

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Disertační práce

Praha, červenec 2014

Marek Bálský

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

Analýza procesu mnohonásobných odrazů

Disertační práce

Marek Bálský

Praha, červenec 2014

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Elektroenergetika

Školitel: Prof. Ing. Jiří Habel, DrSc.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji panu prof. Ing. Jiřímu Habelovi, DrSc. za odborné vedení, podporu a pomoc jak v průběhu zpracování této práce, tak během celého doktorského studia.

Marek Bálský

Praha, 22. 7. 2014

Obsah

Úvod	2
1 Současný stav problematiky	3
1.1 Světelný tok	3
1.2 Integrální činitele	3
1.3 Jas svazku světelných paprsků.....	4
1.4 Osvětlenost rovinné plochy a světlení	5
1.5 Proces odrazu světla od povrchu materiálu	6
1.5.2 Ideální difuzní odraz	8
1.5.3 Ideální zrcadlový odraz.....	10
1.5.4 Smíšené odrazy.....	10
1.6 Proces mnohonásobných odrazů.....	11
1.7 Řešení mnohonásobných odrazů soustavou lineárních rovnic	12
1.8 Osvětlovací modely v počítačových vizualizačních programech.....	13
1.9 Globální zobrazovací metody	15
1.9.1 Metoda sledování paprsku	15
1.9.2 Metoda radiozity	16
1.9.3 Stochastické metody	17
1.10 Shrnutí současného stavu problematiky	17
2 Cíle disertační práce.....	18
3 Výzkum skutečných odrazných vlastností materiálů.....	19
3.1 Návrh metody měření odrazných vlastností materiálů	19
3.2 Výběr vzorku materiálů pro měření.....	22
3.3 Výsledky měření odrazných vlastností materiálu.....	23
3.4 Analýza výsledků měření odrazných vlastností materiálů	27
3.5 Výpočet svítivosti vzorku materiálu	28
3.6 Výpočet dvousměrové odrazové distribuční funkce.....	33
4 Návrh metody záznamu odrazných vlastností materiálů	39
4.1 Formát vstupních dat pro světelně technické výpočetní programy	39
4.2 Návrh záznamu odrazných vlastností materiálů ve formě Eulumdat	41
4.3 Formát vstupních dat pro vizualizační programy	42
4.4 Záznam odrazných vlastností materiálů ve formátu XML.....	47
5 Výpočet mnohonásobných odrazů ve světelné scéně.....	50
5.1 Volba prostoru pro světelně technické výpočty a ověřovací měření.....	50
5.2 Aplikace navržené metodiky ekvivalentních svítidel pro řešení odrazů ve vybrané světelné scéně	52
5.3 Výpočet mnohonásobných odrazů světla ve vybraném prostoru	59
5.3.1 Výpočet mnohonásobných odrazů mezi difuzními plochami v programu Dialux.....	60
5.3.2 Výpočet mnohonásobných odrazů mezi difuzními plochami v programu Radiance	62
5.3.3 Aplikace navržené metodiky záznamu skutečných odrazných vlastností materiálů při řešení odrazů ve vybrané světelné scéně	65
6 Měření světelně technických veličin ve vybraném prostoru	69
Závěr	73
Seznam odborné literatury:	77
Seznam příloh.....	78

Úvod

Hlavní činností v oblasti světelné techniky je analýza parametrů světelných scén (světelného pole). Děje se tak při návrhu a projektování osvětlovacích soustav, kdy jsou parametry světelné scény vypočítávány s využitím matematického modelu, a také při následném ověřování parametrů již realizovaných osvětlovacích soustav měření. Parametry světelných scén jsou primárně určeny vlastnostmi zdroje světla, následně se ale parametry celého světelného pole mění vlivem procesů probíhajících ve světelné scéně. Hlavním takovým procesem je odraz světla od světelně činných prvků scény (prvky svítidel, stěn, nábytku). Při odrazu světla se světelně činný povrch stává sekundárním zdrojem světla a vzhledem k tomu, že při odrazu dochází ke změně směru toku světla ve scéně, dochází tak ke změně většiny parametrů celého světelného pole. Popis odrazu světla tak hraje důležitou roli pro korektní analýzu parametrů světelných scén. Při matematickém modelování světelného pole se však proces odrazu světla často zjednodušuje a idealizuje, což může mít za následek nepřesné výsledky při projektování osvětlovacích soustav.

Cílem této disertační práce je analyzovat současný stav problematiky řešení mnohonásobných odrazů a navrhnout řešení výpočtu parametrů světelných scén charakterizovaných skutečnými odraznými vlastnostmi materiálů. Jedním ze základních předpokladů takových výpočtů je analýza metod využívaných pro výpočet mnohonásobných odrazů v oblasti počítačové grafiky a jejich aplikace ve světelně technických výpočtech a také definování vhodné metody měření a záznamu odrazných vlastností materiálů a jeho následné využití při výpočtu mnohonásobných odrazů.

1 Současný stav problematiky

Pro popis světelných scén (světelného pole) se využívá řada světelně technických veličin, které spolu vzájemně souvisí. Lze je rozdělit na veličiny základní, které nejčastěji charakterizují parametry zdroje světla, a veličiny od nich odvozené, které popisují stav světelného pole v určitém směru či v určitém bodě světelné scény (světelného pole), nebo po určitém ději (např. odrazu či prostupu světla materiálem).

1.1 Světelný tok

Důležitou veličinou pro popis světelného pole je světelný tok Φ (lm). Světelný tok je veličina, která odpovídá zářivému toku a vyjadřuje schopnost zářivého toku způsobit zrakový vjem [1]. Světelný tok Φ_i dopadající na uvažovaný světelně činný materiál se v obecném případě dělí na tři části, a to na část Φ_ρ , která se odráží, na část Φ_τ , která látkou projde, a na část Φ_α , kterou látka pohltí. Platí tedy

$$\Phi_i = \Phi_\rho + \Phi_\tau + \Phi_\alpha. \quad (\text{lm}) \quad (1.1)$$

1.2 Integrální činitele

Světelně technické vlastnosti látek charakterizují tři integrální činitele odpovídající výše popsanému rozdělení světelného toku [1]. Jsou to:

integrální činitel odrazu

$$\rho = \frac{\Phi_\rho}{\Phi_i} \quad (-; \text{lm}, \text{lm}), \quad (1.2)$$

integrální činitel prostupu

$$\tau = \frac{\Phi_\tau}{\Phi_i} \quad (-; \text{lm}, \text{lm}), \quad (1.3)$$

integrální činitel pohlcení

$$\alpha = \frac{\Phi_\alpha}{\Phi_i} \quad (-; \text{lm}, \text{lm}). \quad (1.4)$$

Pro činitele ρ , τ a α vyplývá z rovnice (1.1) známý vztah

$$\rho + \tau + \alpha = 1 \quad (-). \quad (1.5)$$

Pro neprůsvitné materiály platí $\rho + \alpha = 1$ a pro materiály pohlcující veškeré záření na ně dopadající platí $\alpha = 1$.

O prostředí, kterým se šíří světelné paprsky od svítidel na osvětlované plochy, se při výpočtech v praxi předpokládá, že světlo nepohlcuje a nerozptyluje. Tento

předpoklad je většinou splněn jak ve vnitřních, tak i ve venkovních prostorech. Činitel odrazu, prostupu a pohlcení však nezávisí pouze na vlastnostech látky samotné, ale i na vlnové délce dopadajícího záření [1].

Proto se kromě integrálních hodnot zmíněných činitelů definují i jejich spektrální hodnoty $\rho(\lambda)$, $\tau(\lambda)$, $\alpha(\lambda)$ [1]. Dopadá-li na sledovanou látku spektrum monofrekvenčních zářivých toků $\Phi_e(\lambda)$, potom pro hodnotu integrálního činitele odrazu ρ sledované látky platí obecný výraz

$$\rho = \frac{\int_0^\infty \left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_\lambda \cdot V(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^\infty \left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_\lambda \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (1.6)$$

Ve jmenovateli rovnice (1.6) je známý výraz pro složený světelný tok Φ odpovídající spektru monofrekvenčních zářivých toků $\Phi_e(\lambda)$. Pro integrální činitele τ a α platí podobné vztahy.

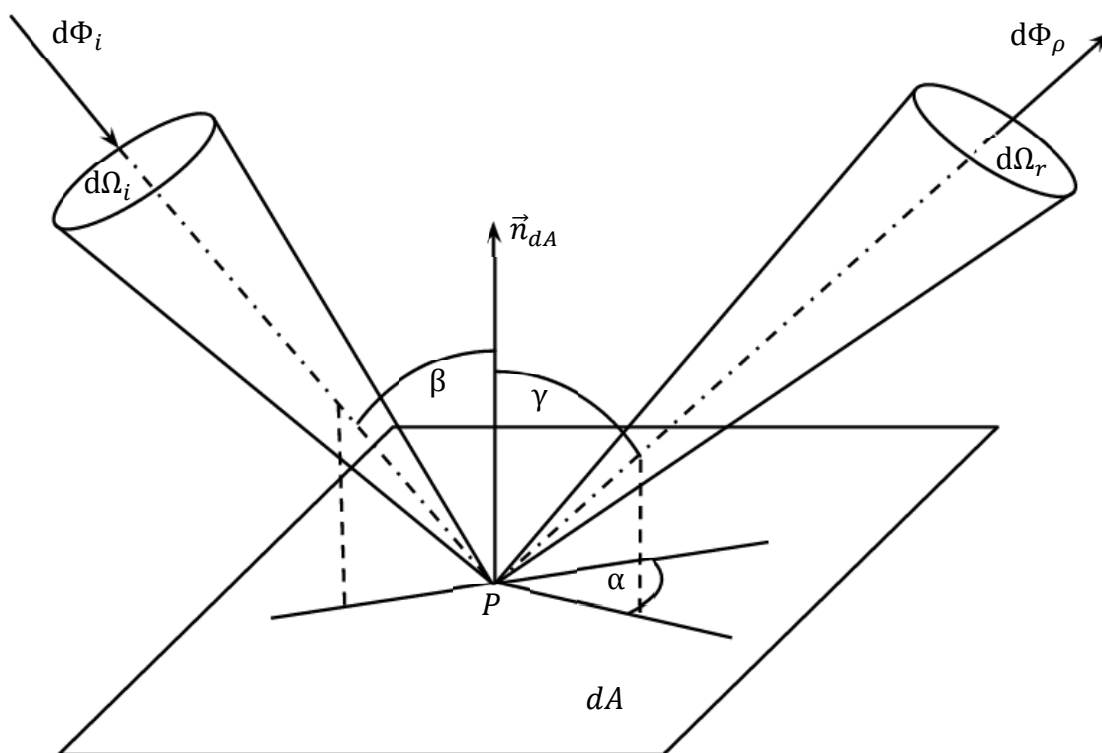
Lidské oko vnímá složený světelný tok Φ jako celek a není schopno rozlišit jeho jednotlivé monofrekvenční složky charakterizované zářivým tokem $\Phi_e(\lambda)$. Vzorec (1.6) se proto v praxi nepoužívá, světelně technické vlastnosti materiálů se při výpočtech nahrazují integrálními činiteli [1].

Pro zjednodušení výpočtů při řešení mnohonásobných odrazů se pro každý povrch uvažuje střední po ploše vážená hodnota činitele odrazu ρ_s . Stanoví se pro povrch A skládající se z n částí o plochách A_1, A_2, \dots, A_n s činiteli odrazu $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ze vztahu

$$\rho_s = \frac{\rho_1 A_1 + \rho_2 A_2 + \dots + \rho_n A_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \quad (1.7)$$

1.3 Jas svazku světelných paprsků

Proces odrazu světla na povrchu reálných látek je rozdílný v každém jednotlivém bodě povrchu látky. Světelný tok dopadající na povrch látky zpravidla přichází z různých směrů prostoru nerovnoměrně a stejně tak se do jednotlivých směrů nerovnoměrně odrazí. Proto je třeba k popisu procesu odrazu světla i veličina, kterou lze charakterizovat velikost světelného toku dopadajícího, příp. odraženého od povrchu látky v konkrétním směru (prostorovém úhlu). Takovou veličinou je jas svazku světelných paprsků. Jas svazku paprsků je zároveň veličina, na kterou bezprostředně reaguje zrakový orgán.



obr. 1-1: Jas svazku paprsků dopadajících do bodu P a vycházejících z bodu P.

Pro jas L_i svazku paprsků (určených světelným tokem $d\Phi_i$) dopadajících ve směru určeném úhlem β z prostorového úhlu Ω_i na elementární plošku dA (viz obr. 1-1) platí:

$$L_i = \frac{d^2\Phi_i}{d\Omega_i \cdot dA \cdot \cos\beta} = \frac{dE_n}{d\Omega_i} \quad (\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}; \text{lm}, \text{sr}, \text{m}^2; \text{lx}, \text{sr}), \quad (1.8)$$

kde dE_n značí normálovou osvětlenost, tj. osvětlenost průmětu plošky dA do roviny kolmé k ose svazku dopadajících paprsků [1].

Pro jas L_r svazku paprsků (určených světelným tokem $d\Phi_\rho$) vycházejících ve směru určeném úhly α a γ do prostorového úhlu Ω_r z elementární plošky dA (viz obr. 1-1) platí:

$$L_r = \frac{d^2\Phi_\rho}{d\Omega_r \cdot dA \cdot \cos\gamma} = \frac{dI_{\alpha\gamma}}{dA \cdot \cos\gamma} \quad (\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}; \text{lm}, \text{sr}, \text{m}^2; \text{cd}, \text{m}^2), \quad (1.9)$$

kde $dI_{\alpha\gamma} = d\Phi_\rho/d\Omega_r$ je svítivost plošky dA ve směru daném úhly α a γ .

1.4 Osvětlenost rovinné plochy a světlení

Osvětlenost rovinné plochy A v bodě P (viz obr. 1-1), do kterého se z různých směrů pod úhly β sbíhají svazky paprsků s různým jasem $L_i(\beta)$, je dána vztahem (1.10).

$$E_p = \int_0^{2\pi} L_i(\beta) \cdot \cos\beta \cdot d\Omega_i = \frac{\Phi_i}{A} \quad (\text{lx; cd}\cdot\text{m}^{-2}, \text{sr; lm, m}^2) \quad (1.10)$$

Místně průměrná hodnota osvětlenosti rovinné plochy je rovna podílu světelného toku Φ_i dopadajícího na rovinnou plochu a velikosti A této plochy.

Světlení rovinné plochy A v bodě P (viz obr. 1-1), ze kterého do různých směrů pod úhlem odrazu γ vycházejí svazky paprsků s různým jasem $L_r(\alpha, \gamma)$, je dáno vztahem (1.11).

$$M_p = \int_0^{2\pi} L_r(\alpha, \gamma) \cdot \cos\gamma \cdot d\Omega_r = \frac{\Phi_\rho}{A} \quad (\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}; \text{cd}\cdot\text{m}^{-2}, \text{sr; lm, m}^2) \quad (1.11)$$

Místně průměrná hodnota světlení rovinné plochy je rovna podílu světelného toku Φ_ρ vycházejícího z rovinné plochy a velikosti A této plochy.

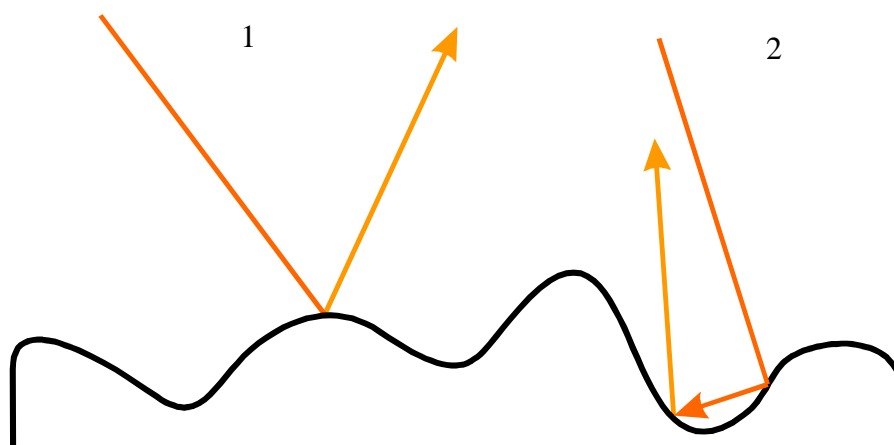
Z rovnic (1.2), (1.10) a (1.11) plyne pro činitel odrazu rovinné plochy vztah:

$$\rho = \frac{\Phi_\rho}{\Phi_i} = \frac{M_p}{E_p} \quad (-; \text{lm, lm; lm}\cdot\text{m}^{-2}, \text{lx}). \quad (1.12)$$

1.5 Proces odrazu světla od povrchu materiálu

Povrch tělesa nikdy není dokonale hladký a při velkém zvětšení vypadá podobně jako na obr. 1-2. Je tvořen drobnými nerovnostmi, jejichž velikost a tvar jsou dány mikroskopickým složením konkrétního materiálu. Při procesu odrazu světla od světelně činného povrchu materiálu dochází ke změně směru světelného toku v prostoru. Povrchy různých látek se rozlišují podle rozložení odraženého světelného toku do různých směrů prostoru v závislosti na směru dopadu světelného toku na danou látku.

Jednotlivé paprsky se mohou po dopadu na povrch látky odrazit dvěma způsoby. Buď se odrazí jednorázově od některé z plošek (na obr. 1-2 případ označený 1), nebo jsou podrobeny vícenásobnému odrazu, případně lomu (na obr. 1-2 případ 2).



obr. 1-2: Odraz světla na mikroskopické úrovni.

Sledujeme-li určitý bod na povrchu látky, vnímáme velké množství (svazek) individuálních paprsků, které z tohoto bodu přicházejí, ale jejichž předchozí trajektorie mohou být značně odlišné podle toho, jak se na povrchu lámaly a odrážely. Proto se jas svazku paprsků L_r vycházejících po procesu odrazu z určitého bodu (P) na povrchu látky mění v závislosti na úhlu natočení α a úhlu odrazu γ (viz obr. 1-1) dle vztahu

$$L_r(\alpha, \gamma) = L_0 \cdot f_L(\alpha, \gamma) \quad (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}, -), \quad (1.13)$$

kde L_0 je jas svazku paprsků vycházejících z daného bodu ve vztažném směru (zpravidla ve směru normály \vec{n} k povrchu látky v tomto bodě) a funkce $f_L(\alpha, \gamma)$ se nazývá indikatrix jasu. Indikatrix jasu je matematickou aproximací fotometrické plochy jasu, kterou tvoří koncové body orientovaných úseček, vycházejících z povrchu světelně činného materiálu a znázorňujících jas světelně činného povrchu v uvažovaném směru.

Analogicky je definována indikatrix svítivosti $f_I(\alpha, \gamma)$, kdy pro svítivost $I_{\alpha\gamma}$ platí:

$$I_{\alpha\gamma} = I_0 \cdot f_I(\alpha, \gamma) \quad (\text{cd}; \text{cd}, -). \quad (1.14)$$

Z rovnice (1.9) dále vyplývá vztah mezi indikatrix svítivosti a indikatrix jasu:

$$f_I(\alpha, \gamma) = f_L(\alpha, \gamma) \cdot \cos \gamma \quad (\text{cd}; \text{cd}, -), \quad (1.15)$$

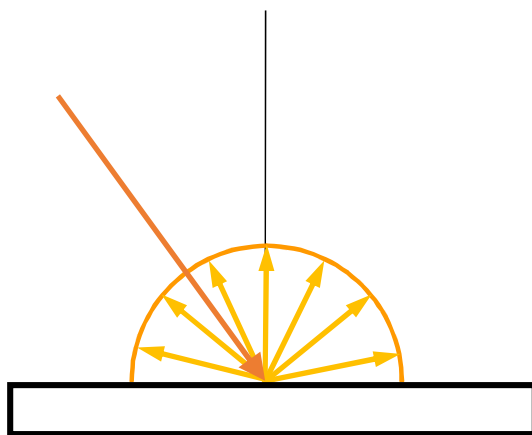
kde I_0 je svítivost vycházející z daného bodu ve vztažném směru (zpravidla ve směru normály \vec{n} k povrchu látky v tomto bodě). Indikatrix svítivosti je matematickou aproximací fotometrické plochy svítivosti, kterou tvoří koncové body orientovaných úseček, vycházejících z povrchu světelně činného materiálu a znázorňujících svítivost světelně činného povrchu v uvažovaném směru.

Fotometrické plochy jasu či svítivosti se zpravidla graficky zobrazují s využitím sférického souřadného systému, kde počátek souřadného systému odpovídá bodu,

ve kterém je daná veličina měřena. V praxi se ale zobrazení trojrozměrných fotometrických ploch jasu či svítivosti často zjednodušuje s využitím dvourozměrných rovinných řezů fotometrickými plochami. Grafy znázorňující řez fotometrickými plochami se pak nazývají křivky jasu, příp. svítivosti.

1.5.2 Ideální difuzní odraz

Difuzní odraz je složen z paprsků podobných paprsku 2 vyznačenému na obr. 1-2. Při difuzním odrazu se odražený světelný tok rovnoměrně rozptýlí v prostoru a povrch látky vykazuje ve všech směrech konstantní jas L_0 , tedy $f_L(\alpha, \gamma) = 1$.



obr. 1-3: Ideální difuzní odraz světla – řez fotometrickou plochou jasu.

Difuzní světelně činné materiály, které mění rozložení světelného toku rozptylem, se nazývají rozptylovače [1]. Představu o chování rozptylovače získáme nejlépe pomocí fotometrické plochy jasu rozptylu. Fotometrickou plochu jasu rozptylu tvoří koncové body orientovaných úseček vycházejících z povrchu světelně činného materiálu, které znázorňují poměrný jas světelně činného povrchu v uvažovaném směru. K vystižení tvaru fotometrické plochy jasu rozptylu je vhodné použít křivky rozptylu, které jsou rovinnými řezy fotometrické plochy jasu rozptylu (viz obr. 1-3). Tyto křivky graficky znázorňují indikatrix jasu, viz rovnice (1.13).

Dokonale rozptylně odrážející (difuzní) plochy se často označují názvem Lambertovy zářiče. Podle rovnic (1.11) a (1.13) pro Lambertovy zářiče platí vztah (1.16).

$$M = \int_0^{2\pi} L_r(\alpha, \gamma) \cdot \cos\gamma \cdot d\Omega_r = L_0 \int_0^{2\pi} \cos\gamma \cdot d\Omega_r = L_0 \cdot \pi \quad (1.16)$$

Souvislost mezi světlením M a konstantním jasem L_0 ideálně rozptýlně vyzařující plošky je tedy určena výrazem:

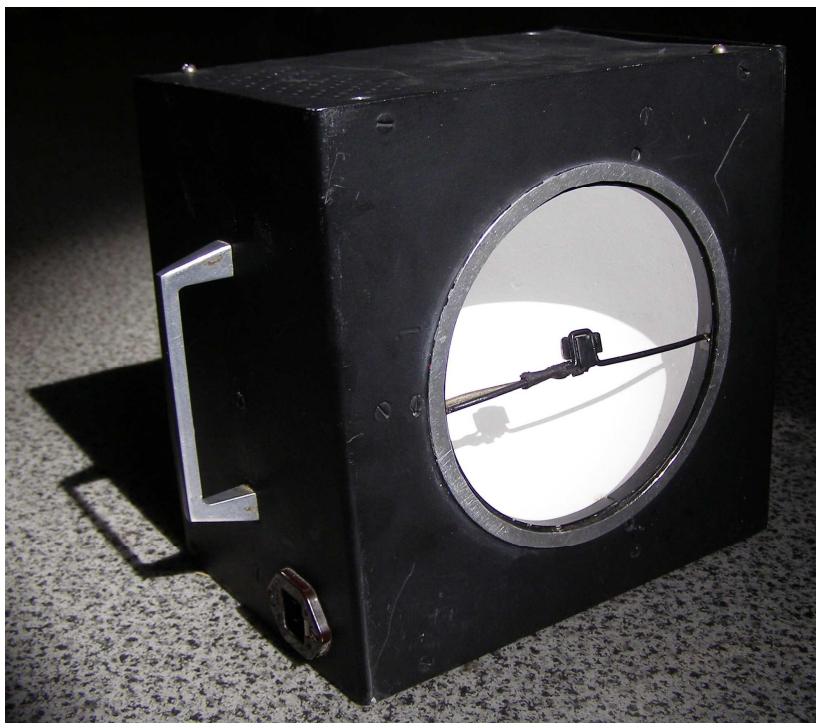
$$M = \pi \cdot L_0 \quad (\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}; \text{sr}, \text{cd}\cdot\text{m}^{-2}). \quad (1.17)$$

Mezi osvětleností E a světlením M sledované odrážející plochy, charakterizované činitelem odrazu ρ , platí vztah (1.12). Potom při kombinaci rovnice (1.12) a rovnice (1.17) vyplývá pro difuzně odrážející povrch významná souvislost mezi osvětleností E a jasem L_0 tohoto povrchu [1]:

$$\rho \cdot E = \pi \cdot L_0 \quad (\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}; \text{sr}, \text{cd}\cdot\text{m}^{-2}). \quad (1.18)$$

Uvedený vztah umožňuje například při známé osvětlenosti a činiteli odrazu stanovit jas difuzně odrážejícího povrchu nebo naopak vypočítat z předem zjištěných hodnot E a L_0 činitele odrazu ρ [1].

Konstantní jas L_0 difuzní plochy je i předpokladem pro jednoduché měření integrálního činitele odrazu takové plochy. To lze provést reflektometrem (viz obr. 1-4), jehož základním prvkem je dutá plocha ve tvaru polokoule opatřená bílým rovnoměrně rozptýlným nátěrem a pásem halogenových žárovek po obvodu okraje této plochy. Ve středu polokoule je umístěno čidlo (fotočlánek).



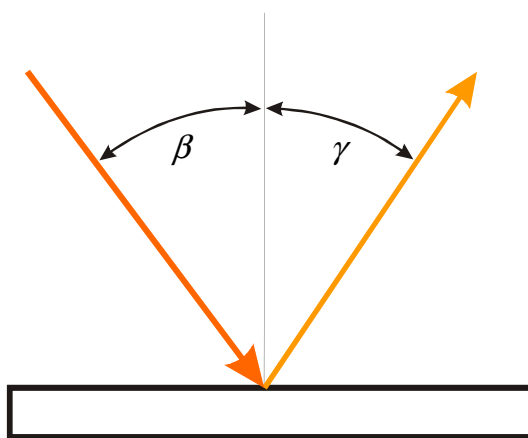
obr. 1-4: Reflektometr pro měření integrálního činitele odrazu difuzních materiálů.

Po přiložení reflektometru (duté polokulové plochy) ke vzorku materiálu a rozsvícení halogenových žárovek dojde k uzavření duté plochy sledovaným vzorkem

a k mnohonásobným odrazům mezi vzorkem materiálu a polokulovou plochou. Světelný tok dopadající na fotočlánek po procesu mnohonásobných odrazů je pak úměrný integrálnímu činiteli odrazu vzorku materiálu.

1.5.3 Ideální zrcadlový odraz

Zrcadlový odraz odpovídá paprsku označenému 1 na obr. 1-2. Charakteristickou vlastností zrcadlového odrazu je jeho směrovost. Světelný paprsek se odrazí od povrchu pod stejným úhlem, pod kterým na uvažovaný povrch dopadl, tj. dle obr. 1-1 v případě, kdy $\beta = \gamma$ a $\alpha = 0^\circ$ (viz obr. 1-5).



obr. 1-5: Ideální zrcadlový odraz světla.

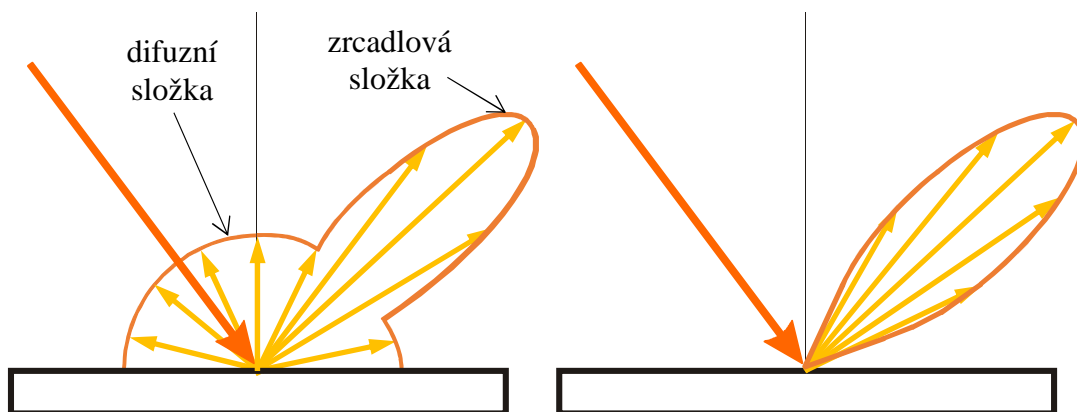
Směrovost je tím vyšší, čím jsou plošky na povrchu více uspořádané, neboli čím je povrch hladší. Ideální zrcadlový odraz vykazuje jas jen ve směru odraženého paprsku. V ostatních směrech je naopak jas takového povrchu nulový. Zrcadlová složka je také příčinou vzniku odlesků na zobrazovaném tělese. Světlo odražené od dokonalého zrcadla má pouze tuto složku. V praxi lze poměrně dokonalého zrcadlového odrazu dosáhnout jen na velmi přesně vyleštěných kovových plochách. Výroba takových zrcadel je velmi náročná a drahá.

1.5.4 Smíšené odrazy

V současné době jsou k popisu odrazných vlastností ploch používány jen zmíněné ideální případy odrazných povrchů (viz odstavce 1.5.2 a 1.5.3). Při světelně technických výpočtech se téměř výhradně využívá vlastností ideálně difuzní plochy, neboť se tím výpočty podstatně zjednoduší. Pokud se tedy vlastnosti skutečných svítících ploch blíží vlastnostem rovnoměrného rozptylovače, považují se tyto za Lambertovy zářiče. Počítá

se tak například se svítícími stropy, transparenty, se svítidly s opálovým sklem apod. Výhod ideálního rozptylovače se využívá i při výpočtech průměrných jasů matných osvětlovaných ploch, pokud ovšem nevykazují viditelné zrcadlové odlesky. Naopak při návrhu reflektorů předpokládáme ve výpočtech vlastnosti ideálně zrcadlové plochy.

Ve skutečnosti však nenalezneme mnoho ideálně difuzních či ideálně zrcadlově odražejících materiálů. Matné povrchy mají většinou lesklá místa a naopak u zrcadlově odražejících povrchů je jas odražené složky pozorovatelný nejen pod úhlem zrcadlového odrazu, ale i v jeho blízkém okolí.



obr. 1-6: Difuzní odraz se zrcadlovou složkou (vlevo) a zrcadlový odraz s rozptylnou složkou (vpravo).

Jelikož podrobný výpočet vlastností světelné scény je možný jen za použití skutečných modelů odrazu světla, vzniká potřeba realistického popisu světelně činných materiálů. Čím lépe model odraženého světla popisuje jeho chování, tím přesnější je světelně technický výpočet a přesvědčivější je i dojem z počítačové vizualizace světelné scény.

