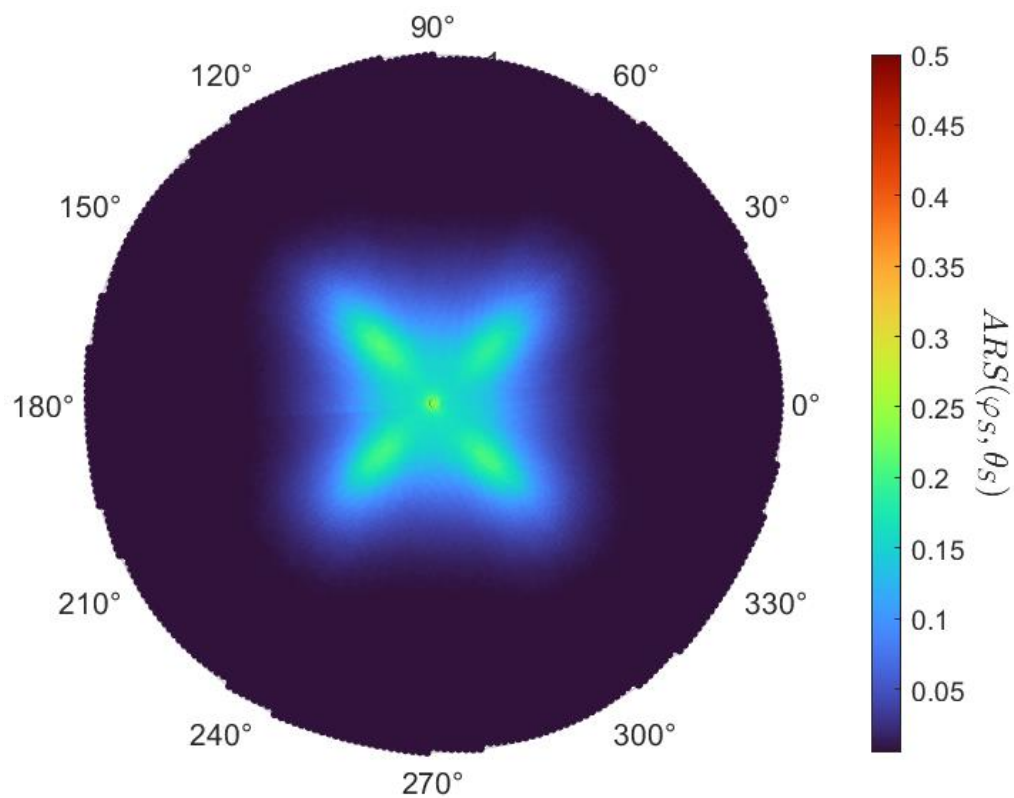
Obrázek 14.2: Graf šumu

## 14.2. 3D měření a numerické simulace

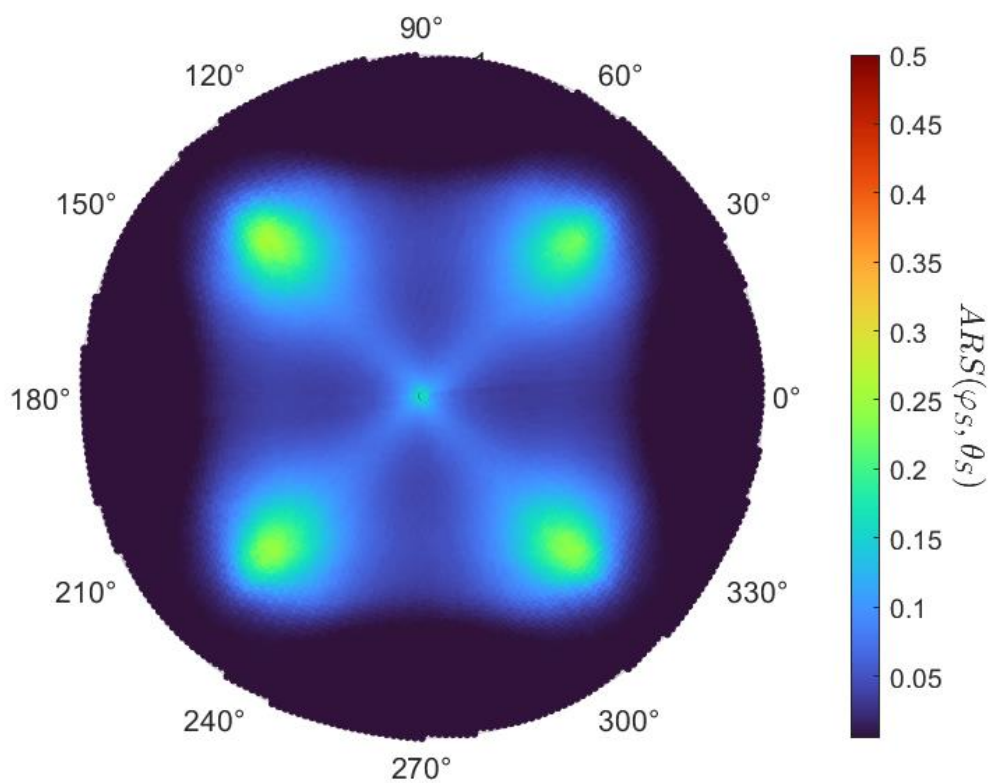
Měření na hemisféře bylo ověřeno v disertační práci Václava Šulce [45], kde porovnává numerické modelace s daty naměřenými na SMIII. Mezi naměřenými daty a simulovanými daty je dobrá shoda, která je detailně popsána a diskutována v [45]. Na následujících obrázcích 14.3 až 14.6 jsou zobrazeny pouze naměřená data přístrojem SMIII z měření provedených Václavem Šulcem na vzorcích, jejichž povrchy byly anizotropně strukturované procesem selektivního leptání křemíkového substrátu s různou úrovní odleptání vzniklých struktur [45].



