

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY
PALACKÉHO OLOMOUC

Katedra optiky



**Měření úhlového rozptylu odraženého a
propuštěného světla**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypracoval

Vedoucí bakalářské práce

Studijní obor

Práce odevzdána dne

Jakub Vjaclovský

RNDr. Ing. Jan Podloucký

Optika a optoelektronika, 2. ročník

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce RNDr. Ing. Janu Podlouckému, za jeho ochotu a čas, který mi věnoval během vzniku této práce. Dále pak konzultantovi Mgr. Petru Ferbasovi ze společnosti VISTEON-AUTOPAL Nový Jičín, který mi velmi pomohl a poskytnul množství velmi cenných rad ohledně měření a softwarového zpracování naměřených hodnot.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci napsal samostatně s použitím uvedených zdrojů a souhlasím s jejím použitím pro potřeby katedry.

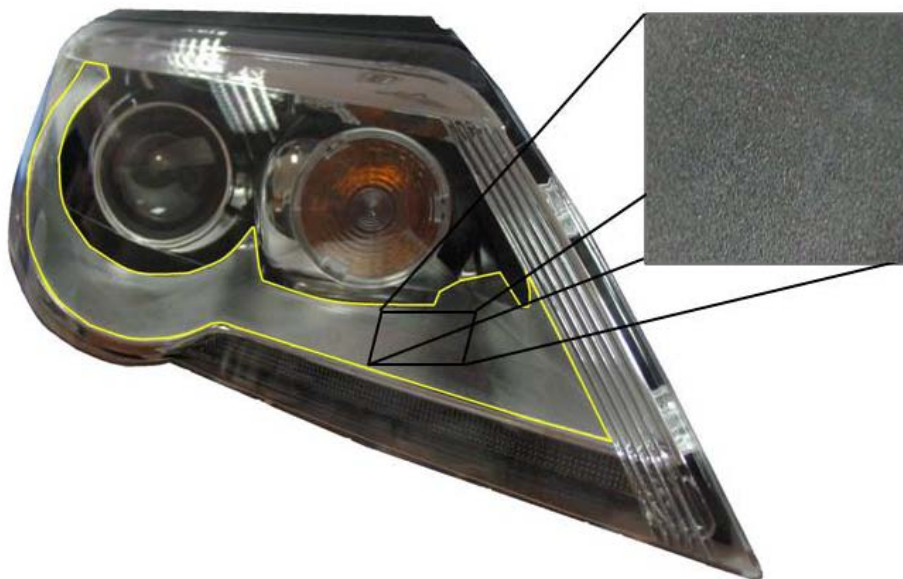
Obsah:

1. Úvod	5
2. Fotometrické veličiny-popis, měření	7
2.1. Fotometrie	7
2.1.1. Definice názvosloví	8
2.2. Fotometrická měření	9
3. Vlastnosti materiálů	11
3.1. Odrazivost	11
3.2. Propustnost	11
3.3. Absorpce	13
4. Rozptyl	15
4.1. Příčiny vzniku rozptylu	16
4.2. Obousměrná rozptylová distribuční funkce: BSDF	19
4.2.1. Vlastnosti BSDF	22
5. Měřené vzorky	23
6. Požadavky na měření úhlového rozptylu světla a prostředky firmy Visteon	26
6.1. Soupis požadavků na řešení úkolů měření úhlového rozptylu světla odraženého od vzorků a prošlého vzorky	26
6.2. Soupis prostředků, které jsou k dispozici a které byly použity na výrobu přípravku	27
7. Měřicí sestava	28
7.1. Návrh měřicího přípravku	29
8. Parametry goniofotometru OPTRONIK SMS 10h	36
9. Popis měření rozptylových charakteristik, zpracování výsledků, vytvoření rozptylových modelů v programu ASAP	39
9.1. Popis měření	39
9.2. Zpracovávání výsledků v programu ASAP	46
9.2.1. Úprava naměřených dat do programu ASAP	46
9.2.2. Harveyho model	48
9.2.3. Polynomiální model	50
9.2.4. BSDFDATA model	51
9.2.5. USERBSDF model	52

9.2.6. Příklad použitý na porovnávání modelů	53
10. Porovnání naměřených hodnot s daty firmy OPSIRA	58
10.1. Geometrie měření použití firmou OPSIRA	58
10.2. Měřené vzorky	59
10.3. Porovnávání naměřených dat	59
10.3.1. Srovnání naměřených dat pro odrazné vzorky	60
10.3.2. Srovnání naměřených dat pro propustné vzorky	62
10.4. Porovnání vytvořených rozptylových modelů	63
10.4.1. Rozptylové modely vytvořené z naměřených dat firmy OPSIRA	64
10.4.2. Srovnání rozptylových modelů vytvořených z našich dat s modely USERBSDF od firmy OPSIRA	69
11. Závěr	76
Literatura	79

1. Úvod, aneb důvody měření rozptylových charakteristik

Tato diplomová práce vznikla podle zadání firmy VISTEON-AUTOPAL Nový Jičín s.r.o., která patří k předním výrobcům osvětlovací techniky pro automobilový průmysl. Krycí skla moderních automobilových světlometů se vyrábějí z čirého plastu (polykarbonátu) a lze tak pozorovat vnitřní části světlometů (světelné zdroje, parabolické odražeče, čočky projektorů atd.). Vnitřní komponenty musí takový tvar, aby intenzita, směr a rozložení světelné stopy vyhověly mezinárodním předpisům pro osvětlení automobilů. Jelikož lze tyto vnitřní části vidět, klade se také důraz na jejich vzhled, neboť design automobilu je jedním z nejdůležitějších faktorů rozhodujícím o jejich prodeji. V současnosti se kromě hladkých používají také různě texturované povrchy, jejichž vzhled připomíná jinovatku, nebo zamlžení. Pro představu o vzhledu a umístění těchto materiálů je na Obrázku 1. zachycen světlomet, ve kterém se tyto povrchy uplatňují ve velké míře (žlutě ohraničené).



Odrazné povrchově upravené vzorky se používají při konstrukci masek uvnitř světlometů. Jejich funkcí je rozptýlení odraženého světla od krycího skla světlometu a tím omezení jeho následných nekontrolovatelných odrazů od lesklých vnitřních komponent, které by mohly vést k výrazným nežádoucím projevům v rozložení a intenzitě výstupní světelné stopy. Automobilové světlometry musí splňovat předpisy (v Evropské unii to jsou předpisy Evropské hospodářské komise), aby získaly homologaci k provozu na pozemních komunikacích. Je tedy nutné toto odražené světlo od krycího skla (polykarbonát $n=1,584$ má podle Fresnelova vztahu v kolmém dopadu odrazivost $\rho=0,051$) utlumit. V minulosti se

místo texturovaných povrchů používaly přesně geometricky definované tvary, na kterých se odražené světlo šíří různými směry v závislosti na místě dopadu a dochází tak k snížení jeho intenzity. Také na měřených vzorcích vyráběných elektroerozivním obráběním dochází odrazem k rozšíření odraženého svazku, ovšem jejich povrchová struktura je izotropní. Kromě odrazných texturovaných materiálů se používají také propustné, převážně ve svítelnových funkcích, které musí mít velmi širokou výstupní světelnou stopu (směrová, obrysová a brzdivá světla), neboť průchodem přes tento materiál dojde k rozšíření svazku. Abychom mohli do počítačových simulací vlastností světlometů zahrnout přesné chování světla po odrazu nebo průchodu od těchto materiálů, je třeba proměřit rozptyl světla v závislosti na dopadovém úhlu světelného svazku a úhlu detekce odraženého či propuštěného záření, neboť jeho chování se liší v závislosti na velikosti povrchové struktury tak také na použitém materiálu. Následně se z těchto naměřených hodnot mohou vytvořit rozptylové modely použitelné v optickém výpočetním programu. Právě tyto úkoly byly řešeny v rámci diplomové práce. Společnost VISTEON si v minulosti objednala u německé firmy OPSIRA proměření a vytvoření rozptylových modelů několika vzorků. Z důvodu možnosti vlastního měření, které má kromě časové výhody také velmi podstatnou výhodu finanční, bylo nutné navrhnout takový způsob měření, aby byl možný na přístrojovém vybavení používané ve společnosti VISTEON. Data a rozptylové modely firmy OPSIRA byly využity k porovnání s výsledky získanými z měření provedenými během zpracování diplomové práce.

2. Fotometrické veličiny-popis, měření

2.1. Fotometrie

Tato kapitola neobsahuje detailní výklad fotometrie. Podrobnější popis fotometrických a radiometrických veličin poskytuje Dodatek A. a fotometrickým měřením se věnuje Dodatek B. Tyto dodatky nejsou součástí této práce, ale nachází se na přiloženém CD disku.

Z historického pohledu se jedná o starší měřicí systém než radiometrie. Mohlo by se tedy zdát, že půjde o zastaralý způsob měření. Opak je pravdou, neboť ve všech situacích, ve kterých máme jako pozorovatele člověka, je fotometrie neocenitelná. Tyto situace jsou pro většinu lidí ty nejběžnější. Například se může jednat o fotografování nebo o filmování. Díky tomu, že procesy zpracovávání obrazového materiálu jsou konstruovány s ohledem na odezvu lidského oka, se nám výsledné snímky a filmy jeví přirozeně. Také v osvětlovací technice (světlomety v automobilech, svítidla) se pracuje s fotometrickými veličinami. Význam fotometrie si lze uvědomit, když se podíváme na základní jednotky SI (International System of Units). Jednou z těchto sedmi základních jednotek je **kandela**. Kromě kandely jsou to ještě: metr, kilogram, sekunda, ampér, kelvin, mol. Definice každé základní jednotky nezávisí na žádné jiné jednotce. Fotometrie je měření intenzitních veličin elektromagnetické záření, kde detektorem je lidské oko nebo přístroj napodobující spektrální citlivost normálního fotometrického pozorovatele. Podle deklarace je interval vlnových délek viditelných okem od 380nm do 780nm, tedy od fialové přes modrou, zelenou a žlutou k červené barvě. Oči každého člověka jsou rozdílné, a proto může někdo vidět i kratší nebo delší vlnové délky. Fotometrické veličiny mají svůj analog v radiometrii, například ozáření odpovídá osvětlení atd. Fotometrické a jim odpovídající radiometrické veličiny jsou uvedeny v Tabulce 1.

Fotometrické veličiny	Radiometrické veličiny
Světelný tok [lm]	Zářivý tok [W]
Svítivost [cd]	Zářivost [W/sr]
Jas [cd/m^2]	Záře [W/sr.m^2]
Osvětlení [lx]	Ozáření [W/m^2]
Intenzita světlení [lm/m^2]	Intenzita vyzařování [W/m^2]

Tabulka 1. Odpovídající si fotometrické a radiometrické veličiny se svými jednotkami.

2.1.1. Definice názvosloví

Prostorový úhel $d\Omega$, který vytkne na plášti koule o poloměru r plochu dA , se určí podle

vztahu:
$$d\Omega = \frac{dA}{r^2}.$$

Jednotkou prostorového úhlu je steradián.

Světelný tok vyjadřuje schopnost zářivého toku vyvolat zrakový vjem na sítnici oka normálního fotometrického pozorovatele. Používá se značení ϕ a jednotkou světelného toku je lumen [lm]. Pro polychromatické světlo s průběhem zářivého toku $\phi_e(\lambda)$ lze

světelný tok určit z výrazu:
$$\phi = K_m \int_0^\infty \phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda = 683 \int_0^\infty \phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda,$$

kde $K_m=683$ je maximální hodnota světelné účinnosti monochromatického záření $K(\lambda)$ a $V(\lambda)$ poměrná světelná účinnost monochromatického záření.

Svítivost I je vztažena k bodovému zdroji, který vysílá světelný tok $d\phi$ do prostorového úhlu $d\Omega$. Svítivost I_α v daném směru je definována vztahem:

$$I_\alpha = \frac{d\phi}{d\Omega}.$$

Jednotkou svítivosti je kandela [cd].

Jas L popisuje charakter zdroje světla s konečnými rozměry. Plošný element tohoto zdroje dA vyzářuje do prostorového úhlu 2π steradiánů (poloprostor) světelný tok $d\phi$. Světelný tok procházející prostorovým úhlem $d\Omega$ bude mít velikost $d^2\phi$. Jas plošného elementu dA svítícího do prostorového úhlu $d\Omega$, jehož osa svírá s normálou plochy zdroje úhel α , bude

určen rovnicí:
$$L_\alpha = \frac{d^2\phi}{d\Omega dA \cos \alpha}.$$

Pomocí svítivosti lze jas definovat:

$$L_\alpha = \frac{dI_\alpha}{dA \cos \alpha}.$$

Jednotkou jasu je cd/m^2 . Jas závisí na směru pozorování, ale v případě Lambertovských povrchů má jas konstantní velikost.

Intenzita světlení, neboli světlení M , je podíl světelného toku $d\phi$ vyzařovaný z elementární plochy zdroje dA a tohoto plošného elementu dA :

$$M = \frac{d\phi}{dA}.$$

Rozdílem oproti jasů je, že intenzita světlení udává světelný vycházející ze svítící plochy do celého poloprostoru (prostorový úhel 2π). Jednotkou intenzity světlení je lm/m^2 .

Osvětlení E plochy dA určíme jako podíl světelného toku $d\phi$ dopadajícího na plochu dA , a tohoto elementu dA :

$$E = \frac{d\phi}{dA}.$$

Používanou jednotkou osvětlení je lux [lx].

2.2. Fotometrická měření

Měření fotometrických veličin lze rozdělit podle druhu použitého detektoru:

- Subjektivní-vizuální, detektorem je lidské oko.
- Objektivní, použití fyzikálního čidla (polovodičové detektory).

V dnešní době se přesná fotometrická měření provádějí převážně polovodičovými detektory. Použitím filtrů se koriguje jejich spektrální citlivosti tak, aby se průběh shodoval s křivkou spektrální citlivosti normálního fotometrického pozorovatele obvykle pro fotopické vidění. Fotodetektory jsou významnou součástí objektivní fotometrie, neboť na jejich vlastnostech závisí fotometrická měření. Nejpoužívanějšími detektory jsou fotodiody, jejichž princip je založen na vnitřním fotoefektu. Často používaným materiálem bývá křemík, nebo také InGaAs. Využívá vlastnosti přechodu mezi nevlastními polovodiči p - n . O měření jednotlivých fotometrických veličinách důkladně pojednává Dodatek B. (umístěn v elektronické formě na příloženém CD)

Měření svítivosti:

Provádí se na fotometrické lavici substituční metodou, ve které nejdříve osvětlujeme detektor normálovým zdroje a poté měřeným zdrojem, abychom vyloučili možný vliv nelinearity detektoru v závislosti na dopadajícím osvětlení, tak změnou vzdálenost mezi detektorem a zdrojem nastavíme stejnou hodnotu osvětlení na detektoru jako v případě normálového zdroje.

Měření světelného toku:

Při měření světelného toku je důležité určit jeho celkovou velikost ve všech směrech. Při těchto měřeních se používá zařízení nazývané integrační koule. Jedná se kouli, jejíž vnitřní část je natřena bílým rozptýlným materiálem s hodnotou odrazivosti okolo 0,8. Ve středu integrátoru se nachází měřený zdroj a v plášti koule okénko na fotodetektor. Aby světlo nedopadalo přímo ze zdroje na detektor, ale pouze po odrazu od vnitřního povrchu, jsou uvnitř integrátoru umístěny clony. Měření se opět provádí substituční metodou

Měření osvětlení

Toto měření je nejčastějším fotometrickým měřením. Zařízení používané při měření osvětlení jsou luxmetry. Jedná se o objektivní přístroje složené z detekční části, která je tvořena korigovaným fotodetektorem opatřeným kosinovým nástavcem, a z vyhodnocovacího systému, který je opatřen ukazatelem naměřených hodnot.

Měření jasu

Měřicí přístroje se nazývají jasoměry, jimiž zjišťujeme střední hodnotu jasu plochy, kterou nám vymezuje zorné pole přístroje na povrchu zkoumaného objektu. Je tedy nezbytné, aby zorné pole jasoměru obsahovalo pouze povrch tělesa, jehož jas nás zkoumáme. Zorné pole se u jasoměrů obvykle pozoruje v okuláru, v němž je oblast měření vyznačena.

3. Vlastnosti materiálů

Optické parametry materiálů jsou velmi důležité při návrhu osvětlovacích zařízení. Mezi tyto optické systémy lze zařadit automobilové světlomety. Pro jejich konstrukci je důležitá znalost odrazivosti reflexních materiálů používaných ve vnitřních částech světlometů, dále také propustnost a absorpce krycích skel a filtrů.

Pokud nám dopadne světelný tok na rozhraní dvou prostředí, můžeme uvažovat případ, vzduch-sklo, nastanou tři jevy: odraz, absorpce a průchod. Těmto jevům odpovídají veličiny: odrazivost, absorpce a propustnost. Část dopadající světelného toku ϕ_p je odražena, část pohlcena ϕ_a a poslední část projde materiálem ϕ_τ . Platí zákon zachování energie:

$$\phi = \phi_p + \phi_a + \phi_\tau. \quad (1)$$

3.1. Odrazivost

Odrazivost ρ lze interpretovat jako poměr odraženého světelného toku k dopadajícímu světelnému toku:

$$\rho = \frac{\phi_p}{\phi} \quad (2)$$

Hodnotu odrazivosti rozhraní dvou neabsorbujících prostředí o známých indexech lomu n_0 a n' (n_0 je index lomu před rozhraním a n' index lomu materiálu) lze pro kolmý dopad určit

z Fresnelova vztahu:

$$\rho = \left| \frac{n' - n_0}{n' + n_0} \right|^2. \quad (3)$$

Například rozhraní polykarbonátu ($n'=1,586$) a vzduchu ($n_0=1$) bude mít odrazivost $\rho=0,051$.

3.2 Propustnost

Analogicky se zavádí propustnost τ , která je určena poměrem prošlým světelným tokem

k dopadajícímu:

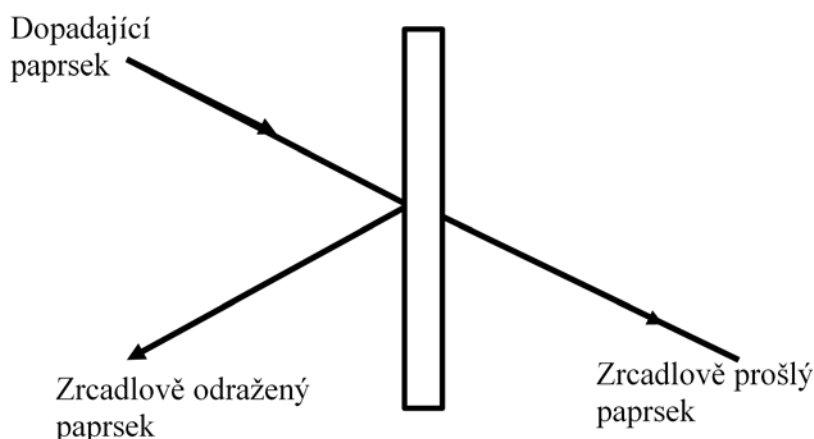
$$\tau = \frac{\phi_\tau}{\phi}. \quad (4)$$

Fresnelův vztah pro propustnost má tvar:

$$\tau = \frac{4n_0n'}{(n'+n_0)^2}. \quad (5)$$

Propustnost rozhraní polykarbonátu a vzduchu bude mít hodnotu $\tau=0,949$, destička z tohoto materiálu (2 rozhraní) má propustnost $\tau=0,903$. Fresnelovy vztahy jsou odvozeny například v [1].

Při dopadu světelného toku na dokonale hladký, odrazný povrch (ideální zrcadlo) dochází pouze k odrazu tohoto světelného toku se stejnou velikostí, jakou měl dopadající světelný tok ve směru určeném zákonem odrazu (úhel dopadu=úhlu odrazu). Pokud toto rozhraní není odrazné, ale je dokonale propustné (nulová absorpce), bude mít světelný tok prošlý tímto prostředím nejen stejnou velikost jako dopadající, ale také stejný směr (přímý prostup). Tyto dva případy zobrazuje Obrázek 1.



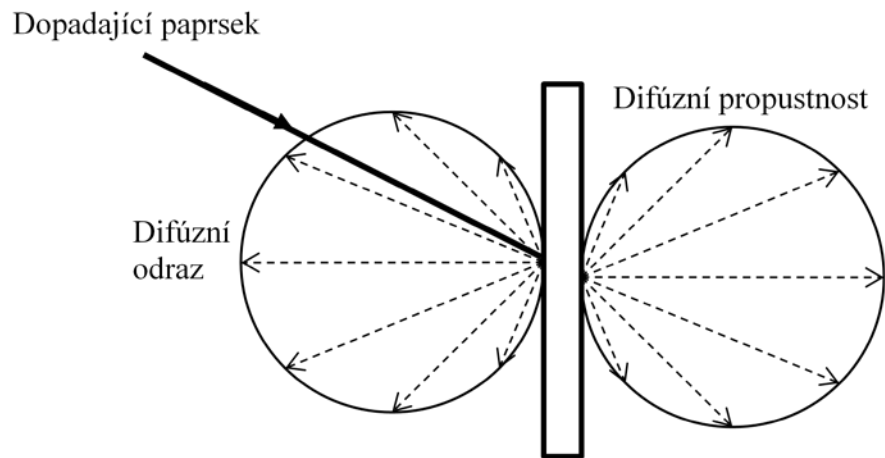
Obrázek 1. Ideálně odrazné a propustné prostředí.

Toto byl příklad dvou ideálních prostředí, která nezpůsobovala při dopadu ani průchodu žádný rozptyl. Nyní se podíváme na jiný případ, na prostředí, ve kterých dochází při odrazu nebo průchodu k difúznímu rozptylu. Za prvé budeme uvažovat odrazný dokonale difúzní materiál (Lambertovský rozptylovač) s odrazivostí $\rho=1$, na kterém se po odrazu světelný paprsek rozdělí do celého poloprostoru. Dojde k rovnoměrně rozptylnému odrazu. Velikost jasu L odraženého záření od difúzního povrchu nezávisí na směru, ovšem její svítivost bude maximální v kolmém směru na povrch, v jiných směrech se určí z Lambertova zákona. Podobně jako pro odrazný povrch lze získat rovnoměrný rozptyl průchodem záření dokonale rozptylujícím průsvitným prostředím. Odraz a průchod přes difúzní povrch jsou naznačeny na Obrázku 2. Oba tyto materiály se nazývají Lambertový zářič a rozptylovač. Prostorový úhel, do kterého rozptylují je $\Omega = 2\pi$, osvětlení E Lambertovského zářiče se vypočítá takto:

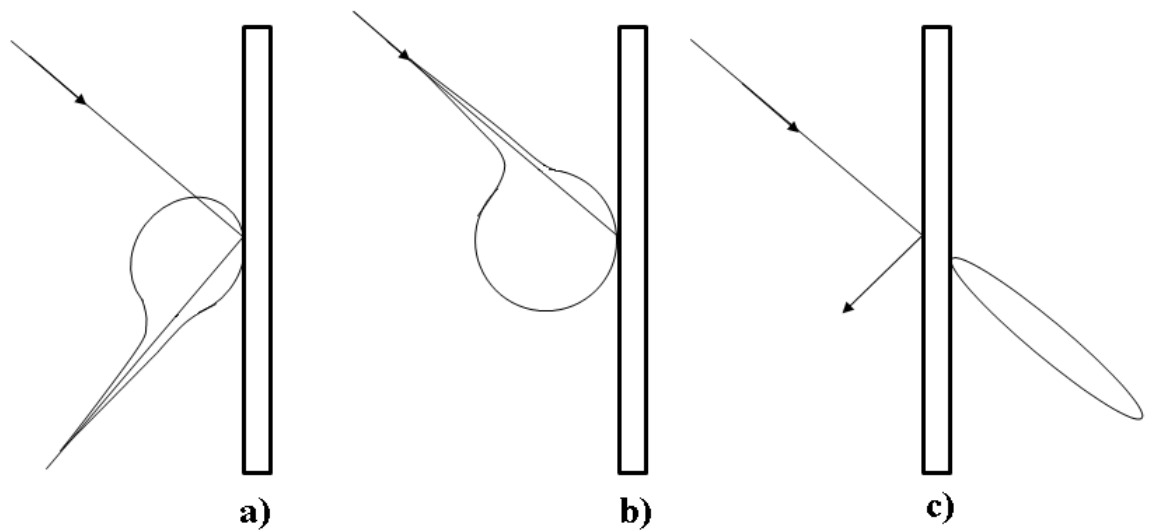
$$E = \frac{\pi L}{\rho}. \quad (6)$$

V reálných situacích se ovšem s výše vyjmenovanými povrchy neseťkáme. Reálná zrcadla vždy světlo rozptylují a naopak reálné Lambertovské rozptylovače mívají větší hodnotu odraženého nebo propuštěného světelného toku ve směru zrcadlového odrazu nebo přímého prostupu. Většinou se setkáváme se smíšeným odrazem nebo průchodem.

Smíšený odraz je určen součtem příspěvku od zrcadlového odrazu a od difúzního odrazu. Smíšený prostup dostaneme obdobně jako smíšený odraz. Tyto případy zobrazuje Obrázek 3.



Obrázek 2. Ideální difúzní materiál.



Obrázek 3. Rozptyl na reálných rozhraních: a) převažující odraz ve směru zrcadlového paprsku (reálné zrcadlo), b) výrazný zpětný odraz (ve směru dopadajícího paprsku), c) propustnost reálného materiálu

3.3 Absorpce

Nakonec nám zůstala absorpce α , kterou dostaneme jako podíl světelného toku pohlceného v materiálu k dopadajícímu:

$$\alpha = \frac{\phi_a}{\phi}. \quad (7)$$

Pro součet odrazivost, propustnosti a absorpce platí obdobně podle vztahu (1):

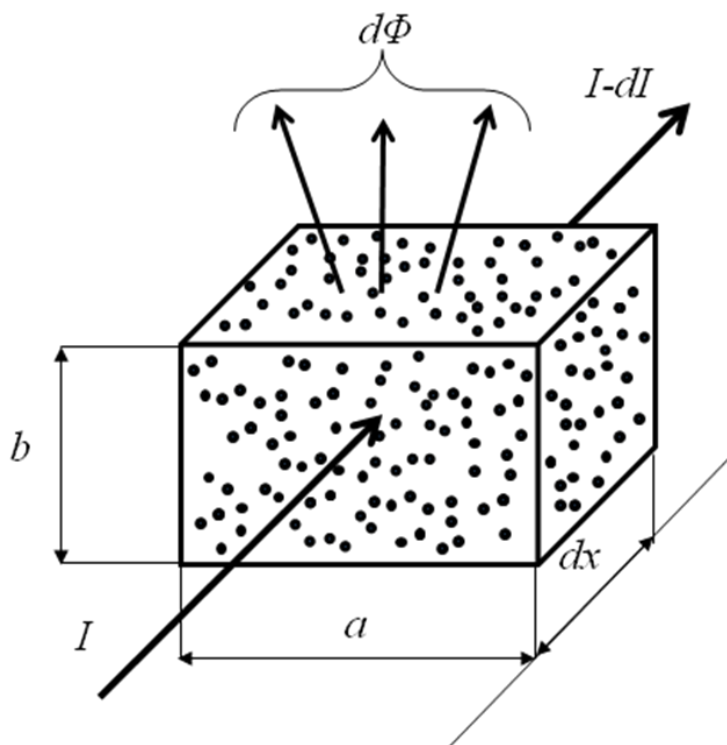
$$\rho + \tau + \alpha = 1. \quad (8)$$

V případě, že zkoumaný materiál bude neprůsvitný tak propustnost $\tau=0$, vzorec (8) se zjednoduší na tvar: $\rho + \alpha = 1$. (9)

Další ideální možností je látka pohlcující veškeré záření dopadající na její povrch (černé těleso), zde se rovnice (8) přepíše pouze na vyjádření absorpce: $\alpha = 1$. Problematika reflexe, transmise a absorpce je zpracována v [2],

4. Rozptyl světla

S rozptylem se setkáváme prakticky každý den, neboť většina světla, které pozorujeme je rozptýlená. Nejznámější příklad rozptylu lze za jasného dne nalézt na obloze. Rozptyl na molekulách vzduchu má za následek její modrou barvu. Také barva mraků je dána rozptylem. V tomto případě však dochází k rozptylu světla na daleko větších částicích (částičky vody, ledu, nečistoty-prach), než jsou molekuly vzduchu. Dalším známým příkladem, který souvisí také s atmosférou, je západ slunce. Rozptyl souvisí s vlastnostmi materiálů, kterými se světlo šíří, a jedná se o složitý fyzikální jev, který v sobě zahrnuje lom, odraz, absorpci a ohyb světla na rozptylujících částicích, či odrazných plochách. Rozptyl světla lze popsat na soustavě náhodně rozmístěných částic v určitém prostoru, jak je zobrazeno na Obrázku 4.



Obrázek 4. Rozptylující prostředí obsahující náhodně rozmístěné částice.