1.6 Proces mnohonásobných odrazů

Světelné toky vyzařované zdroji světla či svítidly instalovanými v určitém prostoru dopadají nejprve ze svítidel přímo na jednotlivé světelně činné plochy, které se v daném prostoru vyskytují (např. na strop, stěny a podlahu místnosti) a které vykazují určité odrazné vlastnosti. V důsledku odrazu části světla od těchto ploch dochází k novému rozložení světelných toků v prostoru. Na sledované plochy tak dopadají nové dílčí světelné toky, které se od nich opět zčásti odrážejí. Zmíněné opakující se odražení světelných toků a jejich znovurozdělení v prostoru se neustále opakuje – probíhá proces mnohonásobných odrazů [1].

Protože činitele odrazu světelně činných ploch jsou vždy menší než jedna, dochází při každém odrazu ke ztrátám. Velikosti odražených světelných toků postupně klesají a po velmi krátkém čase je jejich vliv zcela zanedbatelný. V tomto smyslu se pak v procesu mnohonásobných odrazů prakticky dosahuje určitého konečného rozdělení světelných toků [1].

Celkové výsledné světelné toky dopadající po mnohonásobných odrazech na jednotlivé plochy v daném prostoru jsou přes zmíněné ztráty vyšší, než počáteční toky dopadlé na tyto plochy přímo ze svítidel. Proto jsou vyšší i hladiny osvětlenosti sledovaných ploch, tedy i jejich jasy a světlení [1].

Při světelně technických výpočtech je tedy nutné plochy obklopující sledovaný prostor chápat jako sekundární zdroje světla, které svým vyzářeným světelným tokem ovlivňují výsledný stav rozložení světelného toku v prostoru [1].

1.7 Řešení mnohonásobných odrazů soustavou lineárních rovnic

Sekundární zdroje světla se ve většině případů nahrazují modelem Lambertova zářiče. Za takového předpokladu lze výsledný světelný tok Φ_i dopadající na i -tou plochu podílející se na mnohonásobných odrazech stanovit jako součet toku Φ_{i0} dopadajícího na tuto plochu přímo ze svítidel (tzv. počáteční tok) a toků Φ_{ki} dopadajících na i -tou plochu z ostatních ploch. Světelný tok Φ_{ki} dopadající na i -tou plochu z plochy k -té je dán součinem světelného toku Φ_k dopadajícího na k -tou plochu, středního činitele odrazu k -té plochy ρ_k a činitele vazby k -té plochy s plochou i -tou ψ_{ki} , který určuje, jaká část toku vyzářeného k -tou plochou dopadne na plochu i -tou [1].

$$\Phi_i = \Phi_{i0} + \sum_{k=1}^n \Phi_{ki} = \Phi_{i0} + \sum_{k=1}^n \psi_{ki} \cdot \rho_k \cdot \Phi_k, \quad (1.19)$$

kde Φ_k je výsledný světelný tok dopadající na k -tou plochu v procesu mnohonásobných odrazů (lm),

ψ_{ki} je činitel vazby k -té plochy s plochou i -tou (–),

ρ_k je střední činitel odrazu k -té plochy a n je počet ploch podílejících se na procesu mnohonásobných odrazů (–).

Ze soustavy lineárních algebraických rovnic sestavených podle vztahu (1.19) lze pro všechny plochy uvažovaného prostoru podílející se na procesu mnohonásobných odrazů vypočítat výsledné toky Φ_i dopadající na jednotlivé uvažované plochy [1].

Při popisu skutečného odrazu světla však nevystačíme jen s tímto zjednodušením odrazných vlastností světelně činných ploch a s integrálním činitelem odrazu, tak jak byl popsán v odstavci 1.2. Je proto třeba zjistit, jaké je skutečné rozložení jasu při odrazu od světelně činných povrchů, které se v interiéru běžně vyskytují.

Při respektování nedifuzního přístupu k odraženým světelným tokům jsou činitelé vazby ψ_{ki} závislé na úhlu dopadu paprsků. Vyzařování sekundárních zdrojů světla je pak třeba popisovat obecnou fotometrickou plochou jasu. Respektování takových fotometrických ploch jasu je při výpočtech výsledného rozložení světelných toků velmi náročné, proto se jako vhodnější pro řešení mnohonásobných odrazů jeví metody používané v počítačové grafice pro realistické zobrazení (tzv. vizualizaci) modelované scény.

1.8 Osvětlovací modely v počítačových vizualizačních programech

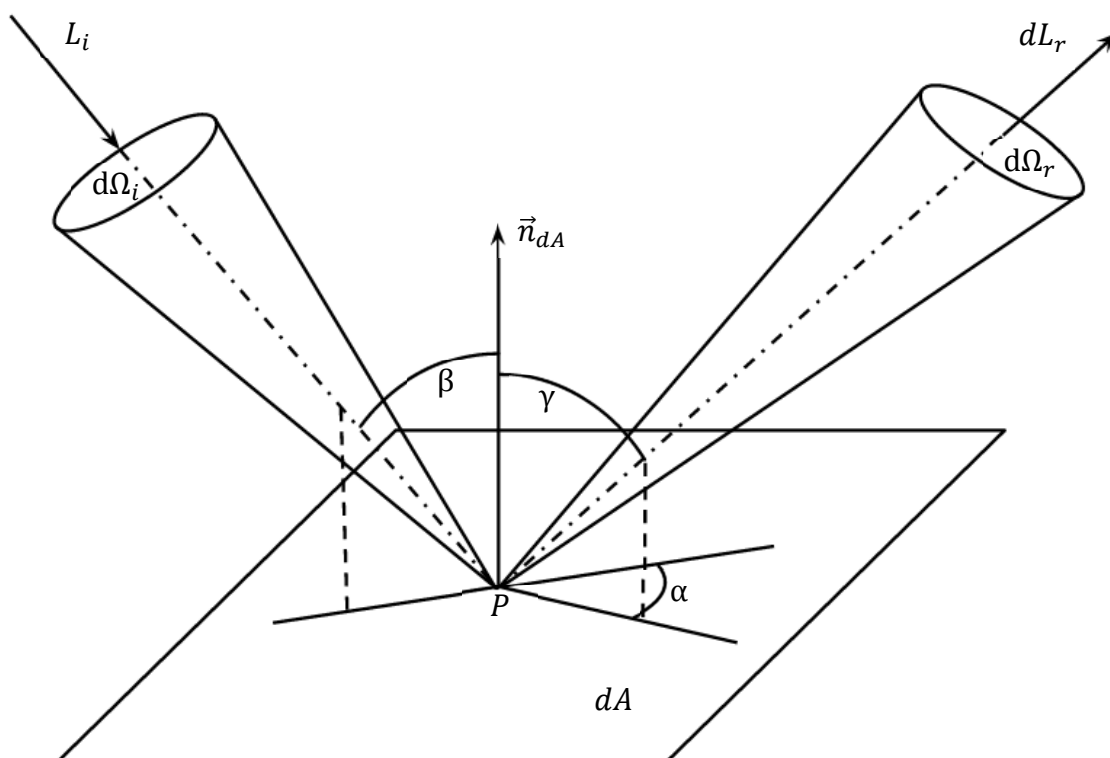
Počítačové vizualizační programy využívají pro realistické modelování trojrozměrných scén a řešení mnohonásobných odrazů znalosti chování světelného paprsku v uzavřeném prostoru. Dopadne-li světelný paprsek do bodu na povrchu tělesa, po odrazu se rozptýlí obecně do všech směrů prostoru. Matematická funkce vyjadřující intenzitu paprsku rozptýleného světla v závislosti na jeho směru a na směru a intenzitě dopadajícího paprsku se nazývá odrazová funkce a je základem osvětlovacího modelu.

Úkolem osvětlovacího modelu je definovat jas daného bodu na povrchu objektu při pohledu na tento bod z libovolného směru. Vstupem algoritmu řešícího odraz světla v daném bodě jsou geometrické informace o daném bodu (poloha, směr normály k ploše v daném bodě), údaje o osvětlení (rozmístění zdrojů světla, jednotlivé směry a jim odpovídající intenzity světla dopadajícího do daného bodu, apod.) a údaje o směru pohledu pozorovatele. Další parametry jsou pak specifické pro konkrétní osvětlovací model a popisují optické vlastnosti materiálu a jeho povrchu. Mohou to být např. parametry jako lesklost, průhlednost, index lomu, anizotropie odrazu (závislost odrazných vlastností na směru dopadajícího světla) a podobně.

Většina osvětlovacích modelů, které vycházejí z reálných fyzikálních zákonů, je založena na tzv. dvousměrové odrazové distribuční funkci $f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma)$ označované též zkratkou BRDF – bidirectional reflectance distribution function. Tato funkce popisuje, kolik světla přicházejícího z daného směru se odrazí do jiného směru poloprostoru (proto dvousměrová). Je definována jako poměr mezi diferenciálním

jasem dL_r ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$) bodu P ve směru určeném úhly α a γ a diferenciální osvětleností dE_P (lx) okolí bodu P (elementární plošky dA) vyvolané bodovým zdrojem světla s jasnem L_i ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$), který je umístěn ve směru určeném úhlem β :

$$f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma) = \frac{dL_r(\alpha, \gamma)}{dE_P(\beta)} = \frac{dL_r(\alpha, \gamma)}{L_i(\beta) \cdot \cos\beta \cdot d\Omega_i} \quad (1.20)$$



obr. 1-7: Dvousměrová odrazová distribuční funkce (BRDF).

Funkční hodnota dvousměrové odrazové distribuční funkce je vždy kladná, avšak shora není nijak omezena. Hodnota dvousměrové odrazové distribuční funkce se nezmění, zaměníme-li směry dopadajícího a odraženého záření. Platí tedy tzv. Helmholtzův princip reciprocity:

$$f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma) = f_{BRDF}(\alpha, \gamma, \beta) \quad (1.21)$$

Vyhodnocování osvětlení pomocí dvousměrové odrazové distribuční funkce je výpočetně velmi náročné. Taktéž zjistit hodnoty BRDF pro konkrétní materiál je velice obtížné a bez přesných optických přístrojů v podstatě nemožné. Proto všechny osvětlovací modely pracují s určitou aproximací distribuční funkce. Z dvousměrové odrazové distribuční funkce vychází například metoda radiozity.

1.9 Globální zobrazovací metody

V reálném světě se v procesu mnohonásobných odrazů výrazně projevuje existence více objektů v jednom prostoru. Pokud jsou mezi daným objektem a zdrojem světla umístěny další objekty, leží tento objekt ve stínu či polostínu. Naopak odražené světlo od velkého tělesa (např. stěny) může zvýšit osvětlenost stěn těles odvrácených od přímých (primárních) zdrojů světla. Dalším typem interakce v procesu odrazů jsou odlesky světla vznikající na vysoce zrcadlově odrazivém povrchu.

Globální charakter vzájemných vztahů popisujících šíření světla mezi objekty postihují dvě základní zobrazovací metody, které patří v počítačové grafice mezi nejnáročnější, ale poskytující kvalitní obrazy prostorových scén těžko odlišitelné od fotografií reálného světa. Jedná se o metodu sledování paprsku a metodu radiozity.

1.9.1 Metoda sledování paprsku

Metoda sledování paprsku vychází z fyzikální podstaty světla a respektuje některé optické vlastnosti objektů. V reálném světě se světelné paprsky šíří od světelných zdrojů různými směry. Některé z paprsků opustí prostor scény, jiné zasáhnou povrch objektů ve scéně, odrazí se a lámou a ovlivňují tak osvětlení dalších míst scény.

V počítačové grafice se proces šíření světla modeluje opačným postupem. Metoda pracuje tak, že pro každý bod obrazu vytvoří paprsek (polopřímku) s počátkem v oku pozorovatele, který prochází středem daného bodu na průmětně. Pro tento tzv. primární paprsek hledá jeho nejbližší průsečík se scénou. Pokud žádný takový průsečík neexistuje, paprsek přijímá jas pozadí a výpočet končí.

Pokud je průsečík nalezen, vyhodnotí se pro tento bod osvětlovací model. Do výpočtu se zahrnou však jen ty světelné zdroje, ke kterým dorazí stínový paprsek. Ten spojuje bod a zdroj světla. Pro stínové paprsky se nemusí hledat nejbližší průsečík, stačí, když je nalezen libovolný průsečík. Pokud žádný takový průsečík neexistuje, světlo není ničím zastíněno a může být zahrnuto do výpočtu osvětlovacího modelu.

Poté, co byl vyhodnocen osvětlovací model, může algoritmus vyslat až dva nové, tzv. sekundární paprsky. Pokud je objekt z lesklého materiálu, vytvoří se nový paprsek s počátkem ve zpracovávaném průsečíku a se směrem, který odpovídá paprsku odraženému od objektu (podle zákona odrazu). V případě průhledného objektu je vygenerován paprsek vzniklý lomem světla na hranici objektu (podle zákona lomu). Jas získaný pomocí těchto paprsků se přičítá k výslednému jasů bodu, pochopitelně upraven

koeficienty, které vyjadřují odraznost, resp. průhlednost materiálu. Sledování sekundárních paprsků se zastavuje, pokud paprsek opustí scénu nebo dopadne na objekt, který zrcadlově neodráží ani neláme světlo. V praxi se pak také výpočet zastavuje po dosažení nějaké maximální hloubky rekurze (obvykle 4 až 6).

Metoda sledování paprsku je vhodná pro zobrazování zrcadlových nebo průhledných objektů, kde však náročnost výpočtu vysoce stoupá s počtem odrazivých ploch. Typické pro metodu sledování paprsku jsou ostré stíny vržené tělesy ve scéně způsobené tím, že tato metoda nerespektuje nepřímé osvětlení, tj. odraz světla od difuzních ploch. Tento podstatný nedostatek řeší až metoda radiozity, která se díky tomu často s metodou sledování paprsku kombinuje.

1.9.2 Metoda radiozity

Metoda radiozity vychází ze zákona zachování energie. Základní algoritmus této metody tedy předpokládá, že šíření světelného záření mezi objekty probíhá v energeticky uzavřené scéně a že není ovlivněno prostředím (prostředí scény netlumí procházející světlo). Na rozdíl od metody sledování paprsku umožňuje využít i jiné než bodové zdroje světla, ale naopak neumožňuje zrcadlové ani průhledné povrchy.

Výpočet probíhá metodou konečných prvků, což způsobuje nutnost rozdělení scény na jednotlivé elementární plošné elementy. Nejprve je vyhodnoceno šíření světla ze světelných zdrojů a jeho odrazy od okolních těles. Výsledkem tohoto výpočtu je soustava konfiguračních faktorů, které jsou přiřazeny každé elementární ploše a vyjadřují vzájemnou viditelnost plošek (pro každou plochu existuje index vyjadřující viditelnost všech ostatních ploch). Výpočet vyzařování (radiozity) jednotlivých ploch je pak řešením soustavy n rovnic o n neznámých, kde n je počet elementárních ploch, na které je scéna rozdělena. Pro samotný výpočet konfiguračních faktorů existuje mnoho postupů, z nichž některé komplexnější spadají již do oblasti statistických metod výpočtu globálního osvětlování (např. stochastic radiosity, stochastic relaxation radiosity, Jacobi interactive radiosity, shooting radiosity, apod.).

Metoda radiozity je nejrozšířenější zobrazovací metodou, která bere v úvahu globální šíření světla. Výhodou této metody je, že řešením je množina hodnot popisující šíření světla ve scéně závislá na geometrii, nikoli na pohledu do scény. Jediný výpočet radiozity je proto možné použít pro zobrazení jakéhokoliv pohledu do scény. Výpočetní náročnost metody radiozity však prudce stoupá s rostoucí složitostí scény. Základní

algoritmus metody radiozity nebere v úvahu jiné odrazy světla, než ideálně difuzní, není tedy brán v úvahu odraz od zrcadlových povrchů a transparentnost materiálů.

Metodu radiozity využívá většina systémů pro návrh soustav umělého osvětlení. Ze známých systémů pro vizualizaci jsou to například Lightscape (kombinace radiozity a metody sledování paprsku), Blender, Microstation renderer [2].

1.9.3 Stochastické metody

S nárůstem výkonnosti výpočetních systémů také vzrostly požadavky na kvalitu fotorealistického zobrazování, což umožnilo rozvoj dalších metod, které řeší nedostatky výše jmenovaných postupů. Umožňují modelovat mnohem více fyzikálních jevů reálného světa a tím vytvářejí realističtější dojem. Základem těchto metod je většinou integrace zobrazovací rovnice metodou Monte Carlo (viz [3]), kdy se v různých obměnách zpracovává zjednodušený fyzikální model průchodu fotonů scénou mezi zdroji světla a pozorovatelem. Příkladem těchto metod je stochastické zpětné sledování paprsku (stochastic ray tracing), metoda fotonových map (photon mapping), metoda sledování fotonů a cest (particle tracing, path tracing) [4].

1.10 Shrnutí současného stavu problematiky

Současné světelně technické výpočetní programy určené pro návrh osvětlovacích soustav nahrazují skutečné odrazné vlastnosti materiálů v daném prostoru modelem ideální difuzní plochy, což vede k potlačení zrcadlové složky odrazu a nepřesným výsledkům výpočtu při použití materiálů vykazujících smíšený odraz světla. Metodami používanými v počítačové grafice (jako je např. metoda sledování paprsku) lze dosáhnout korektní architektonické vizualizace scény včetně zohlednění mnohonásobných odrazů světla na plochách s nedifuzními odraznými vlastnostmi. Dosud jsou ale i v těchto výpočtech odrazné vlastnosti materiálů popsány matematickým modelem, který nemusí vždy odpovídat skutečným odrazným vlastnostem sledovaného materiálu. Proto je třeba navrhnout vhodný postup měření a zejména záznamu odrazných vlastností materiálů do datových souborů tak, aby bylo možné se skutečnými (změřenými) odraznými vlastnostmi materiálů provést světelně technické výpočty osvětlovacích soustav s využitím metod počítačové grafiky a výsledky těchto výpočtů porovnat s výsledky běžně užívaných světelně technických výpočetních programů.

2 Cíle disertační práce

- výzkum skutečných odrazných vlastností materiálů,
- definování vhodné metody záznamu odrazných vlastností materiálů a jeho následné využití při výpočtu mnohonásobných odrazů,
- analýza metod využívaných pro výpočet mnohonásobných odrazů v počítačové grafice a jejich aplikace ve světelně technických výpočtech,
- srovnání skutečných hodnot světelně technických veličin získaných měření ve vybraném prostoru s teoretickými výpočty mnohonásobných odrazů,
- zhodnocení vlivu mnohonásobných odrazů na kvalitu osvětlení.

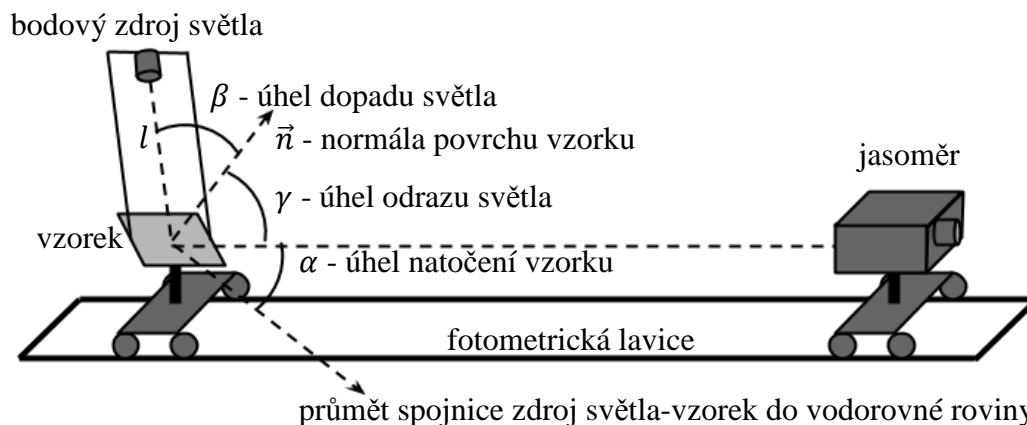
3 Výzkum skutečných odrazných vlastností materiálů

Vzhledem k tomu, že odrazné vlastnosti reálných materiálů neodpovídají idealizovaným modelům odrazu světla (viz odstavce 1.5.2 a 1.5.3), je při studiu odrazných vlastností skutečných materiálů třeba provést jasovou analýzu povrchu materiálu (sekundárního zdroje světla). Představu o odrazných vlastnostech zkoumaného materiálu získáme nejlépe s využitím fotometrické plochy jasu (viz odstavec 1.5) vzniklé odrazem světla od povrchu vzorku. U sekundárních zdrojů světla tvar fotometrických ploch jasu závisí na směru dopadu světla na zkoumaný odrazný povrch. Postup řešení výše uvedených cílů tak vyžaduje rozsáhlé měření jasu vzorků světelně činných povrchů v závislosti na úhlu dopadu světla. Naměřené hodnoty jasu vzorku v závislosti na úhlu dopadu světla jsou nezbytné pro tvorbu fotometrických ploch jasu, svítivosti a dvousměrové odrazové distribuční funkce.

3.1 Návrh metody měření odrazných vlastností materiálů

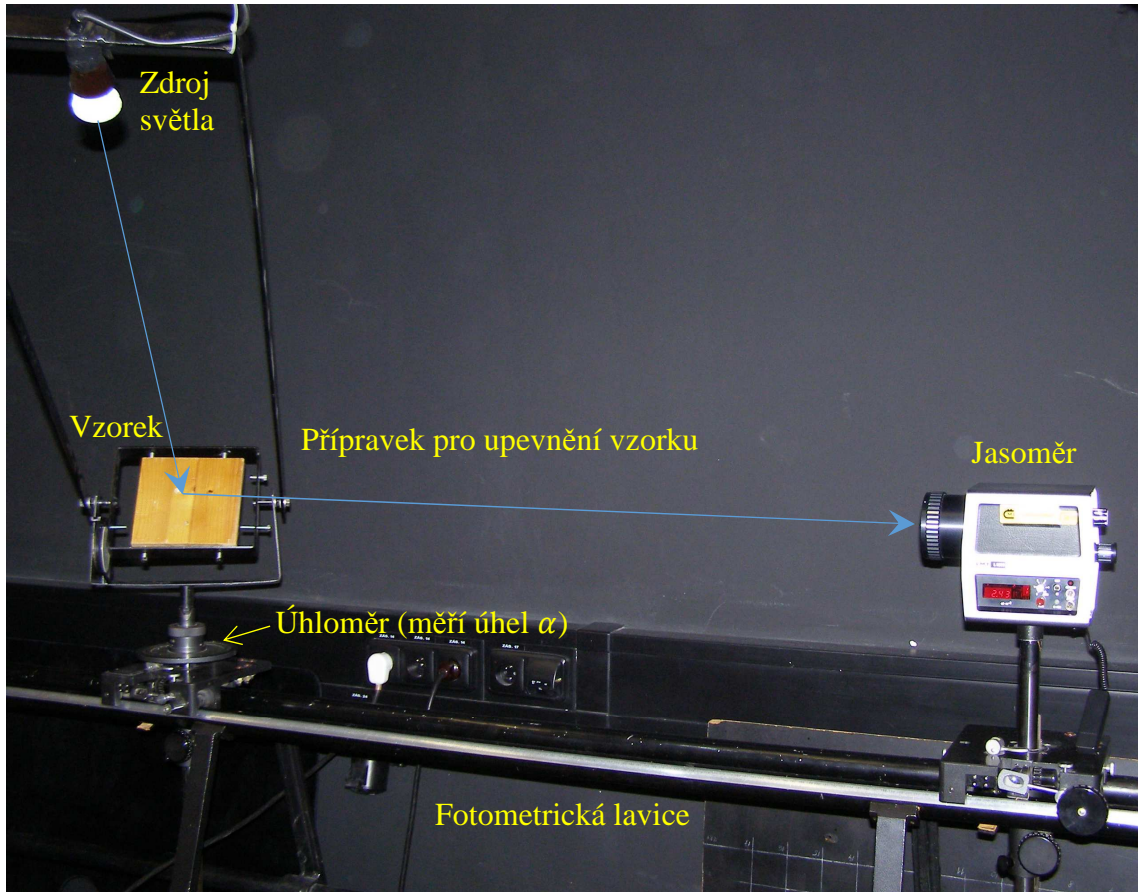
Jasová analýza sekundárního zdroje světla (vzorku materiálu) je založena na využití přípravku, který umožňuje osvětlování vzorku materiálu bodovým zdrojem světla pod různými úhly dopadu světla (β) a současně měření jasu L_r povrchu tohoto vzorku v různých úhlech odrazu světla (γ) a při různém natočení vzorku vzhledem k průmětu spojnice zdroj světla – vzorek do vodorovné roviny (úhel α). Tento přípravek vznikl rozšířením přípravku zkonstruovaného a využíteho pro měření vzorků povrchu vozovek [5], který však dříve neumožňoval nastavení úhlu natočení α a sloužil tak pouze k měření jednoho z řezů fotometrickou plochou jasu.

Aby byla zajištěna dostatečná stabilita přípravku, dostatečné fotometrické vzdálenosti (zdroj světla–vzorek a vzorek–jasoměr) a opakovatelnost měření, je vhodné umístit měřicí přípravek na fotometrickou lavici. Pro jasovou analýzu jsem využil jasoměr LMT L1009 laboratoře světelné techniky katedry elektroenergetiky FEL ČVUT v Praze. Vzhledem k nemalé hmotnosti tohoto přístroje jsem zvolil uspořádání měřicího pracoviště s pevným umístěním jasoměru v kombinaci s přípravkem s nastavitelnou polohou vzorku a otočným zdrojem světla, viz obr. 3-1.



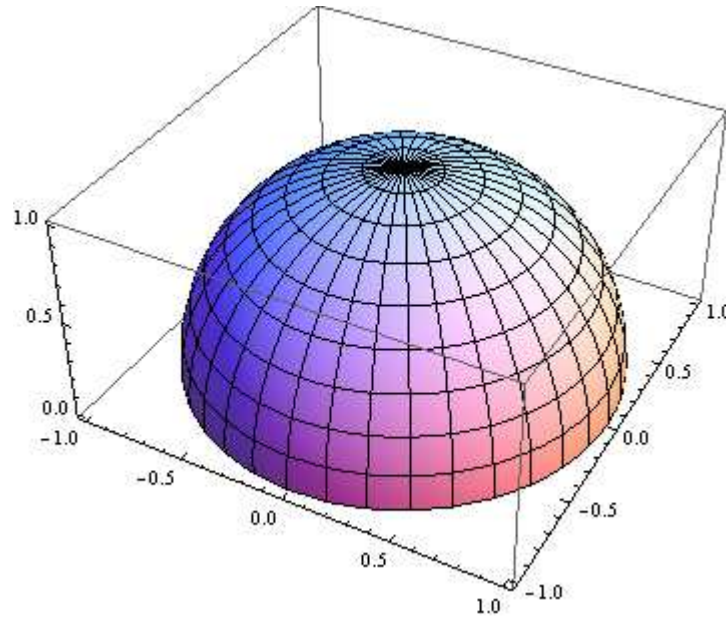
obr. 3-1: Fotometrická lavice s přípravkem pro jasovou analýzu odraženého světla.

Na fotometrické lavici je pevně umístěn bodový jasoměr, jehož objektiv je zaostřen na měřený vzorek. Vzorek o rozměrech 15×15 cm je umístěn na konstrukci, která se otáčí kolem své vertikální i horizontální osy, čímž se při daném uspořádání mění úhel natočení vzorku α (vertikální osa) a úhel odrazu světla γ (horizontální osa). Na konstrukci nesoucí vzorek je dále připevněno pevné rameno délky l , kterým lze samostatně otáčet podél vodorovné osy (a měnit tak úhel dopadu světla β), a na jehož konci je připevněn světelný zdroj. Jako vhodný zdroj byla použita halogenová žárovka, protože její velikost je menší než pětina vzdálenosti l od vzorku a lze ji tudíž považovat za bodový světelný zdroj. Měřicí přípravek umožňuje aretaci vzorku materiálu v nastavené poloze (pevný úhel dopadu β a úhel natočení α), postupným natáčením přípravku tak lze získat soubor hodnot jasů povrchu vzorku odpovídajících postupně nastavovaným úhlům odrazu světla γ , samozřejmě s výjimkou situace, kdy jsou vzorek, zdroj i jasoměr seřazeny v přímce a vzorek je zacloněn světelným zdrojem. Tato konfigurace přípravku se díky snadnosti obsluhy ukázala jako nejvhodnější pro měření poměrně velkého souboru hodnot jasů odpovídajících jednotlivým kombinacím všech tří měřených úhlů (úhlu dopadu, odrazu a natočení).



obr. 3-2: Měřící pracoviště s upevněným vzorkem, zdrojem světla a jasoměrem;
případ, kdy $\alpha = 50^\circ, \beta = 0^\circ, \gamma = 60^\circ$.

Zkoumání jednoho vzorku představuje velice zdlouhavý proces, neboť podrobné proměření indikatrix jasu závisí na přesném nastavení požadovaných úhlů. Vzhledem k množství kombinací jednotlivých úhlů byl zvolen krok měření $\Delta\alpha = \Delta\beta = \Delta\gamma = 10^\circ$ pro všechny 3 sledované úhly α, β, γ , což při měřicím rozsahu úhlů $\alpha \in \langle 0^\circ; 360^\circ \rangle$; $\beta \in \langle 0^\circ; 70^\circ \rangle$; $\gamma \in \langle 0^\circ; 80^\circ \rangle$ činí 2 664 kombinací jednotlivých úhlů pro každý měřený vzorek. Úhly dopadu a odrazu β a γ nebylo možné nastavit na 90° (resp. 80°), neboť při tomto úhlu docházelo k zaclonění povrchu materiálu upevňovacím rámečkem, resp. konstrukcí ramene se světelným zdrojem. Jednotlivé směry měření jasu vzorku vyznačené průsečíky křivek na jednotkové polokouli se středem v bodě odrazu světla jsou znázorněny na obr. 3-3. Křivky připomínající zeměpisné poledníky znázorňují jednotlivé úhly natočení vzorku α , kružnice připomínající zeměpisné rovnoběžky znázorňují jednotlivé úhly odrazu γ .



obr. 3-3: Jednotlivé směry (definované úhly α, γ) měření jasů vzorku vyznačené průsečíky křivek na jednotkové polokouli se středem v bodě odrazu světla $[0,0,0]$.

Měření jasů bylo doplněno měřením osvětlenosti v bodě, do kterého byl zaostřen jasoměr (tj. ve středu měřeného vzorku). K měření osvětlenosti byl použit luxmetr Minolta T-10. Hodnoty osvětlenosti vzorku bodovým zdrojem světla jsou třeba pro výpočet hodnot dvousměrové odrazové distribuční funkce BRDF, viz rovnice (1.20).

3.2 Výběr vzorku materiálů pro měření

Vzhledem k časově velmi náročnému procesu měření (viz odstavec 3.1) a také k tomu, že cílem této disertační práce není proměření co největšího počtu vzorků materiálů (tím se zabývala práce [5]), ale spíše nalezení metody zpracování, záznamu a využití naměřených dat pro matematické modelování světelných scén, zvolil jsem pro měření pouze jeden vzorek materiálu, který reprezentuje v co největší míře odlišnost od idealizovaných modelů odrazu světla (viz odstavce 1.5.2 a 1.5.3). Takový materiál by tedy neměl vykazovat ani ideálně difuzní, ani ideálně zrcadlový odraz, ale naopak naprosto obecné odrazné vlastnosti. Vzhledem k možnosti dalšího využití výsledků této práce jsem zvolil materiál hojně využívaný v interiérech, a to lakované dřevo (viz obr. 3-4), které tak reprezentuje povrchy různých druhů nábytku.

