

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

Katedra optiky



Vliv materiálů s různou texturou povrchu
na charakteristiky promítaných světelných
svazků reflektorů

Diplomová práce

Bc. Ester Doláková

2013

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

Katedra optiky



Vliv materiálů s různou texturou povrchu
na charakteristiky promítaných světelných
svazků reflektorů

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor:	Ester Doláková
Studijní program:	N1701 Fyzika
Studijní obor:	Digitální a přístrojová optika
Forma studia:	Prezenční
Vedoucí práce:	RNDr. Ing. Jan Podloucký
Konzultant:	Mgr. Mikuláš Zápražný

Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora: Ester Doláková

Název: Vliv materiálů s různou texturou povrchu
na charakteristiky promítaných světelných svazků reflektorů

Typ práce: Diplomová

Vedoucí práce: RNDr. Ing. Jan Podloucký

Konzultant: Mgr. Mikuláš Zápražný

Rok obhajoby práce: 2013

Počet stran: 64

Počet příloh: 5

Jazyk: Český

Klíčová slova: oboustranná distribuční rozptylová funkce, Fourierova transformace, nehomogenity v osvětlení, projektor, reflektor, rozptyl

Bibliographical identification

Author's first name and surname: Ester Doláková

Title: The influence of materials with variable surface texture
on characteristics of the projected light beams of reflectors

Type of thesis: Diploma

Supervisor: RNDr. Ing. Jan Podloucký

Co - supervisor: Mgr. Mikuláš Zápřažný

Years of presentation: 2013

Number of pages: 63

Number of appendices: 5

Language: Czech

Keywords: bidirectional scatter distribution function, Fourier transform, inhomogeneities in irradiation, projector, reflector, scatter

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci „Vliv materiálů s různou texturou povrchu na charakteristiky promítaných světelných svazků reflektorů" vypracovala sama, s využitím zdrojů uvedených v seznamu literatury a souhlasím s jejím použitím pro potřeby katedry, včetně libovolné prezentace.

Poděkování

Tímto bych velice ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce RNDr. Ing. Janu Podlouckému za veškerou pomoc, poskytnuté rady, trpělivost a věnovaný čas konzultacím. Dále mé poděkování patří Mgr. Mikuláši Zápražnému za pomoc při experimentálním měření a v neposlední řadě Mgr. Jakubovi Vjaclovskému za věnovaný čas simulacím.

Abstract

Diplomová práce se zabývá zjištěním rozptylových charakteristik povrchů automobilových reflektorů. U experimentálně získaných dat byl minimalizován vliv koherenční zrnitosti a pomocí Fourierovy transformace eliminován vliv zakřivení povrchu reflektoru. Získané rozptylové charakteristiky jsou pak modifikací gaussovy funkce. Přesnost použité matematické metody byla ověřena v simulačním programu Asap. Z dostupných reflektorů s drsným i hladkým povrchem byl zvolen jeden, který vhodným způsobem zmírní nehomogenity v osvětlení vozovky před automobilem.

Abstract

The subject of the Diploma thesis is finding out the scatter characteristics of the car reflector surfaces. In the data obtained in the experiment, the influence of the speckle pattern was minimalized, and the influence of the reflector curvature was eliminated with the help of Fourier transformation. The resulting scatter characteristics are then a modification of the Gaussian function. The accuracy of the used mathematic method was verified by the Asap software. From the rough- and smooth-surface reflectors available, one was chosen which will adequately lessen the inhomogeneities in irradiance the road in front of the car.

Obsah

1	ÚVOD	1
2	ZÁKLADNÍ POJMY A JEJICH OBJASNĚNÍ	5
2.1	Interakce záření s látkou	5
2.2	Rozptyl záření	7
2.3	Drsnost povrchu	8
2.4	Rozptyl záření od povrchů s různou texturou	11
2.5	Koherenční zrnitost	16
2.6	Oboustranná distribuční rozptylová funkce	18
3	PRAKTICKÁ ČÁST	22
3.1	Experimentální uspořádání	25
3.2	Postup měření	28
4	ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ	31
4.1	Simulace	31
4.2	Fourierova transformace	37
4.3	Digitální zpracování obrazu	39
4.4	Matematický aparát zpracování výsledků	41
5	VÝSLEDKY	44
5.1	Výsledky měření reflektorů	44
5.2	Proměření projektorů	56
5.3	Navrhovaná vylepšení měření a zpracování výsledků	59
6	ZÁVĚR	61
7	SEZNAM PŘÍLOH	63

1 ÚVOD

Tato diplomová práce byla zpracována na základě zadání divize světelné techniky firmy Visteon Autopal Services, s.r.o, nyní Varroc Lighting Systems, s.r.o. se sídlem v Novém Jičíně. Tato firma se zabývá především výrobou a vývojem svítlen a světlometů osobních automobilů.

Svítilna plní informační funkci ostatním uživatelům silničního provozu, a to například o změně směru jízdy pomocí směrových svítidel nebo o šířce vozidla pomocí obrysových svítlen. Dalším typem svítlen jsou denní svítilny, které plní funkci snadnější viditelnosti vozidla za dne.

Světlomety jsou primárně určeny k osvětlení vozovky před automobilem. Podle typu osvětlení vozovky můžeme rozdělit světlomety na tlumené, dálkové a mlhové. Světlomety se skládají ze zdroje světla, optické soustavy a krytu. Celkové rozložení světla před automobilem je dáno typem optického systému a ty dělíme na:

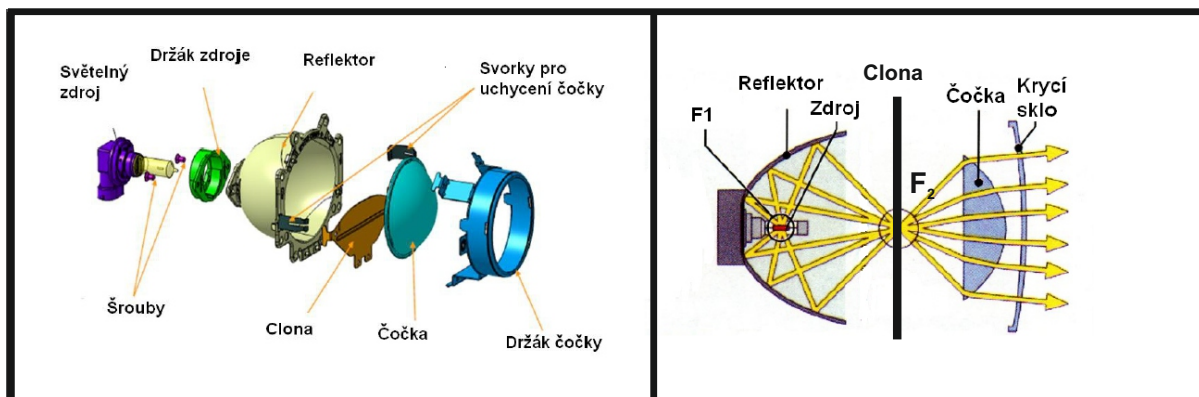
a) **Parabolový reflektor s optikou na skle.** Tento reflektor má tvar paraboly a v jejím ohnisku je uložen světelný zdroj. Paprsky vycházející ze soustavy jsou paralelní a jejich chod je ovlivněn strukturou krycího skla, která může mít podobu například Fresnelovy čočky. Dnes se již tyto světlomety z estetického hlediska nepoužívají.

b) **Reflektorová optika** obsahuje reflektor, který nenabývá pravidelného geometrického tvaru. Jeho plocha je záměrně deformovaná. Skládá se z jednotlivých optických segmentů, neboli fazet. Díky tomuto tvaru odrazné plochy jsme schopni vymodelovat požadované osvětlení vozovky.

c) **Adaptivní světlometový systém** je složen z několika nezávislých optických segmentů. Přičemž každý segment vyzařuje specifický světelný tok v závislosti na rychlosti vozidla, natočení volantu, zapnutí či vypnutí směrových svítlen atd.

d) **Projekční optika** se skládá ze světelného zdroje (halogenové žárovky, výbojky),

reflektoru, clony a čočky, jak je patrné na Obrázku 1 vlevo. Clona se vyskytuje pouze u potkávacích reflektorů nebo může být sklopná a plní funkci přepínání režimu potkávacích a dálkových světel. V této práci se budeme zabývat pouze světly s projekční optikou neboli projektorovými světly.

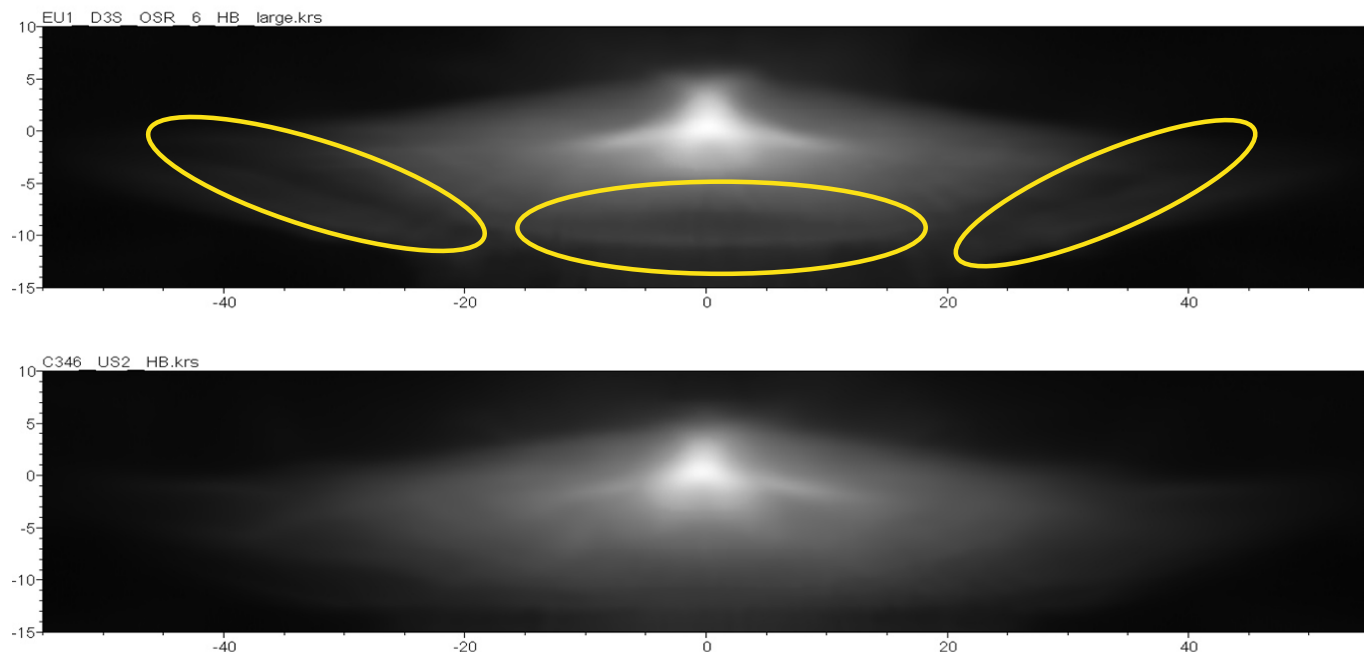


Obrázek 1: Obrázek vlevo znázorňuje projektor složený ze světelného zdroje, reflektoru, clony a čočky. Obrázek vpravo zobrazuje chod paprsků optickou soustavou projektoru.

Na Obrázku 1 vpravo je znázorněn chod paprsků projektorem. Reflektor má tvar polyelipsoidu, tedy má dvě ohniska. V prvním ohnisku $F1$ se nachází světelný zdroj, z něj paprsky směřují do druhého ohniska $F2$, kde se nachází clona. Dále paprsky dopadají na čočku a odkud vycházejí rovnoběžné s optickou osou, samozřejmě pokud se omezíme na fyzikálně dokonalý systém bez optických aberací.

Motivací této práce je fakt, že při testovacích nočních jízdách světlometů se před vozidlem na vozovce vyskytují nehomogenity ve formě tmavých skvrn. Zadavatel s tímto samozřejmě není spokojen, protože předpokládá, že vozovka bude osvětlena rovnoměrně bez výrazných vad.

Na Obrázku 2 jsou znázorněny rozdíly mezi osvětlením, kde se vyskytují nehomogenity (znázorněny žlutými oblastmi) a osvětlením bez nehomogenit.



Obrázek 2: Horní obrázek zobrazuje nehomogenity osvětlení na testovací stěně.

Dolní obrázek zobrazuje ideální osvětlení bez nehomogenit.

V současné době se vyrábějí a používají projektory, které obsahují hladké reflektory. V důsledku nedokonalého výrobního procesu vznikají při výrobě hladkých reflektorů odchylky od ideální plochy, což se následně projeví v nehomogenitách osvětlení vozovky. Jedním z řešení, jak se vyhnout nežádoucím jevům v podobě nehomogenit, je zdrsnění povrchu reflektorů. Pak je vozovka osvětlena, tak jako na spodní části Obrázku 2. Důležité je tedy najít optimální drsnost, která vhodně zmírní nehomogenity.

Pro simulace chodu paprsků a rozložení výsledného osvětlení vozovky před automobilem se používá simulační program, který pracuje se základním zákonem odrazu. Ovšem předpokládáme-li použití reflektorů s drsným povrchem, je nutné tento základní model rozšířit o simulaci rozptylu od drsného povrchu, který je popsán dvojrozměrnou rozptylovou funkcí.

Cílem této diplomové práce je tedy navrhnout a provést měření rozptylu světla po do-

padu na optickou plochu reflektorů o různé drsnosti dle škály VDI. Dále najít matematické vyjádření rozptylové funkce dané plochy reflektoru tak, aby mohla být začleněna do simulačního programu.

Celá práce je rozdělena do šesti hlavních kapitol. V první kapitole **Úvod** je shrnuto zadání a motivace práce. Ve druhé kapitole **Základní pojmy a jejich objasnění** je popsán teoretický přehled problému, který zahrnuje interakci záření s látkou, rozptyl záření, popis drsnosti povrchu, koherenční zrnitost a matematický popis rozptylu pomocí oboustranné distribuční rozptylové funkce.

Ve třetí kapitole s názvem **Praktická část** je popsán důvod měření rozptylu světla od drsné plochy reflektoru, samotné uspořádání experimentu a detailní popis měření.

Metoda zpracování výsledků je shrnuta ve čtvrté kapitole, která obsahuje použitý matematický aparát. Nejprve je naznačen princip simulace naměřených dat, stručný popis Fourierovy transformace, konvolučního teorému a zpracování digitálního obrazu.

Výsledky měření reflektorů s drsným povrchem, celých projektorů a diskuse dat jsou obsaženy v páté kapitole **Výsledky**. Zde jsou také shrnuty návrhy na vylepšení postupu měření a zpracování dat, které mohou v budoucnu vést ke zkvalitnění dosažených výsledků.

Poslední šestá kapitola **Závěr** obsahuje celkový náhled na práci a shrnutí výsledků.

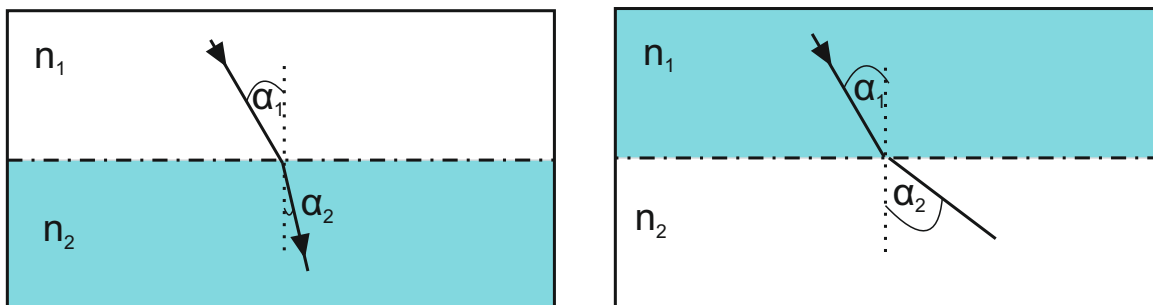
2 ZÁKLADNÍ POJMY A JEJICH OBJASNĚNÍ

2.1 Interakce záření s látkou

Světlo chápeme jako elektromagnetické záření. Při dopadu světla na rozhraní dvou prostředí dochází ke čtyřem základním fyzikálním jevům a to k lomu, odrazu, absorpci a k rozptylu záření. Pro tuto diplomovou práci je nejdůležitější rozptyl záření. Proto lom, odraz a absorpce budou zmíněny pouze okrajově a největší pozornost bude věnována rozptylu záření, kterému je také vyhrazena samostatná kapitola.

Lom světla

K lomu světla dochází při průchodu světla z prostředí o indexu lomu n_1 do prostředí o indexu lomu n_2 . Pokud je $n_1 < n_2$, to znamená průchod světla z opticky řidšího prostředí do opticky hustšího prostředí, nastává lom ke kolmici. Tento případ může nastat například při průchodu světla ze vzduchu do vody. Na druhou stranu pokud je $n_1 > n_2$ mluvíme o průchodu světla z opticky hustšího do opticky řidšího prostředí (průchod z vody do vzduchu) a nastává lom od kolmice.



Obrázek 3: Na obrázku vlevo je znázorněn lom světla ke kolmici, ke kterému dochází při průchodu světla z opticky řidšího do opticky hustšího prostředí. Na obrázku vpravo je lom od kolmice. K tomuto lomu dochází při průchodu světla z opticky hustšího do opticky řidšího prostředí.

Lom se řídí Snellovým zákonem lomu

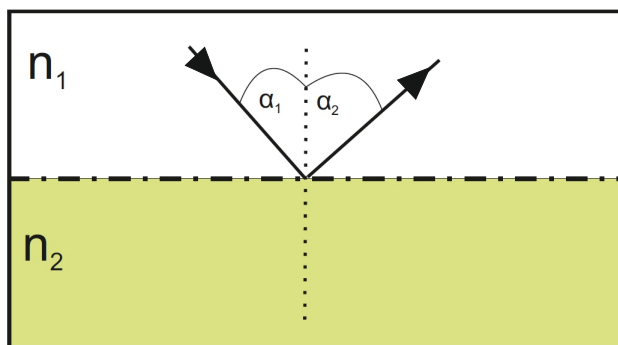
$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2, \quad (1)$$

kde n_1 je index lomu prostředí, ze kterého světlo dopadá pod úhlem α_1 na rozhraní, n_2 je index lomu prostředí, ve kterém se světlo láme pod úhlem α_2 . Úhly α_1 a α_2 se vztahují ke kolmici na rozhraní [1].

Může také dojít ke speciálnímu případu a to k totálnímu odrazu, který nastává při průchodu světla z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího prostředí. Projevuje se tím, že se lomený paprsek pro mezní úhel dopadu láme od kolmice pod úhlem 90° a tak splývá s rovinou rozhraní prostředí.

Odraz světla

K odrazu světla dochází při dopadu světla na dokonale hladký odrazný povrch o jiném indexu lomu než je prostředí, ve kterém se světlo šíří.



Obrázek 4: Odraz od rozhraní prostředí.

Zde platí zákon odrazu. Ten říká, že úhel dopadu je stejný jako úhel odrazu, tedy

$$\alpha_1 = \alpha_2, \quad (2)$$

kde α_1 je úhel dopadu světla na rozhraní prostředí a α_2 je úhel odrazu. Úhel dopadu i odrazu se vztahují ke kolmici na rozhraní prostředí [1].

Absorpce

Kromě lomu a odrazu světla může dojít také k absorpci A . Při tomto jevu dochází ke snížení výstupní intenzity světla oproti vstupní. Ovšem musí platit zákon zachování energie

$$R + T + A = 1, \quad (3)$$

kde R je odraznost, T je propustnost a A je absorpce prostředí. Pro ideální fyzikální soustavu, kde nedochází k absorpci, můžeme uvažovat

$$R + T = 1. \quad (4)$$

R , T a A jsou definovány pomocí Fresnelových vztahů [1].

2.2 Rozptyl záření

K rozptylu záření dochází při dopadu záření na povrch, který není dokonale hladký a homogenní. Může se jednat o povrch zdrsňený opracováním, o povrch s nehomogenitami či různými vnitřními defekty.

Rozptyl záření je běžný fyzikální jev, který můžeme pozorovat pravidelně v běžném životě. Díky rozptylu záření jsme schopni vysvětlit zásadní optické jevy, jako je například modrá obloha, barva mraků, červánky a mnoho dalších.

Základní rozdělení rozptylu záření je na pružný a nepružný rozptyl. Při pružném rozptylu nedochází ke ztrátám energie, naopak u nepružného rozptylu dochází ke ztrátám energie. Přitom dochází ke snižování intenzity světla, nastává absorpce. Analogii můžeme najít při srážkách těles [2].

Rozptyl záření můžeme popsat pomocí dvou základních principů, a to Rayleighova a Mieho rozptylu. Samozřejmě existují i další fyzikální jevy, které vedou k Ramanově rozptylu, Rutherfordově rozptylu a dalším, ale jejich popisy spadají mimo rámec této práce.

Rayleighův rozptyl je patrný při dopadu záření na částice, které jsou menší než vlnová délka dopadajícího záření. Pro tento typ rozptylu je charakteristické, že intenzita rozptýleného záření je úměrná šesté mocnině rozměru částice a nepřímoúměrná čtvrté mocnině

vlnové délky. Dále můžeme říci, že vyzařovací charakteristika je osově souměrná, z toho plyne, že rozptyl záření nezávisí na tvaru částice. Nakonec můžeme zmínit, že polarizační stav dopadajícího záření se po rozptylu zachovává. Rayleighův rozptyl stojí za vysvětlením například modré oblohy.

Mieho rozptyl je naopak patrný při dopadu záření na částice srovnatelné či větší než je vlnová délka dopadajícího záření. Rozptylovací charakteristika je osově nesymetrická a ovlivněna tvarem částic. Rozptyl dopředný je vždy větší než rozptyl zpětný. Dalším typickým projevem je, že rozptýlené záření je depolarizováno.