Do tohoto objemu dopadá rovinná monochromatická vlna o intenzitě I a tedy zářivý tok bude dán součinem intenzity I a plochy, na níž dopadá $S = ab$:

$$\phi = Iab. \quad (10)$$

Průchodem prostředí se část zářivého toku $d\phi$ rozptýlí do všech směrů na částicích prostředí. Z prostředí bude vystupovat zářivý tok menší o tuto hodnotu:

$$d\phi = dIab. \quad (11)$$

Rozptýlenou část zářivého toku, lze vyjádřit jako součin intenzity I , objemu prostředí $dV = a b dx$ a β což je objemový součinitel úplného rozptylu:

$$d\phi = -\beta I dV . \quad (12)$$

Sloučením rovnic (10), (11) a (12) dostáváme vyjádření:

$$\frac{d\phi}{\phi} = \frac{dI}{I} = -\beta dx . \quad (13)$$

Integrací této rovnice dostáváme Bouguerův exponenciální zákon:

$$I = I_0 e^{-\beta x} . \quad (14)$$

Kde I_0 je vstupující intenzita do rozptylujícího prostředí. Úpravou tohoto zákona dostaneme vyjádření propustnosti:

$$\tau = \frac{I}{I_0} = e^{-\beta x} . \quad (15)$$

Toto odvození lze nalézt například v [3].

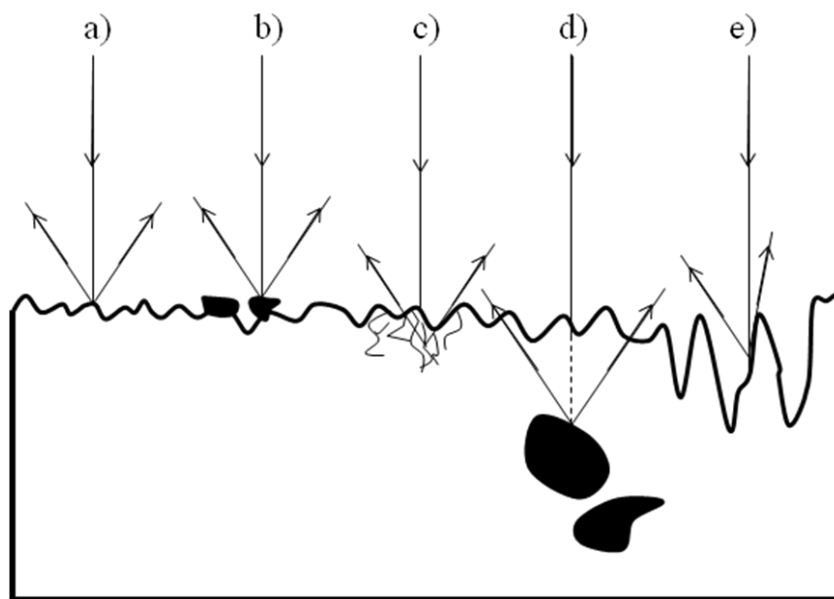
4.1. Příčiny vzniku rozptylu

Vznik rozptylu na matných nebo odrazných materiálech je způsoben odrazem od povrchu těchto látek. V případě propustných nebo částečně propustných vzniká rozptyl jak na povrchu tak také při průchodu objemem materiálu. Nyní si tyto jevy podrobněji popíšeme:

Vady povrchu-na dokonale hladkém, odrazném povrchu (ideální zrcadlo) nedochází k rozptylu odraženého světla, ale pouze k jeho odrazu ve směru určeném zákonem odrazu (úhel dopadu=úhlu odrazu). Naopak odrazem na ideálním difúzním odrazném povrchu (Lambertovský rozptylovač) s hodnotou odrazivosti $\rho=1$, vzniká difúzní rozptyl. Velikost jasu odraženého záření od difúzního povrchu nezávisí na směru. Tyto dva případy zobrazuje Obrázek 1. Ideální zrcadlový a dokonalý difúzní odraz jsou případy, kterých v reálném světě nedosahujeme. Obdobně při průchodu záření dokonale hladkým a propustným rozhraním nedojde k rozptylu ani odrazu. V případě světla prošlého ideálně difúzním, propustným povrchem dojde ke vzniku difúzního rozptylu. Jeho vlastnosti jsou stejné jako v případě difúzního rozptylu vzniklého odrazem. Reálné povrchy nejsou dokonale hladké a vždy vykazují určité vady, jako povrchové znečištění (prachové částičky), nerovnosti vzniklé při obrábění. Mezi tyto vlivy patří tvar obráběcího nástroje, částecek brusiva a odděleného materiálu, jenž se nachází mezi nástrojem a obrobkem, dalším vlivem jsou vibrace obráběcího nástroje atd. Vlastnosti

rozptýleného záření také závisejí na velikosti nerovností povrchu. Právě na těchto nedokonalostech povrchu vzniká rozptyl, znázorněno na Obrázku 4. Velký vliv na rozptyl má znečištění povrchu. Určitými měřicími technikami lze oddělit rozptyl způsobený znečištěním od povrchového rozptylu. [4]

- **Vady materiálu**-u propustných materiálů, pokud je tento materiál dokonale propustný, nevzniká při průchodu světla rozptyl. Vyskytují-li se v látce vady, nastane rozptyl. Nehomogenity materiálu mohou být způsobeny opracováním povrchu, nyní neuvažujeme jeho vliv na tvar povrchu. Tento proces také ovlivňuje podpovrchovou vrstvu, dochází při něm ke vzniku mikroskopických prasklin, které ovlivní procházející světlo. V látce se také mohou nacházet různé nečistoty, dutiny, nebo bubliny. Tito původci rozptylu způsobují obdobný rozptyl jako povrchové znečištění. Nevýhodou podpovrchového znečištění je nemožnost jeho odstranění čištěním. Tyto možnosti znázorňuje Obrázek 5.



Obrázek 5. Příčiny vzniku rozptylu: a) na povrchu s nerovnostmi $\ll \lambda$,
b) odrazem od znečištění na povrchu, c) na podpovrchových vadách-praskliny,
c) na poruchách v objemu-příměsi, dutiny, d) na povrchu s nerovnostmi $\gg \lambda$.

Z předchozích bodů je patrné, že vlastnosti rozptylu jsou úzce spjaté s vlastnostmi povrchu a materiálu. Měření rozptylu se využívá ke zjištění topografie povrchu. V případě odrazných vzorků je určení topografie daleko jednodušší než u propustných, u nichž rozptyl závisí na průchodu dvěma povrchy a také na vadách materiálu. Vztah mezi vlastnostmi rozptylu a statistikou povrchu poskytuje Rayleigh-Rice teorie. O této problematice se velmi detailně pojednává v [4], nebo v [5]. Měření mikronerovností

(nerovnosti na relativně hladkém povrchu) se nejvíce používá v polovodičovém průmyslu. U proměřovaných vzorků dochází v případě odrazných k rozptylu způsobeném nerovnostmi na povrchu, které vznikají elektroerozivním obráběním. Tento povrch je složen s velkého množství různě orientovaných plošek, jejichž orientace je nahodilá. Odražené záření od jednotlivých elementů se šíří různými směry a dochází k rozšíření odraženého svazku. [4]

Rozptyl lze podle změny frekvence rozptýleného záření rozdělit:

- Pružný-frekvence rozptýleného světla se nemění
- Nepružný-frekvence rozptýleného záření se změní

První pozorování rozptylu světla na malých částicích bylo zaznamenáno Tyndallem, jenž pozoroval rozptyl v zakaleném prostředí (tabákový kouř) a zjistil, že velikost rozptylu způsobená částicemi s malými rozměry ve srovnání s vlnovou délkou je závislá na vlnové délce světla (světlo s krátkou vlnovou délkou se rozptyluje více než světlo s delší λ). Na malých částicích se světlo jednak ohýbá, ale také rozptyluje, čímž se jeho stopa stává viditelnou (Tyndallův jev) První teoretickou práci popisující rozptyl světla napsal Lord Rayleigh roku 1871. Uvažoval částice, které jsou od sebe velmi dobře oddělené a jejíž velikost je menší než vlnová délka světla $a < 0,1\lambda$. Ve své práci stanovil velikost intenzity rozptýleného světla na těchto malých molekulách:

$$I = \frac{1}{\lambda^4}. \quad (16)$$

Množství rozptýleného světla roste nepřímo úměrně se čtvrtou mocninou vlnové délky. Tento vztah vysvětluje modré nebe a červenou barvu západu slunce, neboť při dopadu bílého světla na malé částičky se rozptýlené světlo jeví jako modravé, naproti tomu prošlé světlo je načervenalé. Rozptylujícími částicemi v atmosféře způsobující Rayleighův rozptyl jsou molekuly plynů. Dalšími vlastnostmi Rayleighova rozptylu jsou:

- Množství rozptýleného světla ve směru a proti směru šíření je stejné.
- Rozptýlené světlo kolmo ke směru šíření je prakticky lineárně polarizované.

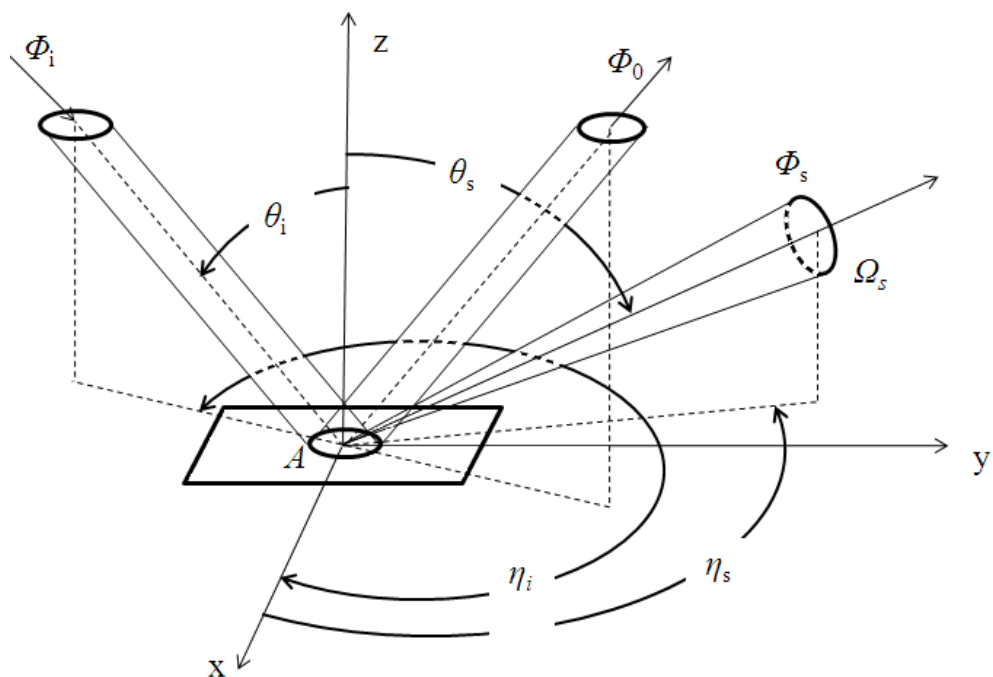
V roce 1908 zveřejnil Gustav Mie matematické řešení difrakce rovinné monochromatické vlny na homogenní kouli v homogenním prostředí. Jako Mieův rozptyl se označuje rozptyl na částicích, větších než je vlnová délka světla. Tento rozptyl má složitější závislost na

vlnové délce než Rayleighův. Barva rozptýleného záření není modrá, ale převažuje zelená a červená a to pouze v určitých úhlech a za předpokladu, že velikost všech částic je stejná. Pokud tomu tak není, má rozptýlené záření bílou barvu. Mieův rozptyl vzniká v atmosféře na kapkách vody a krystalech ledu a vysvětluje barvu mraků. Jejich různé zbarvení je důsledkem rozdílných velikostí a typů rozptylujících částic (voda, led, prachové částice-sopečný prach, průmyslové nečistoty atd.). Mimo tyto dva nejznámější typy rozptylu se v oblasti nelineární optiky vyskytuje Ramanův a Brillouinův rozptyl. Zatímco Ramanův rozptyl vzniká na vibračních a rotačních stavech látky tak původem Brillouinova jsou mechanicko-akustické vibrace.

4.2. Obousměrná rozptylová distribuční funkce: BSDF (Bidirectional Scattering Distribution Function)

Již jsme se seznámili s mechanismy vzniku rozptylu a víme, že rozložení rozptýleného světla závisí na dopadovém úhlu, vlnové délce, stejně jako na parametrech vzorku (propustnost, odrazivost, vlastnosti povrchu, homogenita látky, index lomu, znečištění atd.) K popisu rozptylu se používá obousměrná rozptylová distribuční funkce. Jedná se o nejčastější formu popisu rozptylových vlastností. Byla zavedena F. E. Nicodemem. Pro zjednodušení je použito několik aproximací. Uvažujeme, že na povrch dopadá kolimovaný svazek se stálým příčným průřezem a všude rozptyl vzniká na povrchu, nikoliv v materiálu. BSDF se definuje v radiometrických veličinách a obvykle se rozptýlené světlo dělí na dvě části, na odraženou a propuštěnou, jenž se poté řeší odděleně. Označení BRDF (Bidirectional Reflection Distribution Function) značí obousměrnou distribuční funkci pro popis rozptylu způsobeného odrazem, analogicky BTDF (Bidirectional Transmission Distribution Function) pro propustné povrchy. Nejobecnější funkcí je BSSRDF (Bidirectional Surface Scattering Reflectance Distribution Function), která se používá v případě, že zjišťujeme rozptyl materiálů s podpovrchovým rozptylem. To znamená, že místo dopadu paprsku se neshoduje s místem rozptylu (podpovrchové vady). Příkladem takového materiálu je například mramor.

Obrázek 6. zobrazuje geometrii používanou pro definici parametrů BSDF funkce, abychom byli zcela přesní tak pro BRDF funkci, neboť hemisféra odpovídající dopadajícímu paprsku se shoduje s hemisférou rozptýleného svazku. U BTDF funkce je hemisféra rozptýleného paprsku opačná než hemisféra odpovídající dopadajícímu paprsku. Pro jednoznačnější výklad se nyní omezíme na BRDF funkci.



Obrázek 6. Geometrie definující BRDF funkci.

Podle použitého označení na Obrázku 6 je Φ_i zářivý (světelný) tok dopadajícího záření na měřený povrch, Φ_s udává zářivý tok rozptýleného záření odrazem od povrchu a Φ_0 je zářivý tok odraženého záření ve směru daného zákonem odrazu (zrcadlový odraz).

- Proměnné:
- θ_i - polární úhel dopadajícího záření (měřený od kolmice na povrch).
 - η_i -azimutální úhel dopadajícího záření.
 - θ_s - polární úhel rozptýleného záření.
 - η_s -azimutální úhel rozptýleného záření.

O BRDF funkci lze nejobecněji říci, že se jedná o úhlově závislou odrazivost, neboli o funkci úhlu dopadu a rozptylu. BRDF funkci můžeme v radiometrických (fotometrických) veličinách definovat jako zář (jas) povrchu $L(\theta_i, \eta_i, \theta_s, \eta_s)$ dělenou dopadajícím ozářením (osvětlením) E :

$$\text{BRDF}(\theta_i, \eta_i, \theta_s, \eta_s) = \frac{L(\theta_i, \eta_i, \theta_s, \eta_s)}{E}. \quad (17)$$

Jedná se o čtyř-rozměrnou funkci, dvě proměnné (θ_i, η_i) určují směr dopadajícího záření a dvě odchozí (θ_s, η_s) definují směr rozptýleného světla. Pokud bude zkoumaný povrch izotropní, bude BRDF funkce závislá pouze na třech proměnných $\theta_i, \eta_i, \theta_s$, neboť odrazivost povrchu je symetrická vzhledem k rovině dopadu a kolmici na povrch, nemění se v případě, když se povrch otáčí kolem své normály. [6]

Dosadíme-li do rovnice (17) známé vztahy definující záři a ozáření můžeme BSDF funkci

napsat ve tvaru:

$$\text{BRDF}(\theta_i, \eta_i, \theta_s) = \frac{L(\theta_s)}{E_i} = \frac{\frac{d^2\phi_s(\theta_s)}{d\Omega_s dA \cos\theta_s}}{\frac{d\phi_i(\theta_i, \eta_i)}{dA \cos\theta_s}}. \quad (18)$$

Tento výraz dále upravíme a dosadíme $d\Omega_s = \Omega_s \cos\theta_s$, pak lze psát:

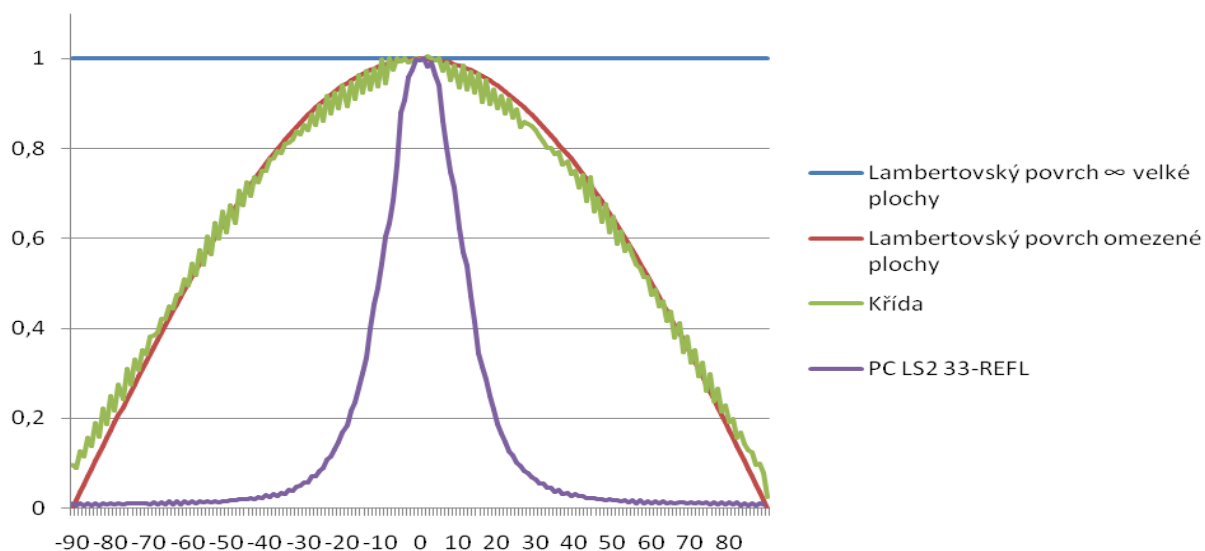
$$\text{BRDF}(\theta_i, \eta_i, \theta_s) = \frac{\frac{\phi_s(\theta_s)}{\Omega_s}}{\phi_i(\theta_i, \eta_i) \cos\theta_s} \quad (19)$$

V této rovnici je $\Omega_s = \frac{A}{R^2}$ prostorový úhel rozptýleného záření, kde symbolem A označujeme velikost ozářené plochy na vzorku. Toto je definice BRDF funkce pro izotropní povrch. Pro obecný povrch je tato funkce čtyř rozměrná. Ačkoliv toto odvození bylo učiněno pro BRDF funkci, úplně analogicky se definuje BTDF funkce. Jednotkou BSDF funkce je sr^{-1} .

Nejjednodušším příkladem povrchu, na kterém si lze určit BRDF funkci, je Lambertovský povrch, jehož záře L nezávisí na směru pozorování, je konstantní:

$$\text{BRDF}(\theta_i, \eta_i, \theta_s, \eta_s) = \frac{L}{E_i} = \frac{\rho}{\pi}. \quad (20)$$

Tento vztah je známý z radiometrie a fotometrie pro vyjádření jasu (záře) Lambertovského odražeče ve tvaru $L = \frac{\rho E}{\pi}$. Průběh BRDF funkce tohoto povrchu je konstantní, v případě, že plocha pozorovaného povrchu bude omezená, projeví se z geometrie pokles s faktorem $\cos\theta_s$, bude mít kosinový průběh (například křída). V rámci měření jsme provedli její proměření. Výsledky jsou srovnány v Grafu 1. Pro orientaci zobrazuje také výsledek měření pro odrazný vzorek PC LS2 33.



Graf 1. Srovnání teoretických a prakticky naměřených hodnot BRDF funkcí.

V literatuře například v [4] se lze setkat s BSDF funkcí, v jejíž definici nefiguruje člen $\cos\theta_s$. Tato funkce bývá označována jako kosinově opravená (korigována) BSDF funkce, nebo také rozptylová funkce. [7]

4.2.1. Vlastnosti BSDF

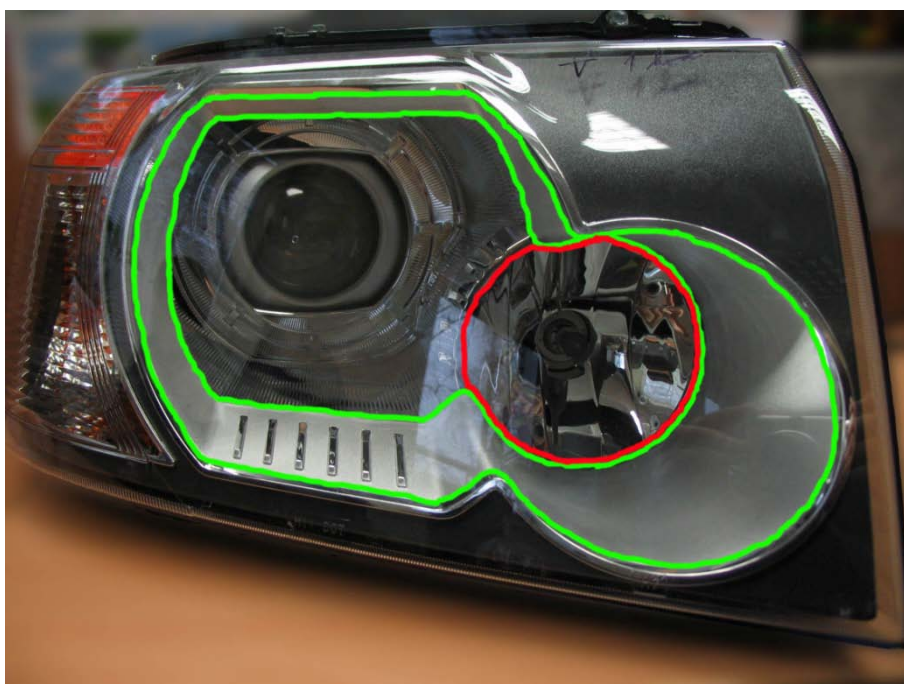
Může nabývat jakékoliv hodnoty, která se liší podle použité vlnové délky světla. BSDF funkci lze měřit pro jakoukoliv vlnovou délku od ultrafialové, přes viditelnou po infračervenou oblast. Podle dohody se nejčastěji měří pro vlnovou délku 632nm.

Tato funkce musí splňovat Helmholtzův princip reciprocity, jenž nám říká, že BSDF nezávisí na směru. Její velikost se tedy nezmění v případě, že dojde k záměně směru dopadajícího za směr odraženého paprsku

Také musí vyhovovat zákonu zachování energie, podle kterého se nemůže z povrchu odrazit více energie než na něj dopadá. Pokud zjišťujeme BRDF funkci povrchu zdroje, neuvažujeme jeho vlastní záření, zajímá nás pouze odrazivost jeho povrchu.

5. Měřené vzorky

Materiály, jejichž povrchová struktura byla měřena, jsou plasty používané v celé řadě odvětví. Vzhled těchto vzorků vypadá obdobně jako zamlžení, nebo jinovatka. Dva povrchy různých materiály vyobrazuje Obrázek 2. Nás zajímá hlavně jejich použití v automobilovém průmyslu, kde se používají na výrobu světlometů. Proměřované vzorky byly odrazné nebo propustné. Odrazné se používají jako masky ve světlometech, ale ne na výrobu odražeče světlometu. Odražeč musí být vyroben z plastu s příměsí skelných vláken, díky kterým nelze na jeho povrchu zhotovit požadovanou strukturu. Skelná vlákna jsou důležitá, aby materiál byl schopen odolat velmi vysoké teplotě panující uvnitř světlometu. Tyto materiály bývají označovány jako termosety. Lepší představu, kde se ve světlometech nacházejí měřené vzorky, dává Obrázek 1., na kterém je zobrazen jeden světlomet vyráběný ve firmě Visteon - Autopal. Zelené obrysy vyznačují oblast, kde se uplatňují odrazné vzorky, a červený obrys ohraničuje odražeč, jehož materiál obsahuje skelná vlákna.



Obrázek 1. Rozmístění odrazných vzorků.

Propustné materiály lze nalézt na směrových a zadních svítilnách. Jejich funkcí je rozšířit světelnou stopu do většího úhlu a zlepšit tak viditelnost těchto svítilnových funkcí. Proměřované vzorky patří do skupiny termoplastů. Tyto materiály jsou při určité teplotě

tvarovatelné a tudíž nevhodné do míst s vysokou teplotou. Typickými představiteli termoplastů jsou:

- **Polykarbonát** - označení **PC**, má velmi široké použití v elektronických přístrojích, displejích, CD discích a také v osvětlovací technice díky svým dobrým optickým vlastnostem. Jeho teplota tání má hodnotu 267°C a teplota tepelné deformace 140°C. Polykarbonát se obdobně jako ostatní termoplasty formuje vstřikováním do forem při teplotě vyšší než teplota tání. Jedná se o nejpoužívanější termoplast v automobilovém průmyslu. Je čirý, může být tedy použit jak pro propustné tak pro odrazné aplikace. V automobilovém průmyslu se z něj vyrábějí krycí skla světlometů díky jeho dobré odolnosti při nárazu, ale své využití najde také jako odražeč, pokud na něj napaříme vrstvu hliníku. Odrazivost má po napaření hodnotu 0,8. Index lomu polykarbonátu je 1,584. [8], [9]
- **Polymethylmetakrylát** – označuje se jako **PMMA**, lidově se nazývá plexisklem, stejně jako v případě polykarbonátu se jedná o propustný termoplast, uplatnění najde jak u propustných filtrů, tak také jako odrazný prvek. Rozdílem je však nižší teplota tání a to pouze 160°C. tento materiál je tedy možno použít pouze v místech, kde nebude vysoká teplota, v opačném případě dojde k deformaci materiálu. Další nevýhodou je malá mechanická odolnost, PMMA se lehce poškrábá. Index lomu polymethylmetakrylátu má hodnotu 1,490. [10]
- **Polybutylentereftalát** – **PBT**, tento termoplast není průhledný, lze jej využít pouze jako odražeče při napaření hliníkové vrstvy. Mezi průmyslové aplikace kde jej lze nalézt patří elektrotechnika, díky výborným izolačním vlastnostem, dále v osvětlovací technice. Teplota tání má hodnotu 223°C. Index lomu 1,550. [12]

Výroba měřených povrchů:

- **Elektroerozivní obrábění**-velmi rozšířená metoda, díky ekonomické stránce, v anglické literatuře bývá označována jako EDM – Electric discharge machining. Obrobek získává svůj tvar díky elektrickým výbojům, které působí na jeho povrch a roztavují částičky materiálu. Výboje probíhají mezi dvěma elektrodami v kapalině s nízkou vodivostí, která odplavuje oddělené části materiálu. Výhodou tohoto výrobního procesu oproti klasickým (broušení, řezání atd.) je možnost opracovávat

křehké materiály, také velká přesnost a možnost obrábět velmi problematické tvary.
[13]

- **Leptání** – málo využívaná metoda pro obrábění materiálů používaných v automobilovém průmyslu z ekonomických důvodů, problémem u této metody je také ekologické hledisko.

Velikost povrchové struktury vzorku odpovídá velikosti použitého elektrického proudu při elektroerozivním obrábění a také typu materiálu. Dva různé materiály obráběné stejným elektrickým proudem mají různou povrchovou strukturu. Také na porovnávaných vzorcích lze při důkladnějším pohledu rozeznat rozdíly ve struktuře. Na fotografiích lze tyto rozdíly rozeznat jen velmi obtížně, konkrétně jsou na Obrázku 2. zobrazeny vzorky PC LS2 33 a PBT Crastin 33.



Obrázek 2. Srovnání dvou odrazných povrchů různých materiálů PC LS2 33 a PBT Crastin 33 obráběných stejným elektrickým proudem.

6. Požadavky na měření úhlového rozptylu světla a prostředky, které je možno využít ve firmě Visteon-Autopal Nový Jičín.

6.1. Soupis požadavků na řešení úkolů měření úhlového rozptylu světla odraženého od vzorků a prošlého vzorky.

- Vzorky původně měřeny německou firmou OPSIRA GmbH.
- Požadavkem firmy Visteon-Autopal je mít možnost operativně měřit vzorky používané v automobilových světlometech, bez nutnosti je zasílat na měření do firmy OPSIRA.
- Ke stávající vybavení nacházející se ve firmě Visteon, je třeba za účelem tohoto měření navrhnout přípravek umožňující měření úhlového rozptylu.
- Měřicí přípravek musí být schopen zajistit měření jak odrazných tak také propustných vzorků, při co nejjednodušší manipulaci.
- Úhlový krok měření je stanoven na $0,1^\circ$ a rozsah měření od -90° do $+90^\circ$, tuto přesnost zajišťuje goniofotometrem OPTRONIK SMS 10h, který je používán ve firmě VISTEON.
- Stanovené úhly dopadu vzorek mají tyto hodnoty: 0° , 15° , 30° a 45° . Měřicí přípravek musí umožnit jejich nastavení s dostatečnou přesností, aby byla zaručena reprodukovatelnost měření.
- Zdroj používaný k tomuto měření by měl být laser, nejlépe kompaktních rozměrů, aby nedocházelo při měření odrazných vzorků k clonění odraženého svazku. Jako zdroj byl použit polovodičový laser zapůjčený z katedry optiky.
- Měřicí přípravek by také měl být dostatečně stabilní a robustní, aby při otáčení na goniofotometru nedocházelo k nechtěné deformaci a s ní související změně úhlových poměrů. Přípravek byl tedy vyroben převážně z ocelových a hliníkových profilů. Tyto díly byly nastříkány černou matnou barvou z důvodu omezení nechtěných odrazů.
- Přípravek by měl v maximální možné míře využívat materiálů a prostředků, které k dispozici ve firmě VISTEON, kvůli ekonomické stránce.

