

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra experimentální fyziky

a

Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého a Fyzikálního
ústavu AVČR, v. v. i.



Rigorózní práce

**Integrační koule jako zdroj uniformního
záření**

Jméno: Mgr. Jan Šupík

Konzultant: Mgr. Miroslav Pech, Ph.D.

„Na konci poznávacího procesu nevíme sice nic, ale zato to víme správně.“

J. Cimrman k teorii externismu.

Děkuji Mgr. Miroslavu Pechovi, Ph.D. za vedení této práce, za naprogramování ovládacího softwaru a za možnost konzultací. Děkuji prof. RNDr. Miroslavu Hrabovskému, DrSc. za umožnění vypracování této rigorózní práce a za vstřícný přístup během mého studia. Dále děkuji RNDr. Pavlovi Horváthovi, Ph.D. za spolupráci a konzultace při provádění experimentálních prací. Děkuji také Mgr. Martinovi Vaculovi za poskytnutí výsledků provedených simulací. Závěrem děkuji všem ostatním pracovníkům Společné laboratoře optiky UP a FZÚ AVČR, kteří se na této práci jakkoliv podíleli.

Tato práce vznikla za podpory projektů IGA_PrF_2019_008, MŠMT č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/17_049/0008422 a MŠMT č.8J18DE008.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovával samostatně a že jsem použil zdroje, které uvádím v seznamu použité literatury.

V Olomouci dne 18.05.2020

Podpis

Jan Šupík

Obsah

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Úvod | 5 |
| 2 | Teoretická část | 6 |
| 2.1 | Související radiometrické a fotometrické veličiny | 6 |
| 2.2 | Přístroje používané k charakterizaci světelných zdrojů | 8 |
| 2.3 | Integrační koule (IK) a její popis | 13 |
| 2.4 | Matematická teorie integrační koule | 14 |
| 2.5 | Využití integrační koule | 18 |
| 3 | Experimentální část | 30 |
| 3.1 | Experimentální vybavení | 30 |
| 3.2 | Experimentální sestavy | 31 |
| 3.3 | Experimentální procedury | 36 |
| 3.4 | Problémy při měření a zdroje chyb | 38 |
| 4 | Výsledky a diskuze | 42 |
| 4.1 | Měření prostorové homogenity | 42 |
| 4.2 | Měření úhlové homogenity | 59 |
| 5 | Závěr a výhledy do budoucna | 67 |
| 6 | Reference | 70 |

1 Úvod

Hlavním tématem této práce je charakterizace integrační koule (IK) a nalezení metody, kterou by se daly měřit vyzařovací charakteristiky s ohledem na změny prováděné v její konstrukci. Integrační koule (IK, viz obr. 1.) má více využití, která budou popsána dále. Jedno z nich, i když oproti ostatním využitím málo používané, je použití IK jako homogenního (uniformního) zdroje světla, který lze použít pro kalibraci detektorů světla nebo jiného záření. Homogenní zdroj záření se vyznačuje tím, že záření, které vydává, se v daném místě (rovině) pozorování nemění. Typicky se vyhodnocuje jeho intenzita nebo radiance. Aby tato kalibrace detektorů byla možná, je potřeba nejdříve kalibrovat samotnou IK a přesně kvantifikovat parametry jejího vyzařování.

Cílem této práce je popsat IK, její vlastnosti a možnosti jejího využití v praxi. V této práci bude studována homogenita vyzařování IK na základě měření rozložení vyzařovaného světelného toku. V teoretické části budou nejdříve zmíněny používané radiometrické a fotometrické veličiny a přístroje používané pro charakterizaci zdrojů světla. Na základě informací získaných z literatury bude teoreticky popsán vliv geometrických rozměrů experimentu na homogenitu světelného toku vyzařovaného IK (zkráceně homogenitu), konkrétně vliv velikosti průměru IK a průměru výstupního portu. Dále bude popsán vliv vzdálenosti IK od roviny pozorování (umístění detektoru) a velikosti úhlu sevřeného osou detektoru a normálou výstupního portu IK na homogenitu IK. Experimentálně bude změřena homogenita IK v majetku Společné laboratoře optiky UP a FZÚ AVČR v závislosti na průměru výstupního portu, který bude měněn pomocí omezovačů, a úhlu pozorování. Přítomnost těchto omezovačů průměru by měla teoreticky zvýšit homogenitu IK. Bude také zkoumán vliv přítomnosti ochranných krytů ve výstupním portu koule, které by zamezily případné kontaminaci vnitřku koule nečistotami z okolního prostředí. Účel těchto modifikací a měření je, aby tyto změny parametrů v budoucnu vedly k vytvoření zařízení, které umožňuje praktickou kalibraci detektorů světla.



Obr. 1: Příklad integrační koule (IK). Převzato z <http://www.labsphere.com>.

2 Teoretická část

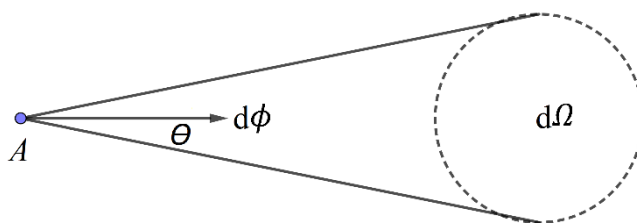
2.1 Související radiometrické a fotometrické veličiny

Radiometrie a fotometrie jsou odvětví optiky zabývající se měřením elektromagnetického záření [1, 2, 3] (z těchto zdrojů pocházejí také definice níže uvedených veličin). Radiometrie se zabývá elektromagnetickým zářením v celém spektru vlnových délek a fotometrie se úžeji zaměřuje na světlo, jeho vnímání lidským okem a v používaných jednotkách citlivost oka zohledňuje.

Výkon záření vycházejícího z bodového zdroje se nazývá zářivý tok ϕ a jeho jednotkou je Watt. Tento tok vychází ze zdroje rovnoměrně všemi směry do prostorového úhlu 4π . Pro kvantifikaci výkonu záření vyzařovaného do menšího prostorového úhlu se zavádí zářivost (zář) I [$\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$] vztahem

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega}, \quad (1)$$

kde $d\phi$ značí zářivý tok bodového zdroje A, který je vyzařován do prostorového úhlu $d\Omega$ pod úhlem θ . Zářivost je graficky znázorněna na obr. 2.

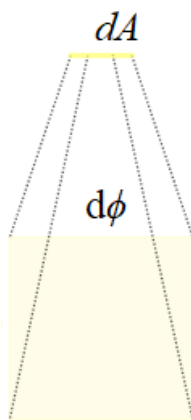


Obr. 2: Schematické znázornění definice zářivosti (bodový zdroj A).

Je-li zdroj plošný, je potřeba brát v úvahu velikost jeho plochy. To je vyjádřeno veličinou intenzita ozáření E [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], pro kterou platí

$$E = \frac{d\phi}{dA}, \quad (2)$$

kde dA značí velikost plochy zdroje. Intenzita ozáření je graficky znázorněna na obr. 3.



Obr. 3: Schematické znázornění definice intenzity ozáření.

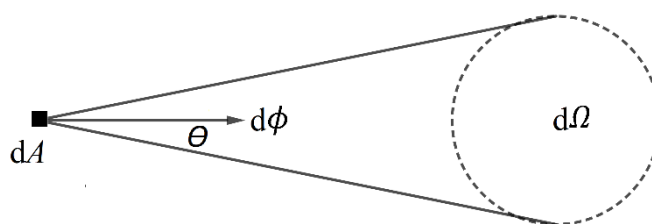
Definuje se také intenzita vyzařování H [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], která vyjadřuje zářivý tok vyzařený do poloprostoru 2π na jednotku plochy.

$$H = \frac{d\phi (2\pi)}{dA}. \quad (3)$$

Úhlová závislost v případě plošného zdroje je vyjádřena veličinou zář (radiance) L [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$]. Ta je definována jako

$$L = \frac{dI}{dA \cos\theta}, \quad (4)$$

kde θ je úhel mezi normálou k ploše zdroje a směrem šíření. Zář plošného zdroje dA je graficky znázorněna na obr. 4.



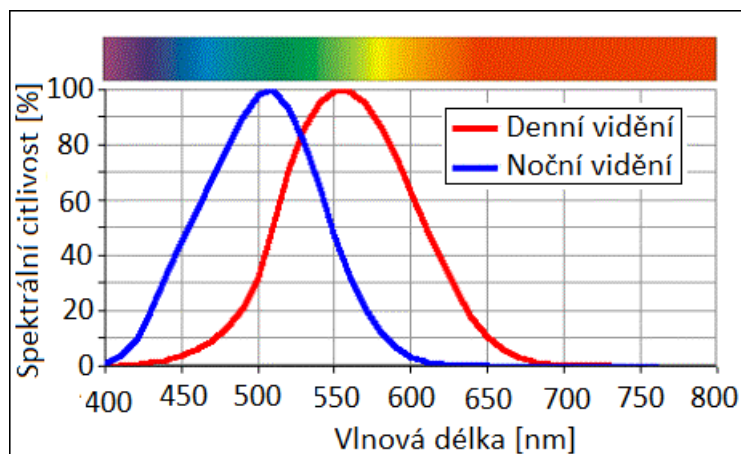
Obr. 4: Schematické znázornění definice záře (plošný zdroj dA).

V případě, kdy je třeba znát spektrální závislosti výše uvedených veličin, se definují příslušné spektrální hustoty, např. spektrální hustota zářivého toku ϕ_λ odpovídající zářivému toku na jednotkový frekvenční interval kolem vlnové délky λ .

Analogicky výše uvedeným radiometrickým veličinám se definují fotometrické veličiny. Zářivému toku ϕ [W] odpovídá světelný tok ϕ_v , jehož jednotkou je lumen [lm]. Zářivý tok lze na světelný tok přepočítat pomocí citlivosti oka pro denní (resp. noční) vidění, která je vyjádřena funkcí spektrální citlivosti $V(\lambda)$. Ta je tabelována a lze ji najít např. v normách ČSN nebo DIN. [1] Její průběh je znázorněn na obr. 5. Podle něj je lidské oko nejcitlivější při denním, resp. nočním vidění na vlnovou délku 555 nm, resp. 530 nm. Tento posun citlivosti oka se nazývá Purkyňův jev. Lumen se následně definuje tak, že na této vlnové délce odpovídá zářivý tok 1 W světelnému toku 673 lm pro denní vidění a světelný tok je spojen se spektrální hustotou zářivého toku vztahem

$$\phi_v = K_m \int V(\lambda) \phi_\lambda d\lambda, \quad (5)$$

kde konstanta K_m odpovídá maximu účinnosti vidění. Její hodnota pro denní vidění je $673 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$.



Obr. 5: Graf funkce spektrální citlivosti oka při denním a nočním vidění. Upraveno z [4].

V analogii mezi radiometrickými a fotometrickými veličinami lze pokračovat dále. Radiometrické veličině zářivost [$\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$] odpovídá fotometrická veličina svítivost I_v s jednotkou [$\text{lm}\cdot\text{sr}^{-1}$]. Tato jednotka se nazývá kandela [cd] a je jednou ze základních jednotek soustavy SI. Radianci [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$] odpovídá jas L_v [$\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$], intenzitě ozáření [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] odpovídá osvětlení E_v [$\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}$]. Tato jednotka se nazývá lux [lx]. Schematická znázornění fotometrických veličin svítivost, jas a intenzita osvětlení odpovídají schematickým znázorněním radiometrických veličin zářivost, zář a intenzita ozáření uvedených na obr. 2, 3 a 4 a nejsou zde již znovu uváděna.

Všechny výše zmíněné jednotky jsou přehledně uvedeny v tabulce 1. Index „v“ značí, že se tyto jednotky týkají fotometrických veličin a vizuálního vnímání elektromagnetického záření, světla, lidským okem. Vhodná je také poznámka, že názvosloví radiometrických a fotometrických veličin není ustálené a může se lišit podle použité literatury.

| Radiometrické veličiny | | | Fotometrické veličiny | | |
|------------------------|----------|---|-----------------------|----------|--|
| Název | Označení | Jednotka | Název | Označení | Jednotka |
| Zářivý tok | ϕ | W | Světelný tok | ϕ_v | lm |
| Zářivost (zář) | I | $\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$ | Svítivost | I_v | $\text{lm}\cdot\text{sr}^{-1}$ (cd) |
| Intenzita vyzařování | M | $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ | Intenzita světlení | M_v | $\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}$ (lx) |
| Intenzita ozáření | E | $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ | Intenzita osvětlení | E_v | lx |
| Radiance | L | $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ | Jas | L_v | $\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ |

Tabulka 1: Přehled radiometrických a fotometrických veličin definovaných výše.

2.2 Přístroje používané k charakterizaci světelných zdrojů

Pro správné používání světelných zdrojů je třeba znát jejich vyzařovací charakteristiky a případně je pro kontrolu pravidelně přeměřovat, aby nedocházelo k jejich změnám a nežádoucím jevům. Základní měření světelných zdrojů se odvíjí od měření jejich zářivého a světelného toku pomocí radiometru a fotometru. Pro jejich konstrukci se využívá několik typů

elektrických snímačů na bázi polovodičů [5], jejichž elektrické charakteristiky (odpor, napětí a proud) jsou závislé na dopadajícím světle. Změny těchto charakteristik po dopadu světla jsou pomocí vyhodnocovací jednotky převedeny na měřenou veličinu. Mezi tyto součástky patří fotorezistory, fototyristory, fototranzistory, fotodiody a fotočlánky. Fotočlánek je obecný název pro elektrickou součástku citlivou na světlo, která převádí intenzitu dopadajícího světla na elektrický signál. Je proto nejpoužívanější komponentou pro tento účel. Výše uvedené komponenty tvoří základ pro výrobu složitějších přístrojů.

Pro měření se používají dvě základní metody: absolutní a relativní [6]. Absolutní měření jsou prováděna detektorem kalibrovaným vzhledem k používaným jednotkám, který přímo zobrazuje reálnou hodnotu měřené veličiny. Naproti tomu relativní detektory udávají výsledky měření po porovnání výsledků naměřených detektorem při použití měřeného a známého referenčního zdroje světla se stejným spektrálním složením, jako má měřený svazek. Historicky byl preferován druhý z těchto přístupů. Jako subjektivní detektor bylo používáno lidské oko, které porovnávalo měřený svazek s referenčním, a jako referenční zdroj se používala modelová svíce, která vyzařovala za daných podmínek do daného fixního prostorového úhlu. Takto vznikla jednotka kandela.

Aby bylo měření objektivní a nezávislé na pozorovateli, lidské oko bylo nahrazeno detektorem na bázi elektrických součástek uvedených výše a modelová svíce výbojovými lampami, nověji LED. Světelný svazek o známých parametrech je změřen referenčním detektorem a tímtež detektorem je poté změřen i měřený svazek.

Pro měření dalších radiometrických a fotometrických veličin a charakteristik zdrojů světla je nutná kombinace radiometru (fotometru) s dalšími komponentami. Mezi používané přístroje patří:

a) **Goniofotometr:** Goniofotometr [7] se používá pro měření úhlových charakteristik vyzařování světelných zdrojů. Při měření dochází k rotaci zdroje světla nebo detektoru okolo dvou vzájemně kolmých os, což umožňuje provádět měření v různých rovinách a pod různými úhly. Takto je možné měřit světelný tok a svítivost zdrojů. Je-li nainstalován barevný senzor, lze také měřit barevnou teplotu a barevnou homogenitu zdrojů. [8] Goniofotometry lze podle geometrie jejich měření subjektivně rozdělit na několik typů (typy 1-3, resp. A-C jsou zobrazeny na obr. 6).

1. Typ A: Horizontální osa je fixovaná a rotuje osa k ní kolmá. Při měření rotuje zdroj světla kolem vertikální osy.
2. Typ B: Vertikální osa je fixovaná a rotuje osa horizontální. Měření se provádí rotací světelného zdroje kolem vertikální osy.
3. Typ C: Fixní vertikální a rotující horizontální osa. Měření jsou prováděna v rovině kolmé k horizontální rovině nebo na kuželové ploše. Tento typ odpovídá typu B se světelným zdrojem otočeným o 90°.



Obr. 6: Schematická uspořádání goniofotometrů typů A, B, C v pořadí zleva. Převzato z [7].

4. Goniofotometr s rotujícím detektorem: Při měření je zdroj světla umístěn ve fixní poloze a detektor rotuje kolem dvou vzájemně kolmých os. Tento typ ovšem není příliš často využíván.
5. Zrcadlový goniofotometr: Zrcadlové goniofotometry používají rotující zrcadlo, které nasměruje svazek z měřeného zdroje na detektor. Tyto goniofotometry jsou vývojově starší než ostatní goniofotometry.
6. Lavicový goniofotometr: Tento goniofotometr vzniká kombinací optické lavice a goniofotometru typu A, B nebo C, nejčastěji C, který je na tuto lavici umístěn. Naproti němu je umístěn zdroj světla. Jeho výhodou jsou malé rozměry, díky čemuž je skladný a přenosný a pro použití nejsou nutné prostorné laboratorní podmínky. Naproti tomu je nevhodný pro měření charakteristik zdrojů světla na velké vzdálenosti, např. reflektorů aut [9].

Výše uvedené dělení je ovšem pouze orientační a každý goniofotometr vyžaduje vlastní konstrukční řešení, které může být i kombinací více uvedených typů. Některé goniofotometry mohou obsahovat také spektrometr.

b) Luxmetr a jasoměr: Luxmetr je zařízení měřící osvětlení [5]. Detektor mívá většinou tvar rovinné plochy, ale bývá také prováděno měření válcového, (polo)kulového, aj. osvětlení. Luxmetr se používá např. pro posuzování vhodnosti prostorů pro daný účel používání. Luxmetry bývají také vybaveny tzv. kosinovým nastavcem, který se používá pro korekci nekolmého dopadu světla.

Příklad luxmetru je uveden na obr. 7.



Obr. 7: Příklad luxmetru. Převzato z www.expondo.cz. Rozměry výrobku (15,5×6×3) cm³.

Jasoměr je zařízení sloužící pro měření jasu světelných zdrojů [5]. Princip funkce je stejný jako u luxmetru, ale navíc je luxmetr vybaven kosinovým nástavcem, který zajišťuje korekci nekolmého dopadu světla na detektor v požadovaném prostorovém úhlu. Bez něj dochází k chybě, která je při úhlu dopadu 30° 6 % a 45° více než 15 % a s rostoucím úhlem se dále zvětšuje. Příklad jasoměru je uveden na obr. 8.



Obr. 8: Příklad jasoměru. Převzato z www.anamet.cz/jasomery. Výrobce neudává rozměry výrobku.

Existují také přístroje plnící zároveň funkci luxmetrů i jasoměrů. Tyto přístroje se nazývají fotometry. Luxmetry, jasoměry i fotometry mívají podobu malého přenosného zařízení o přibližné velikosti lidské ruky, kterým je při měření snímán zdroj světla.

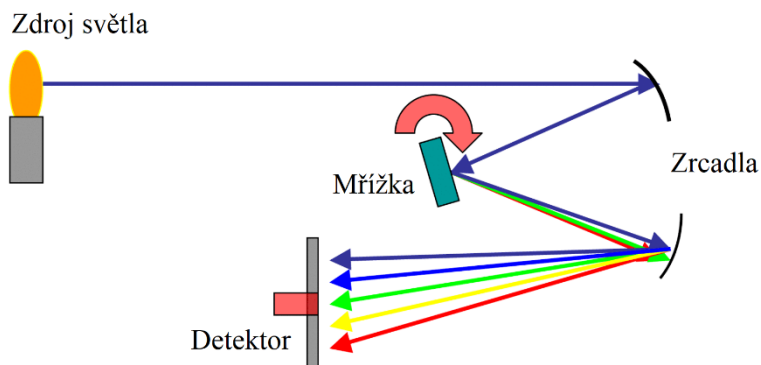
- c) **Kolorimetr a optický spektrometr:** Často je také potřeba znát spektrální složení světla. K tomu se používají kolorimetr a optický spektrometr. Kolorimetr se skládá z barevných filtrů, které rozdělí měřený světelný svazek na jednotlivé trichromatické složky [10, 11]. Tyto trichromatické složky jsou poté separátně detekovány. Kolorimetr se využívá mj. také pro kalibraci barevných televizí a monitorů [12]. Novější kolorimetry bývají také vybaveny zdrojem světla, kterým se ozařuje zkoumaný povrch, a je měřeno odražené světlo [11]. Příklad kolorimetru je uveden na obr. 9.



Obr. 9: Příklad kolorimetru. Převzato z [11].

Naproti tomu optický spektrometr je založen na rozložení světla na své spektrální komponenty pomocí monochromátoru, např. optické mřížky. [13] Po průchodu mřížkou jsou jednotlivé světelné komponenty detekovány, např. polem diod. Spektrometry jsou

vhodné pro měření světla z málo divergentních zdrojů. Používají se také pro analýzu spekter chemických látek. Schéma spektrometru je uvedeno na obr. 10.

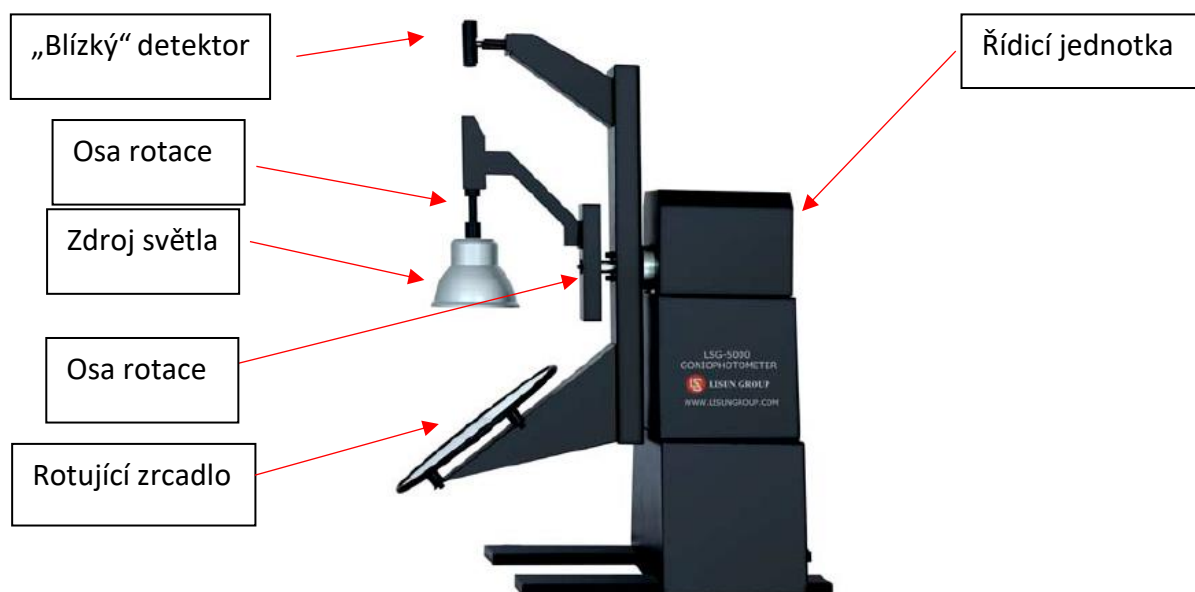


Obr. 10: Schéma optického spektrometru s optickou mřížkou. Upraveno z [13].

Komponenty uvedené na tomto obrázku mohou být obsažené v jednom přenosném zařízení, do kterého bývá světlo přivedeno optickým kabelem a které umožňuje komunikaci s PC přes USB rozhraní.

- d) **Integrační koule (IK):** Viz obr. 1. Podrobný princip IK bude popsán v dalších částech této práce. Pro jednoduchost lze říct, že jejím principem je „zintegrovat“ a sečíst zářivý tok, který do ní vstupuje. Po interakci světla s IK je zářivý tok konstantní v celém jejím objemu, což ho umožňuje pomocí radiometru změřit. Výhoda IK je, že měřené zdroje světla mohou být konvergentní i divergentní. Při měření mohou být tyto zdroje umístěné uvnitř koule, v portu IK nebo mimo kouli.

Výše uvedené přístroje (IK, goniofotometr a spektrofotometr) lze vzájemně funkčně kombinovat. Vzniká tak např. goniospektrometr, který lze ještě používat v kombinaci s IK [14]. Příklad komerčně vyráběného goniospektrometru je uveden na obr. 11.



Obr. 11: Příklad goniospektrometru. Zařízení také obsahuje detektor ve větší vzdálenosti od něj, který zde není zobrazen. Převzato ze [14].

2.3 Integrační koule (IK) a její popis

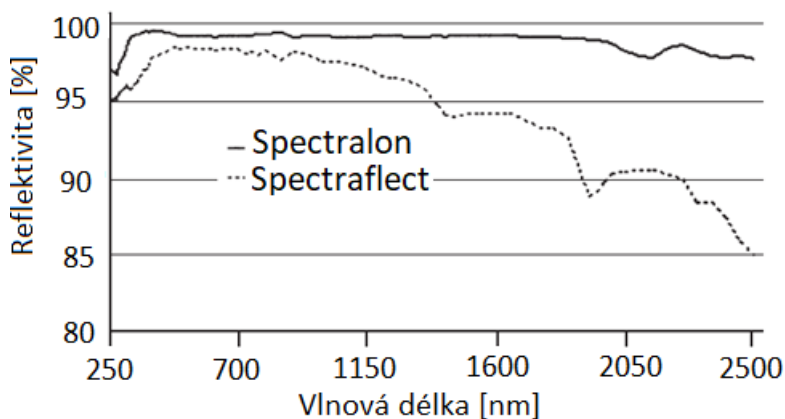
Integrační koule (IK) byla zkonstruována roku 1900 R. Ulbrichtem [15, 16] a v německy psané literatuře bývá proto nazývána Ulbrichtova sféra. IK se skládá z dutiny (koule), která je obvykle složená ze dvou polokoulí, což umožňuje provádět modifikace uvnitř koule, případně dovnitř umísťovat potřebné vybavení. Celý interiér koule je pokryt difúzně-odrazným materiálem, který do svého okolí odráží dopadající záření, a tím umožňuje vytvoření homogenního světelného toku uvnitř této koule, je-li přítomen zdroj světla. Tento zdroj může být umístěn v samotné kouli (výbojová lampa, LED nebo žárovka). Světlo může být také do IK přivedeno z okolního prostředí a může být použito také optické vlákno. Zvláštní kapitola je použití satelitní integrační koule jako zdroje světla pro jinou integrační kouli (viz dále). Do stěny integrační koule je vytvořeno několik otvorů (tzv. portů). Největší z nich se nazývá vstupní nebo výstupní port podle toho, jestli jím světlo do koule vstupuje, nebo vystupuje ven. V případě výstupního portu jej lze po formální stránce označit za aperturu soustavy. Ostatní porty (menší) slouží pro umístění dalších zařízení, jako jsou světelné zdroje, detektory světla nebo slouží pro umístění měřených vzorků. Mohou také plnit jiné specifické účely v experimentu. Ideální IK splňuje několik podmínek [17]:

1. Všechny porty koule mají infinitezimální velikost.
2. Všechny objekty a clonky uvnitř koule jsou také infinitezimálně malé a jejich vliv na záření lze po prvním odrazu od stěny IK záření zanedbat.
3. IK je zevnitř pokryta materiálem s následujícími ideálními vlastnostmi [16]:
 - A. Je difúzně-odrazný v souladu s kosinovým zákonem* v rozsahu vlnových délek používaných při experimentu.
 - B. Neovlivňuje spektrální složení odrážejícího se záření.
 - C. Jeho vlastnosti se nemění v závislosti na teplotě.
 - D. Je tuhý a poněkud pružný.

Historicky se IK povrstvovaly práškovým MnO nebo BaSO₄ (také ve formě nátěru), případně z kondenzovanými parami MnO. Nověji se používají také materiály na bázi polytetrafluoretylenu (PTFE) [18]. PTFE je používán více společnostmi pod různými obchodními názvy: Spectralon (Labsphere, Inc.), Fluorilon (Avian technologies LLC), Op-Di-Ma (Gigahertz-Optik GmbH) nebo Zenith (Sphere Optics GmbH) [19].

Z materiálů používaných v dnešní době jsou pro tuto práci nejdůležitější polymerní spectralon na bázi PTFE [20, 22] a Spectrafect [21] na bázi BaSO₄, který se nanáší ve formě nátěru. Oba tyto materiály byly vyvinuty Labsphere, Inc. a pozornost bude dále věnována jim. Jejich reflektivita dosahuje v určitých intervalech vlnových délek (98–99) % a tyto materiály bývají také používány jako etalony reflektivity. Jejich reflektivita je uvedena na obr. 12.