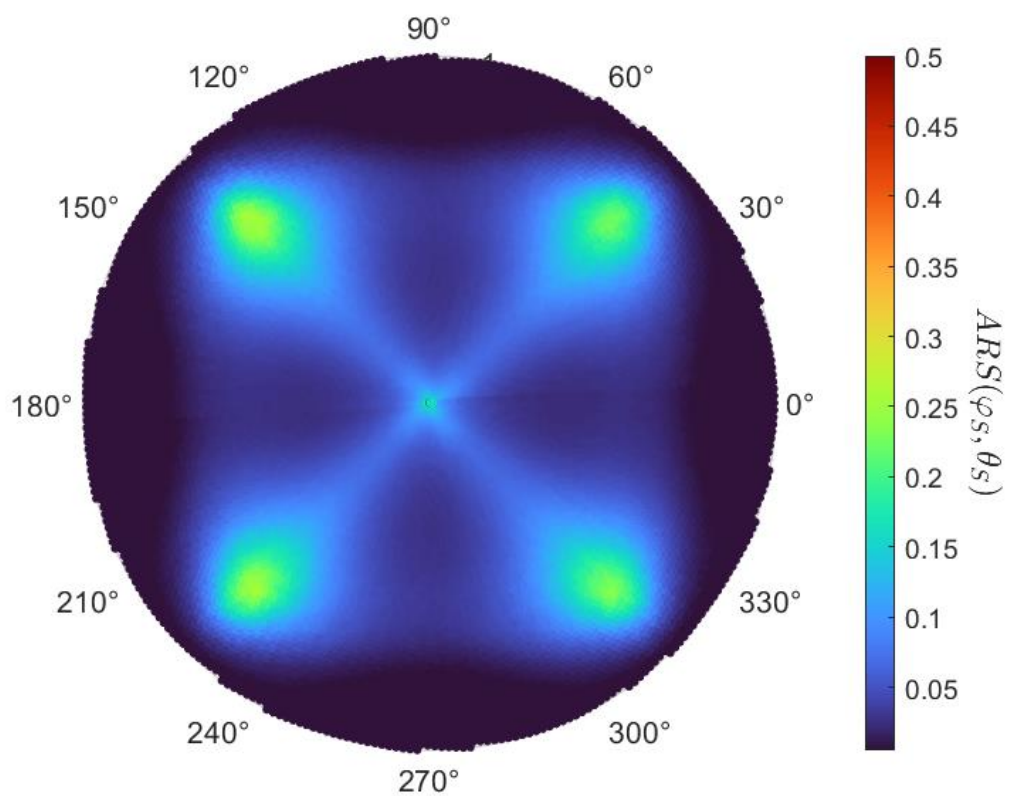
Obrázek 14.3: vzorek SiD2 [45] Závislost ARS na úhlu  $\theta_s$  a  $\phi_s$ . Barevná škála zobrazuje výkon rozptýlený povrchem vzorku v hemisféře nad povrchem vzorku.



Obrázek 14.4: Vzorek SiD5 [45]. Závislost ARS na úhlu  $\theta_s$  a  $\phi_s$ . Barevná škála zobrazuje výkon rozptýlený povrchem vzorku v hemisféře nad povrchem vzorku.



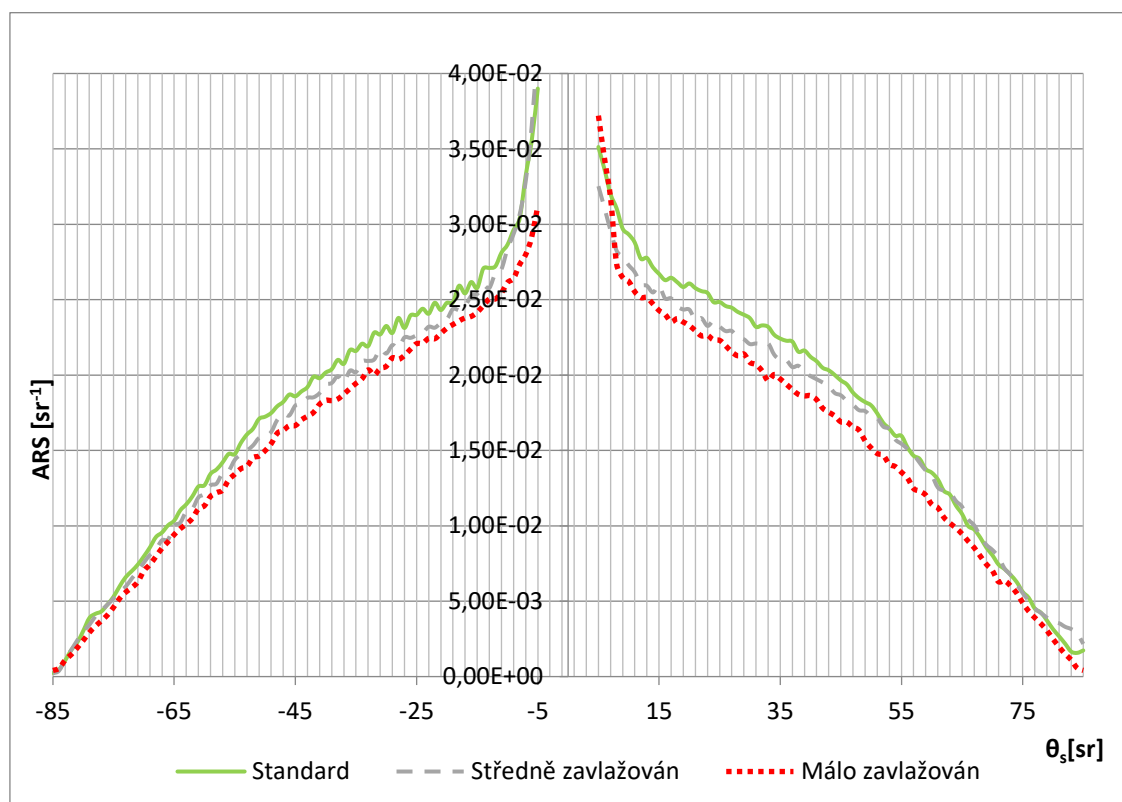
Obrázek 14.5: Vzorek SiD8 [45]. Závislost ARS na úhlu  $\theta_s$  a  $\phi_s$ . Barevná škála zobrazuje výkon rozptýlený povrchem vzorku v hemisféře nad povrchem vzorku.



Obrázek 14.6: Vzorek SiD9 [45]. Závislost ARS na úhlu  $\theta_s$  a  $\phi_s$ . Barevná škála zobrazuje výkon rozptýlený povrchem vzorku v hemisféře nad povrchem vzorku.