Shrnutí: Přípravek, který bude navržen na měření úhlového rozptylu, musí být kompatibilní s vybavením firmy VISTEON, snadno přestavitelný na měření odrazných nebo propustných vzorků, umožňovat nastavení zadaných dopadových úhlů, obsahovat

držáky na uchycení měřených vzorků daného rozměru a laserového zdroje, a nakonec také výrobně jednoduchý.

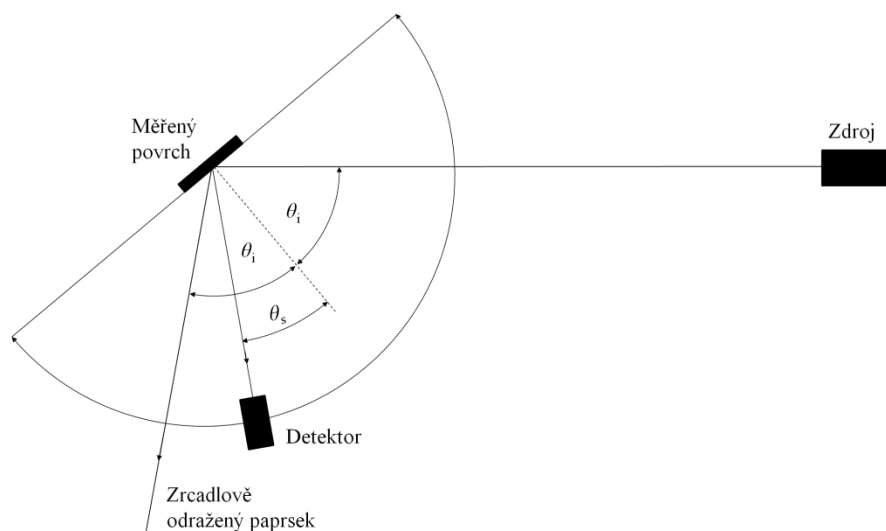
Původním záměrem byl návrh měřicího systému nezávisle na přístrojovém vybavení firmy VISTEON, který by umožňoval měření úhlového rozptylu odraženého a propuštěného světla. Toto měřicí zařízení mělo obsahovat motorizovaný otočný stolek ovládaný počítačem. Od tohoto řešení bylo upuštěno z důvodů finanční náročnosti nákupu nových komponent. Namísto počítačem ovládaného otočného stolku se využilo stávající vybavení firmy VISTEON, čímž došlo k finanční úspoře.

6.2. Soupis prostředků, které jsou k dispozici u konzultující firmy a které byly použity na výrobu přípravku na měření úhlového rozptylu světla.

- Optická zkušebna používaná na měření automobilových světlometů, která je vybavena goniofotometrem OPTRONIK SMS 10h. Na toto zařízení byl primárně navržen měřicí přípravek, ale lze jej využívat také na goniofotometru typu LMT GO 1300, který také vlastní firma VISTEON-AUTOPAL.
- Jako zařízení na nastavování dopadových úhlů byl vybrán ručně ovládaný otočný stolek od firmy Melles Griot s označením TRT.
- Pro redukci stínění při měření odrazných vzorků byl použit naklápěcí stolek od stejného výrobce označený GON. Obě tyto komponenty byly ve vlastnictví firmy VISTEON, nemuselo se tedy nic nakupovat.
- Na výrobu zbývajících komponent (držáky laseru, vzorků, spojení mezi otočným a naklápěcím stolem, ramene a podložky sloužící k připevnění těchto částí k goniofotometru) se použily železné a hliníkové profily, běžně užívané k výrobě přípravků používaných při testování prototypů. Tyto součástky byly zhotoveny přímo v technickém oddělení firmy VISTEON, čímž byly opět sníženy náklady.

7. Měřicí sestava

Konstrukce měřicího zařízení byla jednou z nejdůležitějších částí ve zpracování této diplomové práce, neboť byla nezbytná pro měření úhlového rozptylu odraženého a propuštěného světla. Inspirací při návrhu bylo měření, které prováděla firma OPSIRA pro Visteon-Autopal Nový Jičín. Prvotní myšlenkou byla stavba celého měřicího systému, který by sloužil výhradně k tomuto měření. Tento přístup by obnášel nákup počítačem ovládaného otočného stolku a dalších komponentů. Po zhodnocení finanční náročnosti projektu bylo od této myšlenky upuštěno a při návrhu bylo v co největší míře využito prostředků, které již vlastnila firma Visteon. Jejich soupis je uveden v předchozí kapitole. Jako základní a nejdůležitější prvek celého návrhu byl použit goniofotometr OPTRONIK SMS 10h používaný pro proměňování vlastností svétlometů. Následná konstrukce měřicího přípravku byla navrhována přímo na tento přístroj. Geometrie OPTRONIKU neumožňuje použít obdobné uspořádání jako u firmy OPSIRA, neboť tento přístroj má pevný detektor. Měřicí zařízení firmy OPSIRA naproti tomu používalo detektor umístěný na otočném rameni. Detektor a vzorek se během měření nepohybují, na držáku vzorku se před začátkem měření nastaví velikost dopadového úhlu. Volily se hodnoty 2° , 15° , 30° a 45° . Zajímavý je údaj 2° . Důvodem této volby je především stínění odraženého záření detektorem při měření odrazných vzorků. Pokud bychom nastavili dopadový úhel 0° , tak detektor ve své nulové pozici (ve směru normály k povrchu) zablouká dopadající záření a nezískáme tak data v tomto směru, v němž bude velikost odraženého záření maximální (zrcadlově odražený paprsek). Pokud nastavíme úhel dva stupně, získáme informaci ve směru zrcadlového odrazu, ale opět dojde k zamezení dopadajícího záření, tentokrát v poloze 2° . S tímto jevem se setkáme v měření firmy OPSIRA. Tato geometrie je zcela standardní pro měření rozptylu a zobrazuje jí Obrázek 1. Při návrhu našeho měřicího přípravku jsme tento nežádoucí jev eliminovali použitím naklápěcího stolku, jehož pomocí jsme docílili vychýlení odraženého záření z původního směru a nedocházelo tak k jeho zastínění.



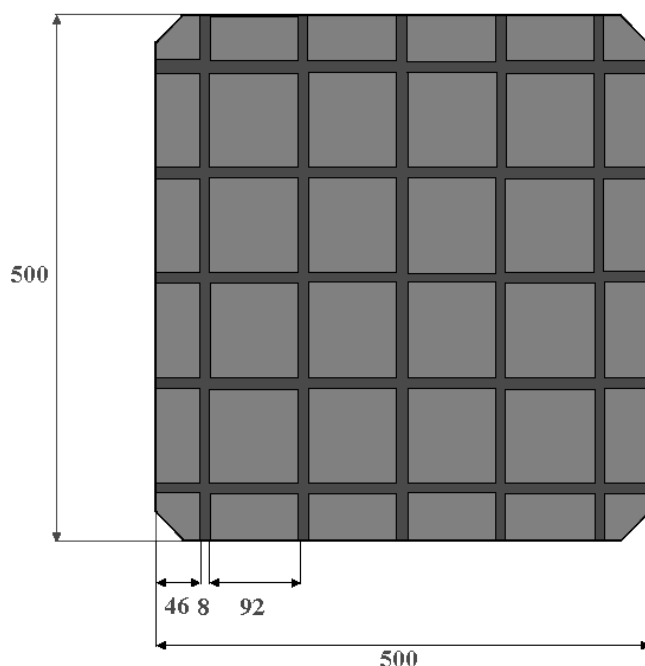
Obrázek 1. Geometrie měření používaného ve firmě OPSIRA.

V případě použití goniofotometru OPTRONIK SMS 10h se výše popsané uspořádání musí změnit. Jelikož jsme limitováni tím, že tento přístroj má otočný stolek a detektor pevně připevněný. V průběhu měření se musí zachovávat dopadový úhel záření na vzorek, musíme na otočný stůl goniofotometru umístit vzorek i zdroj. Na rozdíl od měření firmy OPSIRA, ve kterém se otáčel detektor, použijeme v našem případě uspořádání s otočným zdrojem i s proměřovaným vzorkem. V literatuře zabývající se měřením rozptylu [15] a [14] se setkáváme s konstrukcí měření jako u firmy OPSIRA. Jak uvidíme v kapitole věnované porovnávání výsledků našich měření s výsledky firmy OPSIRA, naměřené hodnoty si velmi dobře odpovídají. Záměna pevných komponent (zdroj a vzorek) za otočné a naopak otočných za pevné (detektor) nevede k rozdílným výsledkům.

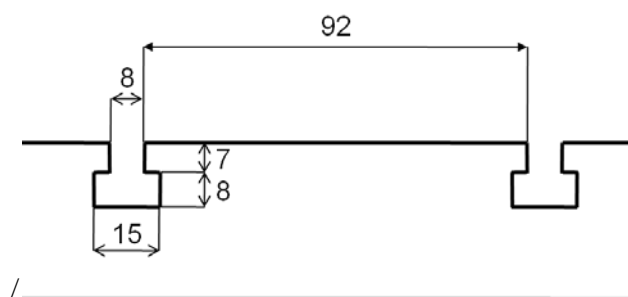
7.1. Návrh měřícího přípravku.

- Konstrukce měřícího zařízení musí zajistit možnost nastavení dopadových úhlů v krocích 0° , 15° , 30° a 45° . Abychom mohli nastavovat tyto hodnoty, je nezbytné použít v navrženém přípravku otočný stoleček. Firma Visteon již vlastnila vhodný exemplář, konkrétně TRT 506 od výrobce Melles Griot. Jeho rozměrový náčrt je obsažen v příloze. Jedná se o manuálně ovládané zařízení s rozměry základny $65 \times 65 \text{ mm}$, v níž jsou tři otvory o průměru 8 mm , a průměrem otočného elementu 40 mm v jehož středu je umístěn závit M6.
- Tento otočný stolek bylo nutno přichytit ve vhodné pozici na stole goniofotometru. Jeho náčrt společně s rozměry zobrazuje Obrázek 2. Tmavě šedé pruhy znázorňují drážky, jejichž profil je na Obrázku 3. Do těchto drážek se vkládají matky se

závitem o rozměru M8. Vhodná pozice otočného stolku TRT 506 je taková, že jeho osa rotace je shodná s osou rotace otočného stolu goniometru.



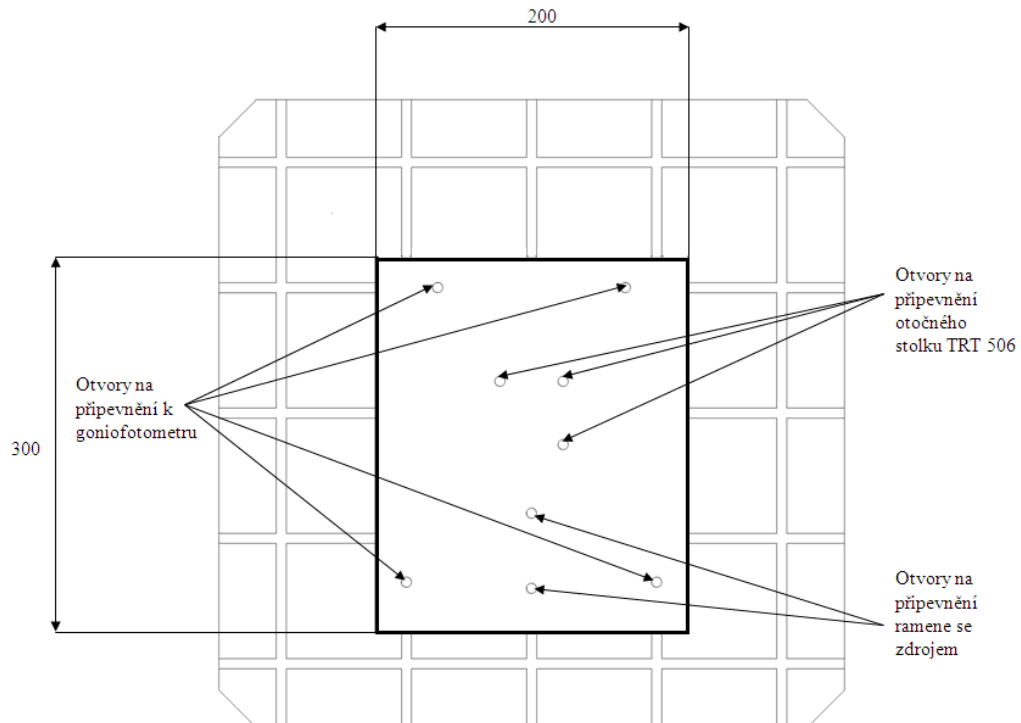
Obrázek 2. Stůl goniometru OPTRONIK SMS 10h sloužící k připevnění měřených komponent.



Obrázek 3. Profil drážek ve stolu goniometru.

Jako prvek použitý k přichycení otočného stolku na goniometr byl navržen hliníkový plát s rozměry 250x300mm a tloušťkou 8mm. Na výkresech je tato komponenta označena jako podložka. Otvary na šrouby sloužící k připevnění na goniometr mají takové rozmístění, že zajistí přesnou pozici této komponenty. Dva šrouby se umisťující do podélných drážek určují polohu v tomto směru a další dva šrouby patřící do příčných drážek ustanoví přesnou pozici. Lepší představu si lze udělat z Obrázku 4. Dále jsou v podložce umístěny otvary pro připevnění otočného stolku TRT 506 a také na připevnění ramene, na kterém je umístěn zdroj. Tyto otvary jsou uzpůsobeny pro použití šroubů M8

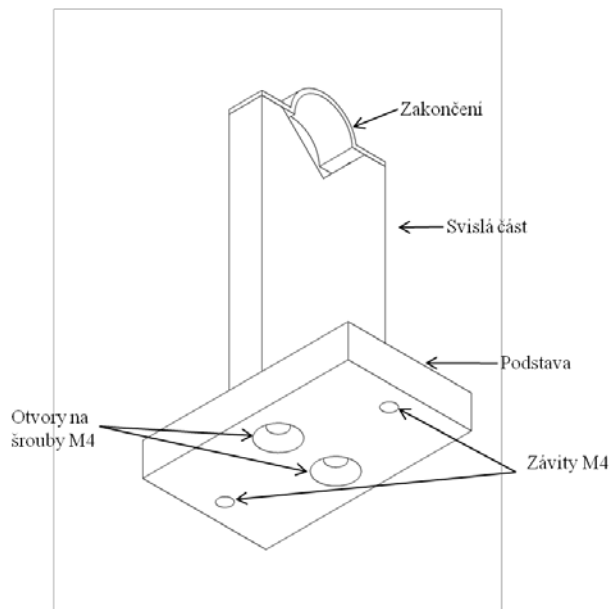
s kuželovou hlavou, jenž jsou zapuštěny do plochy podložky přiléhající ke stolu goniometru. Otočný stolek TRT 506 a rameno se zdrojem jsou k těmto šroubům připevněny maticemi. [15]



Obrázek 4. Naznačeno uchycení podložky měřícího přípravku ke goniometru.

- Délka ramene má velikost 400mm. Důvodem této velikosti je zachovat možnost použití měřícího přípravku i na goniometru GO-H 1300, který je také používán ve firmě Visteon a jenž má menší rozměry než OPTRONIK, na němž by bylo použít délku až 700mm. Rameno je vyrobeno se standardního ocelového profilu s rozměrem 30x15mm a tloušťce 1,5mm. Na konci tohoto ramene je dvěma šrouby připevněn držák zdroje (laseru)
- Vzhled držáku laseru se v během návrhu několikrát změnil, jeho konečný vzhled má takový tvar, aby v co nejmenší míře stínil odraženému záření od vzorku. Skládá se ze tří částí. První je podstava, kterou je celý držák připevněn k rameni, obsahuje 2 otvory pro zápusťné šrouby M4 s kuželovou hlavou, jenž slouží ke spojení se svislou částí držáku laseru. Dále se v podstavě nachází dva závity M4, kterými se celý držák zdroje uchyťí na rameno. Celý držák laseru zobrazuje Obrázek 5., na němž je zachyceno rozmístění otvorů a závitů na podstavě držáku. V dolní ploše svislé části se nachází dva závity M4, kterými je tato část spojena s podstavou

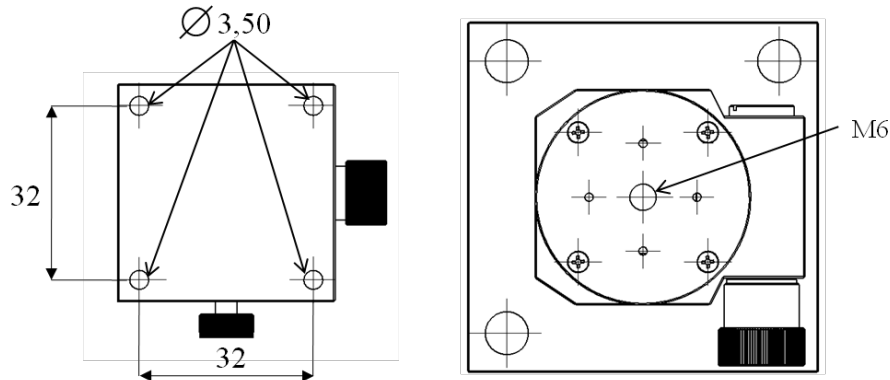
dvěma šrouby. Na vrchní ploše svislé části lze opět nalézt dva závity M4 a výřez ve tvaru písmene V, do něhož se umísťuje laser s průměrem 14mm. Tvar písmene V je výhodný, neboť polovodičový laser s kruhovým průřezem se dotýká pouze ve dvou bodech. Závity slouží k uchycení posledního komponentu držáku laseru označeného jako zakončení. Jedná se o ocelový plech s tloušťkou 1mm, který má po stranách otvory pro šrouby, které jej připevňují ke svislé části držáku laseru. Ve střední části má půlkruhový tvar s poloměrem 7mm odpovídající poloměru laseru. Tento tvar lze vidět na Obrázku 5. Použití plechu na přichycení laseru má velkou výhodu v tom, že má jen minimální výšku a tím omezíme nechtěné zastínění záření.



Obrázek 5. Držák laseru s popsanými částmi, s nichž se skládá.

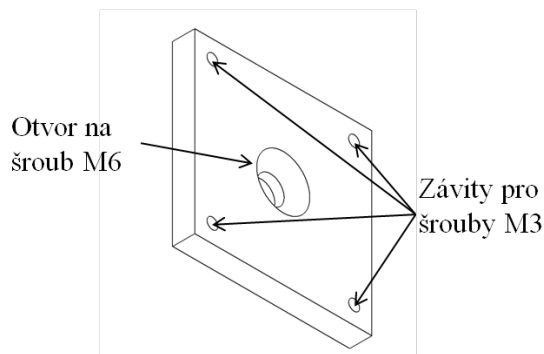
- Jak již bylo zmíněno v popisu měření firmy OPSIRA, chceme odstranit stínění záření při nulovém úhlu dopadu. V našem případě nebude docházet ke stínění dopadajícího záření detektorem, ale omezen bude odražený svazek a to zdrojem a jeho držákem, který byl konstruován s ohledem na minimální stínění, jak je uvedeno v předcházejícím odstavci. Stínění jsme odstranili použitím naklápěcího stolku GON 503 od firmy Melles Griot, který je umístěn na otočném stolku TRT 506. Držák měřených vzorků se poté připevňuje na naklápěcí stůl GON 503. Jeho náklonem odkloníme odražené záření, při našich měřeních jsme používali úhel 2° , o dvojnásobek tohoto úhlu musíme změnit pozici vůči detektoru (úhel dopadu plus úhel odrazu). Aby bylo možno přichytit naklápěcí stůl na otočný, bylo nutno

navrhnout součást, která by toto umožnila, neboť přímé spojení není možné. Na otočný stolek je možno připevnit komponenty pouze pomocí středového závitu M6, naopak naklápací stolek má na své dolní ploše čtyři otvory vhodné na šrouby M3. Popisovanou situaci zachycuje Obrázek 6.



Obrázek 6. Horní pohled na otočný stolek TRT 506 a dolní pohled na naklápací stolek GON 503 s naznačenými otvory a závity.

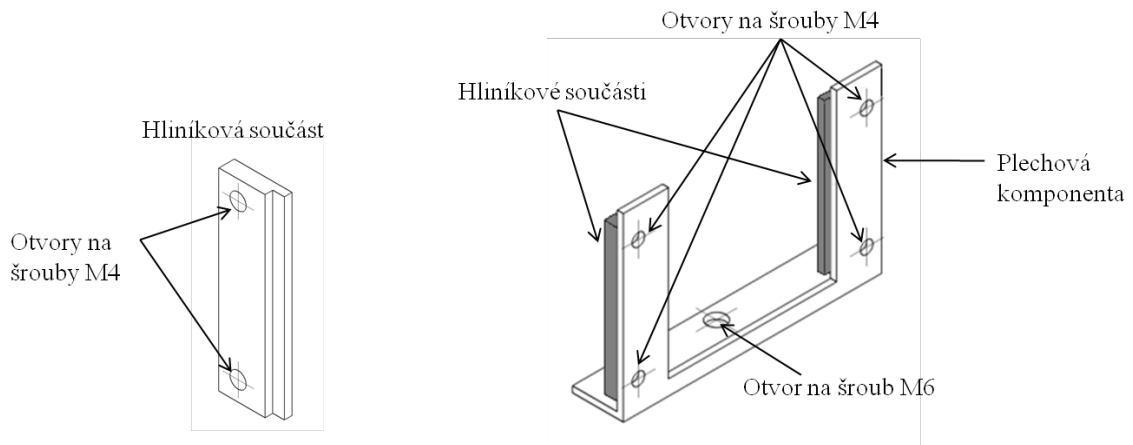
Řešení této situace spočívalo v návrhu součástky s hliníku o rozměrech 40x40mm a tloušťce 5mm, která ve svém středu měla otvor pro zápusťný šroub M6 s kuželovou hlavou a dále čtyři závity na šrouby M3. Znázornění tohoto spojení ukazuje Obrázek 7.



Obrázek 7. Spojení mezi otočným a naklápacím stolem.

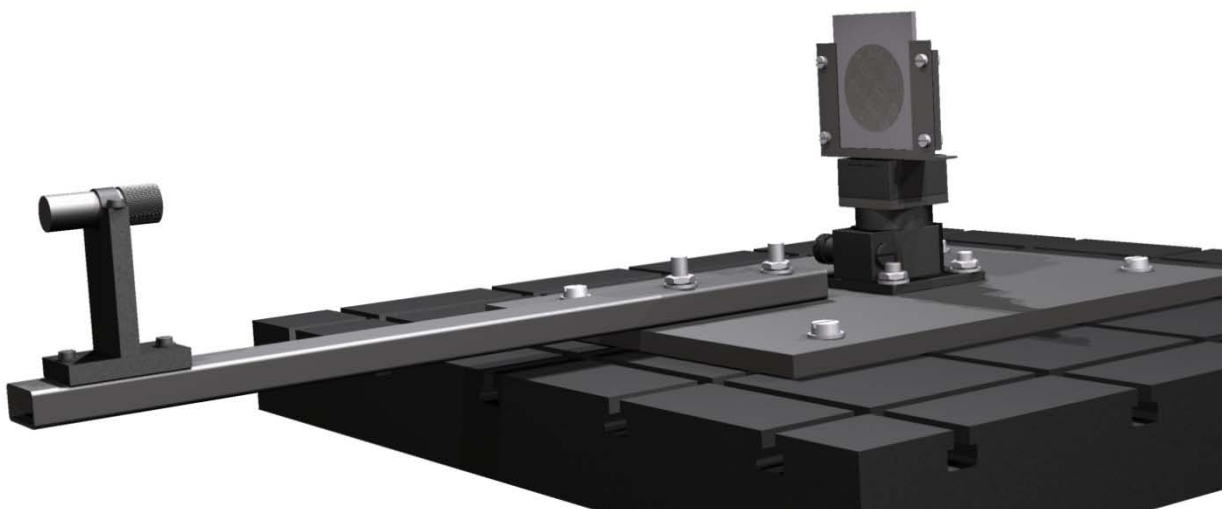
- Poslední součástkou, jež schází v návrhu měřicího přípravku, je držák měřených vzorků. Standardní měřené vzorky mají rozměry 75x60mm a tloušťku 2,5mm, držáku se vkládají kratší stranou. Na výrobu tohoto držáku byl použit ocelový plech společně s hliníkem. Z ocelového plechu tloušťky 1mm byla zhotovena převážná část tohoto držáku. Její pomocí se držák připevňuje k naklápacímu stolku GON 503, také obsahuje čtyři otvory na šrouby M4 sloužící k montáži hliníkových částí a jejichž utažením dochází k fixaci polohy měřených vzorků. Plechová součást má

tvár podobný velkému písmenu U. Hliníkové součásti jsou na držáku umístěny dvě. Jedná se o hliníkový kvádr se dvěma otvory o průměru 4,20mm, který obsahuje výřez tvaru L místo jedné hrany sloužící jako drážka, do které se zasunují měřené vzorky. Na Obrázku 8. nalezneme náčrtek této hliníkové části a také celého držáku měřených vzorků.

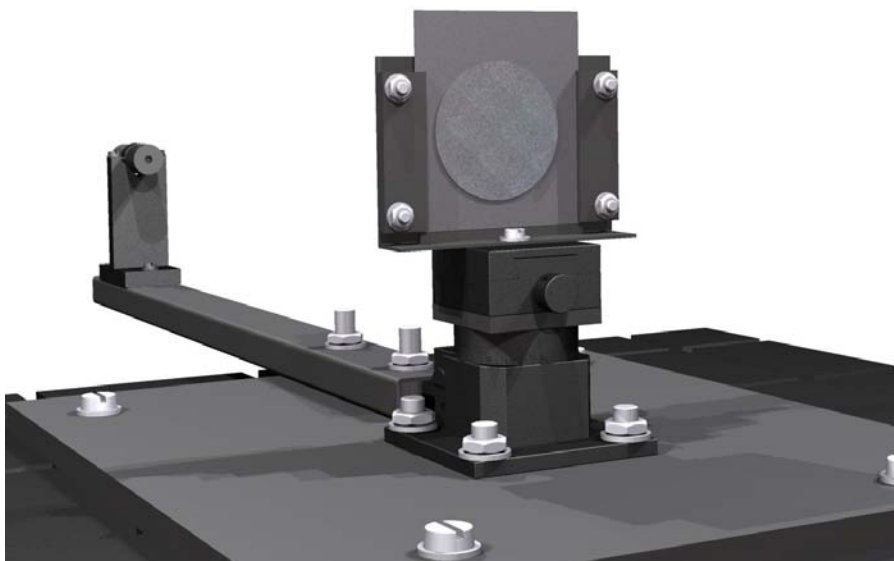


Obrázek 8. Zobrazení držáku vzorku a boční součásti, která je použita při konstrukci dvakrát (šedivě vyznačena na nákresu kompletního držáku).

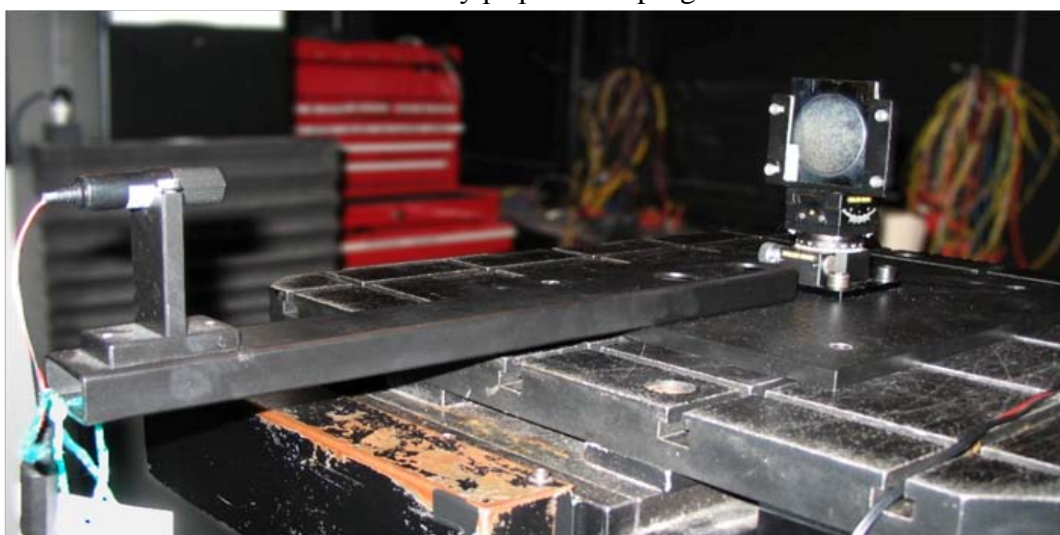
Nyní máme navrženy všechny komponenty potřebné k výrobě měřícího přípravku. Na Obrázku 9. a 10. lze vidět, jak vypadá celý přípravek v programu Autodesk Inventor, ve kterém byl navržen. Ve firmě Visteon ovšem používají software CATIA, bylo nezbytné převést soubory typu .iam používané Inventorem do formátu .stp, který lze použít v CATII. Také výkresy, podle nichž byl zhotoven měřící přípravek se museli změnit z typu .idw na formát .dwg. Na Obrázcích 11. a 12. jsou fotografie vyrobeného měřícího přípravku.