* Podle kosinového zákona zářivost plošného zdroje klesá s kosinem zvyšujícího se úhlu odklonu od kolmice.



Obr. 12: Spektrální reflektivita spectralonu a spectrafectu. Upraveno z [22].

Při výběru povrstvení IK je nutno brát ohled také na jeho mechanickou a teplotní odolnost v prostředí, kde bude koule využívána, a na teplotní závislost jeho reflektivity, protože při provozu IK může vlivem zahřívání světelného zdroje docházet také k zahřívání povrstvení IK a ke změnám jeho reflektivity. U materiálů na bázi směsi ZnO a TiO₂ byly např. během provozu IK zjištěny změny reflektivity o velikosti cca 2 % [24].

Spectralon i Spectralect jsou při běžných laboratorních podmínkách teplotně stabilní a změny v reflektivitě se objevují až při vyšších teplotách. Spectralect je stabilní do teploty 100 °C a až do 160 °C jeho reflektivita pomalu klesá [21]. Spectralon je teplotně stabilní do teploty vyšší než 350 °C [24]. Pro provedení korekce na změny reflektivity vlivem zahřívání lze použít tzv. ac/dc techniku („střídavý/stejnosměrný proud“) popsanou v sekci 2.5.

Další zdroj nejistot při měření představují nehomogenity uvnitř koule. Ty bývají způsobeny nerovnoměrným povrstvením koule, přítomností clonek a dalšího vybavení uvnitř koule, ale také nečistotami pocházejícími z vnějšího prostředí. Aby byl omezen vliv těchto faktorů, provádí se jejich korekce [25]. Definuje se tzv. *SRDF* („spatial responsivity distribution function“) $K(\theta, \phi)$. Ta je definována jako odezva detektoru v integrační kouli v pozici dané dvojicí úhlů (θ, ϕ) k odezvě detektoru v počátku, tj. úhlové pozici $(0,0)$. Při měření této funkce dochází k rotaci zdroje světla umístěného mimo IK, aby byla změněna pozice místa dopadu záření v integrační kouli, která je dána úhly (θ, ϕ) . Tento proces se nazývá kalibrace IK a do detailů je popsán ve zmíněné publikaci. Při experimentech v této práci byla jako zdroj světla použita výbojová lampa spolu s kalibrovanou aperturou.

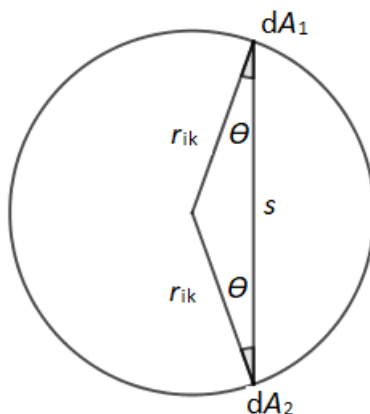
Důležitou součástí IK je clonka (případně jejich větší počet). Clonka má zabránit nežádoucímu přímému osvětlení nebo osvětlení prvním odrazem uvnitř IK požadované součásti IK, především výstupnímu portu nebo detektoru světla. Její umístění závisí na účelu použití IK (viz dále). Clonka je pokryta stejným materiálem jako vnitřek koule, aby bylo minimalizováno ovlivnění zářivého toku v IK.

2.4 Matematická teorie integrační koule

Základy matematické teorie IK byly poprvé publikovány v roce 1892 [26], ale úplnější teorie např. až v práci [27] nebo [28]. Níže uvedená teorie IK vychází z práce [28] a z literatury

vydané výrobcem IK [22]. V literatuře lze sice nalézt více zdrojů této teorie, ale všechny se s ní shodují.

Uvažujme pro jednoduchost dvourozměrnou IK ve tvaru kružnice o poloměru r_{ik} a výměnu záření mezi dvěma body (elementy plochy) umístěnými na její stěně. Tyto body tvoří spolu se středem kružnice rovnoramenný trojúhelník (viz obr. 13).



Obr. 13: Geometrie výměny záření uvnitř IK.

Zářivý tok ϕ přenesený mezi těmito body uvnitř IK lze popsat rovnicí

$$\phi = L \int \int \frac{\cos\theta^2}{s^2} dA_1 dA_2, \quad (6)$$

kde L značí odrážející se zář, dA_1 a dA_2 elementy plochy, mezi kterými probíhá výměna záření, θ úhel sevřený stranami rovnoramenného trojúhelníku (viz obrázek) a s značí vzdálenost mezi těmito elementy. Platí pro ni

$$s = 2r_{ik} \cos \theta. \quad (7)$$

Pro intenzitu ozáření E lze psát

$$E = \frac{\phi}{A_1} = \frac{LA_2}{4r_{ik}^2}, \quad (8)$$

kde A_1 a A_2 značí velikosti ploch, mezi kterými probíhá výměna záření.

Důležitý je fakt, že tento vztah nezávisí na úhlu θ a je platný pro všechny body na plášti koule. Je-li zářivý tok vstupující do IK ϕ_{vst} , platí pro intenzitu ozáření (na každém bodě v kouli) po jednom odrazu na stěně IK

$$E = \frac{\rho\phi_{vst}}{4\pi r_{ik}^2}, \quad (9)$$

kde ρ značí reflektivitu povrstvení koule. Odražená část záření bude rozptýlena v IK a bude podléhat dalším odrazům. Po jejich velkém počtu dojde k vytvoření ustáleného stavu a pro intenzitu ozáření na každém bodě uvnitř IK bude platit

$$E = \frac{(\rho + \rho^2 + \rho^3 + \dots)\phi_{vst}}{4\pi r_{ik}^2} = \frac{\rho\phi_{vst}}{(1-\rho)S}, \quad (10)$$

kde S je vnitřní plocha IK. Výstupní zářivý tok $\phi_{\text{výst}}$ vystupující z IK portem o ploše $S_{\text{výst}}$ lze vyjádřit vztahem

$$\phi_{\text{výst}} = \frac{\rho \phi_{\text{vst}} S_{\text{výst}}}{(1-\rho)S}. \quad (11)$$

Tato rovnice předpokládá, že záření vystupující portem ven z IK nenaruší ustálený stav uvnitř. Vyzáření světla z IK se započítá následovně: Po prvním odrazu světla se v každém následujícím odrazu ztrácí část záření rovnající se podílu celkové plochy portů k ploše IK. Tato část je vyjádřena koeficientem g nazývaným „port fraction“, který udává relativní zastoupení plochy portů na povrchu IK.

$$g = \frac{S_{\text{vst}} + S_{\text{výst}}}{S}, \quad (12)$$

kde S_{vst} a $S_{\text{výst}}$ značí plochu vstupního a výstupního portu. Udává se (např. [30]), že při měřeních s IK by tento koeficient neměl být větší než 0,1. Užitím vztahu (10) lze spočítat výstupní tok

$$\phi_{\text{výst}} = \frac{\rho \phi_{\text{vst}} S_{\text{výst}}}{(1-\rho g)S}. \quad (13)$$

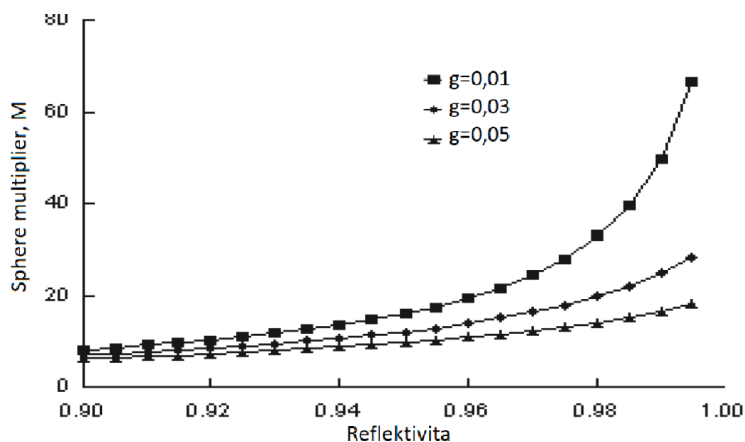
Jelikož je IK lambertovský zářič, pro zář $L_{\text{výst}}$ ve výstupním portu platí

$$L_{\text{výst}} = \frac{\phi_{\text{vst}}}{\pi S} \frac{\rho}{1-\rho(1-g)}. \quad (14)$$

Pravá strana předchozího vztahu je dále v publikaci [25] rozdělena na dvě části: První zlomek v tomto vztahu je přibližně roven vztahu (11) pro intenzitu záření difúzně rozptylujícího povrchu. Druhý zlomek

$$M = \frac{\rho}{1-\rho(1-g)} \quad (15)$$

bývá nazýván „sphere multiplier“ a popisuje nárůst intenzity ozáření uvnitř IK v důsledku vnitřních odrazů. S rostoucí reflektivitou IK tento koeficient roste a s rostoucím koeficientem g naopak klesá (viz obr. 14).



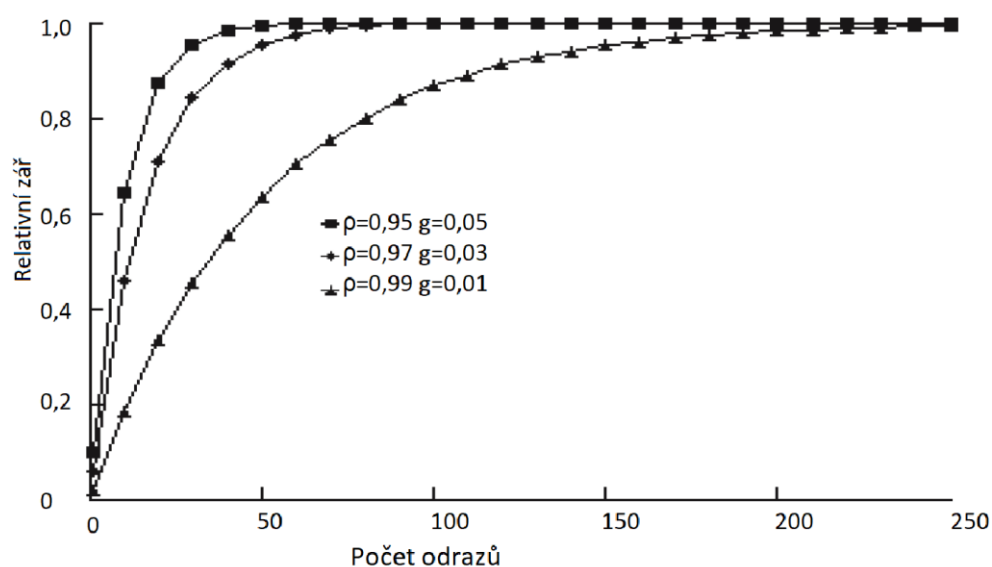
Obr. 14: Závislost koeficientu M na reflektivitě pro různé koeficienty g . Upraveno z [22].

Uvažujme nyní pouze konečný počet n odrazů uvnitř IK. Pak podle [25] bude pro zář uvnitř IK platit

$$L = \phi_{\text{vst}} \sum_{i=1}^n \rho^i (1 - g)^i, \quad (16)$$

kde i značí sčítací index.

Tento vztah je výhodné znázornit graficky (obr. 15). Je na něm patrný nárůst záře uvnitř IK spolu se zvyšujícím se počtem odrazů uvnitř IK pro různé konstrukční parametry IK M a g . Na grafu je názorně vidět, že vyšší hodnoty počtu odrazů již konvergují k ustálenému stavu vnitř IK, ve kterém je zář konstantní.



Obr. 15: Nárůst záře v IK jako funkce počtu vnitřních odrazů pro různé hodnoty reflektivity a koeficientu port fraction. Upraveno z [22].

Jak je vidět z výše uvedených vztahů, vlastnosti IK závisejí na třech faktorech: Na vnitřním poloměru koule, ploše vstupních a výstupních portů a na reflektivitě povrstvení koule. Optimalizace těchto koeficientů tudíž představuje jeden z hlavních úkolů konstruktérů IK. Pro jednoduchost lze říci, že pro optimální výkon IK je důležitá vysoká reflektivita povrstvení, která zvyšuje faktor M . Čím je koeficient M nižší, tím více je IK náchylnější na vnitřní znečištění, nehomogenity a přítomnost objektů uvnitř IK a tím více klesá její schopnost „integrovat“ záření. Důležitý je dále dostatečně velký poloměr koule s ohledem na plochu portů, která by měla být co nejmenší. [24]

Důležitá je také analýza IK z časového hlediska [22]. Jak již bylo řečeno, IK bývají využívány za podmínky ustáleného stavu, kdy je uvnitř úroveň světla konstantní a nedochází k výkyvům. Pokud do IK vstupuje světlo z pulzních zdrojů nebo vysokofrekvenční záření (např. záření s rádiovou frekvencí), může být signál na výstupu IK zkreslený. Výstupní signál je určen konvolucí vstupního signálu a impulzní odezvy IK. Tato odezva má tvar exponenciály

$$\exp\left(\frac{-t}{\tau}\right), \quad (17)$$

kde t značí čas a τ je časová konstanta, pro kterou platí

$$\tau = \frac{-2}{3} \frac{2r_{ik}}{c \ln \bar{\rho}}, \quad (18)$$

kde c značí rychlost světla a $\bar{\rho}$ průměrnou reflektivitu. Tato časová konstanta se pohybuje v jednotkách nebo desítkách nanosekund.

Výše uvedená teorie matematicky popisuje šíření světla uvnitř IK a umožňuje pomocí vztahů (12) a (13) vyjádřit výstupní zářivý tok, resp. zář v případě známého vstupního zářivého toku. Tato teorie dále ilustruje vliv parametrů IK (poloměru, reflektivity povrstvení a plochy portů) na výstupní zářivý tok a zář. Pomocí těchto rovnic se optimalizují parametry IK pro její konkrétní aplikaci.

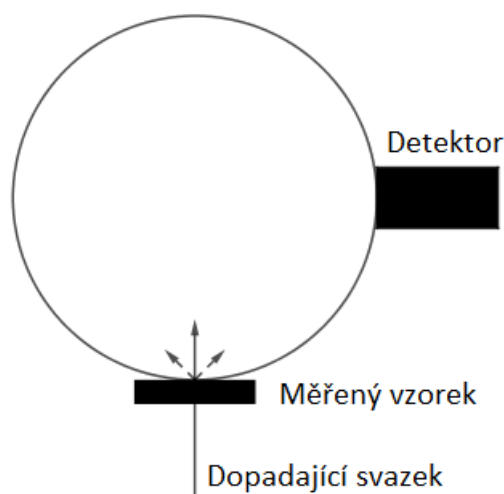
2.5 Využití integrační koule

Využití IK je popsáno např. v materiálech vydanými výrobcí IK [22, 24]. Jak již název napovídá, IK „integruje, sbírá“ světlo, a to buď světlo vyzařující přímo ze zdroje, nebo po interakci se zkoumaným vzorkem. Integrační koule má tři hlavní oblasti využití, podle nichž lze také IK dělit:

a) Měření optických vlastností materiálů:

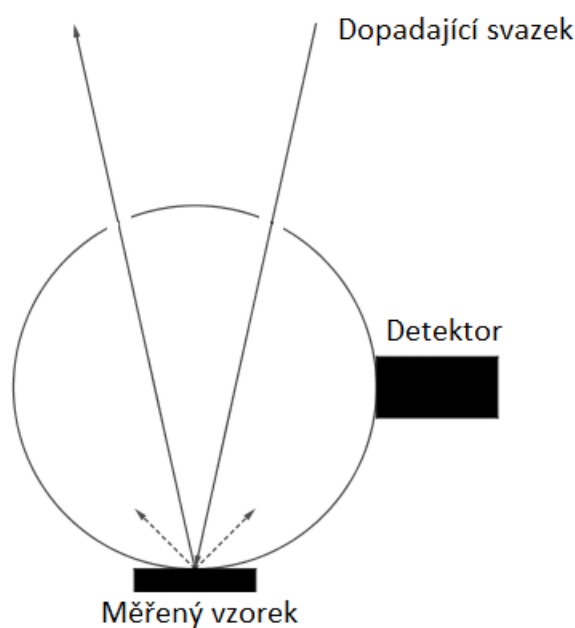
Integrační koule se velmi často používá při měření optických veličin, jako je reflektance, transmittance nebo absorptance. U schémat IK umístěných níže je důležité poznamenat, že zobrazují pouze princip metody, a ne experimentální detaily (např. přesný počet clonek).

1. Transmittance: Při měření transmittance je vzorek umístěn do vstupního portu integrační koule a je osvětlován svazkem světla. Po průchodu svazku měřeným vzorkem je svazek detekován detektorem a spolu s regulární (prošlou) složkou světla se v kouli objevuje také složka difúzní (viz obr. 16). Vyvedením prošlé složky mimo kouli nebo použitím absorbéru pro její absorpci lze dosáhnout detekce pouze difúzní složky. Ze známé transmittance lze také dopočítat absorptanci.



Obr. 16: Příklad experimentální sestavy pro měření transmittance.

2. Reflektance a difúzní vlastnosti: Při měření reflektance je měřený vzorek umístěn ve vstupním portu koule a bočním portem na něj dopadá svazek pod požadovaným úhlem (obr. 17). Velikost úhlu dopadu se pohybuje obvykle do 10° . Měření reflektivity při větších úhlech dopadu bývají prováděna rotací IK kolem dopadajícího svazku. Tak jako v předchozím případě se v kouli objevuje také difúzní odraz. Difúzní a spekulární odrazy lze od sebe rozlišit vyvedením spekulárního odrazu mimo kouli (jako je tomu obr. 16) nebo volbou úhlu dopadu svazku hodnotě blízké 0° . V tomto případě není nutné používat k měření dodatečný port a spekulární odraz lze vyvést tímtož portem. Metody na obr. 16 a 17 bývají nazývány jednosvazkové z důvodu použití jednoho svazku pro měření.



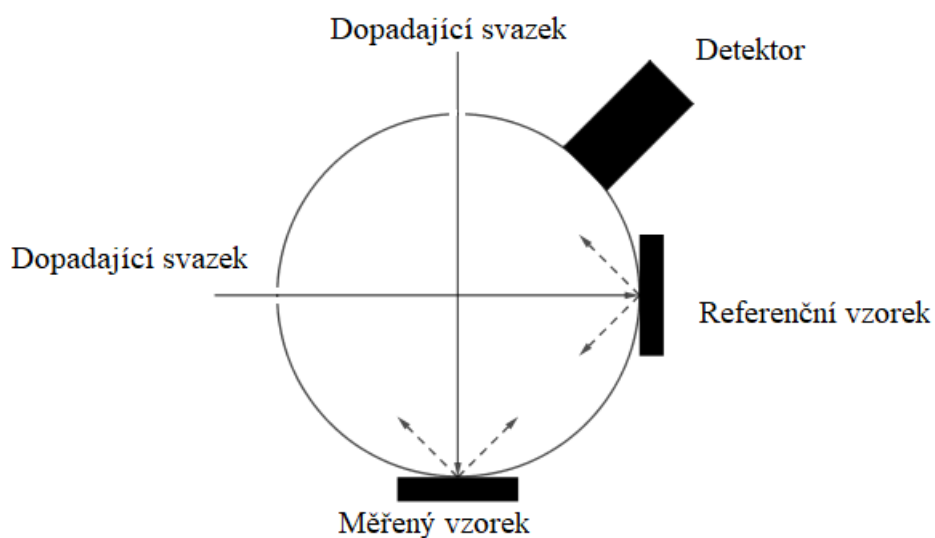
Obr. 17: Příklad experimentální sestavy pro měření reflektance a absorptance spolu s difúzními vlastnostmi.

V případě přímých měření reflektance a transmittance jsou tyto koeficienty dány podílem intenzit nebo zářivých toků svazku po a před interakci se vzorkem. Intenzita dopadajícího svazku, resp. zářivý tok, bývá měřen pomocí experimentální sestavy na obr. 18. Dále se používají relativní metody, při kterých se optické vlastnosti látek měří vzhledem k referenčnímu vzorku [30]. Při těchto měřeních může jako referenční vzorek sloužit také povrstvení IK.



Obr. 18: Měření intenzity (zářivého toku) svazku bez přítomnosti vzorku.

Pro použití relativních metod existují speciální experimentální uspořádání umožňující souběžné měření dvou vzorků najednou. Na obr. 19 je zobrazena tzv. komparační koule, která se používá pro měření reflektivity komparační metodou, kdy jsou porovnávány dva vzorky. Tato metoda se také nazývá, dvousvazková. V IK jsou umístěny dva vzorky ve dvou portech IK a při měření je zapnutý pouze jeden zdroj světla. Komparační metoda také umožňuje měření jednosvazkovou metodou. Při měření je zapnutý pouze jeden zdroj světla a rotací koule lze dosáhnout jednoduché výměny měřeného vzorku.



Obr. 19: Tzv. komparační koule, příklad komparační metody měření reflektivity, který také umožňuje jednoduchou výměnu měřených vzorků pomocí rotace IK.

Výše uvedené metody jsou založeny na měření vzorku umístěného v portu IK. Existuje také experimentální uspořádání, ve kterém je vzorek umístěn na otočném držáku, který je portem IK prostrčen dovnitř. Druhým portem na vzorek dopadá svazek světla. Tato sestava

umožňuje měřit vlastnosti vzorku v závislosti na úhlu dopadu světla pomocí pootočení držáku vzorku, a ne prostřednictvím náklonu svazku. Při těchto měřeních je ovšem nutné brát ohled na vlastní absorpci držáku na vzorky [32]. Jak je z výše uvedeného popisu patrné, IK používané pro měření optických vlastností materiálů se vyznačují větším počtem portů a s tím je spojené větší množství příslušenství, např. kryty na porty nebo držáky na vzorky.

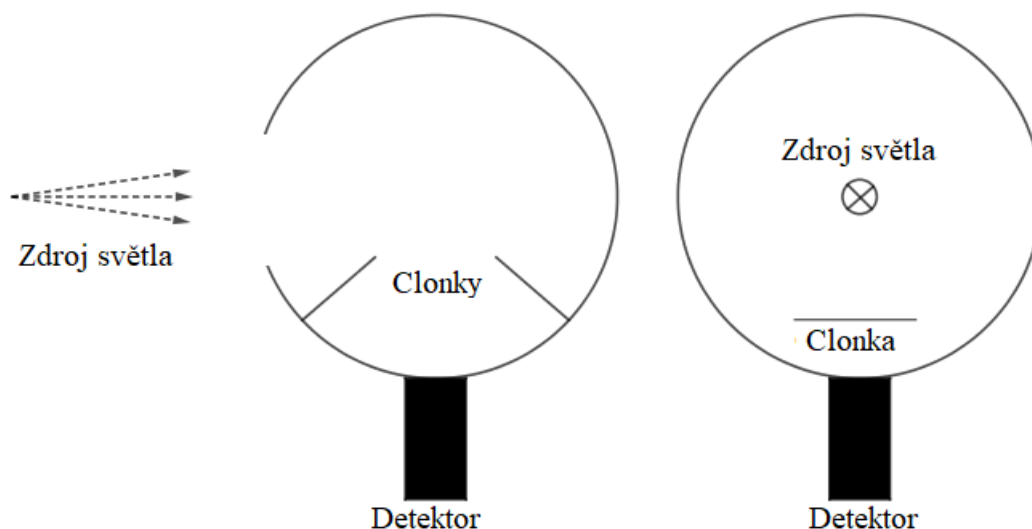
Pomocí IK lze měřit optické vlastnosti pevných látek, kapalin, práškových vzorků i tenkých vrstev. V práci [32] byla měřena reflektivita průmyslově vyráběných hliníkových reflektorů. Pro měření byla použita jednosvazková i dvousvazková metoda. Článek [33] popisuje měření absorpčního koeficientu vody obsahující kontaminující částice. Kapalina byla přivedena do portu umístěného v horní části IK a volným pádem protékala přes IK do portu umístěného v dolní části. V kouli byl dále umístěn zdroj světla (LED 430 nm) a detektor. Publikace [34] popisuje experimentální sestavu pro měření závislosti absorpce laserového záření práškovými materiály na teplotě. Tato sestava také zohledňuje vlastnosti částic, jako je jejich velikost. Měření bylo ilustrováno na vzorcích nerezové ocele.

Dále se pomocí IK zkoumají biologické vzorky, např. tkáně živočichů [35], rostlin nebo jejich plody [36]. V práci [36] byly použity 2 IK souběžně měřící reflektivitu a transmisivitu vzorku, který byl umístěn mezi těmito koulemi tak, že se koule dotýkaly vstupními porty. IK lze využít také při měření plynů a aerosolů [37]. V této práci byla vyvinuta metoda pro měření absorpčního koeficientu spojitého spektra vlnových délek. V práci [38] byl vyvinut senzor pro měření koncentrace plynů NO_2 a SO_2 v atmosféře na základě měření absorpčního koeficientu. IK byla upravena tak, aby při měření tyto plyny mohly proudit jedním portem IK dovnitř a druhým portem IK ven. Nakonec bylo vyhodnoceno jejich absorpční spektrum.

Všechny výše zmíněné optické vlastnosti materiálů jsou většinou měřeny spektrálně pomocí spektrofotometru.

b) Měření, testování a kalibrování světelných zdrojů:

Integrační koule se používají také pro kalibrování světelných zdrojů a pro měření světelného a zářivého toku od kolimovaných zdrojů (např. laseru) až po rozptylující zdroje (např. LED). Tyto zdroje mohou být umístěny uvnitř i vně koule. Uvnitř IK se vytvoří konstantní tok, který je detekován detektorem umístěným v portu koule nebo uvnitř koule. (viz obr. 20). Při měření světelného toku je důležitá volba poloměru IK. Pokud je zvolený poloměr příliš velký, světelný tok může být příliš malý pro detekci a signál z detektoru bude slabý, a pokud je poloměr příliš malý, mohou vzniknout velké nejistoty během měření [15]. V době vydání této zprávy se např. pro měření zdrojů se světelným tokem (270–10000) lm používala IK o poloměru 2 m a pro měření menších toků IK s poloměrem 76 cm nebo 30 cm. Jak je vidět na obr. 20, při těchto měřeních se používají clonky, aby nedocházelo k přímému osvětlení detektoru.



Obr. 20: Příklady integrační koule jako detektoru světla, např. pro měření zářivého toku zdrojů pro zdroj přítomný uvnitř i vně IK.

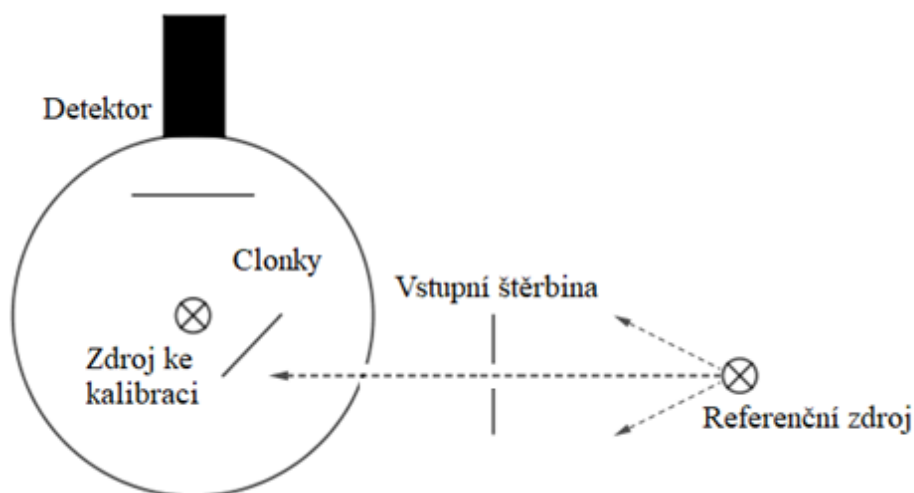
IK používané pro charakterizaci světelných zdrojů umožňují zapojení pomocných lamp a umístění zdroje světla do středu koule. Mohou dosahovat velkých průměrů až 3 m. V případě použití zdroje světla s vysokým výkonem mohou být také vybaveny vodním okruhem zajišťujícím chlazení. Zvláštním typem IK používaným pro tento účel jsou tzv. měřicí polokoule (v originále „halfmoon sphere“) [39]. Tyto integrační „koule“ se používají pro měření světelného toku dopředně vyzařujících zdrojů (např. LED). Polokoule odpovídající IK je zakryta difúzně-odraznou deskou se zdrojem světla umístěným uprostřed této desky. Tento zdroj je umístěn odděleně od vnitřku polokoule, a tak nedochází k jeho zahřívání a k zahřívání povrstvení polokoule. Nedochází také k umístování vodičů a dalších zařízení dovnitř koule. Tímto způsobem lze lépe korigovat jevy spojené s vlastní absorpcí zdroje světla. Příklad měřicí polokoule je uveden na obr. 21.