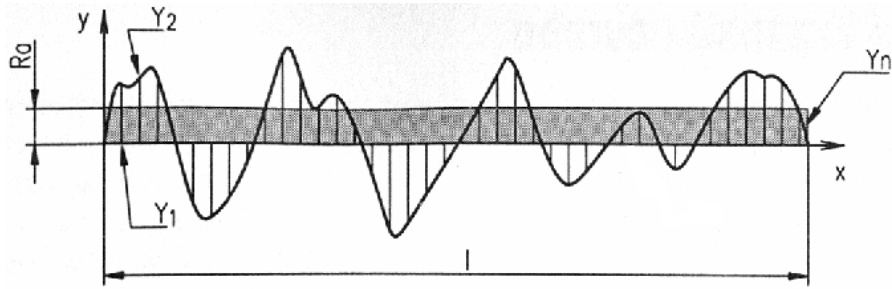
2.3 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu je definována jako souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které nevyhnutelně vznikají při výrobě nebo v důsledku dalších jevů. Do drsnosti se nepočítají vady povrchu, tj. náhodné nepravidelné nerovnosti, které se vyskytují jen ojediněle (rysky, trhlinky, důlky apod.) a které vznikají vadami materiálu, poškozením aj.

Ke kvantifikování drsnosti povrchu se využívají statistické veličiny, a to střední aritmetická úchylka posuzovaného povrchu R_a , průměrná kvadratická úchylka posuzovaného povrchu R_q , výška nerovností profilu R_z určena z deseti bodů, šikmost R_{sk} a průměrný kvadratický sklon profilu $P \triangle q$.

- Střední aritmetická úchylka R_a , označována také jako průměrná drsnost, odpovídá aritmetickému průměru absolutních hodnot výšek nerovností $Y_n(x)$ v rozsahu délky l . R_a se udává v μm , využívá se v technické praxi v popisech výkresů a je definovaná pomocí rovnice [3]:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Y_n(x)| dx. \quad (5)$$



Obrázek 5: Znázornění průměrné drsnosti profilu R_a . Hodnoty Y_n symbolizují jednotlivé výšky nerovností na vybrané délce l , kde $n = 1, 2, 3, \dots$

- Střední kvadratickou odchylku (RMS) R_q udává kvadratický průměr výšek nerovností $Y_n(x)$ na délce l [3].

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l |Y_n(x)|^2 dx}. \quad (6)$$

- R_z odpovídá střední hodnotě z absolutních hodnot výšek pěti nejvyšších výstupků profilu a hloubek pěti nejnižších míst profilu na délce l .

$$R_z = \frac{\sum_0^5 |Y_{vi}| - \sum_0^5 |Y_{hi}|}{5}, \quad (7)$$

kde Y_{vi} je výška i -tého nejvyššího výstupku a Y_{hi} je hloubka i -tého nejnižšího místa profilu na délce l [3].

- Šikmost R_{sk} vyjadřujeme [3]

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \int_0^l |Y_n(x)|^3 dx. \quad (8)$$

- Průměrný kvadratický sklon profilu je dán jako $\frac{dy}{dx}$ [3].

Pokud bychom se vrátili ke střední aritmetické úchylce povrchu R_a , tak v Tabulce 1 jsou zaznamenány její běžné hodnoty pro obrábění povrchů.

Způsob výroby	$R_a[\mu m]$	Způsob výroby	$R_a[\mu m]$
Ruční pilování jemné	1,6	Hoblování	3,2 - 1,6
Soustružení	1,6 - 0,2	Protahování jemné	0,8
Vrtání, vyvrtávání	1,6 - 0,4	Vystružování	0,8
Broušení do kulata	0,4 - 0,025	Frézování	3,2 - 0,8
Broušení vnitřní	0,4 - 0,025	Lapování	0,1 - 0,05
Broušení na plocho	0,4	Honování a superfiniš	0,1 - 0,025

Tabulka 1: Hodnoty střední aritmetické úchytky R_a pro dané úpravy povrchu [4].

Kromě popisu drsnosti materiálu pomocí R_a existuje ještě například stupnice VDI. Tato stupnice se uplatňuje pro povrchy zhotovené elektroerozivním obráběním. Proces spočívá v tom, že obrobek z vodivého materiálu je uložen v dielektrické tekutině. Touto tekutinou je většinou speciální kapalina. Elektroda se přibližuje k obrobku a díky zvyšování napětí mezi nimi dochází k elektrickému výboji. Při výboji dochází k tavení a odpařování určitého množství obrobku. Úbytky materiálu jsou od obrobku a elektrody, která je v jeho těsné blízkosti, odplavovány dielektrikem.

Elektroerozivní obrábění je v dnešní době preferovaná metoda opracování povrchů materiálů s vysokou tvrdostí. Využití můžeme najít při výrobě vstřikovacích forem na plasty, střížných a lisovacích nástrojů a při obrábění problematicky obrabitelných kovů.

Rozdíl mezi materiály, které jsou opracovány klasickými metodami (broušení, frézování, apod.) a materiály upravenými elektroerozivním obráběním, je v tom, že při použití klasických metod jsou na povrchu materiálu patrné stopy po nástroji. Povrch upravený elektroerozivním obráběním je složen z mikroskopických prohlubní, které jsou pozůstatky elektrických výbojů.

V Tabulce 2 je uveden vztah mezi hodnotami R_a a bezrozměrnými hodnotami stupnice VDI, která slouží k popisu drsnosti materiálu opracovaného elektroerozivním obráběním.

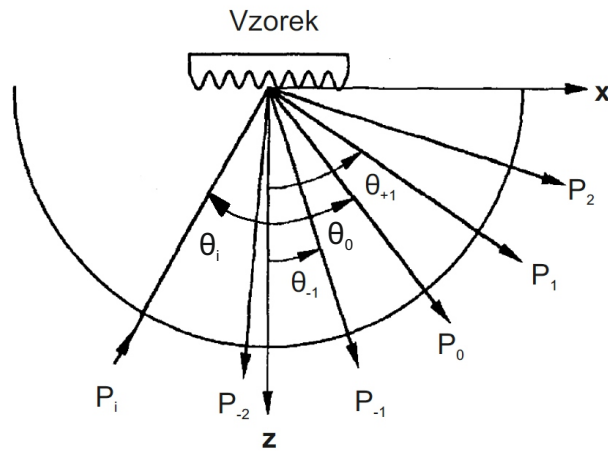
$Ra[\mu m]$	0,4	0,6	0,8	1,1	1,6	2,3	3,1	4,5	6,3	9	12,5	18
VDI	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	43

Tabulka 2: Tabulka hodnot R_a a k nim příslušné hodnoty VDI [5], [6].

2.4 Rozptyl záření od povrchů s různou texturou

Obecný povrch můžeme aproximovat superpozicí sinusových povrchů s různými amplitudami, frekvencemi, směry natočení a počátečními fázemi.

Z teorie difrakce je známo, že pokud osvětlíme sinusovou mřížku koherentním světlem, dojde k difrakci záření.



Obrázek 6: Difrakce na sinusovém povrchu. P_i označuje dopadající paprsek na povrch pod úhlem θ_i , P_0 je zrcadlový odraz pod úhlem θ_0 , P_n označuje difraktované řády a k nim příslušné úhly difrakce θ_n , kde $n = \pm 1, \pm 2, \dots$ [7].

Difrakci na sinusové mřížce popisujeme pomocí mřížkové rovnice

$$\sin\theta_n = \sin\theta_i + m f_g \lambda, \quad (9)$$

kde θ_n je úhel příslušného difraktovaného řádu, θ_i je úhel dopadu záření na povrch, m je difrakční řád, f_g je frekvence vrypů mřížky dána vztahem $f_g = \frac{1}{l}$, kde l je vzdálenost mezi vrypů na mřížce, λ označuje vlnovou délku [7].

Difrakci na mřížce chápeme jako výsledek interference difraktovaných příspěvků od jednotlivých vrypů mřížky. Pokud je mřížek nekonečně mnoho považujeme povrch za drsný a od difrakce přecházíme k rozptylu.

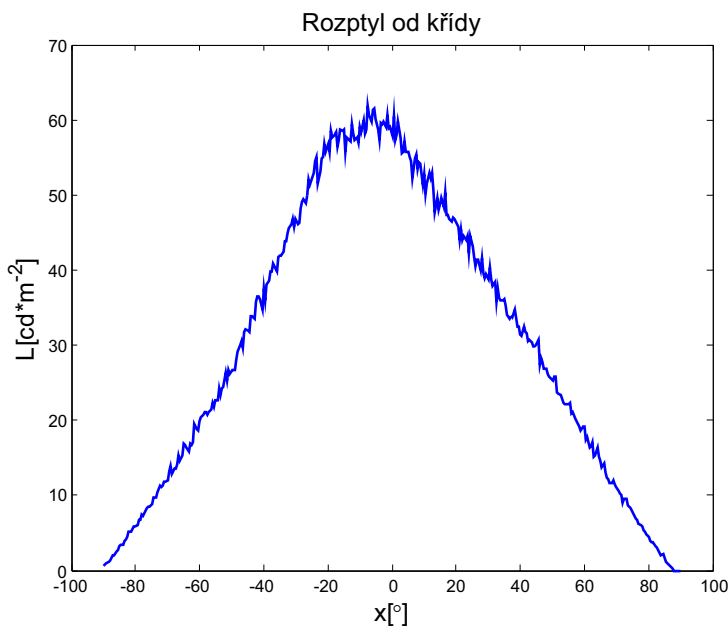
Pokud se chceme zabývat rozptylem záření od povrchu, je třeba si definovat několik pojmů:

Hladký povrch je takový, jehož výškové nerovnosti jsou malé ve srovnání s vlnovou délkou dopadajícího záření.

Čistý a odrazný povrch je takový, u kterého je rozptyl dán difrakcí způsobenou topografií povrchu (zanedbáváme podpovrchové kazy).

Uvažujeme-li tedy dokonale hladký (ideální) povrch, dojde na něm při dopadu záření k zrcadlovému odrazu. To znamená, že veškerá energie odražené vlny bude soustředěná v odraženém svazku, kdy bude platit rovnice (2) a tedy nedojde k žádnému rozptylu.

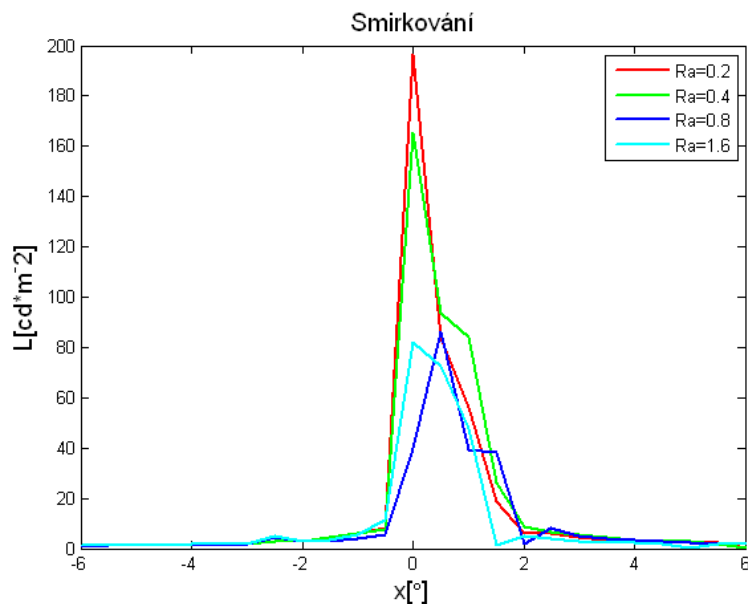
K opačnému efektu dochází u tzv. difúzního odrazu. Zde je odražené záření rozptýleno do všech směrů. Povrch mající tuto vlastnost nazýváme difúzní neboli Lambertovský a příkladem takového povrchu může být křída.



Obrázek 7: Rozptyl od Lambertovského povrchu (křídý).

Obrázek 7 zobrazuje rozptylovou charakteristiku křídly, na jejíž povrch jsme nechali dopadat záření z laseru pod úhlem 2° . Rozptylová charakteristika má šířku v půlce maxima (FWHM = Full width at half maximum) 90° . U vzorků s nerovným povrchem je pak ještě širší.

Pokud povrch nebude dokonale hladký, pak můžeme pozorovat rozptyl. U drsných povrchů platí, že při růstu výškových nerovností klesá intenzita ve směru zrcadlového odrazu a její nárůst pozorujeme v oblasti rozptýleného záření. Pro srovnání s difúzním povrchem jsou přiloženy rozptylové charakteristiky povrchu opracovaného smirkováním o různých hodnotách R_a . Na vzorky drsnosti firmy Supraphon jsme nechali dopadat laserový svazek pod úhlem 2° a výsledný rozptyl jsem zaznamenávali jasměrem L1000 (Lichtmesstechnik GmbH Berlin).

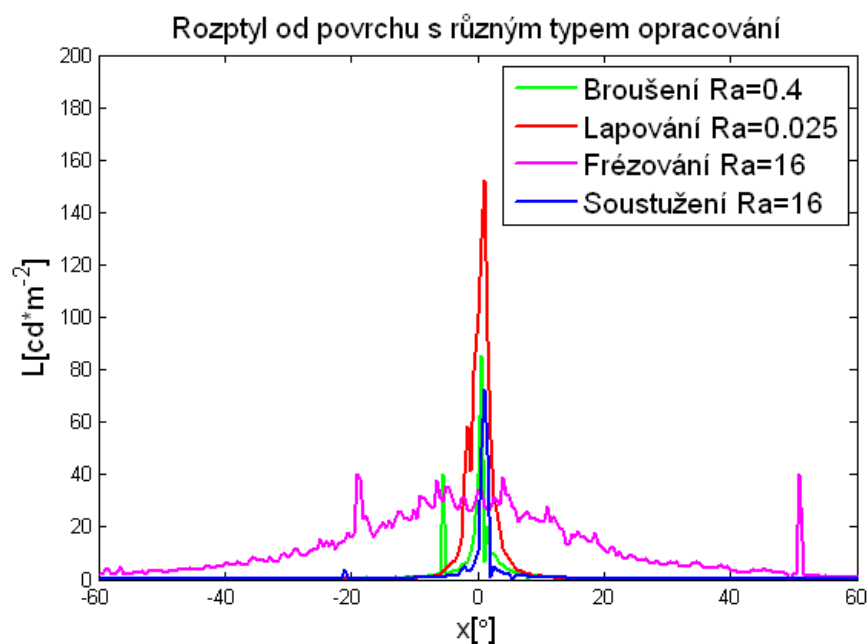


Obrázek 8: Rozptyl od povrchů opracovaných smirkováním s různými hodnotami R_a .

Červená křivka znázorňuje rozptylovou charakteristiku povrchu opracovaného smirkováním s $R_a = 0,2$, zelená křivka odpovídá hodnotě $R_a = 0,4$, modrá $R_a = 0,8$ a azurová křivka $R_a = 1,6$.

Z Obrázku 8 je patrné, že rozptylové charakteristiky jsou mnohem užší ve srovnání s rozptylovou charakteristikou křídly. U křídly byla šířka rozptylové charakteristiky v půlce maxima přibližně rovna 90° . U nejvyšší hodnoty smirkování $R_a = 1,6$ je šířka rozptylové charakteristiky v půlce maxima přibližně rovna 2° . Dále je zde také patrný zmiňovaný předpoklad, že s drsností roste rozptyl a klesá intenzita. Největší intenzity dosahuje červená křivka, která odpovídá hodnotě $R_a = 0,2$ a nejnižší hodnoty maxima dosahuje azurová křivka, která odpovídá nejvyšší měřené drsnosti povrchu o hodnotě $R_a = 1,6$. Můžeme si také povšimnout, že s rostoucí hodnotou R_a se zvyšuje hodnota šířky rozptylové charakteristiky.

Na Obrázku 9 jsou pro představu uvedeny rozptylové charakteristiky drsných povrchů opracovaných různými technologiemi a s různými hodnotami R_a . Podmínky měření jsou stejné jako u rozptylových charakteristik vzorků smirkování.

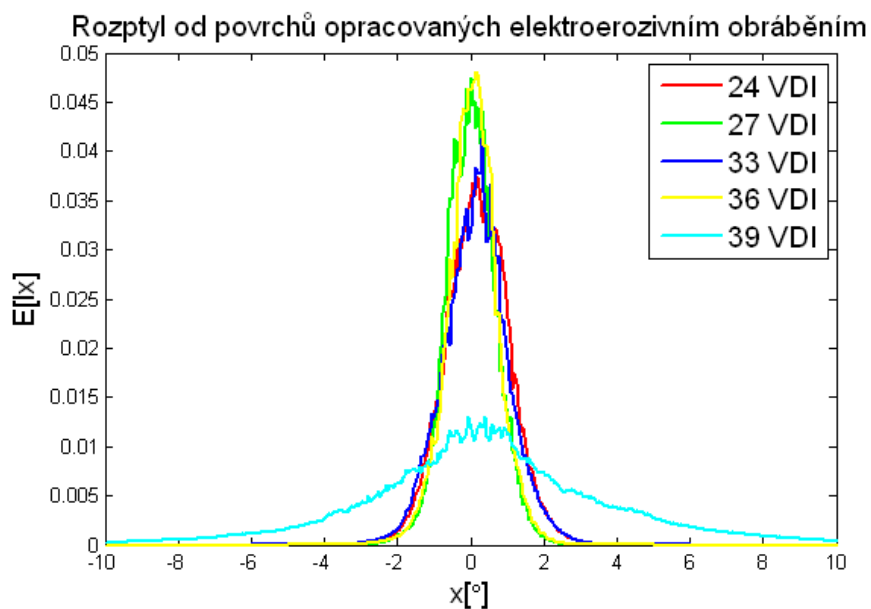


Obrázek 9: Rozptylové charakteristiky povrchů opracovaných různými technologiemi a s různými hodnotami R_a . Zelená křivka představuje povrch opracovaný broušením s $R_a = 0,4$, červená křivka odpovídá lapování s $R_a = 0,025$, fialová křivka odpovídá frézování s $R_a = 16$ a modrá křivka soustružení s $R_a = 16$.

Odtud je patrné, že největšího rozptylu dosahujeme u opracování povrchu frézováním s hodnotou $R_a = 16$, zde je největší šířka rozptylové charakteristiky v půlce maxima a také nejnižší jas. Na druhou stranu nejméně z těchto povrchů rozptyluje povrch opracovaný soustružením s hodnotou $R_a = 16$, zde je nejužší šířka rozptylové charakteristiky v půlce maxima.

Jako poslední srovnání jsou uvedeny rozptylové charakteristiky povrchů opracovaných elektroerozivním obráběním, které je popsáno stupnicí drsnosti VDI. Byly proměřeny destičky o různé drsnosti vyrobené z plastu zytel (polyamid). Výrobní proces těchto destiček je následující. Nejprve se elektroerozivním obráběním vyrobí forma o dané drsnosti, poté se do ní vstříkne plast zahřátý na teplotu tavení. Po vychladnutí se výlisek vyjme z formy a je lakován a pokoven. K proměření jsme měli k dispozici destičky, jejichž formy měly drsnost 24 VDI, 27 VDI, 33 VDI, 36 VDI a 39 VDI. Drsnost proměřovaných destiček je ovšem nižší než jejich formy. Ke snížení drsnosti došlo nejprve při nalití plastu do formy (plast nemusí vyplnit všechny prohlubně a výstupky zjemňuje) a pak následným lakováním. Výsledné rozptylové charakteristiky byly měřeny, tak že na povrch jednotlivých destiček dopadal laserový svazek pod úhlem 2° a rozptyl byl detekován fotodiodou o průměru detekční části 30 mm ve vzdálenosti 25 m.

Z Obrázku 10 je patrné, že rozptylové charakteristiky pro drsnosti forem o hodnotách 24VDI, 27VDI, 33VDI a 36VDI se moc neliší. Jde o drsnosti, kde je velký vliv zalití formy plastem a především lakování lisu. Samozřejmě i zde dochází k předpokládanému poklesu intenzity záření a zvyšování šířky rozptylové charakteristiky s rostoucí drsností formy. Ovšem ke zlomu dochází u formy s drsností 39VDI, zde je patrný pokles maximálního osvětlení a výrazné zvětšení šířky rozptylové charakteristiky. Vysvětlení změny šířky rozptylové charakteristiky oproti předchozím vzorkům, může být v tom, že u této formy je drsnost vysoká a dochází k podstatně menšímu vlivu zalití formy plastem a vlivu lakování výlisku.



Obrázek 10: Rozptylové charakteristiky povrchů opracovaných elektroerozivním obráběním. Červená křivka odpovídá hodnotě drsnosti $24VDI$, zelená křivka $27VDI$, modrá křivka $33VDI$, žlutá křivka $36VDI$ a azurová křivka $39VDI$.

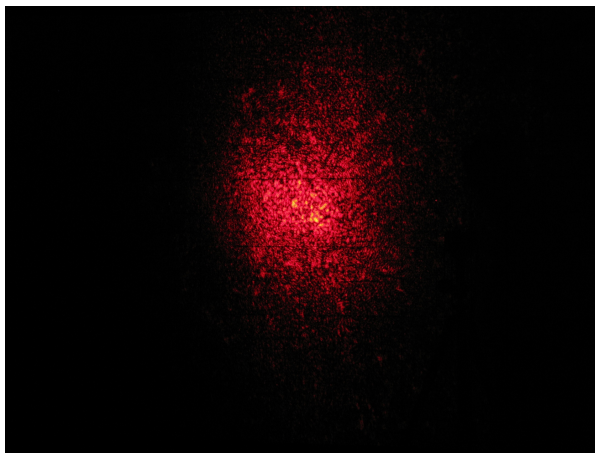
2.5 Koherenční zrnitost

S rozptylem světla od drsného povrchu předmětu je spojen efekt koherenční zrnitosti. K tomuto jevu obecně dochází například při osvětlení tělesa s drsným povrchem koherentním, popřípadě částečně koherentním, světlem. Dále při průchodu koherentního světla prostředím s nehomogenním rozložením indexu lomu.