## 15. ARS A STRES ROSTLIN

Ve spolupráci s Ústavem molekulární biologie a radiobiologie Mendelova univerzita v Brně byla testováno měření stresu rostlin. Při vystavení nedostatku světla, vody případně jiných stresujících faktorů, rostliny reagují změnou buněčné struktury. Tato změna se projeví mimo jiné i rozdílnou interakcí se světlem a zobrazí se tak na ARS diagramu. V LKO byla testována tato hypotéza a z výsledků měření na grafu na obrázku 15.1 jde vidět, že rostliny, které byly vystaveny stresu, mají rozdílné ARS měřené přístrojem SMIII.



Obrázek 15.1: ARS rostli vystavených 3 různým stupňům stresu

Na měření byli připraveny 3 sady vzorků sazenic ječmene. První sada byla zavlažována standartním optimálním způsobem. Druhá sada měla mírný nedostatek vláhy. Třetí sada byla vystavena suchu. Rostliny jsou na stres velice citlivé, měření všech tří sad bylo provedeno ihned po převozu do laboratoře a střídaly se rostliny z jednotlivých sad v kruhu, aby byl eliminován vliv různé délky pobytu v novém prostředí. Jak je vidět na grafu na obrázku se zvyšujícím stresem, kterému jsou rostliny vystaveny, se snižuje jejich rozptyl. To je pravděpodobně způsobeno mírným smrštěním buněk, a tedy jemnější struktury na povrchu listu. Tyto změny nejsou okem patrné a na rostlině samotné se stres projevuje jen pomalejším růstem. Závislost rozptylu světla na stresu

rostlin je zajímavá z hlediska vývoje geneticky modifikovaných rostlin, kdy modifikace jsou zaměřeny na zvýšení odolnosti rostlin proti stresovým podmínkám a tím zrychlení růstu. Tato metoda měření může být provedena nedestruktivním způsobem pro rostlinu. Nedestruktivní měření je v tomto případě nutné. Pokud dojde k jakémukoliv poškození rostliny, je tím způsoben rostlině stres, který pak ovlivňuje výsledky měření stresu například z nedostatku vláhy.

Aplikace této metody měření stresu rostlin pak může značně urychlit vývoj geneticky modifikovaných rostli, kdy je možné měřit stres v rostlinách (a tedy i jejich potenciálně vyšší odolnost vůči různým vlivům) v reálném čase a je možné rychle vyhodnocovat odolnost dané modifikace.

Pro podrobnější výzkum je potřeba laboratoří upravených a certifikovaných pro provoz s geneticky modifikovanými rostlinami podle § 24 písm. b) až f) a h) až j) zákona č. 153/2000 Sb. Laboratoř koherenční optiky nebyla navrhována za tímto účelem a v současné době nesplňuje podmínky pro práci s geneticky modifikovanými rostlinami.

## 16. PŘÍNOS PRO VĚDNÍ OBOR A PRAXI

Technikám charakterizace náhodně drsných povrchů, které jsou založené na rozptylu světla (obecně elektromagnetického záření) se v posledních letech věnuje velká pozornost. Důvodem je skutečnost, že jsou velmi citlivé k mikrotopografii studovaných povrchů, tj. umožňují rozlišit i malé rozdíly v mikrotopografii povrchů. To předpokládá precizně vymezit podmínky měření charakteristik tohoto rysu povrchů, a tak zajistit spolehlivost i porovnatelnost výsledků měření na různých pracovištích. Vědecká komunita věnující se dané problematice se v současnosti snaží sjednotit proceduru měření *ARS*. Rádi bychom se po sestrojení SM III k tomuto úsilí připojili. Mezi špičková světová pracoviště v této oblasti patří pracoviště Functional Optical Surfaces and Layers, Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF, Jena, se kterým spolupracujeme.

Pro praxi je přínos našeho snažení dán skutečností, že kontrola kvality povrchů (k němuž studium mikrotopografie povrchů patří) je zejména v dnešní době velmi významnou součástí přípravy povrchů u všech typů technologií používaných k jejich vytváření. Kvalita povrchů je velmi důležitá zejména v optickém průmyslu vyrábějícím precizní optické prvky a přístroje (např. firma MEOPTA – optika, s.r.o. se kterou v současnosti spolupracujeme v oblasti přípravy tenkých vrstev, má zájem o v disertační práci řešenou problematiku).

Velmi významná je kvalita povrchů i v jiných odvětvích průmyslu. Uvedme zde několik důležitých příkladů: V automobilovém průmyslu je důležitá kvalita povrchů pro světelné systémy automobilů. V elektrotechnickém průmyslu kriticky záleží na kvalitě povrchů křemíkových destiček používaných při výrobě integrovaných obvodů. S rostoucím stupněm integrace elementů v těchto obvodech roste i význam jakýchkoliv nedokonalostí křemíkových povrchů, které pak narušují správnou činnost zmíněných obvodů. V tribologických úlohách je nutné zajistit vhodnou drsnost dotykových ploch různých součástí pro udržení mazacího média mezi nimi. Jako poslední příklad zmiňme oblast koroze materiálů, kde je nutné monitorovat lokální defekty jinak hladkého povrchu, které jsou iniciátory koroze. Předpokládáme, že výsledky této práce mohou být přínosem ve všech naznačených aplikačních oblastech.

## 17. ZÁVĚR

Hlavním předmětem této práce je studium rozptylu elektromagnetického záření z povrchů s velmi nízkou drsností v řádu nanometrů, speciálně pak tenkých vrstev. Tematicky práce navazuje na předchozí výzkum povrchové drsnosti prováděný v Laboratoři koherentní optiky Ústavu fyzikálního inženýrství ve spolupráci s výzkumným pracovištěm Optika tenkých vrstev a povrchů pevných látek Masarykovy univerzity. V rámci tohoto výzkumu se autor této práce podílel na charakterizaci defektů tenkých vrstev [46], stanovení jejich nehomogenity v tloušťce [47] a také na elipsometrické charakterizaci nehomogenních tenkých vrstev [48]. Z výzkumu vyplynula myšlenka využít a případně rozšířit metodu ARS i na měření drsnosti povrchů tenkých vrstev. Tomu odpovídá i cíl předkládané práce: konstrukce a realizace přístroje, který takové měření umožní.

V první části práce se věnujeme statistickému popisu topografie drsných povrchů. Nejprve jsou stručně popsány parametry sloužící k popisu povrchové drsnosti, a to s ohledem na využití optických metod. Následně jsou připomenuty nejvýznamnější optické techniky pro určení parametrů povrchu jako jsou interferometrická mikroskopie, spektroskopická interferometrie nebo techniky založené na celkovém integrovaném rozptylu (TIS). Důraz je kladen na metodu rozptylové distribuční funkce (ARS), která je dlouhodobě v naší laboratoři úspěšně využívána při charakterizaci povrchů pevných těles.