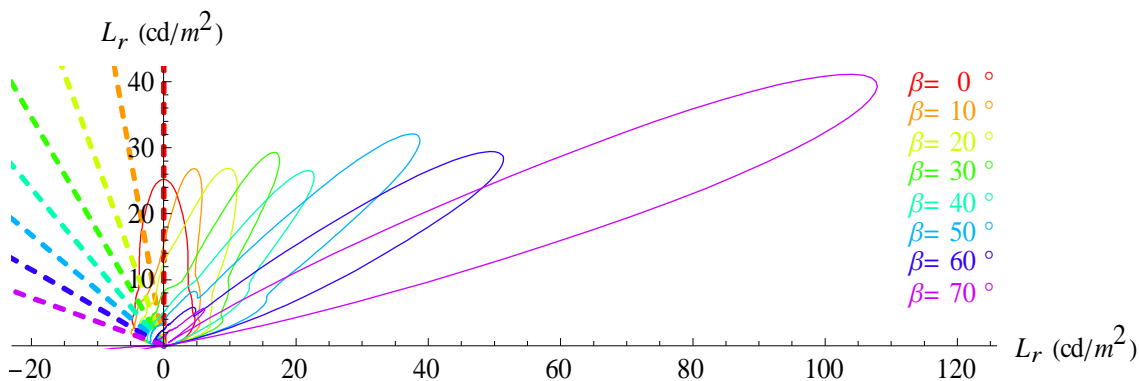


obr. 3-4: Detail vzorku měřeného materiálu v okolí bodu měření jasu.

3.3 Výsledky měření odrazných vlastností materiálu

Naměřené hodnoty jasu $L_r(\alpha, \gamma)$ vzorku materiálu pro různé úhly natočení vzorku (α), úhly dopadu světla (β) a úhly odrazu (γ) jsou shrnuty v tabulkách v příloze A.

Pro znázornění tvaru fotometrické plochy jasu lze využít křivky jasu, které jsou rovinnými řezy fotometrickou plochou jasu. Tyto křivky jsou hlavním grafickým zobrazením, které charakterizuje světelně technické vlastnosti odrazných povrchů, a to podobně, jako křivky svítivosti u běžných svítidel. Na následujícím obrázku (obr. 3-5) jsou uvedeny křivky jasu v polárních souřadnicích odpovídající jednotlivým úhlům dopadu světla β pro úhly natočení $\alpha = 0^\circ$. Čárkovaně jsou znázorněny směry dopadu světla barevně odpovídající příslušné křivce jasu.

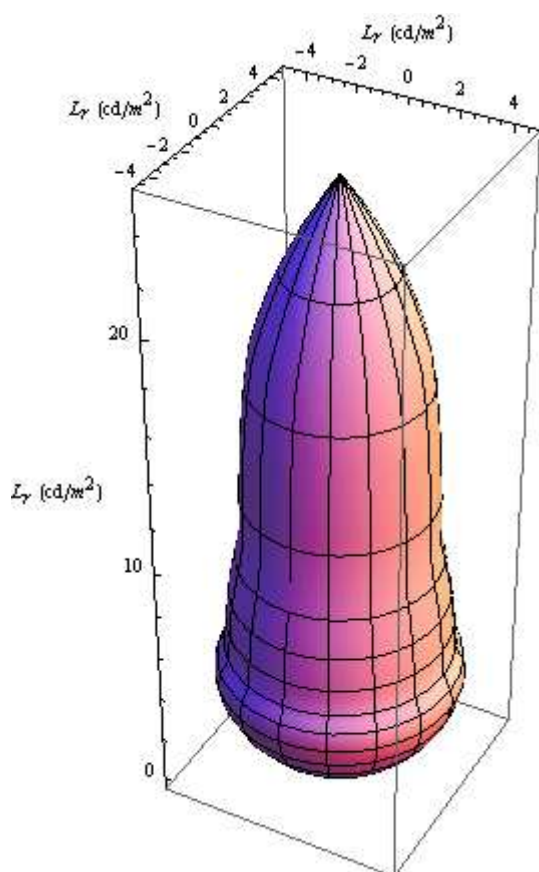


obr. 3-5: Aproximované křivky jasu v polárních souřadnicích odpovídající jednotlivým úhlům dopadu světla β pro úhly natočení $\alpha = 0^\circ$.

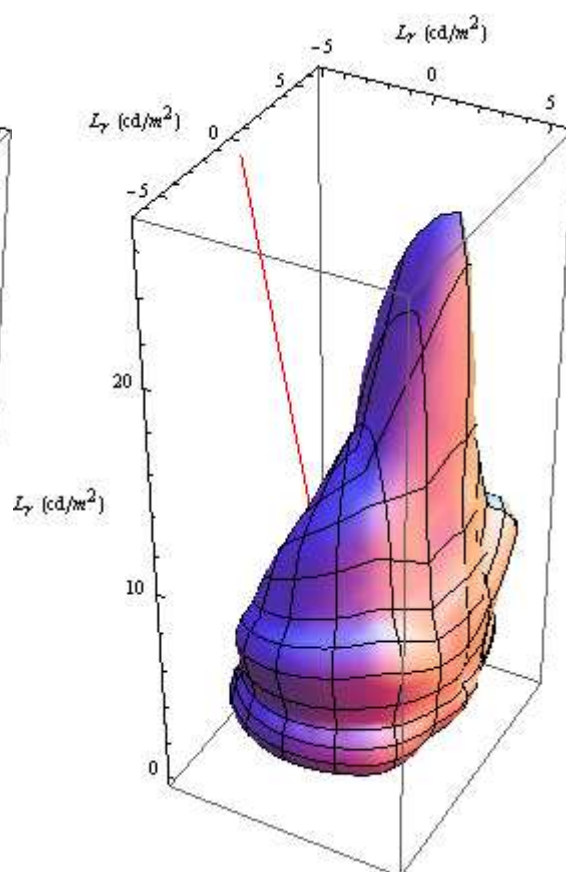
Naměřené hodnoty jasu $L_r(\alpha, \gamma)$ (resp. proměnná *hodnotyL*) pro každý jednotlivý úhel dopadu byly proloženy interpolační funkcí jasu s využitím programu Wolfram Mathematica:

$$\text{fceL}[\alpha_ , \gamma_] = \text{Interpolation}[\text{hodnotyL}][\alpha, \gamma] \quad (3.1)$$

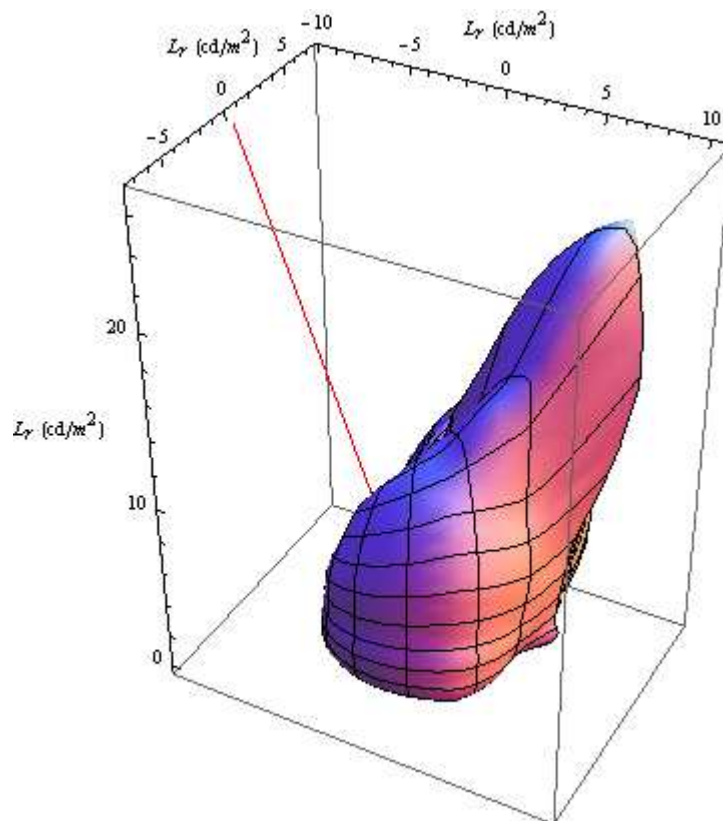
S využitím těchto interpolačních funkcí pak lze získat hodnotu jasu L_r pro jakoukoliv kombinaci úhlů α, β, γ . Pro názornost příkládám na obr. 3-6 až obr. 3-13 grafy fotometrických ploch jasu L_r měřeného vzorku materiálu zkonstruované s využitím interpolačních funkcí a zobrazené ve sférických souřadnicích (červenou přímkou je znázorněn směr dopadu světla; k odrazu světla dochází v bodě $[0,0,0]$ na povrchu materiálu):



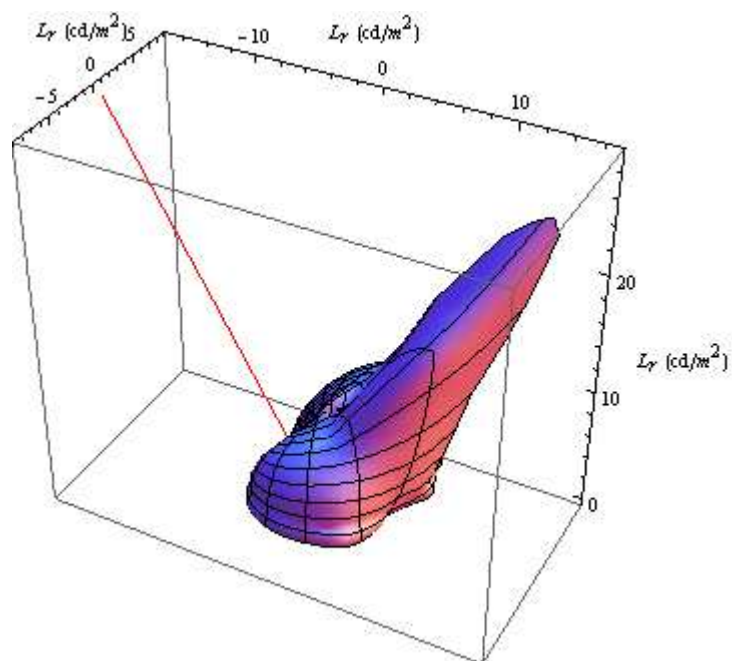
obr. 3-6: Model fotometrické plochy jasu měřeného vzorku materiálu pro úhel dopadu světla $\beta = 0^\circ$.



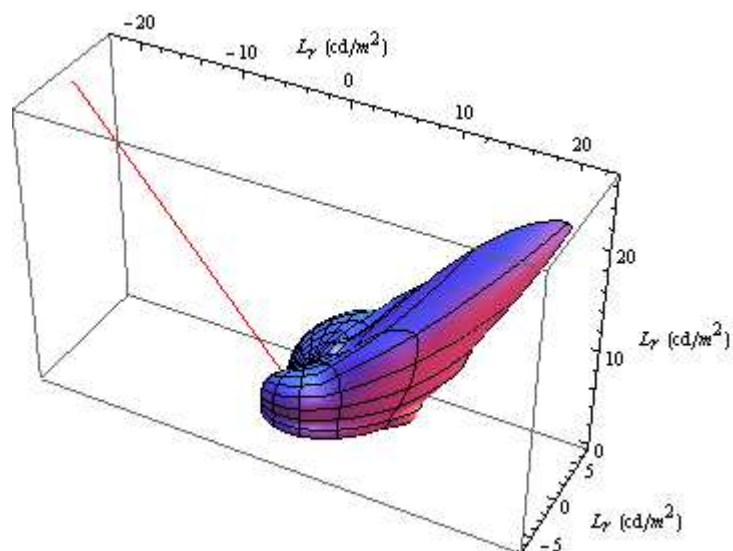
obr. 3-7: Model fotometrické plochy jasu měřeného vzorku materiálu pro úhel dopadu světla $\beta = 10^\circ$.



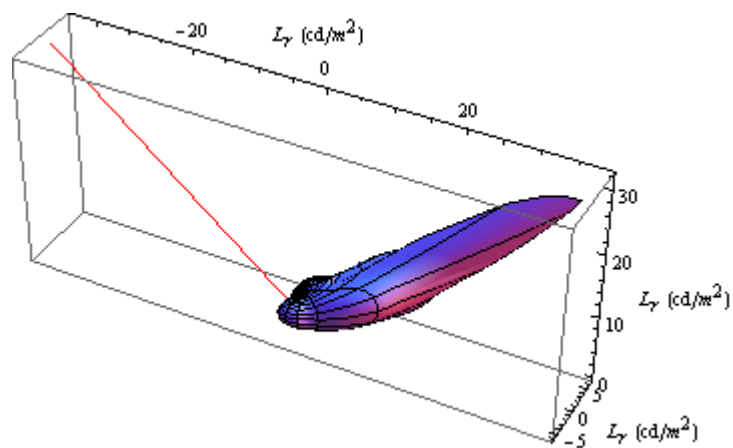
obr. 3-8: Model fotometrické plochy jasu měřeného vzorku materiálu pro úhel dopadu světla $\beta = 20^\circ$.



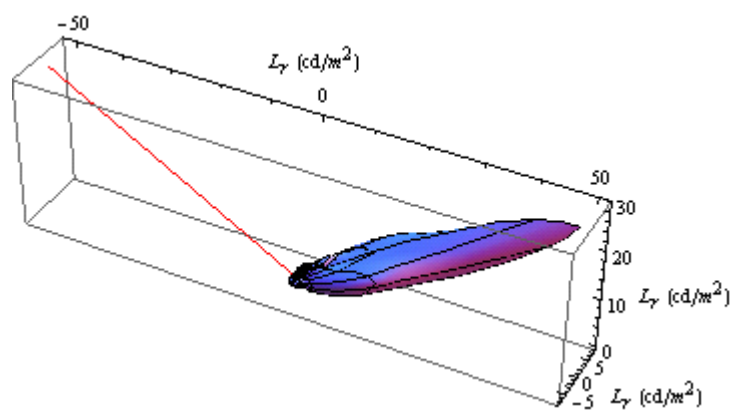
obr. 3-9: Model fotometrické plochy jasu měřeného vzorku materiálu pro úhel dopadu světla $\beta = 30^\circ$.



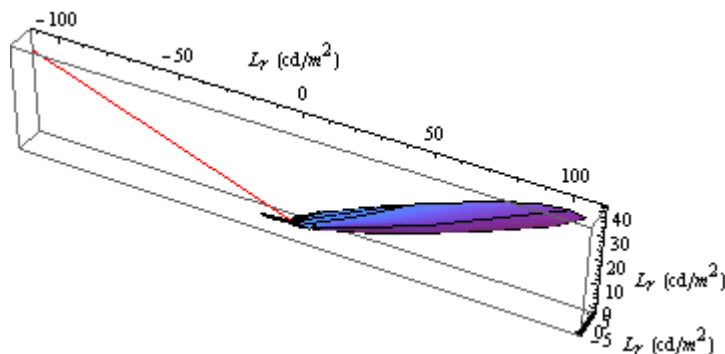
obr. 3-10: Model fotometrické plochy jasu měřeného vzorku materiálu pro úhel dopadu světla $\beta = 40^\circ$.



obr. 3-11: Model fotometrické plochy jasu měřeného vzorku materiálu pro úhel dopadu světla $\beta = 50^\circ$.



obr. 3-12: Model fotometrické plochy jasu měřeného vzorku materiálu pro úhel dopadu světla $\beta = 60^\circ$.



obr. 3-13: Model fotometrické plochy jasu měřeného vzorku materiálu pro úhel dopadu světla $\beta = 70^\circ$.

3.4 Analýza výsledků měření odrazných vlastností materiálů

Z hlediska procesu mnohonásobných odrazů je důležité zjistit podíl celkového odraženého světelného toku a světelného toku dopadlého do sledovaného bodu vzorku. To lze nejlépe realizovat aplikací vztahu (1.12) pro integrální činitel odrazu v kombinaci se vztahem (1.11). V případě, kdy je vzorek osvětlován bodovým zdrojem světla, je třeba určit integrální činitel odrazu pro každý jednotlivý úhel dopadu světla. Z těchto jednotlivých činitelů odrazu lze následně stanovit jejich střední hodnotu charakterizující odrazné vlastnosti materiálu nezávisle na směru dopadu světla.

Konstrukce přípravku pro jasovou analýzu (viz obr. 3-1) zajišťuje konstantní vzdálenost l vzorku od zdroje světla, osvětlenost vzorku při různých úhlech dopadu tedy lze určit vztahem

$$E_p(\beta) = E_0 \cdot \cos \beta \quad (lx; lx, ^\circ) \quad (3.2)$$

kde E_0 je osvětlenost vzorku při úhlu dopadu světla $\beta = 0^\circ$ v bodě měření jasu. Osvětlenost vzorku při úhlu dopadu světla $\beta = 0^\circ$ byla zjištěna s využitím luxmetru Minolta T-10 a její korigovaná hodnota (dle ověřovacího listu luxmetru) je $E_0 = 82,6 lx$.

Celkové světlení vzorku $M_p(\beta)$ bylo určeno pro každý jednotlivý úhel dopadu světla β metodou odvozenou od metody pásmových toků, která slouží k určení světelného toku světelného zdroje na základě znalosti křivek svítivosti zdroje. Jas $L_{\alpha\gamma}$ svazku paprsků vycházejících v prostorovém úhlu $\Delta\Omega_{\alpha\gamma}$ ze sledovaného bodu na povrchu vzorku měřený pod úhlem odrazu γ a při určitém natočení vzorku (úhel α) odpovídá dílčímu světlení ΔM_p . Situaci popisuje následující rovnice:

$$\Delta M_p = L_r(\alpha, \gamma) \cdot \cos \gamma \cdot \Delta\Omega_{\alpha\gamma}. \quad (lm \cdot m^{-2}; cd \cdot m^{-2}, ^\circ, sr) \quad (3.3)$$

Dílčí prostorový úhel $\Delta\Omega_{\alpha\gamma}$ je vymezen úhlovým krokem měření jasu $\Delta\alpha$ a $\Delta\gamma$ a ohraničen intervaly $\langle\alpha - \Delta\alpha; \alpha + \Delta\alpha\rangle$ a $\langle\gamma - \Delta\gamma; \gamma + \Delta\gamma\rangle$. Velikost všech prostorových úhlů $\Delta\Omega_{\alpha\gamma}$ pro daný úhel odrazu γ je totožná a součet těchto dílčích prostorových úhlů tvoří kulový pás $\Delta\Omega_\gamma$.

$$\Delta\Omega_\gamma = \frac{\Delta\alpha}{2\pi} \cdot \Delta\Omega_{\alpha\gamma} = 2 \cdot \pi \cdot [\cos(\gamma - \Delta\gamma) - \cos(\gamma + \Delta\gamma)] \quad (3.4)$$

Celkové světlení M_P vzorku osvětleného bodovým zdrojem světla pod daným úhlem dopadu světla β pak lze vyjádřit vztahem:

$$M_P = \sum \Delta M_P = \sum_{\alpha=0; \gamma=0}^{\alpha=2\pi; \gamma=\frac{\pi}{2}} L_r(\alpha, \gamma) \cdot \cos \gamma \cdot \Delta\Omega_{\alpha\gamma} \quad (3.5)$$

Aplikací rovnic (1.12), (3.2) a (3.5) byly určeny jednotlivé integrální činitele odrazu ρ pro každý měřený úhel dopadu světla β . Výsledky jsou shrnuty v tab. 3-1:

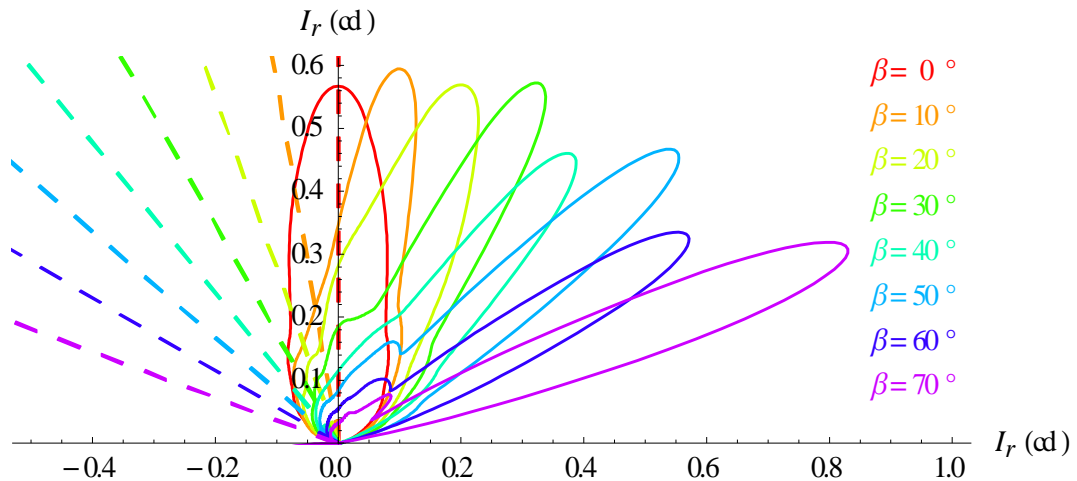
β (°)	0	10	20	30	40	50	60	70
E_P (lx)	82,6	81,3	77,6	71,5	63,3	53,1	41,3	28,3
M_P (lm·m ⁻²)	22,8	29,6	35,0	33,7	28,7	21,9	15,8	11,0
ρ (-)	0,28	0,36	0,45	0,47	0,45	0,41	0,38	0,39

tab. 3-1: Hodnoty osvětlenosti, světlení a integrálních činitelů odrazu vzorku pro jednotlivé úhly dopadu světla β

Střední hodnota činitele odrazu měřeného vzorku materiálu je $\rho_s = 0,40$. Tato hodnota by byla využita v případě modelování světelné scény běžně využívanými výpočetními programy, ve kterých jsou světelně činné materiály nahrazeny ideálně difuzními povrchy charakterizovanými integrálním činitelem odrazu.

3.5 Výpočet svítivosti vzorku materiálu

Svítivost $I_{\alpha\gamma}$ vzorku materiálu při různých úhlech pozorování (α, γ) lze na základě znalosti naměřených hodnot jasu $L_r(\alpha, \gamma)$ z odstavce 3.3 snadno určit s využitím rovnic (1.14) a (1.15). Vypočtené hodnoty svítivosti $I_{\alpha\gamma}$ vzorku materiálu o velikosti 15×15 cm pro různé úhly natočení vzorku (α), úhly dopadu světla (β) a úhly odrazu (γ) jsou shrnuty v tabulkách v příloze B. Na následujícím obrázku (obr. 3-14) jsou vypočtené hodnoty svítivosti $I_{\alpha\gamma}$ graficky znázorněny křivkami svítivosti v polárních souřadnicích odpovídajícími jednotlivým úhlům dopadu světla β pro úhly natočení $\alpha = 0^\circ$. Čárkovaně jsou znázorněny směry dopadu světla barevně odpovídající příslušné křivce svítivosti.

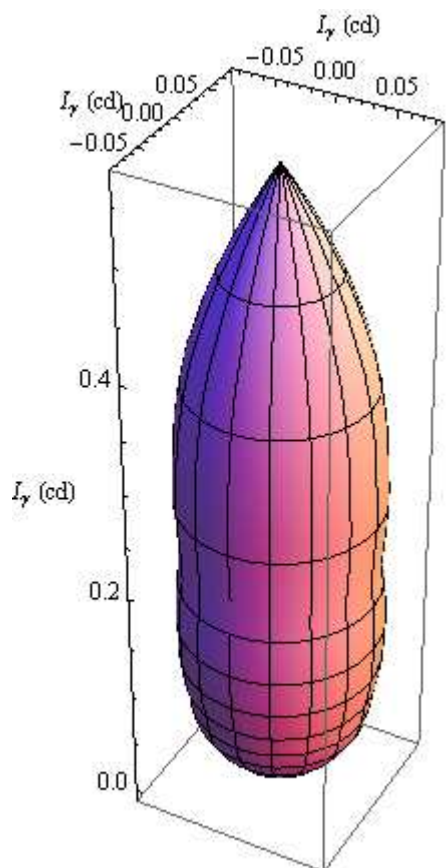


obr. 3-14: Aproximované křivky svítivosti v polárních souřadnicích odpovídající jednotlivým úhlům dopadu světla β pro úhly natočení $\alpha = 0^\circ$.

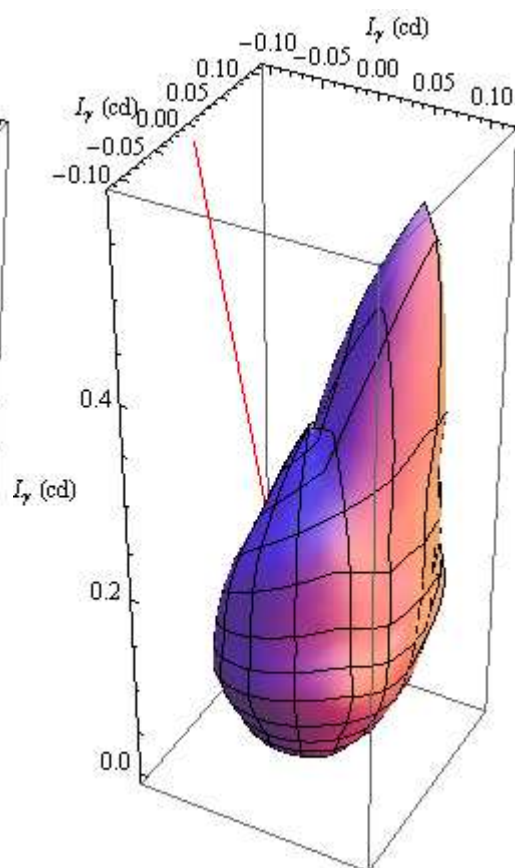
Vypočtené hodnoty svítivosti $I_{\alpha\gamma}$ (resp. proměnná *hodnotyI*) pro každý jednotlivý úhel dopadu byly proloženy interpolační funkcí jasu s využitím programu Wolfram Mathematica:

$$\text{fcel}[\alpha_,\gamma_]=\text{Interpolation}[\text{hodnotyI}][\alpha,\gamma]. \quad (3.6)$$

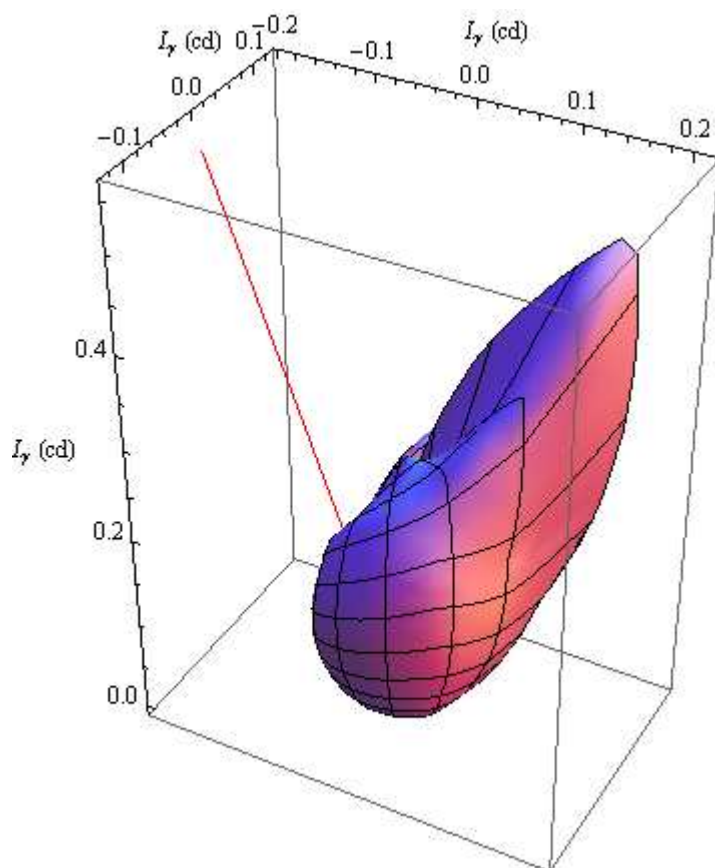
S využitím těchto interpolačních funkcí pak lze získat hodnotu svítivosti $I_{\alpha\gamma}$ pro jakoukoliv kombinaci úhlů α, β, γ . Na obr. 3-15 až obr. 3-22 jsou grafy fotometrických ploch svítivosti $I_{\alpha\gamma}$ měřeného vzorku materiálu zkonstruované s využitím interpolačních funkcí a zobrazené ve sférických souřadnicích (červenou přímkou je znázorněn směr dopadu světla; k odrazu světla dochází v bodě $[0,0,0]$ na povrchu materiálu).



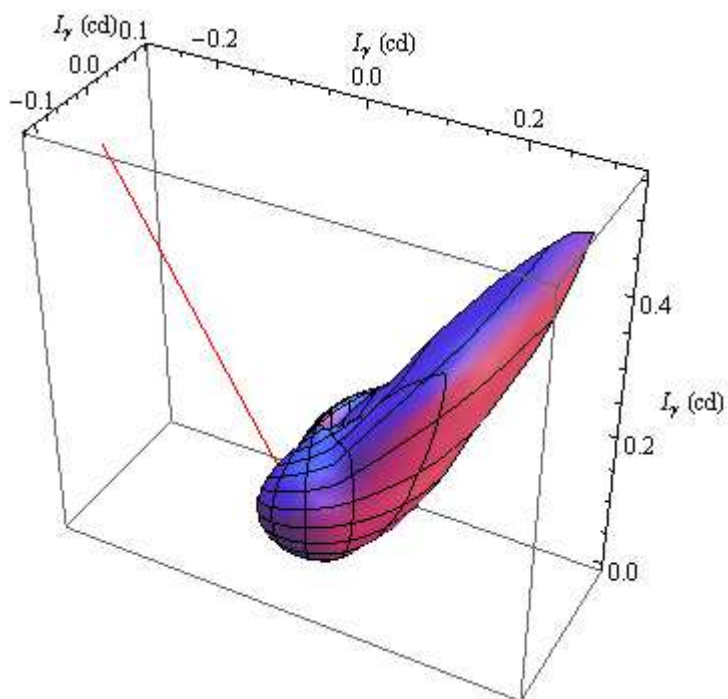
obr. 3-15: Model fotometrické plochy svítivosti měřeného vzorku materiálu pro úhel dopadu světla $\beta = 0^\circ$.



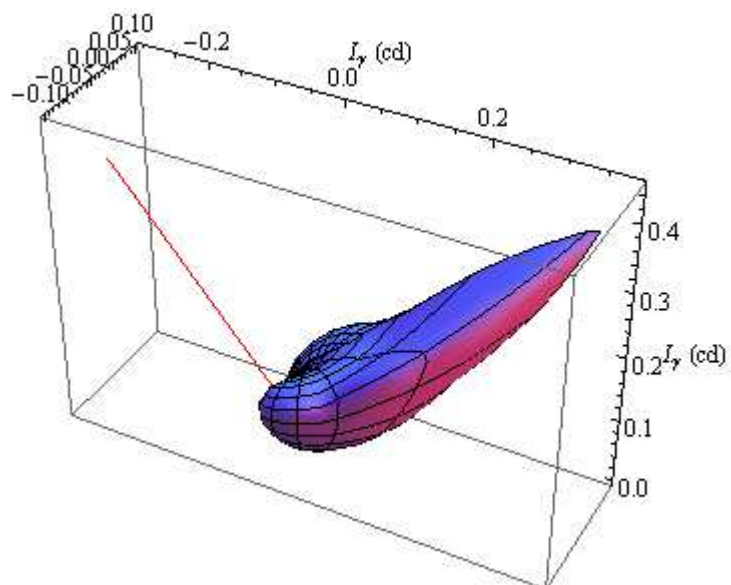
obr. 3-16: Model fotometrické plochy svítivosti měřeného vzorku materiálu pro úhel dopadu světla $\beta = 10^\circ$.