Samotný jev je pozorovatelný jako pole náhodných tmavých a světlých skvrn (speckle). Takovéto pole nazýváme pole koherenční zrnitosti. Jeho vznik si můžeme vysvětlit na modelu odrazu světla od tělesa s drsným povrchem. Toto vysvětlení je pro tuto práci nejpraktičtější.

Uvažujeme, že koherentní, popřípadě částečně koherentní, světlo dopadá na předmět s drsným povrchem. Přitom drsný povrch je takový, jehož reliéf je náhodně proměnný a výškové změny jsou větší než vlnová délka dopadajícího světla. Zde se podle Huygens-

Fresnelova principu vytváří bodové zdroje sekundárních kulových vln. Tyto zdroje jsou náhodně rozmístěné podle náhodnosti reliéfu drsného povrchu. Při šíření těchto sekundárních kulových vln dochází k interferenci. Přičemž fázový posun interferujících vln je náhodný díky náhodné výšce reliéfu povrchu [8]. Výsledkem interference je již zmiňované pole koherenční zrnitosti, které si můžete prohlédnout na Obrázku 11.



Obrázek 11: Pole koherenční zrnitosti vzniklé při rozptylu koherentního záření od předmětu s drsným povrchem.

Vzhled a vlastnosti pole koherenční zrnitosti jsou nejvíce ovlivněny stupněm koherence zdroje, jeho polarizací a vlastnostmi rozptylujícího prostředí. Tyto vlastnosti ovšem můžeme zanedbat v případě použití úplně koherentního a polarizovaného zdroje záření, pak je taky viditelnost struktury koherenční zrnitosti maximální. Viditelnost klesá se stupněm koherence zdroje.

Velikost σ_s jednotlivých zrn koherenční zrnitosti určujeme v rovině kolmé na směr šíření pole a je dána vztahem

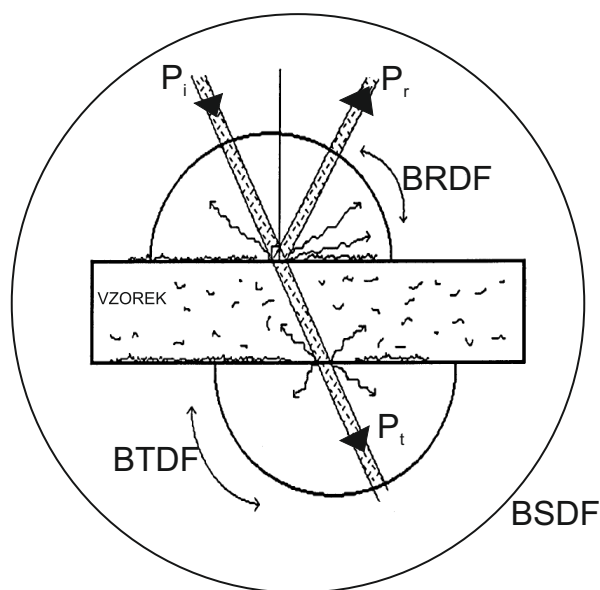
$$\sigma_s \approx \frac{b\lambda}{D}, \quad (10)$$

kde λ je vlnová délka zdroje, b vzdálenost pozorování pole koherenční zrnitosti a D je průměr světelné plošky, kterou osvětluje povrch drsného předmětu. Ze vztahu (10) je patrné, že střední velikost zrn se zvětšuje se zvětšující se vzdáleností pozorování b a klesá se zvětšujícím se průměrem D [8].

Ze znalosti velikosti koherenčních zrn jsme například schopni určit reliéf drsného předmětu.

2.6 Oboustranná distribuční rozptylová funkce

Oboustranná distribuční rozptylová funkce BSDF (Bidirectional Scatter Distribution Function) slouží k matematickému popisu rozptylu. Jedná se o dvoudimenzionální funkci složenou z odrazné distribuční funkce BRDF (Bidirectional Reflective Distribution Function) a propustné distribuční funkce BTDF (Bidirectional Transmissive Distribution Function).



Obrázek 12: Grafické znázornění BSDF funkce rozdělené na dvě hemisféry BRDF a BTDF.

P_i označuje dopadající záření na vzorek, P_r zrcadlově odražené záření od vzorku, P_t propuštěné záření vzorkem.

Před samotnou definicí obou funkcí je nejprve potřeba zavést aproximaci a objasnit si dva základní pojmy, se kterými v další části budeme pracovat. Těmito pojmy jsou prostorový úhel a světelný tok.

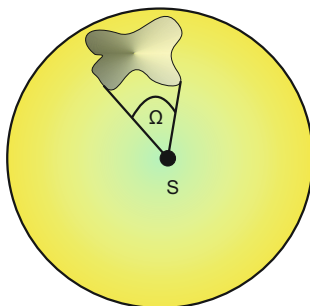
Zmíněná aproximace předpokládá, že dopadající záření musí být dobře kolimované a

svazek se nechová gaussovsky, jak jsme zvyklí u laserového svazku, ale je stejnorodý v celém svém průřezu. Dále považujeme zkoumanou plochu, od níž se rozptyluje záření, za izotropní a veškeré rozptýlené záření vychází pouze z povrchu a ne z objemu zkoumané plochy. To znamená, že zanedbáváme pronikání záření do látky, jeho zpětný odraz a také okolní prostředí (neuvažujeme například rozptyl na částicích vzduchu).

Prostorový úhel Ω definujeme pomocí koule o poloměru r . Na povrchu této koule vybereme libovolnou plošku o obsahu S . Pro prostorový úhel platí

$$\Omega = \frac{S}{r^2}, \quad (11)$$

Jednotkou prostorového úhlu je steradián $[sr]$.



Obrázek 13: Grafické znázornění prostorového úhlu Ω .

Světelný tok ϕ je subjektivní fyzikální veličina, popisující výkon přenášený elektromagnetickým vlněním posuzovaný z hlediska citlivosti lidského oka. Světelný tok je definován rovnicí

$$\phi = k_m \int_0^\infty V_\lambda \cdot W_\lambda d\lambda, \quad (12)$$

kde k_m je největší světelná účinnost pro 555 nm , V_λ je poměrná světelná účinnost záření a W_λ je spektrální hustota výkonu.

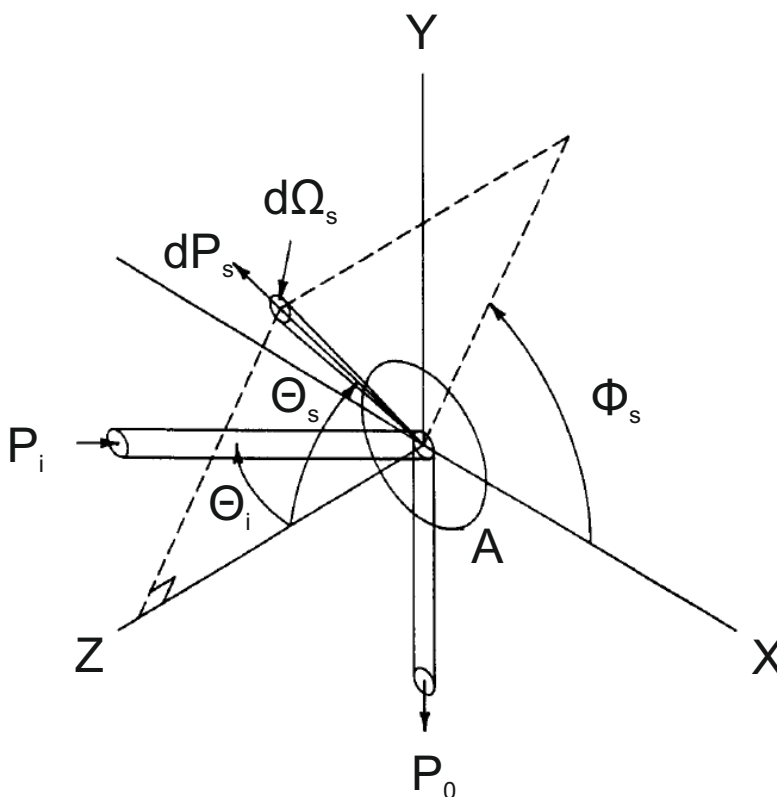
Jednotkou světelného toku je lumen $[lm]$. Lumen je světelný tok vyzařovaný do prostorového úhlu jednoho steradiánu bodovým zdrojem, jehož svítivost je ve všech směrech rovna jedné kandelě.

Pro vlnovou délku 555 nm platí následující převodní vztah mezi lumeny a watty:

$$k_m = \frac{1}{683} [lm/W].$$

Při rozptylu záření závisí rozdělení světla obecně na úhlu dopadu záření na rozptylnou plochu, na vlnové délce, na amplitudě dopadajícího záření a na parametrech vzorku. Parametry vzorku jsou orientace, propustnost, odrazivost, absorpce, povrch, index lomu, homogenita a znečištění.

Definice BSDF vychází z Obrázku 14. Zde je zobrazena pouze hemisféra vztahující se k BRDF, proto se nyní omezíme pouze na ní.



Obrázek 14: Geometrie pro definici BRDF, kde parametr i obecně označuje dopadající svazek a parametr s vystupující svazek. P_i je tedy dopadající svazek na rozptylnou plochu A pod úhlem Θ_i , P_0 je zrcadlově odražený svazek, dP_s označuje rozptýlené záření do prostorového úhlu $d\Omega_s$ pod úhlem Θ_s a Φ_s . [7]

Na Obrázku 14 můžeme vidět, že svazek P_i dopadá na rozptylnou plochu A pod úhlem Θ_i , odtud se zrcadlově odráží svazek P_0 a také zároveň rozptyluje záření dP_s do prostorového úhlu $d\Omega_s$ pod úhlem Θ_s a Φ_s .

BRDF je definovaná jako

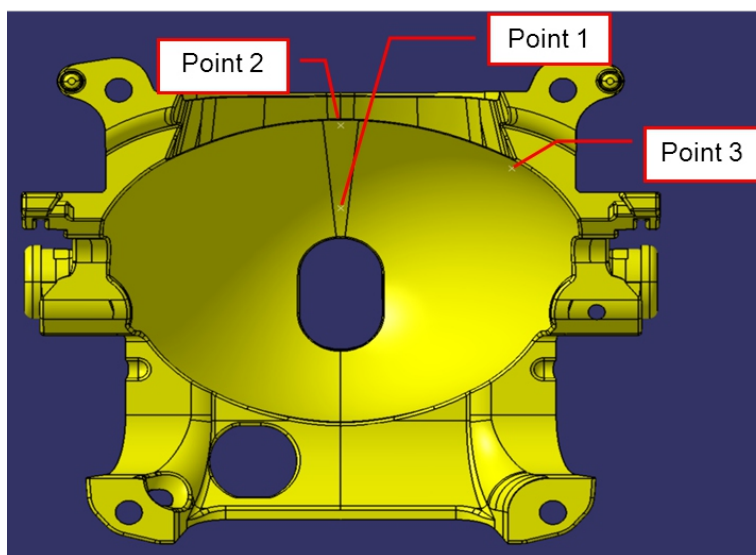
$$BRDF \cong \frac{\frac{dP_s}{d\Omega_s}}{P_i \cos\Theta_s} \cong \frac{\frac{P_s}{\Omega_s}}{P_i \cos\Theta_s}, \quad (13)$$

kde P_i je světelný tok dopadající na rozptylnou plochu A , P_s rozptýlený světelný tok do prostorového úhlu Ω_s pod úhlem Θ_s . Jednotkou BRDF je sr^{-1} [7].

Tento vztah přestává platit pro případ, že měříme za pomoci velké apertury úzký fokusovaný odražený svazek. Naopak dobře funguje pro malé měřicí apertury a pokud se měří dostatečně velký rozptyl.

3 PRAKTICKÁ ČÁST

Motivací této diplomové práce je potlačit nehomogenity v osvětlení, jak je znázorněno na Obrázku 2. Jedním z řešení, jak zmírnit nehomogenity je zdrsňit povrch, dosud hladkého, reflektoru.

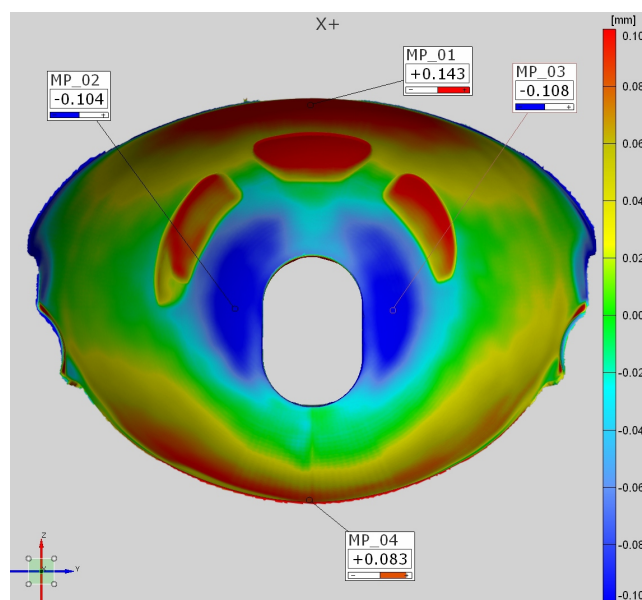


Obrázek 15: Reflektor s vyznačenými body měření.

Reflektory, které máme k dispozici ($VP9SPX - 13D\phi66 - C$ (typ pro výbojku D3S), $VP8M5X - 13D\phi24 - D$ (typ pro výbojku D1S)) mají tvar polyelipsoidu a jsou vyrobeny z plastu polyfenylsulfidu (PPS). Výrobní proces hladkých reflektorů spočívá v tom, že se nejprve vyfrézuje hrubý tvar formy. V lisu se PPS zahřívá na teplotu jeho tavení. Poté se hmota vstříkne do formy. Po vychladnutí a rozpojení formy získáme výsledný reflektor, který se ještě lakuje a je pokoven.

U reflektorů s drsným povrchem se liší výrobní proces formy vylisku. V tomto případě po frézování následuje elektroerozivní obrábění povrchu (viz kapitola 2.3) do finálního tvaru pomocí grafitové elektrody. Tato elektroda má tvar protikusu formy.

V celkovém procesu výroby dochází k nepatrné deformaci povrchu reflektoru při chladnutí materiálu v lisu, jak je znázorněno na Obrázku 16.



Obrázek 16: Sken optické plochy reflektoru s vyznačením deformací povrchu.

Červenou barvou po okrajích reflektoru na Obrázku 16 jsou vyznačeny oblasti, kde se nachází nejvíce materiálu, naopak oblasti s úbytkem materiálu jsou vyznačeny modrou barvou. Tři výrazné červené oblasti, které se nevyskytují na okrajích reflektorů jsou zde záměrně. Jedná se o plošky výrazně vystupující a zdrsňené. Jsou zde umístěny na základě norem profilů reflektorů.

Deformace vzniklé při výrobě se projevují při odrazu světla od povrchu reflektoru a to tím způsobem, že dochází k nerovnoměrnému osvětlení vozovky. Na vozovce jsou pak zřetelné světlé a tmavé skvrny, které mohou působit rušivě pro pozorovatele (řidiče).

Zdrsňením povrchu reflektoru by se vliv tvarových defektů mohl potlačit. Je však třeba uvážit, že při zdrsňení povrchu dojde k rozptylu dopadajícího světla, zvětší se osvětlená plocha vozovky a zároveň dojde ke snížení maximální intenzity osvětlení. Z těchto důvodů se musí dbát na normy definující požadavky na osvětlení vozovky.

Na Obrázku 15 jsou vyznačeny tři body měření, které nesou označení Point1, Point2, Point3. Tyto body byly vybrány, protože se v jednotlivých oblastech jejich výskytu liší reliéf povrchu vlivem naneseného laku. Povrch reflektorů je zalitý lakem, tudíž od okrajů klesá vliv drsnosti a ve středu reflektorů, kde je nejvíce laku, se povrch jeví jako téměř

hladký. U hladkých reflektorů si můžeme povšimnout vyhlazování stop po fréze a stejný efekt je patrný i u reflektorů s drsným povrchem, kde dochází vlivem laku ke snižování drsnosti.

Pro náš experimentální účel je k dispozici "stará = S " forma pro výrobu výlisku reflektorů, jejíž povrch je opracován pouze frézováním. Výlisek z této formy je následně lakován a pokoven. Dále máme k dispozici "novou = N " formu, jejíž povrch je také opracován frézováním a následně elektroerozivně obráběn. Výlisky z této formy mají drsný povrch, který je ještě lakován a pokoven. Obě formy mají dvě kavity ($K1$, $K2$). Používané reflektory k měření budou po zbytek práce nést označení:

SK1 reflektor - "stará"forma, kavita 1.

SK2 reflektor - "stará"forma, kavita 2.

NK2 reflektor - "nová"forma s drsností 24 VDI , kavita 2.

NK1 reflektor - "nová"forma s drsností 27 VDI , kavita 1.

Nanesení laku má zásadní vliv na reliéf povrchu reflektoru. Tento proces ovšem zatím není nijak kontrolován. Na reflektor NK1 byla s největší pravděpodobností nanesena větší vrstva laku, protože při detailnějším prozkoumání jeho plochy se jeví jako hladší než reflektor NK2. Z Obrázku 10 je také patrné, že lakované destičky s drsnostmi 24 VDI a 27 VDI se v šířce své rozptylové charakteristiky zásadně neliší. Tento jev si můžeme vysvětlit tím, že při lakování, byly zality hloubkové nerovnosti a zaobleny výstupky u obou form přibližně stejným způsobem.

Pro simulace chodu odražených paprsků od hladkých reflektorů a následného osvětlení vozovky se využívá simulační program Asap. Ten pracuje se základním zákonem odrazu viz rovnice (2). Pokud budeme chtít zapracovat do tohoto programu reflektory s drsným povrchem, je nezbytné ho rozšířit o BSDF.

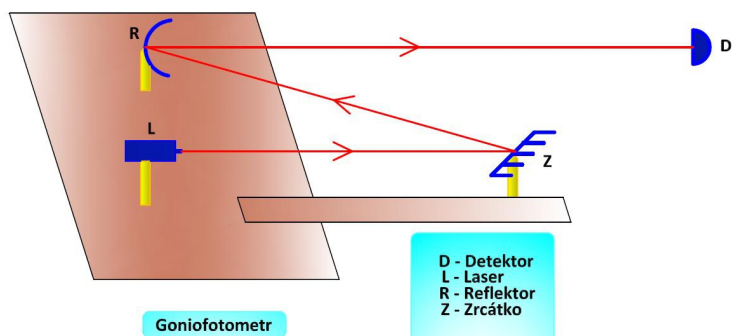
Do programu zadáváme reflektor pomocí jeho tvaru, odrazivosti povrchu a dále se zadávají BSDF. Tyto funkce získáme právě našim experimentálním měřením.

Znázorněné body Point1, Point2, Point3 na Obrázku 15 představují malé plochy, k jejichž osvětlení byl zvolen laserový zdroj, který tvoří dostatečně malou stopu. Musíme si však uvědomit, že kvůli koherenci zdroje dochází při rozptylu od drsného povrchu ke vzniku

koherenční zrnitosti (viz kapitola 2.5). Tento jev je pro naše účely nežádoucí a bohužel v experimentální části jsme ho nebyli schopni potlačit. K minimalizaci vlivu koherenční zrnitosti došlo následně při výpočetním zpracování výsledků (viz kapitola 4.4).

Naměřená rozptylová charakteristika odrazu od drsné plochy byla následně aproximována gaussovskou funkcí, kterou můžeme považovat za BSDF a ta byla zadána do simulačního programu. Výsledky jsou shrnuty (viz kapitola 5.1). Nyní se ovšem budeme věnovat samotnému popisu experimentální části měření.

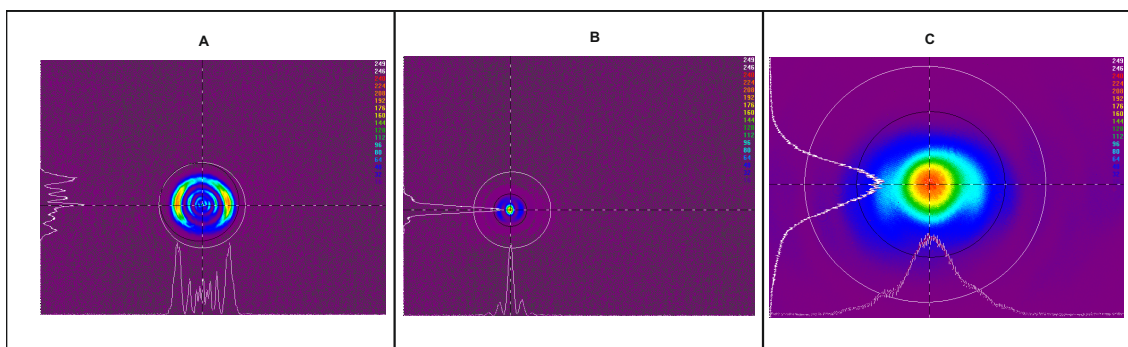
3.1 Experimentální uspořádání



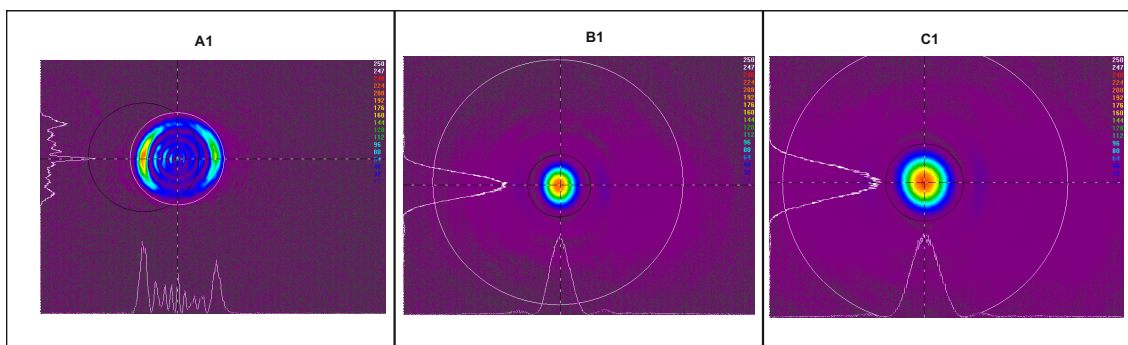
Obrázek 17: Experimentální uspořádání optické sestavy. Zdroj je označen jako L, odrazné zrcátko Z, měřený reflektor R a detektor D. Optická soustava (L,Z,R) je umístěna na goniometrickém stolku.

