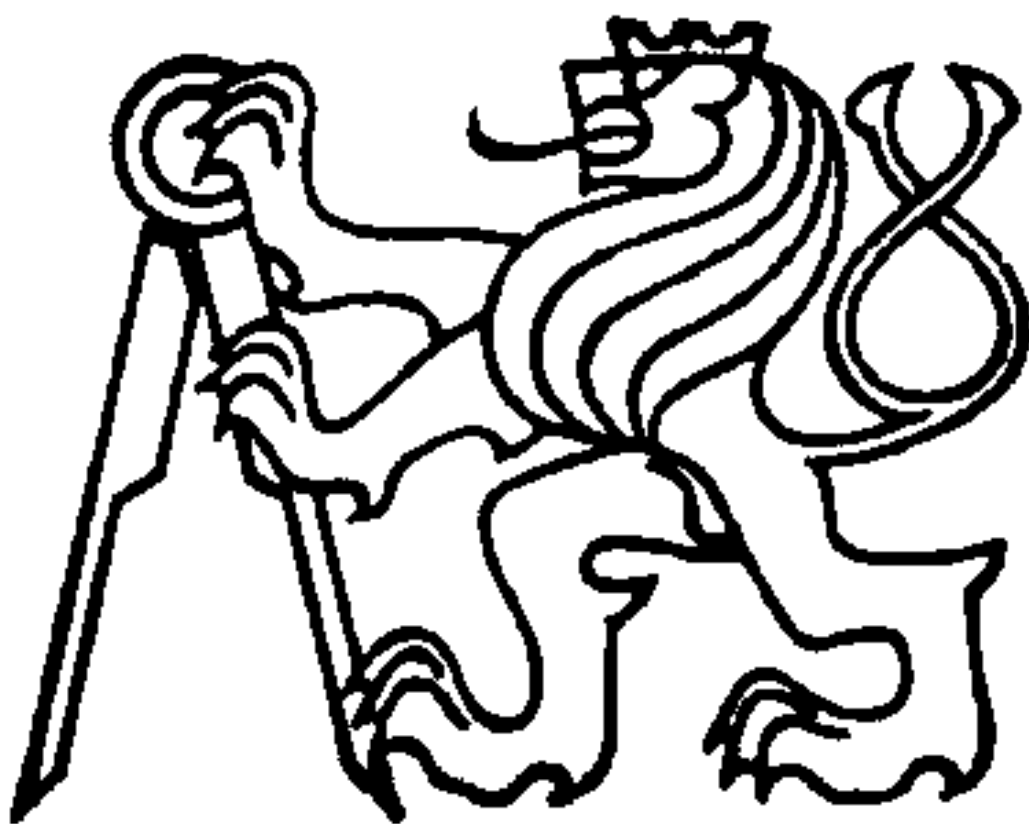


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

Ing. Marek Bálský

**ANALÝZA PROCESU
MNOHONÁSOBNÝCH ODRAZŮ**

Doktorský studijní program: Elektroenergetika
Studijní obor: Elektroenergetika

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce
"Ph.D."

Praha, červenec 2014

Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na katedře elektroenergetiky Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

Uchazeč: Ing. Marek Bálský
Katedra elektroenergetiky
Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze
Technická 2, 166 27 Praha 6

Školitel: prof. Ing. Jiří Habel, DrSc.
Katedra elektroenergetiky
Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze
Technická 2, 166 27 Praha 6

Oponenti:
.....
.....

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod. před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru „Elektroenergetika“ v zasedací místnosti č Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

S disertací je možno se seznámit na děkanátě Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, na oddělení pro vědu, výzkum a zahraniční styky, Technická 2, Praha 6.

předseda komise pro obhajobu disertační práce
ve studijním oboru
Elektroenergetika
Fakulta elektrotechnická ČVUT, Technická 2, Praha 6

Obsah

1. Současný stav problematiky	2
2. Cíle disertační práce	11
3. Metody zpracování	11
4. Výsledky	16
Závěr	20
Seznam v tezích použité literatury	24
Seznam publikací vztahujících se k disertační práci	25
Seznam ostatních publikací.....	26
Ohlasy.....	26
Summary	27
Resumé	27

1. Současný stav problematiky

Pro popis světelných scén (světelného pole) se využívá řada světelně technických veličin, které spolu vzájemně souvisí. 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