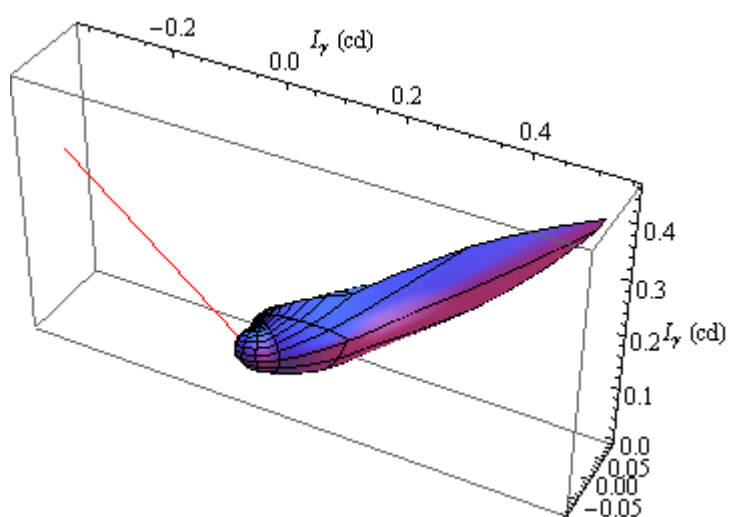
obr. 3-17: Model fotometrické plochy svítivosti měřeného vzorku materiálu pro úhel dopadu světla $\beta = 20^\circ$.



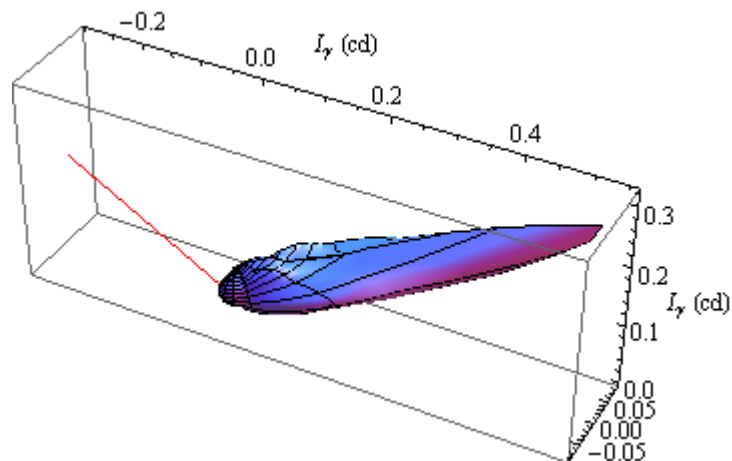
obr. 3-18: Model fotometrické plochy svítivosti měřeného vzorku materiálu pro úhel dopadu světla $\beta = 30^\circ$.



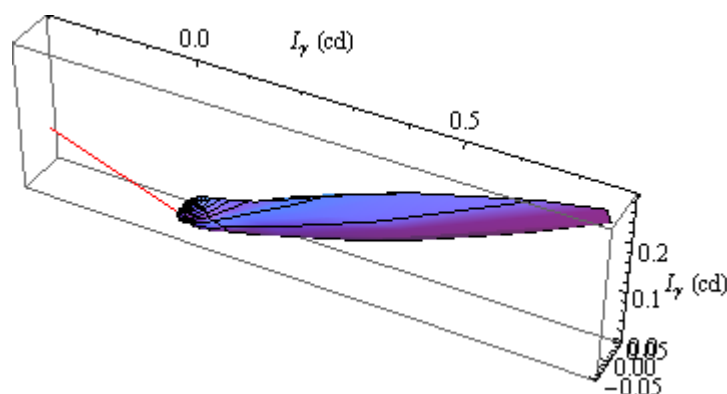
obr. 3-19: Model fotometrické plochy svítivosti měřeného vzorku materiálu pro úhel dopadu světla $\beta = 40^\circ$.



obr. 3-20: Model fotometrické plochy svítivosti měřeného vzorku materiálu pro úhel dopadu světla $\beta = 50^\circ$.



obr. 3-21: Model fotometrické plochy svítivosti měřeného vzorku materiálu pro úhel dopadu světla $\beta = 60^\circ$.



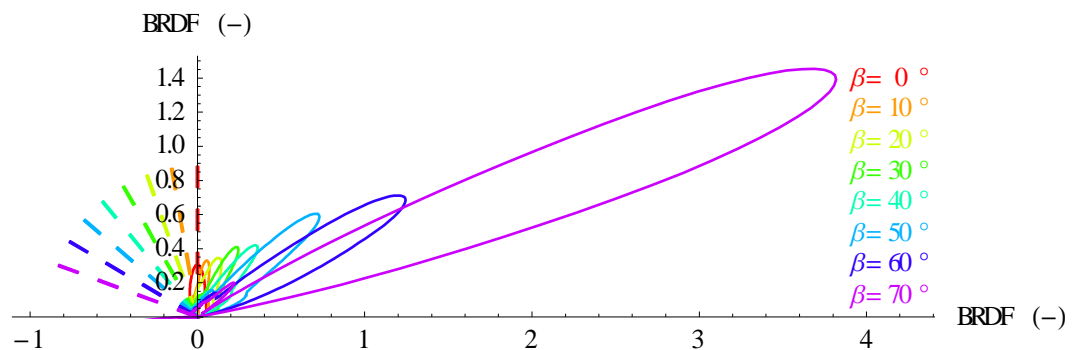
obr. 3-22: Model fotometrické plochy svítivosti měřeného vzorku materiálu pro úhel dopadu světla $\beta = 70^\circ$.

Z porovnání modelů fotometrických ploch jasu (obr. 3-6 až obr. 3-13) s modely fotometrických ploch svítivosti (obr. 3-15 až obr. 3-22) je patrné, že zatímco maximální hodnota jasu vzorku materiálu se se vzrůstajícím úhlem dopadu světla β zvyšuje, maximální hodnota svítivosti vzorku zůstává s měnícím se úhlem dopadu světla β přibližně stejná. To plyne z charakteru odrazných vlastností materiálu a zejména pak ze vztahu (1.15).

3.6 Výpočet dvousměrové odrazové distribuční funkce

Dvousměrovou odrazovou distribuční funkci $f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma)$ vzorku materiálu při různých úhlech pozorování (α, γ) lze na základě znalosti naměřených hodnot jasu $L_r(\alpha, \gamma)$ z odstavce 3.3 a naměřených hodnot osvětlenosti povrchu materiálu snadno určit s využitím rovnice (1.20). Vypočtené hodnoty dvousměrové odrazové distribuční funkce $f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma)$ vzorku materiálu pro různé úhly natočení vzorku α , úhly dopadu

světla β a úhly odrazu γ jsou shrnuty v tabulkách v příloze C. Na následujícím obrázku (obr. 3-23) jsou vypočtené hodnoty dvousměrové odrazové distribuční funkce $f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma)$ graficky znázorněny v polárních souřadnicích křivkami odpovídajícími průběhu dvousměrové odrazové distribuční funkce $f_{BRDF}(0^\circ, \beta, \gamma)$ odpovídajícími jednotlivým úhlům dopadu světla β pro úhly natočení $\alpha = 0^\circ$. Čárkovaně jsou znázorněny směry dopadu světla barevně odpovídající příslušné dvousměrové odrazové distribuční funkci.

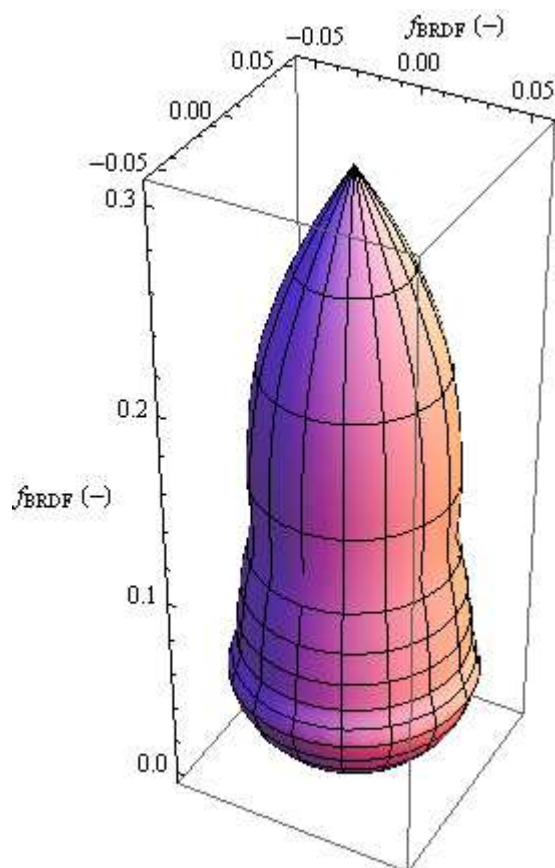


obr. 3-23: Funkční hodnoty dvousměrové odrazové distribuční funkce $f(0^\circ, \beta, \gamma)$ v polárních souřadnicích odpovídající jednotlivým úhlům dopadu světla β pro úhly natočení $\alpha = 0^\circ$.

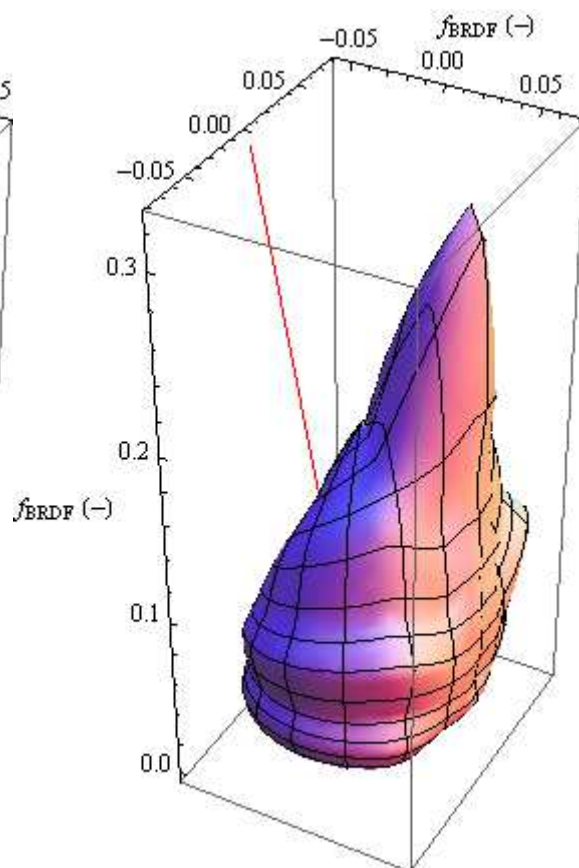
Vypočtené hodnoty dvousměrové odrazové distribuční funkce $f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma)$ (resp. proměnná *hodnotyBRDF*) byly proloženy interpolační funkcí jasu s využitím programu Wolfram Mathematica:

$$\text{fcel}[\alpha_, \beta_, \gamma_] = \text{Interpolation}[\text{hodnotyI}][\alpha, \gamma]. \quad (3.7)$$

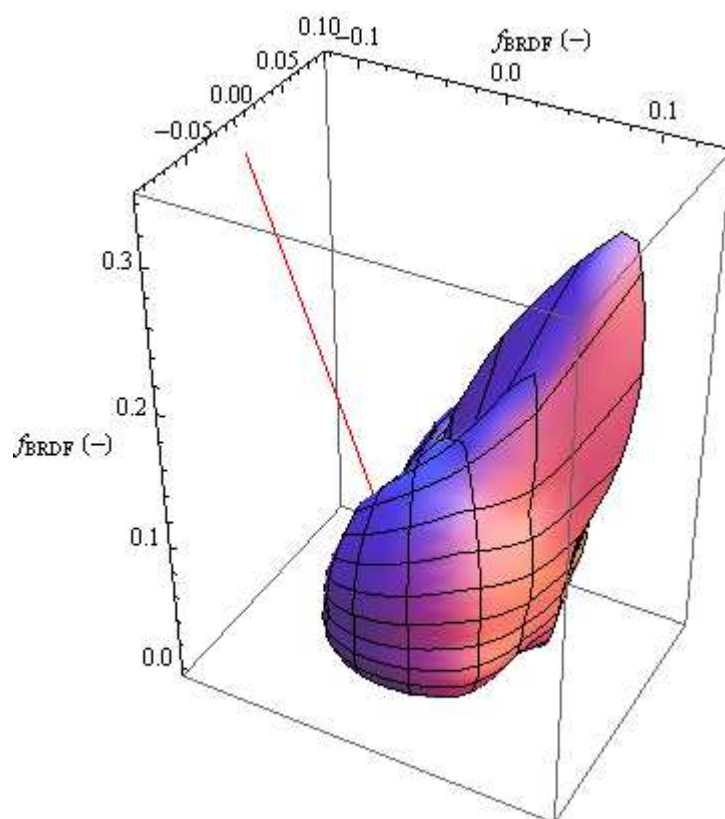
S využitím těchto interpolačních funkcí pak lze získat hodnotu dvousměrové odrazové distribuční funkce $f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma)$ pro jakoukoliv kombinaci úhlů α, β, γ . Na obr. 3-24 až obr. 3-31 jsou grafy funkčních hodnot dvousměrové odrazové distribuční funkce $f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma)$ zkonstruované s využitím interpolačních funkcí a zobrazené ve sférických souřadnicích (červenou přímkou je znázorněn směr dopadu světla; k odrazu světla dochází v bodě $[0,0,0]$ na povrchu materiálu):



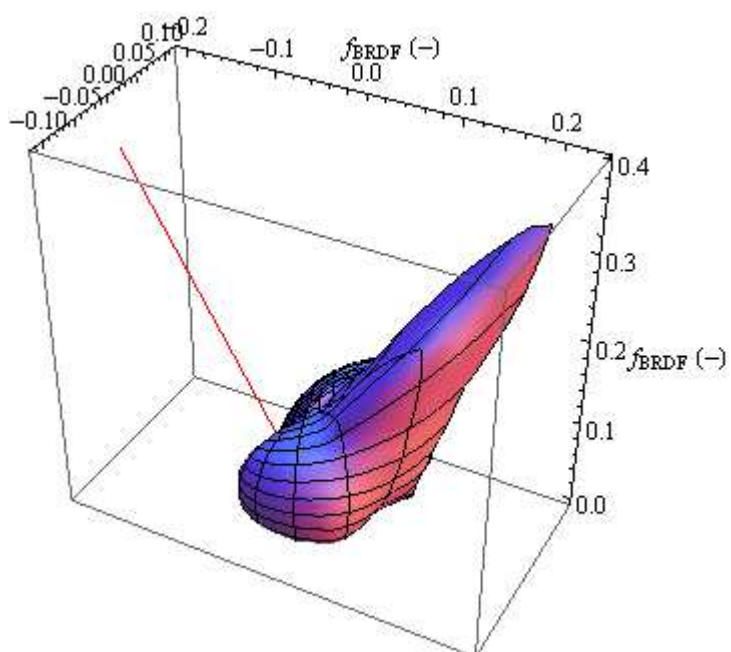
obr. 3-24: Funkční hodnoty dvousměrové odrazové distribuční funkce $f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma)$ měřeného vzorku materiálu pro úhel dopadu světla $\beta = 0^\circ$.



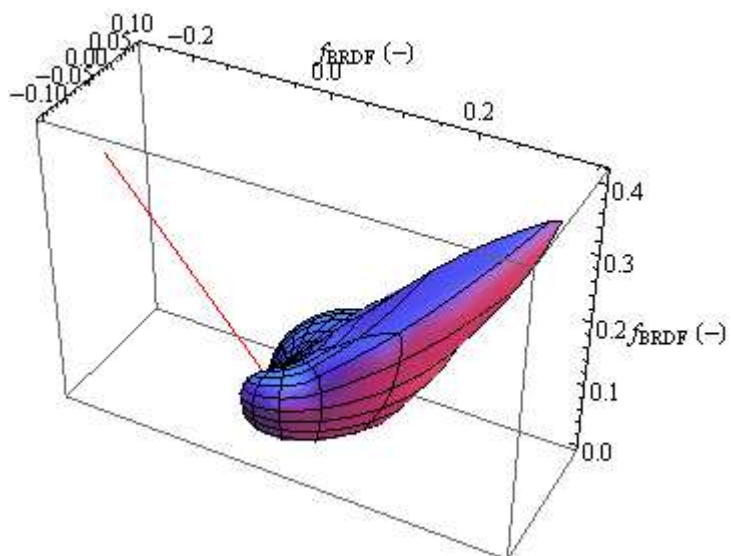
obr. 3-25: Funkční hodnoty dvousměrové odrazové distribuční funkce $f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma)$ měřeného vzorku materiálu pro úhel dopadu světla $\beta = 10^\circ$.



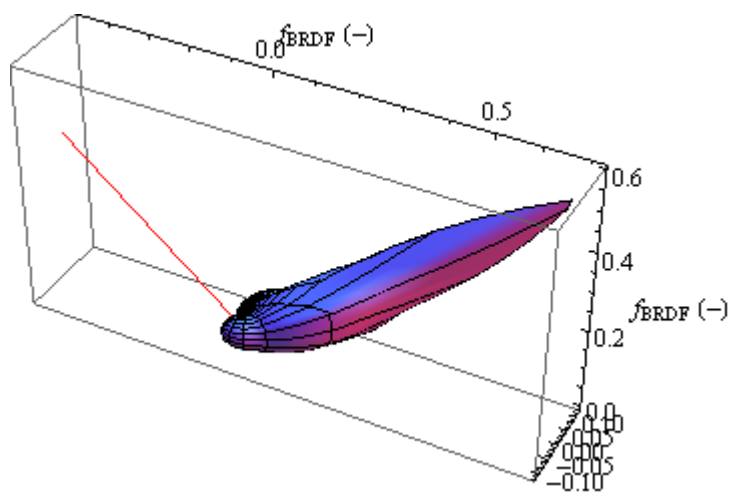
obr. 3-26: Funkční hodnoty dvousměrové odrazové distribuční funkce $f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma)$ měřeného vzorku materiálu pro úhel dopadu světla $\beta = 20^\circ$.



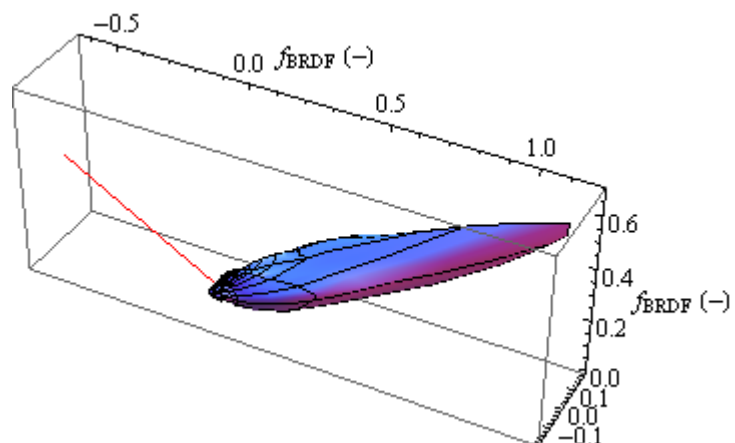
obr. 3-27: Funkční hodnoty dvousměrové odrazové distribuční funkce $f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma)$ měřeného vzorku materiálu pro úhel dopadu světla $\beta = 30^\circ$.



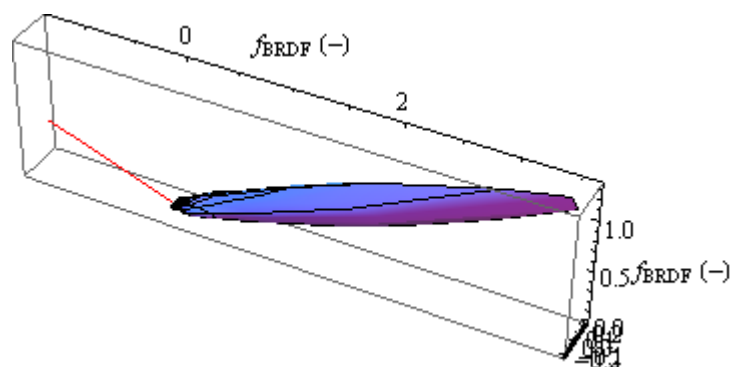
obr. 3-28: Funkční hodnoty dvousměrové odrazové distribuční funkce $f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma)$ měřeného vzorku materiálu pro úhel dopadu světla $\beta = 40^\circ$.



obr. 3-29: Funkční hodnoty dvousměrové odrazové distribuční funkce $f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma)$ měřeného vzorku materiálu pro úhel dopadu světla $\beta = 50^\circ$.



obr. 3-30: Funkční hodnoty dvousměrové odrazové distribuční funkce $f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma)$ měřeného vzorku materiálu pro úhel dopadu světla $\beta = 60^\circ$.



obr. 3-31: Funkční hodnoty dvousměrové odrazové distribuční funkce $f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma)$ měřeného vzorku materiálu pro úhel dopadu světla $\beta = 70^\circ$.

4 Návrh metody záznamu odrazných vlastností materiálů

Návrh vhodné metody záznamu odrazných vlastností materiálů by měl vycházet z předpokládaného budoucího praktického využití těchto dat. Je tedy třeba přihlídnout k v praxi často využívaným metodám modelování světelných scén. V současné době jsou nejrozšířenějšími nástroji využívanými k modelování světelných scén jednak výpočetní programy pro výpočet světelně technických veličin při projektování osvětlovacích soustav a také vizualizační programy využívané zejména v architektuře nebo v oblasti počítačové grafiky. Dále se proto budu zabývat návrhem metodiky záznamu odrazných vlastností materiálů zjištěných v odstavci 0 do formátů, se kterými lze pracovat ve dvou zmíněných oblastech možného využití. Vstupními údaji v programech pro projektování osvětlovacích soustav jsou soubory Eulumdat, které obsahují popis fotometrických ploch svítivosti (vytvořených v odstavci 3.5). Programy pro architektonickou vizualizaci pracují s dvousměrovými odrazovými distribučními funkcemi (vytvořenými v odstavci 3.6).

4.1 Formát vstupních dat pro světelně technické výpočetní programy

V běžně užívaných výpočetních programech pro projektování osvětlovacích soustav jsou světelně činné materiály a jejich odrazné vlastnosti zpravidla nahrazeny s cílem zjednodušení výpočtu ideálním rozptylovačem popsaným integrálním činitelem odrazu. Jediným prvkem, u něhož lze v rámci těchto výpočetních programů definovat směrovou závislost jasu (svítivosti), je svítidlo. Vzhledem k tomu, že odrazem světla od světelně činného povrchu se tento povrch stává sekundárním zdrojem světla, nabízí se možnost světelně činné plochy s obecnými odraznými vlastnostmi modelovat analogicky, jako svítidla.

Svítidla jsou ve výpočetních programech reprezentována souborem dat ve formě tzv. Eulumdat (v Evropě), případně ve formátu IES (v Severní Americe). Tyto soubory obsahují základní informace o svítidle (rozměry, výrobce, typ, identifikační číslo, příkon), o světelném zdroji (typ, světelný tok, teplota chromatičnosti, index podání barev) a sadu diskretních hodnot svítivosti svítidla v systému fotometrických rovin $C - \gamma$ změřených goniofotometrem. Jedná se o jednoduchý formát textového souboru [6], ve kterém jsou údaje o svítivosti zapsány v dané datové struktuře (viz tab. 4-1).

Položka	Údaj	Počet znaků
1	Identifikace svítidla	Max. 78
2	Typ svítidla (1 – bodové se symetrií svítivosti podél vertikální osy; 2 – přímkového typu; 3 – jiné)	1
3	Typ symetrie svítivosti (0 – nesymetrické; 1 – symetrie podél vertikální osy; 2 – symetrické podél roviny C0–C180; 3 – symetrické podél roviny C90–C270; 4 – symetrické podél rovin C0–C180 a C90–C270)	1
4	Počet n_C C-polorovin mezi 0° a 360° (zpravidla 24 pro interiérová svítidla, 36 pro uliční svítidla)	2
5	Úhlová rozteč ΔC mezi jednotlivými C-polorovinami (°)	5
6	Počet n_γ měřených úhlů γ v každé C-polorovině (zpravidla 19 nebo 37)	2
7	Úhlová rozteč $\Delta\gamma$ mezi měřenými úhly γ v každé C-polorovině	5
8	Identifikační číslo měření	max. 78
9	Název svítidla	max. 78
10	Identifikační číslo svítidla	max. 78
11	Název soboru	8
12	Datum vytvoření a jméno autora	max. 78
13	Délka, příp. průměr svítidla d (mm)	4
14	Šířka svítidla s (mm) (0 pro kruhová svítidla)	4
15	Výška svítidla h (mm)	4
16	Délka, příp. průměr světelně činné plochy d_p (mm)	4
17	Šířka světelně činné plochy s_p (mm) (0 pro kruhové plochy)	4
18	Výška h_{C0} světelně činné plochy v polorovině C0 (mm)	4
19	Výška h_{C90} světelně činné plochy v polorovině C90 (mm)	4
20	Výška h_{C180} světelně činné plochy v polorovině C180 (mm)	4
21	Výška h_{C270} světelně činné plochy v polorovině C270 (mm)	4
22	Podíl světelného toku do dolního poloprostoru (%)	4
23	Účinnost svítidla (%)	4
24	Převodní faktor pro uvedené svítivosti	6
25	Náklon svítidla při měření (pro uliční svítidla)	6
26	Počet n_s sad světelných zdrojů	4
26a	Počet světelných zdrojů v sadě	$n_s \cdot 4$
26b	Typ světelného zdroje	$n_s \cdot 24$
26c	Celkový světelný tok zdrojů světla v příslušné sadě (lm)	$n_s \cdot 12$
26d	Teplota chromatičnosti zdrojů světla v příslušné sadě (K)	$n_s \cdot 16$
26e	Index podání barev zdrojů světla v příslušné sadě	$n_s \cdot 6$
26f	Příkon svítidla včetně předřadníku (W)	$n_s \cdot 8$
27	Podíl přímé složky pro indexy místnosti $k = (0,6; 0,8; 1; 1,25; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5)$	$10 \cdot 7$
28	Seznam jednotlivých C-polorovin (začínající 0 pro C0)	$n_C \cdot 6$
29	Seznam jednotlivých úhlů γ (začínající 0)	$n_\gamma \cdot 6$
30	Svítivosti I_γ (cd/klm) v počtu C-polorovin daném tab. 4-2	n_{I_γ}

tab. 4-1: Struktura souborů formátu Eulumdat [6].

Typ symetrie svítivosti:	0	1	2	3	4
Osa/rovina symetrie:	bez symetrie	svislé osy	C0-C180	C90-C270	C0-C180 i C90-C270
Počet diskretních hodnot svítivosti n_{I_γ}	$n_c \cdot n_\gamma \cdot 6$	$n_\gamma \cdot 6$	$\left(\frac{n_c}{2} + 1\right) \cdot n_\gamma \cdot 6$	$\left(\frac{n_c}{4} + 1\right) \cdot n_\gamma \cdot 6$	

tab. 4-2: Určení počtu měřených hodnot svítivosti I_γ pro daný typ symetrie svítidla (viz tab. 4-1)

[6].

Soubory formátu Eulumdat s příponou .ldt lze standardně importovat do většiny běžných výpočetních programů pro projektování osvětlovacích soustav (např. Dialux, Relux). Pro účely světelně technického výpočtu jsou diskretní data uložená v souborech Eulumdat proložena výpočetním programem tak, že lze získat svítivost svítidla v jakémkoliv směru.

4.2 Návrh záznamu odrazných vlastností materiálů ve formě Eulumdat

Aby bylo možné odraz světla na povrchu obecně odrážející plochy modelovat s využitím souborů formátu Eulumdat, je třeba nalézt analogii základních světelně technických parametrů svítidel a odrazných světelně činných ploch. Hlavním předpokladem takové analogie je konečná velikost modelované světelně činné plochy, jejíž odrazné vlastnosti mají být s využitím Eulumdat modelovány, a vytvoření souboru Eulumdat pro každý jednotlivý úhel dopadu světla β z každého jednotlivého bodového zdroje světla. Světelně činnou plochu lze rozdělit na dílčí obdélníky o rozměrech $s \times d$ (m), které tak modelují ekvivalentní svítidlo (sekundární zdroj světla) obdélníkového typu o stejných rozměrech a s nulovou výškou (nulovou výškou z hlediska Eulumdat jsou charakteristická např. svítidla zapuštěná v podhledech).

Světelný tok $\Phi_i(\beta)$ dopadající z bodového zdroje světla pod konkrétním úhlem dopadu světla β na dílčí obdélníkovou plochu o rozměrech $s \times d$ pak odpovídá světelnému toku světelného zdroje, kterým je ekvivalentní svítidlo osazeno. Zároveň pro osvětlenost myšlené dílčí světelně činné plochy platí:

$$E_p(\beta) = \frac{\Phi_i(\beta)}{s \cdot d} \quad (lx; lm, m, m). \quad (4.1)$$

Jednotlivé hodnoty svítivosti $I_{C\gamma}$ ve fotometrické soustavě C- γ pak odpovídají svítivosti povrchu světelně činné plochy $I_{C\gamma}$:

$$I_{C\gamma} = I_{\alpha\gamma} = L_r(\alpha, \gamma) \cdot s \cdot d \cdot \cos \gamma \quad (cd; cd; cd \cdot m^{-2}, m, m, ^\circ). \quad (4.2)$$

Účinnost takového ekvivalentního svítidla odpovídá integrálnímu činiteli odrazu ρ světelně činné plochy.

Při tvorbě Eulumdat ekvivalentních svítidel odpovídajících odrazným vlastnostem vzorku materiálu pak úhly natočení α odpovídají jednotlivým polorovinám C ve fotometrickém systému $C - \gamma$ a úhly odrazu γ odpovídají úhlům γ ve fotometrickém systému $C - \gamma$. Modely fotometrické plochy svítivosti (obr. 3-15 až obr. 3-22) jsou symetrické podél roviny procházející úhly $\alpha = 0^\circ$ a $\alpha = 180^\circ$, což odpovídá v systému $C - \gamma$ fotometrickým polorovinám C_0 a C_{180} . Ekvivalentní svítidlo tedy vykazuje symetrii typu 2 (viz tab. 4-1). Úhlový krok měření $\Delta\alpha = \Delta\beta = \Delta\gamma = 10^\circ$ (viz odstavec 3.1) odpovídá počtu C -polorovin $n_C = 18$, počtu $n_\gamma = 18$.

Soubory Eulumdat vytvořené výše popsanou metodikou odpovídající jednotlivým úhlům dopadu světla na měřený vzorek materiálu jsou uloženy v příloze D.