Na Obrázku 17 je znázorněno naše experimentální uspořádání optické sestavy. Optická sestava se skládá ze zdroje záření L , odrazného zrcátka Z a z měřeného reflektoru R . Tato sestava je umístěna na goniometrickém stolku. Ze zdroje záření vychází svazek, který je odražen od zrcátka, dále dopadá na měřený reflektor. Výsledný rozptyl od reflektoru je detekován fotodiódou D ve vzdálenosti 25 m od optické sestavy.

Jako zdroj záření jsme použili polovodičový laser firmy Edmund Optics vyzařující na vlnové délce 632 nm . Laser má kruhovou stopu, která však není gaussovská, což je vidět na Obrázcích 18,19.



Obrázek 18: Stopa laseru s pasem ve vzdálenosti 64 *cm*. Na obrázku *A* je stopa laseru zaznamenána ve vzdálenosti 32 *cm* od zdroje, na obrázku *B* je stopa ve vzdálenosti 64 *cm* a na obrázku *C* je stopa ve vzdálenosti 230 *cm*. Rozměr zorného pole kamery je 7,0 *mm* × 5,3 *mm*.



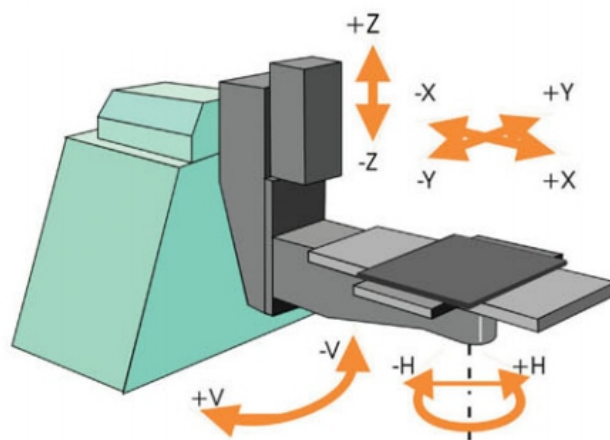
Obrázek 19: Stopa laseru s pasem ve vzdálenosti 182 *cm*. Na obrázku *A* je stopa laseru zaznamenána ve vzdálenosti 32 *cm* od zdroje, na obrázku *B* je stopa ve vzdálenosti 182 *cm* a na obrázku *C* je stopa ve vzdálenosti 230 *cm*. Rozměr zorného pole kamery je 7,0 *mm* × 5,3 *mm*.

Z Obrázku 18 *A* a z Obrázku 19 *A1* je patrné, že stopa laseru před pasem tvoří mezikruží. Ta jsou patrná i pro pas v 64 *cm* ve vzdálenosti 64 *cm* od zdroje (Obrázek 18 *B*). Ovšem se zvyšující se vzdáleností od pasu začínají tato mezikruží mizet, jak je vidět na Obrázku 18 případ *C* a na Obrázku 19 případ *C1*. Zde si také můžete povšimnout, že ve svislé ose se laser chová gaussovsky, ovšem na vodorovné ose jsou stále patrná postranní maxima, která nám mohou ovlivnit výsledné měření.

Proto jsme se rozhodli zvolit, co nejdelší optickou vzdálenost a nechat na reflektor dopadat pas laseru. Z tohoto důvodu je v optické sestavě použito zrcátka, abychom dosáhli prodloužení optické vzdálenosti a aby zároveň nedošlo ke kolizi při natáčení goniometrického stolku s jeho postranní stěnou. Největší možná optická vzdálenost s použitím odrazného zrcátka, které jsme ve zkušebně byli schopni dosáhnout, je $162,5\text{ cm}$.

Průměr stopy laseru v pase je přibližně 1 mm , což je akceptovatelný kompromis pro měření drsnosti. Podle našeho názoru jsme se vyhnuli možnosti, že by stopa laseru byla tak malá, že by dopadala mezi jednotlivé části výškových nerovností povrchu.

Jak již bylo řečeno, optická sestava se nachází na goniometrickém stolku SMS10h firmy Optronik-Berlin. Jako detektor nám slouží Fotometr SMS10s také firmy Optronik-Berlin. Goniometrický stolek a fotometr jsou současně dodávány jako Goniofotometr SMS10h.



Obrázek 20: Schéma goniometrického stolku [9].

Z Obrázku 20 je patrné, že goniometrický stolek je zařízení schopné rotace v horizontálním (H) a vertikálním (V) směru, dále posuvu v osách X , Y a výškového posuvu ve směru osy Z . Přesnost natočení je $0,01^\circ$ v rozsahu od -190° do 120° v H a $\pm 100^\circ$ ve V . Rozsah posuvu v ose X je $\pm 300\text{ mm}$, v ose Y $\pm 100\text{ mm}$ a v ose Z je možný výškový posun od -70 mm do 240 mm . Přesnost posuvu ve všech směrech je $0,1\text{ mm}$. Nosnost gonio-

metrického stolku je 80 kg a je na něj možno umístit přípravek o maximálních rozměrech $1600\text{ mm} \times 600\text{ mm}$.

Součástí goniometrického stolku je také laser, který slouží k nastavení optické osy otáčení.

Detektorem je již zmiňovaný Fotometr SMS10s umístěný 25 m od měřeného reflektoru. Je schopen zaznamenat osvětlení v rozsahu $0,1\text{mlx} - 500\text{kIx}$ [9].

3.2 Postup měření

Postup samotného měření rozptylu záření od drsné plochy reflektoru bude popsán co nejdetailněji, aby mohl být znovu aplikovaný pomocí tohoto textu.

Nejprve na goniometrický stůl umístíme desku s optickou soustavou, která obsahuje laser, reflektor a zrcátko. Fotografie přípravku můžete vidět na Obrázku 21.



Obrázek 21: Fotografie optické sestavy umístěné na goniometrickém stolku.

Optická soustava se skládá z laseru, reflektoru a zrcátka.

Laser je upevněn na nastavitelném stolku s možností náklonu od 0° do 60° , dále je

možný i jemný náklon pomocí mikrošroubů u úchyty laseru. Reflektor je taktéž umístěn na nastavitelném stolku s možností rotace kolem svislé osy o 360° a náklonu od 0° do 30° . Součástí stolku je ještě magnetický prstenec, ve kterém je upevněn reflektor a dovoluje jeho rotaci kolem vodorovné osy o 360° .

Poslední komponentou je zrcátko, které je zde umístěno kvůli prodloužení optické dráhy (viz kapitola 3.1). Zrcátko je upevněno na tyči o délce 70 cm a jeho náklon je taktéž možné nastavit pomocí mikrošroubů.

Nejprve je potřeba desku s optickou sestavou uchytit na goniometrickém stolku těsně k jeho zadní hraně, aby nedošlo při jeho rotaci k zásahu do boční stěny.

Dalším krokem je nastavení optického středu pomocí laseru zabudovaného do goniometrického stolku. Pomocí posunu goniometrického stolku v osách X, Y, Z se snažíme integrovaný laser namířit na střed reflektoru, kde se nachází optická osa otáčení. Střed reflektoru nám určuje hrot, který napodobuje výbojku ($D1S$ nebo $D3S$). Hrot je pomocí držáku výbojky upevněn v reflektoru v patici. Špička hrotu sahá do prvního ohniska reflektoru.

Dalším krokem je zapnutí našeho polovodičového laseru. Volíme maximální hodnotu napětí 5 V , která je stanovena výrobcem.

Dále následuje nastavení jednotlivých komponent optické sestavy před samotným měřením rozptylu od drsné plochy reflektoru. Laser je umístěn ve výšce $17,8\text{ cm}$. Vyzářený svazek laseru směřuje na zrcátko umístěné ve výšce $14,5\text{ cm}$. Proto musíme naklonit stolec, na kterém je umístěn laser, aby svazek z laseru dopadal do středu zrcátka. Od zrcátka se svazek odráží na reflektor. Střed reflektoru je ve výšce $20,5\text{ cm}$, a proto se také náklon zrcátka upraví pomocí mikrošroubů. Toto základní nastavení komponent optické sestavy ještě upravujeme o samotné nastavení pro tři zmiňované body (Point1, Point2, Point3), které jsou znázorněny na Obrázku 15. Nastavení stolku laseru a zrcátka zůstává pro všechny tři body stejné. Ke změnám nastavení tedy dochází pouze u natočení stolku reflektoru kolem svislé osy, naklonění reflektoru a natočení reflektoru pomocí magnetického úchyty. Tento postup zaručuje, že svazek laseru bude procházet středem výboje a napodobí tak světlo vycházející z oblouku výboje.

Point1 osvětlíme tak, že stolek s reflektorem otočíme na hodnotu 220° , náklon reflektoru na hodnotu 15° a reflektorem na magnetu otočíme o 45° vzhledem k jeho základní poloze. Point2 osvětlíme pomocí natočení stolku s reflektorem na hodnotu 308° , náklonem reflektoru na hodnotu 15° a natočení reflektoru zůstává stejné jako u Point2. Poslední bod Point3 osvětlíme pomocí stejného natočení stolku s reflektorem a jeho stejným náklonem jako při osvětlení Point2. Zde dochází pouze ke změně natočení reflektoru na magnetu a to o 90° vzhledem k původní poloze. Některé strany reflektoru se musí před měřením odříznout, abychom byli schopni laserem namířit na hrot, aniž by došlo k omezení svazku.

Podle velikosti rozptylového obrazce volíme velikost měřené mapy. Pro všechna měření volíme krok $0,05^\circ$, tak aby byl menší, než úhlová šířka detektoru, nejmenší možnou rychlost měření 1 a režim měření "DC low resolution".

4 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

4.1 Simulace

V programu *Asap* byly vytvořeny simulace odrazu laseru od hladké zakřivené plochy, která odpovídá tvaru měřených reflektorů. Tyto simulace jsme využívali ke zpracování naměřených dat (viz kapitola 4.4). Pro ověření správnosti simulací jsme ještě provedli jejich srovnání s měřením odrazu záření od hladké rovinné odrazné plochy a od obecné hladké zakřivené odrazné plochy.

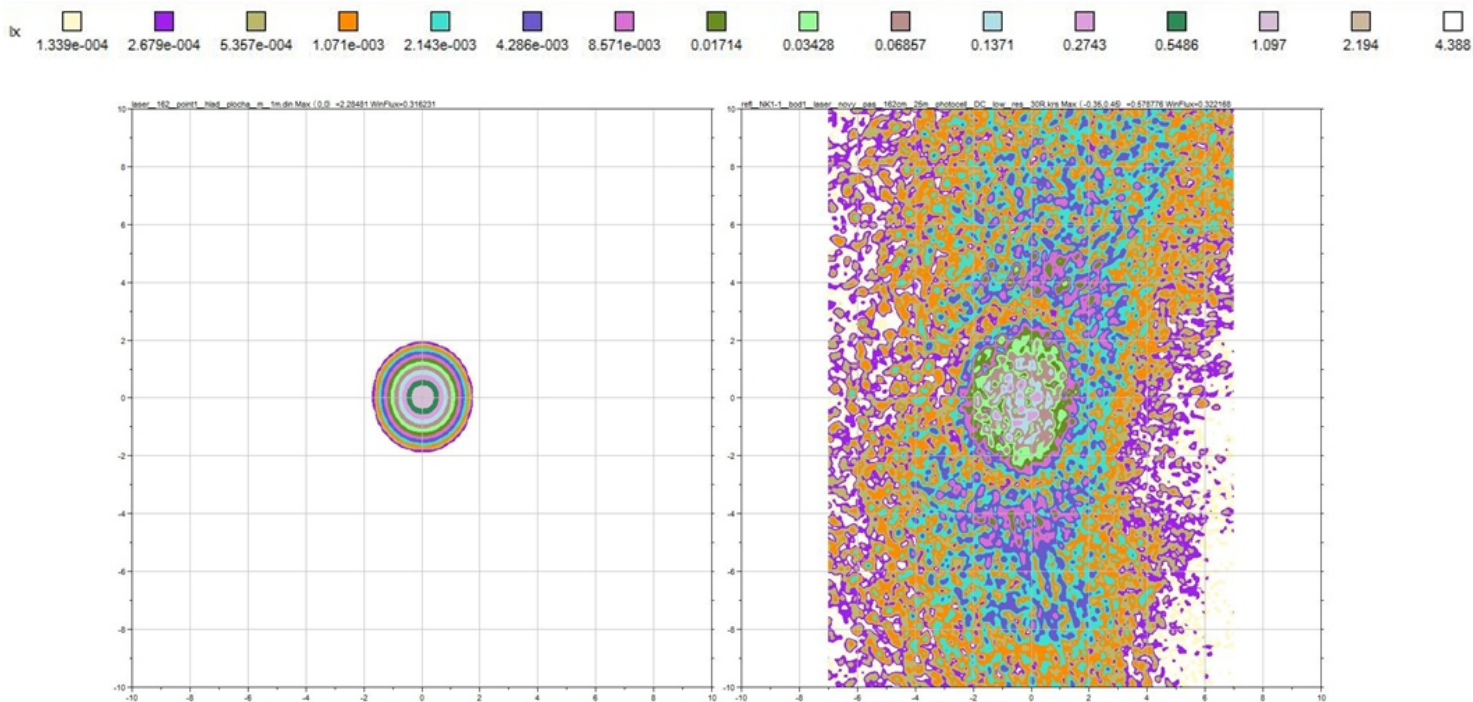
Program *Asap* pracuje na základě trasování paprsků. Celková simulace odrazu laseru od hladké zakřivené plochy, odpovídající měřenému reflektoru, se zadává pomocí parametrů zdroje záření, reflektoru a detektoru. Parametry zdroje jsou vlnová délka a jeho rozbíhavost. Předpokládá se, že zdroj se chová gaussovky. Rozbíhavost jsme zadali podle naměřené charakteristiky laserového svazku a vlnovou délku jsme zadali odlišnou tak, aby rozměr pasu Gaussovského svazku odpovídal rozměru pasu použitého laseru. Reflektor je zadáván svým přesným tvarem a odrazivostí. V tomto případě předpokládáme hladkou odraznou pokovenou plochu, tudíž volíme odrazivost rovnu 0,8. Detektor je nahrazen sférou o poloměru 25 *m*.

Výsledné simulace odrazu od hladké zakřivené plochy jsou na Obrázcích 22, 23, 24, kde je zaznamenán vliv osvětlení na úhlovém rozložení dané rozptylové charakteristiky v horizontálním a ve vertikálním směru.

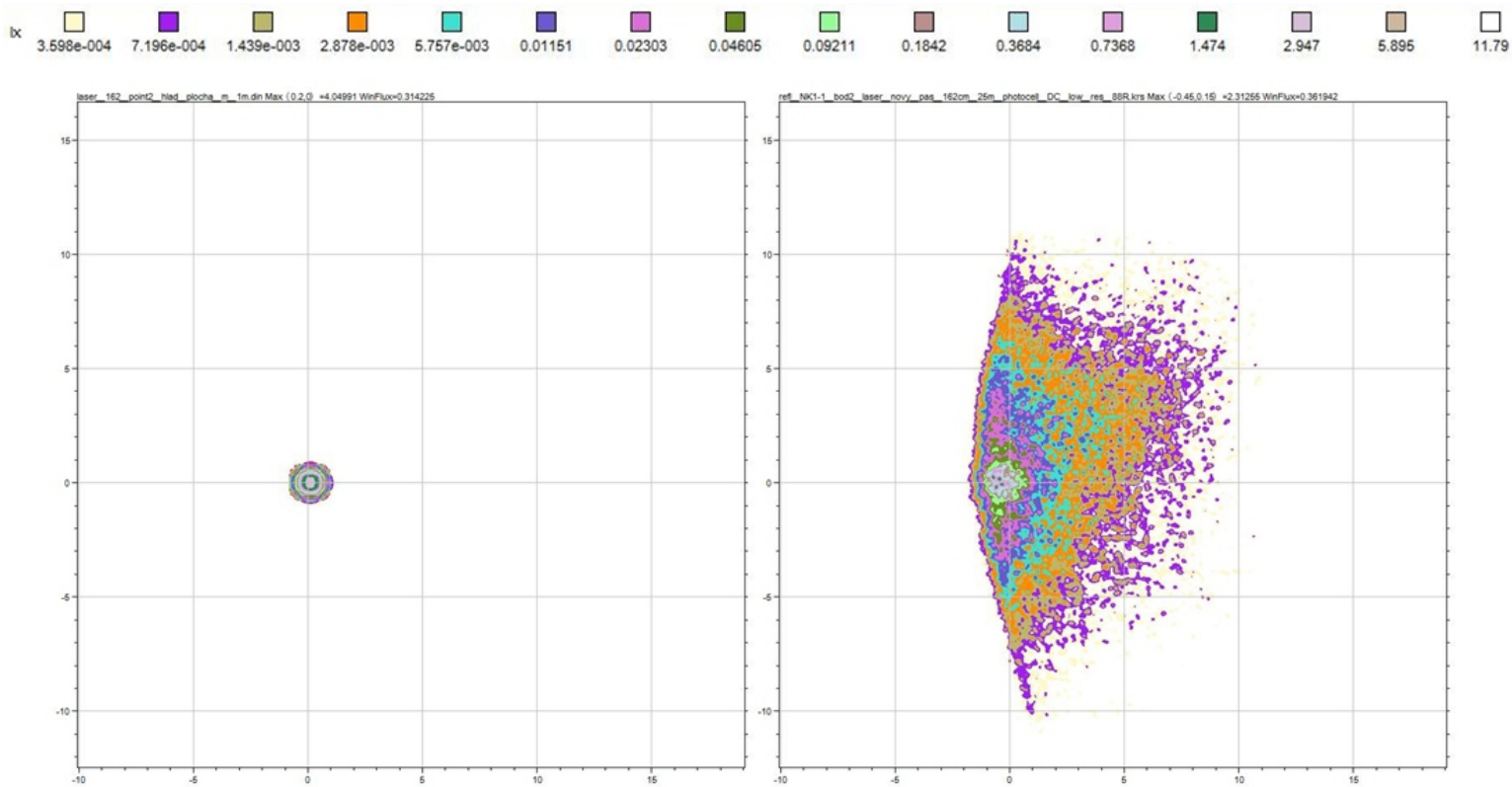
Na levých částech obrázků jsou znázorněny simulace odrazu od hladké zakřivené plochy, která odpovídá měřeným reflektorům. Na pravých stranách obrázků jsou samotná měření rozptylu od drsné zakřivené plochy reflektorů. Je patrné, že tvarově se simulace shodují s rozptylem od drsné zakřivené plochy. Šířky rozptylových charakteristik jsou z map rozptylu jen těžko čitelné, protože jsou výrazně ovlivněny koherenční zrnitostí.

Můžeme však říci, že simulace splňují základní předpoklady. Jejich šířka v půlce maxima je menší než šířka rozptylové charakteristiky měřeného rozptylu od drsného povrchu reálného reflektoru a intenzita v simulacích je větší než u měřených vzorků. Světelné toky

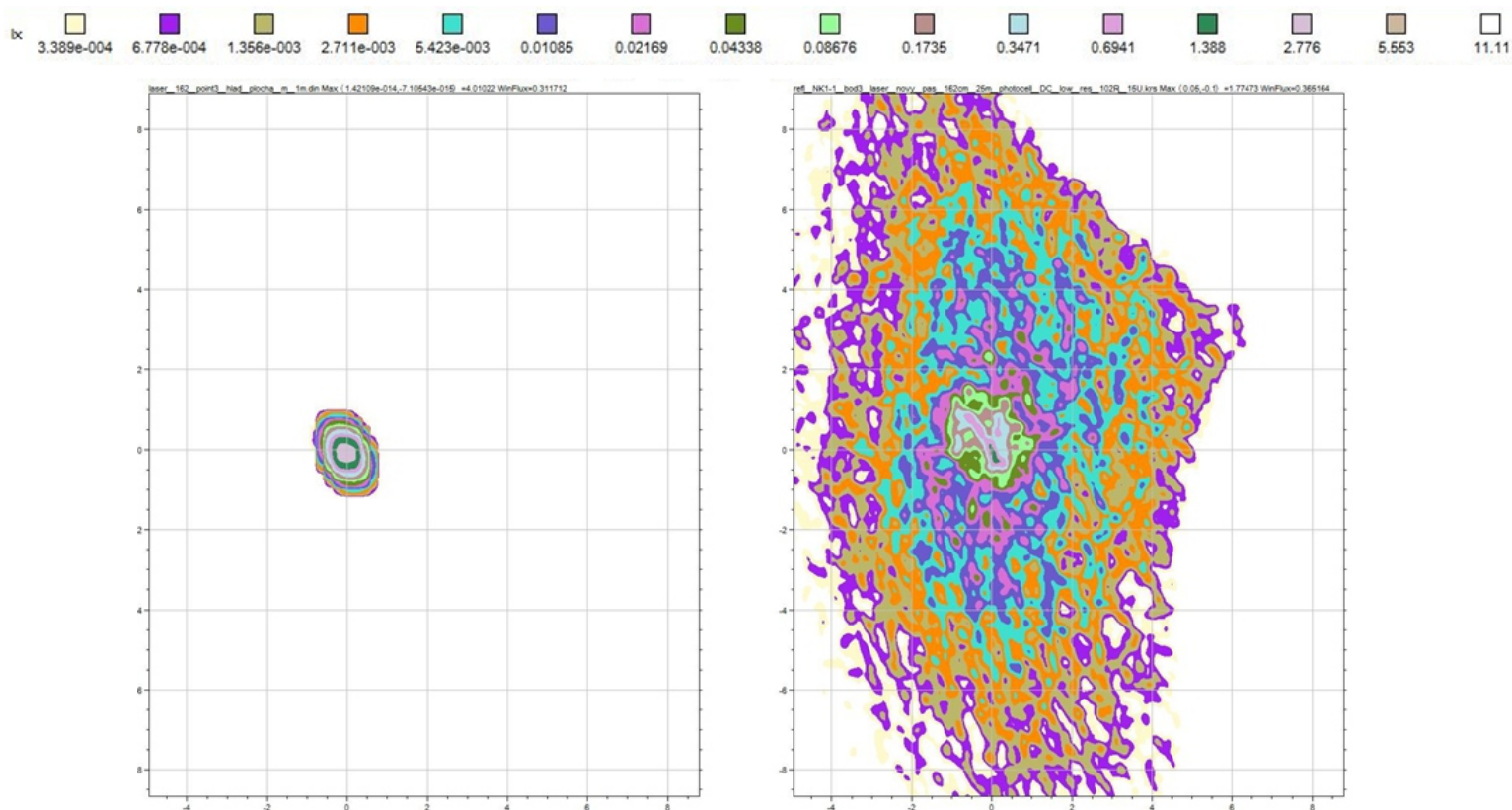
se shodují v obou případech, z toho vyplývá, že se neuvažují žádné ztráty energie.