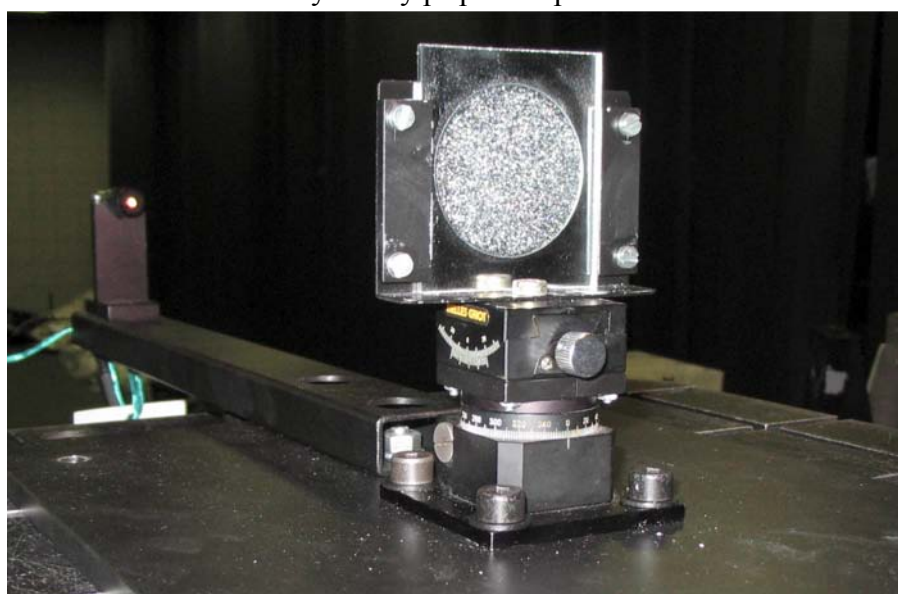
Obrázek 9. Navržený přípravek v programu Inventor.



Obrázek 10. Navržený přípravek v programu Inventor.



Obrázek 11. Vyrobený přípravek pro firmu Visteon.

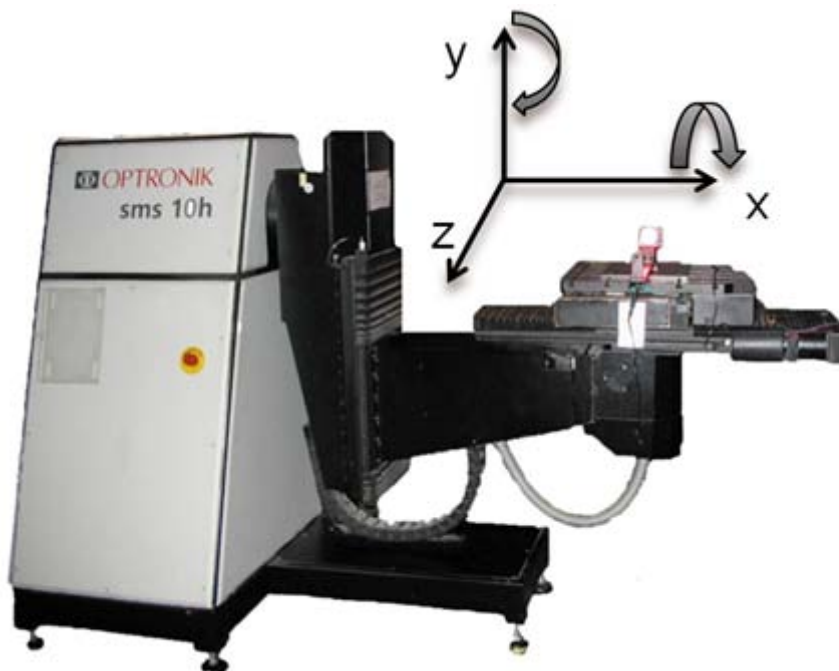


Obrázek 12. Vyrobený přípravek pro firmu Visteon.

8. Parametry goniofotometru Optronik SMS 10h

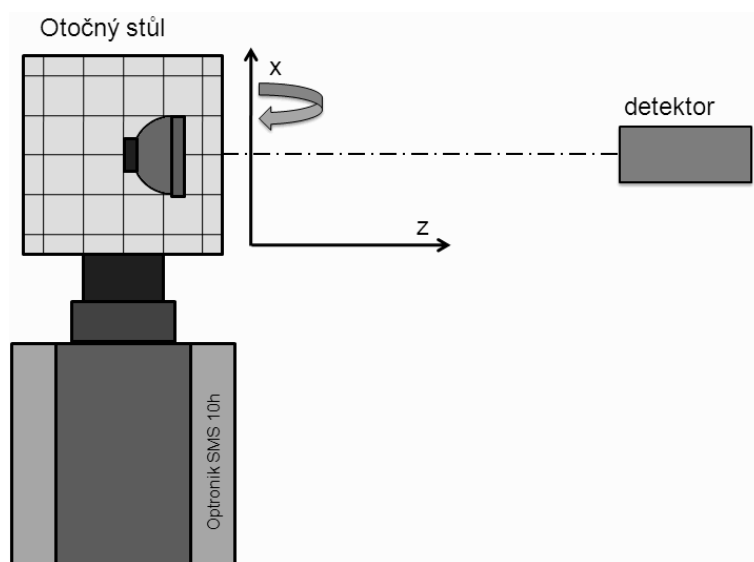
Jedná se o měřicí zařízení používané v automobilovém, leteckém průmyslu nebo také ve zkušebních laboratořích. Nejčastější využití najde ve firmách zabývajících se světelnou technikou pro automobilové odvětví a to jak ve firmách vyvíjejících světlometry tak také v samotných automobilkách. Firma Visteon-Autopal je jednou s firem konstruující světlometry a proto také vlastní tento přístroj. Není to samozřejmě jediné měřicí zařízení používané v této firmě, nachází se zde také goniofotometr typu GO-H 1300 od firmy Lichtmesstechnik GMBH Berlin, také na tomto zařízení je možno použít navržený přípravek. [16] S ohledem na menší rozměry typu GO-H 1300 oproti Optroniku SMS 10h musela být zkrácena délka ramene přípravku na 400mm oproti 700mm, které umožňuje typ SMS 10h.

Ale zpět k samotnému goniofotometru Optronik SMS 10h, který je primárně používán k našemu měření. Ačkoliv na fotografiích vypadá, jako malý přístroj při osobním kontaktu má člověk jiný pocit. Už jenom údaj, že hmotnost měřeného vzorku může být až 80kg jistě napoví, že nepůjde o žádné subtilní zařízení. Na Obrázku 1. si lze prohlédnout tento přístroj. Také jsou zde naznačeny osy posunu a rotace. Posunutí je možné podle všech os (x , y , z), rotovat upevněným přípravkem lze podle os x a y .



Obrázek 1. Fotografie goniofotometru Optronik SMS 10h s naznačenými osami rotace.

Na Obrázku 2. je pro lepší představu o vzájemné pozici otočného stolku a detektoru schematicky naznačeno uspořádání goniofotometru. Zobrazen je pouze jeden detektor, ale ve skutečnosti používá goniofotometr dva detektory, umístěné v různých vzdálenostech (25m a 3,162m). Při mém měření jsem využíval bližší detektor vzdálený 3,162m od otočného stolu. Také jsem do Obrázku 2. zakreslil rotační a translační osy.



Obrázek 2. Schematické uspořádání goniofotometru Optronik SMS 10h.

Ovládání goniofotometru probíhá přes počítač, ale je možné použít také ruční ovládání, jehož řídicí panel je umístěn u otočného stolku. Ruční ovládání jsem využíval k nastavení polohy měřeného vzorku do osy rotace, blíže bude tento postup popsán v kapitole věnované měření. Počítačový řídicí program umožňuje volbu řady parametrů, počínaje volbou detektoru, který se bude používat při měření, přes způsob měření, zda půjde jen o měření v jednom řezu, nebo celé mapy, až po nastavení kroku a rychlosti skenování. Moje měření byly prováděny pouze v jednom řezu s krokem $0,1^\circ$ a v rozsahu od $+90^\circ$ do -90° . Měřit pouze řez lze díky izotropní struktuře zkoumaných vzorků. Předpoklad souměrného rozptylu byl ověřen změřením celé mapy. Tento výsledek bude uveden v 9. kapitole zabývající se měřením a výsledky.

Základní parametry goniometru Optronik SMS 10h jsou uvedeny na internetových stránkách výrobce. [17]

- Horizontální a vertikální osy rotace.
- Úhlová přesnost $0,01^\circ$ v obou rotačních osách.
- Posun s přesností 0,1mm.

- Maximální rozměry měřeného vzorku 1600 mm x 600mm.
- Rotace podél horizontální osy v rozsahu $\pm 200^\circ$, podél vertikální osy $\pm 100^\circ$.
- Posun podél osy X= ± 150 mm, Y= ± 300 mm a podél Z od-50mm do +450mm.
- Rychlost měření až 50°/s, 16 rychlostí.
- Integrovaný seřizovací laser (používán k určení polohy optického středu).

Fotometr spojený s goniometrem má označený SMS 10s a jeho parametry jsou následující:

- Patří do třídy L podle normy DIN 5032 část 7. Zařízení této třídy se označují jako Přístroje s nejvyšší přesností. Další třídy přesnosti jsou:

Třída A: Přístroje s vysokou přesností.

Třída B: Přístroje s průměrnou přesností.

Třída C: Přístroje s malou přesností.

Přístroj, který má být označen jednou z uvedených tříd, nesmí svými jednotlivými chybami a celkovou chybou překročit hranice chyb uvedené v jednotlivých třídách.

[18]

- Měřicí rozsah: pro osvětlení 0,1mlx – 500klx ve vzdálenosti 3,162m.
- Velikost plochy detektoru 100mm² (10x10mm).
- Umístěn v trubici z důvodu snížení vlivu rozptýleného světla.
- Vysoce přesný, teplotně stabilizovaný fotometr.
- Možnost upevnění na trojnožku, nebo na stěnu či strop.

9. Popis měření rozptylových charakteristik, zpracování výsledků, vytvoření rozptylových modelů v programu ASAP

9.1. Popis měření

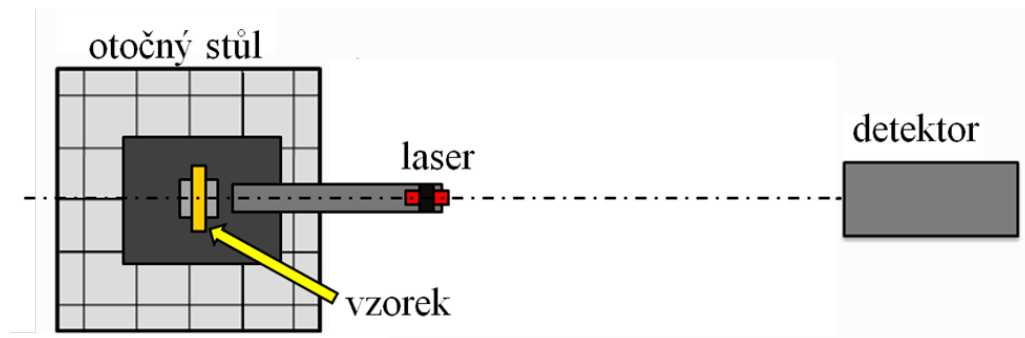
Samotné měření probíhalo ve zkušebně firmy Visteon-Autopal Nový Jičín na goniofotometru OPTRONIK SMS 10h, jehož vlastnosti byly uvedeny v předcházející kapitole. Na toto měřicí zařízení je primárně určen navržený přípravek. Podobné zařízení, na kterém lze také provádět měření je LMT GO 1300. Jedná se také o goniofotometr stejných parametrů používaný na měření světlotetů, jediným omezením oproti SMS 10h je menší maximální rozměr přípravku, který lze umístit na jeho otočný stůl.

Měření bude popsáno pro použití goniofotometru OPTRONIK SMS 10h. K vlastnímu měření je nutné zajistit:

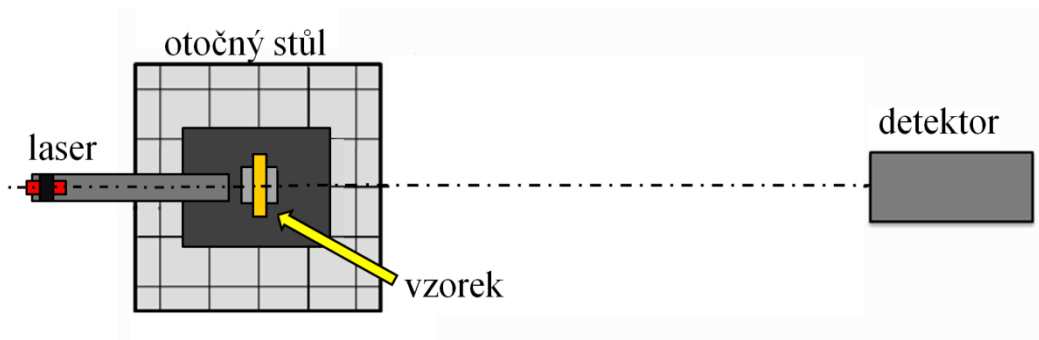
- volnou zkušebnu-nutno rezervovat několik dní předem, rezervaci zajišťoval konzultant diplomové práce Mgr. Petr Ferbas.
- měřicí přípravek-zkonstruovaný pro potřeby měření, lze zapůjčit u pana Ferbase.
- zdroj (polovodičový laser)-jedná se polovodičový laser zapůjčený katedrou optiky. Jelikož nebyly známy jeho základní parametry, bylo nutné je změřit. Byly určeny v laboratoři katedry optiky ve spolupráci s vedoucím diplomové práce RNDr. Ing. Janem Podlouckým.
- měřené vzorky-velké množství k dispozici u pana Ferbase.

Pokud máme všechny výše vyjmenované náležitosti splněny a můžeme začít s vlastním měřením.

1. Prvním krokem je upevnění měřicího přípravku na otočný stůl goniofotometru. Podle měřených vzorků musíme zvolit správnou orientaci přípravku na stole goniofotometru. V případě odrazného vzorku umístíme přípravek podle Obrázku 1., pro propustné vzorky je orientace naznačena na Obrázku 2.

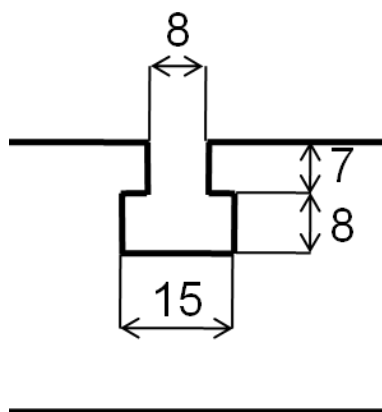


Obrázek 1. Orientace upevnění přípravku na goniofotometr při měření odrazných vzorků.



Obrázek 2. Umístění přípravku pro použití propustných vzorků.

2. Přípravek se na otočný stůl goniofotometru připevňuje čtyřmi šrouby M8. Jak je naznačeno v Kapitole 6. zabývající se konstrukčním řešením navrženého přípravku jsou pozice šroubu umístěny tak aby se při připevnění na goniofotometr docílilo přesné pozice navrženého zařízení na otočném stole, to znamená, aby měřený vzorek ležel ve středu otočného stolu a aby laserový svazek při nulové pozici otočného stolku goniofotometru směřoval přímo do fotodetektoru. Do drážek otočného stolu se zasunují matky se závitem M8, profil drážek je naznačen na Obrázku 3.



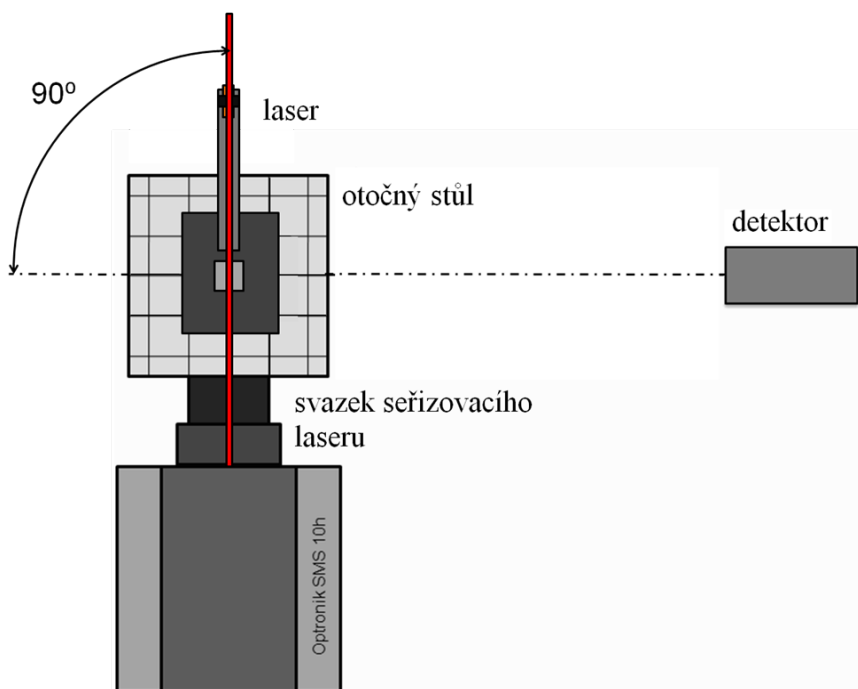
Obrázek 3. Profil drážky otočného stolu.

3. Nyní na přípravek umístíme laser pro kontrolu správného směru laserového svazku. Držák laseru se nachází na konci ramene. Montáž laseru je velmi snadná, stačí plochým šroubovákem povolit dva šrouby držící plech ve tvaru půlkruhu a zastrčit laser a poté šrouby dotáhnout. Laser lze zapojit dvěma způsoby. A to buď ze sítě přes adaptér, nebo lze využít zdroje goniofotometru, který umožňuje nastavení požadovaného napětí. Pro naše měření jsme volili druhou možnost, neboť napájení ze sítě bylo nepraktické z prostého důvodu. Při měření se celý přípravek (i laser) otáčí a bylo by zapotřebí jedné osoby, aby hlídala napájecí kabel před možným zachycením v otáčecím mechanismu. Používali jsme integrovaného zdroje napětí v goniofotometru. Jeho napájecí konektory se nacházejí v těsné blízkosti otočného stolu a rotují společně s ním. Toto uspořádání je mnohem více praktické. Nastavované napětí mělo hodnotu 5,8V, při tomto napětí dosahuje výkonu 18,4mW. Vlnová délka laseru je $\lambda=662,5\text{nm}$.

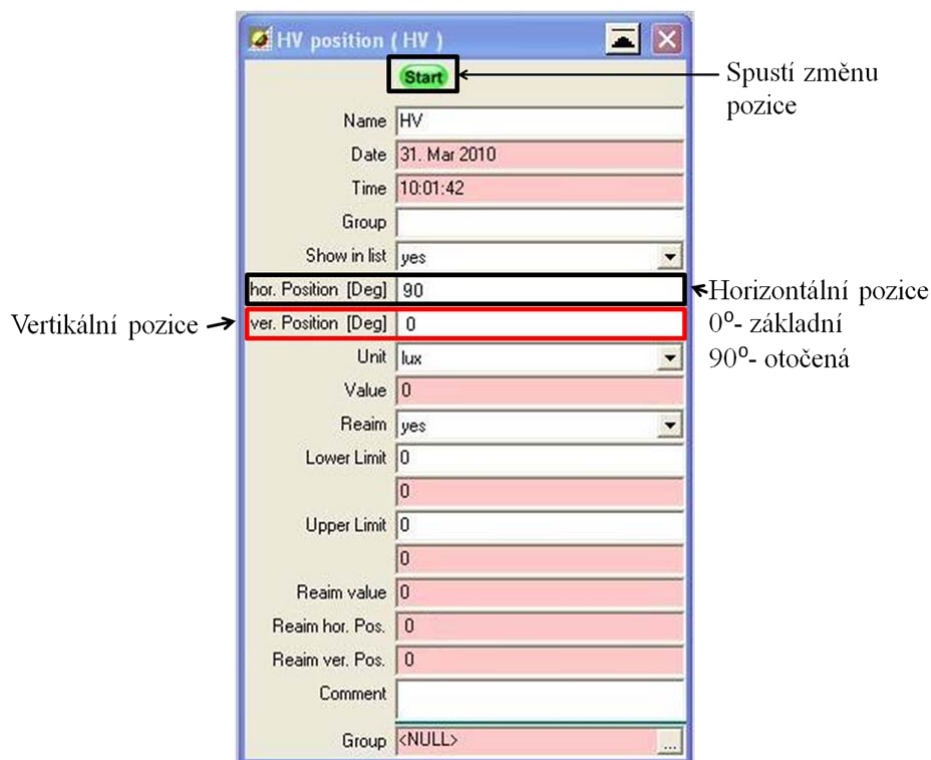
Laser nám již svítí a můžeme si ověřit, zda přípravek pravdu zaujímá správnou pozici na otočném stole. V případě, že používáme orientaci na měření propustných vzorků lze si správný směr laserového svazku zkontrolovat na stěně zkušebny, na které se nachází vodorovná a svislá osa a také mříž čar odpovídající odchylkám po deseti stupních. Za touto stěnou se nachází detektor ve vzdálenosti 25 metrů. Máme ověřen správný směr, vypneme laser

4. V této chvíli je důležité sesouhlasit místo dopadu laserového svazku na vzorek s optickým středem goniofotometru. Držák vzorku se nám nachází ve středu otočného stolu, ale tento stůl se po rameni goniofotometru může pohybovat (osy pohybů a rotace jsou naznačeny na Obrázku 1. v kapitole 8. Parametry goniofotometru Optronik SMS 10h). K nastavení této pozice nám slouží polohování laser, který je implementován do goniofotometru a s jehož pomocí najdeme optický střed. Nejprve otočíme otočným stolem pomocí ovládacího programu OPTO o $+90^\circ$ nebo o -90° v závislosti zda máme přípravek upevněn pro měření odrazných nebo propustných vzorků tak, aby nám polohovací laser svítil vstříc laseru upevněnému na měřícím přípravku (Obrázek 4. – naznačena rotace z uspořádání pro měření propustných vzorků, Obrázek 5. – okno programu OPTO sloužící k nastavení pozice, do kolonky hor. Position [Deg] zadáme 90 namísto 0 a stiskneme tlačítko Start). Upozorňuji, že při této operaci nesmí být v držáku připevněn vzorek, neboť by stínil polohovacímu laseru. Pomocí manuálního ovládní, kterým je také OPTRONIK vybaven nastavíme takovou pozici, aby

paprsek seřizovacího laseru svítil do vstupní pupily laseru upevněného v přípravku. Obsluha je velmi jednoduchá-pro aktivaci manuálního ovládání pouze nutné stisknout tlačítko MAN CPU, které se nachází hned vedle napájecích zdířek, a poté stiskem tlačítka v požadovaném směru (označena: $X\leftarrow$, $X\rightarrow$ $Y\uparrow$, $Y\downarrow$, $Z\uparrow$ a $Z\downarrow$) dojde k posunu. Tuto korekci bylo nutno provést pouze ve vertikálním směru, tedy podle osy Y. Pokud máme pozici nastavenou, musíme opět stisknout tlačítko MAN CPU, jinak nebude goniofotometr reagovat na příkazy z ovládacího programu OPTO. Otočný stolek vrátíme opět do původní polohy (rotace o 90°) a pomocí manuálního ovládání posuneme otočný stolek podle osy Z do pozice, kdy polohovací laser svítí na přední hranu držáku vzorku = rovina vzorku (měřený povrch vzorku). Pokud toto učiníme tak máme přípravek nastaven do správné pozice a je tudíž připraven na měření.

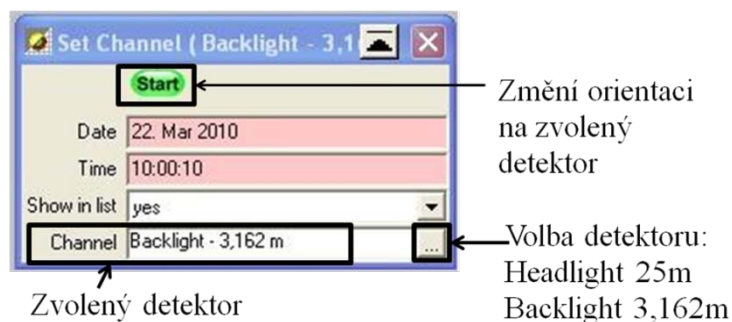


Obrázek 4. Nastavení pozice optického středu.



Obrázek 5. Okno ovládacího programu OPTO

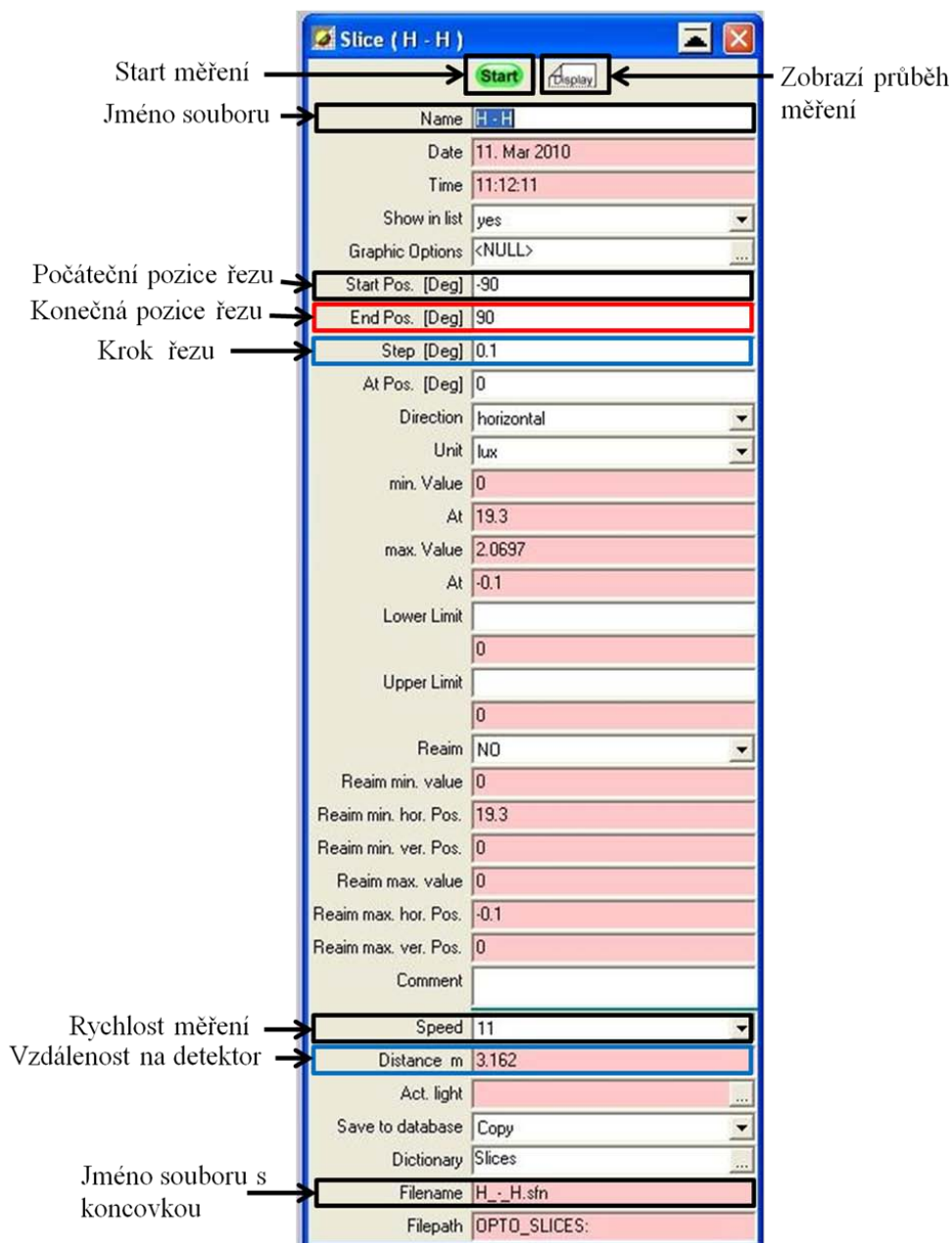
5. Nyní již máme přípravek upevněn a správně zorientován na otočném stole goniofotometru. Také montáž vzorku do držáku není obtížná. Měřené destičky jsou připevněny čtyřmi šrouby. Po jejich uvolnění lze destičku zasunout do držáku a přitáhnutím šroubů se zajistí v dané pozici.
6. V této chvíli máme na přípravku umístěny všechny potřebné komponenty. Na stupnici otočného stolku přípravku (nejedná se o otočný stůl goniofotometru) nastavíme požadovaný dopadový úhel laserového svazku na vzorek, měření probíhalo při dopadových úhlech 0° , 15° , 30° a 45° . V případě měření odrazných vzorků nastavíme na stupnici naklápěcího stolku, jenž je umístěn nad otočným stolkem, úhel 2 stupně. Tento náklon nám zajistí, že nebude docházet ke stínění odraženého záření od vzorku držákem laseru a laserem. Rozptýlený svazek projde nad laserem. Vše potřebné máme nastaveno a můžeme opět zapnout laser.
7. V tomto bodě se lépe seznámíme s ovládacím softwarem OPTO goniofotometru OPTRONIK SMS 10h. Pomocí tohoto programu nejdříve provedeme nastavení otočného stolku goniofotometru na detektor Headlight 3,162m. K výběru slouží okno nazvané Set Channel zobrazené na Obrázku 6.