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

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

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

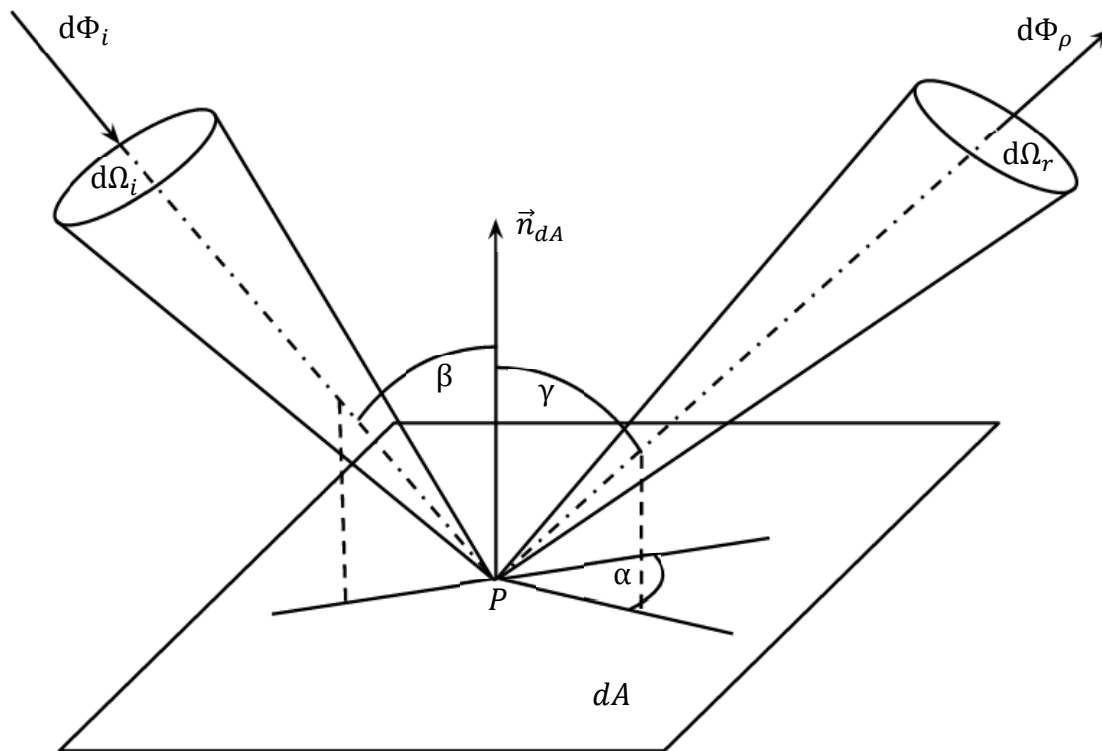
Pro neprůsvitné materiály platí $\rho + \alpha = 1$ a pro materiály pohlcující veškeré záření na ně dopadající platí $\alpha = 1$. O prostředí, kterým se šíří světelné paprsky od svítidel na osvětlované plochy, se při výpočtech v praxi předpokládá, že světlo nepohlcuje a nerozptyluje. Tento předpoklad je většinou splněn jak ve vnitřních, tak i ve venkovních prostorech.

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

$$\rho_s = \frac{\rho_1 A_1 + \rho_2 A_2 + \dots + \rho_n A_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n}. \quad (1.6)$$

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 odráží. 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:

$$L_i = \frac{d^2\Phi_i}{d\Omega_i \cdot dA \cdot \cos\beta} = \frac{dE_n}{d\Omega_i} \quad (\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}; \text{lm, sr, m}^2; \text{lx, sr}), \quad (1.7)$$

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:

$$L_r = \frac{d^2\Phi_\rho}{d\Omega_r \cdot dA \cdot \cos\gamma} = \frac{dI_{\alpha\gamma}}{dA \cdot \cos\gamma} \quad (\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}; \text{lm, sr, m}^2; \text{cd, m}^2), \quad (1.8)$$

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

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 jasnem $L_i(\beta)$, je dána vztahem (1.9).

$$E_P = \int_0^{2\pi} L_i(\beta) \cdot \cos\beta \cdot d\Omega_i = \frac{\Phi_i}{A} \quad (\text{lx; cd}\cdot\text{m}^{-2}, \text{sr; lm, m}^2) \quad (1.9)$$

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 (1.10).

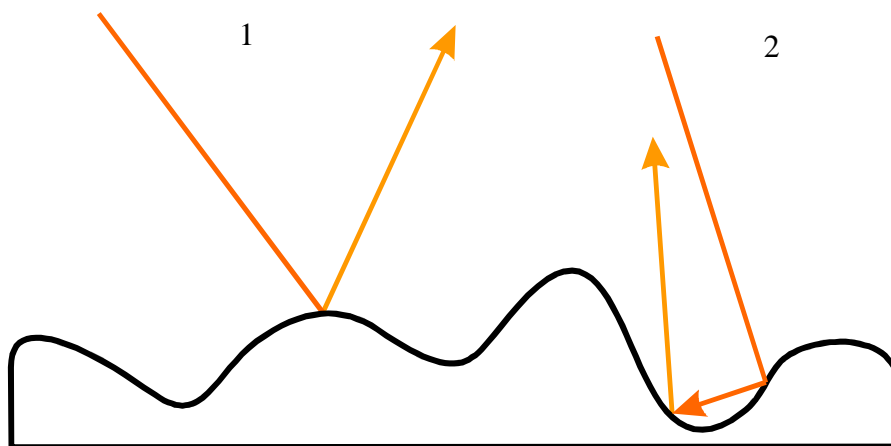
$$M_P = \int_0^{2\pi} L_r(\alpha, \gamma) \cdot \cos\gamma \cdot d\Omega_r = \frac{\Phi_\rho}{A} \quad (\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}; \text{cd}\cdot\text{m}^{-2}, \text{sr; lm, m}^2) \quad (1.10)$$

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), (1.9) a (1.10) plyne pro činitel odrazu rovinné plochy vztah:

$$\rho = \frac{\Phi_\rho}{\Phi_i} = \frac{M_P}{E_P} \quad (-; \text{lm, lm; lm}\cdot\text{m}^{-2}, \text{lx}). \quad (1.11)$$

Povrch tělesa nikdy není dokonale hladký a při velkém zvětšení vypadá podobně jako na obr. 1-2. 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

$$L_r(\alpha, \gamma) = L_0 \cdot f_L(\alpha, \gamma) \quad (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}, -), \quad (1.12)$$

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:

$$I_{\alpha\gamma} = I_0 \cdot f_I(\alpha, \gamma) \quad (\text{cd}; \text{cd}, -). \quad (1.13)$$

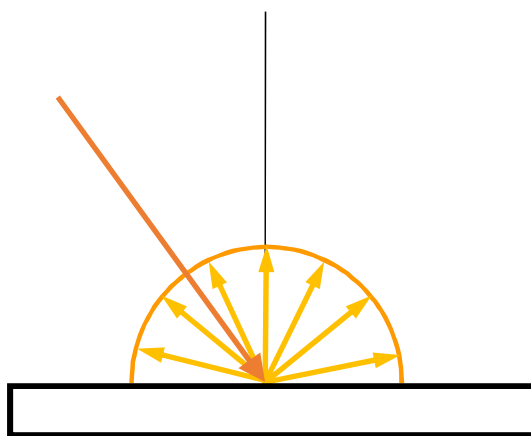
Z rovnice (1.8) dále vyplývá vztah mezi indikatrix svítivosti a indikatrix jasu:

$$f_I(\alpha, \gamma) = f_L(\alpha, \gamma) \cdot \cos \gamma \quad (\text{cd}; \text{cd}, -), \quad (1.14)$$

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.