Dále jsou popsány různé způsoby experimentálních uspořádání a přístrojových instrumentací, které byly využity v minulosti. Jsou diskutovány výhody a omezení jednotlivých zvolených konstrukčních řešení. Je ukázáno, že předchozí konstrukce nemůže být využita k měření rozptylu z povrchů tenkých vrstev.

Proto jsou dále navrženy a aplikovány konstrukční úpravy přístroje skaterometr SM2, které zvyšují jeho dynamický rozsah a citlivost v měření velmi nízkého rozptýleného výkonu. Přístroj byl po úpravách úspěšně otestován a výsledky publikovány [32]. Z výsledků však vyplynulo, že pro měření rozptylu na površích tenkých vrstev je zapotřebí většího dynamického rozsahu, než mohl přístroj dosáhnout.

Těžištěm práce je tedy návrh nového skaterometru goniometrického typu s označením SM3. Postupně byly analyzovány všechny relevantní jevy, které mohou mít vliv při přesnosti a stabilitě měření, zejména na šum přístroje, a diskutovány možnosti jejich

odstranění. Pro omezení každého z těchto nežádoucích jevů bylo vždy vybráno vhodné řešení a aplikováno. Následně byl vytvořen návrh celého přístroje a jeho 3D model v programu Inventor. Konečně byly vyrobeny potřebné části a přístroj sestaven.

Dále se tato práce věnuje testování přístroje pomocí srovnání jeho výsledků s nezávislým měřením. Uvedená měření prokazují funkčnost a dostatečnou přesnost přístroje SM3 i pro měření rozptylu na površích tenkých vrstev. V závěru pro ilustraci všestranného použití přístroje také popisujeme příklad aplikace k měření stresu v rostlinách.

## 18. PUBLIKAČNÍ ČINNOST

Šustek, Š., Vohánka, J., Ohlídál, I., Ohlídál, M., Šulc, V., Klapetek, P., Kaur, N. J., Characterization of randomly rough surfaces using angle-resolved scattering of light and atomic force microscopy. *Journal of Optics*, 2021, [online] 23(10) [cit. 2021-11-09]. ISSN 2040-8978. Dostupné z: doi:10.1088/2040-8986/ac1f35

Vohánka, J., Šustek, Buršíková, V., Šklíbová, V., Šulc, V., Homola, V., Franta, D., Čermák, M., Ohlídál, M., Ohlídál, I., Determining shape of thickness non-uniformity using variable-angle spectroscopic ellipsometry. *Applied Surface Science*, 2020, 534 (SI: SURFINT-SREN VI), 147625. ISSN 0169-4332. Dostupné z: doi: 10.1016/j.apsusc.2020.147625

Ohlídál, I., Vohánka, J., Buršíková, V., Šulc, V., Šustek, Š., Ohlídál, M., Ellipsometric characterization of inhomogeneous thin films with complicated thickness non-uniformity: application to inhomogeneous polymer-like thin films. *Optics Express*, 2020, 28(24), s. 36796-36811. ISSN 1094-4087. Dostupné z: doi:10.1364/oe.412043

Vohánka, J., Ohlídál, I., Ohlídál, M., Šustek, S., Čermák, M., Šulc, V., Vašina, P., Ženíšek, J., Franta, D., Optical characterization of non-stoichiometric silicon nitride films exhibiting combined defects. *Coatings*, 2019, 9(7), 416, ISSN 2079-6412. Dostupné z: doi: 10.3390/coatings9070416

## 19. LITERATURA

[1] BENNETT, Jean M. Measurement of the rms roughness, autocovariance function and other statistical properties of optical surfaces using a FEKO scanning interferometer. *Applied Optics* [online]. 1976, **15**(11) [cit. 2021-11-09]. ISSN 0003-6935. Dostupné z: doi:10.1364/AO.15.002705

[2] CHANDLEY, P. J. Determination of the standard deviation of height on a rough surface using interference microscopy. *Optical and Quantum Electronics* [online]. 1979, **11**(5), 407-412 [cit. 2021-11-09]. ISSN 0306-8919. Dostupné z: doi:10.1007/BF00619822

[3] KWON, Osuk, J. C. WYANT a C. R. HAYSLETT. Rough surface interferometry at 106  $\mu\text{m}$ . *Applied Optics* [online]. 1980, **19**(11) [cit. 2021-11-09]. ISSN 0003-6935. Dostupné z: doi:10.1364/AO.19.001862

[4] HODGKINSON, I J. A simple scatter method for optical surface roughness and slope measurements. Roughness of polished fused silica. *Journal of Physics E: Scientific Instruments* [online]. **3**(5), 341-342 [cit. 2021-11-09]. ISSN 00223735. Dostupné z: doi:10.1088/0022-3735/3/5/301

[5] PAETZELT, H, G BÖHM a Th ARNOLD. Etching of silicon surfaces using atmospheric plasma jets. *Plasma Sources Science and Technology* [online]. 2015, **24**(2) [cit. 2021-11-09]. ISSN 0963-0252. Dostupné z: doi:10.1088/0963-0252/24/2/025002

[6] OHLIDAL, Ivan a Karel NAVRATIL. Analysis of the basic statistical properties of randomly rough curved surfaces by shearing interferometry. *Applied Optics* [online]. 1985, **24**(16) [cit. 2021-11-10]. ISSN 0003-6935. Dostupné z: doi:10.1364/AO.24.002690