Obrázek 6. Výběr detektoru v programu OPTO.

V této chvíli máme otočný stůl goniofotometru nastaven na měření na vhodném detektoru. Pokud při zjišťujeme rozptyl od odrazných vzorků a nastavíme na naklápěcím stolku hodnotu 2° , musíme o dvojnásobek této hodnoty změnit pozici vůči detektoru (úhel dopadu plus úhel odrazu). Tato změna se zadává do pozice ver. Positon [Deg] označené na Obrázku 5. Nyní je nastavení kompletní a lze začít s měřením.

8. Naše měření je prováděno pouze v řezech, neboť povrchová struktura materiálu nezávisí na orientaci, je izotropní. V programu OPTO se toto nastavení provádí v okně nazvaném SLICE, jenž umožňuje zvolit jméno souboru, do kterého se uloží naměřená data, zobrazit si průběh naměřených hodnot, nastavit počáteční a konečnou polohu měření, krok měření a celou řadu dalších voleb (jednotky-kandela, lux, rychlost měření, zda řez bude horizontální nebo vertikální atd.) Kromě řezů umožňuje software proměřovat mapu (matici) hodnot osvětlení. Tuto volbu jsme při měření použili pouze jednou a to při prvním měření kdy jsme si ověřovali, že rozptylový charakter je symetrický. Tato metoda měření je dostupná v okně nazvané Grid, ve kterém lze nastavit obdobně jako u řezů počáteční a konečnou pozici měření, krok měření zvlášť pro horizontální a vertikální orientaci. Zpět k měření řezů. V našem měření jsme do polí nazvaných Start Pos. [Deg], End Pos. [Deg] a Step [Deg] zadali stejné hodnoty jako na Obrázku 7. (Start Pos. [Deg] = -90° , End Pos. [Deg] = 90° , Step [Deg] = $0,1^\circ$) Po vyplnění těchto hodnot lze spustit měření. Dříve než toto učiníme, musíme ve zkušebně zhasnout. Měření se odstartuje stiskem tlačítka Start.



Obrázek 7. Okna ovládání měření řezů.

Po vlastním měření si lze tlačítkem Display prohlédnout průběh naměřených hodnot, jenž se nám automaticky uloží do souboru s koncovkou SFN, jehož jméno jsme vyplnili do kolonky Name (na Obrázku 7. se uložený soubor jmenuje H_-H.sfn). Nyní máme naměřen průběh osvětlení pro dopadový úhel 0° . Nyní na manuálně ovládaném otočném stolku nastavíme nový dopadový úhel a v okně SLICE stačí pouze stisknout Start pro spuštění nového měření. Dopadové úhly jsme volili 0° , 15° , 30° a 45° .

9. Zpracování souborů SFN lze provádět programem MS Excel. V tomto programu byly naměřená data upraveny tak aby je bylo možné použít v programu ASAP, případně

v nich byly vytvořeny grafy průběhů osvětlení sloužící k porovnání s daty, které pro Visteon-Autopal naměřila firma OPSIRA.

V této chvíli máme naměřená data, která je nutno dále zpracovat pro použití v programu ASAP.

9.2. Zpracovávání výsledků v programu ASAP

Data získaná při měření se musí upravit, aby s nimi bylo možno dále pracovat v programu ASAP (Advanced Systems Analysis Program), který vyvíjí firma Breault Research Organization. Tento software se používá pro simulace optických systémů. Ve firmě Visteon se tento program používá k návrhu automobilových světlometů. Je možné jeho pomocí vytvářet rozptylové modely, použili jsme Harveyho, Polynomiální a BSDFDATA rozptylový model.

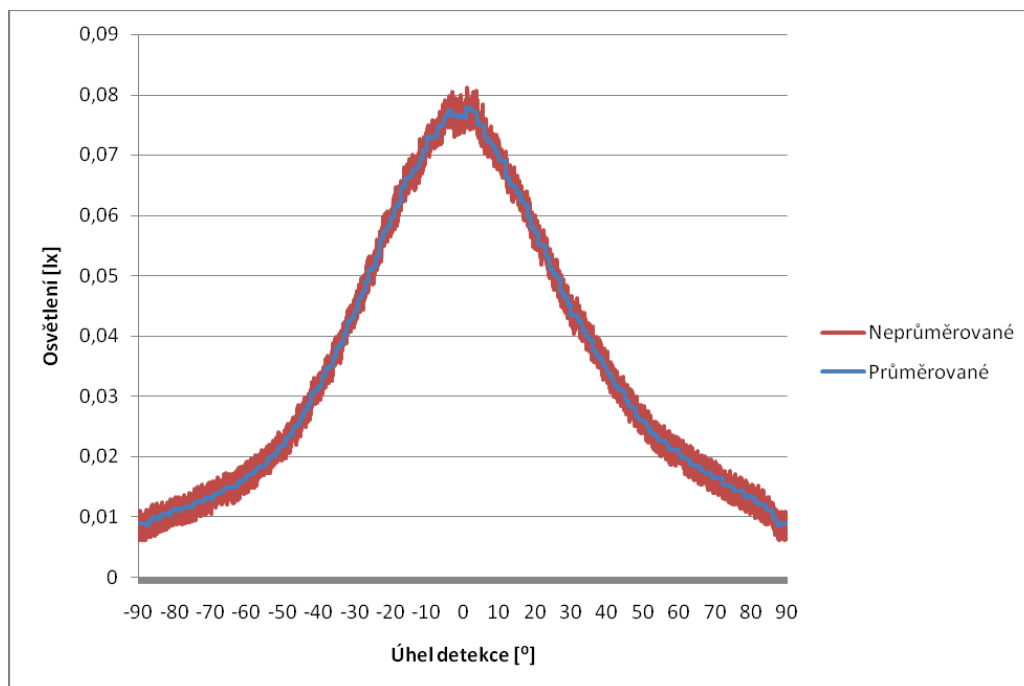
9.2.1. Úprava naměřených dat do programu ASAP

Získaná data je nutno před vložením upravit. K těmto transformacím byl velmi vhodný program Excel. Soubory s koncovkou SFN, které poskytuje ovládací program goniofotometru OPTO, lze v tomto programu otevřít, pokud při otevírání v Průvodci importem textu zvolíte jako oddělovač středník. Při této volbě se data zobrazí v oddělených sloupcích. Ukázka začátku tohoto souboru je v Tabulce 1.

type		
hor.start	-90	
hor.stop	90	
hor.step	0,1	
ver.pos	0	
distance	3,16	
unit	lx	
hor.pos	ver.pos	result
-90	0	0
-89,9	0	2,64E-03
-89,8	0	6,15E-03
-89,7	0	5,96E-03
-89,6	0	3,22E-03
-89,5	0	0

Tabulka 1. Ukázka souboru SFN otevřeného v programu Excel.

Počet hodnot získaných při měření je 1801. Tento velký počet byl snížen aritmetickým průměrem vždy po deseti hodnotách. Dostaneme hladší průběh naměřených hodnot, které se poté lépe prokládají křivkou při tvorbě rozptylových modelů. Odlišnosti mezi těmito dvěma křivkami není prakticky žádná, jak lze vidět na Grafu 1 pro odrazný vzorek PBT MT11030 při dopadovém úhlu 0° .



Graf 1. Průběh osvětlení vzorku PBT MT11030 při nulovém dopadovém úhlu.

Zprůměrování dat nevede k velké ztrátě informací, pouze sníží šum vzniklý během měření a také nám usnadní práci.

Soubory SFN upravíme v programu Excel pro použití v programu ASAP. Nejprve jsme vytvořili průměry z naměřených hodnot. Poté byly tyto průměry vloženy do souboru, jehož začátek je zobrazen v Tabulce 2., jejíž tvar je podle [19]. Hodnota v prvním řádku udává dopadový úhel záření na vzorek (zde 0°), pod ní jsou v prvním sloupci uvedeny úhly (od -90° do $+90^\circ$) a druhý sloupec udává naměřené hodnoty. Také je nutno nahradit desetinné čárky za tečky.

0	
-90	0.009066789
-89	0.008605948
-88	0.00912133

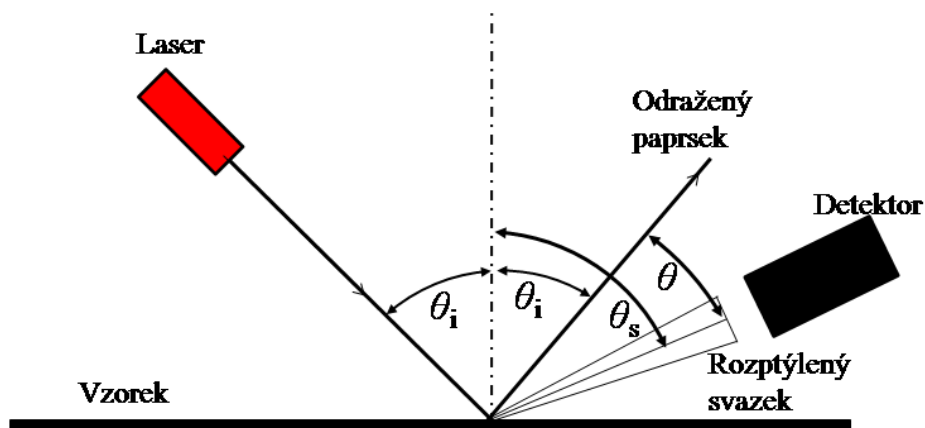
-87	0.009033818
-86	0.009840941
-85	0.009870105

Tabulka 2. Soubor zadávaný do programu ASAP.

Tento soubor je nutno uložit jako text oddělený tabulátory s koncovkou txt. Nyní máme připravený soubor k vložení do programu ASAP. Nejdříve bude uveden popis používaných rozptylových modelů.

9.2.2. Harveyho model

Je pojmenován po svém objeviteli J. E. Harvey. Jedná se o model vhodný pro pokovené povrchy, plastové díly vyrobené vstřikováním do formy, také pro nerovné povrchy vytvořené pískováním, nebo leptáním, lze jej použít také pro bílé natřené povrchy, jako bílý papír. Pro naše povrchy vytvořené elektroerozivním obráběním, nebo leptáním je tento model tedy vhodný. Podstata tohoto modelu pramení z toho, že chování rozptylu je závislé spíše než na dopadovém úhlu tak na rozdílu mezi úhlem detekce a odraženým paprskem podle zákona odrazu. V případě propustného materiálu (planparalelní destičky) to bude rozdíl mezi úhlem detekce a prošlým paprskem ve směru dopadajícího. Obrázek 8. ukazuje geometrii potřebnou k definici Harveyho modelu.



Obrázek 8. Geometrie k Harveyho rozptylovému modelu, θ_i označuje dopadový úhel na vzorek, θ_s rozptylový úhel měřený od kolmice povrchu a θ úhel rozptylu od zrcadlově odraženého paprsku.

Matematicky je Harveyho model definován následujícím výrazem:

$$\text{BSDF}_{\text{Harvey}} = b(100|\sin \theta_s - \sin \theta_i|)^s.$$

Tento vztah obsahuje parametr b , který udává hodnotu BSDF funkce v $\theta = 0,573^\circ$ ($0,01\text{rad}$) od odraženého paprsku, a s , jenž označuje sklon, neboli rychlost klesání BSDF funkce v logaritmickém grafu na jehož svislé ose je vynesena funkce BSDF a na vodorovné $\sin\theta$. Tento vztah má nulovou hodnotu v případě, když se úhel dopadu rovná úhlu detekce. Z tohoto důvodu se zavádí tzv. modifikovaný Harveyho model:

$$\text{BSDF}_{\text{Modif. Harvey}} = b_0 \left[1 + \left(\frac{\sin \theta}{l} \right)^2 \right]^{\frac{s}{2}}.$$

Tento model obsahuje parametry: θ -rozptylový úhel od odraženého paprsku (zrcadlový odraz).
 b_0 -hodnota BSDF funkce v $\theta=0^\circ$.
 l -shoulder-poloha v radiánech, kdy průběh BSDF funkce začne klesat.

Lze vidět, že při detekci pod úhlem $\theta = 0^\circ$ bude mít BSDF funkce hodnotu b_0 a nikoliv nulovou jako předchozí Harveyho model. Vztah mezi parametry b a b_0 je následující:

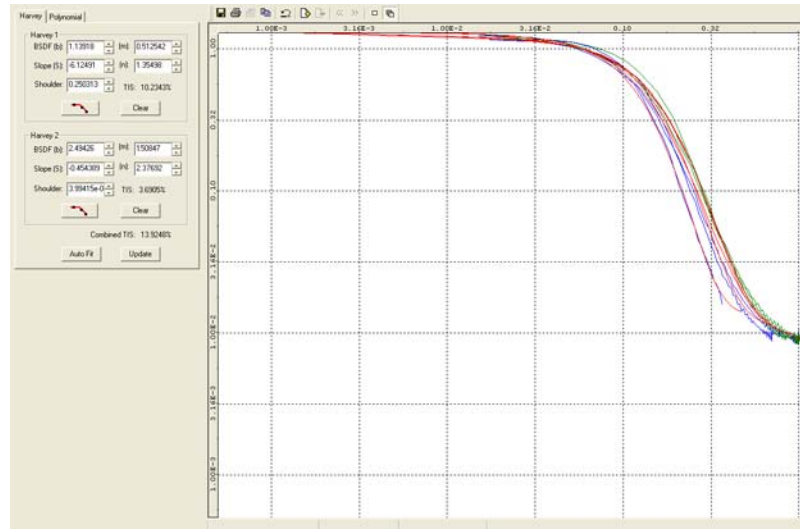
$$b_0 = b(100l)^s.$$

Pro materiál, jehož povrch má určitou hrubost, se do Harveyho modelu zavádějí parametry m a n , definující tento nerovný povrch. Obvyklé hodnoty těchto parametrů jsou $m \approx 2$ a $n \approx 1$. Vztah dávající do souvislosti tyto parametry a BSDF funkci má tvar:



$$\text{BSDF} = g^{-m} b \left\{ \frac{\sin \theta_s - \sin \theta}{\lg^n} \right\}^s,$$

kde $g = \frac{\cos \theta_s - \cos \theta}{2}$. [20]

V programu ASAP existuje aplikace sloužící k výpočtu Harveyho modelu nazvaná BSDF Fit Utility. Její prostředí zobrazuje Obrázek 9.



Obrázek 9. Prostředí programu ASAP sloužící k vytváření Harveyho rozptylového modelu.

V levé části se nachází karta s volbou Harvey/Polynomial. My se nyní budeme věnovat popisu Harveyho modelu. Lze vytvořit buď jednoduchý Harveyho model, nebo součet dvou modelů. Parametry b , s , l , m a n je možné získat zadáváním hodnot, nebo použitím tlačítka Auto Fit. Cílem je docílit co nejlepší shody mezi průběhy naměřených dat (zelené a modré) s prokládanou křivkou Harveyho modelu (červená). Způsob pomocí Auto Fit ovšem není dokonalý a je nutné jej dále korigovat, což je velmi zdlouhavé. Soubory s koncovkou txt s tvarem popsáním výše, se zadávají volbou , lze vložit několik souborů a následně z nich vytvořit rozptylový model. Naměřená data rozdělí program ASAP podle hodnoty dopadového úhlu, která je zapsaná v prvním řádku vkládaného souboru, na dopředný a zpětný rozptyl. Dopředný rozptyl označuje program modře a zpětný zeleně. Pokud jsme spokojeni s proloženou křivkou, tak tlačítkem  zkopírujeme hodnoty do schránky, které poté vkládáme do souborů .inr popisujících určitý optický prvek (například světlomet, v našem případě parabolický odražeč se zdrojem). Bližší informace o tvorbě modelů lze nalézt v [20]


9.2.3. Polynomiální model

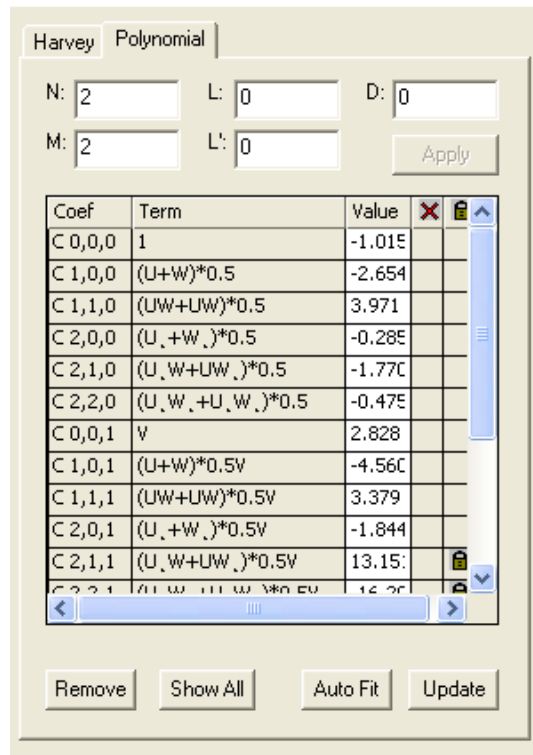
Polynomiální rozptylový model je založen na vyjádření pomocí směrových kosinů. Obecný polynom popisující BSDF funkci obsahuje tři symetrické proměnné U , V a W . V tomto formalismu je rozptyl od izotropního povrchu symetrický s ohledem na rovinu dopadu a kolmici na rozhraní. Proměnné mají následující tvar:

$$U = \cos^2 \theta_i + \cos^2 \theta_s, \quad V = \cos \theta_s \cos \theta \quad \text{a} \quad W = \cos \theta.$$

Polynomiální model se zapisuje ve tvaru:

$$\log(\text{BSDF}) = \sum_{k=0}^n \left\{ \sum_{i=0}^{m[-k]} \sum_{j=0}^i c_{ijk} (U^i W^i + U^j W^j) + \sum_{i=1}^l c_{ik} \log(1 + d^i (U - 2V + W)) \right\} \frac{V^k}{2}. \quad [20]$$

Ačkoliv toto vyjádření vypadá hrozivě, v prostředí vytváření polynomiálního modelu v programu ASAP (viz Obrázek 10) zadáváme pouze hodnoty N a M odpovídající rozměrům polynomu (obvykle N = 2 a M = 2). Stiskem tlačítka Apply volbu potvrdíme. ASAP je schopen při jednom výpočtu počítat s maximálně deseti členy. Jejich počet omezíme volbou . Obdobně jako u Harveyho modelu se stiskem tlačítka Auto Fit spustí výpočet. Automaticky vypočtené hodnoty jednotlivých polynomů neodpovídají naměřeným datům, proto je nezbytná další korekce. Graf s hodnotami a prokládanými křivkami je naprosto shodný jako na Obrázku 9. Po vhodném „nařítování“ postupujeme při kopírování hodnot obdobně jako u Harveyho modelu. [19]



Obrázek 10. Polynomiální model v programu ASAP.

9.2.4. BSDFDATA model

Toto je poslední model, který byl použit při zpracování této diplomové práce. Na rozdíl od předešlých modelů, kdy naměřená data prokládáme křivkami, které jsou zadány několika parametry, což zjednoduší a zkrátí výpočet, tak tento model se pracuje přímo s naměřenými daty, s nichž vytvoříme textový soubor ve tvaru, který ukazuje Tabulka 3.

MODELS		
BSDFDATA ANGLES !! PLOT 0 30		
15	0	
-90	0	0.0030767107
-89	0	0.0025785764
-88	0	0.00301810774
-87	0	0.0030083407
-86	0	0.003076712
-85	0	0.00359438174

Tabulka 3. Soubor pro vkládání BSDF dat nazvaný PBT_33_REFL_BSDF.inr.

Hodnoty 0 a 30 za slovem PLOT na druhém řádku jsou námi definované úhly odrazu. Číslo 15 na třetím určuje dopadový úhel v horizontálním směru a 0 dopadový úhel ve vertikálním směru, který je při měření pouze v horizontálním řezu nulový. Tento soubor se poté při výpočtu vyvolává příkazem \$READ NÁZEV SOUBORU (v našem případě: \$READ PBT_33_REFL_BSDF.inr), který zadáváme do souboru popisující optickou soustavu.

9.2.5. USERBSDF model

Tento model nebyl vytvářen během zpracování této diplomové práce, ale byl společností VISTEON dodán německou firmou OPSIRA specializující se na optická měření. Tento model je vhodný jak na izotropní, tak i na anizotropní povrchy. Používali jsme jej k porovnávání s Harveyho, Polynomiálními a BSDFDATA modely. Příklad USERBSDF modelu pro propustný materiál PMMA 39 je nyní uveden:

```

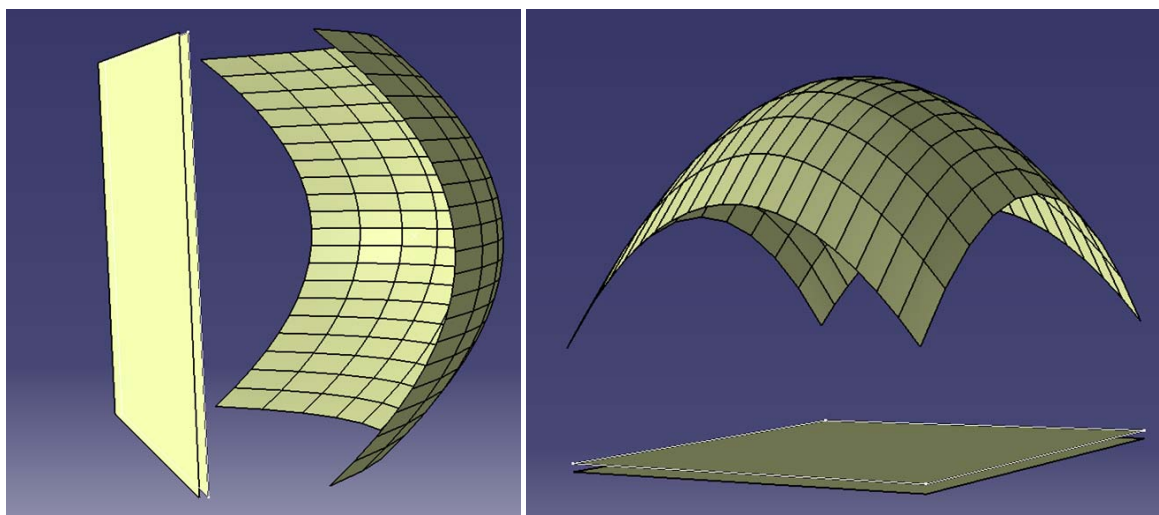
$FCN
$FCN KW COS(SQRT(_1))
$FCN PMMA_39 PSI=ACOS[_2+SQRT(1-_1)*SQRT(1-_3)],
A2=0.0003,
B2=5,
A3=0.0002,
B3=15*(1+0.5*ASIN(_3)),
A4=0.02,
B4=18.5*(1+0.0*ASIN(_3)),
A5=0.9*(1-1*(ASIN(_3))^1),
B5=8.8*(1+0.6*ASIN(_3)),
TST=0.002*SIN(_1)^4,
LAMBERT=A2*COS(SQRT(_1))^B2/KW(_),
GAUSS_1=1*(A3*EXP(-(PSI^2)/(B3)^2)/(KW(_))^4),
GAUSS_2=1*(A4*EXP(-(PSI^2)/(B4)^2)/(KW(_))^4),
GAUSS_3=1*(A5*EXP(-(PSI^2)/(B5)^2)/(KW(_))^1),
(TRAN)*12.7*(LAMBERT+GAUSS_1+GAUSS_2+GAUSS_3+TST)
MODEL

```

\$FCN označuje funkci s proměnnými $_1$, $_2$ a $_3$, které pro izotropní povrchy odpovídají proměnným U , V a W z polynomiálního modelu. Tvorbou těchto modelů jsem se v rámci této diplomové práce podrobněji nezajímá, podrobnosti o této problematice lze nalézt v [20].

9.2.6. Příklad použitý na porovnávání vytvořených modelů

Abychom získali představu o chování rozptylových modelů získaných z měřených dat a také abychom tyto modely mohli kvalitativně porovnávat s modely, které na základě vlastních měření zhotovila firma OPSIRA, vytvořili jsme simulaci velmi jednoduchého optického systému velmi často používaného v automobilových světlometech. Základ tvoří parabolický odražeč, jehož povrch se skládá ze segmentů-obdélníkových plošek. Ohnisková vzdálenost paraboly má hodnotu 20mm. V ohnisku se nachází zdroj, konkrétně žárovka používaná v automobilovém průmyslu H7. V případě odrazných vzorků jsme vytvořený model přiřadili povrchu paraboly, u propustných je nutno doplnit před parabolickou plochu propustnou destičku, na jejíž vnější povrch jsme aplikovali rozptylový model, a dále také nepropustný box okolo paraboly a destičky, aby nemohlo na detektor dopadnout světlo od zdroje, které neprošlo destičkou s rozptylujícím povrchem. Rozměry prvků (parabolická plocha, destička, box) a jejich vzájemná poloha se navrhuje v CAD programu (CATIA, INVENTOR) a následně ukládají v kompatibilním formátu s programem ASAP a to .igs. Popisovanou sestavu si lze prohlédnout na Obrázku 11.



Obrázek 11. Geometrie použitá ke kontrole výsledků. Rozptylující povrch na vnější straně destičky, u odrazných vzorků rozptylující struktura na povrchu paraboly, destičku již neuvažujeme.