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 (1.12).

Dokonale rozptylně odrážející (difuzní) plochy se často označují názvem Lambertovy zářiče. Podle rovnic (1.10) a (1.12) pro Lambertovy zářiče platí vztah (1.15).

$$M = \int_0^{2\pi} L_r(\alpha, \gamma) \cdot \cos\gamma \cdot d\Omega_r = L_0 \int_0^{2\pi} \cos\gamma \cdot d\Omega_r = L_0 \cdot \pi \quad (1.15)$$

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

$$M = \pi \cdot L_0 \quad (\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}; \text{sr}, \text{cd}\cdot\text{m}^{-2}). \quad (1.16)$$

Mezi osvětleností E a světlením M sledované odrážející plochy, charakterizované činitelem odrazu ρ , platí vztah (1.11). Potom při kombinaci rovnice (1.11) a rovnice (1.16) vyplývá pro difuzně odrážející povrch významná souvislost mezi osvětleností E a jasem L_0 tohoto povrchu [1]:

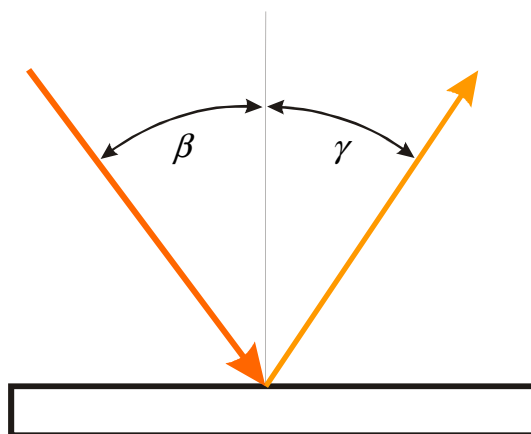
$$\rho \cdot E = \pi \cdot L_0 \quad (-, \text{lm}\cdot\text{m}^{-2}; \text{sr}, \text{cd}\cdot\text{m}^{-2}). \quad (1.17)$$

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, jehož základním prvkem je dutá plocha ve tvaru polokoule opatřená bílým rovnoměrně rozptylným nátěrem a pásem halogenových žárovek po obvodu okraje této plochy. Ve středu polokoule je umístěno čidlo (fotočlánek).

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.

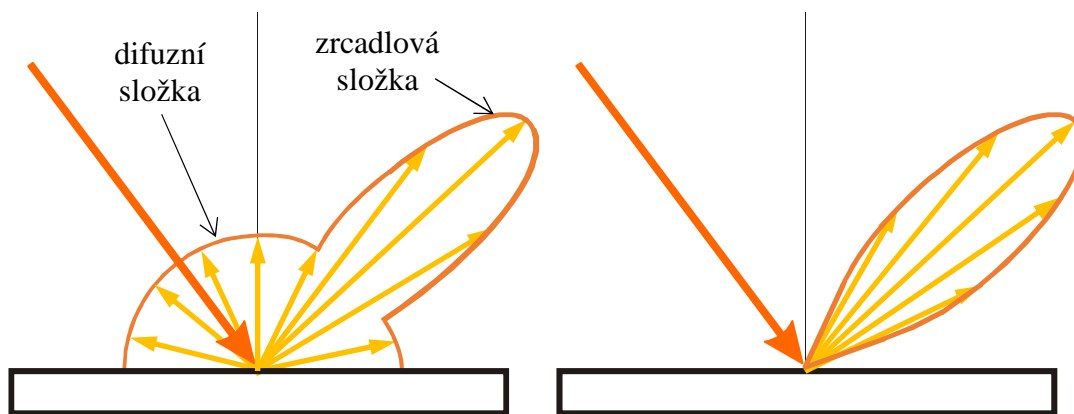
Zrcadlový odraz odpovídá paprsku označenému 1 na obr. 1-2. Charakteristickou vlastností zrcadlového odrazu je jeho směrovost. Světelný paprsek se odrazí od povrchu pod stejným úhlem, pod kterým na uvažovaný povrch dopadl, tj. dle obr. 1-1 v případě, kdy $\beta = \gamma$ a $\alpha = 0^\circ$ (viz obr. 1-4).



obr. 1-4: Ideální zrcadlový odraz světla.

V současné době jsou k popisu odrazných vlastností ploch používány jen zmíněné ideální případy odrazných povrchů (difuzní a zrcadlový odraz). Při světelně technických výpočtech se téměř výhradně využívá vlastností ideálně difuzní plochy, neboť se tím výpočty zjednoduší. Počítá se tak například se svítícími stropy, transparenty, se svítidly s opálovým sklem apod.

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



obr. 1-5: Difuzní odraz se zrcadlovou složkou (vlevo) a zrcadlový odraz s difuzní složkou (vpravo).

Jelikož podrobný výpočet vlastností světelné scény je možný jen za použití skutečných modelů odrazu světla, vzniká tak 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.