- [7] OHLÍDAL M., OHLÍDAL I., DRUCKMÜLLER M., FRANTA D.: A method of shearing interferometry for determining the statistical quantities of randomly rough surfaces of solids, *Pure and Applied Optics*, 1995, **4**, pp.599-616
- [8] OHLÍDAL, Ivan, Karel NAVRÁTIL, Miloslav OHLÍDAL a Miloslav DRUCKMÜLLER. Characterization of the basic statistical properties of very rough surfaces of transparent solids by immersion shearing interferometry. *Applied Optics* [online]. 1994, **33**(34) [cit. 2021-11-10]. ISSN 0003-6935. Dostupné z: doi:10.1364/AO.33.007838
- [9] BENNETT, H. E. a J. O. PORTEUS. Relation Between Surface Roughness and Specular wReflectance at Normal Incidence. *Journal of the Optical Society of America* [online]. 1961, **51**(2) [cit. 2021-11-10]. ISSN 0030-3941. Dostupné z: doi:10.1364/JOSA.51.000123
- [10] BENNETT, H. E. Specular Reflectance of Aluminized Ground Glass and the Height Distribution of Surface Irregularities. *Journal of the Optical Society of America* [online]. 1963, **53**(12) [cit. 2021-11-10]. ISSN 0030-3941. Dostupné z: doi:10.1364/JOSA.53.001389
- [11] OHLÍDAL, Ivan, Jiří VOHÁNKA, Martin ČERMÁK a Daniel FRANTA. Combination of spectroscopic ellipsometry and spectroscopic reflectometry with including light scattering in the optical characterization of randomly rough silicon surfaces covered by native oxide layers. *Surface Topography: Metrology and Properties* [online]. 2019, **7**(4) [cit. 2021-11-10]. ISSN 2051-672X. Dostupné z: doi:10.1088/2051-672X/ab359d
- [12] OHLÍDAL, I. a F. LUKEŠ. Ellipsometric Parameters of Rough Surfaces and of a System Substrate-Thin Film with Rough Boundaries. *Optica Acta: International Journal of Optics* [online]. 2010, **19**(10), 817-843 [cit. 2021-11-10]. ISSN 0030-3909. Dostupné z: doi:10.1080/713818502

[13] OHLÍDAL, Ivan a David NEČAS. Influence of shadowing on ellipsometric quantities of randomly rough surfaces and thin films. *Journal of Modern Optics* [online]. 2008, **55**(7), 1077-1099 [cit. 2021-11-10]. ISSN 0950-0340. Dostupné z: doi:10.1080/09500340701618379

[14] OHLÍDAL, Ivan, Jiří VOHÁNKA, Jan MISTRÍK, Martin ČERMÁK a Daniel FRANTA. Different theoretical approaches at optical characterization of randomly rough silicon surfaces covered with native oxide layers. *Surface and Interface Analysis* [online]. 2018, **50**(11), 1230-1233 [cit. 2021-11-10]. ISSN 01422421. Dostupné z: doi:10.1002/sia.6463

[15] OHLÍDAL, I., F. LUKEŠ a K. NAVRÁTIL. Rough silicon surfaces studied by optical methods. *Surface Science* [online]. 1974, **45**(1), 91-116 [cit. 2021-11-10]. ISSN 00396028. Dostupné z: doi:10.1016/0039-6028(74)90157-5

[16] OHLÍDAL, Ivan, Daniel FRANTA a David NEČAS. Improved combination of scalar diffraction theory and Rayleigh–Rice theory and its application to spectroscopic ellipsometry of randomly rough surfaces. *Thin Solid Films* [online]. 2014, **571**, 695-700 [cit. 2021-11-10]. ISSN 00406090. Dostupné z: doi:10.1016/j.tsf.2014.02.092

[17] DUPARRÉ, Angela, Josep FERRE-BORRULL, Stefan GLIECH, Gunther NOTNI, Jörg STEINERT a Jean M. BENNETT. Surface characterization techniques for determining the root-mean-square roughness and power spectral densities of optical components. *Applied Optics* [online]. 2002, **41**(1) [cit. 2021-11-10]. ISSN 0003-6935. Dostupné z: doi:10.1364/AO.41.000154

[18] Sheppard C J R 1987 Scanning optical microscopy *Advances in Optical and Electron Microscopy* vol 10, ed R Barer and V E Crosslett (London: Academic) pp 1–98

[19] JUŠKAITIS, R., N. P. REA a T. WILSON. Semiconductor laser confocal microscopy. *Applied Optics* [online]. 1994, **33**(4) [cit. 2021-11-10]. ISSN 0003-6935. Dostupné z: doi:10.1364/AO.33.000578

[20] OHTSUBO, Junji a Toshimitsu ASAKURA. Statistical properties of laser speckle produced in the diffraction field. *Applied Optics* [online]. 1977, **16**(6) [cit. 2021-11-10]. ISSN 0003-6935. Dostupné z: doi:10.1364/AO.16.001742

[21] FUJII, Hitoshi, Toshimitsu ASAKURA a Yoshio SHINDO. Measurement of surface roughness properties by using image speckle contrast. *Journal of the Optical Society of America* [online]. 1976, **66**(11) [cit. 2021-11-10]. ISSN 0030-3941. Dostupné z: doi:10.1364/JOSA.66.001217

[22] OHLÍDAL, Miloslav. Comparison of the Two-dimensional Fraunhofer and the Two-dimensional Fresnel Approximations in the Analysis of Surface Roughness by Angle Speckle Correlation. *Journal of Modern Optics* [online]. 2007, **38**(11), 2115-2135 [cit. 2021-11-10]. ISSN 0950-0340. Dostupné z: doi:10.1080/09500349114552221

[23] OHLÍDAL, Miloslav. Comparison of Two-dimensional Fraunhofer Approximation and Two-dimensional Fresnel Approximation at Analysis of Surface Roughness by Angle Speckle Correlation II. Experimental Results. *Journal of Modern Optics* [online]. 1995, **42**(10), 2081-2094 [cit. 2021-11-10]. ISSN 0950-0340. Dostupné z: doi:10.1080/09500349514551811

[24] ASTM F 1048-87, 'Standard Test Method for Measuring the Effective Surface Roughness of Optical Components by Total Integrated Scattering' (American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1999)

[25] SCHRÖDER, Sven, Alexander VON FINCK a Angela DUPARRÉ. Standardization of light scattering measurements. *Advanced Optical Technologies* [online]. 2015, **4**(5-6) [cit. 2021-11-10]. ISSN 2192-8584. Dostupné z: doi:10.1515/aot-2015-0041

[26] STOVER, John C. Optical scattering: measurement and analysis. 3rd ed. Bellingham: SPIE Press, c2012, xxiv, 307 p. ISBN 978-0-8194-9251-7

[27] Brilla, P. Realizace zařízení pro měření rozptylu elektromagnetického záření ve struktuře solárních článků. Brno, CZ, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/18134>.

[28] Nádaský, P. *Experimentální studium rozptylu světla na površích solárních článků*. Brno, CZ, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/10041>.

[29] Nádaský, P., Klus, J., Vodák, J., Šustek, S. a Ohlídál, M. Scattermeter for measurement of solar cells. *Conference: OPTICAL SYSTEMS DESIGN 2015: OPTICAL FABRICATION, TESTING, AND METROLOGY V*. Jena Germany: Proceedings of SPIE. 2015, sv. 9628. DOI: 10.1117/12.2190779.