Obr. 21: Příklad tzv. měřicí polokoule. Převzato z <http://www.labsphere.com>.

Kromě účelů měření byla také pro metrologické účely vyvinuta metoda pro realizaci jednotky lumen využívající IK. Dlouho používanou metodou pro definici jednotky lumen byla metoda založena na použití sad kalibrovaných lamp a na měření pomocí goniofotometru.

Goniofotometr je třeba umístit do temné místnosti, jeho pořízení je finančně nákladné a měření samotné trvá dlouho. Goniofotometr se ale v poslední době spolu s využíváním LED začíná opět více používat. V roce 1995 byla v Národním institutu standardů a technologie NIST v USA vyvinuta nová metoda umožňující realizaci jednotky lumen, tzv. „integrating sphere method“, pomocí IK [25, 41, 42]. Světelný zdroj, který má být kalibrován, je umístěn v IK, do které vyzařuje portem také referenční zdroj (viz obr. 22), jehož světelný tok je určen měřením pomocí fotometru a výpočtem. Oba zdroje jsou postupně zapnuty, vypnuty, změřeny pomocí detektoru umístěného v dalším portu integrační koule a porovnány. Tímto způsobem lze z měření odvodit sadu kalibrovaných lamp. Výhoda této metody je, že během měření není potřeba kalibrovaný zdroj vyjmát z koule, když je referenční zdroj zapnutý. Na obr. 22 jsou také vidět dvě clonky. Clonka blíže detektoru zabraňuje jeho přímému osvětlení zdrojem určeným ke kalibraci a druhá clonka zabraňuje úniku záření ven z koule. Velká výhoda této metody a dalších metod popsanych v této sekci je, že po provedení kalibrace IK je možné provádět korekce na přítomnost nehomogenit v povrstvení IK a na teplotní závislost reflektivity.



Obr. 22: Metoda kalibrace světelných zdrojů „Integrating sphere method“. Podle [41].

Další metoda pro kalibraci zdrojů, vyvinutá na stejném pracovišti a odvozená od předchozí, se nazývá „detector-based calibration method“, příp. „detector-based total luminous flux calibration“ [25]. Na rozdíl od předešlé metody je použito počítače k řízení celého experimentu a je navíc použit rotační prvek umožňující přechod mezi třemi pozicemi ve vstupní štěrbině: Mezi pozicí, kdy je port do koule otevřen a světlo do ní může vstupovat, pozicí, kdy je port uzavřen a do IK nevstupuje světlo, případně pozicí, ve které je umístěn fotometr, kterým je možno kalibrovat zdroj svítící zvnějšku do koule. Obě tyto metody kalibrace zdrojů světla byly vyvinuty za použití integračních koulí s velkými poloměry 2 m a 2,5 m.

Pro kalibraci zdrojů světla se také používá tzv. ac/dc technika, která byla vyvinuta v Mezinárodním úřadu pro míry a váhy ve Francii (BIPM) [42]. Její hlavní výhoda je, že dokáže korigovat chyby vzniklé zahříváním IK při měření. Tato technika se od předchozí techniky na obr. 22 využívající integrační kouli liší hlavně v tom, že je při kalibraci použit mechanický přerušovač svazku. Užitím této metody lze najednou proměřit zdroj světla umístěný uvnitř

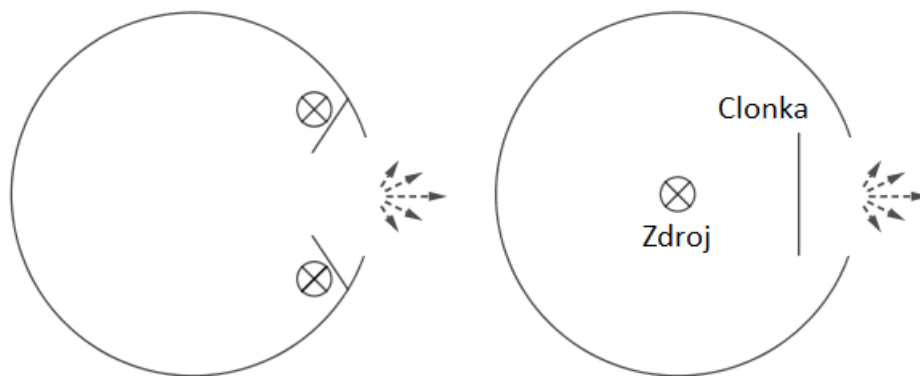
koule i externí zdroj. Během experimentu přerušovač svazku „navzorkuje“ světlo vstupující do integrační koule ze zdroje, který má být kalibrován (tzv. střídavý signál), a užitím signálu naměřeného detektorem umístěným v portu koule (tzv. stejnosměrný signál) lze provést korekci na chyby způsobené zahříváním koule. Vstoupí-li světlo tvořící střídavou složku do koule a je-li zdroj světla uvnitř zapnutý, je na tuto střídavou složku „namodulován“ stejnosměrný signál z lampy nacházející se uvnitř koule. Stejnosměrný signál je (3–4)× slabší než stejnosměrný a pomocí zesilovače ho lze změřit. Měření probíhá postupně se zapnutým a vypnutým zdrojem světla uvnitř lampy a porovnáním těchto dvou signálů lze změřit a korigovat výše zmíněné nežádoucí vlivy, včetně nehomogenit v povrstvení koule. Výsledek měření představuje poměr střídavé a stejnosměrné složky ac/dc. Tato technika také umí detekovat (ale ne korigovat) nelinearity detektoru. Během měření je nutné zajistit, aby světlo nesvítilo přímo nebo prvním odrazem na detektor a použít clonky.

Při kalibrování lamp a měření světelného toku se také používají tzv. pomocné lampy. Jejich použitím lze provést korekci na vlastní absorpci kalibrovaných lamp během měření. Tato absorpce záření během měření může být způsobena držáky, upevněním lampy nebo dalšími předměty uvnitř koule, včetně napájecích vodičů a konektorů. Korekce na vlastní absorpci lampy může být provedena využitím ac/dc techniky nebo lze také použít jiné postupy, např. postup uvedený v [40], ale tento postup je příliš komplikovaný pro prezentaci zde.

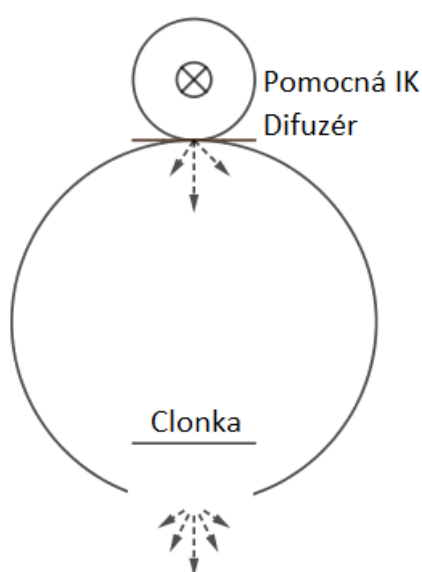
Po vynálezu ac/dc techniky byly v NIST a BIPM provedeny experimenty zkoumající velikost změny reflektivity povrstvení v závislosti na teplotě a také experimenty porovnávající definici lumenu pomocí kalibrovaných lamp a pomocí integrační koule. Byla prokázána silná teplotní závislost v řádu jednotek procent při použití povrstvení založeném na směsi ZnO a BaSO₄. Dále byla naměřena shoda mezi realizací lumenu pomocí kalibrovaných lamp, které byly v té době v BIPM používány, a měřeními pomocí integrační koule v řádu desetin procenta.

c) Homogenní zdroj záření:

IK se také využívají jako lambertovský zdroj záření poskytující homogenní světelný svazek. Ten se využívá nejčastěji pro kalibraci detektorů světla [43]. IK používané pro tento účel se také někdy řadí mezi IK pro všestranné využití, které mohou být použity i pro měření světelných zdrojů nebo optických vlastností materiálů. V integrační kouli je umístěn jeden nebo více zdrojů světla a clonky tak, aby nedošlo k přímému osvětlení výstupního portu. V případě použití jednoho zdroje světla se tento zdroj umísťuje do středu IK nebo do jednoho z portů. Je-li zdrojů více, umísťují se symetricky kolem výstupního portu koule, jako je tomu na obr. 23. Se zvyšujícím se počtem zdrojů světla kolem portu se zvyšuje také celková homogenita svazku vystupujícího z integrační koule. Jako zdroje světla se historicky používají výbojové lampy, nověji LED. Z důvodu zvýšení homogenity výstupního svazku světla je možné před zdroj světla umístit difuzér nebo použít jako zdroj světla pro IK tzv. pomocnou (satelitní) IK s menším průměrem, která je sama o sobě zdrojem světla vyzařujícím do druhé koule (viz obr. 24). V tomto případě je doporučováno umístit mezi obě IK difuzér pro další zvýšení homogenity.



Obr. 23: Příklady integrační koule jako zdroje záření.



Obr.24: Příklad využití pomocné IK jako zdroje záření.

IK jako zdroj světla se používá pro kalibraci polí detektorů světla, např. CCD nebo CMOS. Tyto detektory se využívají ve spotřební elektronice (např. fotoaparátech a mobilních telefonech) nebo také v nákladných vědeckých přístrojích určených pro kosmický výzkum. Při kalibraci bývají umístěné v rovině výstupního portu. Tyto detektory mohou vykazovat nehomogenity v zisku při osvětlení jednotlivých pixelů světlem stejné intenzity, a je proto potřeba je kalibrovat. Detektory se postupně ozařují světlem o různé intenzitě a spektrálním složení a u všech pixelů je nastaven stejný zisk.

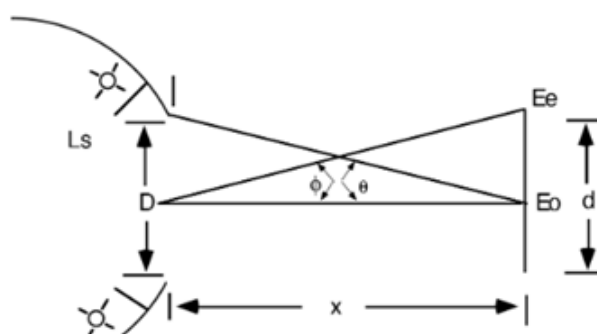
Dále se IK používá pro kalibraci zobrazovacích systémů jako takových (reflektivních, refraktivních i katadioptrických). Tyto systémy musí být kalibrovány stejně jako pole detektorů výše. Jejich kalibrace se od předchozí liší v tom, že je potřeba brát v úvahu optický systém předcházející detektoru, ze kterého mohou vycházet paprsky pod různými úhly vzhledem k optické ose. IK se používá také ke kalibraci detektorů sond ve vesmírném průmyslu, např. ke kalibraci sond detekujících UV záření [44] a záření jiných vlnových délek [45]. Kalibruje se také reflektivita jejich zrcadel [46]. IK se dále používá jako zdroj světla v senzimetrii

při testování fotografických materiálů vyrobených z halogenidů stříbra (např. AgBr). Využívá se zde mj. možnosti změny intenzity a spektra zdroje.

Podle technické zprávy CIE 15: 2004 věnující se kolorimetrii [29] je IK doporučena jako zdroj difúzního záření pro měření reflektivity v geometrii di: 8° (v originále „Diffuse: eight-degree geometry, specular component included“). Při měření v této geometrii svazek dopadá na měřený vzorek pod úhlem 8°, difúzně se od něj odráží a v naměřených datech je zahrnuta také spekulární komponenta. Pro tato měření je dále doporučeno (kromě obecně platných pravidel pro měření s IK), aby plocha portů IK nepřekračovala 10 % plochy koule.

Mimo účely kalibrací lze IK jako zdroj světla použít pro další speciální účely. IK byla např. použita jako zdroj světla pro chlazení atomů v atomových hodinách [47].

Jak již bylo dříve naznačeno, důležitým parametrem charakterizujícím integrační kouli jako zdroj světla je homogenita vyzařovaného světelného toku, zkráceně homogenita, která se stanovuje na základě měření rozložení vyzařovaného světelného toku. Existují dva typy homogenity: prostorová a úhlová. Prostorová homogenita je měřena v bodech v rámci plochy výstupního portu, přičemž osa detektoru je kolmá na výstupní port, a úhlová je měřena při použití rotujícího detektoru. Během měření se mění úhel, který svírá osa detektoru s normálou k výstupnímu potu. Tento úhel je na obr. 25 a 33 označen ϕ . Na obr. 25 je vlevo znázorněn výstupní port ideální IK (lambertovský zářič, viz str. 13) vyzařující doprava na rovinu pozorování. Po měření jsou podle používané definice homogenity (viz dále) vyhodnoceny naměřené body, vzhledem např. k jejich radianci nebo intenzitě a příp. statisticky vyhodnoceny (je např. určen jejich aritmetický průměr). Je ovšem nutno poznamenat, že homogenity definované podle různých fotometrických a radiometrických veličin, včetně těch uvedených dále, spolu ale nijak nesouvisejí. Velká část autorů, včetně některých uvedených níže, pojem úhlová homogenita IK nedefinuje vůbec a pojem homogenita používá pouze pro označení prostorové homogenity. Z tohoto důvodu, bude-li v této kapitole zmínka o homogenitě, je míněna prostorová. O úhlové homogenitě bude pojednáno až v experimentální části této práce. Homogenita bývá udávána buď jako bezrozměrné číslo, nebo v procentech.



Obr. 25: Označení geometrických rozměrů při experimentech s IK. Upraveno z [25].

Obecně existují dvě metody pro měření homogenity [48]. První využívá k měření pole detektorů a druhá jediný detektor, kterým je posunováno. Tato metoda je přesnější a používanější, ale první metoda je jednodušší pro použití. V literatuře lze nalézt více definic homogenity. Homogenita integrační koule měřená ve [49] je definovaná jako relativní

standardní odchylka radiance naměřená ve výstupním portu pro prostorovou homogenitu. V měření úhlové homogenity je homogenita definována analogicky jako relativní odchylka mezi hodnotami naměřené a normálové záře. Prostorová homogenita byla měřena polem detektorů 1×10 , které bylo upevněno na horizontální a vertikální posuv. Úhlová homogenita byla měřena polem detektorů, které bylo připevněno na držák sférického tvaru, kterým bylo možné otáčet. Ten byl připevněn na horizontální a vertikální posuv. Práce [49] se věnuje měření prostorové homogenity pomocí detektoru umístěného na x - y posuvech. Homogenitu H definuje třemi způsoby a vzájemně porovnává získané výsledky:

$$H_1 = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{2L_{\text{average}}} \quad (19)$$

$$H_2 = \frac{L_{\text{rmse}}}{L_{\text{average}}} \quad (20)$$

$$H_3 = \frac{L_{\min}}{L_{\max}}, \quad (21)$$

kde L značí radianci a indexy max, min a average její maximální, minimální a průměrnou naměřenou hodnotu a rmse značí jeho střední kvadratickou odchylku. Podle výsledků této práce je homogenita závislá nejen na použité definici, ale také na konkrétním uspořádání experimentální sestavy, konkrétně na velikosti proudu, který protéká zdrojem světla. Rozdíly v naměřených hodnotách homogenity se pohybují v jednotkách procent. Prostorová homogenita byla měřena také v pracích [50] a [51]. Práce [50] používá definici č. 3. Práce [51] definuje homogenitu jako

$$H_4 = \frac{L_i}{L_{\max}}, \quad (22)$$

kde L_i značí radianci naměřenou v daném bodě výstupního portu IK. Tento vztah bude použit v experimentální části této práce s tím rozdílem, že bude vyhodnocována intenzita svazku. Práce [52] se věnuje stárnutí integrační koule prostřednictvím změn její homogenity způsobených opotřebením povrstvení koule. Při experimentu byl nad koulí umístěn laser spolu s pozičním systémem, který umožňoval jeho rotaci v rámci dvou kolmých os a měření v různých bodech IK. Byly použity dva detektory: Jeden měřil zářivý tok uvnitř koule a druhý, referenční, fluktuace ve výkonu laseru. Článek [53] popisuje výrobu finančně dostupné IK v rámci studentského projektu. Byla zde také měřena její homogenita, která byla definována jako

$$H_5 = 100 \left(\frac{\langle L \rangle - \sigma_L}{\langle L \rangle + \sigma_L} \right), \quad (23)$$

kde $\langle L \rangle$ značí střední hodnotu radiance a σ_L její střední kvadratickou chybu. Při měření bylo použito pole detektorů 16×16 px².

Homogenita vyzařování IK je také silně závislá na geometrických rozměrech experimentu. Uvažujme experimentální uspořádání na obr. 25.

Pro osovou a mimoosovou intenzitu ozáření na rovině pozorování E_o a E_e lze pro malé úhly Φ do 10° psát [25]

$$E_0 = L\pi\sin^2\theta, \quad (24)$$

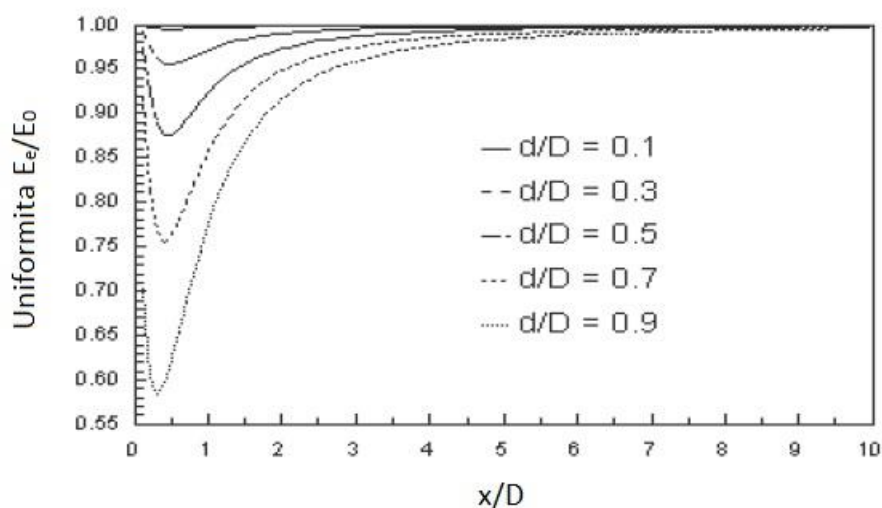
$$E_e = E_0 \cos^4\Phi, \quad (25)$$

kde L značí radianci uvnitř koule a úhly θ a Φ značí úhly pozorování mimoosového bodu a výstupního portu IK (viz obr. 25).

Definujeme-li podle [25] homogenitu jako podíl osové a mimoosové intenzity osvětlení

$$H_6 = \frac{E_e}{E_0}, \quad (26)$$

pak tato homogenita roste s rostoucími podíly $\frac{x}{D}$ a $\frac{d}{D}$, kde x značí vzdálenost roviny pozorování od roviny výstupního portu IK, D průměr výstupního portu a d vzdálenost na osvětlovaném objektu mezi bodem osvětleným krajem portu IK a okrajovým bodem tohoto objektu. Homogenita také roste s rostoucím poloměrem IK. Např. pro IK s poměrem průměru koule a průměru výstupního portu IK 1:3 lze při dodržení plochy portů „port fraction“ do 5 % povrchu IK očekávat homogenitu IK vyšší než 98 %. [23, 49]. Práce [23] ovšem neudává definici homogenity, ke které se číslo vztahuje. Na obr. 26 lze vidět příklady závislosti homogenity U_6 na vzdálenostech x , d a D . Je patrné, že homogenita roste s rostoucí vzdáleností roviny pozorování od IK a že homogenita také roste, jak už bylo řečeno, s klesajícím průměrem výstupního portu. Druhé tvrzení je pro tuto práci důležitější, protože se během prováděných experimentů nebude měnit vzdálenost IK od roviny pozorování, ale bude měněn průměr výstupního portu. V obou případech homogenita konverguje ke 100 %. Je nutno dodat, že data na obr. 26 pocházejí ze simulací provedených za ideálních podmínek, nicméně s experimenty se podle [25] shodují velmi dobře.



Obr. 26.: Závislost prostorové homogenity U_6 jako funkce $\frac{x}{D}$ pro různé poměry $\frac{d}{D}$. Upraveno z [25].

Toto pravidlo bylo také potvrzeno v experimentální části této práce při měření se zmenšujícím se průměrem výstupního portu, ale blíží-li se jeho průměr vlnové délce světla, projevují se difrakční účinky a toto pravidlo přestává platit.

Homogenita se ovšem také mění s dalšími faktory, např. s velikostí, tvarem a pozicí clonky nebo s plochou a umístěním portů a vlastnostmi jejího povrstvení. Vliv má také přítomnost dalších zařízení a nečistot v IK.

3 Experimentální část

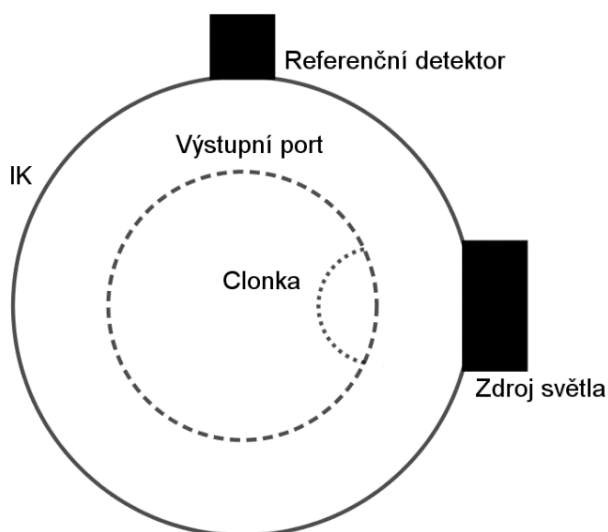
Experimentální část této práce spočívá v měření prostorové a úhlové homogenity integrační koule. Výsledky těchto měření slouží jako indikátory vlastností IK a jako základ pro provedení jejích modifikací, které mají za cíl zajistit, aby byla tato homogenita co nejvyšší a IK vhodnější pro kalibraci detektorů světla při jejím použití v praxi.

Nejprve byla podle níže uvedených postupů změřena prostorová a úhlová homogenita IK bez modifikací. Poté byla změřena prostorová a úhlová homogenita s ochrannými kryty ze skla (BK7) a plexiskla (PMMA). Tato měření byla provedena s původní nemodifikovanou clonkou. Poté byly Mgr. Martinem Vaculou provedeny modifikace clonky tak, aby nebyla při pohledu do vstupního portu vidět a aby byla homogenita co nejvyšší (byl změněn její tvar, rozměry a umístění). Tyto modifikace byly potvrzeny pomocí simulace v simulačním programu Zemax.

Nakonec byla změřena prostorová homogenita IK při použití omezovačů průměru výstupního portu IK a s modifikovanou clonkou.

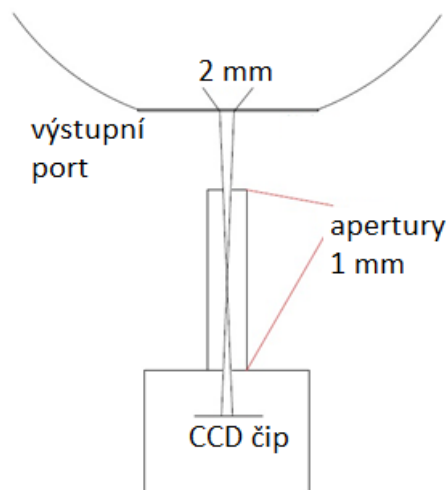
3.1 Experimentální vybavení

Při měřeních byla použita integrační koule 3P-GPS-053-SL od Labsphere, Inc. s vnitřním poloměrem 5,3 palce (13,5 cm), průměrem výstupního portu 2,5 palce (6,4 cm) a difúzně-odraznou vrstvou ze spectralonu, který má pro používanou vlnovou délku 400 nm reflektivitu 99 %. Tato IK se svým použitím řadí mezi IK pro všestranné použití a má clonku zabraňující přímému osvětlení výstupního portu zdrojem světla. Tato koule byla použita z důvodu, že byla momentálně k dispozici v laboratoři a tento typ IK může být použit jako zdroj homogenního záření. V této IK jsou kromě výstupního portu umístěny další dva porty o průměru 1 palec (2,5 cm) rozmístěné jako na obr. 1. V jednom portu byl umístěn při měření zdroj světla a ve druhém referenční detektor (viz. obr. 27). Při pohledu zepředu na výstupní port je patrná clonka. Výše uvedeným parametrům odpovídá koeficient port fraction 0,07 a sphere multiplier 11,97.



Obr. 27: Řez IK během měření (nemodifikovaná clonka), pohled na výstupní port.

Jako detektor byla použita CCD kamera G2-4000 od Moravských přístrojů, a. s. s rozlišením (2056×2062) px² a velikostí jednoho pixelu $(7,4 \times 7,4)$ μm^2 . Pro omezení zorného pole detektoru byla použita apertura zobrazená na obr. 28 (pracovně nazvaná „dvoudírková“), která omezila oblast snímanou detektorem na oblast s tvarem kružnice o průměru 2 mm (viz obr. 28). Jako zdroj světla byla použita LED 400 nm od společnosti ProLight Opto Technology spolu s difuzérem vyrobeným z pingpongového míčku, který zvyšoval výslednou homogenitu. To bylo ověřeno před měřeními obsaženými v této práci.



Obr. 28: Schéma apertury omezující zorné pole CCD detektoru spolu s tímto detektorem.

Dále byly použity lineární mechanizované posuvy od Newport Corporation a Physik Instrumente GmbH & Co. KG, rotační posuv od stejného výrobce a laboratorní zdroj. Kvůli změnám ve výkonu LED během měření byl použit referenční detektor PM100 od Thorlabs, Inc., jehož účelem bylo měření velikosti zářivého toku uvnitř IK, aby na tyto změny mohla být provedena korekce, která bude popsána dále. Dále byly použity kryty výstupního portu IK ze skla (BK7, tloušťka 8,1 mm) a plexiskla (PMMA, tloušťka 3,1 mm) spolu s příslušenstvím pro jejich uchycení.

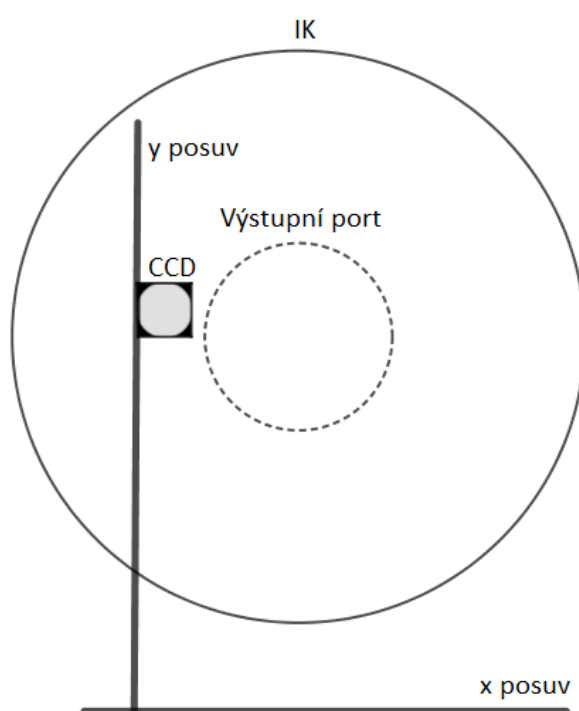
Byly také použity omezovače průměru výstupního portu IK s průměrem 1, resp. 2 palce. Jejich účelem je zvýšit výslednou homogenitu vyzařování. Tyto omezovače byly z vnitřní strany IK pokryty vrstvou spectraflectu, který má na používané vlnové délce podobnou reflektivitu (98 %) jako spectralon, který má reflektivitu 99 %. Tak bylo minimalizováno narušení funkce IK. Měření s těmito omezovači by mohlo být ovšem ovlivněno faktem, že mají rovinný tvar, a ne sférický jako IK.