V procesu 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 odrážení světelných toků a jejich znovurozdělení v prostoru se neustále opakuje – probíhá proces mnohonásobných odrazů [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].

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].

$$\Phi_i = \Phi_{i0} + \sum_{k=1}^n \Phi_{ki} = \Phi_{i0} + \sum_{k=1}^n \psi_{ki} \cdot \rho_k \cdot \Phi_k , \quad (1.18)$$

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 (1.18) lze pro všechny plochy uvažovaného prostoru podílející se na procesu mnohonásobných odrazů vypočítat výsledné toky Φ_i dopadající na jednotlivé uvažované plochy [1].

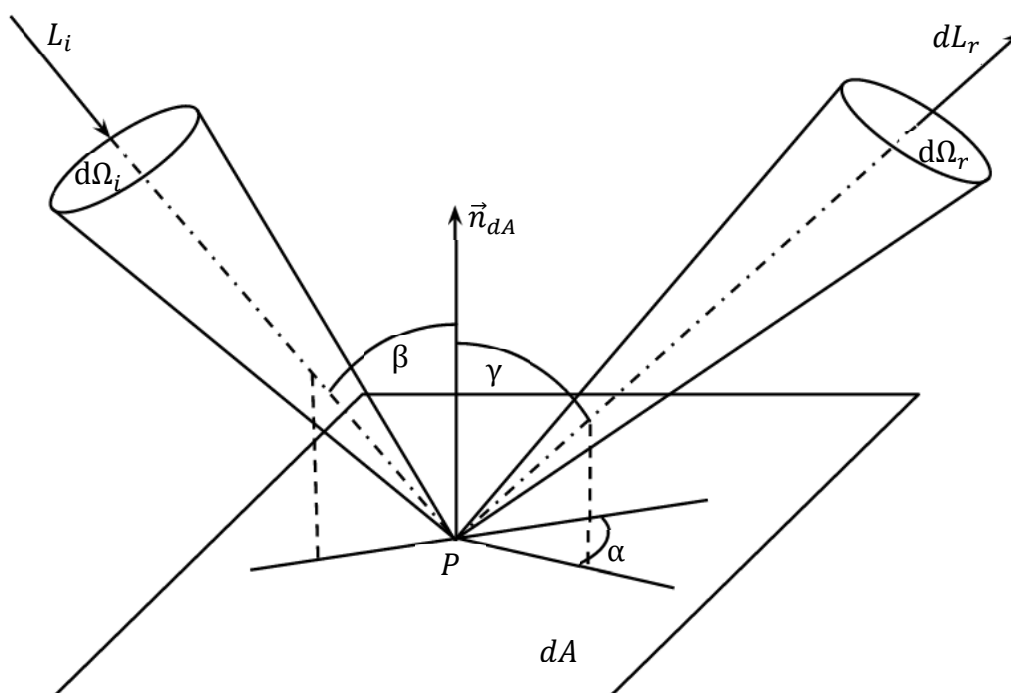
Při popisu skutečného odrazu světla však nevystačíme jen s tímto zjednodušením odrazných vlastností světelně činných ploch a s integrálním činitelem odrazu. Je proto třeba zjistit, jaké je skutečné rozložení jasu při odrazu od světelně činných povrchů, které se v interiéru běžně vyskytují.

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 výpočtu používané v počítačové grafice.

Počítačové vizualizační programy využívají pro realistické modelování 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.

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 [2]. Tato funkce popisuje, kolik světla přicházejícího z daného směru se odrazí do jiného směru poloprostoru (proto dvousměrová). Je definována jako poměr mezi diferenciálním jasnem dL_r ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$) okolí 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 :

$$f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma) = \frac{dL_r(\alpha, \gamma)}{dE_p(\beta)} = \frac{dL_r(\alpha, \gamma)}{L_i(\beta) \cdot \cos\beta \cdot d\Omega_i} \quad (1.19)$$



obr. 1-6: 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 [2]:

$$f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma) = f_{BRDF}(\alpha, \gamma, \beta). \quad (1.20)$$

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.

V reálném světě se v procesu mnohonásobných odrazů výrazně projevuje existence více objektů v jednom prostoru. Globální charakter vzájemných vztahů popisujících šíření světla mezi objekty postihují dvě základní zobrazovací metody. Jedná se o metodu sledování paprsku a metodu radiozity [3].

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, odráží se a lámou a ovlivňují tak osvětlení dalších míst scény. 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.

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

Nedostatky výše jmenovaných postupů se daří řešit stochastickými metodami výpočtu mnohonásobných odrazů. Základem těchto metod je většinou integrace zobrazovací rovnice metodou Monte Carlo (viz [4]), 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, metoda fotonových map, metoda sledování fotonů a cest [5].