Nyní bude uveden obsah souboru .inr, který používá program ASAP k výpočtu, pro propustný materiál PMMA 11030. Obsahuje odkazy na soubory .igs a také definice rozptylových modelů, jelikož se jedná o transparentní vzorek, je zapotřebí propustné destičky a absorpčního boxu. Základní příkazy jsou popsány v kódu programu.

```

*****
*          ASAP program for raytracing of reflector created by          *
*          the freeform program                                         *
*****
SYS NEW
$CASE UPPER
$IIO OUTPUT C346_LB_L.OUT 12
UNITS MM
HALT 3
ACCURACY LOW
SPLIT 2
FRESNEL AVE
XMEMORY MIN

NUMRAYS=500 !! pocet paprsku ve vypoctu

M1="PMMA_11030-TRANS_MOJE_1" !! nazev vytvareneho souboru

*****Vlastnosti povrchu*****
REFL=0.80000 !! pokoveny reflektor
ABSORB=0

COATINGS
(REFL) 0 'REFL'

COATING PROPERTIES
0 1E-30 'PROPUSTNOST1'

COATINGS
(ABSORB) 0 'ABSORB'

MEDIA
1.493 'PMMA' !!index lommu materialu

NUMRAYS=(NUMRAYS)*1000
MODEL !! soucet 2 Harveyho modelu
HARVEY 0.8618 -6.0604 0.1182 0.8156 0.4373
HARVEY 6.76E-3 -0.6205 0.0264 3.3118 6.9085
SUM .1 .2 !!PMMA 11030-TRANS-NORM-MAX V NULE.fit

RETURN
*****Geometrie*****
&REFLEKTOR !!parabolicky odrazec, pro odrazné vzorky rozptyl. povrch, viz vnejsi povrch
desticky.
$ECHO NONE
$DO 1 (200) 1
{
OBJECT .?; INTERFACE 0.8 0
}
$ECHO

&INNER_SURF !!vnitni povrch propustné desticky- není u odrazných vzorku
$ECHO NONE

```

```

$DO 1 (1) 1
{
  OBJECT .?; INTERFACE COATINGS +BARE AIR PMMA
}
$ECHO

&OUTER_SURF_GRAIN      !!vnější povrch desticky- není u odraz. vzorku
$ECHO NONE
$DO 1 (1) 1
{
  OBJECT .?; INTERFACE COAT +BARE AIR PMMA
  ROUGHNESS MODEL 1      !!rozptyl. model-prikaz ROUGHNESS MODEL
}
$ECHO

&ABSORB_BOX            !! absorpci box.
$ECHO NONE
$DO 1 (4) 1
{
  OBJECT .?; INTERFACE COATINGS "ABSORB"
}
$ECHO

*****Nastavení zdroje*****

EMITTING DATA "C:\SOURCES\HAL_BULB\h7\h7bro_5m.dis" (NUMRAYS)

!!SPOT POS
!!WIN Z Y
!!PLOT FAC 10 10
!!$VIEW
!!$IO
*****Kulovy detector s polomerem DRAD*****

DRAD=25000              !!polomer detektoru
SURFACE
ELLIPSOID 3@(DRAD) 0 0 0
OBJECT 'DETECTOR'

*****Trasovani:*****

TRACE
CONSIDER ONLY DET

H_MIN=-65              !!vypocet v horizontalnim smeru -65 az +65 stupnu
H_MAX=65
V_MIN=-65              !!vypocet v vertikalnim smeru -65 az +65 stupnu
V_MAX=65
STEP_H=0.5             !!krok vypoctu v horizontalnim smeru 0,5 stupne
STEP_V=0.5             !!krok vypoctu v vertikalnim smeru 0,5 stupne
H_MIN=H_MIN-STEP_H/2
H_MAX=H_MAX+STEP_H/2
V_MIN=V_MIN-STEP_V/2
V_MAX=V_MAX+STEP_V/2
HN=(H_MAX-H_MIN)/STEP_H
VN=(V_MAX-V_MIN)/STEP_V

RADIANT -Z (V_MIN+90) (V_MAX+90) (VN) -(H_MIN) -(H_MAX) (HN)

```

```
DISPLAY  
WRITE M1"  
RETURN
```

```
$TIC
```

```
STATS
```

```
RAYS 0
```

```
SIO OUTPUT CLOSE
```

```
END
```

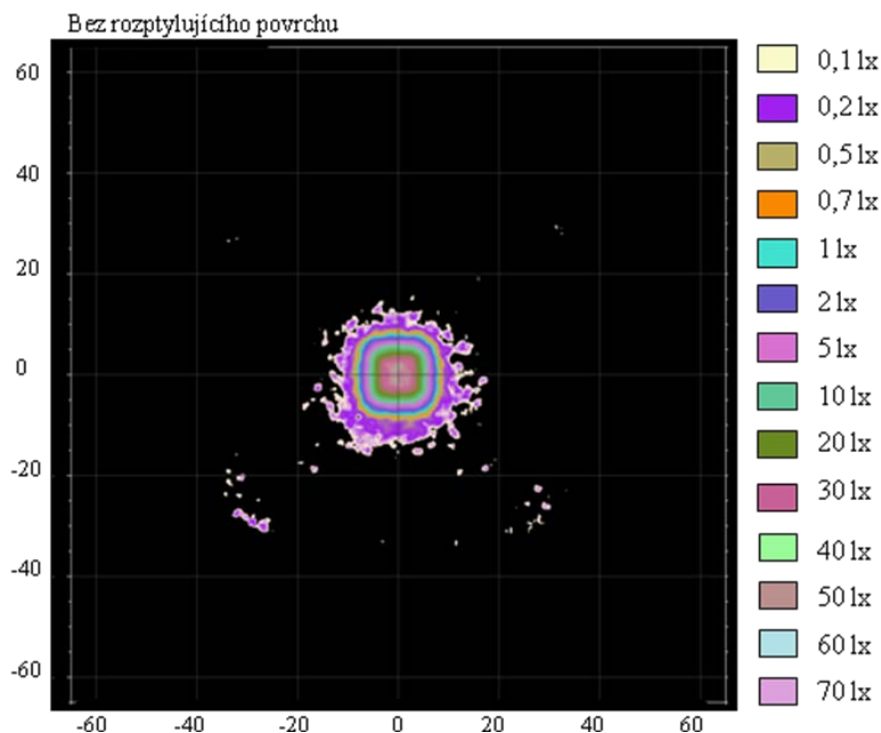
Toto je obsah souboru používaný pro výpočet, po jeho výpočtu dostaneme na výstupu soubor .din, v našem případě PMMA_11030-TRANS_MOJE_1.din. S tímto souborem se dále pracuje v programu Beam Analyzer, který umožňuje zobrazit více výsledných světelných stop najednou, což je vhodné při jejich porovnání. Při zadávání rozptylových modelů do tohoto souboru existují odlišnosti při definování geometrie, na které bude umístěn rozptylující povrch.

- Harveyho, Polynomiální a BSDFDATA model příkaz: ROUGHNESS MODEL 1.
- USERBSDF model příkaz: SCATTER MODEL 1

```
TOWARDS REFL 10 3.14/2 0 0 2
```

Parametr TOWARDS REFL-pro odrazné vzorky, nebo TOWARDS TRANS-pro propustné určuje směry, ve kterých jsou paprsky rozptylovány. První číslo určuje množství paprsků na rozptylujícím povrchu. V našem případě deset znamená, že z jednoho dopadajícího bude po odrazu nebo průchodu 10 paprsků. Toto je výhodné pro zpřesnění výpočtů, pokud nám na povrch dopadá malé množství paprsků.

Pro získání představy, jak vypadá rozložení světla od parabolického odražeče v případě, že žádnému povrchu nebude přiřazen rozptylující povrch, je na Obrázku 12 zobrazen tento případ.



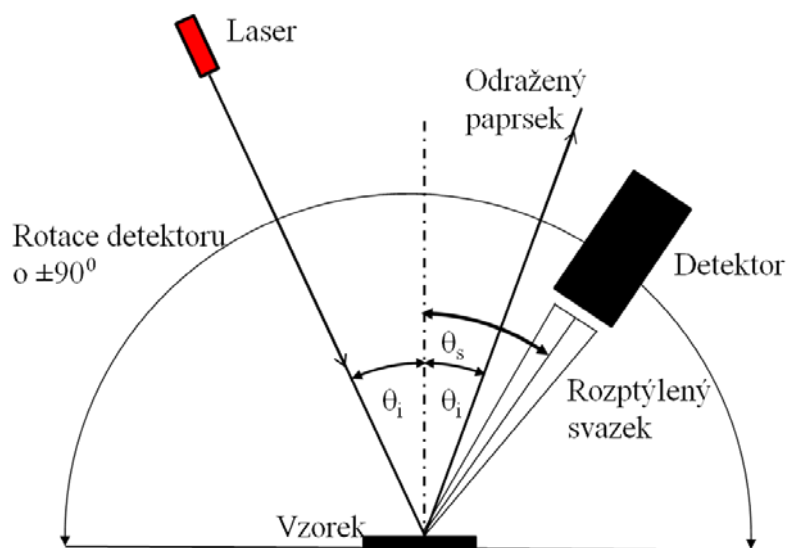
Obrázek 12. Uvažovaná geometrie bez použití rozptylujících povrchů.

Bez jakéhokoliv rozptylného povrchu má světelná stopa velikost přibližně $\pm 15^\circ$, přičemž maximální velikost osvětlení je 39,5lx ve středu této stopy. Artefakty mimo centrální světelnou stopu jsou způsobeny zdrojem (žárovka H7), jehož model vytvořený na základě měření reálného zdroje obsahuje databáze programu ASAP. Jeho vlastnosti nejsou stejně jako u skutečné žárovky dokonalé (vliv vnitřní konstrukce ovlivňující šíření světla atd.). Tyto simulace byly učiněny pro odrazné materiály (PBT MT11030, PBT Crastin 33 a PC LS2 33) a pro propustné (PC LS2 30, PMMA 11030 a PMMA 39). Tyto kombinace materiálů a drsností jejich povrchů byly vybrány pro měření, neboť tyto vzorky změřeny u firmy OPSIRA. V následující kapitole budou srovnány výsledky těchto nezávislých měření. A to jak přímo naměřené hodnoty osvětlení tak hlavně výsledky pramenící s rozdílných rozptylových modelů.

10. Porovnání naměřených hodnot s daty firmy OPSIRA

10.1. Geometrie měření použité firmou OPSIRA

Rozdílem oproti našemu měření je skutečnost, že firmy OPSIRA používala odlišné uspořádání při měření. Zatímco v našem měření je detektor pevný a otáčí se měřený povrch a laser, tak v případě jejich měření je pevný zdroj a měřený vzorek a rotuje detektor kolem vzorku. Příčina tohoto rozdílu pochází z použití goniometru pro naše měření. Tento přístroj má již pevně danou geometrii (pevný detektor, otočný stůl na vzorek a zdroj). Při měření rozptylu je nutné zachovat daný dopadový úhel na vzorek, nelze tedy na otočný stůl umístit pouze zdroj nebo měřený vzorek. Geometrie měření firmy OPSIRA je zobrazena na Obrázku 1.



Obrázek 1. Měření firmy OPSIRA.

Přesné rozměry zařízení firmy OPSIRA se mi nepodařilo zjistit. Podle informací pana Ferbase byla vzdálenost mezi vzorkem a laser kolem 3 metrů a mezi vzorkem a detektorem kolem 1 metru. Jako Zdroj byl použit He-Ne laser s vlnovou délkou 632nm. Ostatní parametry měření jako rozsah a krok detekce byly stejné (od -90° do $+90^\circ$, a krok $0,1^\circ$). Lišila se pouze jedna hodnota dopadového úhlu. Zatímco my jsme používali dopadové úhly 0° , 15° , 30° a 45° , tak jejich měření 2° , 15° , 30° a 45° . Důvodem proč místo nulového úhlu zvolili dva stupně, bylo stínění detektorem v poloze, kdy jsou laser a detektor za sebou. Při nulovém dopadovém úhlu by došlo k zastínění dopadajícího záření a nebyla by registrována informace o velikosti osvětlení, která bude v této pozici maximální (zákon odrazu). Díky odchylce dva stupně nebude dopadající svazek omezen detektorem a odražený paprsek podle zákona odrazu lze detekovat. Omezením svazku v měřícím

zařízení firmy OPSIRA nebylo díky použití malého detektoru výrazné. Na Grafu 1 až grafu 3. lze toto stínění pozorovat v blízkosti nulového úhlu.

10.2. Měřené vzorky

Společnost Visteon-Autopal si nechala u německé firmy OPSIRA proměřit několik propustných a odrazných vzorků, které se liší drsností struktury a také materiálem. Konkrétní příklady jsou uvedeny v Tabulce 1.

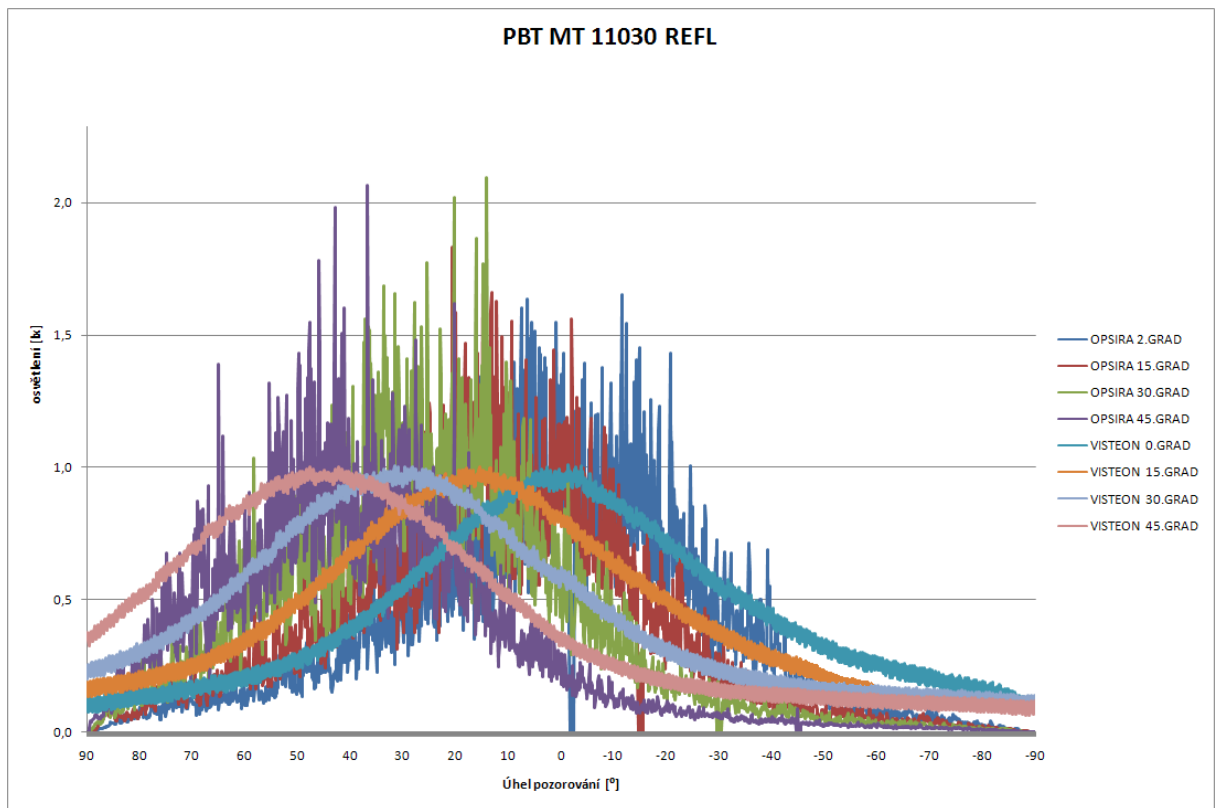
Propustné vzorky	Odrážné vzorky
PC LS2 30	PC LS2 33
PC LS2 36	PBT 33
PMMA MT 11030	PBT MT 11030
PMMA 39	

Námi proměřované vzorky byly stejné jako vzorky uvedené v Tabulce 1., až na materiál PC LS2 36, který neměl pan magistr Ferbas k dispozici. Důvodem výběru stejných vzorů byla možnost porovnání našich výsledků z výsledky naměřených firmou OPSIRA. Pan Ferbas mi zapůjčil naměřená data, která mají k dispozici od firmy OPSIRA, a také simulace podle naměřených dat určené pro program ASAP. Tyto modely byly vytvořeny použitím rozptylového modelu USERBSDF. Při našem zpracovávání jsme vytvářeli rozptylové modely pomocí Harveyho, Polynomiálního a BSDFDATA modelu. Jejich tvorba je snadnější a také jsou při simulacích osvětlovacích soustav výpočetně rychlejší než USERBSDF model. Z dat firmy OPSIRA jsme také vytvořili Harveyho model, abychom se přesvědčili, zda odlišné přístupy při tvorbě modelů povedou ke stejným výsledkům.

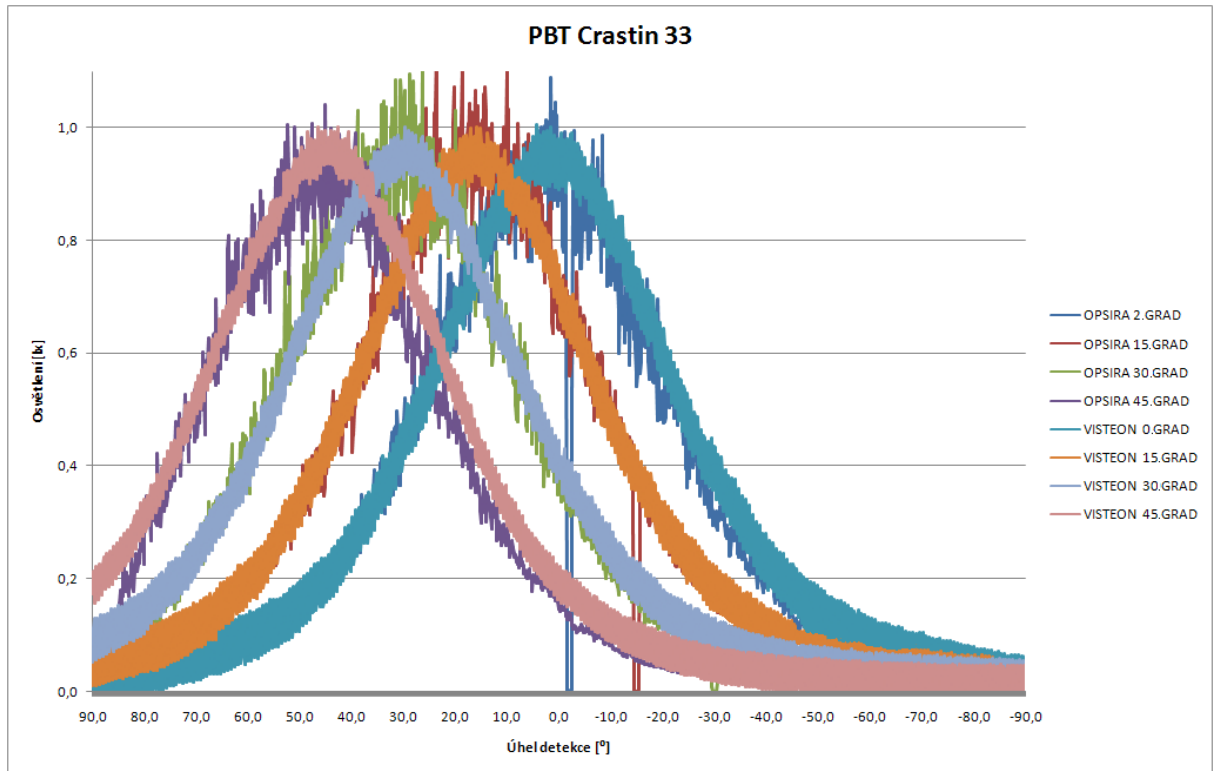
10.3. Porovnání naměřených dat

Nyní se podíváme, jak se shodují průběhy naměřených hodnot od firmy OPSIRA a našeho měření. Data firmy OPSIRA jsou velmi zašuměná, lze si toho všimnout na Graf 1. až Graf 6. Také maximální hodnoty dosahují vyšších hodnot než při našem měření. Z tohoto důvodu byly naše data normované na jednotku. U hodnot firmy OPSIRA musela být zvolena střední hodnota, neboť průběh není hlavně u odrazných vzorků zcela jasný. Takto upravená data lze srovnat. Následující grafy Graf 1. až Graf 6. srovnávají námi změřená data, jenž jsou označena jako VISTEON 0.GRAD až VISTEON 45.GRAD, a data firmy OPSIRA značená OPSIRA 2.GRAD až OPSIRA 45.GRAD. Lze si povšimnout, že průběhy naměřených dat se velmi dobře shodují.

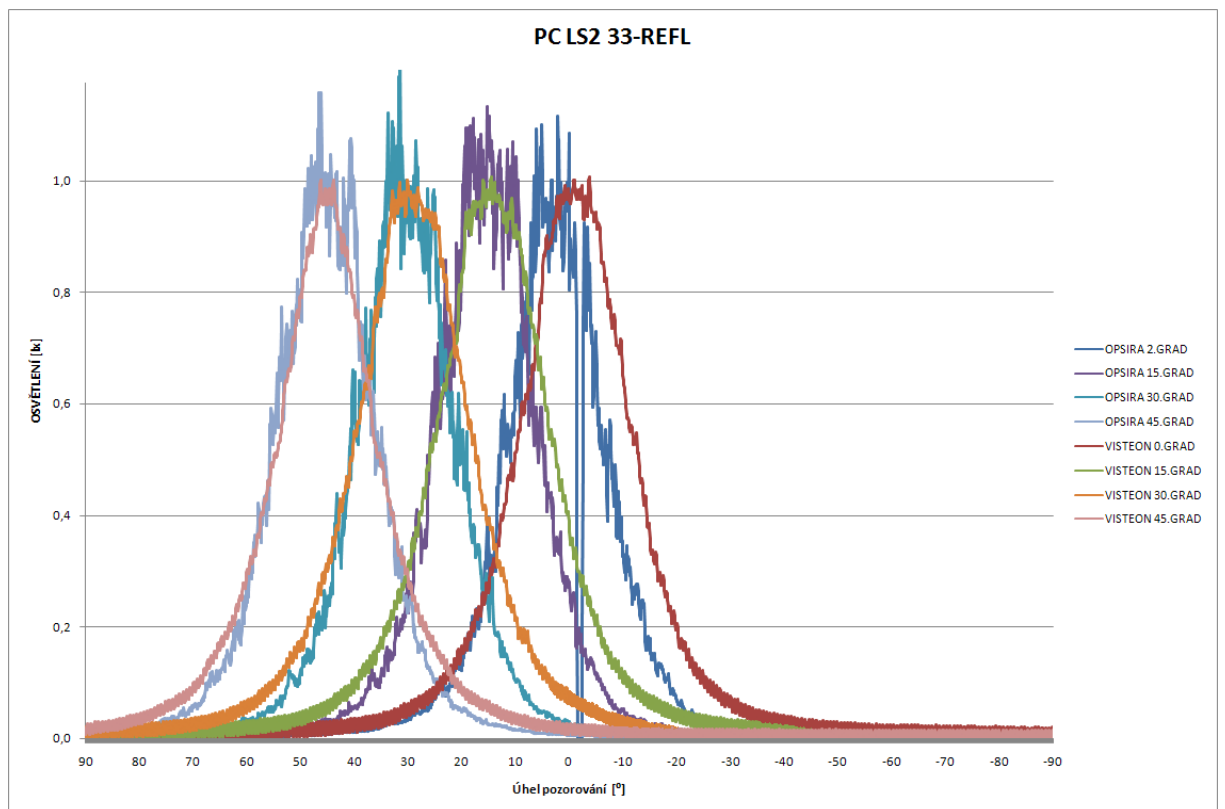
10.3.1. Srovnání naměřených dat pro odrazné vzorky



Graf 1. Průběhy naměřených dat pro odrazný vzorek PBT MT11030.



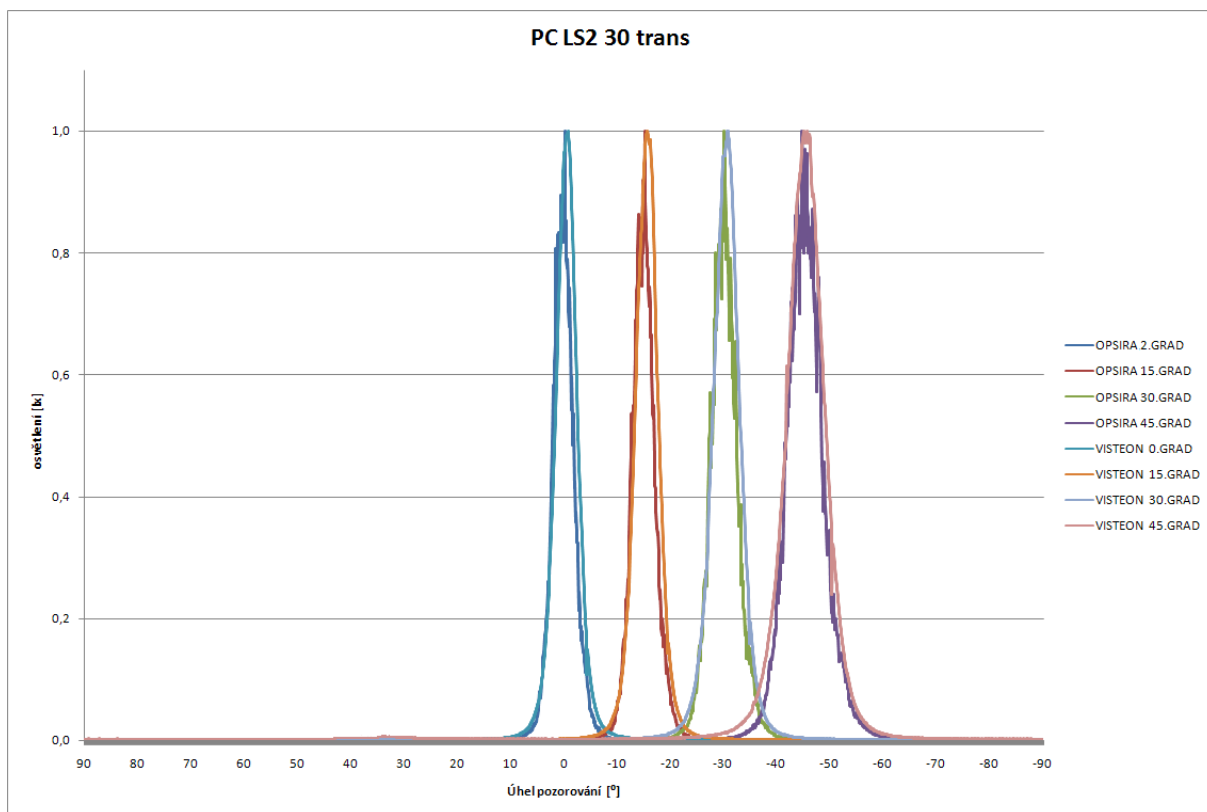
Graf 2. Odrazný vzorek PBT Crastin 33.



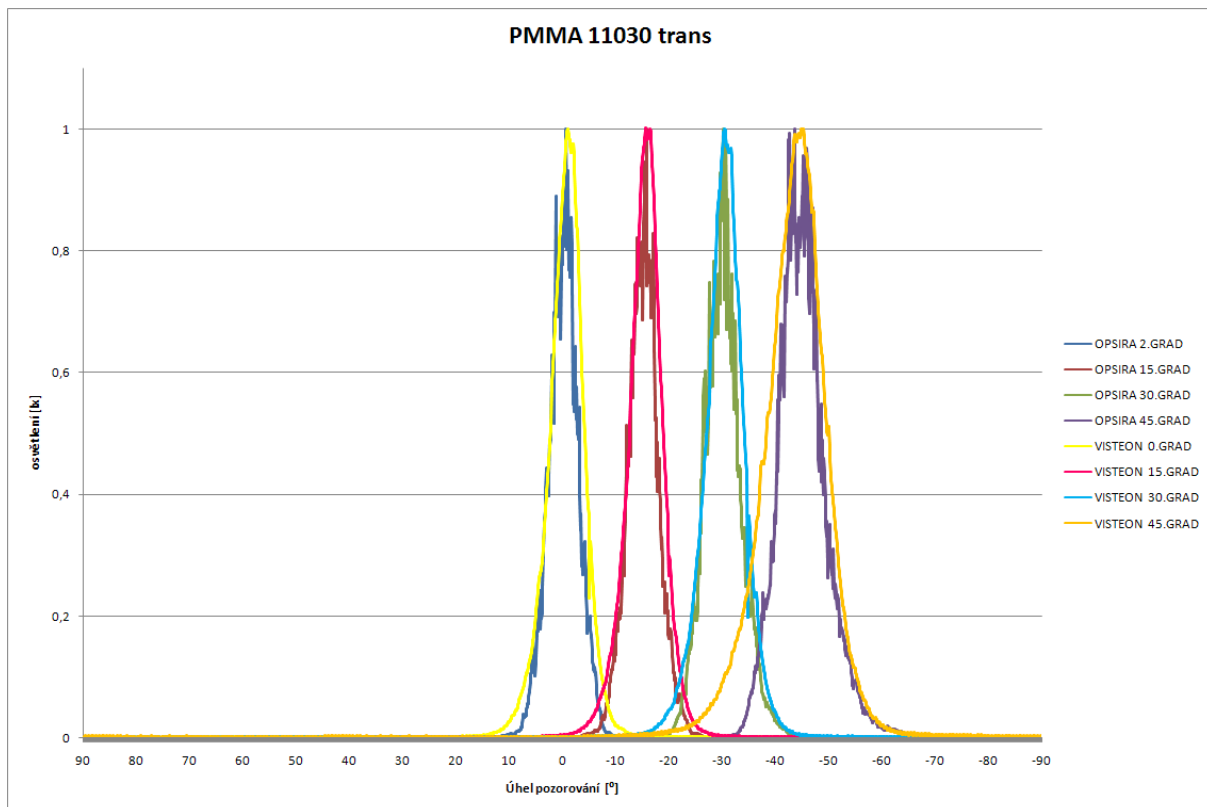
Graf 3. Poslední odrazný vzorek PC LS2 33.

Výše uvedené grafy srovnávaly průběhy odrazivostí z měření provedených firmou OPSIRA s měřením uskutečněným při zpracovávání diplomové práce. Nyní bych měl připomenout, že číslo za vzorkem (11030 v Grafu 1. - z něj je podstatné číslo 30 a 33 u Grafů 2. a 3.) udává velikost elektrického proudu použitého při elektroerozivním obrábění. Velikost povrchové struktury, kterou tento proud při obrábění vytvoří, závisí na typu použitého materiálu. Rozdíly jsou velmi dobře patrné z Graf 2 a Graf 3, na kterých jsou zachyceny průběhy odrazivosti pro dva rozdílné materiály obráběné stejnou velikostí elektrického proudu. Není tedy možné pouze proměřit různě zdrsněné povrchy jednoho materiálu, ale je nutno vyhodnotit konkrétní povrch na daném materiálu. Vzorek PBT MT 11030, je v podání firmy OPSIRA velmi zašuměly. U vzorků PBT 33 a PC LS2 33 je situace lepší, a lze proto lépe porovnat průběhy. U PBT 33 máme velmi dobrou shodu, ovšem u PC LS2 33 a i u PBT MT 11030 lze vidět rozdíly pro větší hodnoty dopadových úhlů. Příčinou těchto odchylek je s největší pravděpodobností parazitní odraz od měřícího přípravku, nebo od goniofotometru.