Obrázek 22: Na obrázku vlevo simulace odrazu od hladké zakřivené plochy v Point1, na obrázku vpravo rozptyl od reflektoru NK1 v Point1.

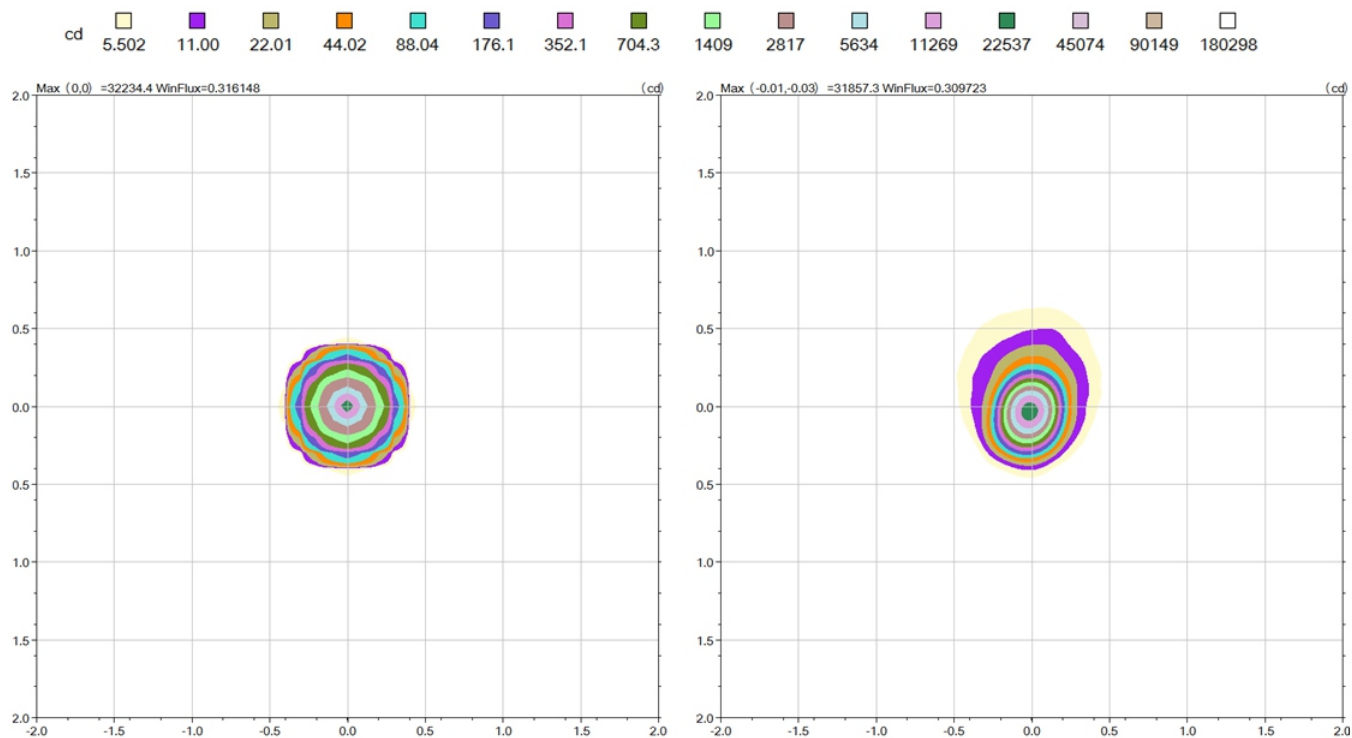


Obrázek 23: Na obrázku vlevo simulace odrazu od hladké zakřivené plochy v Point2, na obrázku vpravo rozptyl od reflektoru NK1 v Point2.



Obrázek 24: Na obrázku vlevo simulace odrazu od hladké zakřivené plochy v Point3, na obrázku vpravo rozptyl od reflektoru NK1 v Point3.

Jak již bylo řečeno, náš polovodičový laser používaný k měření se nechová gaussovsky. Tento fakt bude nepříznivě ovlivňovat rozdíl mezi simulací a naměřenými daty. Bohužel jsme u experimentálního ověření neměli k dispozici hladkou plochu tvaru odpovídajícímu reflektoru. Proto jsme se rozhodli provést měření odrazu od hladké rovinné plochy (zrcátka) a odrazu od hladké zakřivené plochy (pokovená čočka) a obě varianty nasimulovat. Na příložených Obrázcích 25 a 26 jsou srovnání simulací a měření.

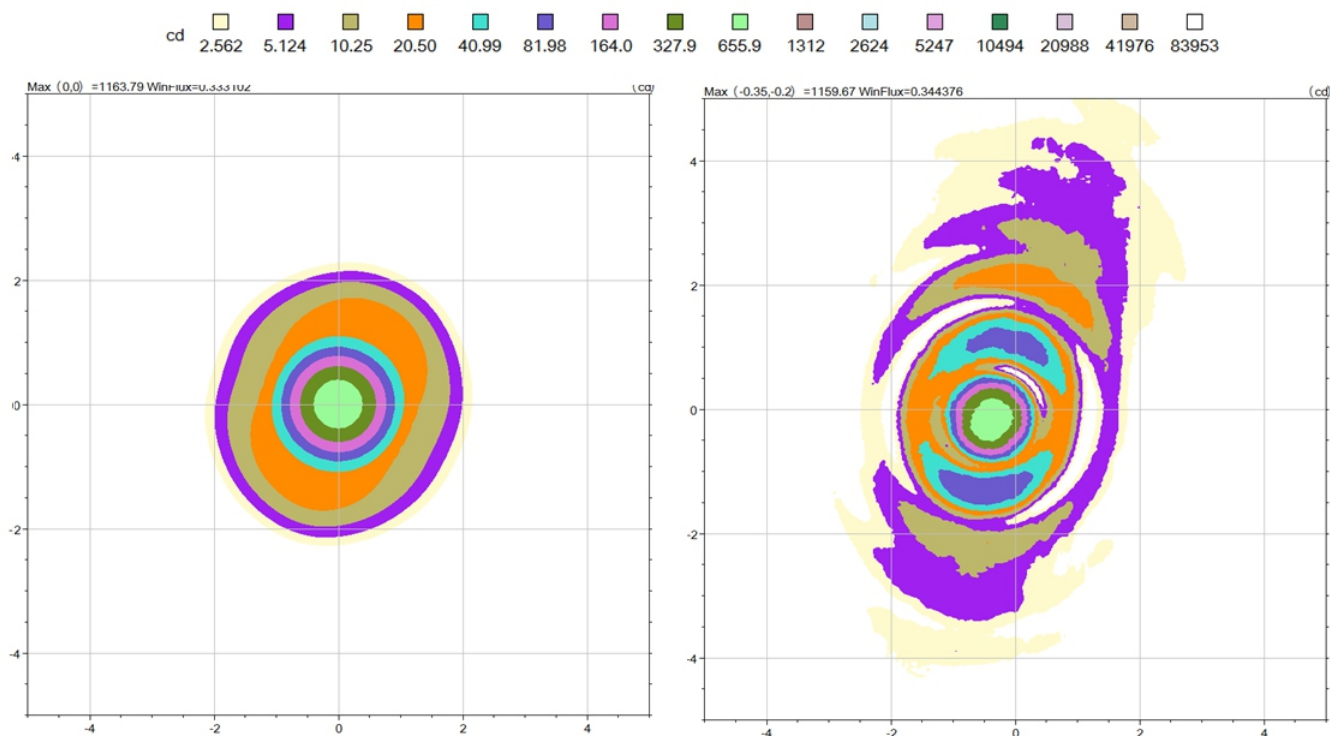


Obrázek 25: Na obrázku vlevo je znázorněna simulace odrazu od hladké rovinné plochy.

Na obrázku vpravo je měření reálné hladké rovinné plochy (zrcátka).

V obou případech necháváme na plochu dopadat laserový svazek pod úhlem 2° .

Obrázek 25 zahrnuje simulace odrazu laseru od hladké rovinné plochy a měření odrazu od stejně definované plochy (zrcátka). V obou případech na plochu dopadá laserový svazek pod úhlem 2° . U měření je šířka rozptylové charakteristiky nepatrně větší než u simulací, maxima a světelný tok jsou v obou případech totožná. K rozdílu dochází v porovnání tvarů. Toto si můžeme vysvětlit tím, že reálný laser, který jsme používali k měření se nechová gaussovsky, tak jak s tím počítají simulace.



Obrázek 26: Na obrázku vlevo je znázorněna simulace odrazu laseru od hladké zakřivené plochy s poloměry křivosti v horizontálním směru $-56,541 \text{ mm}$ a ve vertikálním směru $-72,138 \text{ mm}$. Na obrázku vpravo je měřený odraz od hladké zakřivené plochy (pokovená čočka) s totožnými poloměry křivosti jako u simulace.

Obrázek 26 zobrazuje porovnání simulace a měření odrazu od hladké zakřivené plochy (pokovená čočka). V obou případech na plochu dopadá laserový svazek pod úhlem 2° . Šířky rozptylových charakteristik, maxima i světelné toky jsou v obou případech totožné. K rozdílu opět dochází v porovnání tvarů. U měření se vyskytují již zmiňovaná mezikruží.

Z Obrázků 25 a 26 můžeme vyvodit závěr, že simulace jsou téměř totožné s měřením. Patrné rozdíly jsou zapříčiněny tím, že svazek laseru používaného k měření není gaussovský.

4.2 Fourierova transformace

Matematická operace zvaná Fourierova transformace (FT) pracuje s lineárními systémy, kde platí zákon superpozice, a její princip spočívá v rozložení složité funkce na lineární kombinaci harmonických funkcí.

FT obecné komplexní funkce g dvou nezávislých proměnných x a y se vyjadřuje například ve tvaru $\mathcal{F}\{g\}$ a definovaná jako [10]

$$\mathcal{F}\{g\} = \int \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) e^{-i2\pi(f_x x + f_y y)} dx dy. \quad (14)$$

Transformace nabývá obecně komplexních hodnot dvou nezávislých proměnných f_x a f_y označovaných jako frekvence. Tato transformace nám slouží jako přechod z prostorových souřadnic do frekvenčních. Naopak zpětný přechod z frekvenčního spektra do prostorových souřadnic zprostředkovává zpětná (inverzní) FT funkce $G(f_x, f_y)$ označována jako $\mathcal{F}^{-1}\{G\}$ se vyjadřována například jako [10].

$$\mathcal{F}^{-1}\{G\} = \int \int_{-\infty}^{\infty} G(f_x, f_y) e^{i2\pi(f_x x + f_y y)} df_x df_y. \quad (15)$$

Podmínky existence FT [10]:

1. g integrovatelná s absolutní hodnotou v rovině (x, y)
2. g má konečně mnoho bodů nespojitosti a konečný počet maxim a minim v libovolném konečném obdélníku
3. g nemá žádný bod nekonečné nespojitosti

Jeden ze základních teorémů FT je **Konvoluční teorém** [10]. Jestliže platí, že

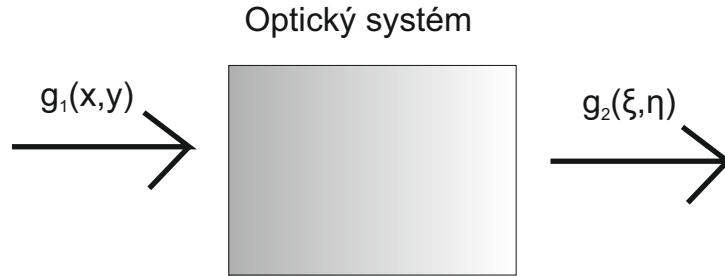
$$\mathcal{F}\{g(x, y)\} = G(f_x, f_y), \quad (16)$$

a zároveň $\mathcal{F}\{h(x, y)\} = H(f_x, f_y)$, pak

$$\mathcal{F}\left\{\int \int_{-\infty}^{\infty} g(\xi, \eta) h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta\right\} = G(f_x, f_y) H(f_x, f_y). \quad (17)$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že konvoluci v délkových proměnných odpovídá násobení Fourierových obrazů ve frekvenčních proměnných.

V optice nachází FT uplatnění například při zpracování obrazové informace.



Obrázek 27: Základní schéma optického zobrazení. $g_1(x, y)$ označuje vstupní signál, který dopadá na optický systém, kde dochází k transformaci a z optického systému vystupuje výstupní signál označen jako $g_2(\xi, \eta)$.

Na Obrázku 27 je znázorněno základní schéma optického zobrazení. Vstupní signál označen jako $g_1(x, y)$ dopadá na obecný optický systém. Zde dojde k transformaci $g_1(x, y)$ na $g_2(\xi, \eta)$ označován jako výstupní signál. Vstupní a výstupní signál mohou být reálné funkce (intenzity) nebo komplexní funkce (amplitudy) v systému dvojdimenzionálních nezávislých prostorových souřadnic.

Pro popis transformace vstupního signálu optickým systémem na výstupní signál se využívá matematické operace konvoluce \otimes [10]:

$$g_2 = h \otimes g_1, \quad (18)$$

kde h je odezвовá funkce. Pokud pracujeme s představou, že světlo se chová jako elektromagnetické vlnění, tak bod se vždy zobrazí jako rozptylová ploška, kterou můžeme popsat bodové rozptylové funkce (PSF - Point Spread Function). Tomuto vyjádření odpovídá i zmíněná odezвовá funkce. Ke zjednodušení vztahu využijeme vztahu (17) a získáme:

$$G_2(f_x, f_y) = G_1(f_x, f_y)H(f_x, f_y). \quad (19)$$

Po přechodu do frekvenční oblasti pomocí FT dostáváme výstupní signál jako součin vstupního signálu a přenosové funkce $H(f_x, f_y)$.

4.3 Digitální zpracování obrazu

Pojem zpracování obrazu představuje převedení obrazu reálného trojrozměrného, popřípadě dvojrozměrného, předmětu do digitální podoby a jeho následné úpravy. Tato podoba obrazu je pro nás výhodná, protože je reprezentována maticí čísel s hodnotami jasu či osvětlení. Díky výpočetní technice můžeme s maticí dále libovolně nakládat.

Při převodu do digitální podoby modifikujeme obraz reálného předmětu, který je nejčastěji vyjádřen optickými veličinami jako je jas, svítivost či osvětlení, na veličiny elektrické. Tohoto dosahujeme pomocí analogově-digitálního převodníku.

Samotná digitalizace obrazu se skládá ze vzorkování a kvantování. Vzorkování chápeme jako převod zaznamenaného spojitého signálu na jednotlivé diskrétní hodnoty, které nabývají reálných hodnot. Proces vzorkování musí splňovat Nyquistův vzorkovací teorém, který říká, že vzorkovací frekvence musí být větší než dvojnásobek nejvyšší harmonické složky vzorkovaného signálu.

Kvantování nám převede reálné spojité hodnoty příslušných vzorků na konečný počet celočíselných hodnot (v případě šedotónového obrazu se jedná o 256 hodnot).

Obecně platí, že čím jemnější vzorkování a kvantování, tím přesněji jsme schopni reprodukovat původní obraz. Musí být však splněn výše zmíněný Nyquistův vzorkovací teorém.

Pro naše účely je nejdůležitějším procesem zpracování obrazu filtrace, která nám umožňuje minimalizovat vliv koherenční zrnitosti. Základní myšlenka filtrace spočívá v tom, že dochází k transformaci původního obrazu a to tím způsobem, že jednotlivé body obrazu nabývají určitého jasu (osvětlení) a my se jim snažíme přiřadit jiné hodnoty s ohledem na okolí bodu. Nejčastěji můžeme filtraci přirovnat k dolní či horní propusti.

V prostorové oblasti dochází ke konvoluci původního obrazu a masky, které obsahuje váhové koeficienty. Ke zjednodušení dochází, pokud původní obraz převedeme pomocí FT do frekvenční oblasti. To znamená, že obraz rozložíme na harmonické funkce. Za filtraci pak považujeme násobení jednotlivých harmonických funkcí námi zvolenou funkcí (maskou). Filtrovaný obraz dostáváme po přechodu zpět do prostorových souřadnic pomocí zpětné FT.

Filtry primárně dělíme na lineární a nelineární.

Lineární filtry podle volby váhových koeficientů masky mohou plnit funkci vyhlazování obrazu nebo také zvýraznění jemných detailů a hran. Princip lineárních filtrů spočívá v tom, že kolem zvoleného bodu (pixelu) se vytvoří malé okolí. Nová hodnota zvoleného bodu je dána jako lineární kombinace zvoleného okolí. Základními lineárními filtry jsou průměrovací a gaussovské.

Průměrovací filtr v podstatě přiřadí každému bodu novou hodnotu, která je výsledkem aritmetického průměrování okolí původního bodu. U gaussovského filtrování je maska zadána pomocí gaussovské funkce

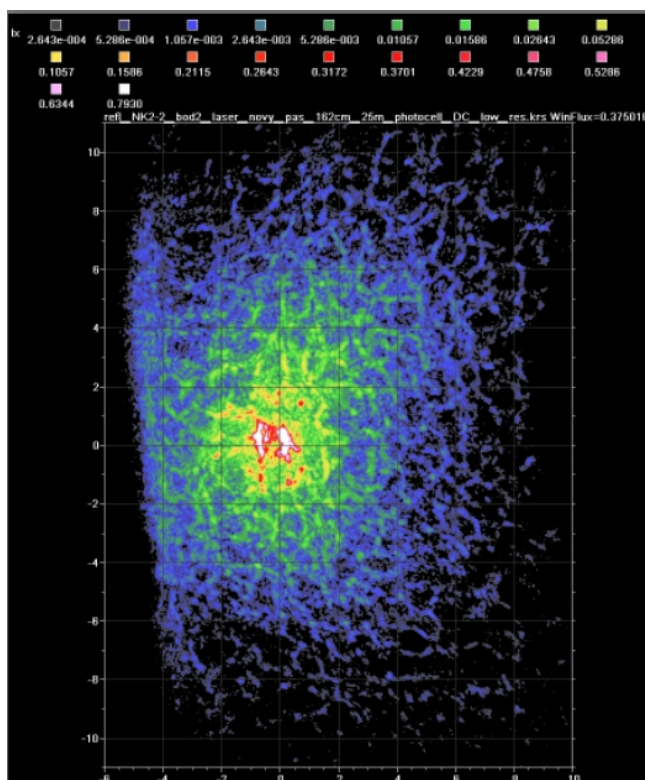
$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (20)$$

kde σ je v relaci se šířkou v polovině maxima (FWHM - Full Width at Half Maximum) a to vztahem:

$$\sigma = \frac{FWHM}{2\sqrt{2\ln 2}} \quad (21)$$

Nelineární filtry částečně eliminují potíže s rozmazáním hran, které se vyskytují u lineárních filtrů. Pracují se metodami statistické analýzy a rozdíl mezi lineárními a nelineárními filtry je v tom, že nelineární nepřepočítávají hodnotu vybraného bodu, ale vybírají z jeho okolí vhodnou hodnotu, kterou pak dosazují do vybraného bodu. Mezi nelineární filtry patří například medián nebo Wienerův filtr.

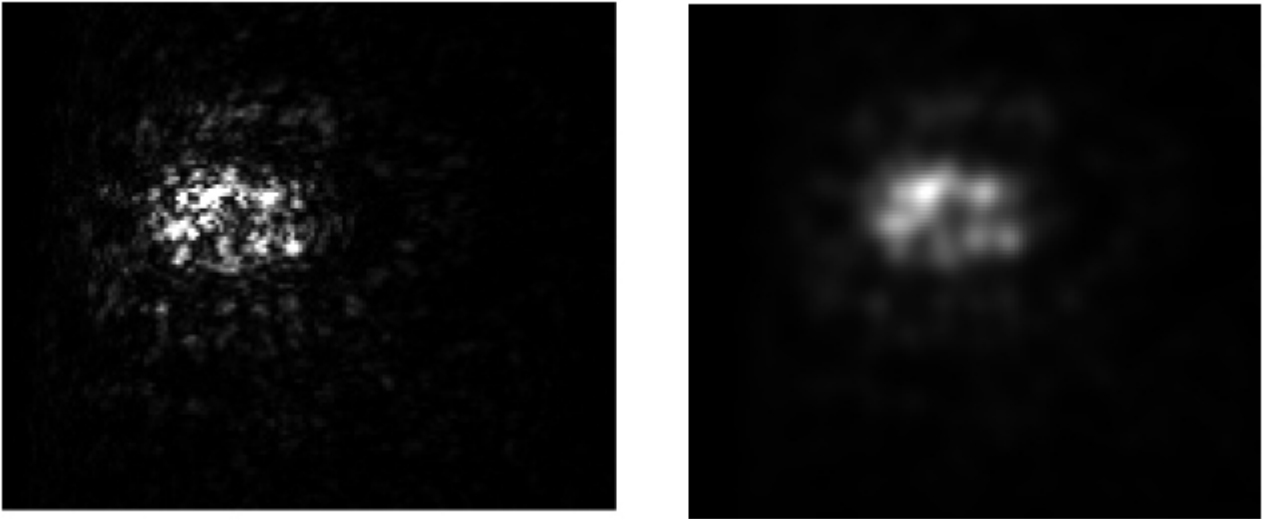
4.4 Matematický aparát zpracování výsledků



Obrázek 28: Rozptyl od reflektoru NK2 v Point2.