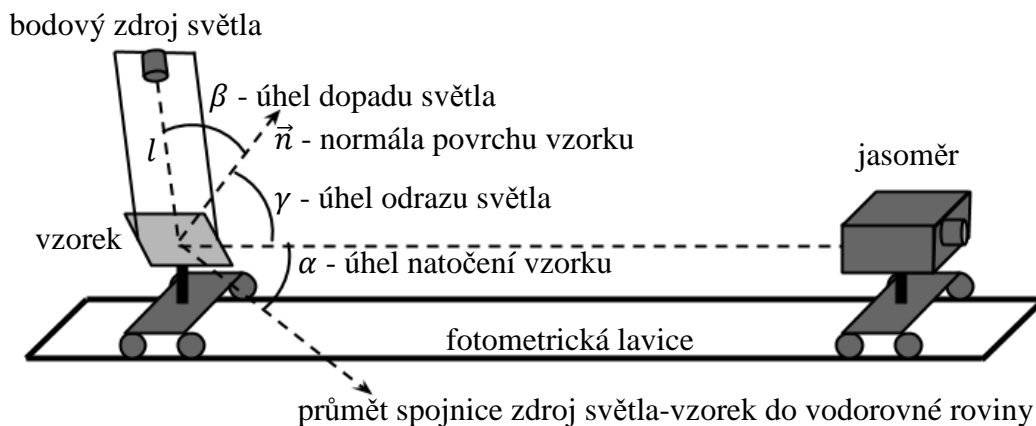
Současné světelně technické výpočetní programy určené pro návrh osvětlovacích soustav nahrazují skutečné odrazné vlastnosti materiálů v daném prostoru modelem ideálního Lambertova zářiče, což vede k potlačení zrcadlové složky odrazu a nepřesným výsledkům výpočtu při použití materiálů vykazujících smíšený odraz světla. Metodami používanými v počítačové grafice (jako je např. metoda sledování paprsku) lze dosáhnout zpřesnění výpočtu mnohonásobných odrazů. 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 architektonické vizualizace 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 měřeními ve vybraném prostoru s teoretickými výpočty mnohonásobných odrazů,
- zhodnocení vlivu mnohonásobných odrazů na kvalitu osvětlení.

3. Metody zpracování

Při studiu odrazných vlastností skutečných materiálů je třeba provést jasovou analýzu povrchu materiálu (sekundárního zdroje světla), což 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. Jasová analýza sekundárního zdroje světla (vzorku materiálu) je založena na využití fotometrické lavice a 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). Uspořádání měřicího pracoviště s pevným umístěním jasoměru v kombinaci s přípravkem s nastavitelnou polohou vzorku a otočným zdrojem světla je patrné z obr. 3-1.



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

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 začlenění povrchu materiálu upevňovacím rámečkem, resp. konstrukcí ramene se světelným zdrojem.

Pro měření jsem zvolil vzorek materiálu hojně využívaný v interiérech – lakované dřevo, který reprezentuje povrchy různých druhů nábytku a který také v co největší míře reprezentuje odlišnost od idealizovaných modelů odrazu světla. Takový materiál by neměl vykazovat ani ideálně difuzní, ani ideálně zrcadlový odraz, ale naopak naprosto obecné odrazné vlastnosti.

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 (1.11) pro integrální činitel odrazu v kombinaci se vztahem (1.10). 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.

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 $E_0 = 82,6 \text{ lx}$. Hodnoty osvětlenosti vzorku bodovým zdrojem světla jsou třeba pro výpočet hodnot dvousměrové odrazové distribuční funkce BRDF, viz rovnice (1.19).

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. Aplikací rovnice (1.11) pak byly určeny jednotlivé integrální činitele odrazu ρ pro každý měřený úhel dopadu světla β .

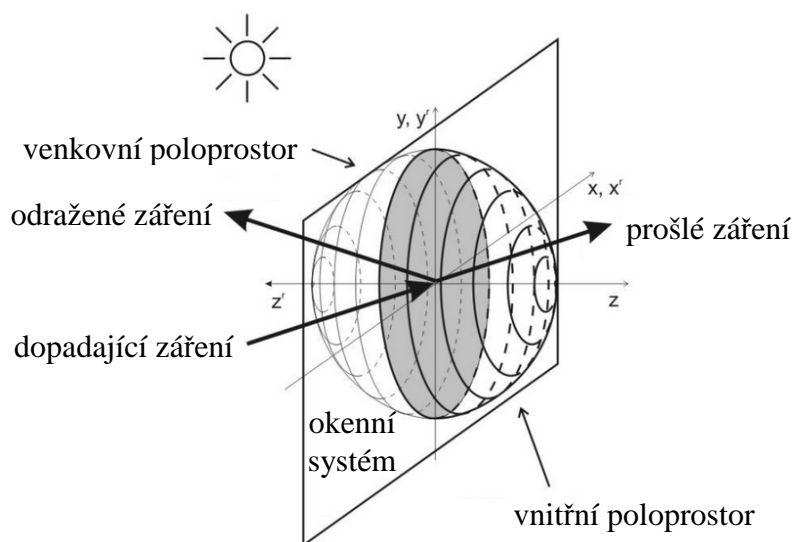
Svítilivost $I_{\alpha\gamma}$ vzorku materiálu při různých úhlech pozorování (α, γ) lze na základě znalosti naměřených hodnot jasu $L_r(\alpha, \gamma)$ určit s využitím rovnic (1.13) a (1.14).

Dvousměrovou odrazovou distribuční funkci $f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma)$ vzorku materiálu při různých úhlech pozorování (α, γ) lze na základě znalosti naměřených hodnot jasu $L_r(\alpha, \gamma)$ a naměřených hodnot osvětlenosti povrchu materiálu určit s využitím rovnice (1.19).

Návrh vhodné metody záznamu naměřených odrazových vlastností materiálů vycházel z předpokládaného budoucího praktického využití těchto dat ve výpočetních programech pro světelně technické projektování a programech pro realistické zobrazování scén (vizualizaci).

Vstupními údaji v programech pro projektování osvětlovacích soustav jsou soubory Eulumdat, které obsahují popis fotometrických ploch svítivosti (vytvořených na základě vypočtených hodnot svítivosti vzorku). Metodika tvorby souborů Eulumdat vychází ze známých postupů [6] a je podrobně popsána v disertační práci. Soubory Eulumdat vytvořené na základě vypočtených hodnot svítivosti jsem využil pro návrh metody tzv. ekvivalentních svítidel při výpočtu jednorázového odrazu světla ve zvoleném prostoru.