[30] Klus, J. Optimalizace procedury měření optického záření rozptýleného pevnými tělesy prováděného scattermeterem. Brno, CZ, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/27951>.

[31] Fundamentals of Spatial Filtering. Online. In: Dostupné z: <https://www.newport.com/n/spatial-filters>. [cit. 2024-03-21].

[32] ŠUSTEK, Štěpán, Jiří VOHÁNKA, Ivan OHLÍDAL, Miloslav OHLÍDAL, Václav ŠULC, Petr KLAPETEK a Nupinder JEET KAUR. Characterization of randomly rough surfaces using angle-resolved scattering of light and atomic force microscopy. *Journal of Optics* [online]. 2021, **23**(10) [cit. 2021-11-10]. ISSN 2040-8978. Dostupné z: doi:10.1088/2040-8986/ac1f35

[33] EX ENVIFLEX. Čisté prostory. Online. EX ENVIFLEX. Čisté prostory. 2019. Dostupné z: <https://enviflex.cz/ciste-prostory/>. [cit. 2024-04-06].

[34] POTRUBNÍ VENTILÁTOR DALAP TURBINE P 315. Online. VZDUCHOTECHNIKA A VENTILÁTORY. Vzduchotechnika-ventilatory. 2013. Dostupné z: <https://www.vzduchotechnika-ventilatory.cz/potrubni-ventilator-dalap-turbine-p-315/>. [cit. 2024-04-06].

[35] IZHININ, Ihor I.; LOZOVY, Kirill A.; KOKHANENKO, Andrey P.; KHOMYAKOVA, Kristina I.; DOUHAN, Rahaf M. H. et al. Single-photon avalanche diode detectors based on group IV materials. Online. Applied Nanoscience. 2022, roč. 12, č. 3, s. 253-263. ISSN 2190-5509. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01667-0>. [cit. 2024-04-08].

[36] FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT. ALBATROSS-TT Table-Top System. Online. FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT. ALBATROSS-TT Table-Top System. 2015. Dostupné z: <https://www.vision.fraunhofer.de/en/technologies/projects/albatross-tt-table-top-system.html>. [cit. 2024-04-09].

[37] THORLABS. Si Avalanche Photodetectors. Online. THORLABS. Thorlabs.com. 2015. [cit. 2024-04-10] Dostupné z: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=6686](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6686).

[38] EDMUND OPTICS. Aluminum Off-Axis Parabolic Mirrors. Online. EDMUND OPTICS. <https://www.edmundoptics.com/>. 2020. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/p/508mm-dia-x-1906mm-e-fl-enhanced-aluminum-50-90-off-axis-mirror/39904/>. [cit. 2024-04-12].

[39] EDMUND OPTICS. Understanding Surface Quality Specifications. Online. EDMUND OPTICS. <https://www.edmundoptics.com/>. 2018. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/lasers/understanding-surface-quality-specifications/>. [cit. 2024-04-15].

[40] THORLABS. APD130A2/M - Si Avalanche Photodetector. Online. THORLABS. Thorlabs.com. 2015. [cit. 2024-04-18] Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=APD130A2/M>

[41] Jaworkova, M. Numerické modelování rozptylu laserového světla z drsných povrchů. Brno, CZ, 2020. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/192395>.

[42] MBM TECHNIK. Manual\_PD4C\_CANopen.pdf. Online. Dostupné z: <https://www.mbmtechnik.cz/elektromotory/krokove-motory/krokove-motory-s-integrovanym-rizenim/pd4-c-nema-23-24#ke-stazeni>. [cit. 2024-03-21].

[43] NANOTEC. PRECISION PLANETARY GEARBOXES. Online. Dostupné z: <https://en.nanotec.com/products/820-gple40-2s-20-f56>. [cit. 2024-04-21].

[44] Labsphere, Inc. - Spectralon Diffuse Reflectance Standards. [cit. 2023-11-09]. Dostupné z: <https://www.labsphere.com/product/spectralon-diffuse-reflectance-standards/>.

[45] ŠULC, Václav. Rozptyl světla z drsných povrchů pevných těles a na něm založená analýza topografie těchto povrchů. Brno, 2024. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Školitel prof. RNDr. Radim Chmelík, Ph.D. Dostupné z: [https://www.vut.cz/studenti/zav-prace?aid\\_redir=1](https://www.vut.cz/studenti/zav-prace?aid_redir=1)

[46] Vohánka, J., Ohlídal, I., Ohlídal, M., Šustek, S., Čermák, M., Šulc, V., Vašina, P., Ženíšek, J., Franta, D., Optical characterization of non-stoichiometric silicon nitride films exhibiting combined defects. *Coatings*, 2019, **9**(7), 416, ISSN 2079-6412. Dostupné z: doi: 10.3390/coatings9070416

[47] Vohánka, J., Šustek, Buršíková, V., Šklíbová, V., Šulc, V., Homola, V., Franta, D., Čermák, M., Ohlídal, M., Ohlídal, I., Determining shape of thickness non-uniformity using variable-angle spectroscopic ellipsometry. *Applied Surface Science*, 2020, 534 (SI: SURFINT-SREN VI), 147625. ISSN 0169-4332. Dostupné z: doi: 10.1016/j.apsusc.2020.147625

[48] Ohlídal, I., Vohánka, J., Buršíková, V., Šulc, V., Šustek, Š., Ohlídal, M., Ellipsometric characterization of inhomogeneous thin films with complicated thickness non-uniformity: application to inhomogeneous polymer-like thin films. *Optics Express*, 2020, 28(24), s. 36796-36811. ISSN 1094-4087. Dostupné z: doi:10.1364/oe.412043