3.2 Experimentální sestavy

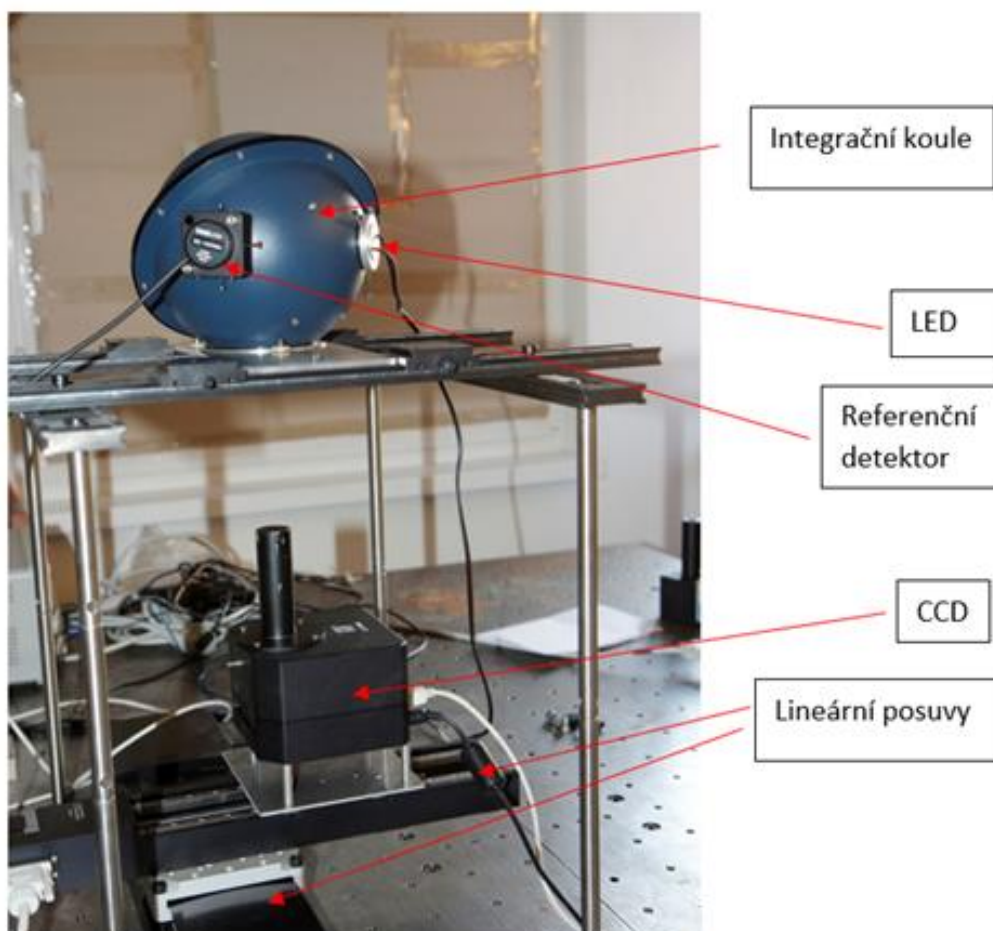
Použité experimentální sestavy vycházejí z práce [36] a dalších zdrojů. Byly použity dvě experimentální sestavy. Jedna pro měření prostorové homogenity a druhá pro měření úhlové homogenity.

Při měření prostorové homogenity byla CCD umístěna na lineárním mechanizovaném lineárním posuvu ve směru osy y, který byl spolu s CCD umístěn na druhém lineárním posuvu

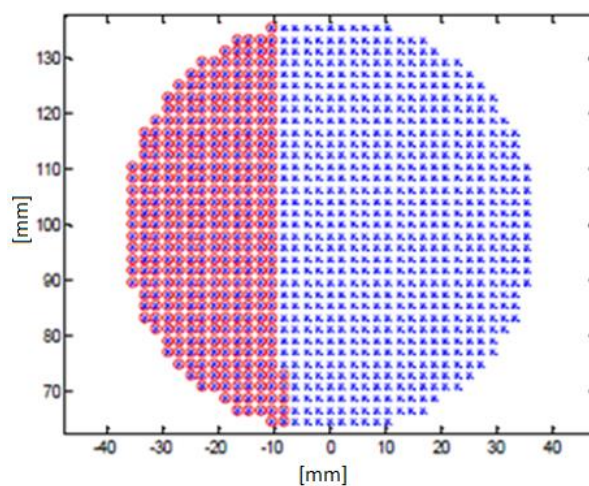
ve směru osy x . Oba posuvy byly umístěny pod výstupním portem IK a posouvaly CCD tak, aby nasnímala celou plochu výstupního portu IK. Vzdálenost CCD čipu od výstupního portu koule byla při všech měřeních zvolena 20 cm, což je minimální vzdálenost, při které nedocházelo ke zpětným odrazům mezi CCD a výstupním portem IK (bude popsáno v sekci 3.4). Schéma experimentální sestavy pro měření prostorové homogenity je uvedeno na obr. 29 a její fotografie na obr. 30, kde je vidět také zdroj světla a referenční detektor umístěné na IK. Krok posunu obou posuvů byl zvolen 2 mm a po každém posunu byl sejmut snímek. Tento krok odpovídá 1005 měřeným pozicím (měřeným bodům a sejmutým snímkům), viz obr. 31, kde je znázorněno jejich rozložení. Modré body zde značí nezměřené body během měření a červené změřené. Každý bod odpovídá sejmutému snímku z obr. 32. Při měření s omezovači průměru výstupního portu 1 mm byl zvolen krok posuvu 1 mm a počet sejmutých bodů je tedy odlišný. Krok posuvu odpovídá kompromisu mezi rozlišením a časem měření.



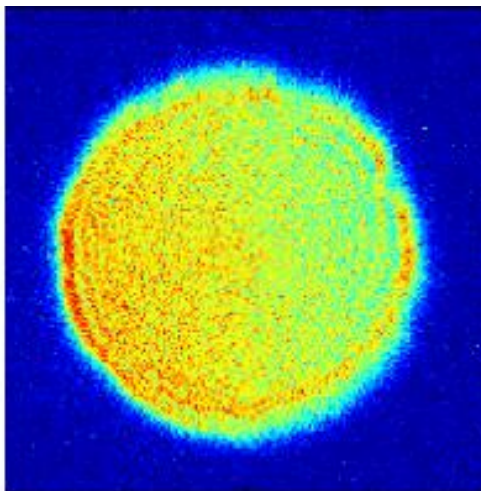
Obr. 29: Schéma experimentální sestavy pro měření prostorové homogenity. Pohled svrchu, výstupní port směřuje směrem k optické lavici.



Obr. 30: Experimentální sestava pro měření prostorové homogenity, pohled z boku.

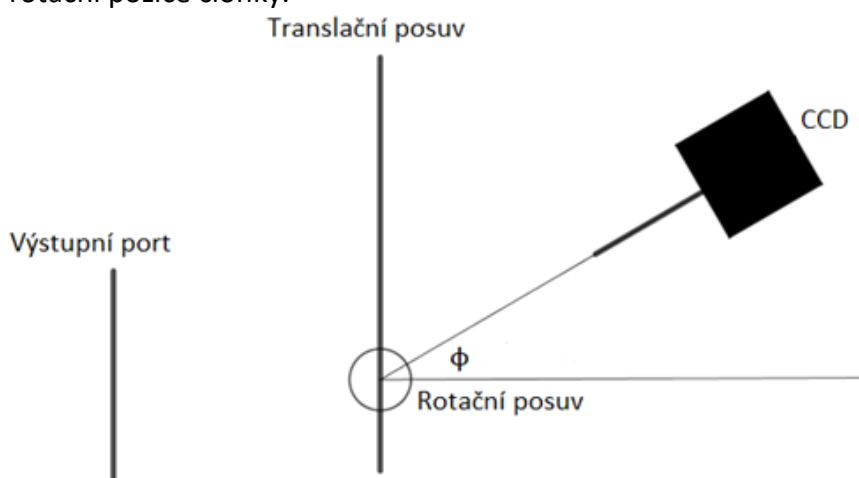


Obr. 31: Schéma výstupního portu IK během měření prostorové homogenity generované programem MATLAB.

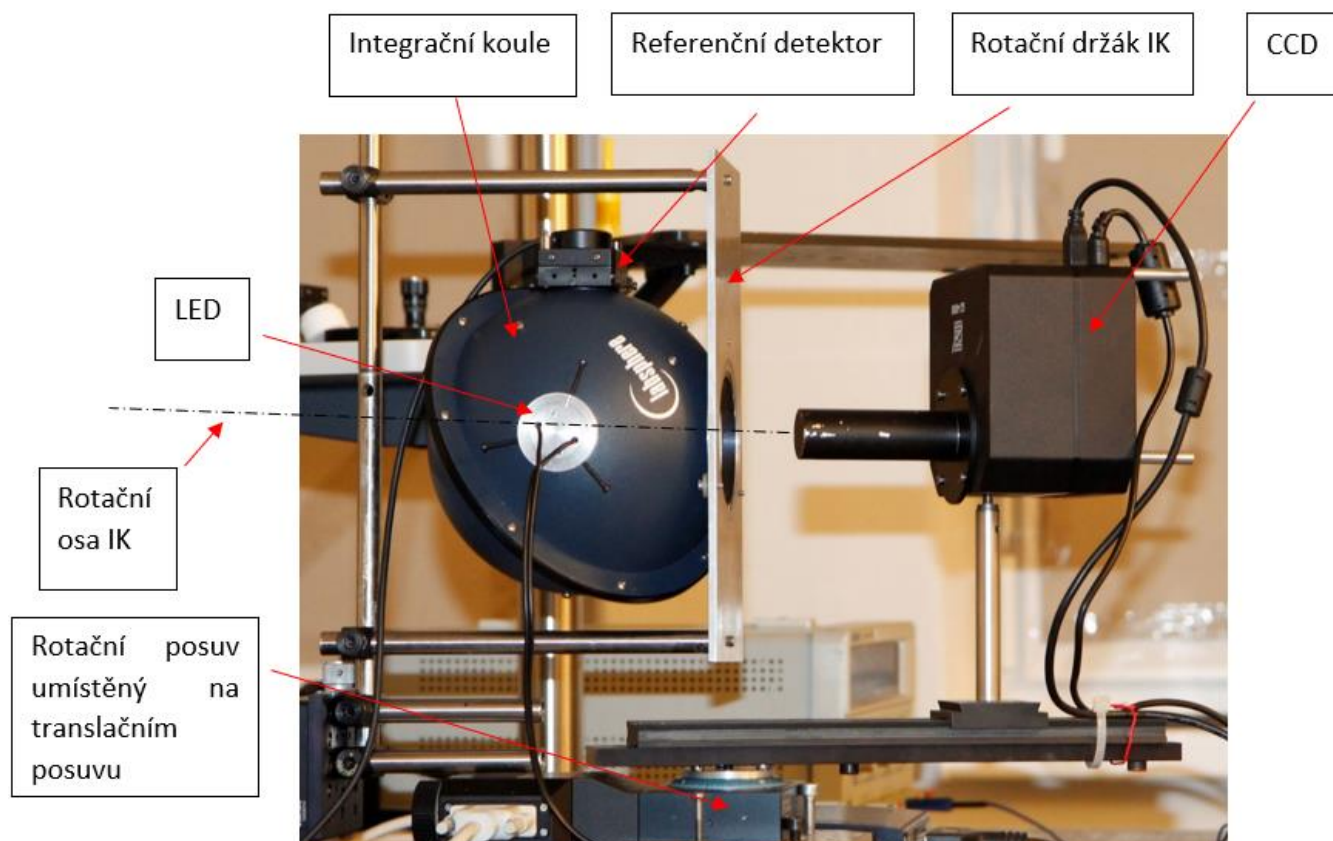


Obr. 32: Příklad snímku získaného během měření prostorové homogenity. Podobné snímky byly získány také při měření úhlové homogenity.

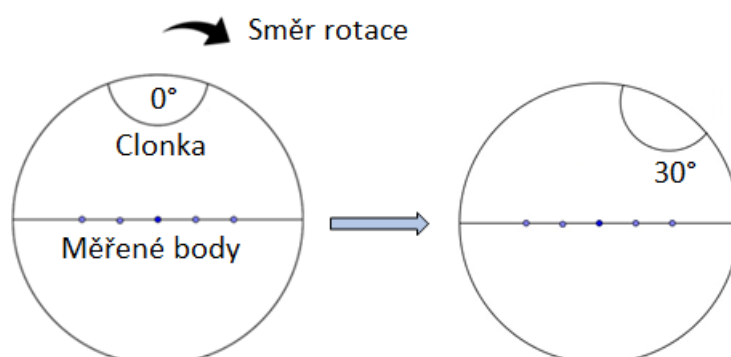
Experimentální sestava pro měření úhlové homogenity byla složena ze CCD umístěné na rotačním posuvu, který umožňoval rotaci kamery před výstupním portem IK. Rotační posuv byl navíc umístěn na lineárním posuvu umožňujícím translaci CCD spolu s rotačním posuvem před výstupním portem IK. Schéma této experimentální sestavy je uvedeno na obr. 33, kde je znázorněn také úhel rotace ϕ , a její fotografie na obr. 34. Během měření byla CCD kamera spolu s rotačním posuvem posouvána mezi body ve vzdálenosti ± 10 mm a ± 20 mm od středu výstupního portu IK, ve kterých probíhalo měření, a měřen byl i střed (celkem 5 bodů). V každém z těchto bodů CCD rotovala v rozmezí úhlů ϕ od -30° do 30° s krokem 1° a v každé pozici byl pořízen snímek. Celou kouli bylo také možno rotovat kolem osy procházející jejím středem a středem výstupního portu (viz obr. 34). Během všech měření bylo s koulí rotováno v rozsahu úhlů od 0° do 180° s krokem 30° (celkem 7 rotačních pozic), čímž docházelo také k rotaci clonky při pohledu zepředu na výstupní port koule. Schéma translace a rotace IK během měření je znázorněno na obr. 35. Rotační pozice 0° je definovaná tak, že se clonka při pohledu na výstupní port zepředu nachází „nahore“, jako je tomu na obr. 35, a rotace IK probíhá v záporném směru. V rámci jednoho měření bylo proměřeno všech pět translačních bodů a jedna rotační pozice clonky.



Obr. 33: Schéma experimentální sestavy pro měření úhlové homogenity. Pohled svrchu.



Obr. 34: Experimentální sestava pro měření úhlové homogenity, pohled z boku.



Obr. 35: Schéma rotace a translace během měření úhlové homogenity IK, pohled zepředu na výstupní port IK.

Během všech experimentů byl použit referenční detektor pro měření změn v zářivém toku uvnitř koule. Referenční detektor měřil během měření každých 5 s jeho velikost, aby na tyto změny bylo možné provést korekci (viz kapitola 3.4).

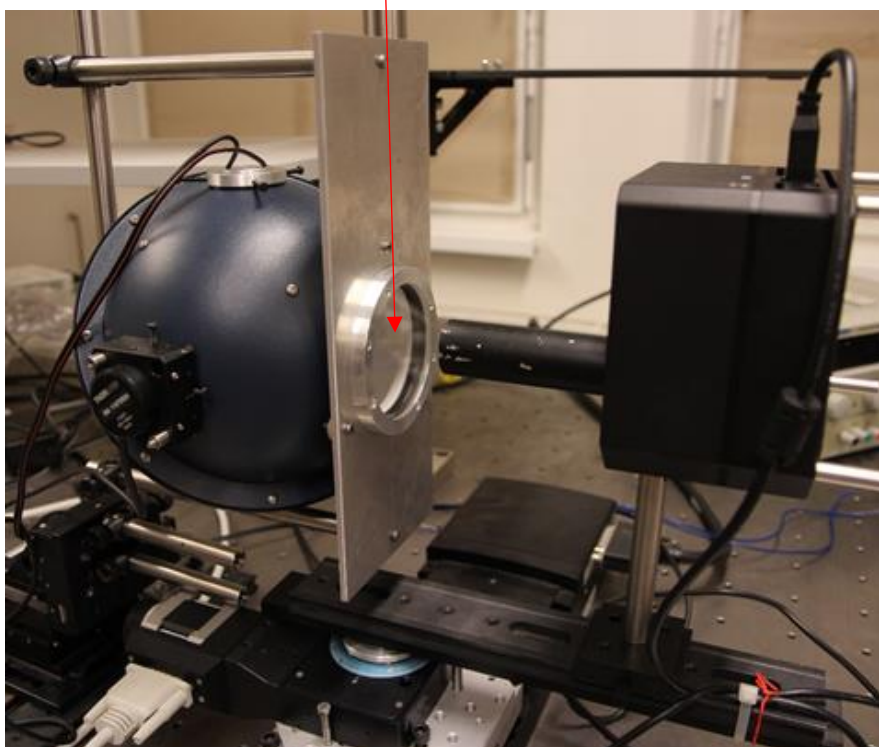
Expoziční doba kamery byla ve všech měřeních nastavena 3 s, což je optimální hodnota pro sejmутí snímku za daného výkonu diody (viz dále), a každý desátý pořízený snímek byl snímek temného pozadí. Délka expozice byla vyzkoušena na několika testovacích snímcích tak, aby měl snímek potřebné rozlišení a nedocházelo k saturaci detektoru.

3.3 Experimentální procedury

Během měření byla nejdříve s použitím výše uvedených procedur proměřena prostorová a úhlová homogenita IK bez modifikací. Celá experimentální sestava byla řízena pomocí počítače prostřednictvím programovacího prostředí MATLAB, pomocí kterého proběhlo také vyhodnocení naměřených dat. Dále byla vyrobena nová clonka tak, aby oproti původní clonce nebyla při pohledu do výstupního portu koule vidět, resp. aby zabírala co nejmenší plochu a tím zvýšila výslednou homogenitu. Vliv nové clonky byl nasimulován a experimentálně ověřen. Dále byl změřen vliv ochranných krytů ze skla (BK7) a plexiskla (PMMA) na prostorovou homogenitu. Upevnění krytu (skleněného) na IK je ilustrováno na obr. 36. Kryt z plexiskla se od krytu ze skla liší jen svou tloušťkou, systém upevnění je analogický.

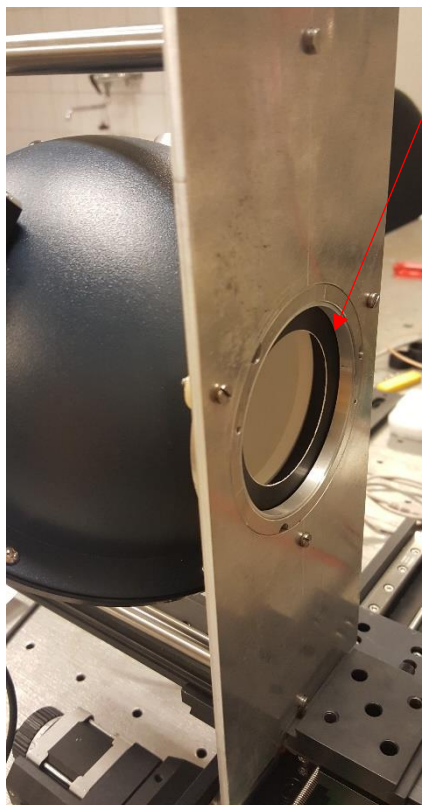
Úhlová homogenita s kryty byla proměřena pouze pro úhlové pozice 0° a 180° . Nakonec byl také zkoumán vliv omezovačů průměru výstupního portu IK o průměru 1 a 2 palce na prostorovou homogenitu. Při použití omezovače o průměru jeden palec byl měřicí krok při měření snížen na 1 mm z důvodu dosažení lepšího rozlišení. Získané výsledky byly porovnány s výsledky měření provedenými před modifikacemi IK. Příklad experimentální sestavy s omezovačem o průměru 2 palce je uveden na obr. 37.

Skleněný kryt s upevněním a rotačním držákem IK



Obr. 36: Experimentální sestava pro měření úhlové homogenity IK spolu s krytem výstupního portu IK ze skla. Pohled z boku.

Omezovač průměru výstupního portu



Obr. 37: Experimentální sestava pro měření úhlové homogenity IK spolu s omezovačem průměru výstupního portu o průměru 2 palce.

Během měření se zářivý tok uvnitř IK naměřený referenčním detektorem pohyboval v intervalu $(68-73) \mu\text{W}$, což je hodnota, při které je zářivý tok dostatečný pro sejmutí snímku a při které zároveň nedochází k saturaci detektoru. Tato hodnota byla nastavena změnami reálného elektrického proudu procházejícího LED.

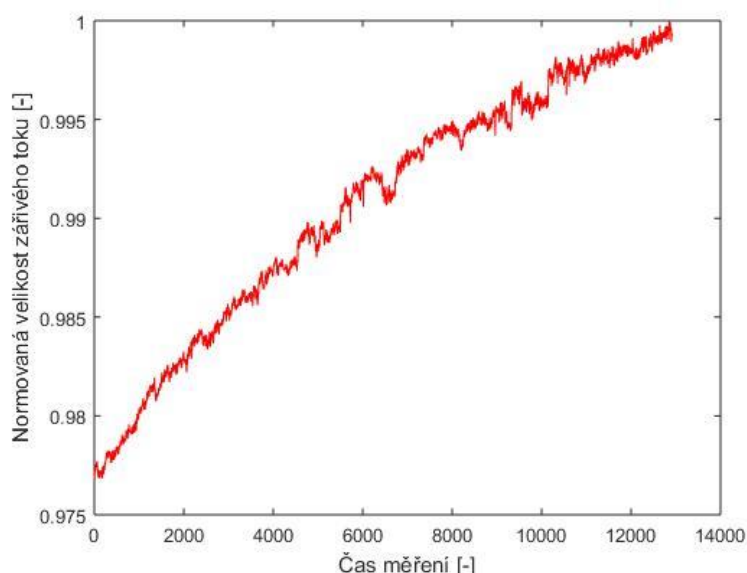
Poté byly nasnímané snímky (ilustrované na obr. 32) vyhodnoceny. Nejprve bylo od těchto snímků odečteno temné pozadí. Dále byly zprůměrovány hodnoty intenzity naměřené na jednotlivých pixelech osvětlených na CCD čipu, čímž byla získána výsledná intenzita pořízeného snímku. Po pořízení všech snímků byla pro každý snímek pomocí vztahu (22) spočítána veličina, kterou lze, poněkud nesprávně, nazvat „hodnota homogenity (pro měřený bod)“. Toto označení vychází z potřeby charakterizovat homogenitu světelného toku ve více (měřených) bodech, a ne pouze jako celek jedním číslem. Poté byly tyto vypočtené hodnoty homogenity zpracovány (byla určena jejich střední hodnota a odchylka měření). Měření s omezovači portu byla provedena s modifikovanou clonkou a bez krytu. V této práci bude užívána následující terminologie: Pojem homogenita bodu nebo hodnota homogenity označuje veličinu vypočítanou pomocí vztahu (22) pro daný bod. Pojem (střední) homogenita označuje průměrnou homogenitu spočítanou ze všech naměřených hodnot homogenity při daném měření.

V důsledku efektů, které budou ilustrovány v sekci 4, dochází k poklesu hodnot prostorové homogenity na okraji snímané oblasti, a je proto potřeba tento jev brát v úvahu.

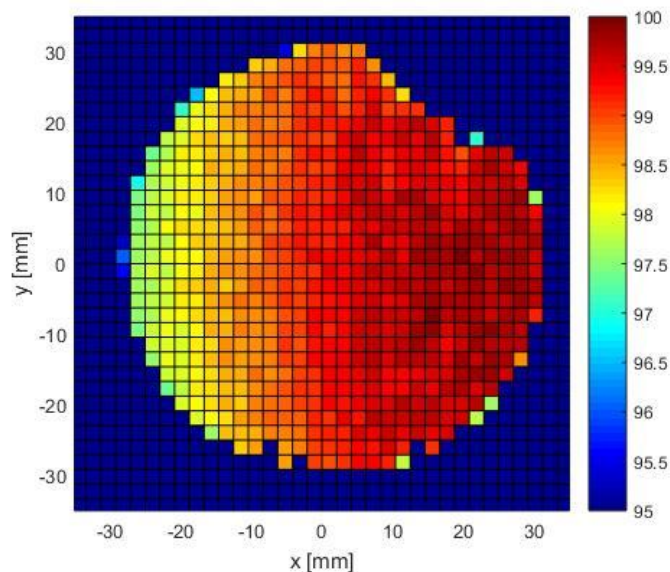
To lze provést snížením poloměru vyhodnocované oblasti na 90 % hodnoty poloměru výstupního portu. Tato hodnota (90 %) vychází z norem daných Labsphere, Inc. [54]. Ve výsledcích měření budou následně uvedeny dvě hodnoty homogenity: První popisuje průměrnou hodnotu homogenity v rámci celého výstupního portu spočítanou ze všech naměřených bodů a druhá průměrnou hodnotu homogenity v oblasti kruhu, jehož poloměr je zmenšený na hodnotu 90 % původního poloměru výstupního portu. Tato zmenšená oblast s vyššími hodnotami homogenity se pak využívá pro kalibraci detektorů v praxi. Analogicky měření prostorové homogenity bylo vyhodnoceno měření úhlové homogenity. Nejprve byla průměrováním jednotlivých pixelů určena intenzita všech snímků a poté ze vztahu (22) vypočtena hodnota homogenity pro každý měřený bod a určena střední hodnota homogenity.

3.4 Problémy při měření a zdroje chyb

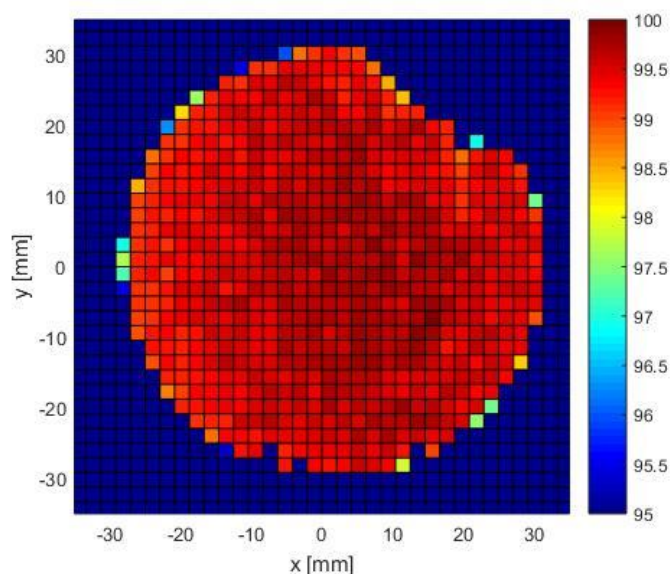
Při prvních měřeních se ukázalo, že prostorová homogenita vykazuje závislost na poloze ve vstupním portu IK a že se pozvolna mění. Bylo zjištěno, že zářivý tok uvnitř IK není během měření konstantní a že se také mění. Proto byl zářivý tok uvnitř koule měřen referenčním detektorem a při vyhodnocování byla provedena korekce, aby tyto změny neovlivňovaly měření. Největší změny v zářivém toku během měření (koncová minus počáteční velikost zářivého toku), které byly takto korigovány, dosahovaly při pozvolné změně zářivého toku během celého měření až 6 %, i když tyto změny ve většině měření dosahovaly velikosti (1-2) %. Tento efekt lze ilustrovat na měření prostorové homogenity před modifikací clonky, jehož normovaný průběh zářivého toku naměřený referenčním detektorem během měření je uveden na obr. 38. Prostorové rozložení homogenity ve výstupním portu IK je uvedeno na obr. 39 a 40 před korekcí na změny zářivého toku a po korekci.



Obr. 38: Příklad normované velikosti zářivého toku naměřené referenčním detektorem při měření prostorové homogenity. Časová osa odpovídá délce měření (asi 3 h).



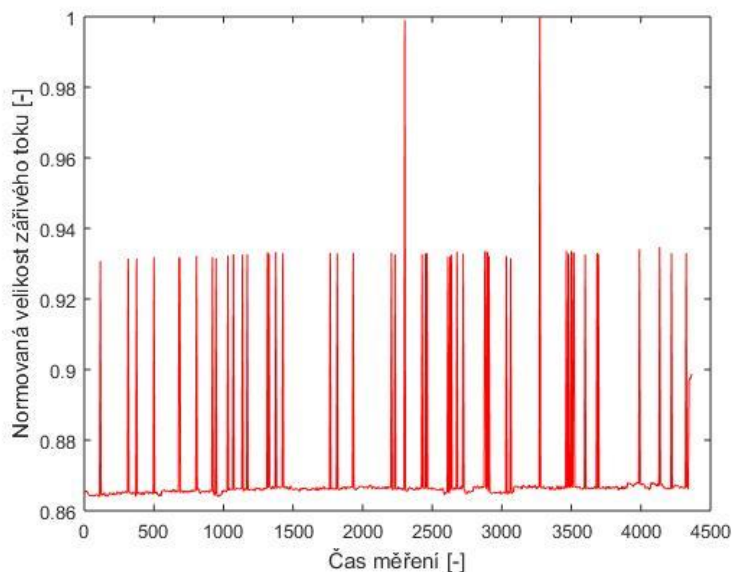
Obr. 39: Příklad rozložení prostorové homogenity před korekcí na změny v zářivém toku uvnitř IK.