Obrázek 28 znázorňuje námi měřenou mapu rozptylu od reflektoru NK2 v Point2. Je z něj patrný nezanedbatelný vliv koherenční zrnitosti. K jejímu potlačení jsme se rozhodli využít matematický software Matlab a v něm průměrování gaussovskou maskou. Abychom dosáhli co nejúčinnějšího potlačení koherenční zrnitosti, použili jsme normované gaussové masky se šířkou σ viz (20) shodnou se šířkou rozptylové charakteristiky simulace odrazu od hladké zakřivené plochy. Simulace Point1 a Point2 jsou symetrické, ovšem Point3 je oválný. Zde jsme tedy šířku rozptylové charakteristiky volili jako průměrnou hodnotu šířky simulace odrazu od hladké zakřivené plochy v horizontálním a vertikálním směru. Stejnou masku jsme aplikovali i na samotné simulace odrazu záření od hladké zakřivené plochy.

Vyhlazení dat je patrné na Obrázku 29.



Obrázek 29: Na obrázku vpravo je znázorněná naměřená rozptylová charakteristika s vlivem koherenční zrnitosti. Na obrázku vlevo je tatáž rozptylová charakteristika po vyhlazení pomocí gaussovské masky.

Po filtraci můžeme přejít k dalšímu kroku zpracování. Naměřená mapa rozptylu obsahuje vliv samotného světelného zdroje, zakřivení plochy reflektoru a jeho drsnost, jak je patrné na Obrázku 28 (jako vzor byla zvolena mapa rozptylu od reflektoru NK2 v Point2). Jelikož nás zajímá pouze rozptyl od drsné plochy reflektoru, je nezbytné eliminovat vliv zakřivení reflektoru. Vliv zakřivení plochy reflektoru je nezbytné potlačit, protože BSDF se určuje z rozptylu od rovinné plochy. Je to vhodné i pro další využití v simulačním programu, kde se trasuje projektor s využitím zadání BSDF na již zakřivenou plochu reflektoru. Tím jsme zabránili tomu, aby křivost reflektoru byla započítána dvakrát.

Počáteční úvaha spočívá v tom, že měřený výstupní stav vzniká konvolucí rozptylu od drsné zakřivené plochy a vstupního stavu.

$$out(\alpha, \beta) = rozptyl(\alpha, \beta) \otimes in(\alpha, \beta), \quad (22)$$

kde $out(\alpha, \beta)$ je námi měřený rozptyl od reflektoru, který obsahuje informaci o zakřivení plochy reflektoru, o jeho drsnosti a o vlivu samotného zdroje. $rozptyl(\alpha, \beta)$ je hledaný vliv drsnosti a $in(\alpha, \beta)$ je vstupní stav, za který jsme zvolili simulaci odrazu zdroje od hladké zakřivené plochy. Zde je obsažena informace o zakřivení povrchu reflektoru a o simulovaném zdroji, využívajícím gaussovský svazek. Jinou možnost chování zdroje simulační program nedovoluje (viz kapitola 4.1).

Pro zjednodušení výpočtu aplikujeme na (22) FT, pak

$$\mathcal{F}\{out(x, y)\} = \mathcal{F}\{rozptyl(x, y) \otimes in(x, y)\} \quad (23)$$

$$OUT(f_x, f_y) = ROZPTYL(f_x, f_y)IN(f_x, f_y). \quad (24)$$

Přechodem do frekvenční oblasti se nám vztah zjednoduší na pouhé násobení obrazu rozptylu a obrazu vstupního stavu ve frekvenční oblasti. Nyní můžeme vyjádřit požadovaný obraz rozptylu vydělením obrazu výstupního stavu obrazem vstupního stavu.

$$ROZPTYL(f_x, f_y) = \frac{OUT(f_x, f_y)}{IN(f_x, f_y)} \quad (25)$$

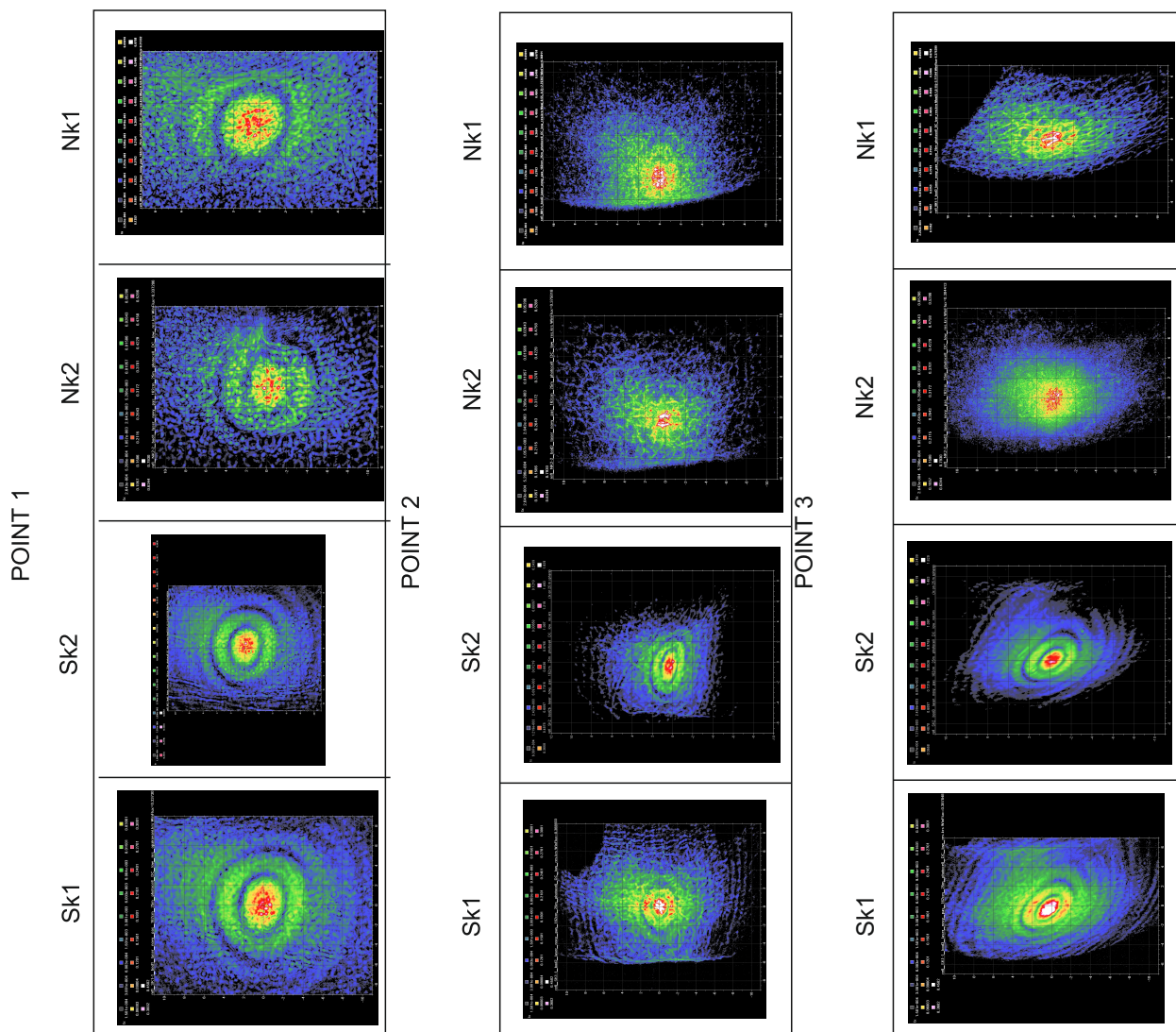
Jak již bylo řečeno, vstupní i výstupní stav obsahují informaci o zakřivení povrchu reflektoru a úhlovém rozložení měřícího svazku. Podíl obou obrazů, pak obsahuje jen informaci, která charakterizuje rozptyl, o což jsme usilovali.

Nyní můžeme zpětnou FT přejít do prostorových souřadnic a získáme námi hledanou úhlovou charakteristiku rozptylu

$$rozptyl(\alpha, \beta) = \mathcal{F}^{-1}\{ROZPTYL(f_x, f_y)\} = \mathcal{F}^{-1}\left\{\frac{OUT(f_x, f_y)}{IN(f_x, f_y)}\right\}. \quad (26)$$

5 VÝSLEDKY

5.1 Výsledky měřených reflektorů



Obrázek 30: Zobrazení rozptylů od jednotlivých bodů (Point1, Point2, Point3) u reflektorů různé drsnosti (SK1, SK2, NK2, NK1).

Obrázek 30 znázorňuje naměřené mapy rozptylů záření od reflektorů s různými drsnostmi povrchu a v různých bodech. V prvním sloupci jsou zaznamenány rozptyly záření od Point1 reflektorů SK1, SK2, NK2 a NK1, ve druhém sloupci jsou rozptyly od Point2 a

ve třetím sloupci od Point3 od jmenovitých reflektorů.

Téměř na všech obrázcích jsou patrná mezikruží kolem zrcadlového odrazu, která mohou být způsobena technologií opracování povrchu nebo nestandardním chováním použitého měřicího laseru. Obě varianty určitě ovlivňují toto měření, ale vliv laseru se jeví jako zásadní. Stejného efektu si totiž můžeme povšimnout i na odrazu laseru od hladké zakřivené plochy (viz Obrázek 26). Bohužel chování laseru jsme v průběhu měření dat k diplomové práci nebyli schopni ovlivnit.

Dále je na obrázcích patrná koherenční zrnitost, kterou jsme alespoň částečně potlačili průměrováním gaussovskou maskou ve výpočetním programu Matlab (viz kapitola 4.4). Po vyhlazení jsme využitím FT přešli do frekvenční oblasti. Zde jsme schopni vyjádřit $ROZPTYL(f_x, f_y)$ za předpokladu eliminace zakřivení plochy viz vztah (24), následně zpětnou FT přecházíme zpět do prostorových souřadnic. Takto vyjádřenou úhlovou charakteristiku rozptylu prokládáme gaussovskou plochou ve tvaru.

$$f(x, y) = B \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}}, \quad (27)$$

kde B je amplituda, x_0 a y_0 jsou vzdálenosti od středu souřadnic, σ_x odpovídá vztahu (21) v ose x a σ_y odpovídá (21) ose y .

Jinou možností, jak potlačit vliv koherenční zrnitosti je, že výslednou úhlovou charakteristiku rozptylu sečteme po řádcích nebo po sloupcích a vydělíme příslušným počtem řádků či sloupců a dostáváme pouze jednorozměrné rozptylové charakteristiky v ose x a v ose y . Vzniklé charakteristiky prokládáme gaussovskými křivkami ve tvaru:

$$f(x) = a_x \cdot e^{-\left(\frac{x-b_x}{c_x}\right)^2}, \quad (28)$$

$$g(y) = a_y \cdot e^{-\left(\frac{y-b_y}{c_y}\right)^2}, \quad (29)$$

kde a_x, a_y jsou amplitudy, b_x, b_y jsou vzdálenosti od středu souřadnic a c_x, c_y opět odpovídají (21). Prokládanou plochu i křivky můžeme pro malé úhly rozptylu považovat za BSDF. V tabulce jsou uvedeny koeficienty prokladů $rozptylu(x, y)$ plochami a charakteristikami se směrodatnými odchylkami (RMS).

Bod měření	Proklad	Reflektor				
		SK1	SK2	NK2	NK1	
Point1	plocha	B	0,4488 ± 0,0126	0,2197 ± 0,0054	0,2117 ± 0,0046	0,3542 ± 0,0094
		σ_x	0,1765 ± 0,0049	0,2244 ± 0,0055	0,3531 ± 0,0077	0,2760 ± 0,0074
		σ_y	0,2091 ± 0,0059	0,1680 ± 0,0041	0,3300 ± 0,0072	0,2789 ± 0,0074
		x_0	1,9450 ± 0,0040	2,6230 ± 0,0060	3,0570 ± 0,0080	2,1440 ± 0,0070
		y_0	1,9220 ± 0,0060	2,4990 ± 0,0040	2,9520 ± 0,0070	2,1530 ± 0,0080
		RMS	0,5956	0,5315	0,4930	0,5838
	křivka x	a_x	0,9032 ± 0,0602	0,800 ± 0,0545	0,7350 ± 0,0473	0,8988 ± 0,0578
		b_x	1,9780 ± 0,0170	2,6270 ± 0,0210	3,0870 ± 0,0310	2,1480 ± 0,0230
		c_x	0,3119 ± 0,0240	0,3636 ± 0,0286	0,5802 ± 0,0431	0,4231 ± 0,0314
		RMS	0,9266	0,8993	0,8839	0,9196
	křivka y	a_y	0,8548 ± 0,0821	0,6742 ± 0,0584	0,7030 ± 0,0588	0,6486 ± 0,0590
		b_y	1,9330 ± 0,0290	2,4920 ± 0,0170	2,9600 ± 0,0350	2,1520 ± 0,0300
		c_y	0,3690 ± 0,0410	0,2430 ± 0,0244	0,5153 ± 0,0498	0,4040 ± 0,0424
		RMS	0,8296	0,8493	0,8145	0,8293

Tabulka 3: Shrnutí prokládacích parametrů gaussovské funkce pro Point1.

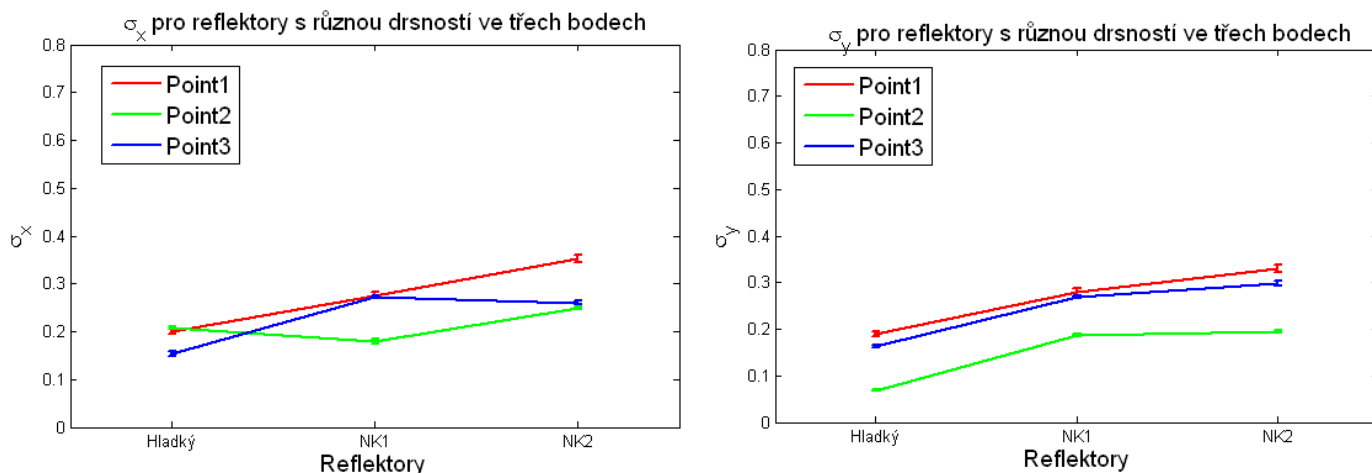
Bod měření	Proklad	Reflektor			
		SK1	SK2	NK1	
Point2	plocha	B	0,3581 ± 0,0092	0,2928 ± 0,0054	0,3924 ± 0,0063
		σ_x	0,0622 ± 0,0011	0,1465 ± 0,0037	0,1787 ± 0,0029
		σ_y	0,0387 ± 0,0006	0,0974 ± 0,0025	0,1868 ± 0,0030
		x_0	2,3700 ± 0,0010	2,4640 ± 0,0040	2,3470 ± 0,0030
		y_0	2,3410 ± 0,0010	2,6120 ± 0,0020	3,5550 ± 0,0030
		RMS	0,7401	0,4765	0,5891
	křivka x	a_x	0,8587 ± 0,0629	0,5318 ± 0,0628	0,5757 ± 0,0545
		b_x	2,3540 ± 0,0120	2,4820 ± 0,0260	2,3550 ± 0,0200
		c_x	0,1977 ± 0,0167	0,2661 ± 0,0363	0,2684 ± 0,0293
		RMS	0,9076	0,7499	0,7931
		a_y	0,9419 ± 0,0813	0,9198 ± 0,0774	0,6529 ± 0,0516
		b_y	2,3230 ± 0,0080	2,6230 ± 0,0130	3,5760 ± 0,0220
	křivka y	c_y	0,1152 ± 0,0115	0,1871 ± 0,0182	0,3464 ± 0,0316
RMS		0,8764	0,8560	0,8298	

Tabulka 4: Shrnutí prokládacích parametrů gaussovske funkce pro Point2.

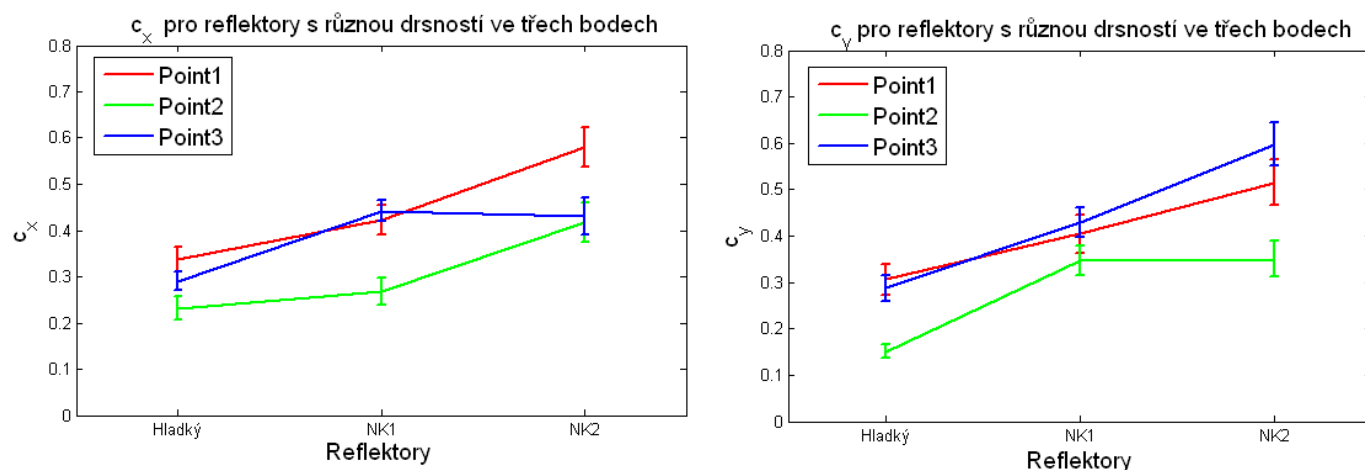
Bod měření	Proklad	Reflektor				
		SK1	SK2	NK2	NK1	
Point3	plocha	B	0,3305 ± 0,0052	0,2447 ± 0,0045	0,2635 ± 0,0043	0,3543 ± 0,0045
		σ_x	0,1243 ± 0,0019	0,1846 ± 0,0034	0,2603 ± 0,0043	0,2721 ± 0,0035
		σ_y	0,1466 ± 0,0023	0,1793 ± 0,0033	0,2990 ± 0,0050	0,2690 ± 0,0034
		x_0	3,4650 ± 0,0020	3,2530 ± 0,0030	3,2700 ± 0,0040	4,8250 ± 0,0030
		y_0	3,6310 ± 0,0020	3,5130 ± 0,0030	3,6660 ± 0,0050	4,8860 ± 0,0030
		RMS	0,5954	0,5189	0,5558	0,5400
	křivka x	a_x	0,7245 ± 0,0437	0,6939 ± 0,0405	0,6824 ± 0,0534	0,7452 ± 0,0325
		b_x	3,4700 ± 0,0110	3,2680 ± 0,0170	3,2660 ± 0,0280	4,8750 ± 0,0150
		c_x	0,2240 ± 0,0157	0,3564 ± 0,0241	0,4308 ± 0,0389	0,4424 ± 0,0223
		RMS	0,9052	0,9025	0,8330	0,9260
		a_y	0,6240 ± 0,0560	0,8133 ± 0,0606	0,7712 ± 0,0509	0,7425 ± 0,0472
		b_y	3,6270 ± 0,0200	3,5100 ± 0,0180	3,6340 ± 0,0320	4,8800 ± 0,0220
	křivka y	c_y	0,2812 ± 0,0291	0,2937 ± 0,0252	0,5977 ± 0,0456	0,4290 ± 0,0314
		RMS	0,7937	0,8531	0,8490	0,8445

Tabulka 5: Shrnutí prokládacích parametrů gaussovské funkce pro Point3.

Výsledky tabulek 3, 4, 5 jsou shrnuty v následujících čtyřech grafech na Obrázcích 31 a 32.



Obrázek 31: Graf závislosti σ_x a σ_y na drsnosti reflektoru v bodech Point1 (červená křivka), Point2 (zelená křivka) a v Point3 (modrá křivka).



Obrázek 32: Graf závislosti c_x a c_y na drsnosti reflektoru v bodech Point1 (červená křivka), Point2 (zelená křivka) a v Point3 (modrá křivka).