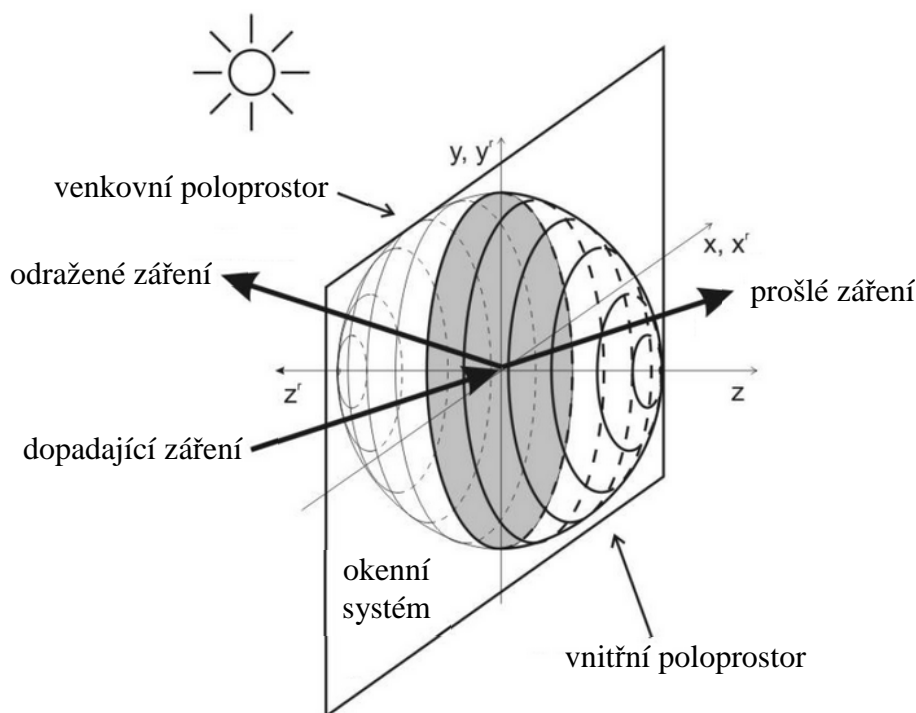
4.3 Formát vstupních dat pro vizualizační programy

Vizualizační programy umožňují při modelování mnohonásobných odrazů světla ve světelných scénách využít fyzikálně založené osvětlovací modely reprezentované dvousměrovou odrazovou distribuční funkcí $f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma)$ (viz odstavec 1.8). Při vizualizaci světelných scén a tvorbě počítačové grafiky je však z důvodu nedostupnosti experimentálně zjištěných hodnot dvousměrové odrazové distribuční funkce $f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma)$ často využívána náhrada matematickými modely této funkce. Matematické modely jsou charakteristické určitou idealizací procesu odrazu světla, která je pro vizualizace scén a počítačovou grafiku dostačující, neboť v porovnání s modelem difuzního odrazu světla (viz odstavec 4.1) daleko lépe reprezentuje skutečné odrazné vlastnosti materiálu.

Existují ale i oblasti výzkumu, kde není přípustné nebo vhodné zjednodušení procesu odrazu světla matematickým modelem dvousměrové odrazové distribuční funkce $f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma)$. Jednou z takových oblastí je problematika využití sluneční energie v budovách. Jedná se o výzkum prostupu a odrazu slunečního záření okenními systémy s žaluziemi, kdy světlo prostupuje několika vrstvami překážek (zpravidla vnější či vnitřní žaluzie v různých stavech natočení a několik skleněných tabulí). Hlavním cílem výzkumu je zjištění směrového rozložení záření odraženého a záření, které prostoupilo dovnitř budovy okenním systémem při jeho různých konfiguracích. Tato problematika úzce souvisí s energetickou náročností budov, proto je jí věnována

poměrně velká pozornost a zřejmě i právě proto byl v této oblasti výzkumu vyvinut systém záznamu dvousměrových distribučních funkcí, který lze využít v některých programech pro architektonickou vizualizaci.

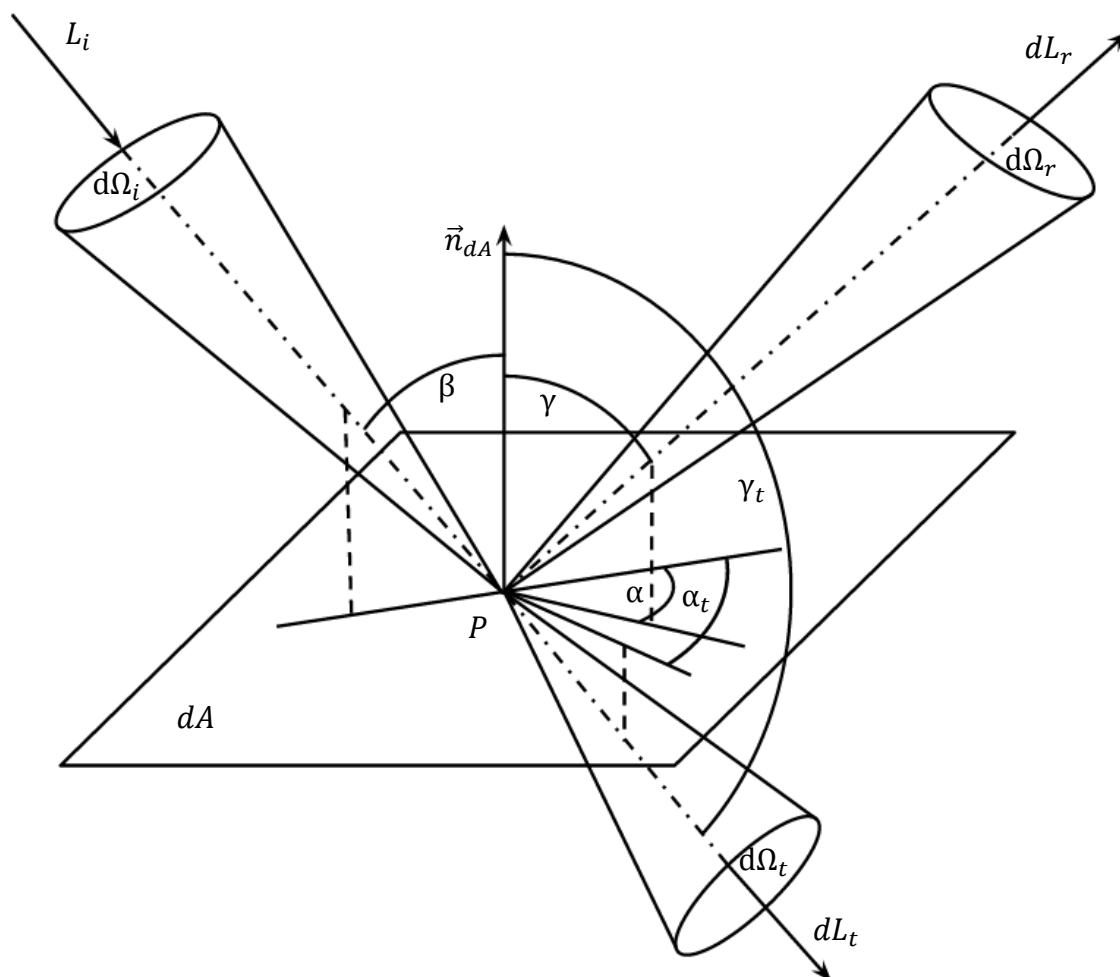
Rovinným okenním systémem je prostor rozdělen na dva poloprostory – vnější (kde je umístěn zdroj světla – Slunce) a vnitřní – viz obr. 4-1. Při dopadu světla na rovinný okenní systém se část světla odrazí zpět do vnějšího poloprostoru a část světla projde do vnitřního poloprostoru.



obr. 4-1: Rozdělení prostoru okenním systémem na 2 poloprostory [7].

Proces odrazu světla na rozhraní okenního systému lze popsat s využitím dvousměrové distribuční odrazové funkce $f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma)$ (viz odstavec 1.8). Proces prostupu (případně i lomu) světla do vnitřního poloprostoru lze analogicky popsat dvousměrovou prostupovou distribuční funkcí $f_{BTDF}(\alpha_t, \beta, \gamma_t)$ (anglicky Bidirectional Transmission Distribution Function – BTDF), která je definována jako poměr mezi diferenciálním jasem $dL_t(\alpha_t, \gamma_t)$ elementárního okolí bodu P okenního systému ve směru určeném úhly α_t a γ_t a diferenciální osvětleností $dE_p(\beta)$ plošky dA v okolí bodu P vyvolané zdrojem světla s jasem $L_i(\beta)$, který je umístěn ve směru určeném úhlem β (viz obr. 4-2), tj. vztahem (4.3).

$$f_{BTDF}(\alpha_t, \beta, \gamma_t) = \frac{dL_t(\alpha_t, \gamma_t)}{dE_p(\beta)} = \frac{dL_t(\alpha_t, \gamma_t)}{L_i(\beta) \cdot \cos\beta \cdot d\Omega_i} \quad (4.3)$$

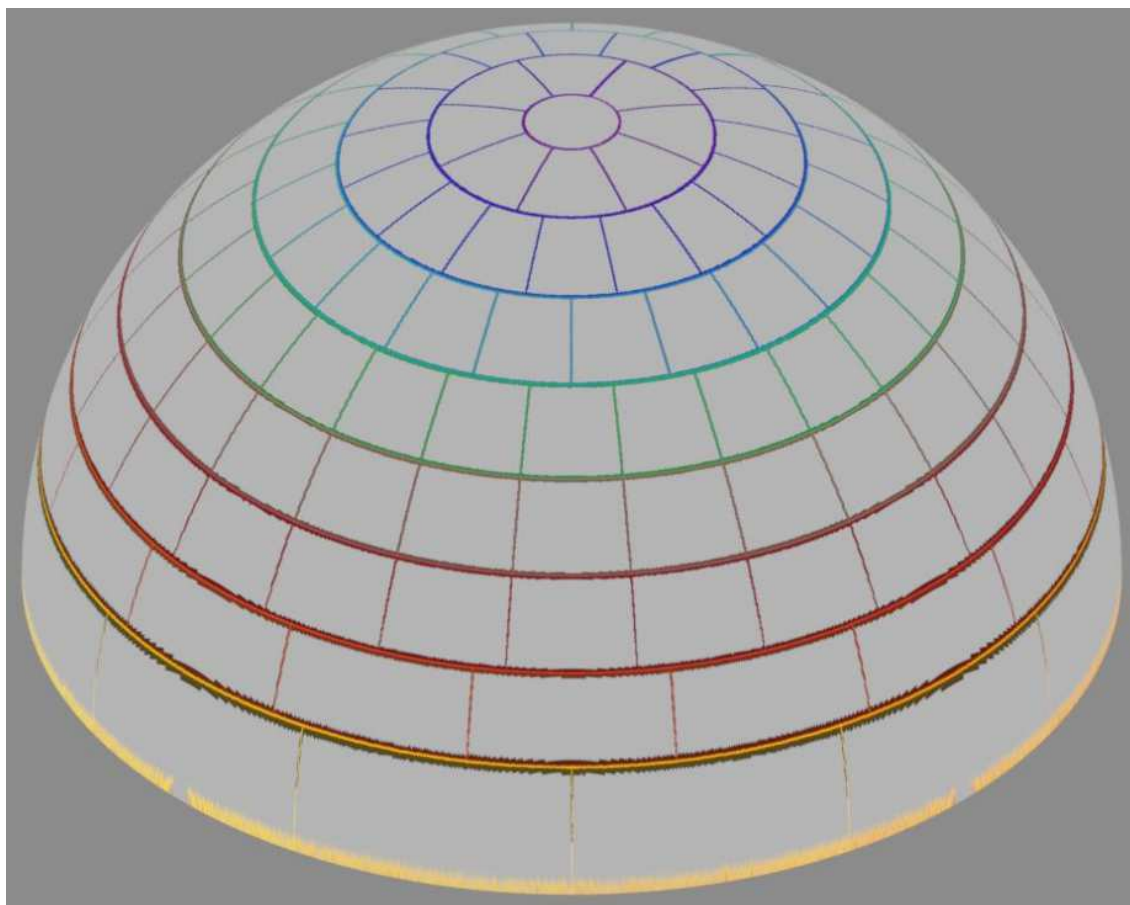


obr. 4-2: Dvousměrová prostupová distribuční funkce (BTDF).

Dvousměrová prostupová distribuční funkce $f_{BTDF}(\alpha_t, \beta, \gamma_t)$ má stejné vlastnosti, jako dvousměrová odrazová distribuční funkce $f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma)$ – viz odst. 1.8. Sloučením dvousměrové prostupové distribuční funkce a dvousměrové odrazové distribuční funkce vzniká tzv. dvousměrová rozptylová distribuční funkce (angl. Bidirectional Scattering Distribution Function – zkráceně BSDF).

Pro zápis hodnot dvousměrové odrazové i prostupové distribuční funkce při prostupu záření okenním systémem se žaluziemi je zaveden systém rozdělení vnitřního i vnějšího poloprostoru na tzv. Klemsovy segmenty (angl. Klems patches) [8].

Jedná se o rozdělení každého z poloprostorů (vnějšího i vnitřního) na 145 dílků prostorových úhlů (segmentů) určených úhly α a γ ve vnějším poloprostoru (respektive α_t a γ_t ve vnitřním poloprostoru) rozložených tak, aby při rovnoměrném osvětlení kontrolního bodu P ze všech směrů poloprostoru byly příspěvky osvětlenosti v bodě P z každého segmentu (prostorového úhlu) přibližně stejné [9].



obr. 4-3: Rozdělení poloprostoru na tzv. Klemsovy segmenty [10].

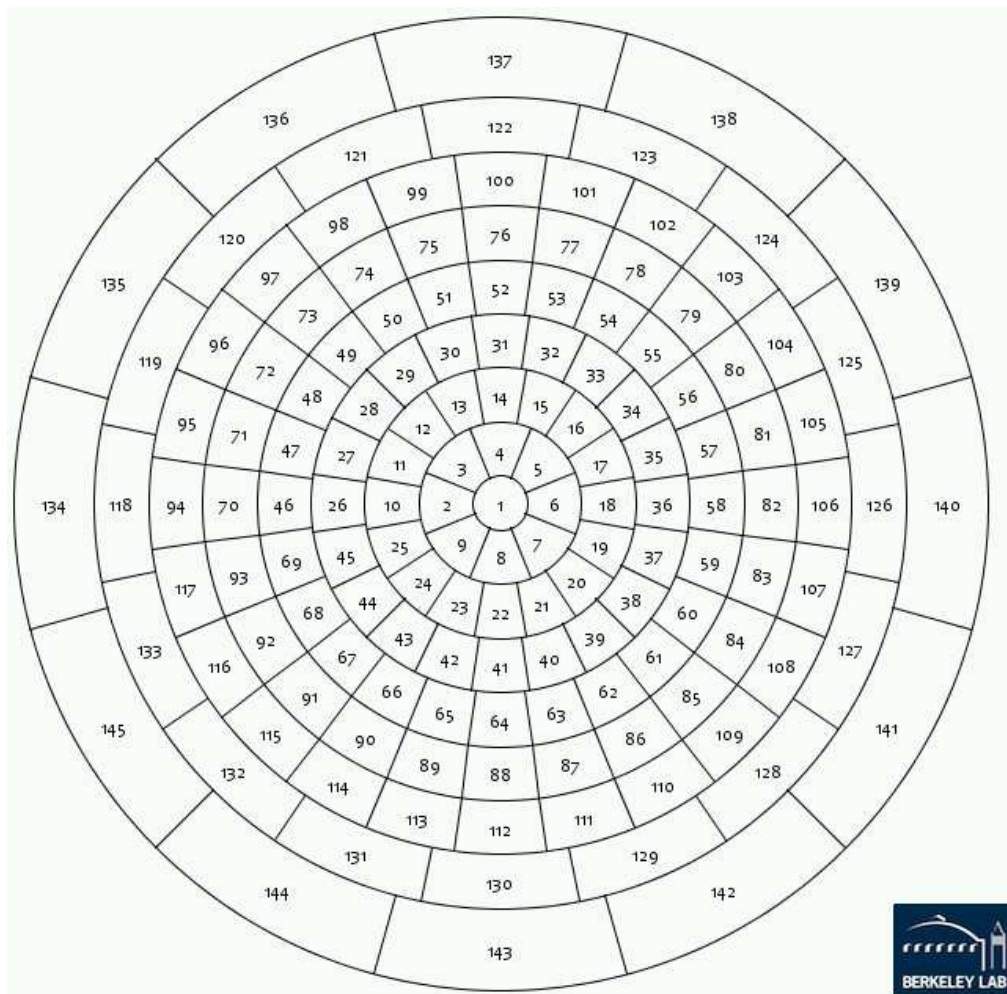
Následující tabulka (tab. 4-3) udává rozsahy úhlů γ , kterými jsou vymezeny jednotlivé kulové pásy v systému Klemsových segmentů, a počet a číslování segmentů rozložených rovnoměrně v příslušném kulovém pásu [9]. Jednotlivé kulové pásy jsou naznačeny svisle na obr. 4-1.

$\gamma_{min} (^{\circ})$	0	5	15	25	35	45	55	65	75
$\gamma_{max} (^{\circ})$	5	15	25	35	45	55	65	75	90
počet segmentů v kulovém pásu	1	8	16	20	24	24	24	16	12
počáteční pořadové číslo	1	2	10	26	46	70	94	118	134
koncové pořadové číslo	1	9	25	45	69	93	117	133	145

tab. 4-3: Rozdělení Klemsových segmentů poloprostoru do jednotlivých kulových pásů [9].

Každý ze segmentů v Klemsově systému charakterizuje dílčí prostorový úhel (včetně směru jeho osy), ze kterého světlo (záření) dopadá na povrch sledovaného

vzorku (segment zdroje), případně do kterého se odrazí (segment odrazu) či projde (segment prostupu). Při jasové analýze se tedy nejprve umístí bodový zdroj světla do středu každého ze 145 segmentů (segment zdroje) a následně se vždy pro daný segment zdroje změří jas vzorku ve sledovaném bodě při pohledu ze všech 145 segmentů (segmenty odrazu či prostupu). Pro každou dvojici segmentů zdroje a odrazu (případně zdroje a prostupu) se stanoví hodnota dvousměrové odrazové distribuční funkce $f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma)$ podle vztahu (1.20), případně hodnota dvousměrové prostupové distribuční funkce $f_{BTDF}(\alpha_t, \beta, \gamma_t)$ podle vztahu (4.3). Pro každý ze 145 segmentů zdroje je tedy stanoveno 145 hodnot příslušné dvousměrové distribuční funkce. Výsledkem takové analýzy je pak matice funkčních hodnot o velikosti 145×145 (tj. 21 025 funkčních hodnot), kde sloupce odpovídají pořadí segmentů zdroje a řádky odpovídají pořadí segmentů odrazu či prostupu. Pořadí segmentů v matici je určeno jejich pořadovými čísly uvedenými v tab. 4-3 a graficky jsou vyznačeny v následujícím obrázku.



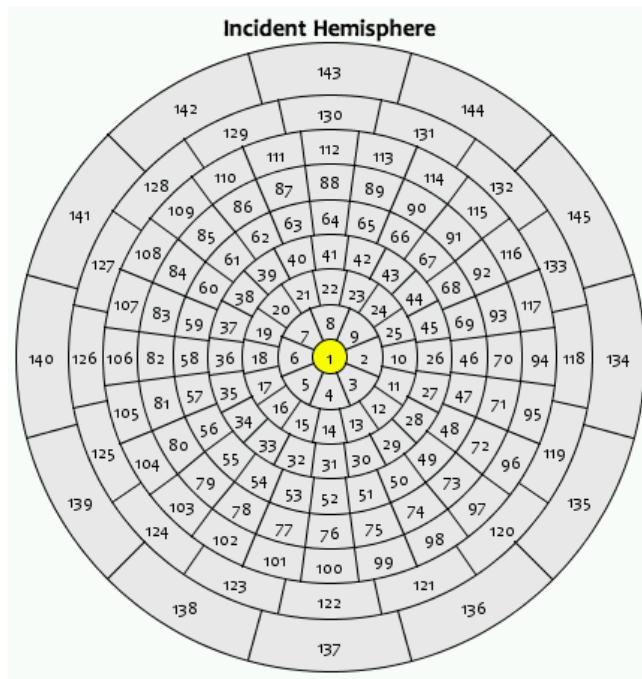
obr. 4-4: Pořadová čísla segmentů při pohledu shora na Klemsův systém.

Díky tomu, že tento systém záznamu dvousměrových distribučních funkcí obsahuje dvě oddělené matice funkčních hodnot odpovídající dvěma poloprostorům (vnějšímu, kde dochází k odrazu, a vnitřnímu, kam světlo prostupuje) lze ho analogicky využít i pro záznam odrazných vlastností materiálů tak, že se do matice odpovídající prostupu světla dosadí nulové funkční hodnoty.

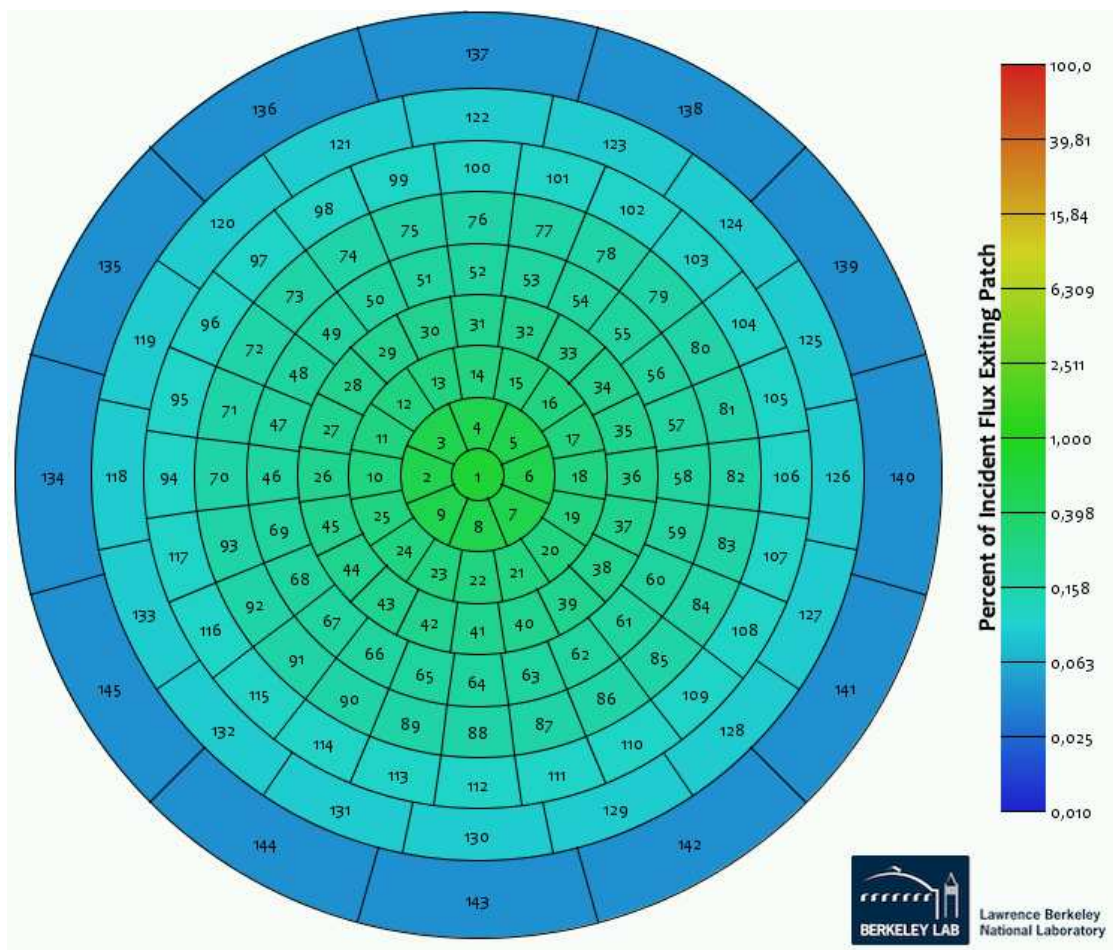
4.4 Záznam odrazných vlastností materiálů ve formátu XML

Matice funkčních hodnot dvousměrových distribučních funkcí odpovídajících jednotlivým segmentům v Klemsově systému lze zapsat do datových souborů s využitím standardu XML (z angl. Extensible Markup Language – rozšiřitelný značkovací jazyk), které lze využít v některých programech pro architektonickou vizualizaci scén [9]. Struktura souboru XML sestává z hlavičky, ve které je definován popis materiálu (název, výrobce, apod.), dále popis prostorového rozložení Klemsových segmentů podle tab. 4-3, charakteristika typu zdroje světla užitého při měření, matice hodnot dvousměrové vstupové distribuční funkce a konečně matice hodnot dvousměrové odrazové distribuční funkce [9]. Jak bylo popsáno výše, při využití tohoto formátu dat pro popis odrazných vlastností neprůsvitných materiálů je matice dvousměrové vstupové distribuční funkce nulová. Soubor hodnot dvousměrové odrazové distribuční funkce odpovídající odrazným vlastnostem měřeného materiálu (viz obr. 3-24 až obr. 3-31) je uložený ve formátu XML v příloze E.

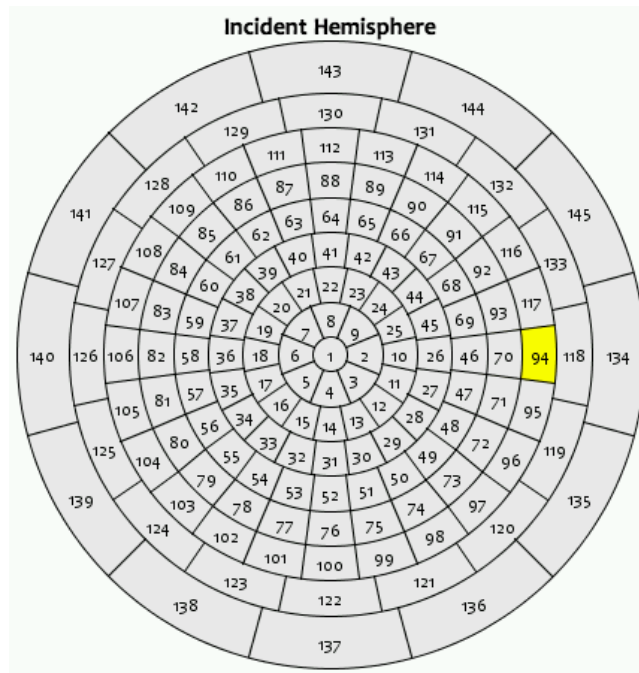
Hodnoty dvousměrových distribučních funkcí ve formátu XML (příloha E) pro každý jednotlivý segment zdroje lze graficky zobrazit s využitím prohlížeče BSDFViewer ve formě diagramu znázorňujícího pohled shora (ve směru normály ke sledovanému povrchu) na systém Klemsových segmentů. Prohlížeč umožňuje uživateli z diagramu zdrojového poloprostoru (Incident Hemisphere) zvolit segment zdroje, pro který se následně graficky zobrazí rozložení poměrného světelného toku odraženého od sledovaného vzorku materiálu při osvětlení materiálu bodovým zdrojem světla umístěným ve směru definovaném zvoleným segmentem ve zdrojovém poloprostoru. Ukázky hodnot dvousměrové odrazové distribuční funkce měřeného vzorku materiálu (viz odstavec 3.6) zaznamenané v systému Klemsových segmentů jsou zobrazeny na obr. 4-5 až obr. 4-8.



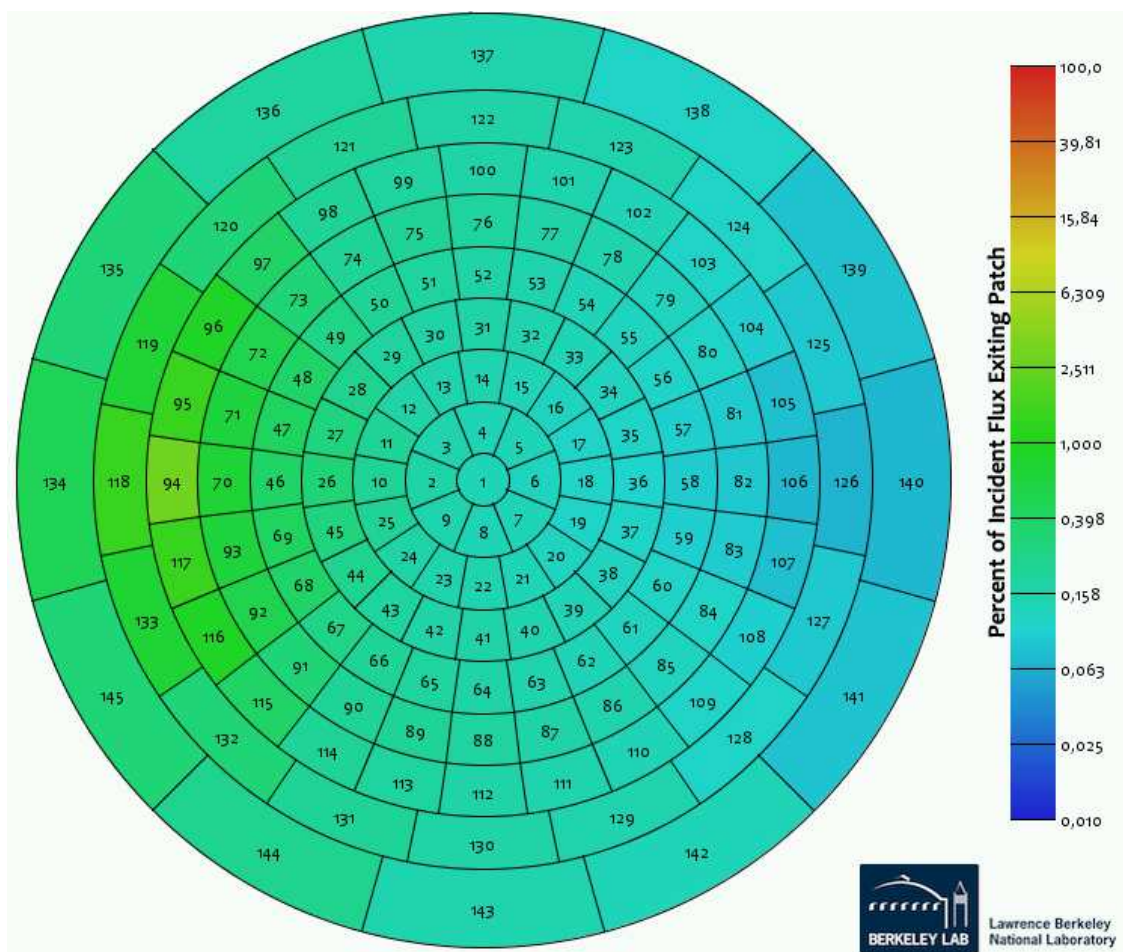
obr. 4-5: Segment zdroje č. 1 v Klemsově systému zvolený pro zobrazení dat v prohlížeči BSDFViewer.



obr. 4-6: Prostorové rozložení světelného toku odraženého od materiálu (viz odstavec 3.6) při dopadu světla z bodového zdroje umístěného ve zvoleném segmentu č. 1 ve škále poměrných hodnot (%).



obr. 4-7: Segment zdroje č. 94 v Klemsově systému zvolený pro zobrazení dat v prohlížeči BSDFViewer.



obr. 4-8: Prostorové rozložení světelného toku odraženého od materiálu (viz odstavec 3.6) při dopadu světla z bodového zdroje umístěného ve zvoleném segmentu č. 94 ve škále poměrných hodnot (%).