Obr. 40: Příklad rozložení prostorové homogenity po korekci na změny v zářivém toku uvnitř IK.

Protože měření na obr. 39 a 40 probíhalo zleva doprava a shora dolů, přičemž homogenita směrem doprava podle obr. 39 rostla, a protože zářivý tok uvnitř koule podle obr. 38 v čase také rostl, plyne z toho, že korekce na změny zářivého toku je velmi důležitá, protože by jinak hodnoty homogenity jednotlivých bodů IK závisely na velikosti zářivého toku uvnitř IK.

Objevovaly se také skokové změny zářivého toku v podobě výstřelků velikosti vyšší než 10 % (viz např. obr. 41), které nebylo možné korigovat referenčním detektorem, protože používaný detektor není schopen snímat data s potřebnou frekvencí.



Obr. 41: Příklad normované velikosti zářivého toku s velkým výskytem výstřelků naměřené referenčním detektorem při měření úhlové homogenity. Časová osa odpovídá délce měření (asi 1,25 h).

Četnost těchto výstřelků se u jednotlivých měření velmi lišila a pro jejich existenci bylo formulováno několik teorií:

1. Vysoká venkovní teplota během měření (měřilo se také v létě).
2. Fluktuace použitého laboratorního zdroje.
3. Elektromagnetické interference mezi vodiči na laboratorním stole.

Kvůli vysokým teplotám byla snaha měřit, pokud možno, v ranních a dopoledních hodinách, kdy teploty nebyly tak vysoké. Aby byly odstraněny vlivy napájecího zdroje, byl pro napájení, kromě původního laboratorního zdroje, použit automobilový akumulátor a baterie z notebooku. Byly použity také filtry, aby byly odfiltrovány případné nežádoucí frekvence v napájecím proudu. Tyto změny neměly na měření vliv. Kvůli snížení vlivu elektromagnetických interferencí byly vodiče referenčního detektoru umístěny ve větší vzdálenosti od napájecích vodičů s vyšším napětím. Tato teorie byla označena za nejpravděpodobnější, protože se skokové změny výkonu projevovaly i mimo měření při pouhé manipulaci s vodiči. Přesto ale nebyla příčina těchto změn zářivého toku odhalena s úplnou jistotou a skokové změny se objevovaly pořád. Bylo proto nutno provést větší počet měření, aby změny v zářivém toku byly vždy pozvolné a skokové změny se neobjevovaly.

Chyby při měření vznikaly také v důsledku zpětných odrazů světla mezi výstupním portem IK a detektorem, protože čelní strana IK i CCD je tvořena kovovým materiálem, který je sice natřený načerno, ale jehož účelem není absorbovat světlo. Tyto zpětné odrazy se projevovaly periodickými změnami v naměřeném zářivém toku uvnitř IK, čímž docházelo také ke změnám hodnot homogenit při měření prostorové homogenity, která vykazovala také periodický charakter. Vliv zpětných odrazů byl odstraněn posunutím detektoru dále od IK. Při

prvních měřeních byla vzdálenost mezi IK a CCD bezprostřední a byla postupně zvětšována, až došlo k vymizení zpětných odrazů.

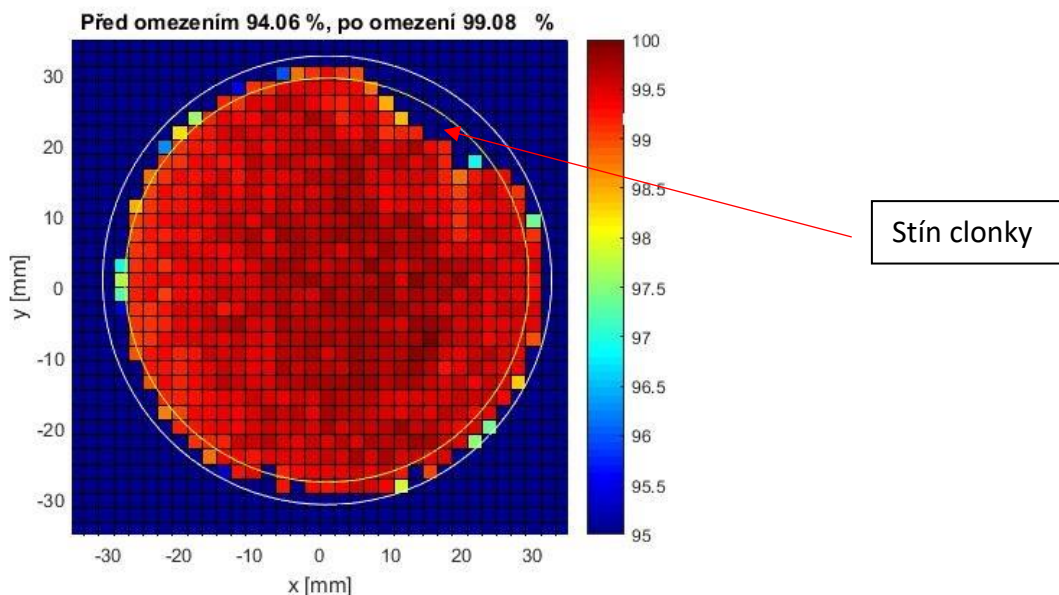
Dalším problémem, který ovlivňoval měření, konkrétně úhlové homogenity, bylo seřazení experimentální sestavy. Přestože bylo seřazení sestavy zkontrolováno před každým měřením, homogenita pro nejnižší a nejvyšší úhly (-30° a 30°) v některých pozicíchjevila klesající tendenci, viz sekce 4.2. Bylo zjištěno, že tuto odchylku lze ovlivnit a odstranit nepatrným natočením CCD tak, aby bylo „čelo“ CCD detektoru rovnoběžné se vstupním portem IK, resp. aby přední část kamery ve „tvaru nosu“ byla na port kolmá (viz obr. 28).

Měření mohlo být také ovlivněno faktem, že omezovače průměru výstupního portu neměly sférický tvar jako IK, ale měly rovinný tvar, takže IK jako celek již neměla přesně tvar koule. Dále mohlo docházet k teplotní roztažnosti experimentálního zařízení vlivem změn teploty a k ovlivnění světla z IK změnami vlastností vzduchu. Protože ale tyto zdroje chyb jsou pouze teoretické, nebyly při měření patrné, a tak nebyly brány při měření v úvahu a nebyly korigovány.

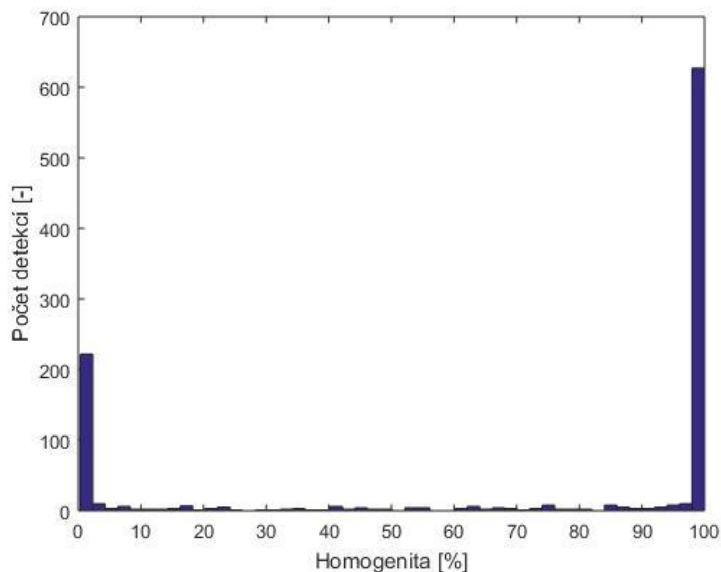
4 Výsledky a diskuze

4.1 Měření prostorové homogenity

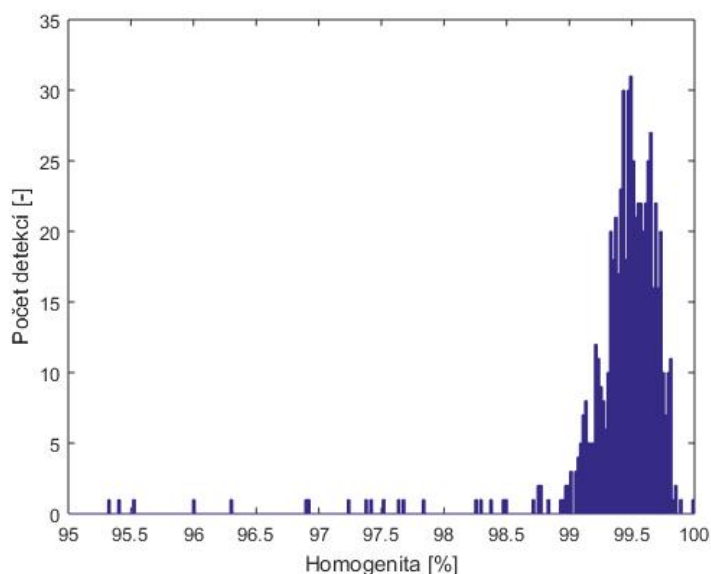
Nejprve bylo provedeno měření prostorové homogenity. Homogenita byla nejprve změřena před optimalizací clonky, která by měla zvýšit homogenitu vyzařování IK., a dále byla změřena s ochrannými kryty ze skla (BK7) a plexiskla (PMMA), které mají za úkol ochranu IK před nečistotami z vnějšku. Poté byla provedena modifikace clonky a bylo zopakováno měření bez a s použitím krytů. Nakonec byla změřena homogenita při použití omezovačů průměru výstupního portu IK. Všechna měření (prostorové a poté i úhlové homogenity) byla provedena vícekrát, aby byla zajištěna reprodukovatelnost měření, a níže uvedené grafy představují typické naměřené případy v dané konfiguraci, protože celkové množství naměřených dat je příliš velké pro prezentaci zde. Každé uvedené měření prostorové homogenity je prezentováno následovně: Nejdříve byly do naměřených závislostí homogenity na poloze ve výstupním portu dokresleny dvě kružnice: vnější (bílá) označuje velikost výstupního portu a vnitřní (žlutá) označuje jeho omezení na 90 % původního poloměru. V mezikruží obou kružnic se nacházejí body s homogenitou nižší než 95 %. V grafu jsou také uvedeny průměrné hodnoty homogenity odpovídající bodům naměřeným v těchto dvou oblastech. Ve výsledcích jsou dále uvedeny histogramy naměřených hodnot v rozsahu homogenit (0-100) % a (95-100) %. V intervalu hodnot (0-100) % jsou obsaženy všechny naměřené hodnoty a v intervalu (95-100) % se nachází většina naměřených hodnot. Přesnost měření je zde prezentována směrodatnou odchylkou homogenity vypočítanou z výsledků všech jednotlivých měření a je uvedena níže. Výsledky měření prostorové homogenity IK s nemodifikovanou clonkou jsou uvedeny na obr. 42-44.



Obr. 42: Výsledky měření prostorové homogenity spolu se středními hodnotami homogenity. Vnější kružnice omezuje vyhodnocovanou oblast na celý port a vnitřní na 90 % jeho hodnoty. Měření bez krytu a s původní clonkou.



Obr. 43: Histogram naměřených hodnot v rozsahu (0-100) %. Měření bez krytu a s původní clonkou.

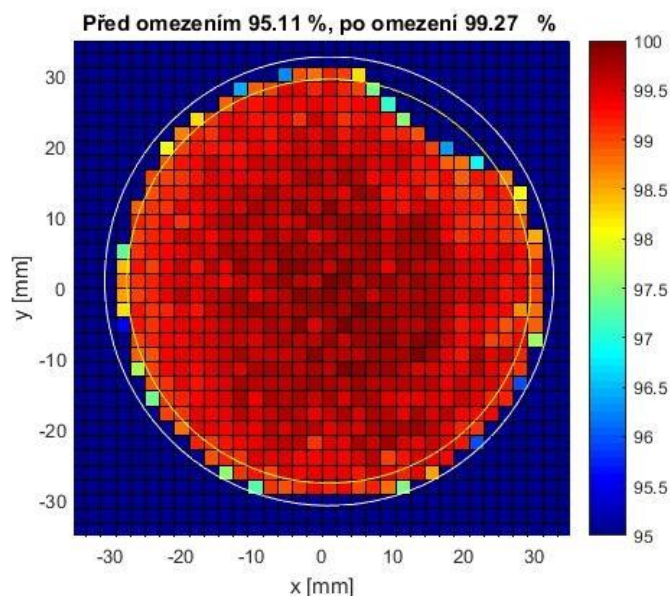


Obr. 44: Histogram naměřených hodnot v rozsahu (95-100) %. Měření bez krytu a s původní clonkou.

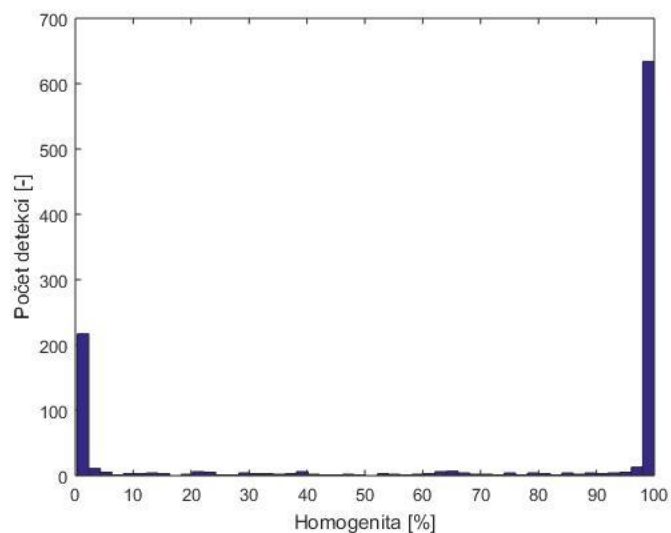
Na grafu prostorového rozložení homogenity (obr. 42) je jasně patrná oblast snížené homogenity v „pravém horním rohu grafu“ způsobená přítomností nemodifikované clonky uvnitř IK. Tento trend se projevuje ve výsledcích z provedených měření s nemodifikovanou clonkou. Hodnota homogenity v této oblasti se pohybuje okolo 65 %. Tato hodnota je ale příliš nízká na to, aby byla v barevné patrná. Je ale patrná při hlubší analýze dat a ve výsledcích měření úhlové homogenity (např. obr. 74 a 75). Na grafech prostorového rozložení homogenity (obr. 42 a další následující) je také vidět, že homogenita dosahuje nejnižších hodnot na okraji výstupního portu a směrem k jeho středu naměřené hodnoty stoupají. To by se dalo vysvětlit jako pomyslné zmenšení průměru portu IK, které teoreticky vede ke zvýšení

homogenity IK. Na okraji grafu výstupního portu byly také naměřeny body s nízkou hodnotou homogenity, které nejsou kvůli rozsahu tohoto grafu patrné, ale jsou patrné při hlubší analýze dat a na histogramu naměřených hodnot. Tyto hodnoty jsou způsobeny faktem, že během měření CCD snímá nejenom svazek světla vystupující z výstupního portu IK, ale také jeho obrubu. Tyto body nasnímané v jeho obrubě velmi snižují průměrnou hodnotu homogenity. Proto jsou ve výsledcích uvedeny dvě průměrné hodnoty homogenity pro každé měření: Jedna vychází z vyhodnocení celé měřené oblasti průměru výstupního portu IK a druhá z oblasti omezené na 90 % jeho hodnoty.

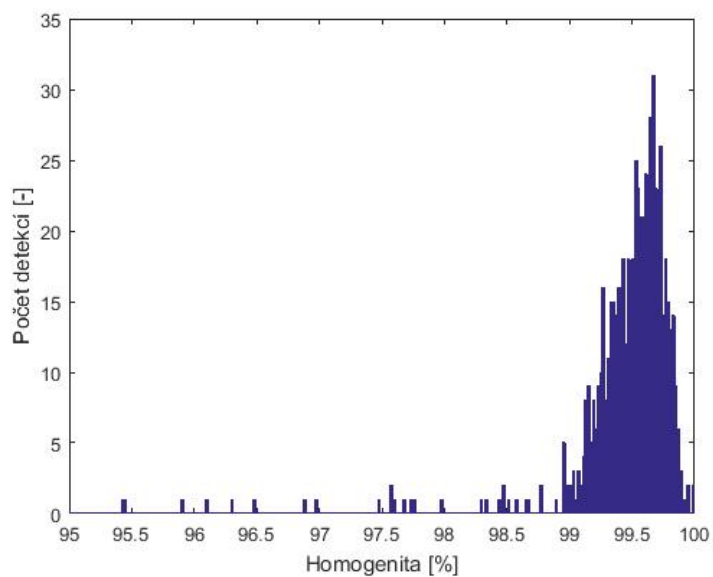
Na histogramech (obr. 43 a 44) lze popsat několik významných intervalů homogenity. Velmi nízké hodnoty homogenity (přibližně okolo prvního významného „peaku“) byly naměřeny zejména na okraji výstupního portu, kde dochází k poklesu homogenity. Nejvyšší (a nejčastější) hodnoty homogenity od 99 % do 100 % byly zaznamenány ve středu výstupního portu IK a jsou pro účely kalibrace nejvhodnější. Z těchto hodnot je nejvíce zastoupena hodnota 99,5 %. Poté bylo provedeno měření s ochrannými kryty ze skla a plexiskla. Výsledky měření s krytem z plexiskla jsou uvedeny na obr. 45-47 a s krytem ze skla na obr. 48-50.



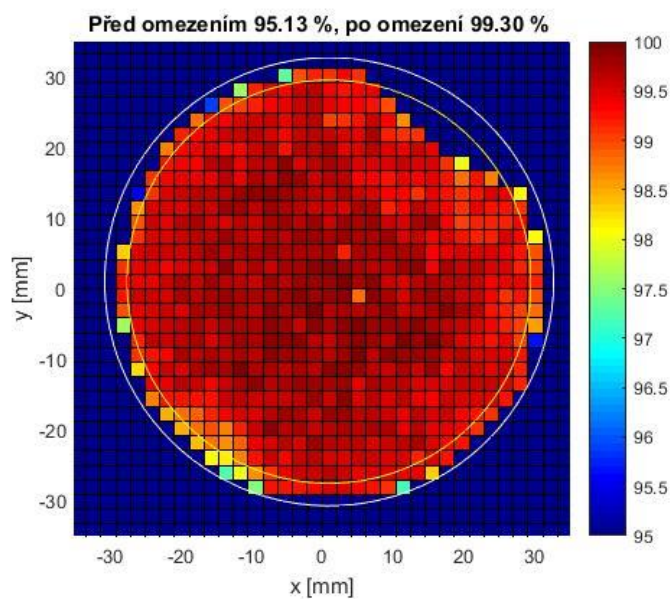
Obr. 45: Výsledky měření prostorové homogenity spolu se středními hodnotami homogenity. Vnější kružnice omezuje vyhodnocovanou oblast na celý port a vnitřní na 90 % jeho hodnoty. Měření s krytem z plexiskla a s původní clonkou.



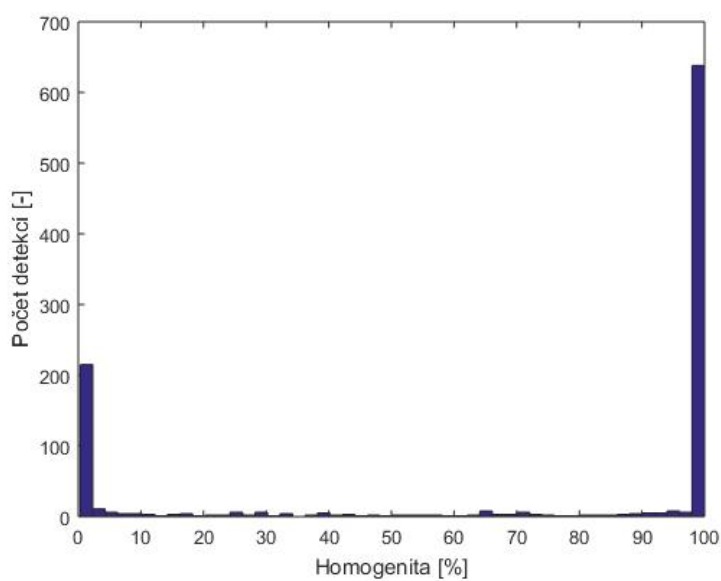
Obr. 46: Histogram naměřených hodnot v rozsahu (0-100) %. Měření s krytem z plexiskla a s původní clonkou.



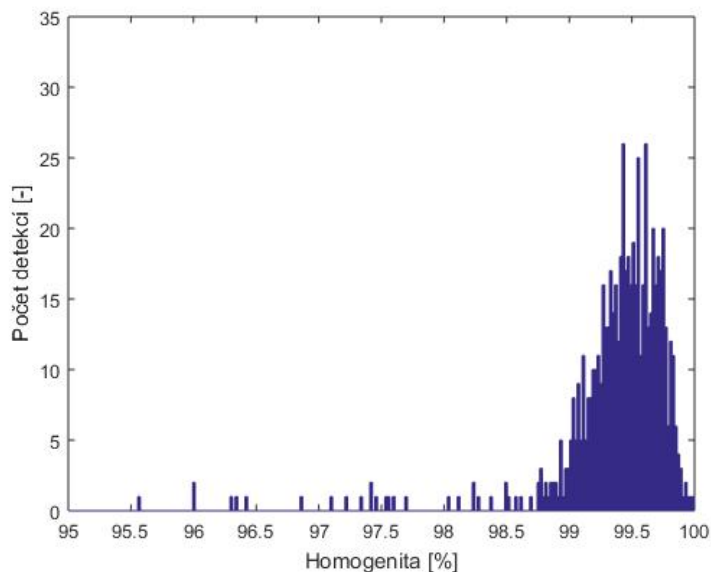
Obr. 47: Histogram naměřených hodnot v rozsahu (95-100) %. Měření s krytem z plexiskla a s původní clonkou.



Obr. 48: Výsledky měření prostorové homogenity spolu se středními hodnotami homogenity. Vnější kružnice omezuje vyhodnocovanou oblast na celý port a vnitřní na 90 % jeho hodnoty. Měření s krytem ze skla a s původní clonkou.



Obr. 49: Histogram naměřených hodnot v rozsahu (0-100) %. Měření s krytem ze skla a s původní clonkou.



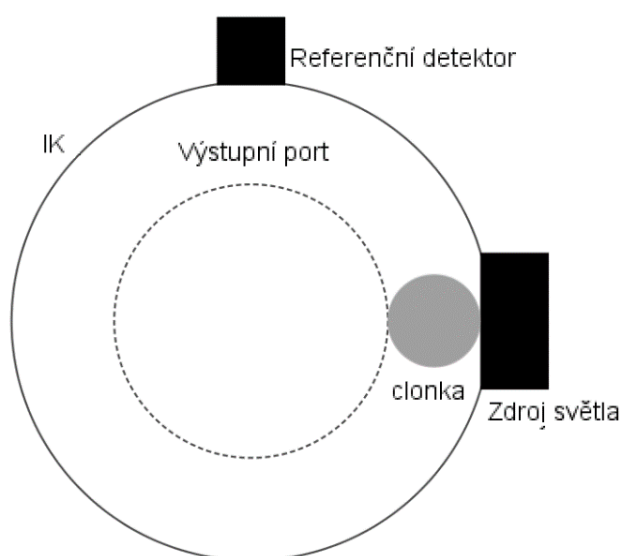
Obr. 50: Histogram naměřených hodnot v rozsahu (95-100) %. Měření s krytem ze skla a s původní clonkou.

Podle obr. 42-50 lze konstatovat, že výsledky měření s ochrannými kryty z plexiskla i ze skla jsou velmi podobné jako výsledky naměřené bez použití ochranných krytů. Rozdíly v naměřených středních hodnotách homogenity se pohybují do 0,5 %. Střední hodnoty všech naměřených homogenit jsou včetně měření s kryty porovnány v tabulce 2. Stejně jsou i výše uvedené komentáře k prostorovým rozložením homogenit a k histogramům naměřených hodnot.

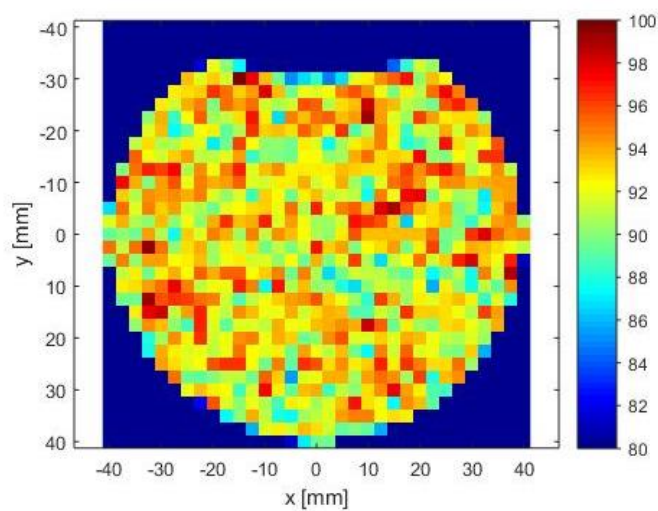
Po těchto měřeních byla provedena Mgr. Vaculou optimalizace clonky, která měla za cíl dosáhnout toho, aby při pohledu na výstupní port IK nebyla clonka při měření patrná a homogenita byla co nejvyšší. Zároveň byly provedeny simulace, které měly porovnat vliv obou clonek na měření. Porovnání tvarů obou clonek je uvedeno na obr. 51. Původní clonka byla umístěna mezi výstupním portem IK a zdrojem světla a měla tvar elipsy s délkami poloos 23,9 mm a 19,7 mm a tloušťku 6 mm. Nová clonka má tvar kružnice o průměru 6 mm a tloušťku 2 mm a je umístěna přímo u zdroje světla. Nová clonka je na obr. 51 vyznačena červeně. Její rozměry a pozice byly teoreticky spočítány pomocí zákonů geometrické optiky. Schematické umístění modifikované clonky na řezu IK je uvedeno na obr. 52. Je zde patrné, že clonka již při pohledu do výstupního portu IK není vidět. Při pohledu na tento obrázek se může zdát, že clonka není dostatečně velká pro zakrytí celého zdroje světla, ale je dostatečně velká, aby kryla LED. Výsledky simulace prostorového rozložení homogenity IK se starou clonkou jsou uvedeny na obr. 53 spolu s histogramem nasimulovaných hodnot (obr. 54) a nasimulované rozložení homogenity při použití modifikované clonky na obr. 55 (spolu s histogramem nasimulovaných hodnot na obr. 56).



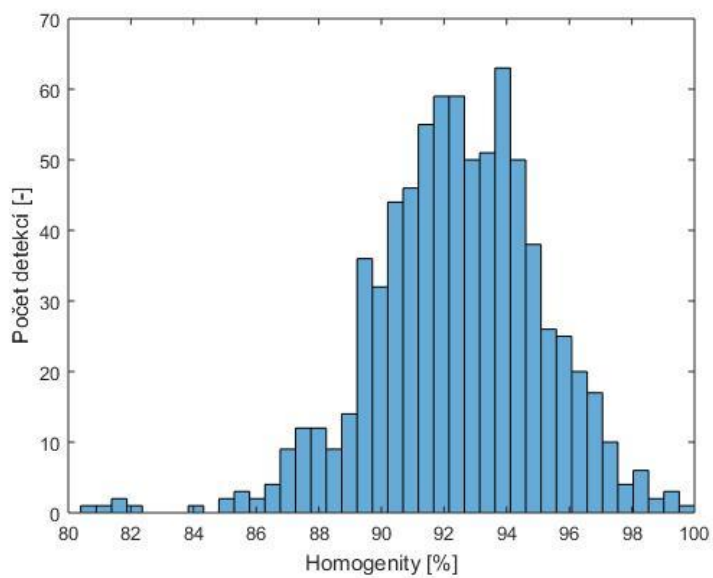
Obr. 51: Porovnání staré clonky (bílá barva) a k ní dokreslené modifikované clonky (červená barva). Foto a grafika Mgr. Martin Vacula.