Na Obrázku 31 jsou znázorněny závislosti σ_x a σ_y na drsnosti reflektoru. Na x-ové ose je vyznačen hladký reflektor, reflektor NK1 s drsností formy 27 VDI a reflektor NK2

s drsností formy 24 *VDI*. Za hladký reflektor považujeme průměr hladkých reflektorů SK1 a SK2.

Na Obrázku 32 jsou znázorněny závislosti c_x a c_y na drsnosti reflektoru. Osa x-ová je označena stejně jako u Obrázku 31.

Z přiložených grafů na Obrázcích 31, 32 je patrné, že se zvyšující se drsností povrchů reflektorů roste $\sigma_x, \sigma_y, c_1, c_2$ prokládacích funkcí. Může se zdát zavádějící, že nejprve je na x-ové ose vyznačen reflektor NK1, který byl zhotoven ve formě s drsnějším povrchem než reflektor NK2. K této záměně došlo záměrně, jelikož na reflektoru NK1 je nanášena větší vrstva laku, která způsobuje, že se reflektor jeví hladší než reflektor NK2. Větší vrstva laku mohla způsobit, že prohlubně v povrchu jsou zality lakem více a došlo k patrnému zjemnění povrchu reflektoru. Naopak u méně drsného reflektoru NK1 menší vrstva laku zapříčinila, že se reflektor jeví jako drsnější. Vliv laku na drsném povrchu byl již diskutován i u proměření destiček zhotovených z plastu zytel (polyamid) a následně polakovaných (viz Obrázek 10).

Vliv laku stojí za vysvětlením drobných odchylek, které jsou patrné na Obrázcích 31 a 32 na levých grafech na modrých křivkách. Domníváme se, že zmíněné nepřesnosti mohou být způsobeny právě větší vrstvou laku v měřených oblastech. Při zalévání povrchu reflektoru lakem dochází k nerovnoměrnému zalití plochy reflektoru lakem. Patrné je to na srovnání vrstvy laku v Point1 a v Point2. Do Point1, který se nachází u středu reflektoru, steče nejvíce laku a vytvoří se zde největší vrstva. Ovšem ke krajům tato vrstva bude klesat. Způsob lakování reflektorů zatím není detailně popsán a není v rámci diplomové práce jej uvažovat.

Pro objasnění domněnky, že vrstva laku může zásadně ovlivnit výslednou drsnost reflektoru, jsou přiloženy dvě fotografie reflektoru ze stejné formy s drsností 27 *VDI* a ze stejné kavity, přičemž na fotografii na Obrázku 33 je reflektor záměrně zalitý větší vrstvou laku než na fotografii na Obrázku 34. Obě fotografie byly pořízeny shodným nastavením parametrů fotoaparátu (expoziční čas, clonové číslo, úroveň blesku).

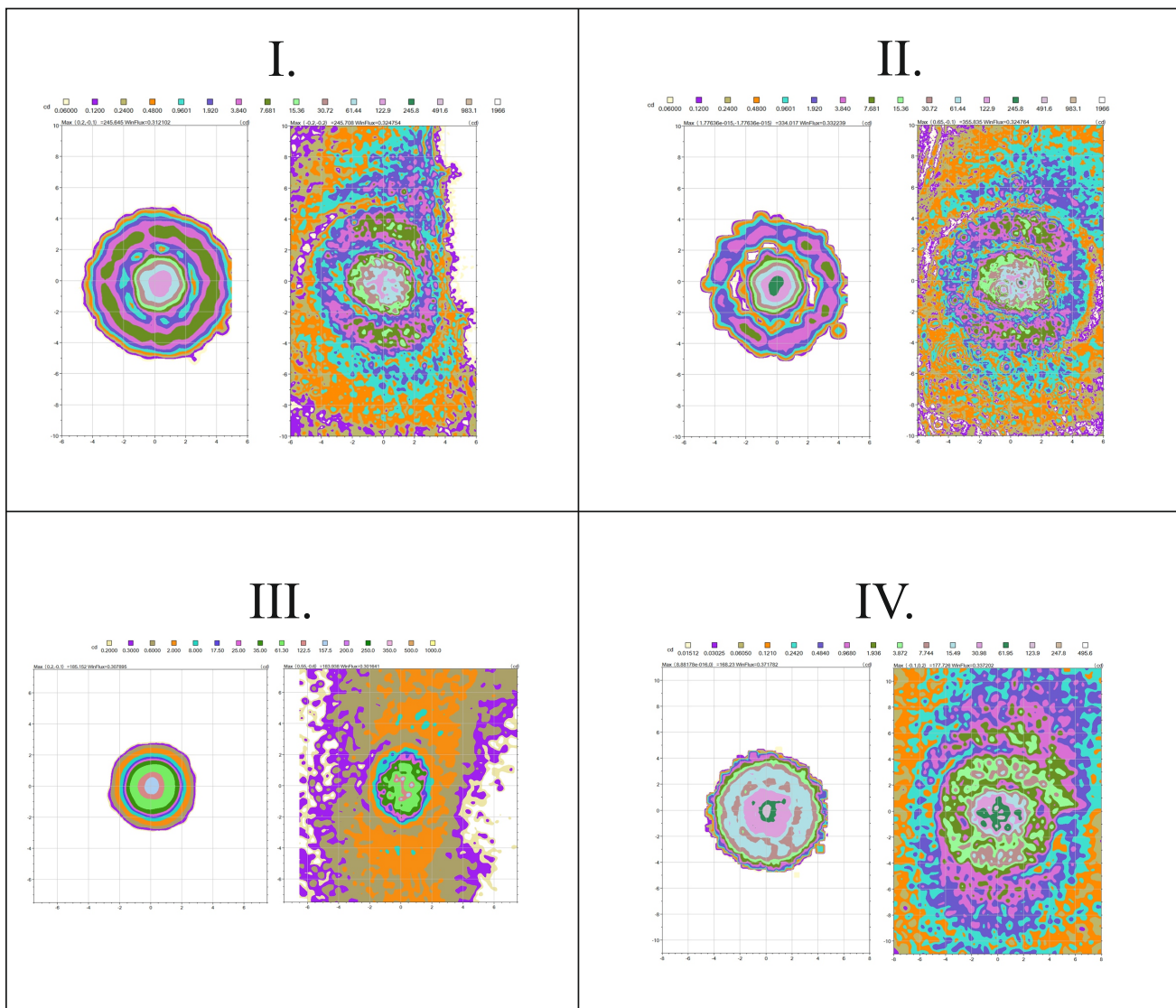


Obrázek 33: Reflektor z formy o drsnosti 27 *VDI* z kavity 1 zalitý silnou vrstvou laku.

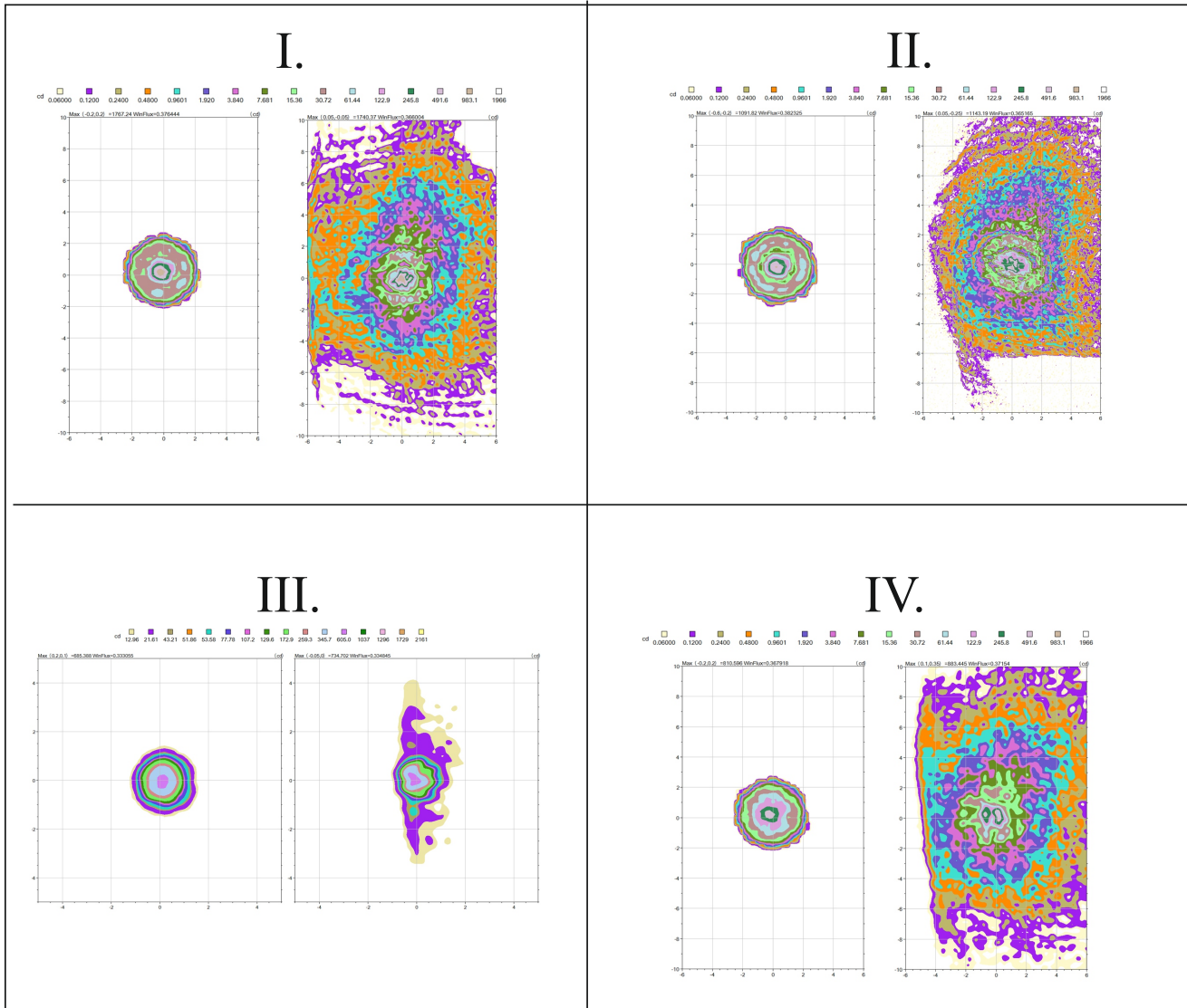


Obrázek 34: Reflektor z formy o drsnosti 27 *VDI* z kavity 1 zalitý slabší vrstvou laku než na Obrázku 33.

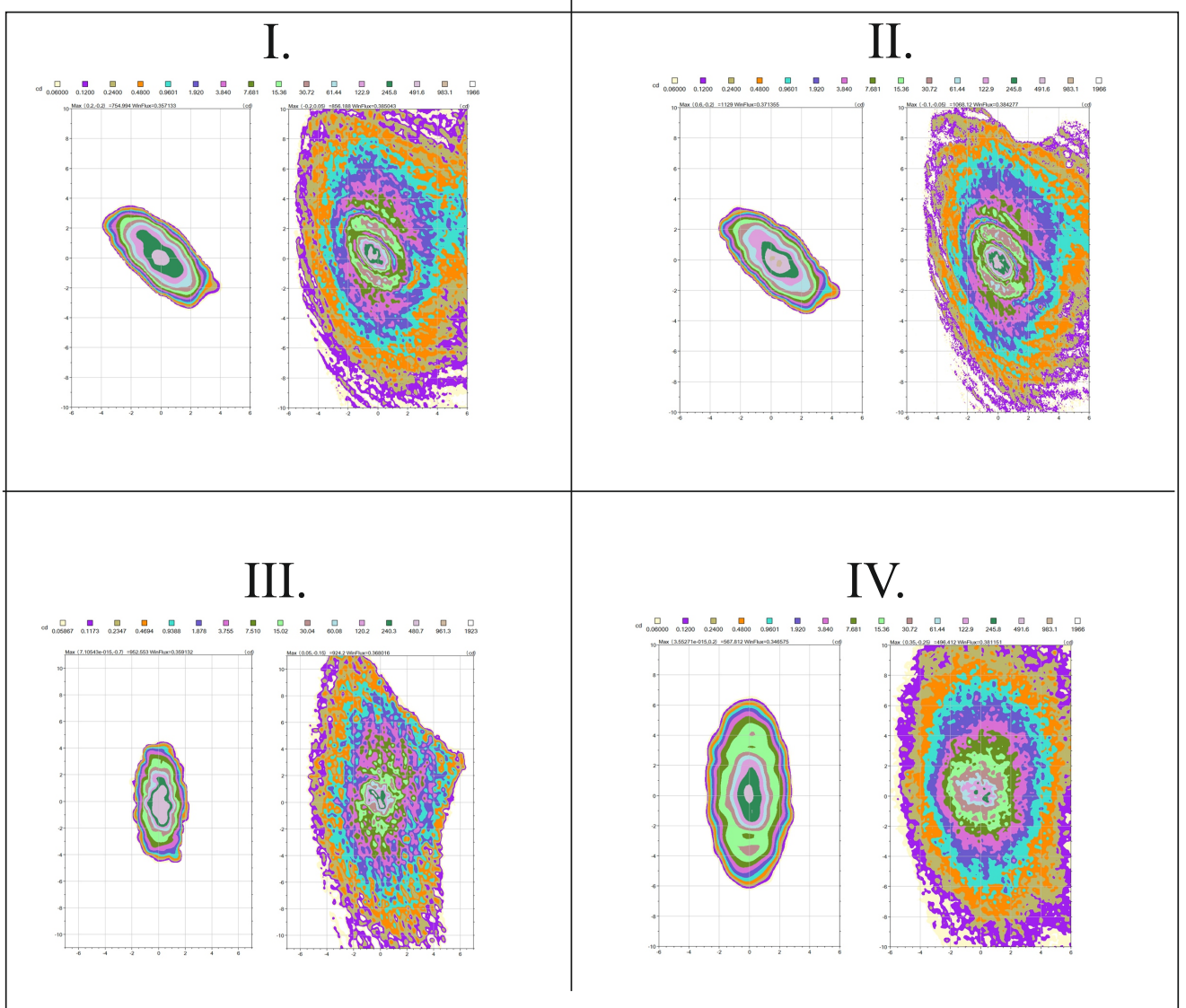
Pro ověření správnosti prokládacích funkcí jsou přiloženy srovnání simulací a měření reflektorů různých drsností ve třech bodech. Simulace byly zhotoveny tak, že na povrch hladký povrch reflektoru byly postupně v Point1, Point2, Point3 nanесeny prokládací funkce. Z Obrázků 35, 36 a 37 můžeme konstatovat, že simulace přibližně odpovídají naměřeným charakteristikám, jak tvarem, tak i velikostí šířky rozptylu. Z tohoto můžeme vyvodit závěr, že zjištěná rozptylová charakteristika představuje v rámci nejistot měření přijatelnou volbu. Tím není dotčena možnost prověřit použití i jiných prokládacích funkcí.



Obrázek 35: Srovnání simulací, které využívají prokládací funkce a měření reflektoru s různými typy povrchu v Point1, přičemž simulace jsou zaznamenány na levých stranách segmentů a měření na pravých stranách. *I.* segment obrázku zobrazuje reflektor SK1, *II.* segment reflektor SK2, *III.* segment reflektor NK1 a *IV.* segment reflektor NK2.



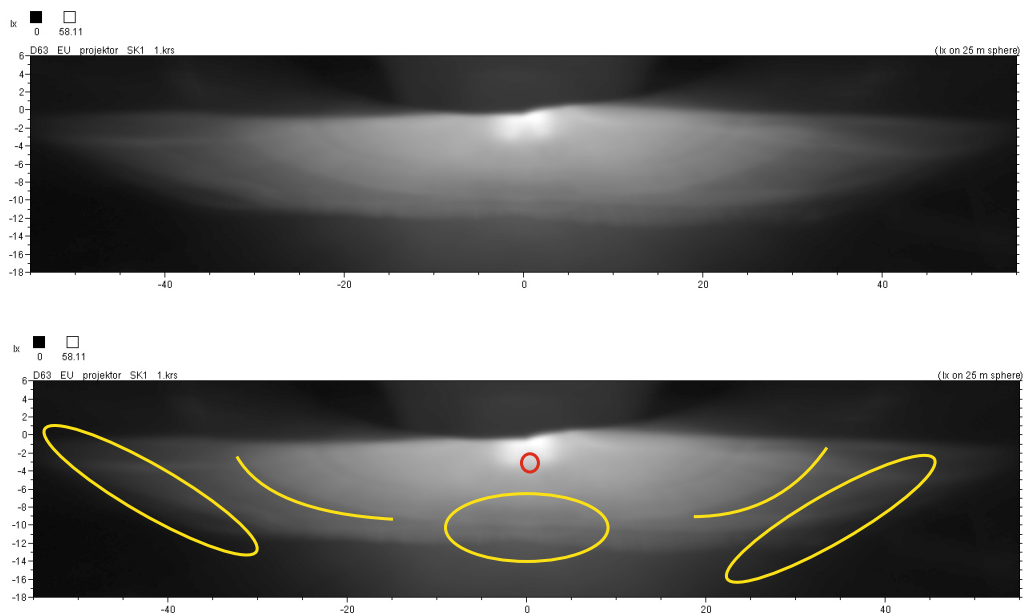
Obrázek 36: Srovnání simulací, které využívají prokládací funkce a měření reflektoru s různými typy povrchu v Point2, přičemž simulace jsou zaznamenány na levých stranách segmentů a měření na pravých stranách. *I.* segment obrázku zobrazuje reflektor SK1, *II.* segment reflektor SK2, *III.* segment reflektor NK1 a *IV.* segment reflektor NK2.



Obrázek 37: Srovnání simulací, které využívají prokládací funkce a měření reflektoru s různými typy povrchu v Point3, přičemž simulace jsou zaznamenány na levých stranách segmentů a měření na pravých stranách. *I.* segment obrázku zobrazuje reflektor SK1, *II.* segment reflektor SK2, *III.* segment reflektor NK1 a *IV.* segment reflektor NK2.

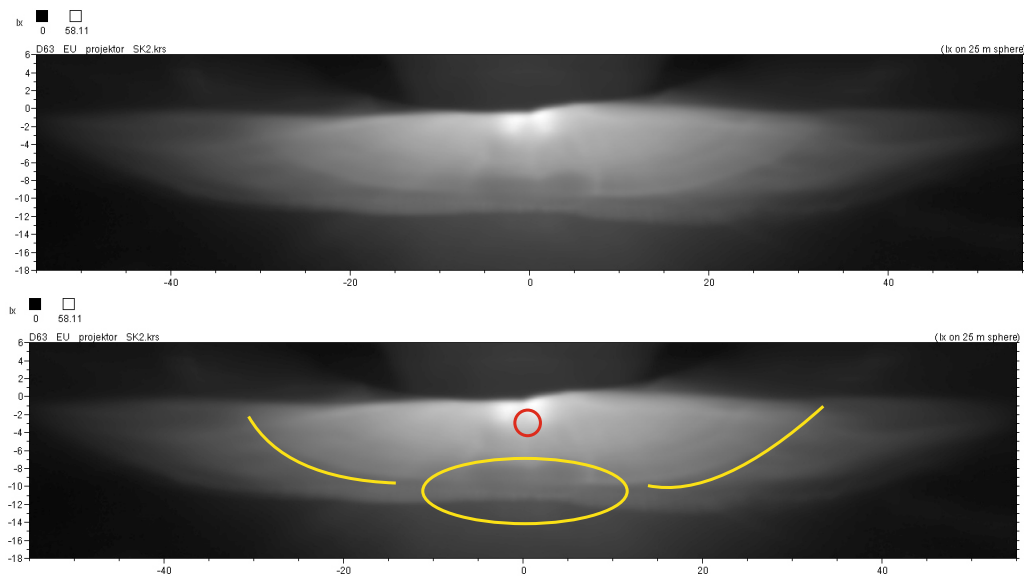
5.2 Proměření projektorů

V této části textu jsou na obrázcích znázorněny mapy osvětlení testovací stěny pomocí projektorů, které obsahují reflektory, které byly v předchozí části proměřovány.



Obrázek 38: Na horním obrázku je osvětlení vozovky projektorem, který obsahuje reflektor SK1. Na dolním obrázku je stejná situace jen s vyznačenými nehomogenitami.

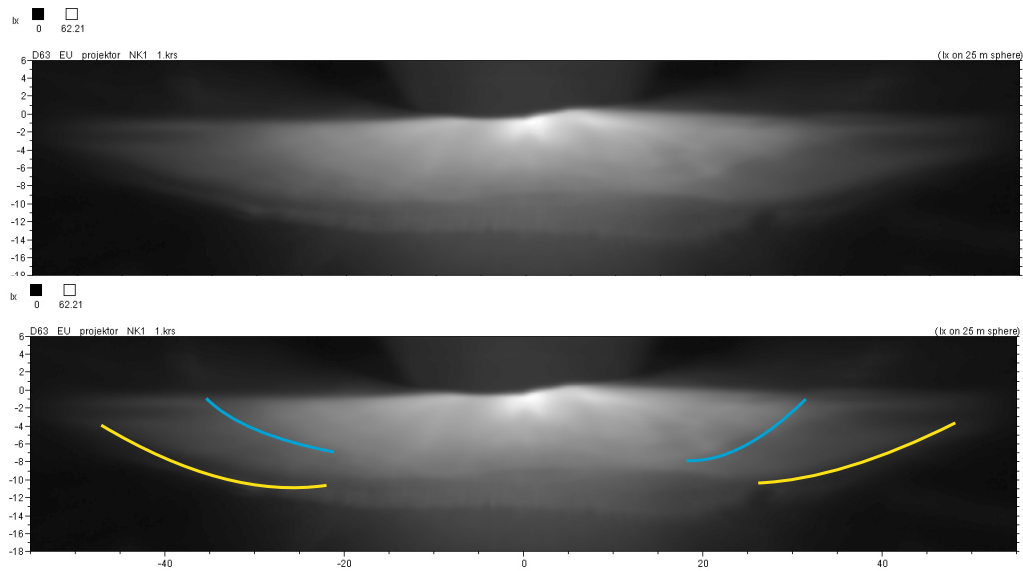
Horní Obrázek 38 zobrazuje osvětlení vozovky projektorem s hladkým reflektorem SK1. Patrné nehomogenity jsou vyznačeny žlutými elipsami na spodním obrázku. Za pozornost stojí ostré přechody mezi světlými a tmavými oblastmi vyznačenými žlutými křivkami a také nehomogenity vyznačena červenou křivkou v oblasti centrálního maxima.