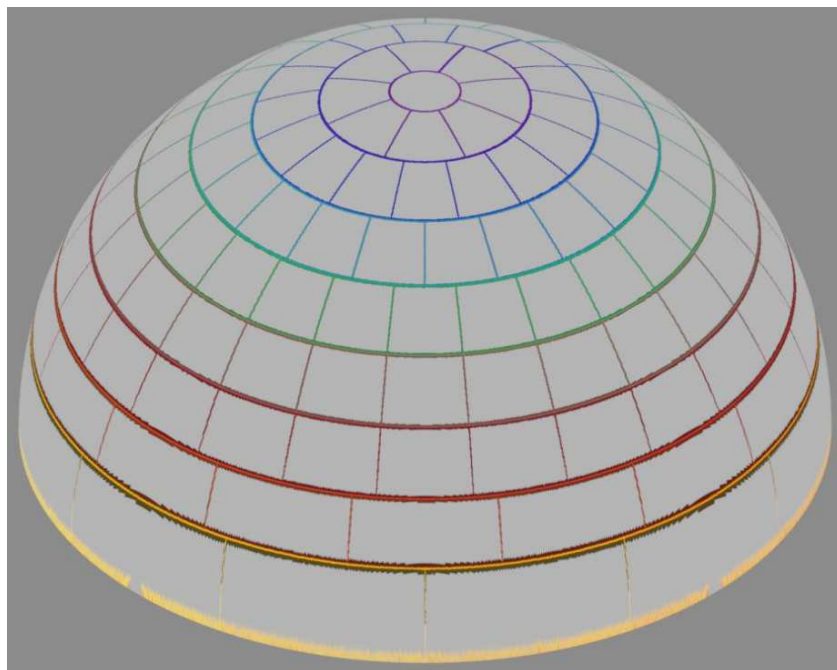
Programy pro architektonickou vizualizaci pracují s dvousměrovými odrazovými distribučními funkcemi. Pro záznam hodnot dvousměrové odrazové distribuční funkce jsem navrhl metodiku odvozenou od postupu využívaného pro popis prostupu a odrazu světla rovinnými okenními systémy s žaluziemi, pro které je zaveden systém rozdělení vnitřního i vnějšího poloprostoru na tzv. Klemsovy segmenty (angl. Klems patches) [7].



obr. 3-2: Rozdělení prostoru okenním systémem na 2 poloprostory [8].

Jedná se o rozdělení každého z poloprostorů (vnějšího i vnitřního) na 145 dílčích 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].

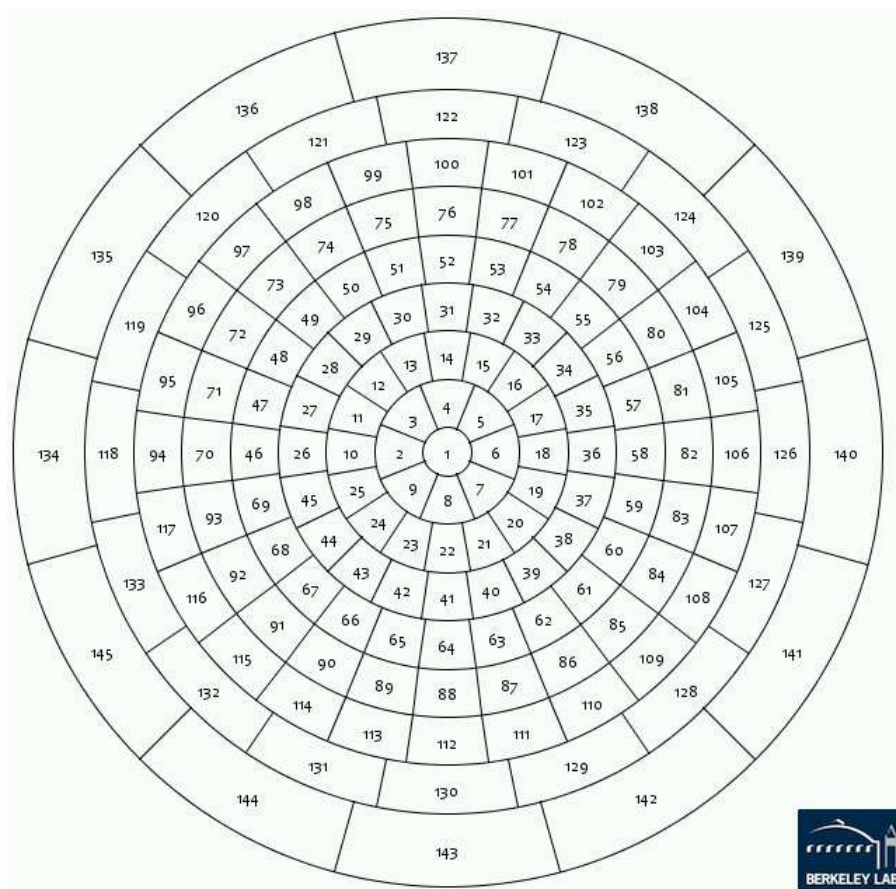


obr. 3-3: Rozdělení poloprostoru na tzv. Klemsovy segmenty [10].

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 (1.19). Pro každý ze 145 segmentů zdroje je tedy stanoveno 145 hodnot příslušné dvousměrové distribuční funkce [11]. 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 disertační práci a graficky jsou vyznačeny v obr. 3-4.

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].



obr. 3-4: Pořadová čísla segmentů při pohledu shora na Klemsův systém.