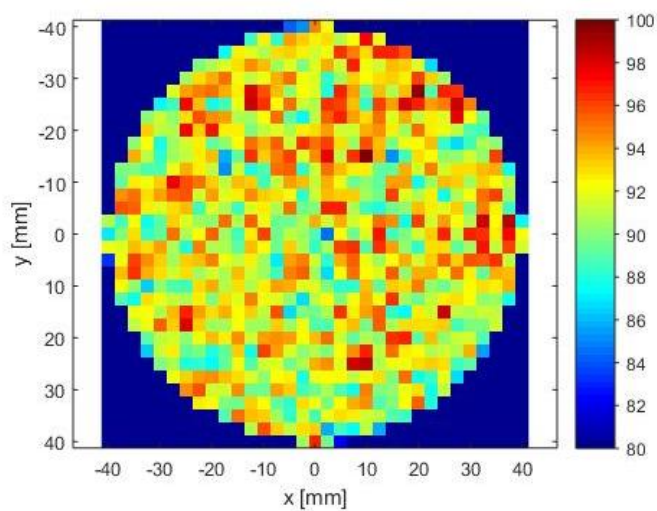
Obr. 52: Řez IK po modifikaci clonky. Pohled na výstupní port zepředu.



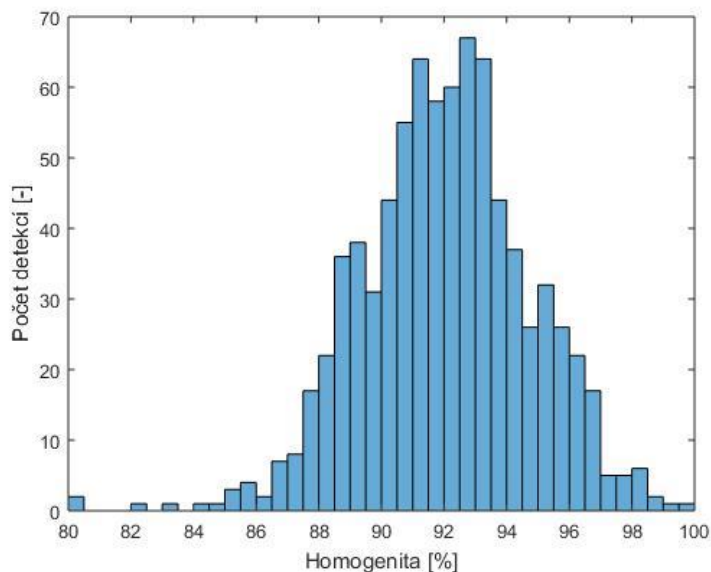
Obr. 53: Nasimulovaná závislost hodnot prostorové homogenity na poloze ve výstupním portu s původní clonkou.



Obr. 54: Histogram nasimulovaných hodnot s původní clonkou.

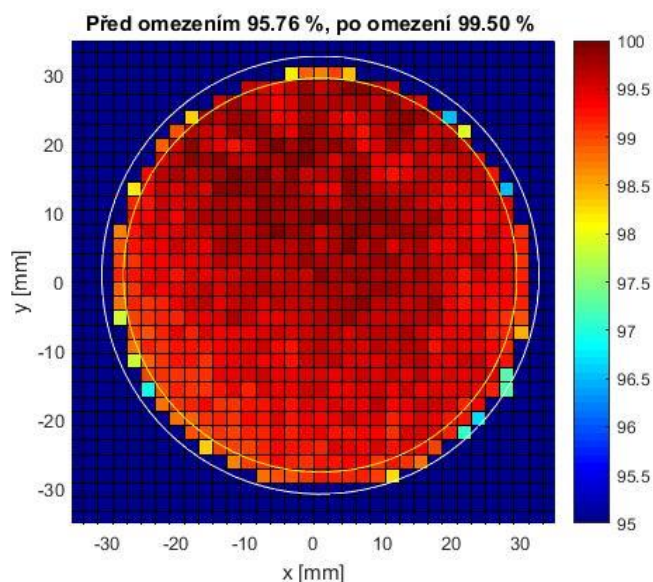


Obr. 55: Nasimulovaná závislost hodnot prostorové homogenity na poloze ve výstupním portu s modifikovanou clonkou.



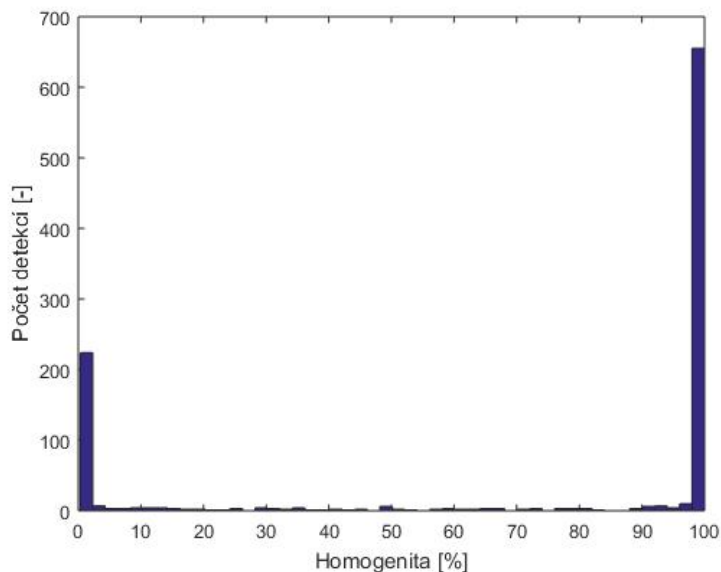
Obr. 56: Histogram nasimulovaných hodnot prostorové homogenity s modifikovanou clonkou.

Z nasimulovaných rozložení homogenit před a po modifikaci clonky je zřejmé, že před modifikací je clonka při pohledu do výstupního portu IK jasně patrná a po její modifikaci již ne. Na nasimulované závislosti je dále vidět, že rozložení hodnot homogenity je „chaotické a náhodné“ a nedosahuje nejvyšších hodnot ve středu výstupního portu jako experimentálně získané hodnoty. Tyto neshody mezi experimentem a simulací jsou způsobeny numerickou povahou nasimulovaných hodnot. Z grafů je také patrné, že byly vytvořeny užitím různého softwaru. Po provedení optimalizace clonky a simulací byla tato clonka vyrobena a experimentálně ověřen její vliv. Výsledky měření s modifikovanou clonkou jsou uvedeny

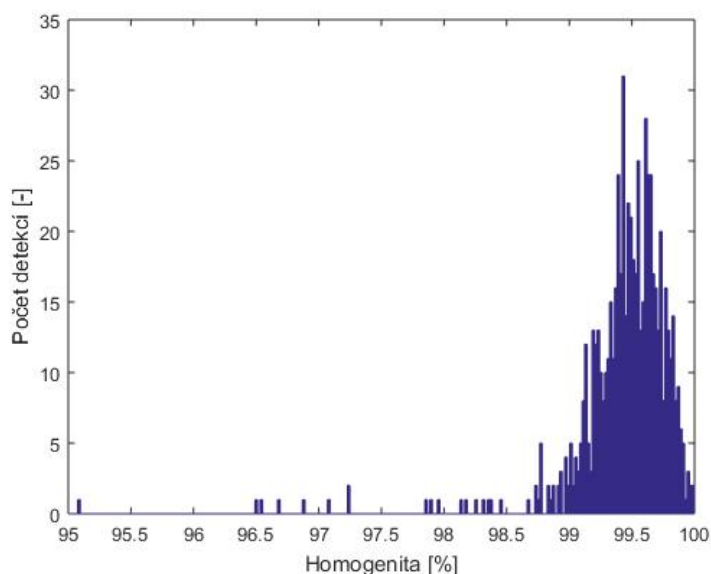


na obr. 57-59.

Obr. 57: Výsledky měření prostorové homogenity spolu se středními hodnotami homogenity. Vnější kružnice omezuje vyhodnocovanou oblast na celý port a vnitřní na 90 % jeho hodnoty. Měření bez krytu a s modifikovanou clonkou.



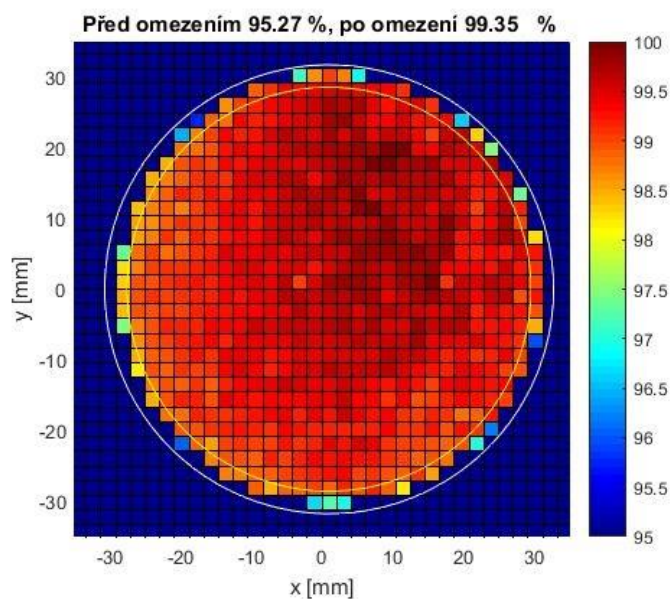
Obr. 58: Histogram naměřených hodnot v rozsahu (0-100) %. Měření bez krytu a s modifikovanou clonkou.



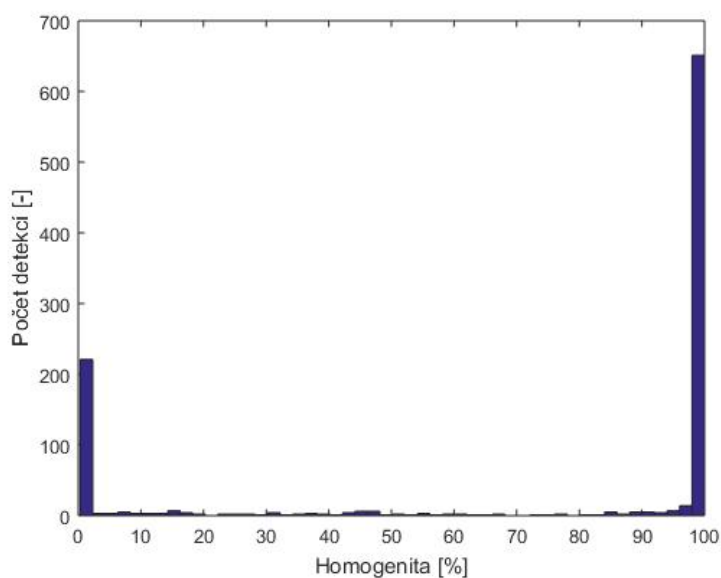
Obr. 59: Histogram naměřených hodnot v rozsahu (95-100) %. Měření bez krytu a s modifikovanou clonkou.

Porovnání měření na obr. 42 před optimalizací clonky s obr. 57 po optimalizaci potvrzuje, že modifikací clonky bylo dosaženo žádaného efektu. Optimalizovaná clonka již není při pohledu na výstupní port patrná, a navíc došlo k mírnému zvýšení homogenity. Je také možné porovnat nasimulované prostorové rozložení homogenity s naměřeným před modifikací clonky (obr. 53 a 42) a po její modifikaci clonky (obr. 55 a 57). Z porovnání rozložení homogenit před optimalizací je vidět, že při simulaci a měření byla clonka pootočená o přibližně 45°. Důležitý závěr je, že provedené simulace potvrzují správnost navržené clonky. Všechna následující měření byla provedena s modifikovanou clonkou. Dále byla také

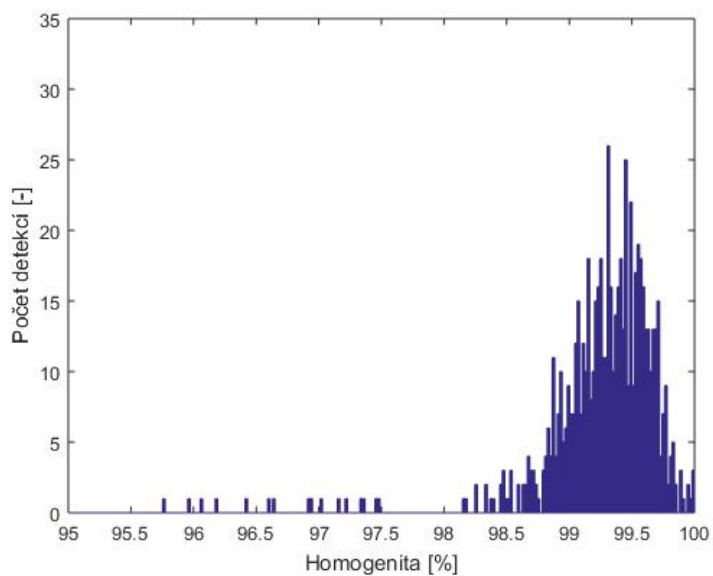
provedena měření s modifikovanou clonkou a s použitím ochranných krytů. Výsledky měření s použitím ochranného krytu z plexiskla jsou uvedeny na obr. 60-62 a ze skla na obr. 63-65.



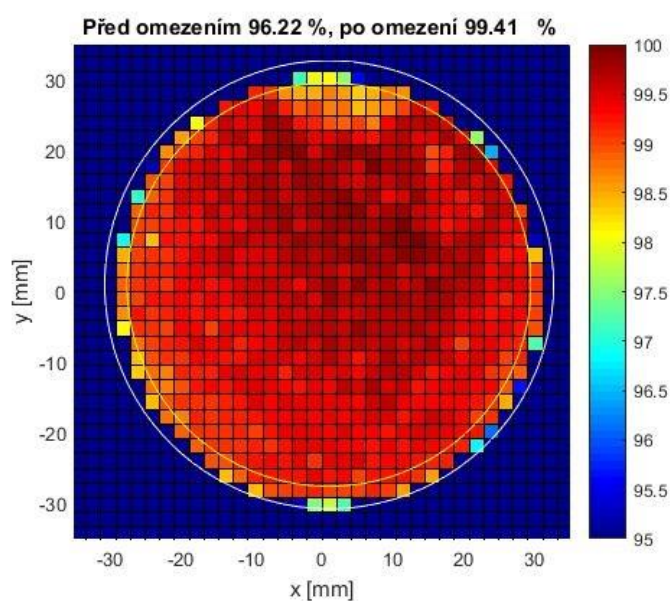
Obr. 60: Výsledky měření prostorové homogenity spolu se středními hodnotami homogenity. Vnější kružnice omezuje vyhodnocovanou oblast na celý port a vnitřní na 90 % jeho hodnoty. Měření s modifikovanou clonkou a s krytem z plexiskla.



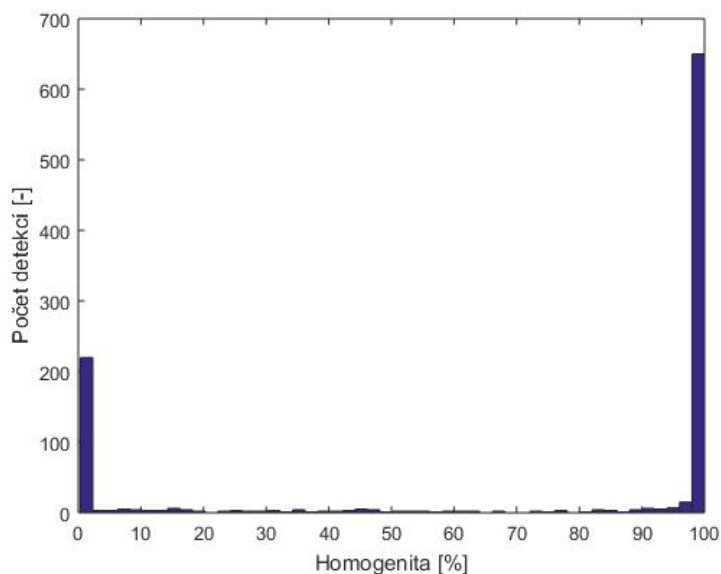
Obr. 61: Histogram naměřených hodnot v rozsahu (0-100) %. Měření s modifikovanou clonkou a krytem z plexiskla.



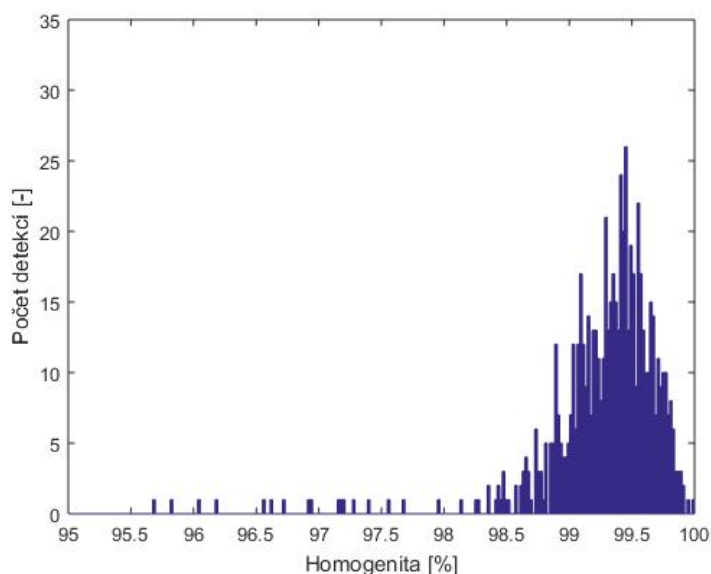
Obr. 62: Histogram naměřených hodnot v rozsahu (95-100) %. Měření s modifikovanou clonkou a krytem z plexiskla.



Obr. 63: Výsledky měření prostorové homogenity spolu se středními hodnotami homogenity. Vnější kružnice omezuje vyhodnocovanou oblast na celý port a vnitřní na 90 % jeho hodnoty. Měření s modifikovanou clonkou a s krytem ze skla.



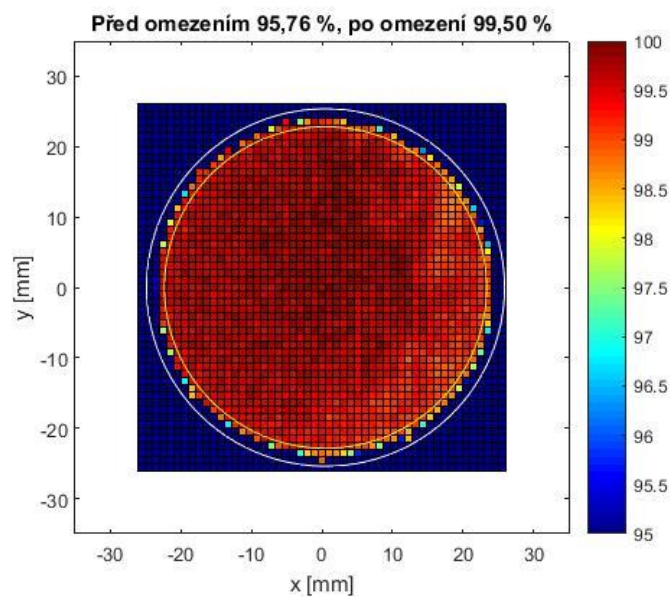
Obr. 64: Histogram naměřených hodnot v rozsahu (0-100) %. Měření s modifikovanou clonkou a krytem ze skla.



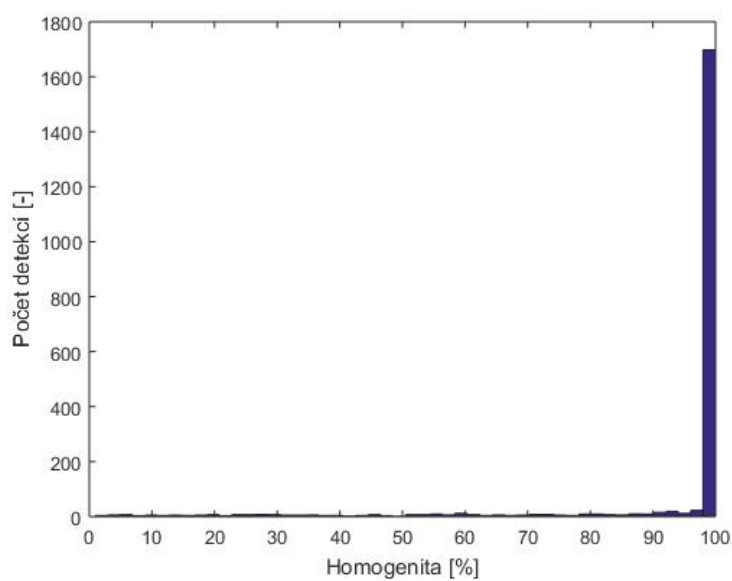
Obr. 65: Histogram naměřených hodnot v rozsahu (95-100) %. Měření s modifikovanou clonkou a krytem ze skla.

Výsledky měření při použití modifikované clonky a ochranného krytu ze skla a plexiskla potvrzují výše uvedené výsledky měření s původní clonkou a ochrannými kryty. Ochranné kryty z těchto materiálů nemají na měření v rámci experimentálních nejistot vliv.

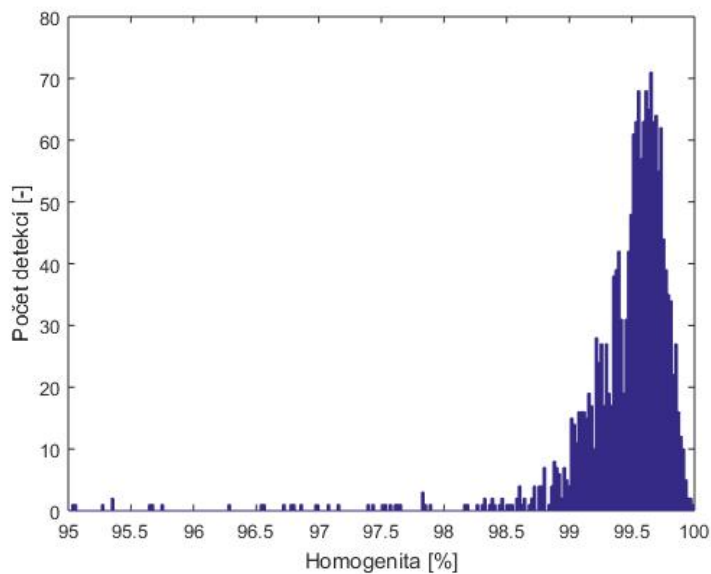
Nakonec byla změřena prostorová homogenita při použití omezovačů průměru výstupního portu IK o průměrech 2 palce a 1 palec (původní průměr výstupního portu IK je 2,5 palce). Výsledky měření s omezovačem 2 palce jsou uvedeny na obr. 66-68 a s omezovačem 1 palec na obr. 69-71.



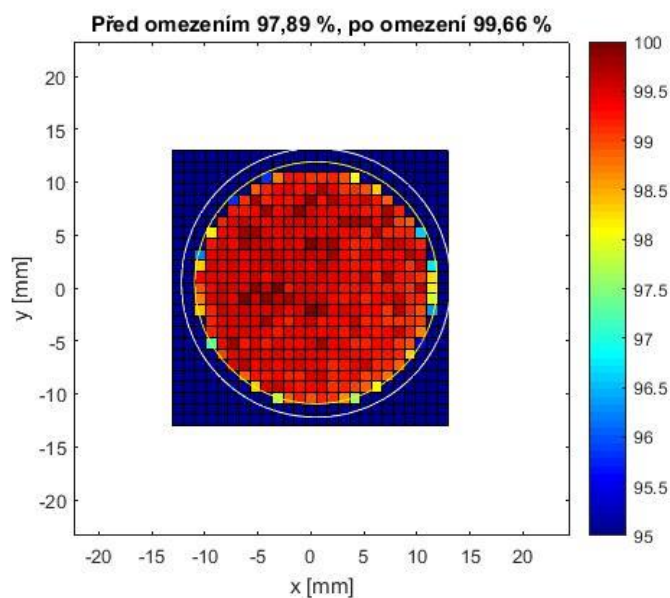
Obr. 66: Výsledky měření prostorové homogenity spolu se středními hodnotami homogenity. Vnější kružnice omezuje vyhodnocovanou oblast na celý port a vnitřní na 90 % jeho hodnoty. Měření s modifikovanou clonkou a omezovačem průměru portu o průměru 2 palce.



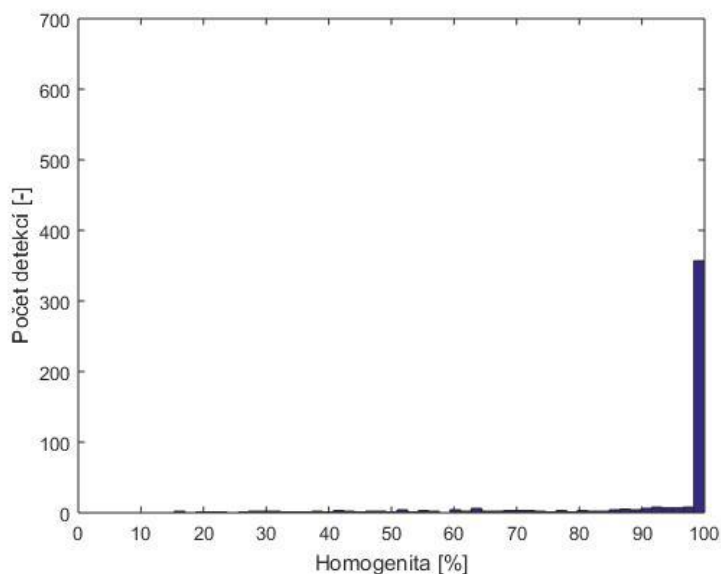
Obr. 67: Histogram naměřených hodnot v rozsahu (0-100) %. Měření s omezovačem průměru portu 2 palce. Rozdílný rozsah osy y.



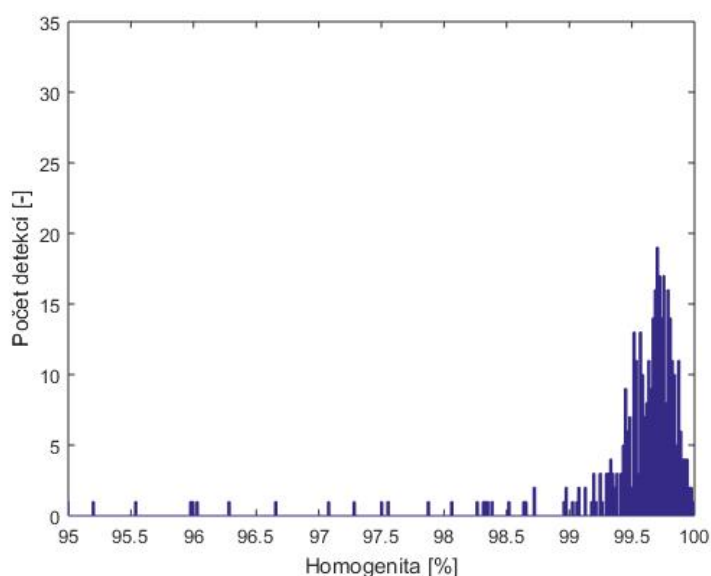
Obr. 68: Histogram naměřených hodnot v rozsahu (95-100) %. Měření s omezovačem průměru portu 2 palce. Rozdílný rozsah osy y.



Obr. 69: Výsledky měření prostorové homogenity spolu se středními hodnotami homogenity. Vnější kružnice omezuje vyhodnocovanou oblast na celý port a vnitřní na 90 % jeho hodnoty. Měření s modifikovanou clonkou a omezovačem průměru portu 1 palec. Zmenšený rozsah osy x.



Obr. 70: Histogram naměřených hodnot v rozsahu (0-100) %. Měření s omezovačem průměru portu 1 palec.



Obr. 71: Histogram naměřených hodnot v rozsahu (95-100) %. Měření s omezovačem průměru portu 1 palec.