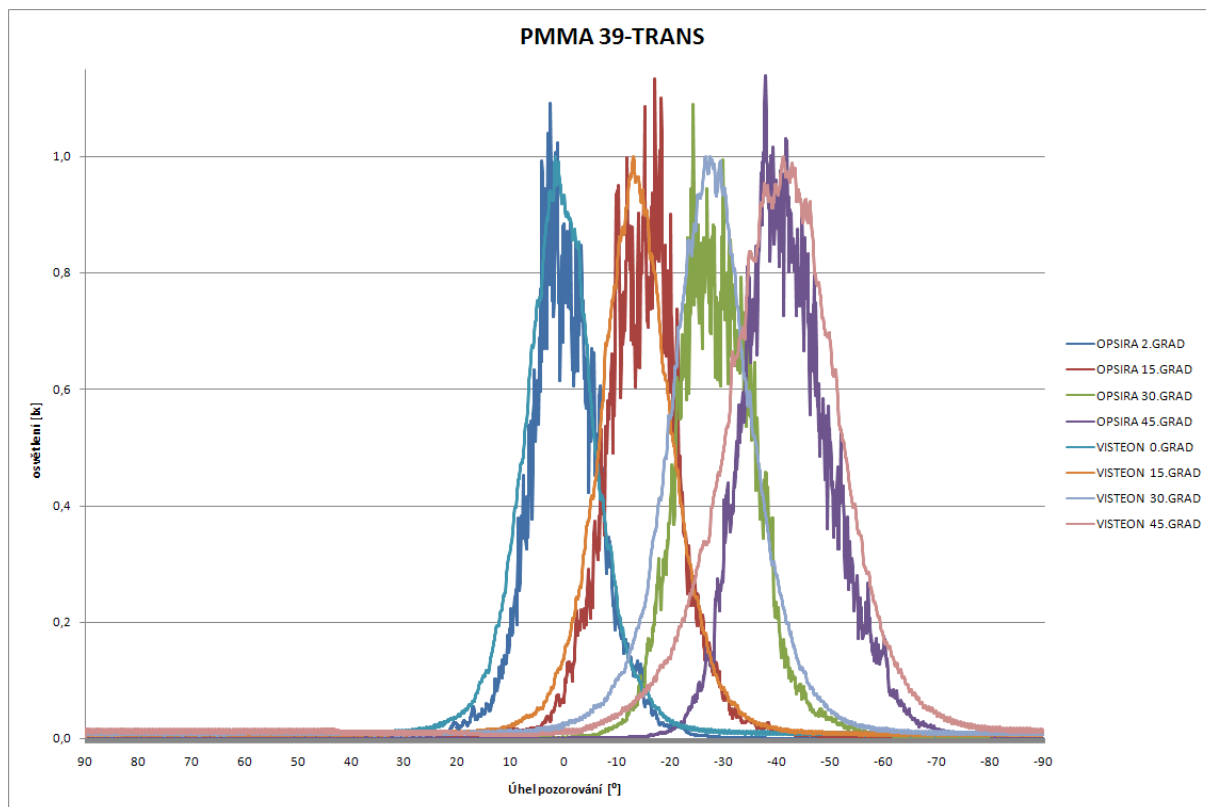
10.3.2. Srovnání naměřených dat pro propustné vzorky



Graf 4. Propustný vzorek PC LS2 30.



Graf 5. Propustný vzorek PMMA 11030.



Graf 6. Poslední porovnávaný propustný vzorek PMMA 39.

Grafy 4. až 6. Porovnávají naměřená data propustných vzorků získaná při měření firmy OPSIRA s měřeními provedenými při zpracování diplomové práce. Opět je vidět velmi dobrá shoda, nejvíce pro materiál PC LS2 30 zobrazený na Graf 4. V případě Grafů 5. a 6. jsou odchylky nejvíce pro dopadové úhly 45° , ale nejsou výrazné, spíše v oblasti nízkých intenzit. Rozdíly budou podobně jako u odrazných vzorků s nejpravděpodobněji způsobeny nechtěnými reflexemi od měřicího přípravku, nebo od goniofotometru.

10.4. Porovnání vytvořených rozptylových modelů

V předchozí kapitole jsme si ukázali tvorbu rozptylových modelů a popsali příklad, který jsme použili pro jejich porovnávání (parabolický odrazeč, u odrazných vzorků rozptylující povrch na tomto prvku, u propustných před tímto odražečem propustná destička s rozptylujícím povrchem na vnější ploše). Tvorba rozptylových modelů a jejich použití je dosti časově náročná, počínaje zpracováním naměřených dat do vhodného tvaru, proložením naměřených dat křivkami, které jsou určeny hodnotami proměnných od jednotlivých rozptylových modelů, výpočtem zkoumané sestavy a konče porovnáním světelných stop dané sestavy s různými rozptylovými modely, které byly vytvořeny různými přístupy (Harvey, Polynomial, BSDFDATA, USERBSDF), od stejných vzorků

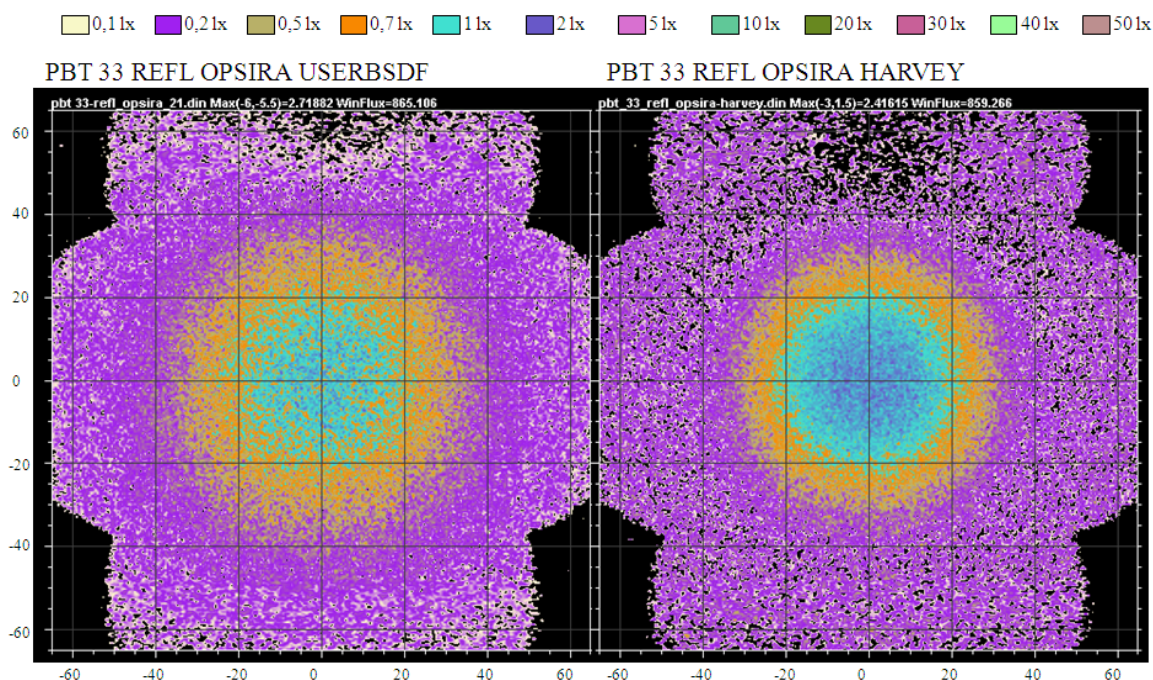
v programu BeamAnalyzer. Z tohoto programu pocházejí také všechny dále uvedené ukázky světelných stop při použití rozdílných rozptylových modelů. Nejdříve si ověříme na datech firmy OPSIRA, zda modely vytvořené různými způsoby povedou ke stejnému cíli.

10.4.1. Rozptylové modely z naměřených dat firmy OPSIRA

Firma OPSIRA dodala společnosti VISTEON rozptylové modely USERBSDF. Konzultant Mgr. Petr Ferbas mi sdělil, že počítačové simulace vlastností světlometů s použitím těchto modelů velmi dobře odpovídají vyrobeným prototypům, a proto bereme tyto modely za referenční. Na příkladu dvou odrazných a propustných vzorků se podíváme, jak se shodují různé rozptylové modely vycházející ze stejných dat. Vždy srovnáváme model USERBSDF s Harveyho nebo BSDFDATA modelem.

- **Odrasné vzorky:**

Prvním příkladem je vzorek PBT 33, z Obrázku 2. Ize vidět, že ačkoliv použitím modelu USERBSDF dostáváme ve střední části větší výkyvy ve velikosti osvětlení než u Harveyho modelu (hodnota 0,7lx-oranžová barva se vyskytuje také ve středu u USERBSDF, narozdíl od Harveyho modelu kde převažuje velikost 2lx-tmavě modrá), tak maximální velikost osvětlení má u obou těchto modelů velmi podobnou hodnotu: USERBSDF $E=2,71\text{lx}$ a Harvey $E=2,41\text{lx}$. Také celkový světelný tok si odpovídá: USERBSDF $\Phi=865,1\text{lm}$ vs. Harvey $\Phi=859,2\text{lm}$. Pro nás je ovšem nejdůležitější jakým způsobem povrch rozptyluje záření. V předchozí kapitole na Obrázku 12. je zobrazena situace bez použití rozptylujících povrchů. Pokud se zaměříme na osvětlení 0,7lx zjistíme, že bez rozptylujících povrchů dostáváme tuto hodnotu zhruba v 8° , u materiálu PBT 33 s použitým modelem USERBSDF přibližně v 28° a u modelu Harvey v 26° . Lze tedy říci, že použití modelu USERBSDF nebo Harveyho pokud vycházíme ze stejných dat, vede k rovnocenným výsledkům.



Obrázek 2. PBT 33 odrazný vzorek.

Nyní uvedu data rozptylových modelů pro materiál PBT 33.

```

USERBSDF:   $FCN
                $FCN KW COS(SQRT(_1))
                $FCN PBT_CR_33 PSI=ACOS[_2+SQRT(1-_1)*SQRT(1-_3)],
                A2=0.023,
                B2=2.5,
                A3=0.77,
                B3=26*(1+0.4*ASIN(_3)),
                A4=0.12,
                B4=50,
                A5=1,
                B5=1,
                LAMBERT=A2*COS(SQRT(_1))^B2/KW(_),
                GAUSS_1=1*(A3*EXP(-(PSI^2)/(B3)^2)/(KW(_))^2.5),
                GAUSS_2=1*(A4*EXP(-(PSI^2)/(B4)^2)/(KW(_))^3),
                GAUSS_3=0*(A5*EXP(-(PSI^2)/(B5)^2)/(KW(_))^1),
                (REF)*1.06*(LAMBERT+GAUSS_1+GAUSS_2+GAUSS_3)
                MODEL
                USERBSDF PBT_CR_33 'PBT_CR_33'

```

K definici geometrického prvku, na který se aplikuje rozptylový model, se následně doplní:

```

SCATTER MODEL 1
TOWARDS REFL 1 3.14/2 0 0 2

```

```

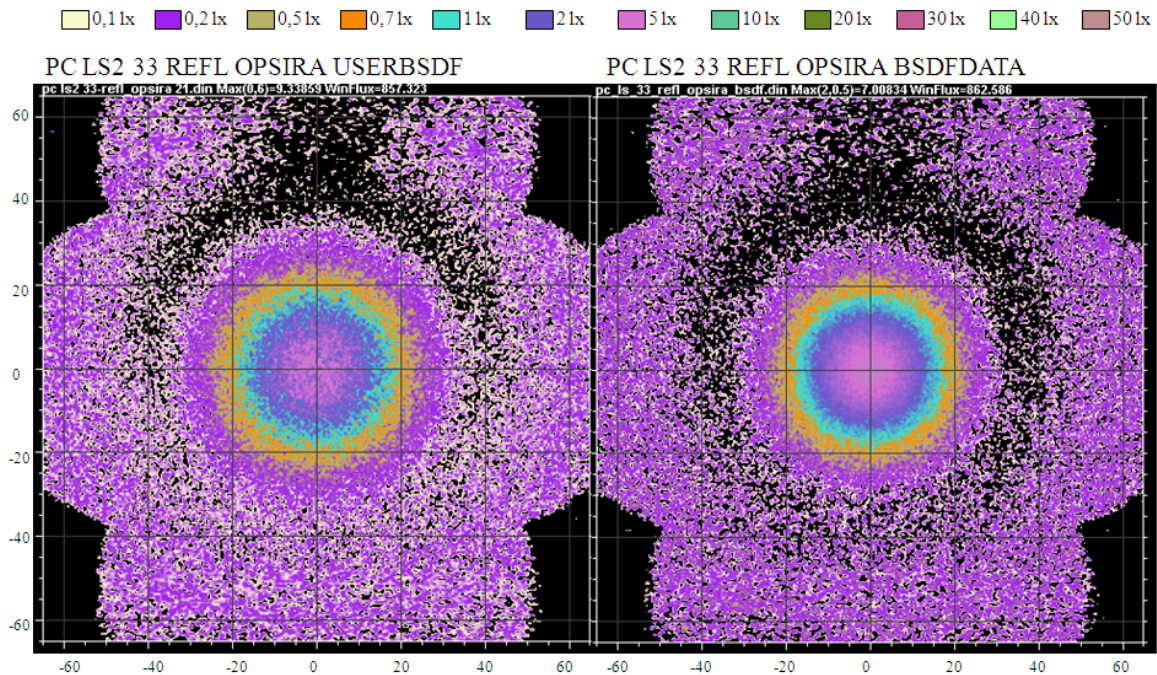
Harvey: MODEL
            HARVEY 1.24E-5 -0.6686 0.4822 8.54E-3 17.1215
            HARVEY 1.0470 -4.8095 0.7476 7.63E-5 0.9586
            SUM .1 .2 !!pbt_33_refl-opsiraharvey.fit

```

K definici daného geometrického prvku se píše: ROUGHNESS MODEL 1

Tento model je dán součtem dvou Harveyho modelů.

Dalším porovnávaným materiálem je hliníkem pokovený PC LS2 33. Na srovnání s modelem USERBSDF jsem nyní použil model BSDFDATA. I při použití tohoto modelu dochází k velmi dobré shodě. Pokus se opět podíváme na osvětlení 0,7lx tak udíme, že u USERBSDF (maximální osvětlení $E=9,3lx$ a celkový světelný tok $\Phi=857,3lm$) se nachází přibližně v okolí 20° . U modelu BSDFDATA ($E=7lx$ a $\Phi=862,5lm$) je situace podobná, hodnotu 0,7lx nalezneme v okolí 21° . Tedy i o modelu BSDFDATA lze říci, že odpovídá modelu USERBSDF.



Obrázek 3. PC LS2 33 odrazný vzorek.

Uvedu zde pouze hodnoty pro model USERBSDF, neboť model BSDFDATA se vytváří použitím souboru s naměřenými data. Počet těchto dat je vysoký a nebude zde zobrazen. U definice komponenty, které je přiřazen rozptylový model se uvede ROUGHNESS MODEL 1

```

USERBSDF:   $FCN
                $FCN KW COS(SQRT(_1))
                $FCN PC_LS2_33 PSI=ACOS[_2+SQRT(1-_1)*SQRT(1-_3)],
                A2=0.0006,
                B2=0.5,
                A3=0.008, !!*(1+0.1*(ASIN(_3))^1),
                B3=45, !!*(1-0.2*ASIN(_3))
                A4=0.088,
                B4=23,
                A5=0.9,
                B5=12,
                LAMBERT=A2*COS(SQRT(_1))^B2/KW(_),
                GAUSS_1=1*(A3*EXP(-(PSI^2)/(B3^2))/(KW(_))^3),
                GAUSS_2=1*(A4*EXP(-(PSI^2)/(B4^2))/(KW(_))^3),
                GAUSS_3=1*(A5*EXP(-(PSI^2)/(B5^2))/(KW(_))^1),
                (REF)*5.1*(LAMBERT+GAUSS_1+GAUSS_2+GAUSS_3)
  
```

MODEL
 USERBSDF PC_LS2_33 'PC_LS2_33'

K definici daného geometrického modelu se doplní: SCATTER MODEL 1
 TOWARDS REFL 1 3.14/2 0 0 2

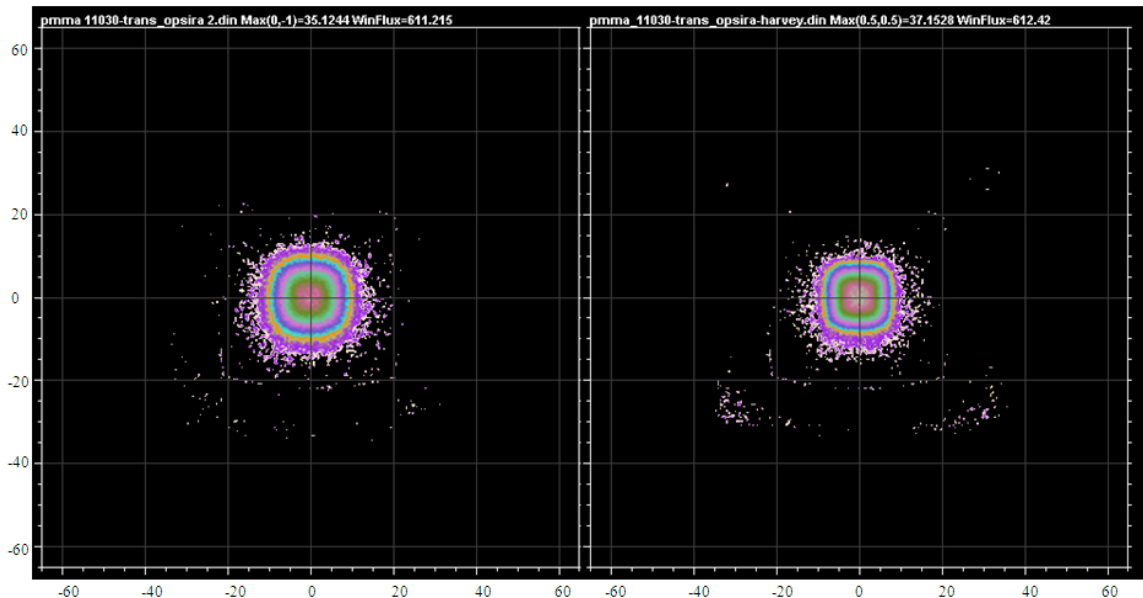
- **Propustné vzorky:**

Abychom jsme si ověřili funkčnost také u propustných vzorků, uvedu zde dva příklady. Prvním je materiál PMMA 11030, jeho model USERBSDF ($E=35,12lx$ a $\Phi=611,2lm$) má velikost osvětlení $0,7lx$ v úhlu pozorování 10° a Harveyho model ($E=37,15lx$ a $\Phi=612,4lm$) jej má v 9° . Také u propustných si tyto dva modely odpovídají.

0,1lx 0,2lx 0,5lx 0,7lx 1lx 2lx 5lx 10lx 20lx 30lx 40lx 50lx

PMMA 11030 TRANS OPSIRA USERBSDF

PMMA 11030 TRANS OPSIRA HARVEY



Obrázek 4. PMMA 11030 propustný vzorek.

Definice rozptylových modelů:

USERBSDF: \$FCN
 \$FCN KW COS(SQRT(_1))
 \$FCN PMMA_MT11030 PSI=ACOS[_2+SQRT(1-_1)*SQRT(1-_3)],
 A2=0.00004,
 B2=5,
 A3=0.85*(1-2.5*(ASIN((_3))^1)),
 B3=2.0*(1+1*ASIN(_3)),
 A4=0.001*(1+2*(ASIN((_3))^1)),
 B4=6.1*(1+1*ASIN(_3)),
 A5=0.00025*(1+2*(ASIN((_3))^1)),
 B5=18,
 A6=0.1,
 B6=3.5*(1+2*(ASIN((_3))^1)),
 LAMBERT=A2*COS(SQRT(_1))^B2/KW(_),
 GAUSS_1=1*(A3*EXP(-(PSI^2)/(B3^2))/(KW(_))^4),
 GAUSS_2=1*(A4*EXP(-(PSI^2)/(B4^2))/(KW(_))^2),
 GAUSS_3=1*(A5*EXP(-(PSI^2)/(B5^2))/(KW(_))^3),

```

GAUSS_4=1*(A6*EXP(-(PSI^2)/(B6)^2)/(KW(_))^3),
(REF)*218*(LAMBERT+GAUSS_1+GAUSS_2+GAUSS_3+GAUSS_4)
MODEL
USERBSDF PMMA_MT11030 'PMMA_MT11030'

```

Ke geometrii daného prvku se doplní: SCATTER MODEL 1

TOWARDS SPEC 10 0.2616 1

Harvey: MODEL

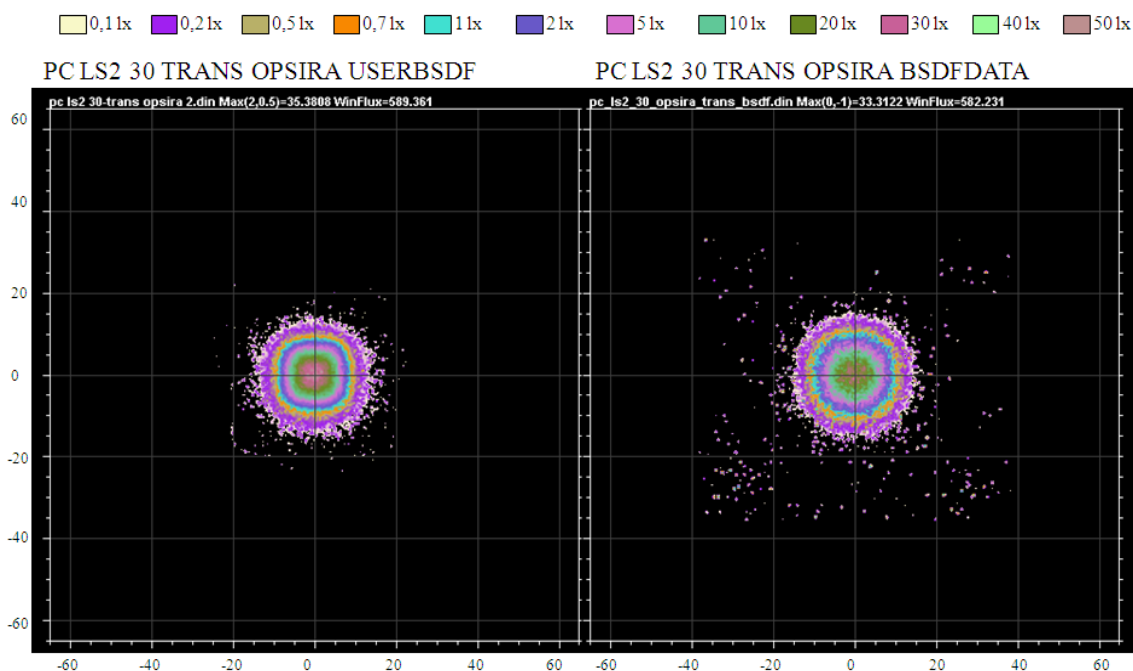
```

HARVEY 0.9890 -8.4565 0.1211 0.4946 0.3557
HARVEY 0.1092 -0.4969 0.69E-6 3.64E-4 1.0482
SUM .1 .2 !!PMMA 11030-TRANS-opsira.fit

```

K definici určitého geometrického prvku se píše: ROUGHNESS MODEL 1

Dalším zkoumaným materiálem je PC LS2 30. Porovnávali jsme jeho rozptylové modely USERBSDF a BSDFDATA. USERBSDF ($E=35,31x$ a $\Phi=589,31m$) má osvětlení $0,7lx$ v 10° a model BSDFDATA ($E=33,31x$ a $\Phi=589,31m$) v 12° . Lze říci, že tyto modely také dobře souhlasí.



Obrázek 5. PC LS2 30 propustný vzorek.

Hodnoty rozptylového modelu USERBSDF vzorku PC LS2 30. Data do modelu BSDFDATA zde uvedena nejsou. U definice komponenty, které je přiřazen rozptylový model se uvede ROUGHNESS MODEL 1

```

USERBSDF: $FCN
$FCN KW COS(SQRT(_1))
$FCN PC_LS2_30 PSI=ACOS[_2+SQRT(1-_1)*SQRT(1-_3)],
A2=0.00001,
B2=400,
A3=0.0007*(1+0.5*(ASIN((_3))^1)),

```

```

B3=13,
A4=0.03,
B4=3.6*(1+0.5*ASIN(_3)),
A5=0.95*(1-3*(ASIN(_3))^1),
B5=1.6*(1+0.6*ASIN(_3)),
LAMBERT=A2*COS(SQRT(_1))^B2/KW(_),
GAUSS_1=1*(A3*EXP(-(PSI^2)/(B3^2))/(KW(_))^4),
GAUSS_2=1*(A4*EXP(-(PSI^2)/(B4^2))/(KW(_))^4),
GAUSS_3=1*(A5*EXP(-(PSI^2)/(B5^2))/(KW(_))^1),
(REF)*355*(LAMBERT+GAUSS_1+GAUSS_2+GAUSS_3)
MODEL
USERBSDF PC_LS2_30 'PC_LS2_30'

```

Ke geometrii prvku, na který nanášíme rozptylový model, se doplní:

```

SCATTER MODEL 1
TOWARDS TRAN 10 0.2616 1

```

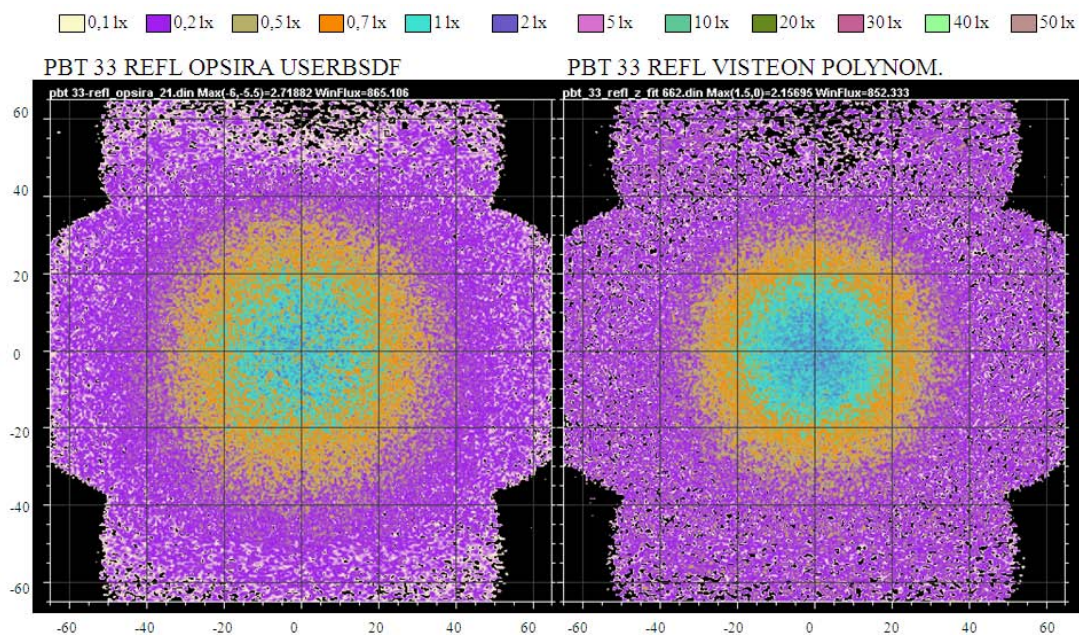
10.4.2. Srovnání rozptylových modelů vytvořených z námi naměřených dat s modely USERBSDF od firmy OPSIRA

V tomto odstavci srovnáme rozptylové modely vytvořené s námi naměřených hodnot s modely USERBSDF od firmy OPSIRA. V předchozí části jsme se ujistili, že rozptylové modely USERBSDF poskytují velice podobné výsledky jako Harvey a BSDFDATA modely. Ačkoliv jsem zde neuváděl srovnání Harveyho a BSDFDATA modelu, tak tyto dva modely si velmi dobře odpovídají pro odrazné materiály, u propustných je situace o něco složitější. Velmi dlouhou dobu se nám nedařilo dosáhnout shody mezi našimi Harveyho modelem a modelem USERBSDF a to navzdory tomu, že naměřená data si odpovídají lépe než u odrazných materiálů. Nakonec se nám povedlo docílit docela přesných výsledků pro propustné materiály PC LS2 30 a PMMA 11030. U materiálu PMMA 39 se nám shoduje pouze model BSDFDATA s modelem USERBSDF a to ještě ne úplně dokonale.

- **Odravné vzorky:**

Nyní zde budou uvedeny tři různé materiály, pro každý byl vytvořen rozptylový model jiným způsobem.

U odrazného materiálu PBT 33 jsme vytvořili Polynomiální model, který také dobře odpovídal modelu USERBSDF. Hodnota osvětlení 0,7lx u Polynomiálního modelu ($E=2,15lx$ a $\Phi=852,3lm$) odpovídá 25° , zatímco u USERBSDF ($E=2,71lx$, $\Phi=865,1lm$) 28° . Polynomiální rozptylový model získaný z námi naměřených dat docela dobře odpovídá modelu USERBSDF, ačkoliv Harveyho model vytvořený z dat firmy OPSIRA v minulém odstavci odpovídal lépe.