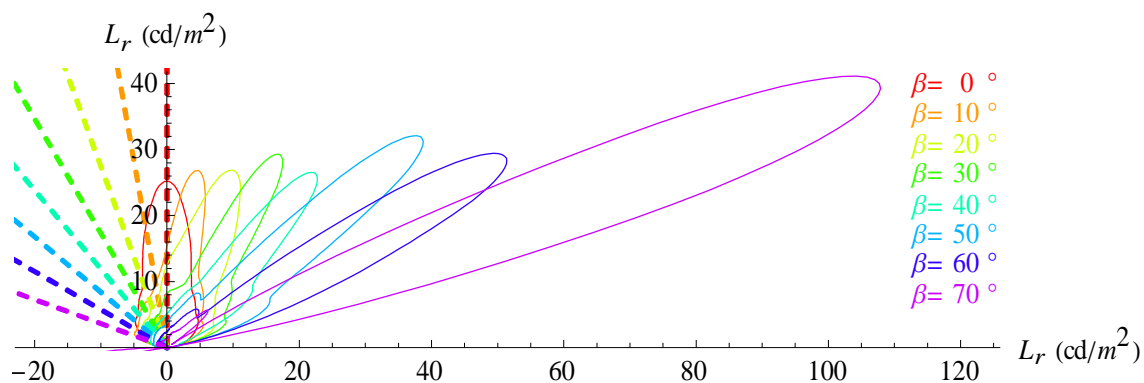
V závěru práce jsem porovnal několik různých metod výpočtu světelně technických veličin ve vybraném prostoru, kde dochází k mnohonásobným odrazům od světelně činných ploch, s využitím obou navržených metod záznamu odrazných vlastností materiálů (souborů Eulumdat a XML).

Výpočtem jednorázového odrazu světla od obecně odrážející stěny ve vybraném prostoru byla ověřena možnost využití navržené metodiky ekvivalentních svítidel 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 byla 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 (Radiance [12]). Výpočtem mnohonásobných odrazů mezi stěnami, stropem a podlahou vybraného prostoru byla ověřena možnost využití navržené metodiky záznamu dvousměrových odrazových distribučních funkcí

popisujících obecně odražející povrchy pro zpřesnění výsledků výpočtu světelně technických veličin v porovnání s běžně užívanými výpočetními programy pro světelně technické projektování.

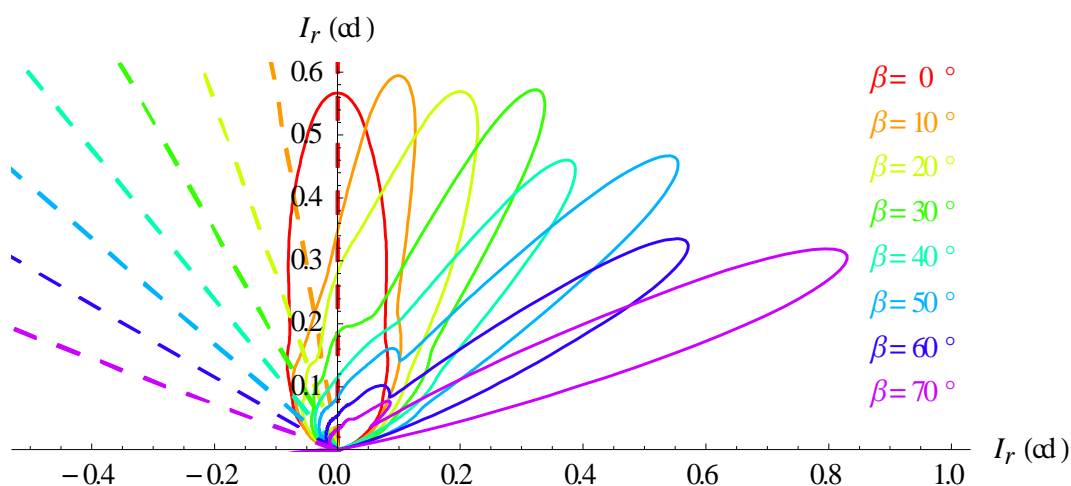
4. Výsledky

Na následujícím obrázku (obr. 4-1) jsou uvedeny křivky jasů měřeného vzorku materiálu v polárních souřadnicích odpovídající jednotlivým úhlům dopadu světla β pro úhly natočení $\alpha = 0^\circ$. Čárkovaně jsou znázorněny směry dopadu světla odpovídající příslušné křivce jasů.