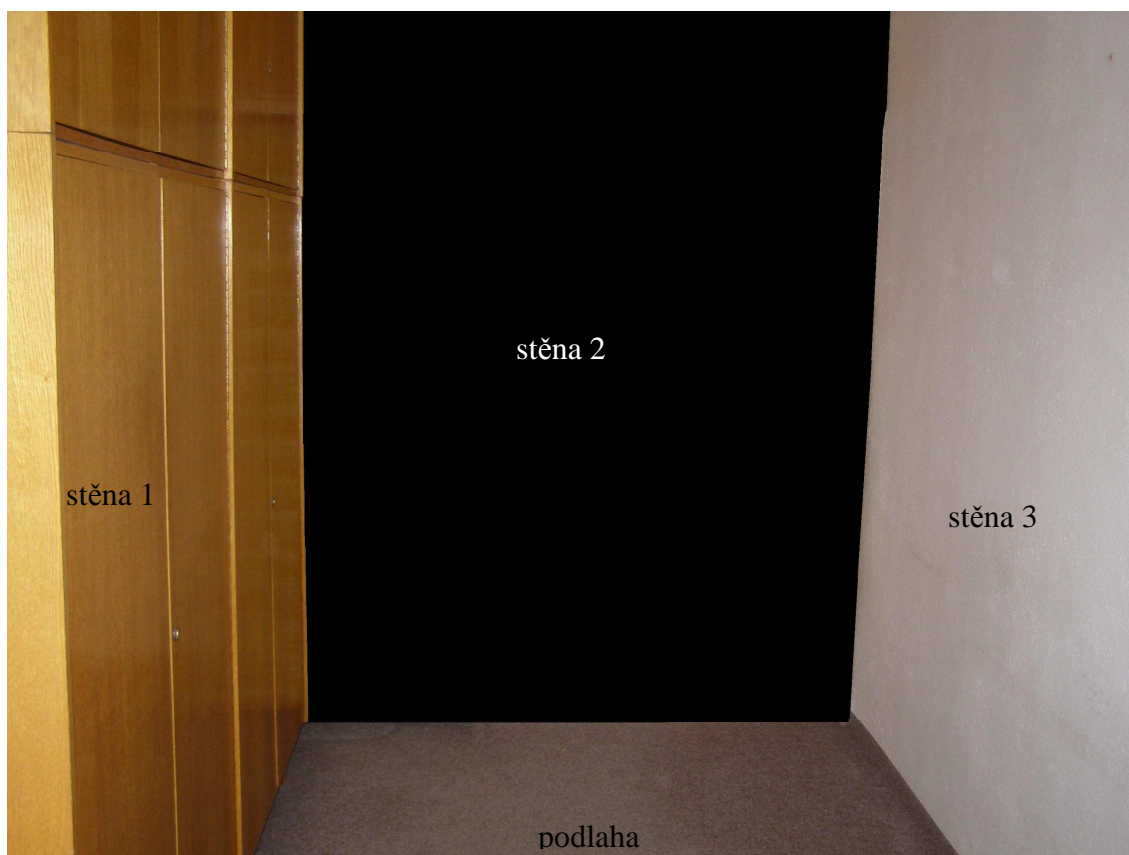
5 Výpočet mnohonásobných odrazů ve světelné scéně

V této části se budu zabývat porovnáním několika různých metod výpočtu světelně technických veličin ve vybraném prostoru, kde dochází k mnohonásobným odrazům od světelně činných ploch. Jednotlivé metody se liší zejména využitím různých přístupů k procesu odrazu světla od světelně činných povrchů.

Výpočtem jednorázového odrazu světla od obecně odrážející stěny ve vybraném prostoru bude ověřena možnost využití navržené metodiky ekvivalentních svítidel (viz odstavec 4.2) pro zpřesnění výsledků výpočtu světelně technických veličin v porovnání s běžně užívanými výpočetními programy pro světelně technické projektování. Výpočtem mnohonásobných odrazů mezi stěnami, stropem a podlahou vybraného prostoru bude ověřena shoda výsledků výpočtu světelně technických veličin s využitím difuzního modelu odrazu v běžně užívaném programu pro projektování osvětlovacích soustav (Dialux) a v programu pro architektonickou vizualizaci. Výpočtem mnohonásobných odrazů mezi stěnami, stropem a podlahou vybraného prostoru bude ověřena možnost využití navržené metodiky záznamu dvousměrových odrazových distribučních funkcí (viz odstavec 4.4) popisujících obecně odrážející povrchy pro zpřesnění výsledků výpočtu světelně technických veličin v porovnání s běžně užívanými výpočetními programy pro světelně technické projektování.

5.1 Volba prostoru pro světelně technické výpočty a ověřovací měření

Pro ověření metodiky řešení mnohonásobných odrazů v interiéru navržené v předchozích kapitolách jsem zvolil část místnosti B3-347b na Fakultě elektrotechnické, ČVUT v Praze–Dejvicích, kde jedna ze stěn (stěna 1) je tvořena lakovaným dřevem, jehož odrazné vlastnosti jsou popsány v odstavci 0, protilehlá stěna (stěna 3) je opatřena bílým difuzním nátěrem, jehož činitel odrazu změřený reflektometrem (viz obr. 1-4) je 0,7. Podlaha, strop i zbývající dvě stěny (stěna 2 a 4) jsou zakryty černou matnou látkou tak, aby zde byl odraz světla co nejvíce potlačen. Výška takto upraveného prostoru je 2,35 m, světelně činné stěny jsou dlouhé 2,2 m a místnost je široká 1,8 m.



obr. 5-1: Prostor vybraný pro výpočet mnohonásobných odrazů s vyznačením sledovaných ploch.

Předpokládá se, že ve středu stropu zvoleného modelového prostoru je umístěn bodový zdroj světla – halogenová žárovka Halolux Ceram E27 64480 IM 230 W se světelným tokem 4 210 lm. Jedná se o typické uspořádání prostoru, kdy je svítidlo umístěno v blízkosti stropu a zraková činnost probíhá ve spodní části prostoru. Cílem takového uspořádání je v praxi zejména zamezit oslnění v důsledku přímého pohledu do svítidla a zároveň využít odrazných vlastností stěn místnosti k distribuci části světelného toku (odraženého od stěn) do dolní části prostoru.

Výsledkem výpočtu mnohonásobných odrazů ve vybraném prostoru je zejména rozložení osvětlenosti na sledovaných plochách scény, tedy na bílé stěně, na stěně tvořené lakovaným dřevem, na podlaze a na stropu.

Všechny následující světelně technické výpočty budou probíhat s nastavením udržovacího činitele na hodnotu 1, vypočtené místně průměrné hodnoty osvětlenosti E_s a její minimum E_{min} a maximum E_{max} tedy odpovídají počátečnímu rozložení osvětlenosti ve světelné scéně a nezahrnují pokles osvětlenosti v průběhu doby života osvětlovací soustavy, světelných zdrojů a svítidel. Rozložení svítivosti svítidla v prostoru bylo změřeno s využitím goniofotometru před výpočty provedenými v této

práci a zaznamenáno do připraveného souboru Eulumdat. Výpočet osvětlenosti na všech sledovaných plochách bude probíhat v síti kontrolních bodů s vzájemnou roztečí 0,2 m a vzdáleností krajních bodů od stěny 0,1 m.

5.2 Aplikace navržené metodiky ekvivalentních svítidel pro řešení odrazů ve vybrané světelné scéně

Nejčastěji využívaným nástrojem pro výpočet světelně technických veličin ve světelné scéně jsou programy přímo určené pro projektování osvětlovacích soustav, např. Dialux nebo Relux. Tyto programy využívají pro výpočet mnohonásobných odrazů metodu radiozity, která umožňuje pracovat i s jinými než bodovými zdroji světla (lineárními a plošnými), ovšem neumožňuje výpočty odrazu světla od obecně odrazujících ploch (pracuje pouze s idealizovanými difuzními odrazy – viz odstavec 1.9.2). Vlastnosti svítidel jsou v těchto výpočetních programech popsány s využitím souborů Eulumdat, odrazné vlastnosti světelně činných ploch jsou nahrazeny ideální difuzní plochou popsanou integrálním činitelem odrazu s předpokladem konstantního jasu ploch při pohledu z jakéhokoliv směru – viz vztah (1.16). Z toho důvodu není možné provádět výpočty mnohonásobných odrazů obecně odrazujících ploch a jedinou možností, jak alespoň částečně analyzovat proces odrazu světla od obecně odrazujících ploch je jejich náhrada ekvivalentními svítidly plošného typu (viz odstavec 4.1 a 4.2).

Náhrada světelně činných ploch ekvivalentními svítidly plošného typu je však matematicky velmi náročná, neboť je třeba při každém dílčím odrazu světla rozdělit světelně činnou plochu na dílčí plošky, analyzovat směr dopadu světla na každou z těchto plošek, určit osvětlenost povrchu všech dílčích plošek od jednotlivých bodových zdrojů světla a pro každý světelný zdroj a směr dopadu světla vytvořit ekvivalentní svítidlo (soubor Eulumdat) s odpovídajícími parametry. Proto je prakticky možné touto metodou modelovat pouze první odraz světla od takového materiálu, tedy proces, kdy světlo (jeho přímá složka) dopadá z primárního světelného zdroje na světelně činný povrch, odrazí se do prostoru a tento povrch se tak stává sekundárním zdrojem světla. Vzájemné odrazy mezi sekundárními zdroji světla (násobné odrazy) tímto postupem prakticky nelze realizovat, neboť by se jednalo v podstatě o manuální výpočet odrazů metodou sledování paprsku, který se s každým odrazem rozdělí na velké množství dílčích paprsků a vrací se zpět do světelné scény.

Metoda náhrady světelně činných ploch ekvivalentními svítidly však může sloužit jako prostředek pro ověření výsledků dalších výpočetních metod, neboť ji lze využít ve světelně technických projekčních programech, které pracují na principu metody radiozity.

Dále se tedy budu věnovat analýze výsledků výpočtu prvního odrazu světla od stěny tvořené lakovaným dřevem ve výše popsaném vybraném prostoru (viz obr. 5-1). Z analýzy změřených odrazných vlastností materiálů (viz tab. 3-1) plyne, že střední činitel odrazu měřeného vzorku materiálu (lakovaného dřeva) je 0,4 (viz tab. 3-1). S využitím programu Dialux jsem tedy modeloval místnost o rozměrech uvedených v odstavci 5.1, kde jsem bílou stěnu (na obr. 5-1 vpravo) nahradil černým materiálem s nulovým činitelem odrazu, tak, aby nedocházelo k dalším odrazům od této stěny. Světelná scéna je tedy tvořena pouze bodovým zdrojem světla (na obr. 5-2 vyznačen modrou barvou) a jednou světelně činnou plochou (stěnou z lakovaného dřeva vyznačenou na obr. 5-1 vlevo). Všechny ostatní plochy místnosti (strop, podlaha a tři zbývající stěny) jsou černé s nulovým činitelem odrazu. V takové scéně dojde pouze k jednorázovému odrazu světla od světelně činné plochy a světelný tok následně dopadne na okolní černé plochy, kde je pohlcen. Tohoto principu se využívá například ve fotometrických laboratořích, kde jsou ovšem černé zpravidla všechny plochy v okolí fotometrického zařízení (např. fotometrické lavice).

V uvedené světelné scéně jsem provedl běžný výpočet odrazů světla metodou radiozity (programem Dialux), kdy stěna z lakovaného dřeva (stěna 1) byla výpočetním programem nahrazena ideální difuzní plochou s činitelem odrazu 0,4 (viz tab. 5-1).

Plocha scény	Podlaha	Stěna 1	Stěna 2, stěna 4	Stěna 3	Strop
Činitel odrazu nastavený ve výpočetním programu (%)	0	40	0	0	0
Metoda výpočtu odrazu světla	bez odrazu	metoda radiozity	bez odrazu	bez odrazu	bez odrazu

tab. 5-1: Nastavení světelné scény (vybraného prostoru) při výpočtu jednorázového odrazu od stěny 1 metodou radiozity v programu Dialux

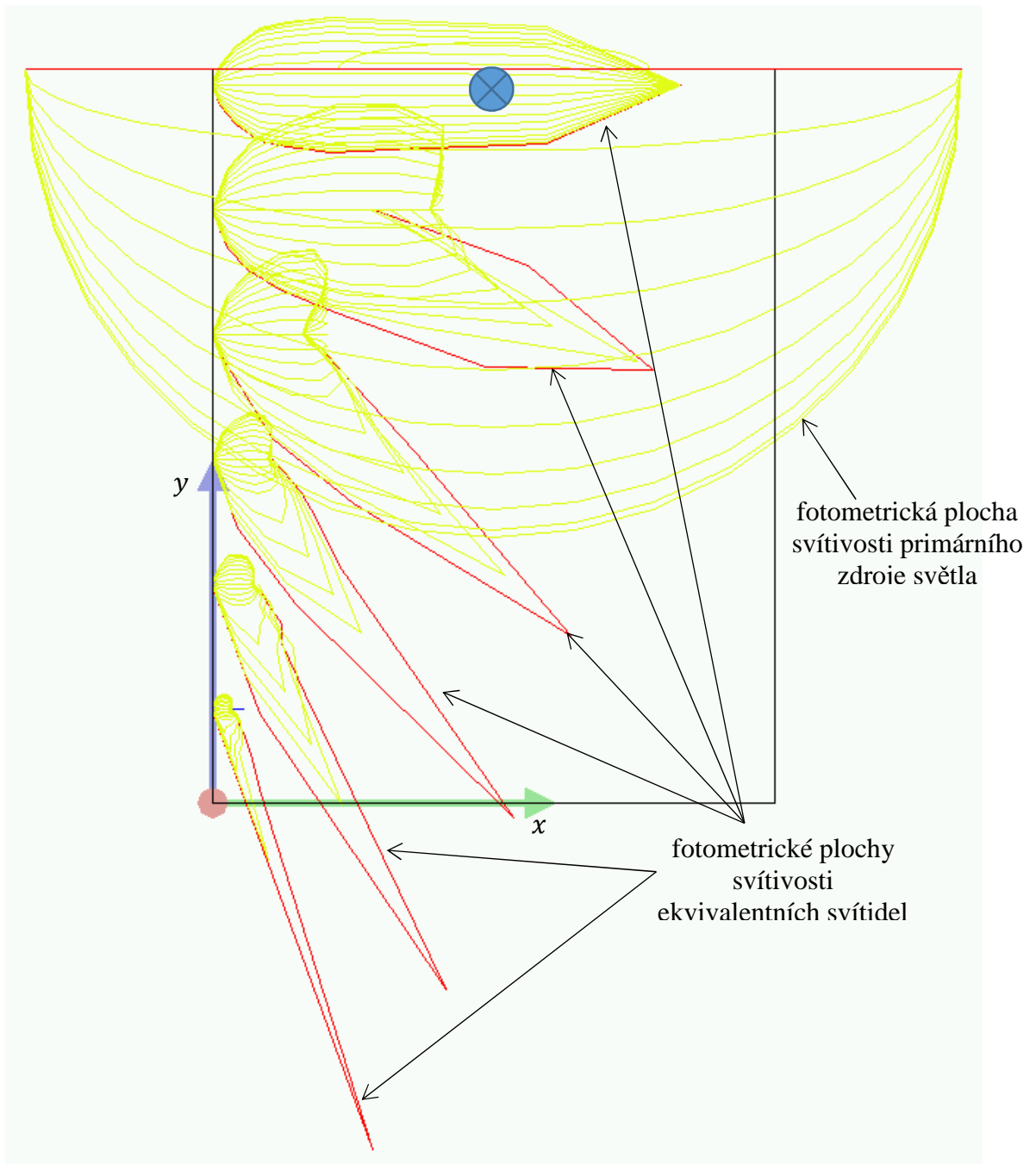
Následně jsem provedl výpočet odrazů ve vybraném prostoru s využitím 30 ekvivalentních svítidel. Stěna z lakovaného dřeva (stěna 1) byla rozdělena rovnoměrně na 5×6 identických dílčích ploch, jejichž odrazné vlastnosti byly popsány soubory Eulumdat ekvivalentních svítidel plošného typu. Prostorové rozložení svítivosti každého

z ekvivalentních svítidel vychází z výpočtů v odstavci 3.5 a velikost svítivosti je odvozena od velikostí přímé složky osvětlenosti příslušné dílčí plochy.

Plocha scény	Podlaha	Stěna 1	Stěna 2, stěna 4	Stěna 3	Strop
Činitel odrazu nastavený ve výpočetním programu (%)	0	0 (nahrazeno ekvivalentními svítidly)	0	0	0
Metoda výpočtu odrazu světla	bez odrazu	5×6 ekvivalentních svítidel	bez odrazu	bez odrazu	bez odrazu

tab. 5-2: Nastavení světelné scény (vybraného prostoru) při výpočtu jednorázového odrazu od stěny 1 s využitím náhrady světelně činné plochy sadou ekvivalentních svítidel v programu Dialux

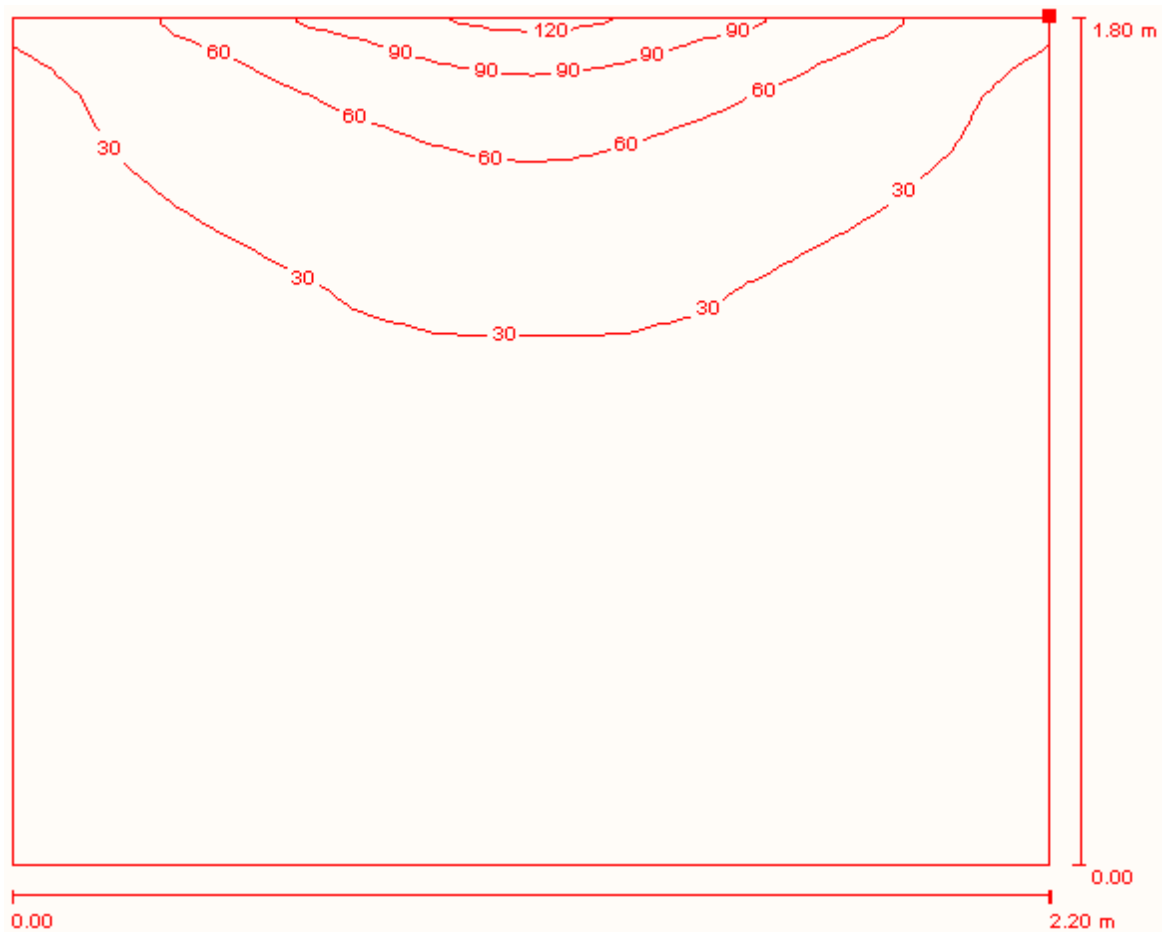
Následující obrázek (obr. 5-2) znázorňuje model odrazu světla s využitím ekvivalentních svítidel (viz tab. 5-2). Zobrazena je pouze prostřední šestice ekvivalentních svítidel umístěných v ose stěny. Bodový zdroj světla je vyznačen modrou barvou a jeho prostorové rozložení svítivosti znázorňuje polokulová plocha, v jejímž středu je bodový zdroj světla (žárovka) umístěn.



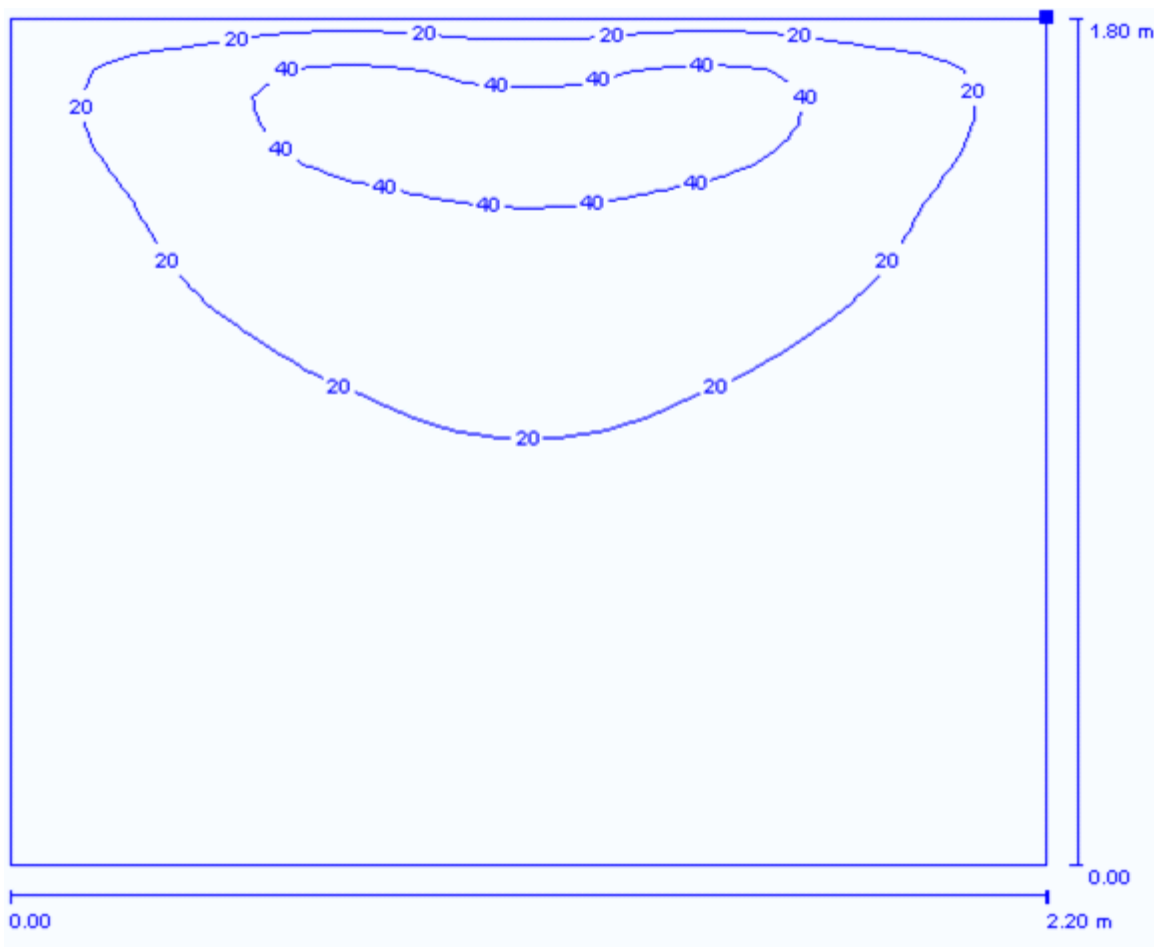
obr. 5-2: Proces odrazu světla na stěně 1 modelovaný souborem ekvivalentních svítidel.

Na stěně na obr. 5-2 vlevo (stěna 1) je patrný postupný pokles velikosti difuzní složky odraženého světelného toku se vzrůstající vzdáleností od zdroje světla a současně postupný nárůst složky zrcadlové. V porovnání s případem, kdy má takováto světelně činná plocha převážně difuzní charakter tak dochází k přesunu většího podílu světelného toku směrem od svítidla do spodní části prostoru, tedy v tomto případě k předpokládanému místu zrakového úkolu. Podíl světelného toku odraženého do horní části místnosti naopak klesá. Tato skutečnost se při porovnání výše zmíněných dvou

postupů výpočtu jednorázového odrazu světla nejmarkantněji projevila na osvětlenosti stropu prostoru, jak ukazují následující grafy.



obr. 5-3: Izočárý znázorňující osvětlenost stropu (lx) vybraného prostoru po jednorázovém odrazu světla od stěny z lakovaného dřeva (umístěné v horní části obrázku) vypočtená metodou radiozity, tedy náhradou stěny ideální difuzní plochou s činitelem odrazu 0,4 (viz tab. 5-1).



obr. 5-4: Izočáry znázorňující osvětlenost stropu (lx) vybraného prostoru po jednorázovém odrazu světla od stěny z lakovaného dřeva (umístěné v horní části obrázku) vypočtená náhradou stěny souborem ekvivalentních svítidel vystihujících skutečný odraz světla na povrchu materiálu (viz tab. 5-2).

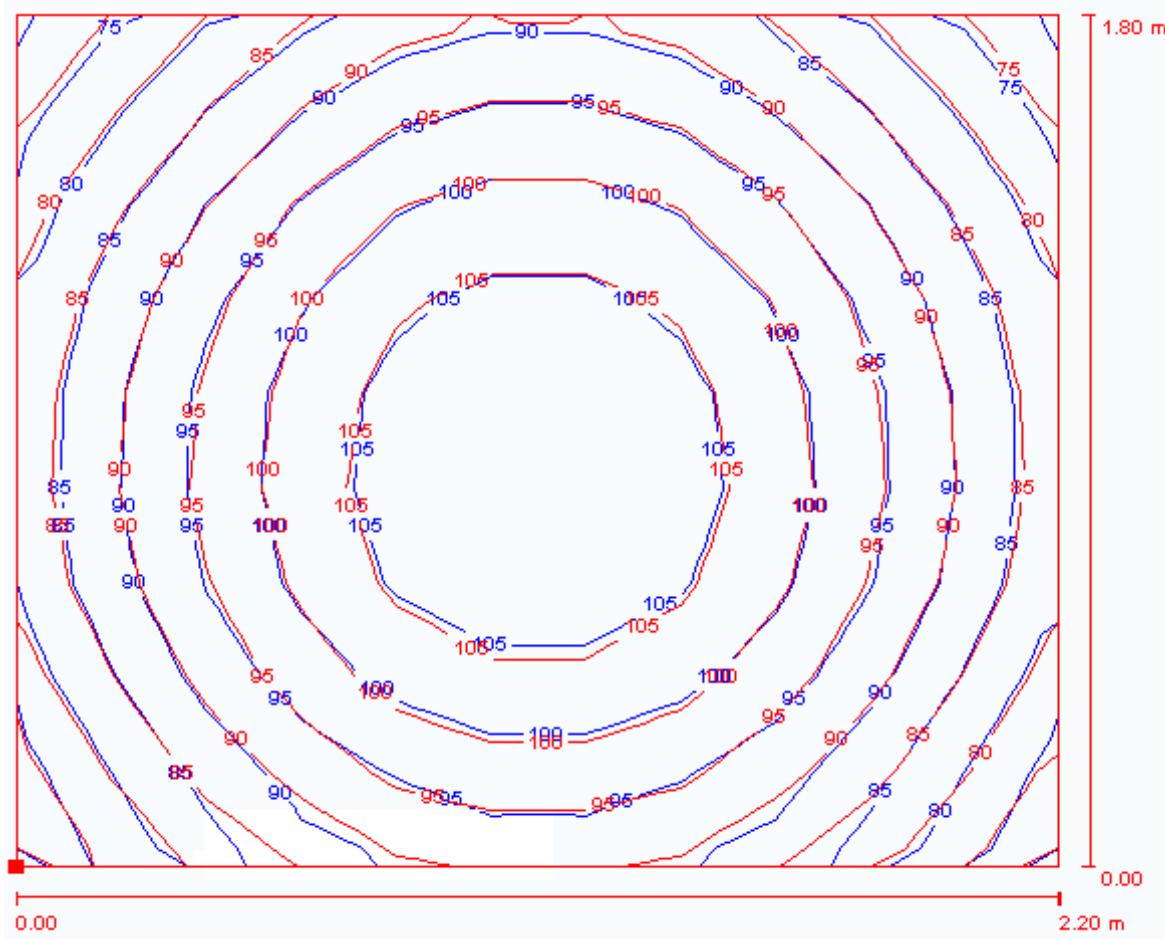
Z obr. 5-4 je patrné, že při výpočtu jednorázového odrazu světla náhradou světelně činné plochy ekvivalentními svítidly osvětlenost stropu nedosahuje tak vysokých hodnot jako při výpočtu jednorázového odrazu světla náhradou světelně činné plochy ideálním rozptylovačem, kdy je difuzní složkou odraženého světelného toku daleko větší (obr. 5-3). Souhrnné výsledky výpočtu udává následující tabulka (tab. 5-3).

Metoda výpočtu odrazu	E_s (lx)	E_{min} (lx)	E_{max} (lx)	$\frac{E_{min}}{E_m}$ (-)
Náhrada difuzní plochou	24	6,7	129	0,28
Náhrada ekvivalentními svítidly	17	1,7	54	0,10

tab. 5-3: Souhrnné výsledky výpočtu rozložení osvětlenosti na stropě vybraného prostoru po jednorázovém odrazu světla vypočtené metodou radiozity a s využitím ekvivalentních svítidel.

V dolní části místnosti již nedošlo k tak markantním změnám v rozložení osvětlenosti, a to zejména kvůli větší vzdálenosti sledovaných ploch od svítidla. I při analýze osvětlenosti podlahy je však patrná změna rozložení osvětlenosti vlivem změny

metody výpočtu odrazu světla od světelně činné plochy. Vzhledem k menšímu rozdílu výsledků výpočtu je změna zřejmá až při sloučení grafů vystihujících rozložení osvětlenosti na podlaže vybraného prostoru do jednoho obrázku (viz obr. 5-5).



obr. 5-5: Izochary znázorňující osvětlenost podlahy (lx) vybraného prostoru po jednorázovém odrazu světla od stěny z lakovaného dřeva (umístěné ve spodní části obrázku) vypočtená náhradou stěny souborem ekvivalentních svítidel vystihujících skutečný odraz světla na povrchu materiálu (dle tab. 5-2; zobrazeno modrou barvou) a vypočtená metodou radiozity, tedy náhradou stěny ideální difuzní plochou s činitelem odrazu 0,4 (dle tab. 5-1; zobrazeno červenou barvou).

Z obr. 5-5 je patrné mírné zvýšení osvětlenosti podlahy vybraného prostoru v blízkosti stěny tvořené lakovaným dřevem (na obr. 5-5 dole) na úkor protilehlé strany podlahy. Na rozdíl od osvětlenosti stropu zde však dochází k součtu přímé a odražené složky osvětlenosti, proto jsou rozdíly jen nepatrné. To potvrzují i totožné souhrnné výsledky výpočtu rozložení osvětlenosti na podlaže vybraného prostoru oběma metodami v následující tabulce (tab. 5-4).