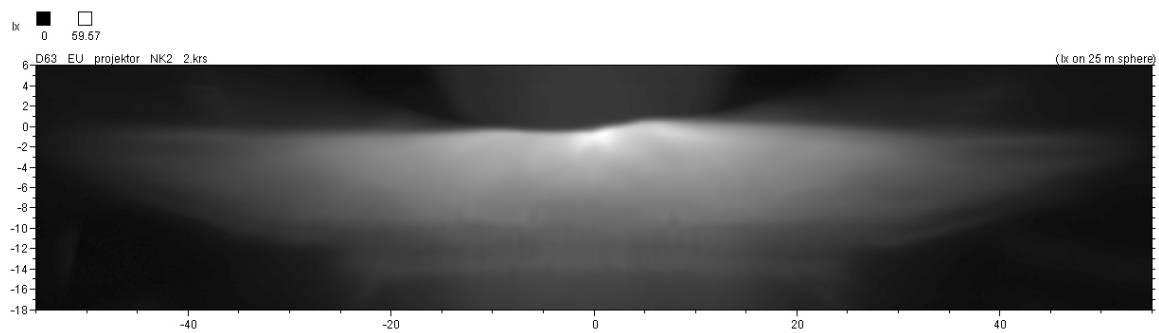
Obrázek 39: Na horním obrázku je osvětlení vozovky projektorem, který obsahuje reflektor SK2. Na dolním obrázku je stejná situace jen s vyznačenými nehomogenitami.

Horní Obrázek 39 zobrazuje osvětlení vozovky projektorem s hladkým reflektorem SK2. Žlutou elipsou na spodním obrázku je vyznačena nehomogenita, kterou můžeme považovat za nejvíce nežádoucí, protože se vyskytuje přesně před vozidlem. Dále jsou na obrázku vyznačené žlutými křivkami ostré přechody mezi světlými a tmavými oblastmi a červenou křivkou nehomogenity vyskytující se v oblasti centrálního maxima.

K patrnému zlepšení osvětlení oproti reflektorů SK1 a SK2 došlo použitím reflektor NK1 vyrobeného v lisovací formě s drsností povrchu 27 VDI, což je patrné na Obrázku 40. Zde jsou žlutými křivkami znázorněny výrazné přechody mezi světlou a tmavou oblastí a modrými křivkami zjemněné přechody oproti projektorům, které obsahují reflektory SK1 a SK2. Za pozornost stojí vymizení nehomogenity v oblasti centrálního maxima.



Obrázek 40: Na horním obrázku je osvětlení vozovky projektorem, který obsahuje reflektor NK1. Na dolním obrázku je stejná situace jen s vyznačenými nehomogenitami.



Obrázek 41: Osvětlení vozovky projektorem, který obsahuje reflektor NK2.

Posledním projektorem, který jsme měli k dispozici je projektor obsahující reflektor NK2 vyrobený v lisovací formě s drsností povrchu 24 VDI. V tomto případě je již vozovka

před vozidlem osvětlena téměř ideálně.

Z příložených Obrázků je také patrný zmiňovaný vliv vrstvy naneseného laku na povrch reflektoru. Jak již bylo řečeno na reflektor NK1 s drsností formy 27 *VDI* byla nanesena silná vrstva laku a proto se jeví jako hladší než reflektor NK2 s drsností formy 24 *VDI*. Proto i nehomogenity téměř vymizely u reflektoru NK2 a u reflektoru NK1 jsou stále patrné.

Z Obrázků 38, 39, 40 a 41 je možno vyvodit, že zdrsňení povrchu reflektorů vede ke zmírnění vlivu nehomogenit. Za nejvhodnější můžeme z daných vzorků považovat projektor s reflektorem NK2 vyrobeným v lisovací formě o drsnosti 24 *VDI*. Ke zjištění optimální drsnosti lisovací formy reflektoru nebo technologie lakování, která by vedla k dostatečnému zmírnění nehomogenit by bylo ovšem zapotřebí většího počtu vzorků s různými drsnostmi. V tomto případě bychom byli schopni porovnat více projektorů s různými reflektory a také ověřit, zda rozptyl od nich odpovídá normám, které určují osvětlení vozovky před automobilem.

5.3 Navrhovaná vylepšení měření a zpracování výsledků

Nejproblematictějším prvkem v popsané metodice je pravděpodobně skutečnost, že svazek použitého laseru není gaussovský. Stopa svazku mezi laserem a pasem tvoří mezikružší, která ovšem ve větší vzdálenosti začínají mizet, ale ani ve větších vzdálenostech nepozorujeme klasický gaussovský řez profilem svazku (viz Obrázek 18 a 19).

Simulace, které při zpracování naměřených rozptylových charakteristik využíváme, předpokládají, že se svazek chová gaussovsky. Proto navrhuji několik opatření, kterými bychom se mohli některým nekorektním krokům vyhnout.

Navrhovanými opatřeními jsou:

1. Zpracovat do simulací svazek, který není gaussovský. To znamená zanést do programu *Asap* buďto samotný naměřený profil svazku laseru nebo se za pomoci kombinace více gaussovských funkcí pokusit namodelovat vedlejší maxima vyskytující se v profilu svazku.

2. Provést prostorovou filtraci pomocí navazování do optického vlákna. Tímto způsobem bychom mohli například vybrat pouze střed svazku a po vyvázání z vlákna by se svazek choval gaussovsky, tak jak jsme zvyklí.
3. Nahradit simulace v programu Asap experimentálním měřením. To znamená proměřit odraz od hladké zakřivené plochy.

6 ZÁVĚR

V této diplomové práci je naznačena motivace práce, kterou je odstranění nehomogenit v osvětlení vozovky pomocí zdrsňení povrchu hladkých reflektorů. Dále je zde popsáno měření rozptylu od drsného povrchu různě drsných povrchů reflektorů (SK1, SK2, NK2, NK1) ve třech různých bodech (Point1, Point2, Point3), matematický aparát nutný ke zpracování výsledků měření.

Můžeme říci, že jsme pomocí našeho matematického aparátu zjistili rozptylovou charakteristiku, která po vložení do simulačního programu dává výsledky, které se dobře shodují s rozptylem naměřeným při odrazu od vybraných bodů na reflektoru. Také jsme ověřili předpokládaný fakt, že se zvyšující se drsností klesají nehomogenity osvětlení vozovky. Z dostupných reflektorů se NK2 zhotovený lisovací formou s drsností 24 *VDI* jeví jako nejvhodnější pro minimalizaci nehomogenit. Dále jsme navrhli případná vylepšení experimentální a výpočetní části metodiky.

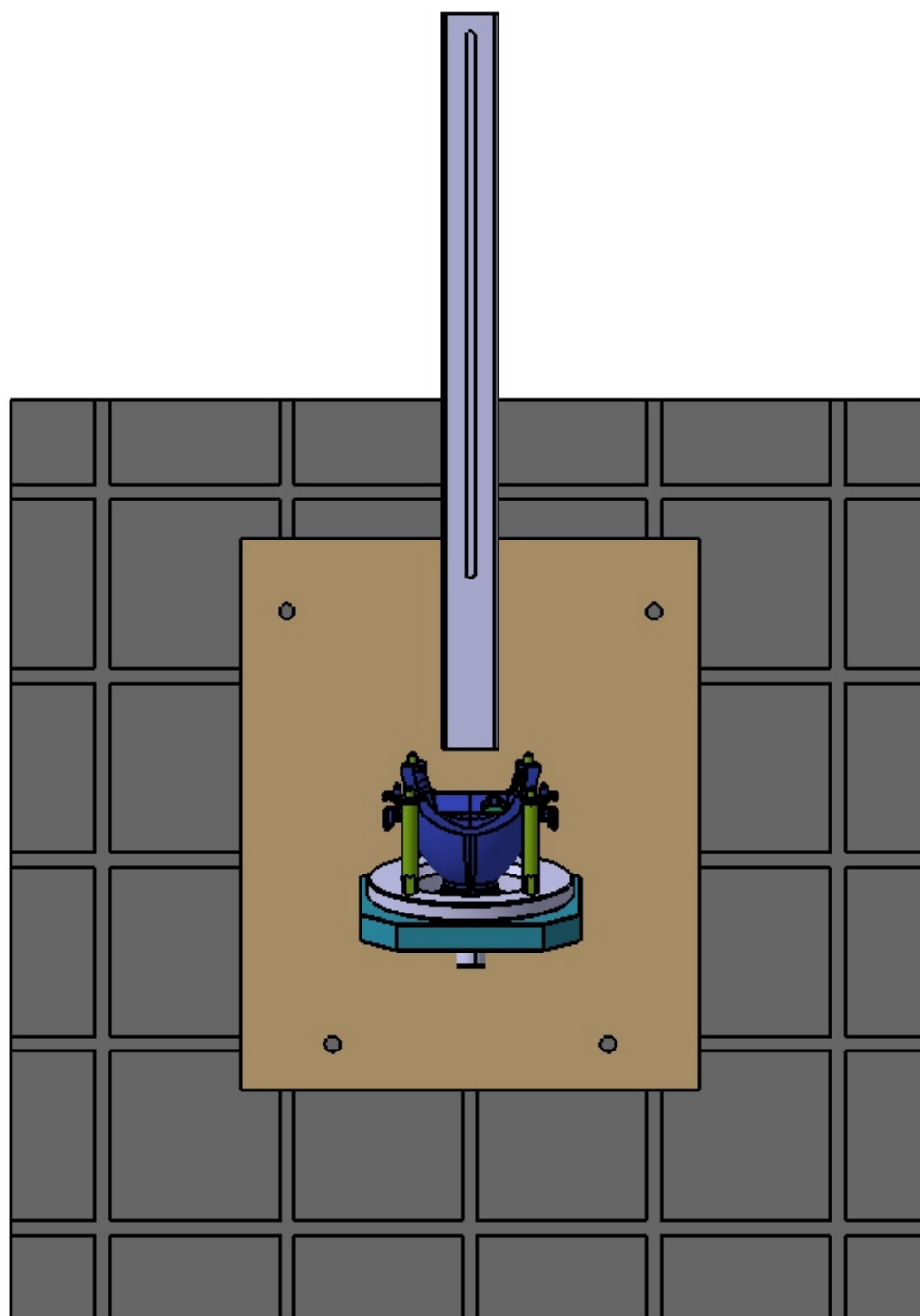
Reference

- [1] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, Fundamentals of photonics, Second edition (John Wiley and Sons, New Jersey 2007)
- [2] J. Bajer, Mechanika 2 (chlup.net, Olomouc 2008)
- [3] ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu (Čestký normalizační institut, Praha 1999)
- [4] J. Leinveber a P. Vávra, Strojnické tabulky (Albra - pedagogické nakladatelství, Úvaly 2005)
- [5] J. Kalenda, Elektroerozivní obrábění při výrobě tvarových dutin (Vysoké učení technické v Brně, 2009)
- [6] M. Kuchařík, Drátové elektroerozivní obrábění při výrobě přesných střížných nástrojů (Vysoké učení technické v Brně, 2008)
- [7] J. C. Stover, Optical scattering: measurement and analysis (The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Washington 1994)
- [8] Kjell J. Goasvik, Optical Metrology (John Wiley and sons, Chichester 2002)
- [9] <http://www.optronik.de/plm-g-sms10h.shtml>
- [10] J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics (The McGraw-Hill Companies, Inc., New York 1968)

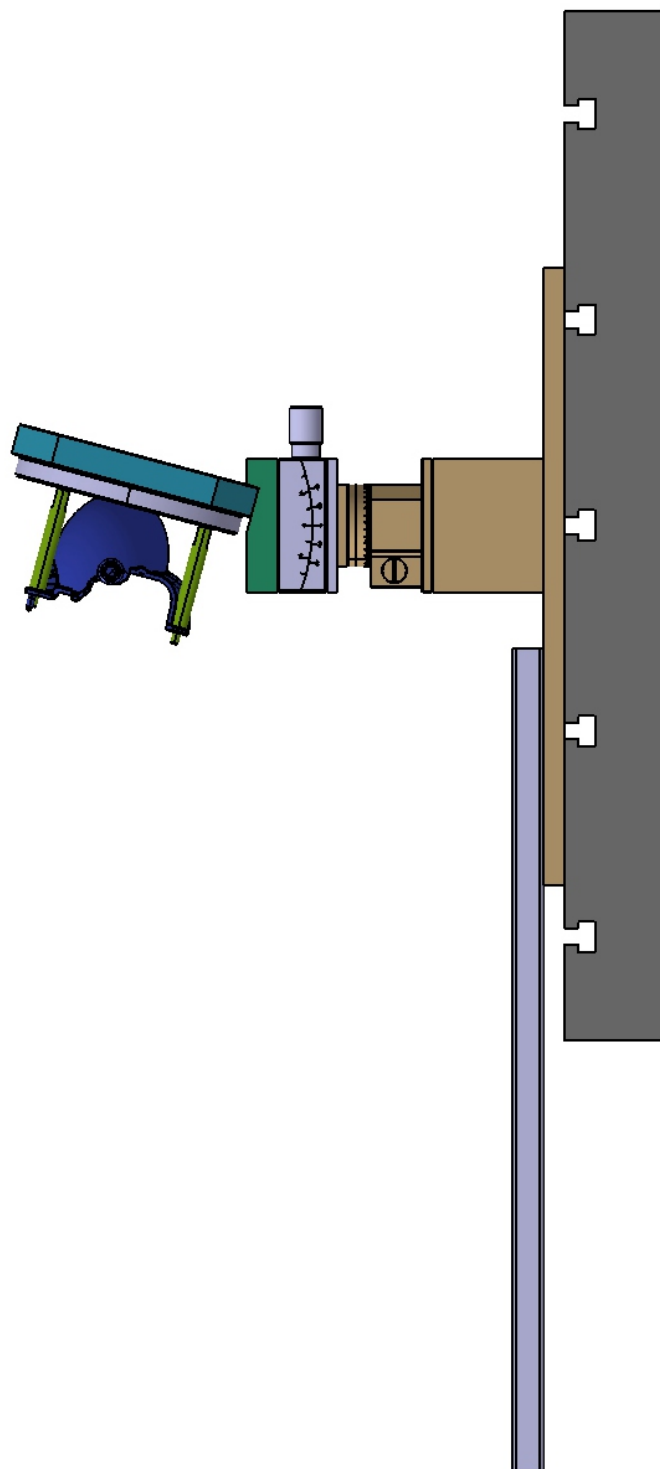
7 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1: Pohled shora na upevnění reflektoru.
- Příloha 2: Boční pohled na upevnění reflektoru.
- Příloha 3: Čelní pohled na upevnění reflektoru.
- Příloha 4: Boční pohled na upevnění laseru.
- Příloha 5: Čelní pohled na upevnění laseru.

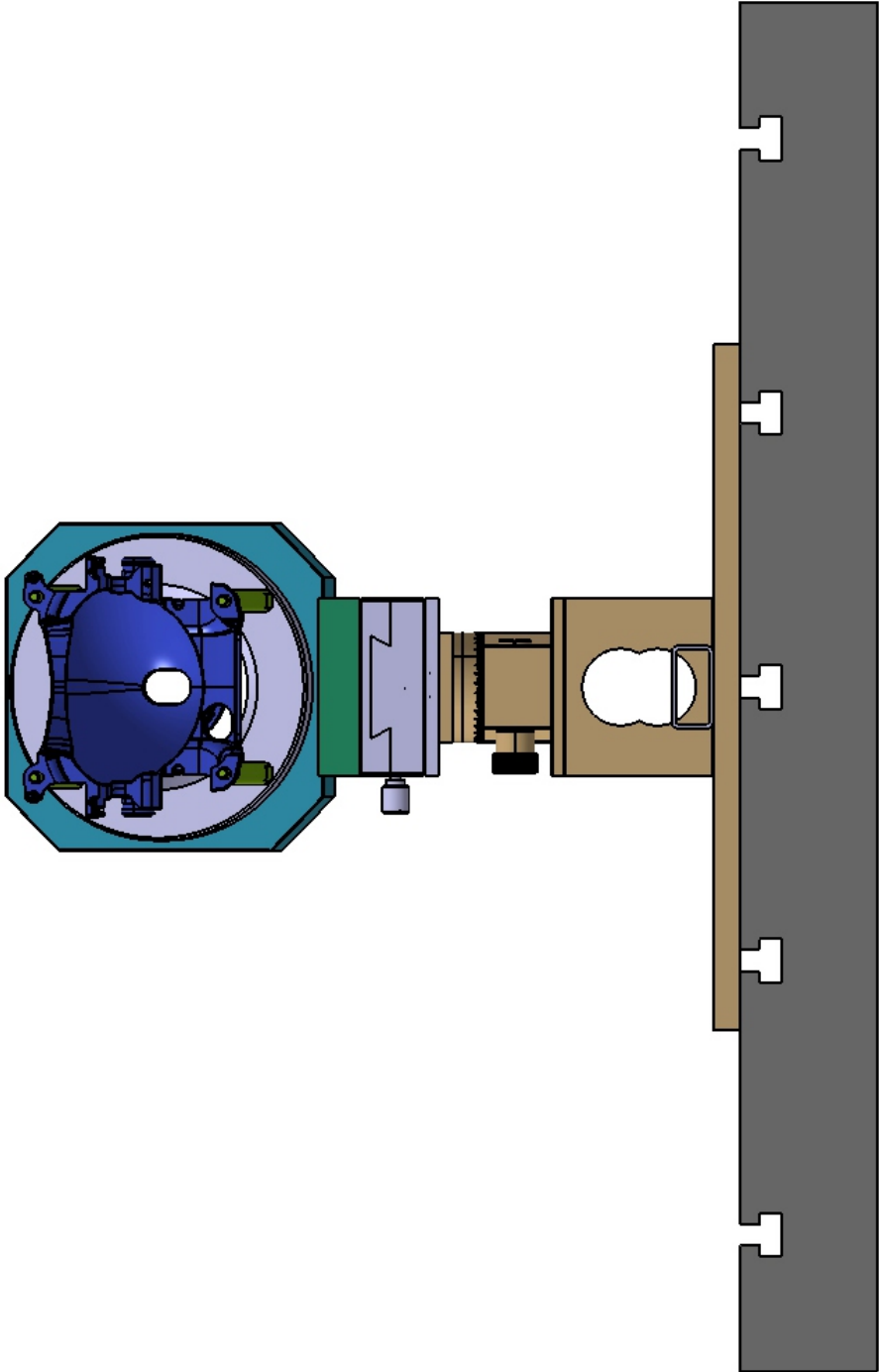
Příloha 1



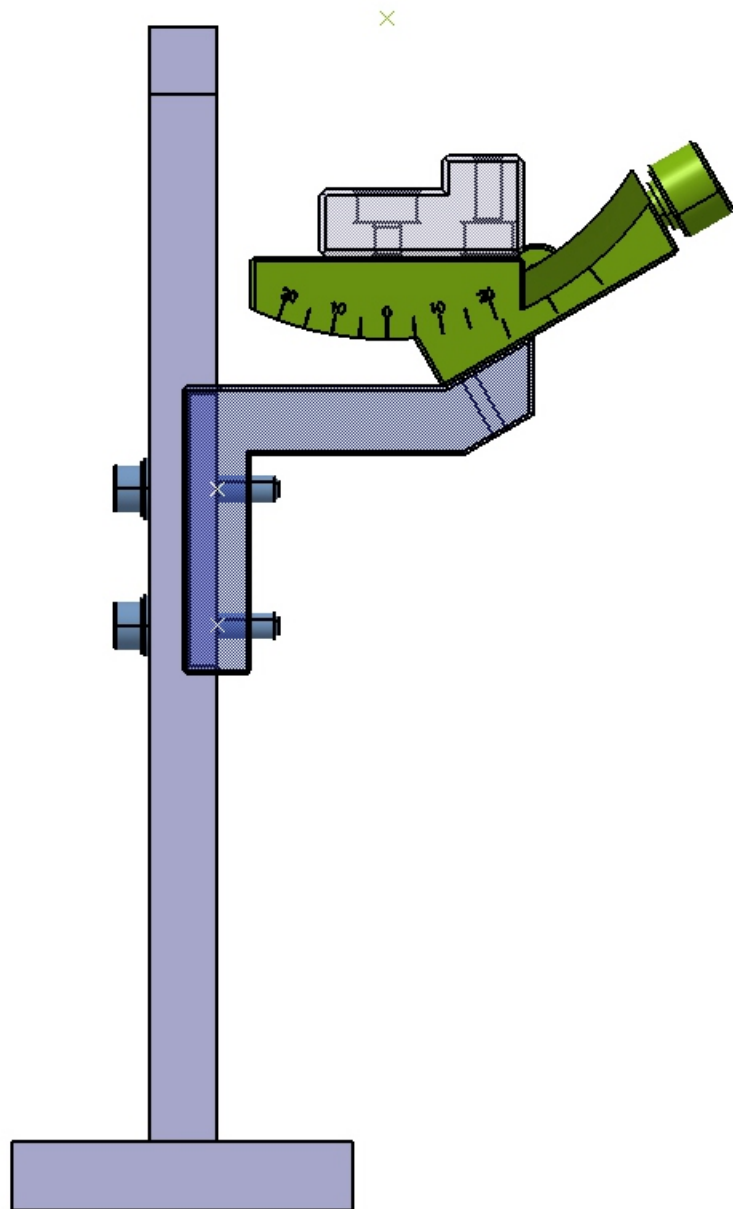
Příloha 2



Příloha 3



Příloha 4



Příloha 5