Z porovnání výsledků měření bez použití omezovačů průměru výstupního portu (obr. 61) a s jejich použitím (obr. 74 a 78) je zřejmé, že při použití omezovačů průměru výstupního portu IK došlo ke zvýšení výsledné homogenity, které bylo vyšší pro omezovač portu s nižším průměrem (1 palec). Čím je průměr výstupního portu IK (resp. průměr použitého omezovače) menší, tím jsou také menší i změny homogenity, ale je obtížnější je rozlišit, protože jsou si poměry průměru IK a jejího výstupního portu velmi podobné a tyto změny homogenity je obtížnější změřit. Při porovnání histogramů na obr. 67 a 70 s ostatními histogramy se stejným rozsahem (0-100) % je vidět, že na histogramech měření s omezovači průměru portu chybí první výrazný „peak“ a hodnoty kolem něj. Toto je způsobeno různým

rozsahem posunu CCD při měření. Při měření bez omezovačů průměru portu snímala CCD kamera také část obruby výstupního portu, která při použití omezovačů nebyla nasnímána, a proto na histogramech nejsou patrné hodnoty blízké nule.

Výběr průměru omezovače má na měření také čistě praktický vliv. Použití omezovače s nižším průměrem by znamenalo zkrácení doby nutné pro proskenování plochy výstupního portu IK. V případě tohoto měření trvá měření při použití omezovače průměru portu o průměru 1 palec a při konstantní rychlosti posunu CCD přibližně polovinu doby (1,5 h) oproti měření bez omezovače.

Měření prostorové homogenity lze shrnout následovně: Většina středních hodnot prostorové homogenity dosahuje po omezení vyhodnocované oblasti vysokých hodnot nad 99 % Tato zmenšená oblast by měla být využívána pro kalibraci detektorů světla, protože při použití plochy celého výstupního portu je homogenita nižší. V průběhu měření byla dále provedena optimalizace clonky tak, aby byla zvýšena homogenita IK a clonka nebyla při pohledu na výstupní port IK vidět.

Byl také testován vliv krytů ze skla a plexiskla na prostorovou homogenitu. Bylo zjištěno, že použití krytů z těchto materiálů má malý vliv na výslednou homogenitu. Změny homogenity IK při použití ochranných krytů vůči měřením bez těchto krytů se pohybují v řádu desetin procenta (do 0,5 %). Tyto kryty mohou být tedy použity pro ochranu interiéru IK před vnějšími nečistotami.

Dále byl pomocí omezovače snížen průměr výstupního portu na 2 palce, resp. 1 palec. Toto zvýšení homogenity bylo také v souladu s teorií výraznější u průměru 1 palec.

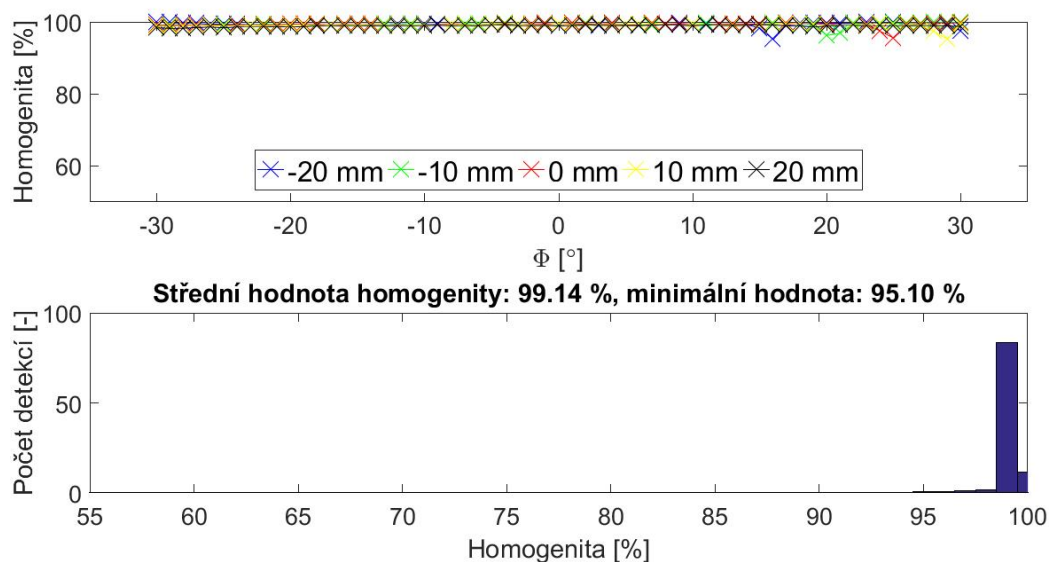
Obecně lze říci, že modifikace IK vedly ke zvýšení její homogenity. Toto zvýšení je kromě číselných hodnot patrné také z grafu prostorového rozložení homogenity a ze změn v barevné škále. Chyby měření byly vypočítané ze středních hodnot homogenity z jednotlivých měření v dané konfiguraci a jsou dány směrodatnou odchylkou, která se pro všechna provedená měření pohybuje do 0,4 %. Pro přehlednost jsou všechny výsledky měření z této sekce shrnuty v tabulce 2. Číselný údaj homogenity před lomítkem značí hodnotu homogenity před omezením vyhodnocované oblasti a údaj za lomítkem po omezení vyhodnocované oblasti. Z jejich porovnání je patrné, že omezení vyhodnocované oblasti vedlo k výraznému nárůstu homogenity, i když jde pouze o jiný způsob vyhodnocení měření. Měření s omezovači portu byla provedena s modifikovanou clonkou a bez krytu.

| Měření | | Střední homogenita [%] |
|---------------------|------------------|-----------------------------|
| Původní clonka | Bez krytu | (94,52±0,23) / (98,83±0,27) |
| | Skleněný kryt | (94,75±0,41) / (99,09±0,38) |
| | Kryt z plexiskla | (95,08±0,06) / (99,30±0,01) |
| Modifikovaná clonka | Bez krytu | (96,12±0,24) / (99,53±0,02) |
| | Skleněný kryt | (96,16±0,21) / (99,40±0,01) |
| | Kryt z plexiskla | (95,99±0,08) / (99,35±0,01) |
| Omezovač portu | 2 palce | (95,56±0,22) / (99,45±0,15) |
| | 1 palec | (97,91±0,11) / (99,64±0,05) |

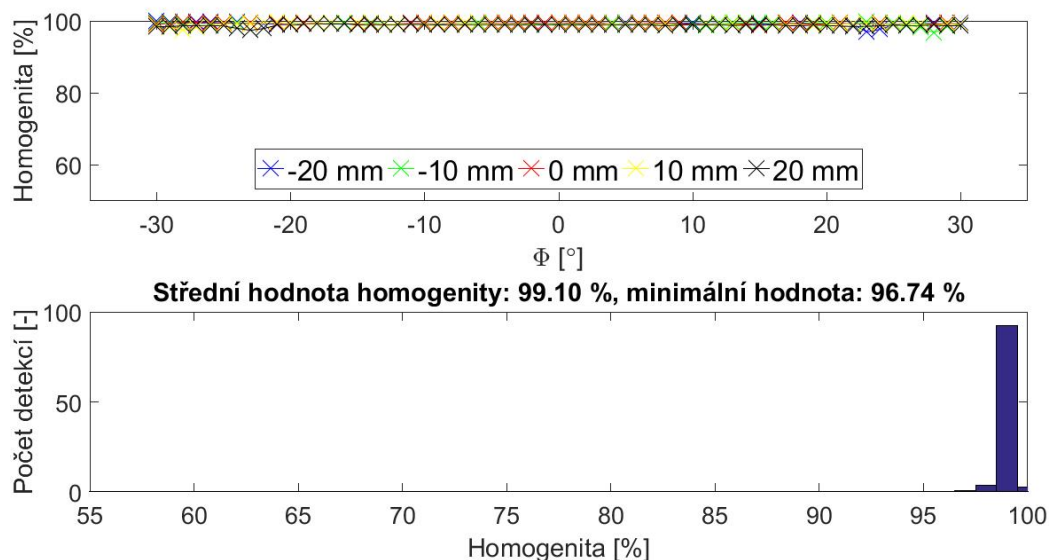
Tabulka 2: Porovnání středních hodnot naměřené prostorové homogenity.

4.2 Měření úhlové homogenity

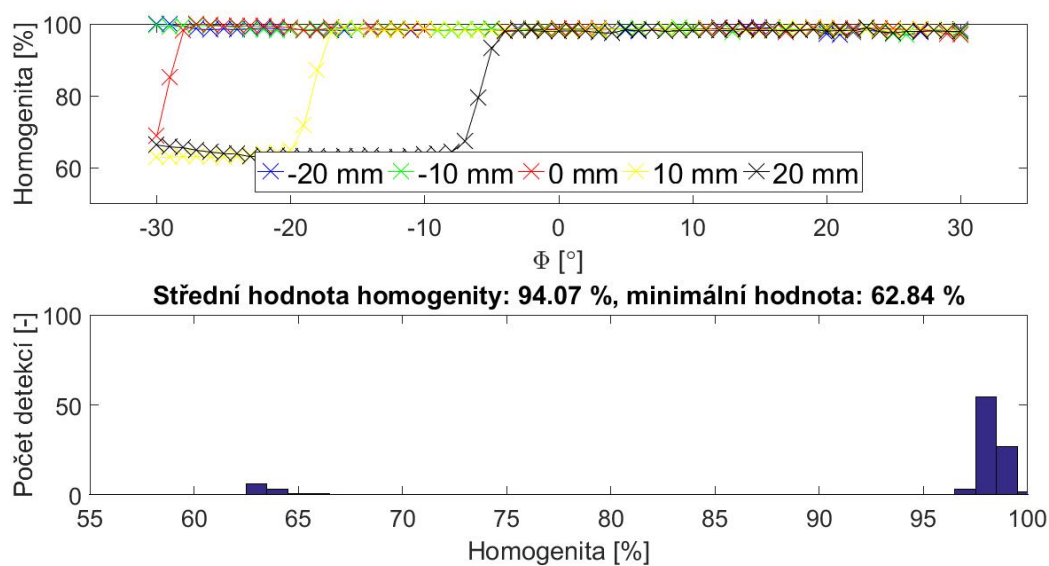
Po měření prostorové homogenity bylo provedeno měření úhlové homogenity IK. Nejprve byly změřeny rotační pozice od 0° do 180° s krokem 30° bez ochranných krytů. Výsledky těchto měření jsou uvedeny na obr. 72-78. Protože bylo provedeno více měření, uvedené grafy jsou pouze příklady naměřených dat. Výsledky statistické analýzy jsou uvedeny dále. Horní část každého obrázku zobrazuje závislost homogenity na velikosti úhlu rotace detektoru ϕ (úhlu sevřeného osou detektoru a normálou výstupního portu IK na homogenitu IK, viz obr. 25) a dolní zobrazuje histogram naměřených hodnot homogenity. Každé měření je charakterizováno střední hodnotou naměřené homogenity a její minimální hodnotou, která vyjadřuje naměřený rozsah homogenit. Ten je důležitý pro kalibraci detektorů. Maximální hodnota homogenity je z její definice 100 %. Tato charakterizace měření byla mj. použita také proto, protože rozdělení naměřených hodnot v rámci jednoho měření není normální. Naměřené střední hodnoty homogenity ze všech provedených měření již vykazují normální rozdělení a byly statisticky zpracovány pomocí jejich střední hodnoty a střední kvadratické odchylky pro každou úhlovou rotační pozici IK. Výsledné hodnoty homogenity jsou včetně odchylek měření shrnuty v tabulce 3 jako funkce úhlové rotační pozice IK.



Obr. 72: Závislost úhlové homogenity na úhlu rotace pro rotační pozici IK 0° pro pět měřených pozic (horní graf) spolu s histogramem naměřených hodnot homogenity (dolní graf).

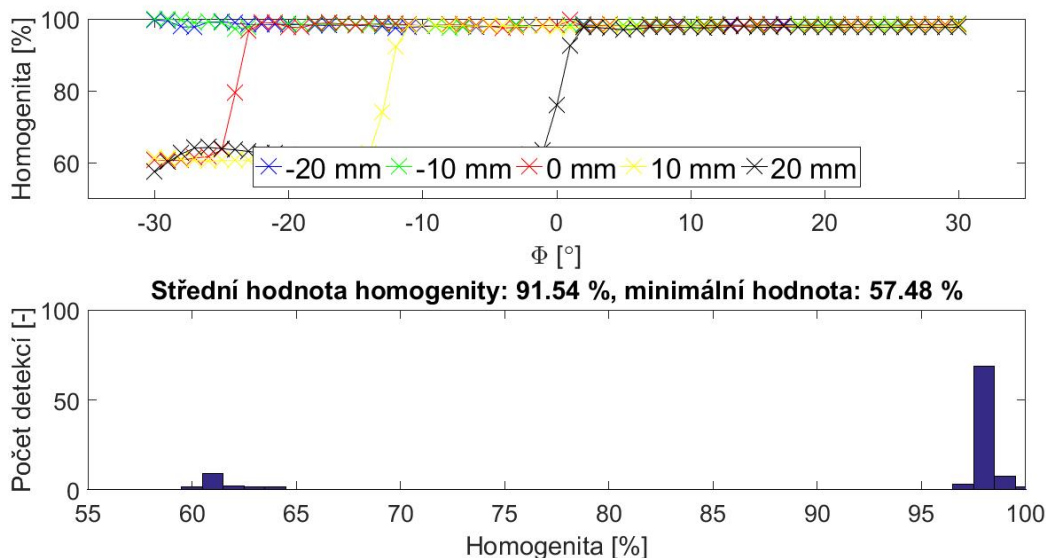


Obr. 73: Závislost úhlové homogenity na úhlu rotace pro rotační pozici IK 30° pro pět měřených pozic (horní graf) spolu s histogramem naměřených hodnot homogenity (dolní graf).



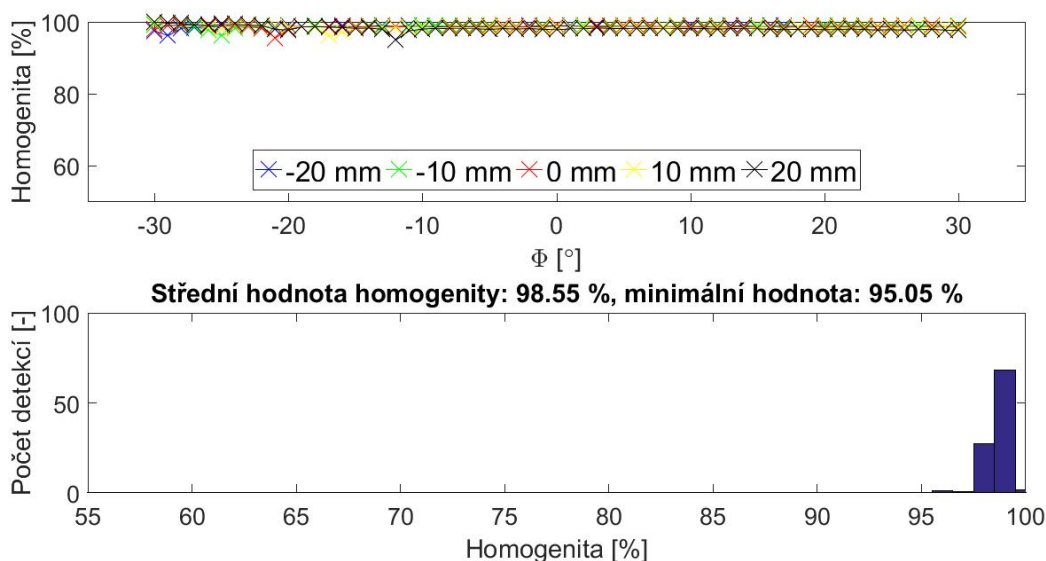
Obr. 74: Závislost úhlové homogenity na úhlu rotace pro rotační pozici IK 60° pro pět měřených pozic (horní graf) spolu s histogramem naměřených hodnot homogenity (dolní graf).

Na obr. 72 a 73 je vidět, že pro tyto rotační pozice (0° a 30°) dosahuje homogenita pro všechny translační pozice CCD hodnot přesahujících 95 %, a střední hodnota homogenity se pohybuje nad 99 %. To lze vypočítat ze závislosti homogenity na velikosti úhlu rotace ϕ i z histogramů naměřených hodnot.

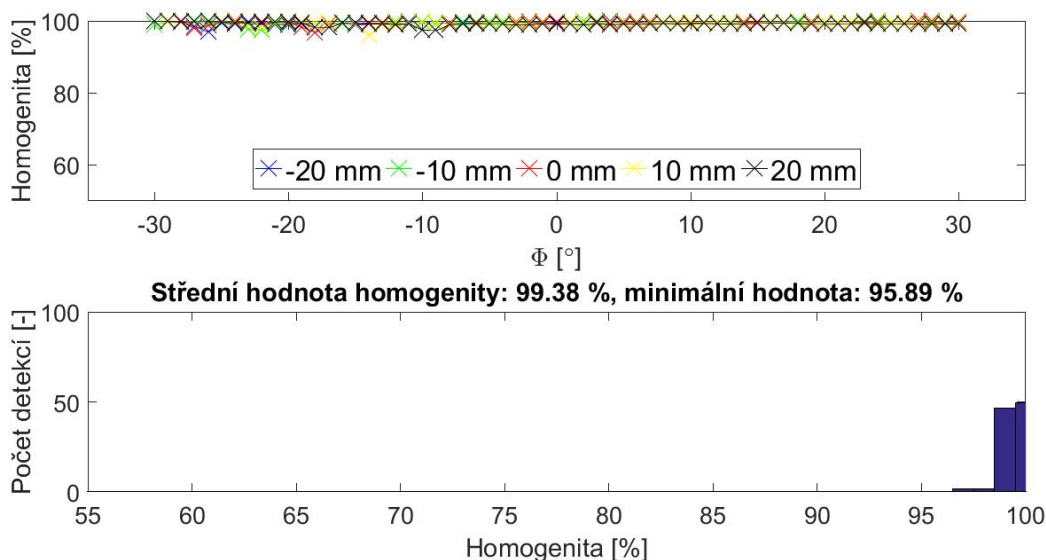


Obr. 75: Závislost úhlové homogenity na úhlu rotace pro rotační pozici IK 90° pro pět měřených pozic (horní graf) spolu s histogramem naměřených hodnot homogenity (dolní graf).

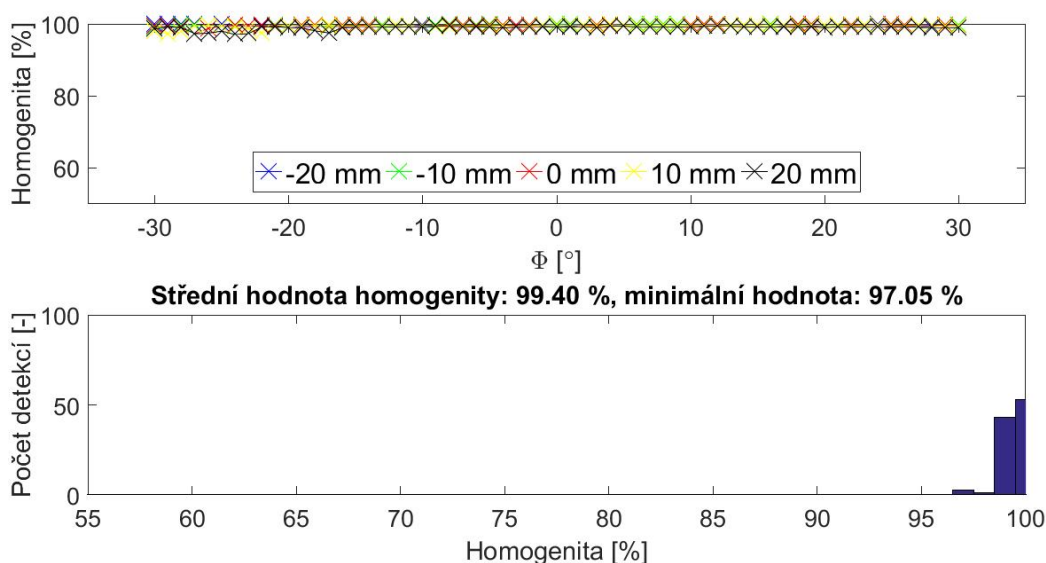
Pro další dvě rotační pozice IK (60° a 90°) a pro translační pozice 0 mm, 10 mm a 20 mm na obr. 74 a 75 je patrné, že se homogenita pro nižší úhly rotace detektoru ϕ (menší než -5° na obr. 74 a menší než 0° na obr. 75) pohybuje kolem 63 % a pro vyšší úhly se prudce zvyšuje. Tyto nižší hodnoty homogenity v těchto měřeních jsou způsobeny přítomností nemodifikované clonky uvnitř IK, která se pro rotační pozice koule 60° a 90° a translační pozice CCD 0 mm, 10 mm a 20 mm objevuje v zorném poli CCD a snižuje výslednou homogenitu. V dalších rotačních pozicích IK (120°, 150° a 180° na obr. 76-78) se již clonka v zorném poli CCD neobjevuje a homogenita se pohybuje jen ve vysokých hodnotách dosahujících 99 %. Tento pokles je jasně patrný také v histogramech naměřených hodnot.



Obr. 76: Závislost úhlové homogenity na úhlu rotace pro rotační pozici IK 120° pro pět měřených pozic (horní graf) spolu s histogramem naměřených hodnot homogenity (dolní graf).



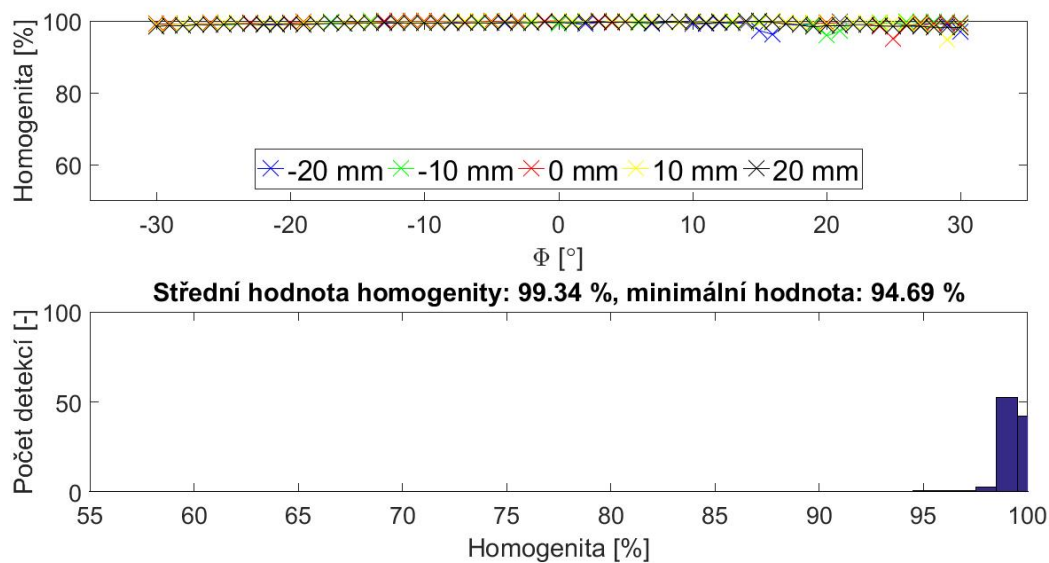
Obr. 77: Závislost úhlové homogenity na úhlu rotace pro rotační pozici IK 150° pro pět měřených pozic (horní graf) spolu s histogramem naměřených hodnot homogenity (dolní graf).



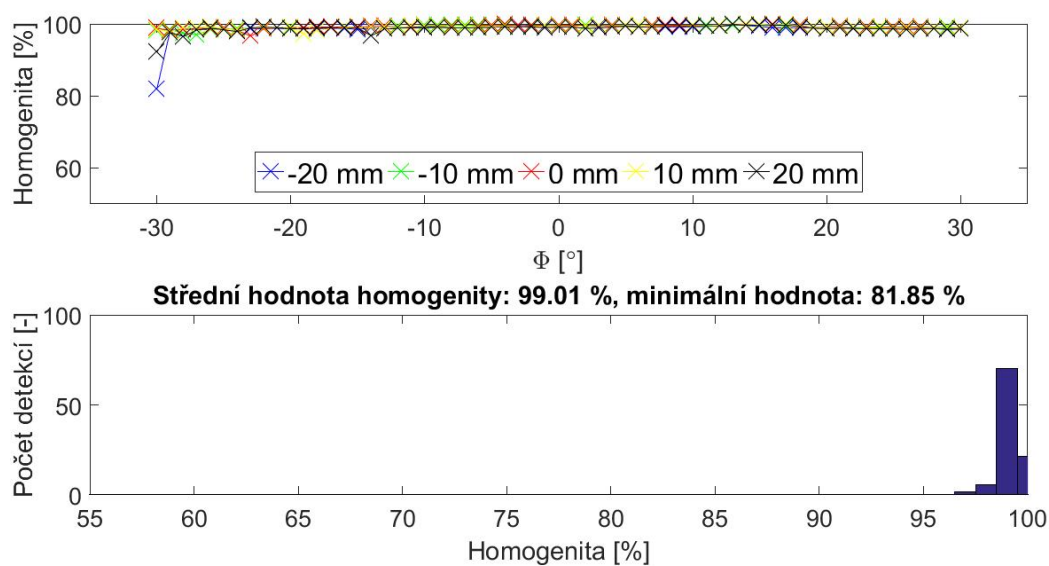
Obr. 78: Závislost úhlové homogenity na úhlu rotace pro rotační pozici IK 180° pro pět měřených pozic (horní graf) spolu s histogramem naměřených hodnot homogenity (dolní graf).

Na všech (výše i níže) uvedených závislostech homogenity na zorném úhlu, kromě obr. 74 a 75 lze také vidět malé poklesy homogenity. Tyto poklesy jsou pravděpodobně způsobeny přítomností nehomogenit uvnitř IK včetně spoje mezi polokoulemi, které se při měření objevily v zorném poli CCD a byly takto sejmuty.

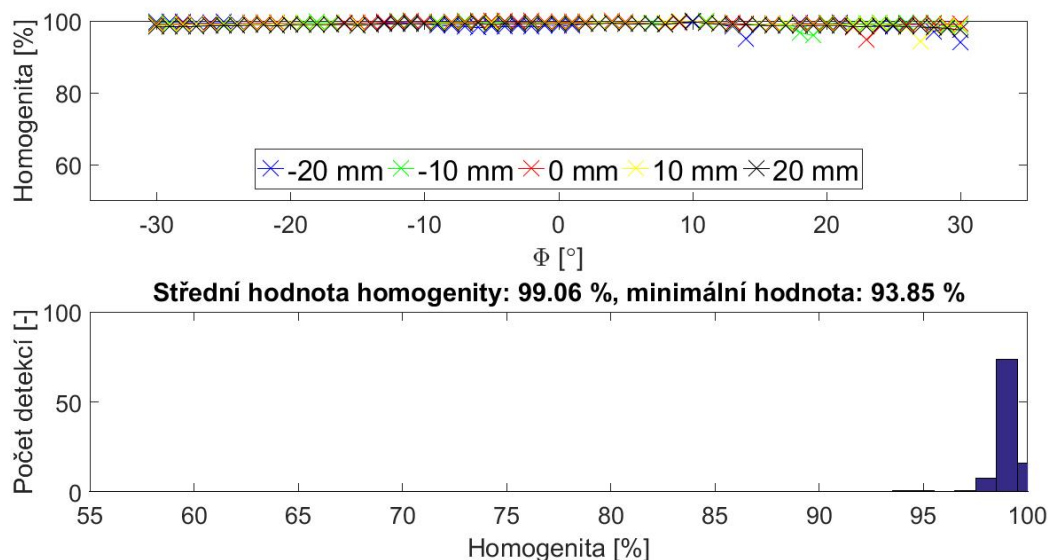
Poté byla provedena měření s použitím ochranných krytů ze skla a plexiskla. Tato měření byla provedena pouze pro úhlové pozice 0° a 180°. Výsledky měření s použitím krytu ze skla jsou uvedeny na obr. 79 a 80 (pro rotační pozice 0° a 180°) a s použitím krytu z plexiskla na obr. 81 a 82 pro rotační pozice 0° a 180°.