Obrázek 6. PBT 33 odrazný vzorek.

USERBSDF model pro materiál PBT 33 již byl uveden v minulém odstavci. Nyní si ukážeme, jak vypadá Polynomiální model (N=2 a M=2).

Polynomiální model:

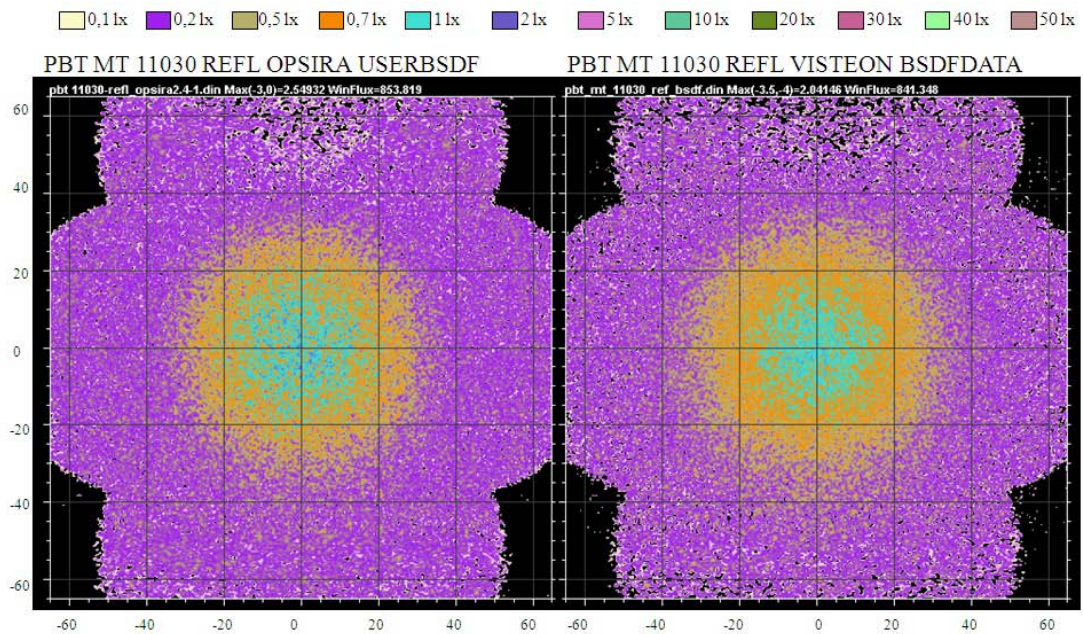
```

MODEL
POLYNOMIAL 2 2 !! !! PBT 33-REFL_polynom.fit
-1.015,      !! C 0,0,0
-2.654,      !! C 1,0,0
 3.971,      !! C 1,1,0
-0.285,      !! C 2,0,0
-1.77,       !! C 2,1,0
-0.475,      !! C 2,2,0
 2.828,      !! C 0,0,1
-4.56,       !! C 1,0,1
 3.379,      !! C 1,1,1
-1.844,      !! C 2,0,1
13.151,      !! C 2,1,1
-16.296,     !! C 2,2,1
 3.097,      !! C 0,0,2
-10.966,     !! C 1,0,2
 4.965,      !! C 1,1,2
 3.507,      !! C 2,0,2
 9.288,      !! C 2,1,2
-12.177,     !! C 2,2,2

```

K definici geometrie optické sestavy zadáváme: ROUGHNESS MODEL 1

Pro vzorek PBT MT 11030 byl použit model BSDFDATA a lze vidět, že shoda mezi tímto modelem a modelem USERBSDF je také velmi dobrá. Velikost osvětlení 0,7lx se v případě USERBSDF ($E=2,54lx$, $\Phi=853,8lm$) modelu nachází v intervalu 16° až 27° a u modelu BSDFDATA ($E=2,04lx$, $\Phi=841,3lm$) taktéž.



Obrázek 7. PBT MT 11030 odrazný vzorek.

Definice rozptylových modelů vzorku PBT MT 11030:

USERBSDF:

```

$FCN
$FCN KW COS(SQRT(_1))
$FCN MS1 PSI=ACOS[_2+SQRT(1-_1)*SQRT(1-_3)],
A3=0.4*(1+0.1*(ASIN(_3))^2),
B3=30,
(REF)*(0.04*COS(SQRT(_1))^0.9/KW(_)+
+(A3*EXP(-(PSI^2)/(B3^2))/(KW(_)^2))*2.03
MODEL
USERBSDF MS1 'PBT_MT11030'

```

Ke geometrii prvku, na který nanášíme rozptylový model, se dopíše:

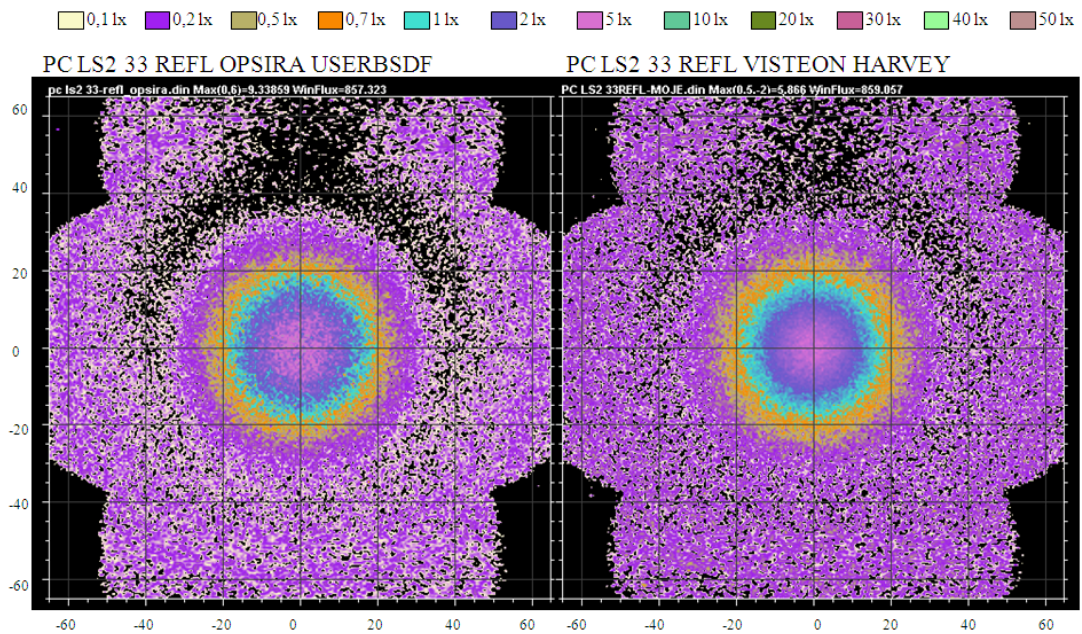
```

SCATTER MODEL 1
TOWARDS REFL 1 3.14/2 0 0 2

```

BSDFDATA: data použitá k definici tohoto rozptylového modelu zde uvedena nejsou, neboť jsou velmi obsáhlá. U definice komponenty, které je přiřazen rozptylový model se uvede ROUGHNESS MODEL 1

Posledním odrazným vzorkem je PC LS2 33, pro jehož charakterizaci byl použit Harveyho rozptylový model. Také u toho modelu existuje velmi dobrá shoda s USERBSDF modelem. U vytvořeného Harveyho modelu ($E=5,86lx$, $\Phi=859,1lm$) je dosažena hodnota osvětlení $0,7lx$ v okolí úhlu 21° shodně jako v případě modelu USERBSDF ($E=9,33lx$, $\Phi=857,3lm$). Rozdíl lze pouze spatřovat ve velikosti maximální hodnoty osvětlení.



Obrázek 8. PC LS2 33 odrazný vzorek.

USERBSDF model pro materiál PC LS2 33 již byl uveden v minulém odstavci. Nyní si ukážeme, jak vypadá Harveyho model.

Harvey:

```

MODEL
HARVEY 0.3710 -3.8300 0.2820 0.5990 0.4260
HARVEY 0.0216 -10.2686 6.99E-3 3.4200 3.9400
SUM .1 .2 !!PC LS2 33-REFL.fit

```

Ke geometrii daného prvku se doplní: ROUGHNESS MODEL 1

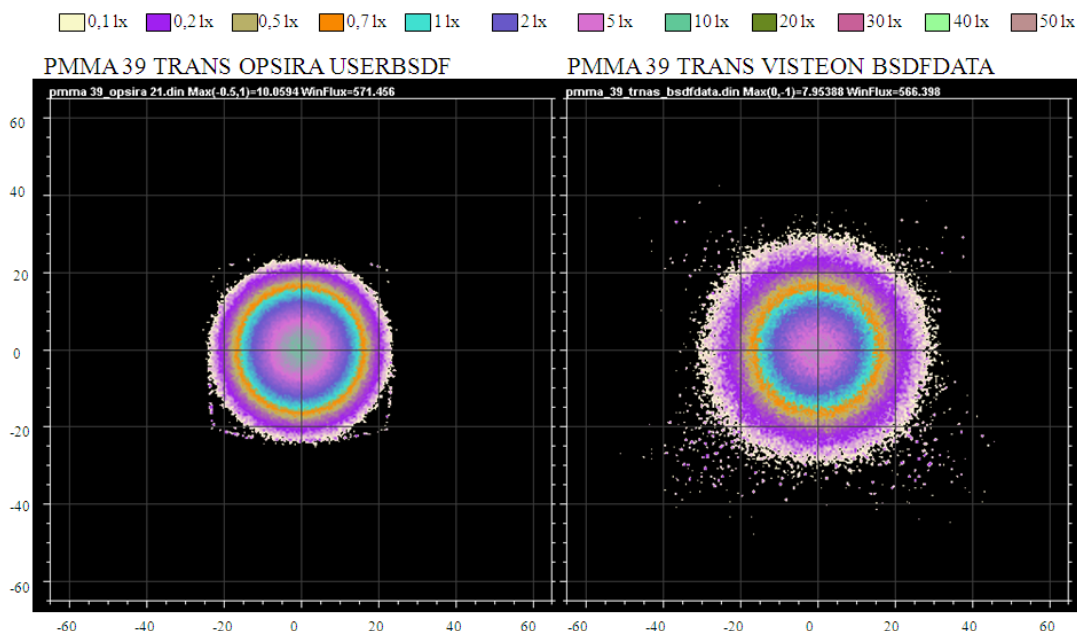
Vidíme, že v případě odrazných vzorků máme velmi dobrou shodu mezi našimi modely (Harvey, Polynomiální a BSDFDATA) a modelem USERBSDF, který dodala firma OPSIRA.

- **Propustné vzorky:**

Zde také budou uvedeny tři různé materiály, pro dva (PMMA 11030 a PC LS2 30) byl vytvořen Harveyho rozptylový model a pro vzorek PMMA 39 model BSDFDATA.

Propustný povrch PMMA 39 má ze všech proměřovaných vzorků nejhorší shodu mezi modelem USERBSDF s jakýmkoliv jiným. Ačkoliv naměřená data mají velice obdobné průběhy, tak při použití Harveyho ani Polynomiálního modelu jsme nedosáhli shody. Jediným modelem, který odpovídal, byl model BSDFDATA, ale tento přístup vykazuje rozdíly zejména v oblasti nízkých úrovní osvětlení. Úroveň

osvětlení 0,7lx dostaneme v případě modelu společnosti OPSIRA USERBSDF ($E=10,05lx$, $\Phi=571,4lm$) pod úhlem pozorování 15° a pro námi vytvořený model BSDFDATA ($E=7,95lx$, $\Phi=566,3lm$) v 17° . Při této hodnotě osvětlení panuje shoda, ale úrovně 0,2lx a 0,1lx jsou pod větším úhlem než v případě modelu USERBSDF. Ovšem takto malé hodnoty osvětlení nemají rozhodující roli.



Obrázek 9. PMMA 39 propustný vzorek.

Hodnoty rozptylového modelu USERBSDF vzorku PMMA 39. Data do modelu BSDFDATA zde s ohledem na svou rozsáhlost uvedena nejsou. U definice komponenty, které je přiřazen rozptylový model se uvede ROUGHNESS MODEL 1

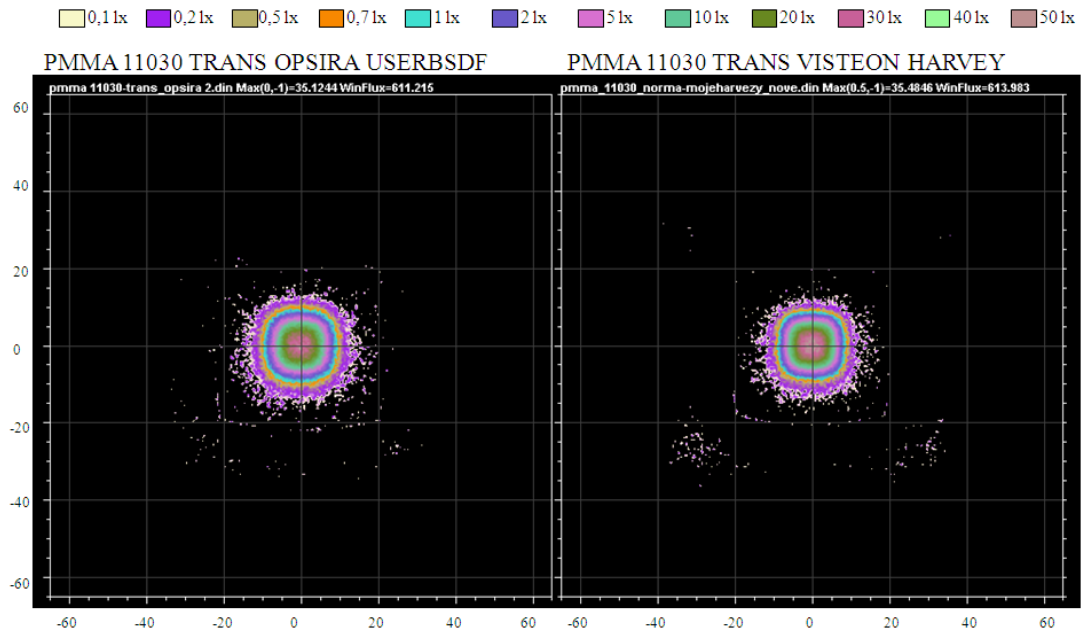
```

USERBSDF:   $FCN
                $FCN KW COS(SQRT(_1))
                $FCN PMMA_39 PSI=ACOS[_2+SQRT(1-_1)*SQRT(1-_3)],
                A2=0.0003,
                B2=5,
                A3=0.0002,
                B3=15*(1+0.5*ASIN(_3)),
                A4=0.02,
                B4=18.5*(1+0.0*ASIN(_3)),
                A5=0.9*(1-1*(ASIN(_3))^1),
                B5=8.8*(1+0.6*ASIN(_3)),
                TST=0.002*SIN(_1)^4,
                LAMBERT=A2*COS(SQRT(_1))^B2/KW(_),
                GAUSS_1=1*(A3*EXP(-(PSI^2)/(B3)^2)/(KW(_))^4),
                GAUSS_2=1*(A4*EXP(-(PSI^2)/(B4)^2)/(KW(_))^4),
                GAUSS_3=1*(A5*EXP(-(PSI^2)/(B5)^2)/(KW(_))^1),
                (TRAN)*12.7*(LAMBERT+GAUSS_1+GAUSS_2+GAUSS_3+TST)
                MODEL
                USERBSDF PMMA_39 'PMMA_39'
    
```

Ke geometrii daného prvku se doplňuje: SCATTER MODEL 1
TOWARDS SPEC 10 0.5233 1

..

Další vzorkem je materiál PMMA 11030, jeho model USERBSDF ($E=35,12lx$ a $\Phi=611,2lm$) má velikost osvětlení $0,7lx$ v úhlu pozorování 10° a námi vytvořený Harveyho model ($E=35,4lx$ a $\Phi=613,9lm$) v 13° . Tento vzorek má daleko lepší shodu než předchozí PMMA 39.



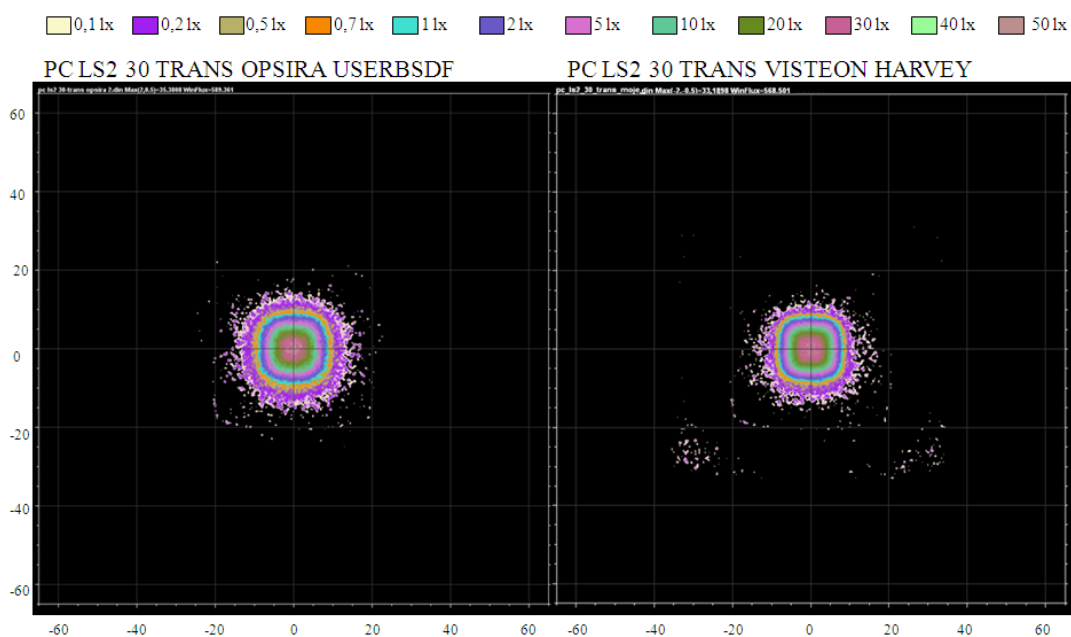
Obrázek 9. PMMA 11030 propustný vzorek.

U tohoto materiálu již byl v předešlém odstavci věnovaném srovnání různých typů rozptylových modelů vytvořených naměřených firmy OPSIRA uveden model USERBSDF a proto zde bude uveden pouze Harveyho model.

Harvey: MODEL
HARVEY 0.9676 -8.1738 0.1657 0.4978 0.3560
HARVEY 0.1067 -0.4692 6.95E-6 3.60E-4 1.0480
SUM .1 .2 !!PMMA 11030-TRANS-NORM-MAX V NULE.fit

Ke geometrii daného prvku se doplní: ROUGHNESS MODEL 1

Posledním zkoumaným materiálem je PC LS2 30. Byly porovnávány rozptylový model USERBSDF firmy OPSIRA a Harveyho model vytvořený z našich měření. USERBSDF ($E=35,3lx$ a $\Phi=589,3lm$) má osvětlení $0,7lx$ v 10° a Harveyho model ($E=33,18lx$ a $\Phi=588,5lm$) v 8° . Lze říci, že tyto modely velmi dobře souhlasí.



Obrázek 10. PC LS2 30 propustný vzorek.

Jelikož už USERBSDF model tohoto vzorku byl uveden (viz předchozí část) bude zde doplněn pouze Harveyho model.

Harvey: MODEL
 HARVEY 0.9290 -5.3300 0.0729 0.4932 0.3704
 HARVEY 0.1089 -0.4930 0.01E-6 3.43E-4 1.0762
 SUM .1 .2 !!PC_LS2_30-TRANS-MOJE.fit

V případě propustných vzorků máme také velmi dobrou shodu až na PMMA 39 mezi našimi modely (Harvey a BSDFDATA) a modelem USERBSDF, který dodala firma OPSIRA. Rozdíly u vzorku PMMA 39 jsou zarážející, neboť u všech ostatních vzorků máme velmi podobné výsledky. Na tento vzorek jsem použil všechny tři modely, se kterými jsem se při zpracování diplomové práce seznámil, ale jediný model podávající přijatelné výsledky byl BSDFDATA využívající přímo hodnoty z měření.

11. Závěr

Tato diplomová práce byla vypracována ve spolupráci se společností VISTEON-AUTOPAL Nový Jičín na základě jejich podnětu. Cílem této diplomové práce bylo navrhnout a zrealizovat měřicí sestavu na měření úhlového rozptylu odraženého a propuštěného světla a vytvořit použitelné rozptylové modely do optického softwaru ASAP používaného ve společnosti VISTEON. Všechny tyto úkoly se podařilo během zpracovávání splnit. Měřicí sestava navržená a vyrobená pro použití na přístrojovém vybavení firmy VISTEON v maximální možné míře využila prostředků v jejím vlastnictví, čímž byla redukována její finanční náročnost. Vyrábět se musely pouze spojovací komponenty a držáky, otočný a naklápěcí stůl již byl zakoupen v minulosti. Na této měřicí sestavě kompatibilní s goniofotometrem OPTRONIK SMS 10h byla poté provedena měření úhlového rozptylu pro propustné i odrazné vzorky, které se uplatňují v automobilových světlometech jako propustné filtry rozšiřující procházející svazek nebo jako odrazné plochy sloužící k redukci vlivu nežádoucího světla odraženého od krycích skel světlometů na výslednou světelnou stopu. Správnost naměřených dat byla ověřena porovnáním s daty od firmy OPSIRA, u které byly v minulosti proměřeny některé vzorky. Ta také dodala rozptylové modely, které jsou klíčové pro další použití ve výpočtech optických sestav. Proto byly v rámci této práce vytvořeny rozptylové modely do programu ASAP a porovnány s modely firmy OPSIRA.

Shrnutí textu diplomové práce:

Kapitola první se zabývá důvody měření úhlového rozptylu na texturovaných vzorcích a také význam jejich použití v automobilovém průmyslu.

Druhá kapitola vnesla základní pohled do problematiky fotometrie a měření fotometrických veličin. Pracujeme s fotometrickými veličinami, neboť zohledňují spektrální citlivost oka (pozorovatelem je v případě provozu na pozemních komunikacích řidič-člověk). Podrobnější informace k tomuto tématu přináší Dodatek A. a Dodatek B. umístěné na příloženém CD disku.

Část věnovaná optickým vlastnostem materiálů se zabývá pojmy odrazivost, propustnost a absorpce. Na tuto kapitolu navazuje následující, ve které se pojednává o projevech, příčinách vzniku a dělení rozptylu. Dále se zde zavádí pojem BSDF funkce, tedy obousměrná distribuční rozptylová funkce. Byly uvedeny její základní vlastnosti, definice a ukázka jejich průběhů pro Lambertovský odrazeč a měřený povrch.

Poté následuje kapitola zabývající se stručným popisem měřených vzorků

V šestém oddíle je uveden soupis požadavků, které měla společnost VISTEON na přípravek navržený pro měření úhlového rozptylu a také prostředky, které mohla poskytnout na jeho konstrukci.

Sedmá kapitola se zabývá návrhem a konstrukčními postupy použitými pro návrh měřicího přípravku. Osmá kapitola uvádí vlastnosti goniofotometru OPTRONIK SMS 10h, který slouží jako polohovací zařízení (elektronicky řízený otočný stůl) a zároveň jako detektor záření.

Dále následuje kapitola obsahující postup při měření a také návod na následné zpracování naměřených hodnot pro použití v optickém simulačním programu ASAP. V této kapitole dále najdeme charakteristiku jednotlivých rozptylových modelů, popis jejich vytváření a zadávání do programu ASAP. V poslední části je uvedena definice jednoduchého optického systému, který byl použit k porovnávání rozptylových modelů.

V desátém oddíle nalezneme srovnání výsledků dosažených při různých měření (měření v rámci diplomové práce vůči měření firmy OPSIRA). Nejprve jsou srovnána pouze data získána z měření. Tyto hodnoty si velmi dobře odpovídají, vyskytují se pouze rozdíly v oblasti nízkých úrovní osvětlení, což může být způsobeno parazitním odrazem od některé z ploch měřicího přípravku. Dále zde nalezneme srovnání rozptylových modelů. Nejprve Harveyho a BSDFDATA modelů vytvořených na základě naměřených dat firmy OPSIRA s modelem USERBSDF, který dodala firmě VISTEON. Tento model velmi dobře odpovídá skutečnosti a bylo tedy cílem se k němu co nejvíce přiblížit, což se také povedlo. Poté následuje srovnání modelu USERBSDF s našimi modely (Harveyho, Polymoniální a BSDFBATA pro odrazné vzorky a Harveyho a BSDFBATA pro propustné) vytvořenými z našich dat. Ačkoliv při tvorbě našich modelů byly použity jiné metody než firmou OPSIRA a bylo zjištěno, že výsledky se u většiny porovnávaných povrchů velmi dobře shodovaly. Výjimkou byl pouze propustný materiál PMMA 39, u kterého se nepodařilo žádným používaným modelem dosáhnout dobré shody, nejvíce odpovídal model BSDFDATA, avšak vykazoval odlišnosti pro nízké úrovně osvětlení, což ovšem nepředstavuje nijak zásadní problém.

Během řešení diplomové jsem se seznámil s obsluhou goniofotometru OPTRONIK SMS 10h a jeho řídicím programem OPTO, také se základy práce v optickém programu ASAP. Při konstrukci měřicího přípravku jsem se zdokonalil v ovládání softwaru Autodesk Inventor a získal základní poznatky o obdobném programu CATIA, který používají ve společnosti VISTEON. Cennou zkušeností bylo také seznámení se s fungováním vývojového oddělení světelné techniky ve společnosti VISTEON-AUTOPAL Nový Jičín.

Na přiloženém CD disku lze kromě samotného textu diplomové práce nalézt:

- Soubory měřicího přípravku pro program Autodesk Inventor v adresáři:

D: \Měřicí přípravek\Soubory Inventor

Soubor celkového měřicího přípravku je nazván:

Měřicí přípravek-diplomová práce Vjaclovský.iam

- Soubor *Měřicí přípravek-diplomová práce Vjaclovský.stp* pro program CATIA v adresáři: **D:\Měřicí přípravek\Soubor CATIA**
- Soubory .din zachycující vypočítané světelné stopy pro konkrétní rozptylové modely lze otevřít pouze v programu BeamAnalyzer. Jejich zobrazení, která jsou uvedena v desáté kapitole, nalezneme společně se soubory použitými pro jejich výpočet a porovnáním průběhů naměřených dat v adresáři: **D:\Naměřená data a rozptylové modely\Název vzorku**

Literatura

- [1] Fuka, J., Havelka, B.: *Optika*, Státní pedagogické nakladatelství, Praha 1961
- [2] Palmer, J., Grant, B.: *The Art Of Radiometry*, SPIE Press Book, 2009
- [3] Václavík, P.: *Technická optika II*, ČVUT, Praha 1996
- [4] Stover, J. C.: *Optical Scattering: Measurement and Analysis*, SPIE Press Book, 1995
- [5] <http://www.schmitt-ind.com/pdf/scatter1.pdf>
- [6] http://www.breault.com/resources/kbasePDF/broprn1157_straylight.pdf
- [7] <http://www.opticalres.com/white%20papers/ScatterGlossy.pdf>
- [8] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Polykarbon%C3%A1t>
- [9] <http://en.wikipedia.org/wiki/Polycarbonate>
- [10] <http://en.wikipedia.org/wiki/Pmma>
- [11] http://en.wikipedia.org/wiki/Polybutylene_terephthalate
- [12] <http://www.omnexus.com/tc/PBT/index.aspx?id=>
- [13] http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_discharge_machining
- [14] Bass, M.: *Handbook of Optics, Volume II- Devices, Measurement and Properties*, The McGraw-Hill Companies, Inc., 1995
- [15] Hajn, M.: *Přehled přesné mechaniky*, Nakladatelství ROH, Praha 1956
- [16] www.lmt-berlin.de/en/goh1300.html
- [17] www.optronik.de/plm-g-sms10h.shtml
- [18] Norma DIN 5032 část 7: Měření světla, Rozdělení přístrojů na měření intenzity osvětlení a jasu do tříd.
- [19] www.breault.com/kbasePDF/broprn1173_bsd.pdf
- [20] ASAP Help: Harvey model.
- [21] The Color Vision Research Lab: www.cvrl.org
- [22] Bass, M.: *Handbook of Optics, Volume III, Classical Optics, Vision Optics, X-Ray Optics*, The McGraw-Hill Companies Inc., 2001
- [23] Palmer, J.: <http://www.optics.arizona.edu/Palmer/rpfaq/rpfaq.htm>
- [24] Habel, J.: *Osvětlování*, ČVUT, Praha 1998
- [25] Fraden, J.: *Handbook of Modern Sensors Physics Designs and Applications*, Springer, 2004
- [26] Wilson, J.: *Sensor Technology Handbook*, John Wiley and Sons Ltd, London 2005.

- [27] Plch, J, Mohelníková, J, Suchánek P: *Osvětlení neosvětlitelných prostor*, Nakladatelství ERA, Brno 2004
- [28] DeCusatis: *Handbook of applied photometry*, AIP-Press, 1997