Metoda výpočtu odrazu	E_s (lx)	E_{min} (lx)	E_{max} (lx)	$\frac{E_{min}}{E_s}$ (-)
Přímá složka (bez odrazů)	84	–	–	–
Náhrada difuzní plochou	94	74	111	0,79
Náhrada ekvivalentními svítidly	94	74	111	0,79

tab. 5-4: Souhrnné výsledky výpočtu rozložení osvětlenosti na podlaze vybraného prostoru po jednorázovém odrazu světla vypočtené metodou radiozity a s využitím ekvivalentních svítidel.

Výsledky výpočtu osvětlenosti stěn vybraného prostoru po jednorázovém odrazu světla od jedné ze stěn se prakticky neliší a jsou součástí přílohy F.

Uvedené výsledky výpočtu osvětlenosti sledovaných ploch po jednorázovém odrazu světla od stěny tvořené obecně odražejším materiálem (stěna 1) ukazují, že metodu náhrady světelně činné plochy sadou ekvivalentních svítidel lze použít pro ověření světelně technických výpočtů, neboť výsledky takového výpočtu korespondují s výsledky vypočtenými běžným postupem (metodou radiozity ve výpočetním programu Dialux). Přesto však metoda náhrady světelně činné plochy sadou ekvivalentních svítidel ukazuje očekávané odlišnosti v porovnání s výsledky běžného výpočtu. Rozdílnost výsledku obou postupů výpočtů jednorázového odrazu světla by se měla v daleko větší míře projevit při výpočtu mnohonásobných odrazů, kdy by se i zmíněné rozdíly měly projevit násobně. Proto se v dalším odstavci budu zabývat možnostmi výpočtu parametrů světelné scény dalšími metodami, které umožňují práci s empirickým modelem (změřenými hodnotami) odrazných vlastností materiálů při mnohonásobných odrazech světla.

5.3 Výpočet mnohonásobných odrazů světla ve vybraném prostoru

Pokročilejší metody výpočtu parametrů světelné scény používají grafické vizualizační programy. Většinou se jedná o kombinaci metody radiozity (viz 1.9.2) a metody sledování paprsku, tzv. Ray Tracing (viz odstavec 1.9.1), což umožňuje výpočet mnohonásobných odrazů od povrchů obecně odražejších materiálů. Často však bývá výsledkem výpočtu světelné scény pouze její grafický vzhled, neboť cílem těchto výpočtů bývá pouze počítačová vizualizace scény. Jak již bylo zmíněno v odstavci 4.3, existují i oblasti výzkumu, ve kterých je třeba parametry světelné scény fyzikálně kvantifikovat. Lze nalézt výpočetní programy, které pracují s výpočetními metodami počítačové grafiky, byly ale upraveny nebo přímo vyvinuty tak, aby umožňovaly i kvantifikovat množství světla (příp. záření) dopadajícího do sledovaného bodu nebo

na sledovanou plochu. Jedním z takových programů je výpočetní program Radiance vyvinutý na University of California za účelem analýzy denního a umělého osvětlení jak z hlediska fotometrického, tak zejména z hlediska energetické náročnosti budov. Výpočet parametrů světelné scény probíhá kombinací metody radiozity a deterministického sledování paprsku s využitím metody Monte Carlo, což umožňuje poměrně rychle dosáhnout velmi přesných výsledků. Výpočet osvětlenosti ploch ve světelné scéně je rozdělen do tří fází. V první fázi je vypočtena přímá složka osvětlenosti dopadající přímo z primárních zdrojů světla. Ve druhé fázi jsou metodou radiozity vypočteny mnohonásobné odrazy od difuzních povrchů, respektive difuzní složky odrazů od všech povrchů. Ve třetí fázi jsou ostatní obecně odrážející plochy nahrazeny elementárními ploškami s vlastnostmi ekvivalentních svítidel, jejichž prostorové rozložení svítivosti je vypočteno s využitím metod sledování paprsku a odhadu výsledku Monte Carlo. Do tohoto procesu vstupují skutečné odrazné vlastnosti materiálů ve většině vizualizačních programů ve formě matematického popisu modelu odrazu. Pro výpočetní program Radiance však byl vyvinut nástroj pro práci s empirickými modely odrazu a prostupu světla (zejména pro simulace průchodu záření okenním systémem, viz odstavec 4.3), který umožňuje popsat odrazné vlastnosti materiálů při výpočtech světelné scény souborem empiricky zjištěných (změřených) hodnot dvousměrových distribučních funkcí ve formátu XML (viz odstavec 4.4).

Tuto možnost jsem využil v následujících výpočtech parametrů světelné scény, kdy jsem porovnal výsledky výpočtu mnohonásobných odrazů ve vybraném prostoru, ve které byly všechny světelně činné plochy nahrazeny ideálními difuzními plochami, s výsledky výpočtu mnohonásobných odrazů v téže scéně, ve které byly světelně činné plochy popsány empiricky zjištěným modelem odrazu (viz odstavec 4.4).

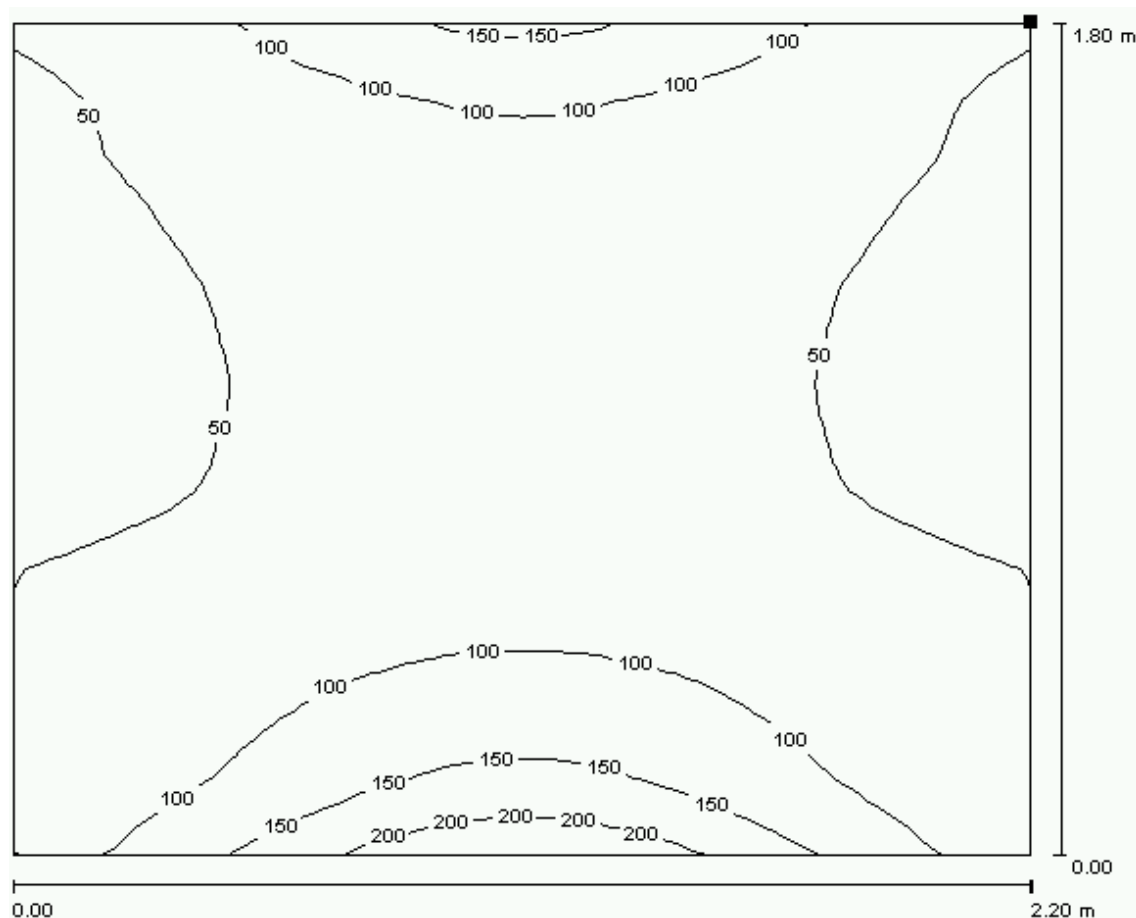
5.3.1 Výpočet mnohonásobných odrazů mezi difuzními plochami v programu Dialux

V tomto odstavci se budu zabývat výpočtem světelně technických parametrů ve vybraném prostoru (viz odstavec 5.1), ve kterém byly všechny světelně činné plochy nahrazeny difuzním modelem odrazu, s využitím běžně používaného programu Dialux. V porovnání s předchozím odstavcem (5.2) zde již však dochází k výpočtu mnohonásobných odrazů mezi stěnou tvořenou lakovaným dřevem s činitelem odrazu 0,4 a protilehlou bílou stěnou s činitelem odrazu 0,7.

Plocha scény	Podlaha	Stěna 1	Stěna 2, stěna 4	Stěna 3	Strop
Činitel odrazu nastavený ve výpočetním programu (%)	0	40	0	70	0
Metoda výpočtu odrazu světla	bez odrazu	metoda radiozity	bez odrazu	metoda radiozity	bez odrazu

tab. 5-5: Nastavení světelné scény (vybraného prostoru) při výpočtu mnohonásobných odrazů mezi stěnou 1 a stěnou 3 (viz obr. 5-1) metodou radiozity v programu Dialux a v programu Radiance.

Analogicky jako v předchozím odstavci uvádím zejména výsledky výpočtu osvětlenosti stropu a podlahy, kde jsou rozdíly v použitých postupech nejmarkantnější.

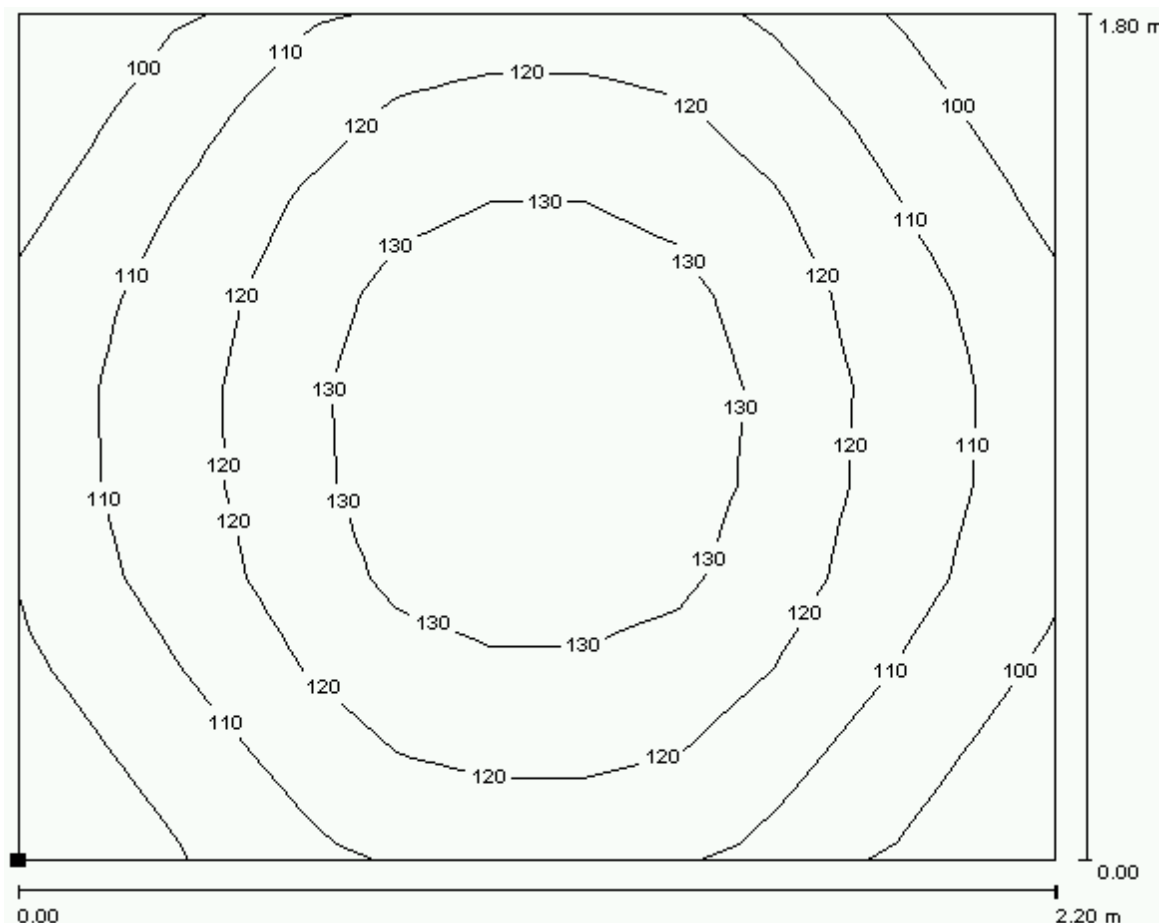


obr. 5-6: Izočáry vypočtené v programu Dialux znázorňující osvětlenost stropu (lx) vybraného prostoru po procesu mnohonásobných odrazů světla od bílé difuzní stěny (stěna 3) s činitelem odrazu 0,7 (ve spodní části obrázku) a stěny z lakovaného dřeva (umístěné v horní části obrázku) nahrazené ideální difuzní plochou s činitelem odrazu 0,4 (stěna 1).

Z obr. 5-6 jsou patrné vyšší hodnoty osvětlenosti u stěny s vyšším činitelem odrazu (stěna 3; viz obr. 5-6 dole) oproti stěně s nižším činitelem odrazu (stěna 1; viz

obr. 5-6 nahoře). Přesto je však osvětlenost stropu i u stěny s nižším činitelem odrazu (stěna 1) poměrně vysoká.

Oproti tomu horizontální osvětlenost podlahy je rozložena téměř rovnoměrně, tedy téměř nezávisle na velikosti činitele odrazu jednotlivých stěn (viz obr. 5-7).

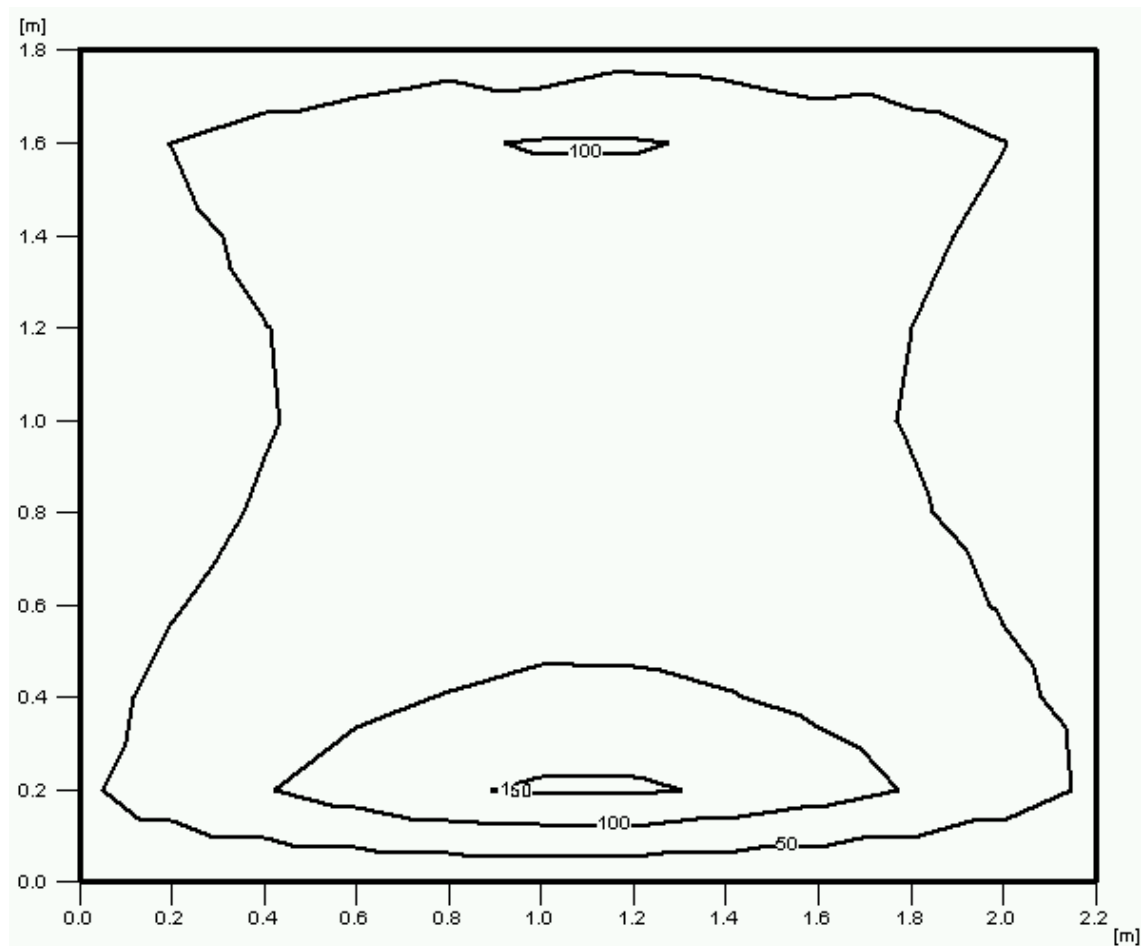


obr. 5-7: Izočáry vypočtené v programu Dialux znázorňující osvětlenost podlahy (lx) vybraného prostoru po procesu mnohonásobných odrazů světla od bílé difuzní stěny (stěna 3) s činitelem odrazu 0,7 (v horní části obrázku) a stěny z lakovaného dřeva (umístěné ve spodní části obrázku) nahrazené ideální difuzní plochou s činitelem odrazu 0,4(stěna 1).

5.3.2 Výpočet mnohonásobných odrazů mezi difuzními plochami v programu Radiance

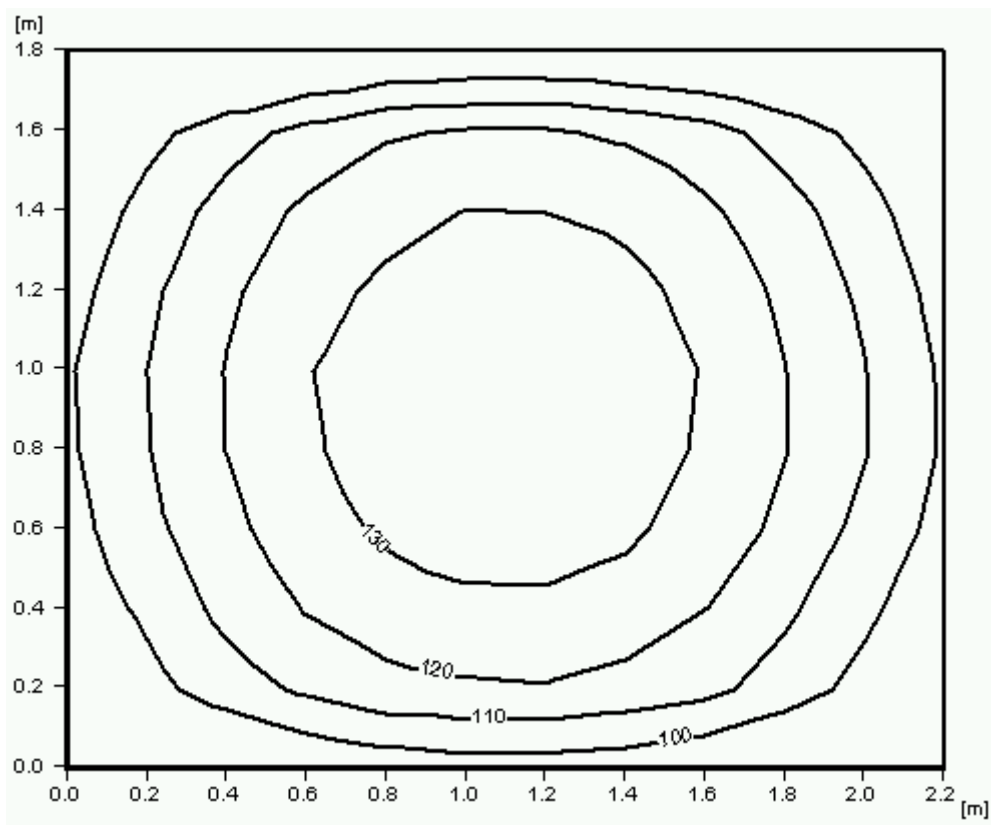
V tomto odstavci se budu zabývat výpočtem světelně technických parametrů ve vybraném prostoru (viz odstavec 5.1) s využitím programu Radiance, který provádí výpočty kombinací metody radiozity a metody sledování paprsku. Aby bylo možné porovnat výsledky s předchozím výpočtem, byly odrazné vlastnosti stěny 1 (z lakovaného dřeva) nahrazeny ideálně difuzní plochou s činitelem odrazu 0,4.

Všechny světelně činné plochy v místnosti mají tedy difuzní charakter a metoda sledování paprsku se v tomto výpočtu neuplatňuje. V porovnání s předchozím odstavcem (5.3.1) by tak měly být výsledky výpočtu co jen velmi málo odlišné, neboť se jedná o tentýž výpočet dvěma různými programy (Dialux a Radiance).



obr. 5-8: Izočáry vypočtené v programu Radiance znázorňující osvětlenost stropu (lx) vybraného prostoru po procesu mnohonásobných odrazů světla od bílé difuzní stěny s činitelem odrazu 0,7 (stěna 3; ve spodní části obrázku) a stěny z lakovaného dřeva (stěny 1 umístěné v horní části obrázku) nahrazené ideální difuzní plochou s činitelem odrazu 0,4.

Z obr. 5-8 a obr. 5-6 je patrné, že výsledky výpočetního programu Radiance se shodují s výsledky výpočetního programu Dialux v celé síti kontrolních bodů (s roztečí 0,2 m). Odlišný je ovšem přístup k okrajové zóně, kdy výpočetní program Dialux (obr. 5-6) provádí extrapolaci výpočtu osvětlenosti v jednotlivých kontrolních bodech až k okraji světelně činné plochy, zatímco výpočetní program Radiance tuto extrapolaci neprovádí.



obr. 5-9: Izočáry vypočtené v programu Radiance znázorňující osvětlenost podlahy (lx) vybraného prostoru po procesu mnohonásobných odrazů světla od bílé difuzní stěny s činitelem odrazu 0,7 (stěna 3; v horní části obrázku) a stěny z lakovaného dřeva (stěny 1 umístěné ve spodní části obrázku) nahrazené ideální difuzní plochou s činitelem odrazu 0,4.

Výsledky výpočtu osvětlenosti podlahy na obr. 5-7 a obr. 5-9 potvrzují, že výsledky obou výpočetních programů jsou prakticky totožné, až na přístup k okrajové zóně (jak bylo popsáno výše). Vyhodnocení místně průměrné hodnoty osvětlenosti E_s a rovnoměrnosti $U_0 = \frac{E_{min}}{E_s}$ však probíhá pouze v rovnoměrné síti kontrolních bodů, extrapolace hodnot osvětlenosti mimo síť kontrolních bodů (v okrajové zóně) tak nehraje při výpočtu místně průměrné hodnoty osvětlenosti a rovnoměrnosti roli. Následující tabulka ukazuje minimální rozdíly mezi hodnotami místně průměrné osvětlenosti a rovnoměrnosti vypočtenými v programu Dialux a v programu Radiance. Významnější odlišnosti ve výsledcích obou programů jsou patrné zejména u maximálních hodnot osvětlenosti E_{max} stropu, což může být způsobeno odlišným rozdělením ploch na elementární výpočtové plošky při výpočtu přímé složky osvětlenosti od bodového zdroje světla umístěného velmi blízko stropu.

Plocha scény	Výpočetní program	E_s (lx)	E_{min} (lx)	E_{max} (lx)	$\frac{E_{min}}{E_s}$ (lx)
Podlaha	Dialux	118	94	138	0,80
	Radiance	116	87	139	0,75
Stěna 1	Dialux	207	45	721	0,22
	Radiance	208	45	709	0,21
Stěna 2 a 4	Dialux	206	50	511	0,24
	Radiance	206	50	502	0,24
Stěna 3	Dialux	194	38	704	0,20
	Radiance	194	39	689	0,20
Strop	Dialux	76	41	247	0,54
	Radiance	75	36	198	0,48

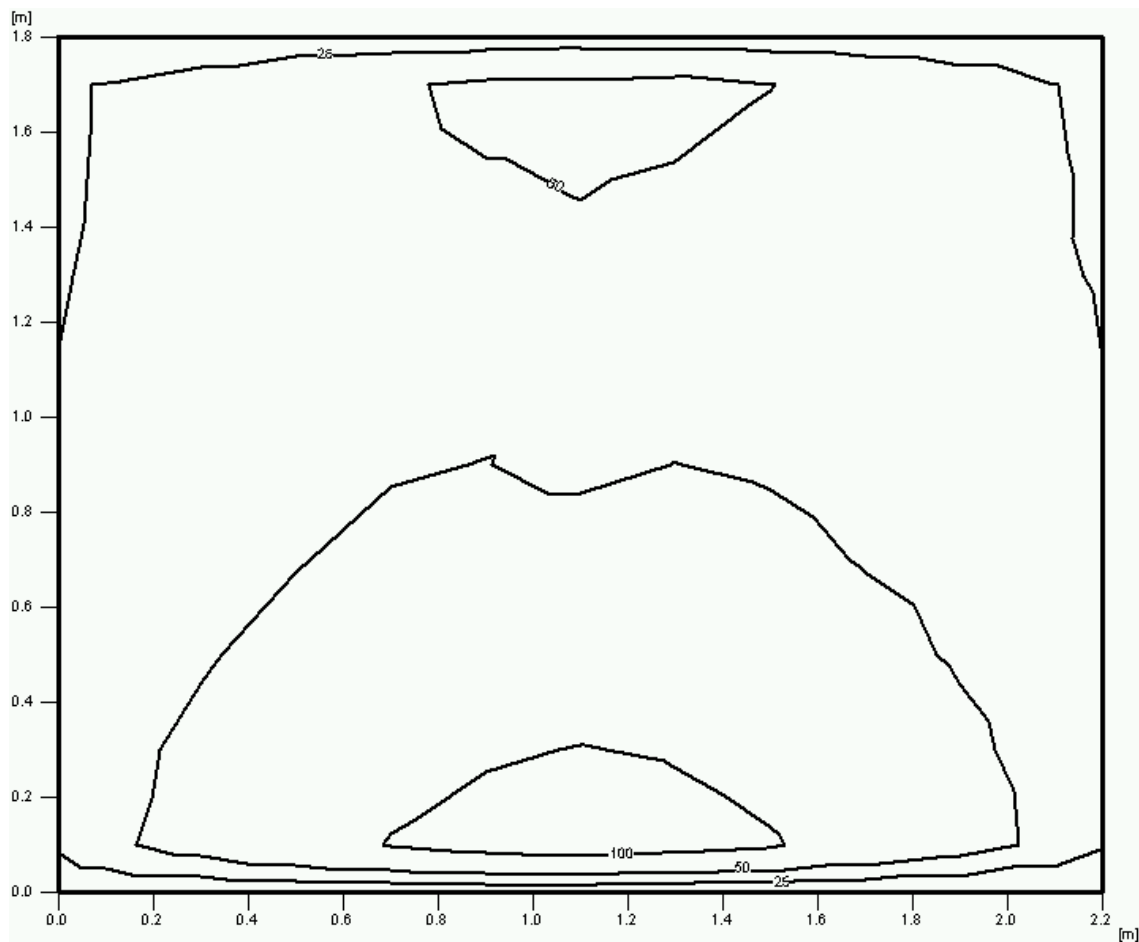
tab. 5-6: Souhrnné výsledky výpočtu osvětlenosti na plochách vybraného prostoru po mnohonásobných odrazech světla mezi dvěma difuzními plochami vypočtené v programech Dialux a Radiance.

5.3.3 Aplikace navržené metodiky záznamu skutečných odrazných vlastností materiálů při řešení odrazů ve vybrané světelné scéně

V odstavcích 5.3.1 a 5.3.2 bylo ověřeno, že souhrnné výsledky výpočtu osvětlenosti ploch ve vybraném prostoru metodou radiozity v programech Dialux a Radiance vykazují jen minimální rozdíly. V tomto odstavci se budu zabývat výpočtem světelně technických parametrů vybraného prostoru (viz odstavec 5.1) s využitím programu Radiance, který provádí výpočty kombinací metody radiozity a metody sledování paprsku. Odrazné vlastnosti stěny 1 (z lakovaného dřeva) jsou popsány empirickým modelem odrazu s využitím souborů dat ve formátu XML (viz odstavec 4.4). Stěna 1 (viz obr. 5-1) již na rozdíl od předchozích odstavců nebude mít difuzní charakter a ve výpočtu se tak uplatňuje metoda sledování paprsku.

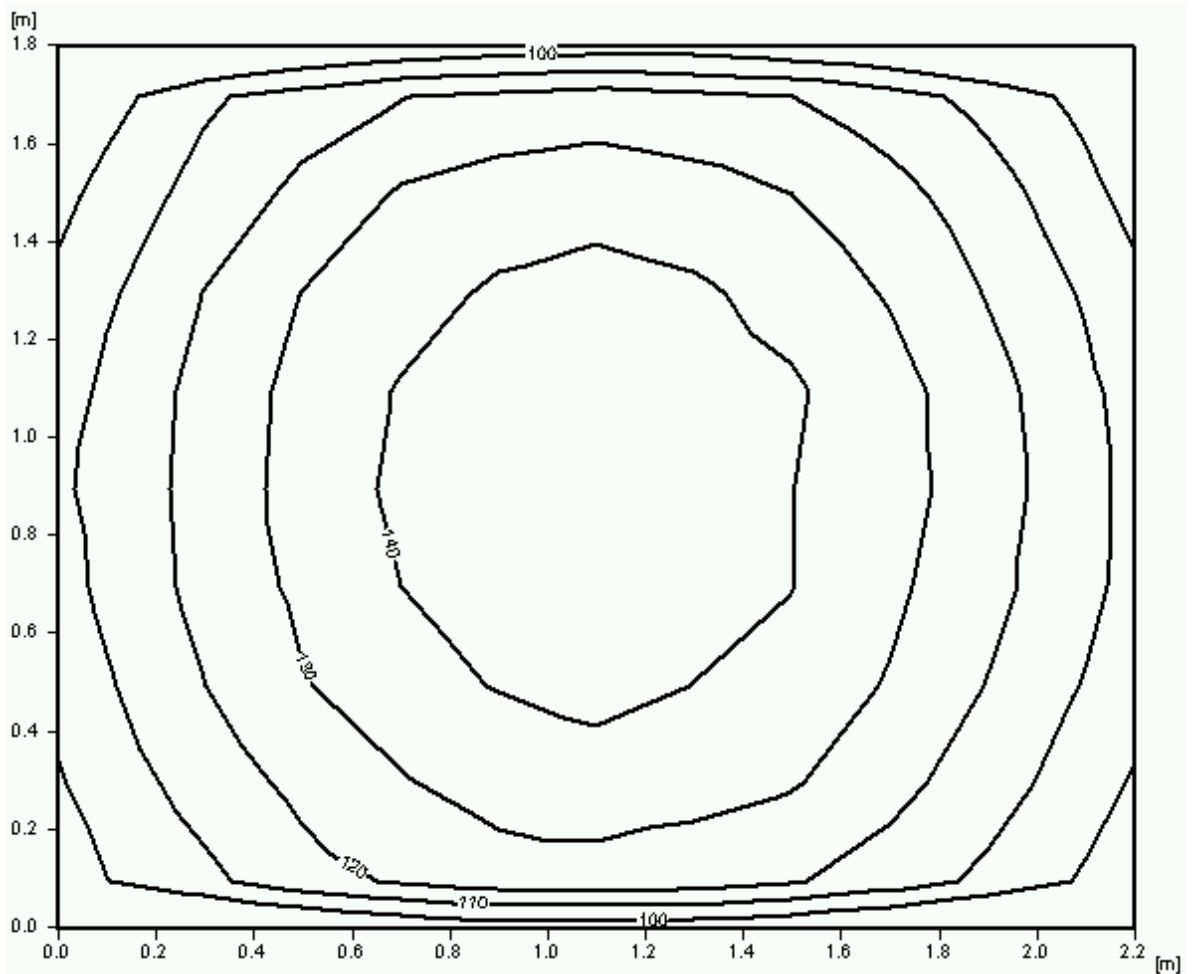
Plocha scény	Podlaha	Stěna 1	Stěna 2, stěna 4	Stěna 3	Strop
Činitel odrazu nastavený ve výpočetním programu (%)	0	40	0	empirický model odrazu (viz odstavec 4.4)	0
Metoda výpočtu odrazu světla	bez odrazu	metoda radiozity	bez odrazu	metoda sledování paprsku	bez odrazu

tab. 5-7: Nastavení světelné scény (vybraného prostoru) při výpočtu mnohonásobných odrazů mezi stěnou 1 a stěnou 3 (viz obr. 5-1) metodou radiozity v kombinaci se sledováním paprsku v programu Radiance.



obr. 5-10: Izochary vypočtené v programu Radiance znázorňující osvětlenost stropu (lx) vybraného prostoru po procesu mnohonásobných odrazů světla od bílé difuzní stěny s činitelem odrazu 0,7 (stěna 3; ve spodní části obrázku) a stěny z lakovaného dřeva (stěny 1 umístěné v horní části obrázku) popsané empirickým modelem odrazu.