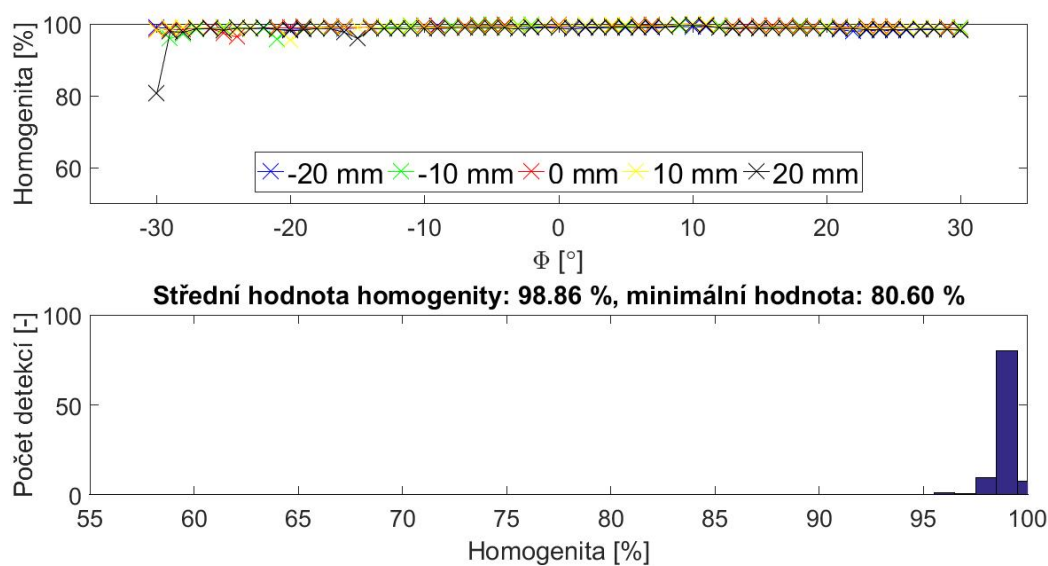
Obr. 79: Závislost úhlové homogenity na úhlu rotace pro rotační pozici IK 0° pro pět měřených pozic (horní graf) spolu s histogramem naměřených hodnot homogenity (dolní graf) pro měření s krytem ze skla.



Obr. 80: Závislost úhlové homogenity na úhlu rotace pro rotační pozici IK 180° pro pět měřených pozic (horní graf) spolu s histogramem naměřených hodnot homogenity (dolní graf) pro měření s krytem ze skla.



Obr. 81: Závislost úhlové homogenity na úhlu rotace pro rotační pozici IK 0° pro pět měřených pozic (horní graf) spolu s histogramem naměřených hodnot homogenity (dolní graf) pro měření s krytem z plexiskla.



Obr. 82: Závislost úhlové homogenity na úhlu rotace pro rotační pozici IK 180° pro pět měřených pozic (horní graf) spolu s histogramem naměřených hodnot homogenity (dolní graf) pro měření s krytem z plexiskla.

Pro přehlednost jsou všechny střední hodnoty homogenity pro dané úhlové pozice včetně nejistot měření (bez krytu) uvedeny v tabulce 3 jako funkce těchto úhlových pozic a s krytem ze skla a plexiskla v tabulce 4 pro úhlové pozice 0° a 180°. Hodnoty v těchto tabulkách byly získány analýzou všech provedených měření, a nikoliv z jednoho výše uvedeného měření

| Úhlová pozice IK [°] | Střední homogenita [%] |
|----------------------|------------------------|
| 0 | (99,12±0,03) |
| 30 | (99,14±0,06) |
| 60 | (94,06±0,91) |
| 90 | (91,46±0,11) |
| 120 | (98,49±0,09) |
| 150 | (99,43±0,08) |
| 180 | (99,30±0,15) |

Tabulka 3: Shrnutí středních hodnot úhlových homogenit jako funkce úhlové rotační pozice IK, měření bez krytu.

| Úhlová pozice IK [°] | Střední homogenita – sklo [%] | Střední homogenita – plexisklo [%] |
|----------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 0 | (99,11±0,23) | (99,03±0,04) |
| 180 | (98,72±0,25) | (98,77±0,13) |

Tabulka 4: Shrnutí středních hodnot měření úhlových homogenit s ochrannými kryty ze skla a plexiskla.

Z porovnání výsledků měření bez ochranných krytů (tabulka 3) a s ochrannými kryty ze skla a plexiskla (tabulka 4) je zřejmé, že použití ochranných krytů (o daných parametrech) má na měření úhlové homogenity, stejně jako na měření prostorové homogenity, malý vliv, změny střední homogenity při použití krytů se pohybují do 0,6 %. Oba tyto materiály mohou tedy sloužit jako ochrana vnitřku IK před nečistotami z vnějšího prostředí, které by mohly kouli znečistit, zhoršit její vlastnosti a snížit homogenitu.

Analýzou naměřených středních hodnot úhlové homogenity jednotlivých měření bylo zjištěno, že směrodatná odchylka všech měření úhlové homogenity dosahuje pro každou měřenou konfiguraci nízkých hodnot do 1 %.

V naměřených hodnotách se také projevuje spoj mezi polokoulemi IK a nečistoty a nehomogenity uvnitř koule. Jak již bylo uvedeno v části 3.1.4 této práce, vliv na měření úhlové homogenity má také seřízení experimentální sestavy. Při měření musí být ve výchozí pozici (kdy CCD snímá střed výstupního portu) apertura z obr. 20 kolmá na výstupní port IK. Není-li toto seřízení přesné, dochází k poklesu naměřených hodnot homogenity pro krajní měřené úhly (-30° a 30°), viz např. obr. 80 nebo obr. 82. Ani při opakovaných měřeních se někdy, i přes velké úsilí, nepodařilo sestavu seřít přesně a tento pokles v daných rotačních pozicích IK odstranit.

Měření úhlové homogenity lze tedy shrnout následovně: Nejvyšší naměřené střední hodnoty homogenity byly naměřeny pro rotační pozice koule 0° a 30° a 150° a 180° (nad 99 %) a nejnižší pro rotační pozici 90° (91,5 %). Celkově je většina naměřených hodnoty homogenity velmi vysoká a velká část z nich dosahuje hodnot nad 99 %. V tomto ohledu lze říct, že se měření prostorové a úhlové homogenity shodují co se týče středních hodnot výsledné homogenity. Jen v případech, kdy CCD kamera přejíždí přes clonku a snímá ji (rotační pozice koule 60° a 90° a translační pozice kamery 10 mm, 20 mm a střed) nebo CCD snímá nehomogenitu uvnitř koule, případně spoj mezi polokoulemi, dochází k poklesu homogenity. V případě clonky homogenita klesá přibližně na 60 %, obr. 83 a 84.). V případech, kdy CCD zaznamená nehomogenitu nebo spoj mezi polokoulemi, má tento pokles velikost jednotek

procent (např. obr. 81 nebo 88). Chyby měření byly vypočteny vzhledem ke středním hodnotám homogenity v dané rotační pozici IK a stanoveny jako směrodatné odchylky vypočtené ze všech jednotlivých měření. Tyto odchylky se pro všechna měření pohybují do 1 %.

5 Závěr a výhledy do budoucna

V této práci byly prezentovány základní poznatky z oblasti radiometrie, fotometrie a měření světelných zdrojů. Důraz byl kladen na integrační kouli, která může sloužit po různých modifikacích jako přístroj pro měření některých optických vlastností látek, jako přístroj pro charakterizaci světelných zdrojů nebo také jako světelný zdroj. IK jako světelný zdroj je hlavní téma experimentální části této práce. V ní byla měřena homogenita vyzařování IK, což je hlavní parametr charakterizující IK z pohledu vyzařování. Byla měřena prostorová i úhlová homogenita. Během těchto měření byly na IK prováděny modifikace mající za účel její homogenitu zvýšit. U obou homogenit byly po modifikacích naměřené vysoké hodnoty nad 99 %. Jejich nejistoty se pohybují do 0,4 % u měření prostorové do 1 % u úhlové homogenity. Tyto nízké hodnoty nejistot byly dosaženy použitím mechanizovaných posuvů s vysokou přesností a provedením korekce na změny v zářivém toku uvnitř IK, i když toto nebyl původní účel korekce. Při analýze výsledků bylo také zjištěno, že přítomnost výstřelků ve velikosti zářivého toku uvnitř IK velmi ovlivňuje měření. Přítomnost jednoho výrazného výstřelku (např. o velikosti 7 %) při měření zřetelně snížila průměrnou hodnotu homogenity (konkrétně o tři procenta). Proto je opravdu důležité při vyhodnocování měření vyřadit z vyhodnocování měření, ve kterých se tyto výstřelky objevily.

U prostorové homogenity jsou hodnoty homogenity závislé především na poměru poloměru koule a výstupního portu. Je-li tento poměr 1:3, je empiricky udávaná hodnota homogenity asi 98 % a roste s klesajícím poměrem průměru IK a jejího výstupního portu. Zkoumaná koule má pro případ měření bez omezovače průměru portu tento poměr vyšší (0,47), a tak by měla být její homogenita nižší než 98 %. To je v souladu s tabulkou 2, kdy byly pro oblast celého portu naměřeny střední hodnoty homogenity 94 % (95 % s modifikovanou clonkou). Experimentálně získané i empirické hodnoty pro měření při použití omezovačů není možné porovnat, protože empirické hodnoty nejsou v literatuře k dispozici. Při použití omezovače portu 1 palec je tento poměr 0,19 a při použití omezovače 2 palce 0,38. Tyto poměry vedou podle tabulky 2 ke středním hodnotám homogenity 95 % a 97 %. Z těchto výsledků je patrné, že homogenita roste se zmenšujícím se průměrem výstupního portu, což je v souladu s teorií. Tyto změny homogenity jsou se zmenšujícím se průměrem portu čím dál menší. Protože již ovšem homogenita v tomto měření dosahuje vysokých hodnot nad 99 % (pro případ omezení velikosti portu při vyhodnocování), nárůst homogenity je menší a hůře detekovatelný, což se projevilo i v experimentu, protože se sobě výsledné hodnoty homogenit téměř rovnaly.

Experiment byl ovlivněn množstvím zdrojů chyb. Uvnitř IK byly např. zjištěny nečistoty a nehomogenity (spoj mezi polokoulemi, poškození vnitřní stěny IK, příp. nerovnoměrné nasvícení). Tyto nečistoty a nehomogenity nejenom ovlivňují měření jako takové, ale zároveň zvyšují důležitost měření na úkor simulací, aby bylo možné zjistit reálné hodnoty homogenity IK.

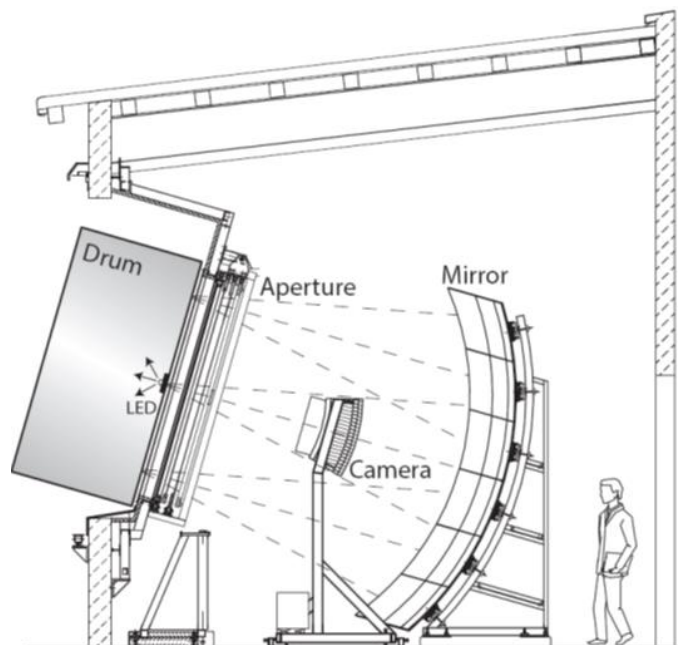
Dále byl testován vliv ochranných krytů vyrobených ze skla (BK7) a z plexiskla (PMMA) na homogenitu. Bylo zjištěno, že přítomnost těchto krytů ve výstupním portu IK má minimální

vliv na naměřené hodnoty homogenity, který se pohybuje v rámci desetin procenta, a ochranné kryty z těchto materiálů (a o daných rozměrech) mohou sloužit jako ochrana IK před nečistotami z vnějšího okolí.

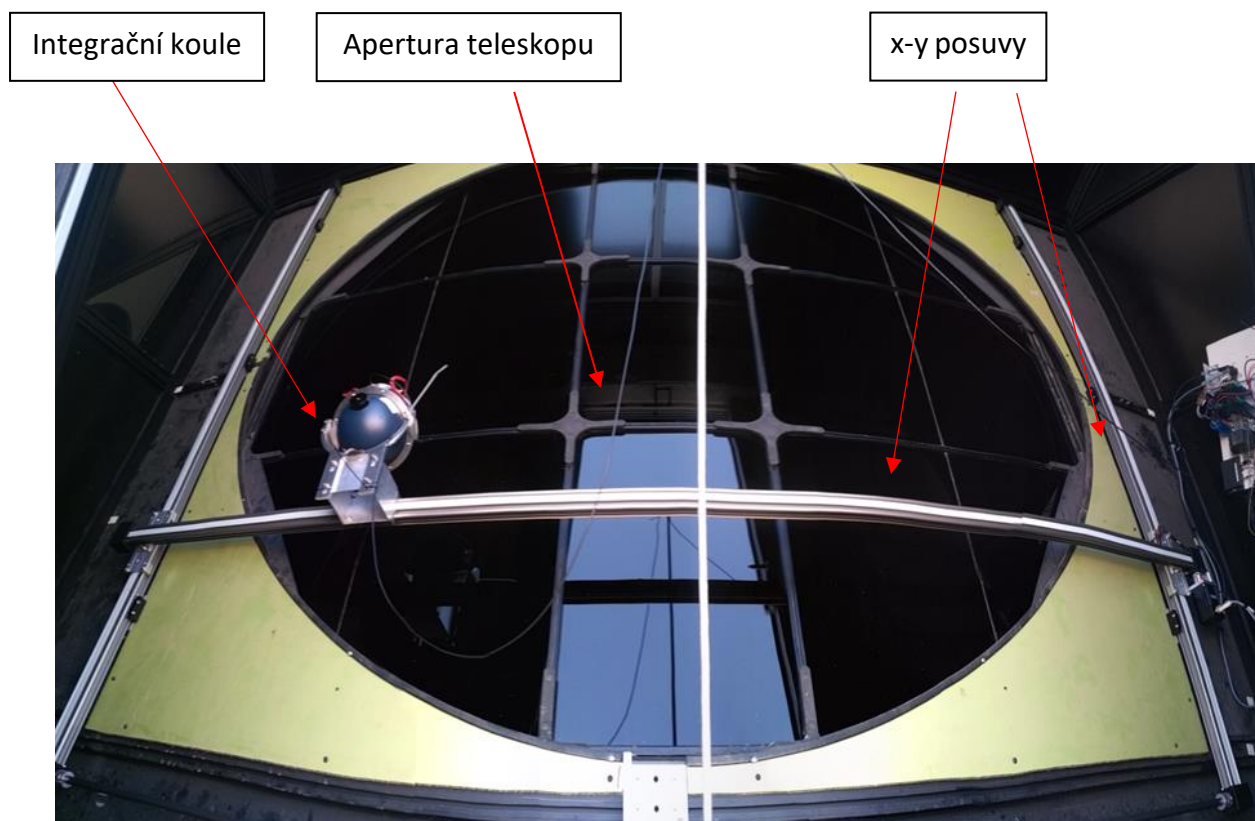
Výhledově se plánuje využít IK jako nástroj pro kalibrování fluorescenčních detektorů (FD) na astročásticové observatoři Pierra Augera v provincii Mendoza v Argentině. Dosavadní technika kalibrace pomocí tzv. „drumu“ (z anglického drum – buben, obr. 49) spočívala v osvětlení celé apertury detektoru definovaným zářivým tokem na vlnové délce $(365 \pm 0,1)$ nm. Tato metoda byla časově a technicky náročná a po rozpadu týmu z Colorado State University, který měl tuto kalibraci na starosti, bylo rozhodnuto o opuštění této techniky kalibrace a o vývoji nové techniky nazvané x-y skener. Tato technika je založena na umístění IK na x-y posuvy, které budou umístěny před aperturou FD a které budou tuto IK před aperturou přesouvat bod po bodu (viz obr. 50) a osvětlovat ji. Takto bude FD nakalibrován.

Momentálně se pracuje na přechodu od měření prostorové a úhlové homogenity pomocí výše uvedených dvou experimentálních sestav k měření pomocí jedné sestavy umožňující změřit oba typy homogenit najednou. Součástí přechodu je také změna podmínek měření na reálnější podmínky, tzn. nízká intenzita světla a změna zdroje světla na zdroj s vlnovou délkou 365 nm odpovídající vlnové délce fluorescenčního záření dusíku. Tento přechod již ale není součástí této práce.

Dalším nezbytným krokem pro dokončení vývoje této techniky bude také provedení absolutní kalibrace IK, aby byl známý zářivý tok, příp. počet fotonů, který vyzařuje.



Obr. 83: Technika „drum kalibrace“ FD. Podle [55].



Obr. 84: x-y skener s IK (foto RNDr. Pavel Horváth, Ph.D.).

6 Reference

- [1] Malý, P. *Optika*. Univerzita Karlova v Praze, Nakladatelství Karolinum (2008), ISBN 978-80-246-1342-0.
- [2] Černá, L. *Fotometrie, radiometrie a spektroskopie*. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie. [online]. [cit. 02.12.2019]. Dostupné online z <http://pasan.feld.cvut.cz/dokumenty/fotometrie.pdf>.
- [3] *Fotometrie a radiometrie* (Učební text k přednášce UFY102). Univerzita Karlova v Praze, Matematicko-fyzikální fakulta. [online]. [cit. 21.11.2019]. Dostupné online z <http://alma.karlov.mff.cuni.cz/ufy102/Fotometrie%20a%20radiometrie.pdf>
- [4] Bouchal, Z. *Optika (část 1)*. Učební pomůcka pro studenty oborů Matematika-Fyzika, Fyzika-Výpočetní technika, Fyzika-Chemie, Optika a optoelektronika, Biofyzika a Aplikovaná fyzika na PŘF UP Olomouc.
- [5] BAJGAR, J. *Luxmetr*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 49 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Rozman, CSc.
- [6] Bukshtab, B. *Applied Photometry, Radiometry and Measurements of Optical Losses*. Springer 2012, ISBN 978-94-007-2164-7.
- [7] *Goniophotometer types A/B/C – Optronik*. [online]. [cit 28.07.2019]. Dostupné online z <https://www.optronik.de/en/products/goniophotometers/goniometer-types-abc/>
- [8] Wikipedie: otevřená encyklopedie. *Goniophotometer*. [cit 29.08.2019]. Dostupné online z <https://en.wikipedia.org/wiki/Goniophotometer>
- [9] Labsphere, Inc. *Benchtop Type D Goniospectrometer*. [online]. [cit. 29.08.2019]. Dostupné online z <https://www.labsphere.com/site/assets/files/2877/pb-15003rev08benchgonio.pdf>
- [10] Bass, M. et al. *Handbook of Optics, volume II*. ISBN 0-07-047740-X (1995).
- [11] *Products / Colorimeter – 3nh*. [online]. [cit 22.11.2019]. Dostupné online z <http://www.colorimeter.com/Products/Colorimeter/>.
- [12] *Jaký je rozdíl mezi kolorimetrem a spektrofotometrem?* [online]. [cit. 24.09.2019]. Dostupné online z <http://www.kalibrace-monitoru.eu/jaky-je-rozdil-mezi-kolorimetrem-a-spektrofotometrem/>
- [13] Wikipedie: otevřená encyklopedie. *Optical Spectrometer*. [online]. [cit 24.09.2019]. Dostupné online z https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_spectrometer
- [14]. Lisun Group. *Brochure Moving Detector Goniospectroradiometer (LSG-5000CCD)*. [online]. [cit. 09.10.2019]. Dostupné online z <https://www.lisungroup.com/wp-content/uploads/sites/2/pdf/moving-detector-goniospectroradiometer.pdf>

- [15] W. B. Fussell. *Optical Measurements: Approximate Theory of the Photometric Integrating Sphere*. NBS Technical Note **594-7** (1974).
- [16] Rosa, E. B. a Taylor, A. H. *Theory, Construction and Use of Photometric Integrating Sphere*. Scientific Papers of Bureau of Standards **18** (1921).
- [17] Gigahertz-Optik, Inc. *Tutorials-page 157*. [online]. [cit. 16.07.2019]. Dostupné online z <https://light-measurement.com/tutorials-on-light-measurement/tutorials.pdf>
- [18] Weidner, V. R. a Hsia, J. J. *Reflection properties of pressed polytetrafluoroethylene powder*. Journal of the Optical Society of America **71**, 7 (1981).
- [19] Springsteen, A. *Integrating Sphere Coatings – A Historical Perspective*. Prezetntace Avian Technologies LCC. [online]. [cit. 17.07.2019]. Dostupné online z http://cormusa.org/wp-content/uploads/2018/04/CORM_2009__SphCoat_Springsteen.pdf.
- [20] Janecek, M. *Reflectivity Spectra for Commonly Used Reflectors*. IEEE Transactions on Nuclear Science **59**, 3 (2012).
- [21] Labsphere, Inc. *A Guide to Reflectance Coatings and Materials*. [online]. [cit. 29.04.2019]. Dostupné online z <http://webx.ubi.pt/~hgil/FotoMetria/PDF%27s-DOC%27s/Labsphere/Coating-20-20Material-20Guide.pdf>
- [22] Labsphere, Inc. *Integrating Sphere Theory and Applications*. [online]. [cit. 21. 05. 2019]. Dostupné online z https://www.labsphere.com/site/assets/files/2551/integrating_sphere_theory_apps_tech_guide.pdf
- [23] SphereOptics-Hoffman LLC. *Integrating Sphere Design and Applications* (2004). [online]. [cit. 17. 04. 2019]. Dostupné online z http://www.physics.muni.cz/~jancely/PPL/Texty/IntegracniKoule/Integrating%20sphere_technical_guide.pdf
- [24] Georgiev, G. T. a Butler, J. J. *Long-term calibration monitoring of Spectralon diffusers BRDF in the air-ultraviolet*. Applied Optics **45**, 32 (2007).
- [25] Y. Ohno. *Detector-based luminous-flux calibration using the absolute integrating-sphere method*. Metrologia **35**, 4 (1998).
- [26] Sumpner, W. E. *The diffusion of light*. Proceedings of the Physical Society of London **12**, 10 (1892).
- [27] Goebel, D. G. *Generalized Integrating-Sphere theory*. Applied Optics **6**, 1 (1967).
- [28] Bass, M. et al. Handbook of Optics 2 volume II. ISBN 0-07-047974-7 (1995).
- [29] International Commission on Illumination. *Colorimetry-Technical Report*. 3. edice, 15:2004.
- [30] Budde, W. *Calibration of Reflectance Standards*. Journal of Research of NBS-Applied Physics and Chemistry **80A**, 4 (1976).

- [31] Edwards, A. K. et al. *Integrating Sphere for Imperfectly Diffuse Samples*. Applied Optics **51** (1961).
- [32] Lindseth, I. et al. *Reflectance measurements of aluminium surfaces using integrating spheres*. Optics and Lasers in Engineering **32**, 5 (1999).
- [33] Fecht, I. a Johnson, M. *Non-contact, scattering-independent water absorption measurement using a falling stream and integrating sphere*. Measurement Science and Technology **10**, **8** (1999).
- [34] Rubenchik, A. et al. *Direct measurements of temperature-dependent laser absorptivity of metal powders*. Applied Optics **54**, 24 (2015).
- [35] Beek, J. F. et al. *In vitro double-integrating-sphere optical properties of tissues between 630 and 1064 nm*. Physics in Medicine and Biology **42**, 11 (1997).
- [36] Wang, W. a Li, Ch. *Measurement of the light absorption and scattering properties of onion skin and flesh at 633 nm*. Postharvest Biology and Technology **86** (2013).
- [37] Montilla, E. et al. *An integrating sphere spectral system to measure continuous spectra of aerosol absorption coefficient*. Journal of Aerosol Science **42**, 3 (2011).
- [38] Hawe, E. et al. *Hazardous gas detection using an integrating sphere as a multipass gas absorption cell*. Sensors and Actuators A: Physical **141**, 2 (2008).
- [39] *Integrating spheres – Labsphere* | Internationally Recognized Photonics Company [online]. [cit. 08. 04. 2019]. Dostupné online z <https://www.labsphere.com/labsphere-products-solutions/components-accessories/integrating-sphere-components-accessories/>
- [40] Y. Ohno. *Realization of NIST 1995 Luminous Flux Scale Using the Integrating Sphere Method*. Journal of the Illuminating Engineering Society **25**, 1 (1996).
- [41] *Realization of lumen | NIST* [online]. [cit. 08. 04. 2019]. Dostupné online z <https://www.nist.gov/pml/sensor-science/optical-radiation/realization-lumen>
- [42] Y. Ohno et al. *An ac/dc technique for the Absolute Integrating-Sphere Method*. Metrologia **37**, 5 (2000).
- [43] Labsphere, Inc. *Tech Guide: Integrating Sphere Uniform Light Source Applications*. [online]. [cit. 11.04. 2019]. Dostupné online z <https://www.labsphere.com/site/assets/files/2552/a-guide-to-integrating-sphere-uniform-light-source-applications.pdf>
- [44] Kowalewski, M. G. a Janz, S. J. *Comparison of spectral radiance calibration techniques used for backscatter ultraviolet satellite instruments*. Metrologia **52**, 1(2015).
- [45] Butler, J. J. et al. *Radiometric Measurement Comparison on the Integrating Sphere Source Used to Calibrate the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and the Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)*. Journal of Research of NIST **108**, 3 (2003).

- [46] Markham, B. et al. *Landsat-8 Operational Land Imager Radiometric Calibration and Stability*. *Remote Sensing* **6**, 6 (2014).
- [47] X. Wang et al. *Integrating sphere cold atom clock with cylindrical microwave cavity*. 2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS) Proceedings, San Francisco.
- [48] Liu, L. et al. *Luminance Uniformity of Integrating Sphere Light Source*. International Conference on Optoelectronics and microelectronics 2015.
- [49] Zhang, Z. et al. *Design and Characteristic Measurement of 8000 mm Large Aperture Integrating Sphere*. *Journal of the Optical Society of Korea* **20**, 4 (2016).
- [50] Walker, J. H. a Thompson, A. *Spectral Radiance of a Large-Area Integrating Sphere source*. *Journal of Research of NIST* **100**, **37** (1995).
- [51] Sandgren, V. *Characterization of an integrating sphere radiation reference source*. MSc. thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2011.
- [52] Knee, P. C. *Investigation of the homogeneity and ageing of integrating spheres*. *Analytica, Chimica Acta* **380**, 2–3, 1999.
- [53] Ducharme, A. et al. *Design of an Integrating Sphere-Uniform Source*. *IEEE Transactions on Education* **40**, 2 (1997).
- [54] Labsphere, Inc. *Uniformity Calculations for Uniform Sources* [online]. [cit. 16.01. 2020]. Dostupné online z <https://www.labsphere.com/site/assets/files/3402/pb-14092rev00.pdf>
- [55] SliseServe. *Systematics in the Pierre Auger Observatory*[online]. [cit. 11.05.2020]. Dostupné online z <https://www.slideserve.com/kimberly/systematics-in-the-pierre-auger-observatory>

Název práce: Integrační koule jako zdroj homogenního záření

Název práce v angličtině: Integrating sphere as a source of uniform radiation

Anotace: V této práci je měřena homogenita vyzařování integrační koule pro její aplikaci jako zdroje záření pro kalibraci detektorů. Během experimentu byly měněny některé geometrické rozměry experimentu a byl vyhodnocen jejich vliv na výslednou homogenitu záření pro její optimalizaci. Byl také testován vliv filtrů ve výstupním portu na homogenitu. Tyto filtry by měly zabránit kontaminaci vnitřku koule nečistotami z vnějšího okolí. Byl také vyhodnocen vliv změny průměru výstupního na homogenitu.

Klíčová slova: integrační koule, měření homogeneity, kalibrace detektorů.

Annotation in English: In this thesis, radiation homogeneity of the integrating sphere was measured for its application as a radiation source for the calibration of detectors. During the measurements, some of geometric dimensions of the experiment were changed and their influence on the resulting radiation homogeneity was evaluated for its optimization. The effect of filters in the output port on homogeneity was also tested. These filters should prevent contamination of the interior of the sphere from dirt from outside. The effect of changes of sphere's exit port diameter was also evaluated.

Keywords in English: Integrating sphere, homogeneity measurement, detector calibration.

Přílohy: 0

Rozsah práce: 74 stran

Jazyk práce: český