## 20. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Odkaz na stranu	Popis
$w(z)$	14	<i>Jednorozměrné rozdělení hustoty pravděpodobnosti výšek nerovností</i>
$\xi(x, y)$	14	funkce popisující topografii náhodně drsného povrchu
$\bar{w}(z')$	14	<i>Jednorozměrné rozdělení hustoty pravděpodobnosti sklonů povrchu</i>
$w(z_1, z_2, \tau)$	14	dvojměrné rozdělení hustoty pravděpodobnosti výšek nerovností
$C(\tau_x)$	14	normovaná autokorelační funkce (autokorelační koeficient)
$PSD(f_x, f_y)$	14	Výkonová spektrální hustota (power spectral density)
$\sigma$	15	<i>drsnost</i>
$M_z$	15	druhý centrální moment náhodné veličiny $z$
$AF(\tau)$	16	autokorelační funkce
$T$	16	autokorelační vzdálenost
$TS$	18	Celkový rozptyl (Total Scatter)
$P_s$	18	výkon světla rozptýleného zpět do celé hemisféry nad povrchem
$P_i$	18	je výkon světelného svazku na povrch dopadajícího
$TIS$	18	Celkový integrovaný rozptyl (Total Integrated Scatter)
$P_{diffuse}$	18	výkon světla difúzně rozptýlený povrchem
$P_{specular}$	18	výkon světla rozptýlený v zrcadlovém směru
$ARS(\theta_s, \phi_s)$	18	Rozptylová distribuční funkce (angle-resolved scattering)
$\theta_s$	18	Úhel směru rozptýleného výkonu

$\phi_s$	18	Úhel směru rozptýleného výkonu
$\Delta\Omega_s$	18	prostorový úhel, (přijímací úhel detektoru),
$P_i$	18	výkon dopadajícího světelného svazku
$\lambda$	19	Vlnová délka elektromagnetického záření
$\varepsilon$	19	dielektrická funkce
$f$	19(2.18)	prostorová frekvence
sr	22	Steradián, jednotka prostorového úhlu
$\delta I$	30	fluktuace v intenzitě světla
$e$	30	Eulerovo číslo, $e = 2,71828 \dots$
$M_k$	78	krouťící moment motoru
$\varepsilon_u$	79	úhlové zrychlení
$I_g$	79	moment setrvačnosti k ose otáčení motoru
$F_p$	81	síla od pružiny
$k$	81	tuhost pružiny
$\Delta l$	81	prodloužení pružiny
$i$	91	Počet měření v jedné poloze detektoru
$\overline{HD}_D$	91	Průměrná hodnota $i$ měření na jedné pozici detektoru při zacloněném laserovém svazku
$\overline{HD}_S$	91	Průměrná hodnota $i$ měření na jedné pozici detektoru z druhého kanálu
$\overline{HD}_P$	91	Průměrná hodnota $i$ měření na jedné pozici detektoru při nezacloněném laserovém svazku
$HD$	91	Výsledná hodnota detektoru
$K_{cal}$	99	kalibrační koeficient pro SMIII

## 21. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Odkaz na stranu	Význam zkratky
VIS	22	Visible spectrum – odkazuje na okem viditelnou část elektromagnetického záření – světlo
LKO	24	Laboratoři koherenční optiky
SM	24	Scattermeter – přístroj pro měření rozptylu záření
He–Ne	28	Helium – Neonový
TT	42	Table Top – stolní verze přístroje
APD	60	Lavinová Dioda (avalanche photodiode)
PM	61	Fotonásobič (photomultiplier)

## 22. SEZNAM OBRÁZKŮ

OBRÁZEK 2.1: VÝZNAM PARAMETRŮ PŘI MĚŘENÍ $ARS(\theta_s, \phi_s)$ .....	18
OBRÁZEK 4.1: 3D MODEL PRVNÍHO PŘÍSTROJE SCATTERMETER .....	24
OBRÁZEK 4.2: KONSTRUKČNÍ NÁVRH NOVÉHO SCATTERMETRU SM2 V DIPLOMOVÉ PRÁCE, P. BRILLA 2010 .....	25
OBRÁZEK 4.3: SCATTERGRAM VZORKU IPA-1B ZMĚŘENÝ NA SM I (VLEVO) A SCATTERGRAM VZORKU IPA-1B ZMĚŘENÝ NA SM II (VPRAVO) . .....	26
OBRÁZEK 4.4: VIZUALIZACE KONFIGURACE BODŮ STARÉ MĚŘICÍ PROCEDURY.....	26
OBRÁZEK 4.5: POZICE DETEKTORU. ....	27
OBRÁZEK 5.1: SCHÉMA PŮVODNÍHO SKATEROMETRU SMII:.....	28
OBRÁZEK 5.2: SCHÉMA PROSTOROVÉHO FILTRU.....	29
OBRÁZEK 5.3: ZNÁZORNĚNÍ ROZLOŽENÍ INTENZITY V LASEROVÉM SVAZKU .....	30
OBRÁZEK 5.4: ZNÁZORNĚNÍ ROZLOŽENÍ INTENZITY LASEROVÉHO SVAZKU ROVINĚ OHNISKA .....	30
OBRÁZEK 5.5: SCHÉMA SKATEROMETRU SMII:.....	31
OBRÁZEK 5.6: FOTOGRAFIE ZADNÍ ČÁSTI GONIOMETRU. MĚDĚNÁ NOSNÁ ČÁST GONIOMETRU S NOVÝM MOTOREM A JUSTACÍ VE SMĚRECH X, Y A Z ULOŽENÍ VZORKU .....	33
OBRÁZEK 5.7: FOTOGRAFIE UPRAVENÉHO GONIOMETRU. ....	34
OBRÁZEK 5.8: ZÁVISLOST ŠUMU NA INTEGRAČNÍM ČASE. SROVNÁNÍ ŠUMU PŘED ÚPRAVOU ŘÍDÍCÍ JEDNOTKY A PO ÚPRAVĚ. ....	35
OBRÁZEK 5.9: VÝSLEDEK MĚŘENÍ LINEÁRNÍ ZÁVISLOSTI HODNOT DETEKTORU NA INTEGRAČNÍM ČASE ...	36
OBRÁZEK 5.10: POČÍTAČEM VYTVOŘENÉ ZOBRAZENÍ SMII .....	37
OBRÁZEK 5.11: ARS, VZOREK 1 .....	39
OBRÁZEK 5.12: ARS, VZOREK 2 .....	40
OBRÁZEK 5.13: ARS, VZOREK 3 .....	40
OBRÁZEK 6.1: SROVNÁVACÍ MĚŘENÍ SMII S PŘÍSTROJEM ALBATROS TT MULTIVRSTEVNÉHO SYSTÉMU NA PODLOŽCE N-BK7 .....	43
OBRÁZEK 6.2: BEAM DAMPER .....	44
OBRÁZEK 6.3: VÝSLEDEK MĚŘENÍ VLIVU ROZPTYLU LASEROVÉHO SVAZKU NA PRACHOVÝCH ČÁSTICÍCH VE VZDUCHU A KOMPONENTECH PŘÍSTROJE.....	45
OBRÁZEK 6.4: INSTALACE VZDUCHOVÉHO SYSTÉMU PRO ČISTĚNÍ VZDUCHU OD MIKROČÁSTIC PRACHU..	46