Výsledky výpočtu osvětlenosti stropu v programu Radiance v případě, kdy je stěna 1 popsána difuzní plochou s činitelem odrazu 0,4 (obr. 5-8) se značně liší od případu, kdy je stěna 1 popsána empirickým modelem odrazu se střední hodnotou činitele odrazu 0,4 (obr. 5-10). Odlišnosti korespondují se srovnáním výpočtů jednorázového odrazu metodou radiozity a náhradou světelně činné plochy sadou ekvivalentních svítidel (viz odstavec 5.2), osvětlenost stropu v případě, kdy je odraz světla od stěny 1 popsán empirickým modelem odrazu, je nižší. To je důsledkem převažující zrcadlové složky odrazu na stěně 1 (viz obr. 5-2), což způsobuje zvýšení podílu světelného toku směrem od svítidla (stropu) do dolní části scény (k podlaze). Výsledkem je pokles světelného toku odraženého od stěn na strop a naopak nárůst světelného toku odraženého od stěn na podlahu v porovnání se scénou s difuzními odrazy (viz odstavec 5.3.2).



obr. 5-11: Izočáry vypočtené v programu Radiance znázorňující osvětlenost podlahy (lx) vybraného prostoru po procesu mnohonásobných odrazů světla od bílé difuzní stěny s činitelem odrazu 0,7 (stěna 3; v horní části obrázku) a stěny z lakovaného dřeva (stěny 1 umístěné ve spodní části obrázku) popsané empirickým modelem odrazu.

Následující tabulka (tab. 5-8) ukazuje rozdíly mezi hodnotami místně průměrné osvětlenosti a rovnoměrnosti E_{min}/E_s ve vybraném prostoru vypočtenými v programu Radiance v případě, kdy je stěna 1 popsána difuzním modelem odrazu s činitelem odrazu 0,4, a v případě, kdy je tato stěna popsána empirickým modelem odrazu.

Plocha scény	Model odrazu na stěně 1	E_s (lx)	E_{min} (lx)	E_{max} (lx)	$\frac{E_{min}}{E_s}$ (-)
Podlaha	difuzní	116	87	139	0,75
	empirický (XML)	125	96	148	0,77
Stěna 1	difuzní	208	45	709	0,21
	empirický (XML)	174	28	699	0,16
Stěna 2 a 4	difuzní	206	50	502	0,24
	empirický (XML)	192	48	473	0,25
Stěna 3	difuzní	194	39	689	0,20
	empirický (XML)	185	24	641	0,13
Strop	difuzní	75	36	198	0,48
	empirický (XML)	52	25	127	0,49

tab. 5-8: Souhrnné výsledky výpočtu osvětlenosti na plochách vybraného prostoru po mnohonásobných odrazech světla mezi stěnou 1 popsanou empirickým modelem odrazu a difuzní stěnou 3 vypočtené v programu Radiance.

Výsledky výpočtu osvětlenosti ploch vybraného prostoru v tab. 5-8 potvrzují výše uvedený předpoklad. Je-li stěna 1 popsána empirickým modelem odrazu světla se středním činitelem odrazu 0,4 s výraznou zrcadlovou složkou (viz obr. 5-2), hodnoty osvětlenosti podlahy vypočtené kombinací metody radiozity a metody sledování paprsku narůstají přibližně o 8 % v porovnání s případem, kdy je stěna 1 charakterizována difuzním modelem odrazu světla s činitelem odrazu 0,4 a výpočet je realizován pouze s využitím metody radiozity. Osvětlenost stěn a stropu je naopak nižší (v případě stropu je osvětlenost nižší přibližně o 30 %). Světelný tok je tedy ve větší míře směřován od zdroje světla (stropu) k podlaze. Tyto výsledky není možné získat výpočtem v běžně užívaných světelně technických výpočetních programech (např. Dialux, Relux, Wils), které nevyužívají při výpočtu metodu sledování paprsku.

6 Měření světelně technických veličin ve vybraném prostoru

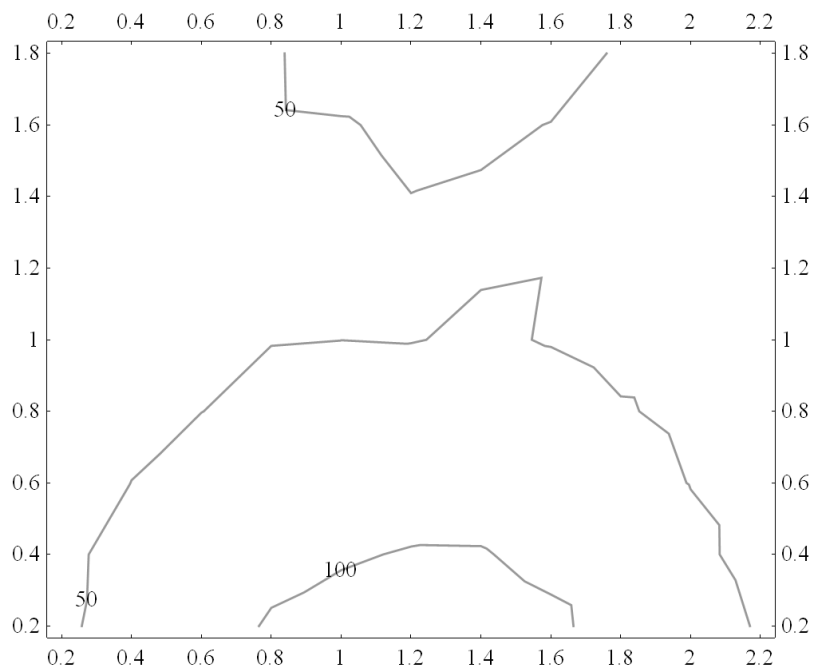
Aby bylo možné ověřit výsledky výpočtu světelně technických veličin ve vybraném prostoru (viz odstavec 5.3.3) s jejich skutečnými hodnotami, provedl jsem měření horizontální osvětlenosti podlahy a stropu v části místnosti B3-347b upravené dle popisu v odstavci 5.1.

Aby byly co nejvíce potlačeny odrazy světla na stěnách 2 a 4, podlaze i stropu, byly při měření osvětlenosti tyto plochy zakryty černou matnou látkou. Na středu stropu byl umístěn bodový zdroj světla (halogenová žárovka Halolux Ceram E27 64480 IM 230 W se světelným tokem 4 210 lm). Aby veškerý světelný tok vycházel pouze do dolního poloprostoru, byl světelný zdroj opatřen v horní části stínítkem. Prostorové rozložení svítivosti zdroje světla opatřeného stínítkem bylo změřeno s využitím laboratorního goniofotometru a následně využito při světelně technických výpočtech v odstavci 5.

Měření osvětlenosti probíhalo s využitím luxmetru Minolta T-10, výrobní číslo 41026002, v rovnoměrné síti kontrolních bodů s roztečí 0,2 m ve srovnávací rovině ve výšce 0,02 m nad podlahou (výška fotočlánku). Naměřené hodnoty osvětlenosti byly korigovány dle ověřovacího listu č. 8018-OL-R0054-12 a jsou uvedeny v tab. 6-1 a tab. 6-2 a graficky znázorněny na obr. 6-1 a obr. 6-2.

Souřadnice kontrolních bodů (m)	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
0,2	44,4	63,8	81,3	104	116	123	119	109	81,2	67,9	46,8
0,4	43,8	59,8	73,2	88,3	95,5	103	102,6	88,6	78,2	57,1	40
0,6	36,7	50,2	65,6	72,5	78,6	75,9	80,3	70,9	61	49,3	39,8
0,8	38,7	44,7	49,7	58,6	65,1	68	62,7	60,8	51,8	45	39,5
1,0	33,3	38	43,6	49,2	49,9	49,1	53,2	48,8	43,2	42,5	32,3
1,2	32,5	35,6	45,4	47,6	49,1	49,9	48,6	49,5	44,5	37,5	35
1,4	29,6	36,9	39,7	42,2	44,7	49,8	48,7	41,2	37	37,7	32,4
1,6	27,1	35,6	42,6	47,2	48,5	53,9	52,2	49,7	41,7	34,3	27,6
1,8	32,1	39,3	46,2	47,5	60,6	61,4	60,2	56,3	48,4	36,2	29,3

tab. 6-1: Naměřené a korigované hodnoty osvětlenosti (lx) stropu vybraného prostoru.

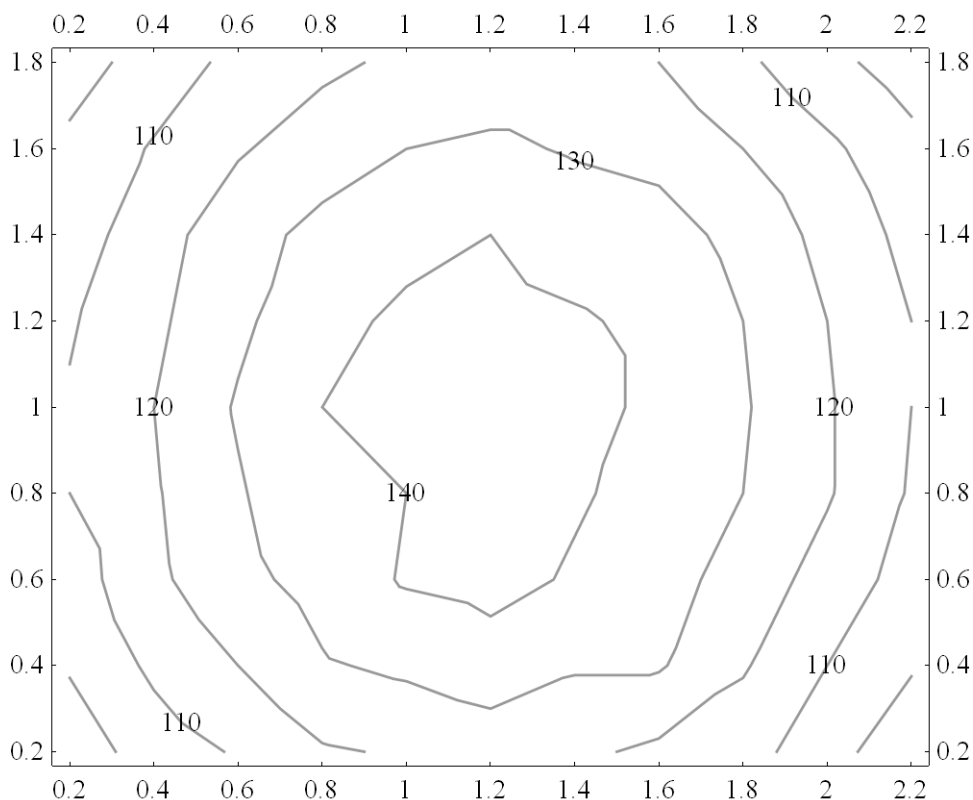


obr. 6-1: Naměřené a korigované hodnoty osvětlenosti (lx) stropu vybraného prostoru zobrazené s využitím izočár.

Naměřené hodnoty osvětlenosti stropu vybraného prostoru (viz tab. 6-1 a obr. 6-1) až na drobné rozdíly odpovídají hodnotám vypočteným v odstavci 5.3.3 (viz obr. 5-10).

Souřadnice kontrolních bodů (m)	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
0,2	94	105	111	119	121	124	122	118	114	104	93
0,4	101	112	120	129	132	136	131	131	121	110	101
0,6	105	118	127	134	141	143	139	134	126	116	106
0,8	110	119	129	138	140	143	141	137	130	121	109
1,0	111	120	131	140	142	144	143	138	131	121	110
1,2	109	118	128	137	142	143	141	138	130	120	110
1,4	105	116	126	133	137	140	136	134	127	117	107
1,6	102	111	119	125	130	132	129	127	120	112	103
1,8	96	104	113	118	122	123	123	120	112	103	95

tab. 6-2: Naměřené a korigované hodnoty osvětlenosti (lx) podlahy vybraného prostoru.



obr. 6-2: Naměřené a korigované hodnoty osvětlenosti (lx) podlahy vybraného prostoru zobrazené s využitím izočár.

Naměřené hodnoty osvětlenosti stropu vybraného prostoru (viz tab. 6-2 a obr. 6-2) taktéž až na drobné rozdíly odpovídají hodnotám vypočteným v odstavci 5.3.3 (viz obr. 5-11).

Následující tabulka ukazuje rozdíly mezi hodnotami místně průměrné osvětlenosti a rovnoměrnosti E_{min}/E_s naměřenými v místnosti B3-347b a hodnotami místně průměrné osvětlenosti a rovnoměrnosti E_{min}/E_s ve vybraném prostoru vypočtenými v programu Radiance v případě, kdy je stěna 1 popsána difuzním modelem odrazu s činitelem odrazu 0,4, a v případě, kdy je tato stěna popsána empirickým modelem odrazu.

Plocha scény	Původ uvedených hodnot	E_s (lx)	E_{min} (lx)	E_{max} (lx)	$\frac{E_{min}}{E_s}$ (-)
Podlaha	Radiance (difuzní model)	116	87	139	0,75
	Radiance (empirický model)	125	96	148	0,77
	Měření	123	93	144	0,80
Strop	Radiance (difuzní model)	75	36	198	0,48
	Radiance (empirický model)	52	25	127	0,49
	Měření	56	27	123	0,50

tab. 6-3: Naměřené a korigované hodnoty osvětlenosti (lx) podlahy vybraného prostoru.

Z tab. 6-3 je patrné, že naměřené hodnoty osvětlenosti podlahy a stropu vybraného prostoru nejlépe korespondují s hodnotami vypočtenými metodou radiozity v kombinaci s metodou sledování paprsku a s využitím empirického modelu odrazu v programu Radiance.

Závěr

Hlavním cílem práce byl výzkum problematiky podrobného měření odrazných vlastností světelně činných materiálů a zejména následného využití naměřených dat ve světelně technických výpočetních programech. V rozboru současného stavu problematiky byly popsány metody popisu odrazných vlastností materiálů a idealizované modely odrazu světla, se kterými pracuje většina běžně užívaných světelně technických výpočetních programů. Skutečné odrazné vlastnosti materiálů nejsou doposud ve světelně technických výpočtech zohledňovány. Navržená metodika záznamu odrazných vlastností materiálů uvedená v této práci umožňuje zkvalitnění výsledků řešení mnohonásobných odrazů a možnost využití zaznamenaných odrazných vlastností materiálů ve světelně technických výpočtech může přispět ke zlepšení jak kvantitativních, tak kvalitativních ukazatelů parametrů nově projektovaných osvětlovacích soustav. Dosažené výsledky v předložené práci lze rozdělit na oblast teoretickou a praktickou.

Přínosy práce k teorii světelné techniky:

- podrobná měření odrazných vlastností materiálů na fotometrické lavici prokázala výrazný rozdíl mezi skutečným tvarem fotometrické plochy odrazu a fotometrickou plochou odrazu difuzní plochy užívanou v běžných světelně technických výpočetních programech,
- s využitím softwaru Wolfram Mathematica jsem provedl aproximaci indikatrix jasu odrazu vybraného materiálu, která umožnila grafické zobrazení naměřených hodnot jasu ve sférických souřadnicích a zejména další práci s těmito daty,
- na základě známých teoretických vztahů jsem provedl výpočet indikatrix svítivosti a hodnot dvousměrové odrazové distribuční funkce (BRDF – z angl. Bidirectional Reflectance Distribution Function) ze změřených hodnot indikatrix jasu,
- v práci jsem navrhl postup tvorby Eulumdat ekvivalentních svítidel, jejichž svítivost odpovídá indikatrix svítivosti měřeného materiálu pro definované směry dopadu světla a osvětlenosti povrchu materiálu,
- navrhl jsem metodiku výpočtu odrazu světla od světelně činné plochy s využitím ekvivalentních svítidel, která názorně ukazuje rozdíly v převažujícím směru šíření

světla po procesu jeho odrazu od obecně odražejícího materiálu při porovnání s difuzním modelem odrazu,

- zpracoval jsem metodiku zápisu vypočtených hodnot dvousměrové odrazové distribuční funkce (BRDF) do struktury souborů formátu XML vyvinutých pro záznam odrazu a prostupu světla okenními systémy a následné využití těchto souborů pro světelně technické výpočty,
- možnost využití skutečných odrazných vlastností materiálů ve světelně technických výpočtech přispívá ke zpřesnění výsledků těchto výpočtů,
- popsany postup výpočtu dvousměrových distribučních funkcí z naměřených hodnot jasu lze využít nejen pro záznam odrazných vlastností materiálů, ale i pro další oblasti světelné techniky, např. při analýze prostupu a odrazu světla okenními systémy s žaluziemi,
- v práci jsem prokázal, že výsledky výpočtu světelně technických veličin realizovaného navrženou metodou ve vybraném prostoru, ve kterém dochází k mnohonásobným odrazům světla od obecně odražejících materiálů, vedou při využití pokročilých výpočetních metod (např. metoda sledování paprsku) ke zpřesnění výsledků výpočtu provedeného běžně užívanými metodami (např. metoda radiozity).

Přínosy práce k světelně technické a fotometrické praxi:

- v předložené práci jsem rozšířil laboratorní přípravek pro měření odrazných vlastností materiálů na fotometrické lavici tak, aby bylo možné měřit prostorové rozložení jasu vzorku materiálu v celém poloprostoru a aby byly dodrženy požadované vzdálenosti pro přesné měření jasu a zejména osvětlenosti vzorku
- měřením jsem získal tabulky indikatrix jasu a osvětlenosti vzorku materiálu při různých úhlech dopadu světla, kterými je podrobně popsán proces odrazu světla vybraného vzorku materiálu vyskytujícího se v interiérech,
- aproximací měřením získaných indikatrix jasu a následným výpočtem indikatrix svítivosti a dvousměrové odrazové distribuční funkce (BRDF) jsem vytvořil model skutečného odrazu světla pro vybraný materiál,
- vypočtené hodnoty dvousměrové odrazové distribuční funkce získané aproximací naměřených hodnot jsem zaznamenal do matice hodnot ve formátu XML a vypočtené hodnoty indikatrix svítivosti do přiložených souborů Eulumdat, což

umožňuje využití zjištěných odrazných vlastností materiálu v různých světelně technických výpočetních programech a je tak možné zpřesnit řešení mnohonásobných odrazů ve vnitřních prostorech,

- provedl jsem srovnání měření a výpočtu jednorázového i mnohonásobných odrazů světla ve vybraném prostoru s nedifuzní stěnou třemi různými metodami – náhradou všech světelně činných ploch difuzními plochami, náhradou nedifuzní plochy ekvivalentními svítidly a výpočtem odrazu světla od nedifuzní plochy s využitím skutečných naměřených hodnot dvousměrové odrazové distribuční funkce a metody sledování paprsku,
- prokázal jsem, že výsledky měření skutečných hodnot osvětlenosti ve vybrané scéně se nejlépe shodují s výsledky výpočtu mnohonásobných odrazů světla s využitím metody sledování paprsku a skutečných naměřených hodnot dvousměrové odrazové distribuční funkce,
- získané výsledky výpočtu i měření osvětlenosti ve vybraném prostoru dokumentují, že v prostoru, kde je svítidlo umístěno v blízkosti stropu a jedna ze stěn je tvořena nedifuzním materiálem s nenulovou zrcadlovou složkou odrazu, dochází k poklesu osvětlenosti stropu (o desítky procent) a naopak k nárůstu osvětlenosti spodní části místnosti (o jednotky procent) oproti případu, kdy jsou všechny stěny tvořeny difuzními plochami se stejnými integrálními činiteli odrazu,
- z ověřovacích výpočtů provedených v této práci vyplývá, že při návrhu osvětlovacích soustav běžnými světelně technickými výpočetními programy v prostorech, jejichž stěny jsou tvořeny nedifuzními materiály s nenulovou zrcadlovou složkou odrazu, mohou být výsledky výpočtu nepřesné a osvětlovací soustavy mohou být předimenzované, což má negativní vliv na jejich energetickou náročnost.

Závěry pro další rozvoj vědy a realizaci v praxi:

Jednoznačným závěrem mé práce je zjištění, že nezbytnou podmínkou pro dosažení přesných výsledků světelně technických výpočtů využití konkrétních modelů odrazu zohledňujícími skutečné odrazné vlastnosti materiálů a aplikace metod počítačové grafiky, které umožňují s modely skutečných odrazných vlastností materiálů pracovat.

Abychom dokázali při návrhu interiérů pracovat se skutečnými modely dat, je třeba zajistit velmi přesné měření hodnot jasu povrchu materiálu a následně je přepočítat na indikatrix svítivosti, popřípadě na hodnoty dvousměrové odrazové distribuční funkce. V oblasti měření jasu vzorků jsem přistoupil ke konstrukci většího měřicího zařízení pro měření prostorového rozložení činitele odrazu povrchů pozorovaných předmětů. Největší problém při získávání dat v minulosti vycházel z malých rozměrů dosud používaného měřicího zařízení, ve kterém nebylo možné měřit vzorky, jejichž tloušťka převyšuje 5 mm. Měření osvětlenosti povrchu vzorku, která je třeba při výpočtu dvousměrové odrazové distribuční funkce, bylo v dosavadním zařízení taktéž nemožné.

Možným pokračováním této práce je další rozvoj a zejména automatizace měření dvousměrové odrazové distribuční funkce a jejího záznamu ve formátu XML. Metodika záznamu odrazných vlastností materiálů pro využití ve výpočetních programech zpracovaná v této práci v kombinaci se zařízením pro automatické měření odrazných vlastností materiálů by v budoucnu umožnila důkladnější analýzu celé problematiky. Další oblastí, která je z hlediska studia mnohonásobných odrazů velmi opomíjena, je problematika oslnění. Riziko vzniku oslnění od světelně činných povrchů se zrcadlovou složkou může být v porovnání s difuzními plochami vyšší.

Seznam odborné literatury:

- [1] J. Habel a kol., Světlo a osvětlování, Praha: FCC Public, 2013.
- [2] V. Appl, Globální osvětlovací metody v architektonické vizualizaci, Brno: Ústav techniky tvorby FA VUT, 2007.
- [3] L. Proňková, Monte Carlo radiační metody, Praha: Univerzita Karlova v Praze, Matematicko-fyzikální fakulta, 2003.
- [4] Z. Jelínek, Algoritmy pro výpočet globálního osvětlení, Brno: Masarykova univerzita, Fakulta informatiky, 2007.
- [5] J. Málek, Odrazné vlastnosti světelně činných materiálů, Praha: ČVUT v Praze, FEL, 2007.
- [6] „EULUMDAT File Format Specification,“ Heart Consultants Limited, 1999-2012. [Online]. Available: <http://www.helios32.com/Eulumdat.htm>. [Přístup získán 12 5 2014].
- [7] Carli, Inc., „Calculation of optical properties for a venetian blind type of shading device,“ Millers Falls, 2006.
- [8] J. Klems, „A New Method for Predicting the Solar Heat Gain of Complex Fenestration Systems,“ ASHRAE Winter Meeting, New Orleans, 1994.
- [9] D. Geisler-Moroder, „BSDF Crash Course and The Radiance 3-Phase-Method,“ 11th International Radiance Workshop, Copenhagen, 2012.
- [10] M. Saxena, G. Ward, T. Perry, L. Hescong a R. Higa, „Predicting Annual Daylight with Variable Fenestration Optics using BSDFs,“ Fourth National Conference of IBPSA-USA, New York City, 2010.
- [11] G. W. Larson a R. Shakespeare, Rendering with radiance: the art and science of lighting visualization, San Francisco: Morgan Kaufmann, 1998.
- [12] J. Žára, B. Beneš, J. Sochor a P. Felkel, Moderní počítačová grafika, Brno: Computer Press, 2004.
- [13] S. K. Nayar, K. Ikeuchi a K. Takeo, „Surface Reflection: Physical and Geometrical Perspectives,“ *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, sv. 13, Červenec 1991.
- [14] J. H. Klems a J. L. Warner, „Measurement of Bidirectional Optical Properties of Complex Shading Device,“ Lawrence Berkley Laboratory, University of California, Berkley, 1995.

Seznam příloh

Přehled publikační činnosti

Příloha A: Naměřené hodnoty jasů vzorku materiálu

Příloha B: Vypočtené hodnoty svítivosti vzorku materiálu

Příloha C: Vypočtené hodnoty BRDF vzorku materiálu

Příloha D: Soubory Eulumdat odpovídající jednotlivým úhlům dopadu světla na měřený vzorek materiálu

Příloha E: Hodnoty dvousměrové odrazové distribuční funkce ve formátu XML

Příloha F: Výpočty osvětlenosti vybraného prostoru ve výpočetním programu Dialux

Příloha G: Výpočty osvětlenosti vybraného prostoru ve výpočetním programu Radiance

Ing. Marek Bálský – publikační činnost

Seznam publikací vztahujících se k disertační práci

Publikace v impaktovaných časopisech (excerpované WOS):

- [L1] Bálský M., Bayer R.: Comparison of real street lighting with sodium lamps and LEDs. In: Przegląd Elektrotechniczny. 2011, roč. 2011, č. 4, s. 17-19. ISSN 0033-2097. 50 %

Publikace v recenzovaných časopisech:

- [L2] Bálský M., Habel J.: Modernizace goniofotometru. In: Světlo. 2009, roč. 12, č. 4, s. 54-57. ISSN 1212-0812. 50 %

Publikace ostatní:

- [L3] Bálský M.: Evaluation of energy efficiency of artificial lighting systems in buildings. In: World sustainable energy days 2013. Linz: O.Ö. Energiesparverband, 2013. 100 %
- [L4] Bálský M., Drábek T.: Automatizované měření osvětlenosti v interiéru. In: Kurz osvětlovací techniky XXX. Ostrava: Česká společnost pro osvětlování, 2013, s. 115-118. ISBN 978-80-248-3173-2. 50 %
- [L5] Bayer R., Bálský M., Musálek L.: Metody určení přímé a nepřímé složky slunečního záření. In: IV Lighting Conference of the Visegrad Countries. Bratislava: Kongres management s.r.o., 2012, s. 318-321. ISBN 978-80-89275-32-8. 33 %
- [L6] Bálský M., Bayer R.: Analýza odrazných vlastností materiálů pro interiéry. In: Kurz osvětlovací techniky XXIX. Ostrava: Česká společnost pro osvětlování, 2012, s. 194-197. ISBN 978-80-248-2832-9. 50 %
- [L7] Bálský M., Bayer R., Zálešák J.: Methods for evaluation of lighting systems energy performance. In: ELEN 2012. Praha: vydavatelství ČVUT v Praze, 2012, s. 1-5. ISBN 978-80-01-05096-5. 33 %
- [L8] Bálský M.: Matematický popis odrazných vlastností materiálů. In: Technika osvětlování XXV. Plzeň: Zdravotní ústav se sídlem v Plzni, 2012, s. 126-130. 100 %
- [L9] Bayer R., Bálský M.: Use of direct and indirect components of solar radiation in photovoltaics. In: Light Světlo 2011. Ostrava: Česká společnost pro osvětlování, 2011, s. 110-112. ISBN 978-80-248-2480-2. 50 %
- [L10] Bálský M.: New trends in road lighting. In: POSTER 2010 - Proceedings of the 14th International Conference on Electrical Engineering. Praha: ČVUT v Praze, FEL, 2010, s. 1-4. ISBN 978-80-01-04544-2. 100 %
- [L11] Habel J., Bayer R., Bálský M.: Softwarová podpora měření čar svítivosti na goniofotometru. In: Technika osvětlování XXIV. Plzeň: Česká společnost pro osvětlování, 2010, s. 34-42. ISBN 978-80-7043-879-4. 33 %
- [L12] Bálský M.: Modernization of Goniophotometer in the Laboratory of Photometry at FEE CTU. In: Poster 2009. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009, s. 1-4. 100 %
- [L13] Habel J., Bálský M.: Rozbor nejistot měření čar svítivosti na goniofotometru. In: Kurz osvětlovací techniky XXVII. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009, s. 59-65. ISBN 978-80-248-2087-3. 50 %

- [L14] Bálský M., Habel J.: Rušivé světlo nad areálem ČVUT. In: Kurz osvětlovací techniky XXVI. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008, s. 10-14. ISBN 978-80-248-1851-1. 50 %

Seznam ostatních publikací

- [L15] Musálek L., Straka L., Bálský M., Musil L.: Use of a solar concentrator to produce electrical energy and heat. In: ELEN 2012. Praha: vydavatelství ČVUT v Praze, 2012, s. 1-5. ISBN 978-80-01-05096-5. 25 %
- [L16] Bálský M.: Solar radiation concentrator calculations. In: POSTER 2011 - 15th International Student Conference on Electrical Engineering. Prague: CTU, Faculty of Electrical Engineering, 2011, p. 1-4. ISBN 978-80-01-04806-1. 100 %
- [L17] Bálský M.: Možnosti zvýšení výkonu fotovoltaických systémů. In: Sborník konference ELEN 2010. Praha: ČVUT FEL, Katedra elektroenergetiky, 2010, s. 1-4. ISBN 978-80-254-8089-2. 100 %

Ohlasy

Citace [L1] v impaktovaném článku: Uddin Sohel, Shareef Hussain, Mohamed Azah et al.: Harmonics and thermal characteristics of low wattage LED lamps. In: Przegląd Elektrotechniczny. 2012, roč. 2012, č. 11a, s. 266-271. ISSN 0033-2097.

K publikacím [L2] až [L17] nejsou zaznamenány ohlasy.

V Praze dne:

Ing. M. Bálský