OBRÁZEK 6.5: FOTOGRAFIE ROZPTYLU LASEROVÉHO SVAZKU NA ČÁSTICÍCH PRACHU VE VZDUCHU BEZ VZDUCHOTECHNIKY .....	47
OBRÁZEK 6.6: FOTOGRAFIE ROZPTYLU LASEROVÉHO SVAZKU NA ČÁSTICÍCH PRACHU VE VZDUCHU S INSTALOVANOU VZDUCHOTECHNIKOU .....	47
OBRÁZEK 6.7: PŘEPIS NORMY ISO 14644-1.....	48
OBRÁZEK 6.8: VLEVO MODEL KONSTRUKCE DVOU PŘEDFILTRŮ .....	49
OBRÁZEK 6.9: VÝŇATEK Z NORMY ČSN ISO 16890 POPIS JEDNOTLIVÝCH TŘÍD FILTRACE .....	50
OBRÁZEK 6.10: CHARAKTERISTIKY VENTILÁTORU DALAP TURBINE P 315 STARK Z KATALOGU VÝROBCE .....	51
OBRÁZEK 6.11: FILTRAČNÍ JEDNOTKA.....	52
OBRÁZEK 6.12: MODEL KONSTRUKCE BEZPRAŠNÉ BUŇKY.....	55
OBRÁZEK 6.13: FOTOGRAFIE POSTAVENÉ BEZPRAŠNÉ BUŇKY S FILTRAČNÍ JEDNOTKOU V HORNÍ ČÁSTI ..	56
OBRÁZEK 6.14: POČÍTAČEM VYTVOŘENÉ ZOBRAZENÍ BEZPRAŠNÉ BUŇKY KOLEM CELÉHO PŘÍSTROJE .....	57
OBRÁZEK 8.1: SCHÉMA VRSTEV V LAVINOVÉ DIODĚ .....	61
OBRÁZEK 8.2: ARS PRO RŮZNÉ POVRCHY, MĚŘENO V FRAUNHOFER INSTITUTE FOR APPLIED OPTICS AND PRECISION ENGINEERING IOF .....	63
OBRÁZEK 8.3: DETEKTOR S LAVINOVOU DIODOU .....	64
OBRÁZEK 9.1: 3D MODEL NÁVRHU KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ ZA POMOCÍ TRANSMISNÍ OPTIKY .....	67
OBRÁZEK 9.2: ROZPTYL NA ROZHRANÍCH ČOČKY S DETAILEM NA ROZPTYL V OBJEMU MATERIÁLU ČOČKY. .....	68
OBRÁZEK 9.3: SPEKTRÁLNÍ ZÁVISLOST ODRAZIVOSTI HLINÍKOVÝCH ZRCADEL S VRSTVOU PRO ZVÝŠENÍ ODRAZIVOSTI V OBLASTI UV.....	69
OBRÁZEK 9.4: ZNÁZORNĚNÍ DVOU PARAMETRŮ KVALITY POVRCHŮ PODLE NORMY MIL-PRF-13830B. .....	70
OBRÁZEK 9.5: SCHÉMATICKÉ USPOŘÁDÁNÍ OPTICKÝCH KOMPONENT PRO PŘÍPRAVU LASEROVÉHO SVAZKU.....	72
OBRÁZEK 9.6: KONSTRUKČNÍ ULOŽENÍ OPTIKY .....	73
OBRÁZEK 10.1: ROZMĚRY DETEKTORU .....	74
OBRÁZEK 10.2: SCHÉMA OPTICKÉHO NADSTAVCE SE ZRCADLEM.....	75
OBRÁZEK 10.3: SCHÉMA OPTICKÉHO NADSTAVCE S OPTICKÝM VLÁKNEM .....	76
OBRÁZEK 10.4: SESTAVENÁ KONSTRUKCE GONIOMETRU NAVRŽENÁ V DIPLOMOVÉ PRÁCI [32].....	78
OBRÁZEK 10.7: DÉLKA RAMENA LR.....	80

OBRÁZEK 10.8: FOTOGRAFIE RAMENA POLOHUJÍCÍ AZIMUT .....	82
OBRÁZEK 10.9: FOTOGRAFIE RAMENA POLOHUJÍCÍ POLEDNÍK.....	83
OBRÁZEK 11.1: MĚŘENÍ ZMĚNY VÝKONU LASERU V ZÁVISLOSTI NA ČASE. ....	87
OBRÁZEK 11.2: ZOBRAZENÍ PŘÍSTROJE Z BOKU S DETAILEM NA CHLADÍCÍ JEDNOTKU.....	88
OBRÁZEK 11.3: DETAILNĚJŠÍ POHLED NA DRUHÝ KANÁL UVNITŘ PŘÍSTROJE .....	90
OBRÁZEK 11.4: RELATIVNÍ ZMĚNA INTENZITY LASEROVÉHO SVAZKU V ČASE .....	92
OBRÁZEK 12.1: NAFUKOVATELNÉ VZDUCHOVÉ MĚCHY NA KTERÝCH JE ULOŽENA MRAMOROVÁ DESKA..	93
OBRÁZEK 13.1: MECHANICKÉ DORAZY RAMEN GONIOMETRU. ŽLUTĚ ZVÝRAZNĚNY ZÁSUVNÉ TYČE .....	96
OBRÁZEK 13.2: SOFTWARE PRO OVLÁDÁNÍ SM3 .....	97
OBRÁZEK 13.3: ETALON POUŽÍVANÝ PRO KALIBRACI PŘÍSTROJE PŘED MĚŘENÍM .....	99
OBRÁZEK 13.4: ARS SPECTRALONU. POROVNÁNÍ DAT ŠPATNĚ ULOŽENÉHO VZORKU.....	100
OBRÁZEK 13.5: VLEVO ZNÁZORNĚNO MIMOOSÉ ULOŽENÍ SPECTRALONU. V PRAVO JE POVRCH SPECTRALONU V OSE GONIOMETRU .....	101
OBRÁZEK 14.1: SROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT NA SM3 A V JENĚ .....	104
OBRÁZEK 14.2:GRAF ŠUMU.....	106