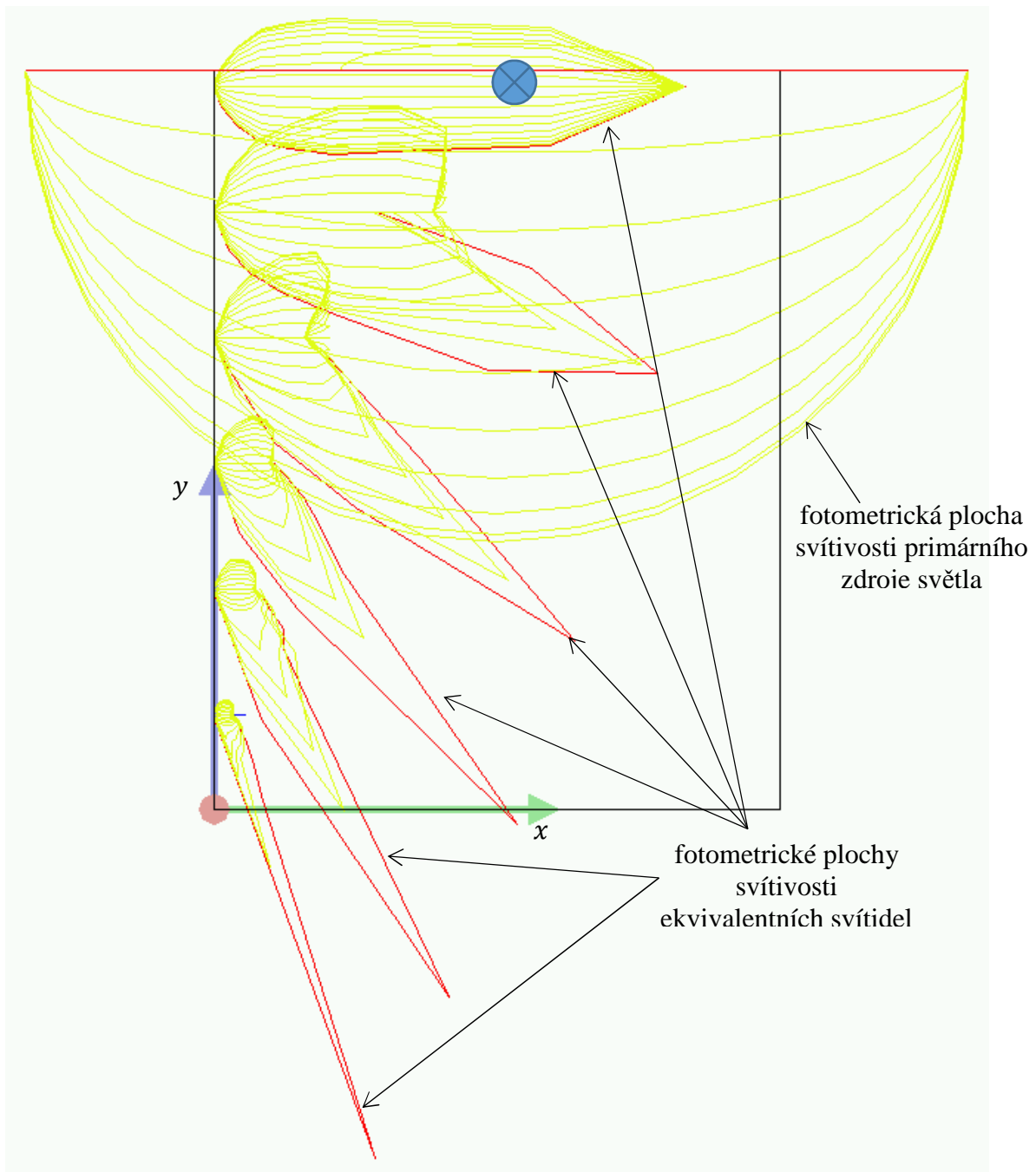
obr. 4-1: Aproximované křivky jasů v polárních souřadnicích odpovídající jednotlivým úhlům dopadu světla β pro úhly natočení $\alpha = 0^\circ$.

Vypočtené hodnoty svítivosti $I_{\alpha\gamma}$ jsou graficky znázorněny na následujícím obrázku (obr. 4-2) 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. 4-2: Aproximované křivky svítivosti v polárních souřadnicích odpovídající jednotlivým úhlům dopadu světla β pro úhly natočení $\alpha = 0^\circ$.

Následující obrázek (obr. 4-3) znázorňuje model odrazu světla ve vybraném prostoru vytvořený v programu Dialux s využitím 30 ekvivalentních svítidel (5 sloupců \times 6 řad) charakterizovaných soubory Eulumdat vytvořenými na základě vypočtených hodnot svítivosti (viz obr. 4-2). 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. 4-3: Proces odrazu světla na stěně 1 modelovaný souborem ekvivalentních svítidel.

Při výpočtu jednorázového odrazu světla s využitím navržené metody ekvivalentních svítidel nedosahuje osvětlenost stropu tak vysokých hodnot jako při výpočtu jednorázového odrazu světla náhradou světelně činné plochy ideálním rozptylovačem, kdy je difuzní složka odraženého světelného toku daleko větší (viz tab. 4-1).

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

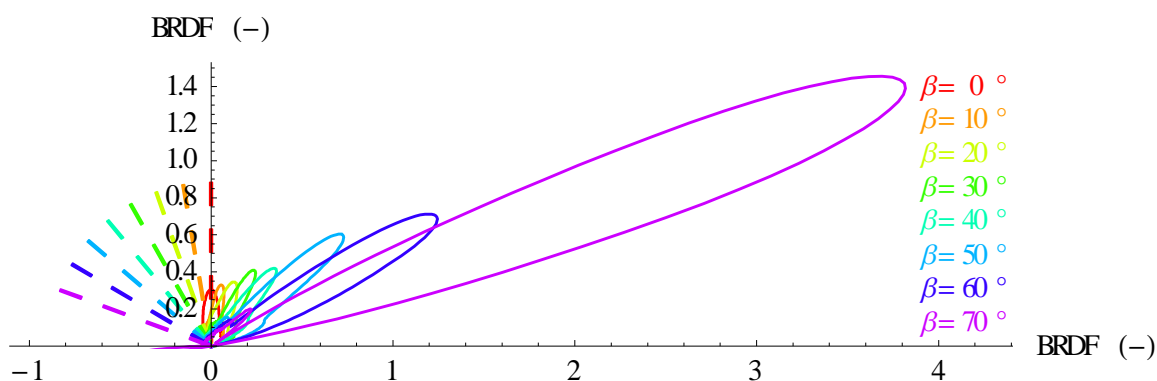
tab. 4-1: Souhrnné výsledky výpočtu rozložení osvětlenosti na stropě vybraného prostoru po jednorázovém odrazu světla vypočtené metodou radiozity a s využitím ekvivalentních svítidel.

Z výpočtů provedených s využitím navržené metody ekvivalentních svítidel je dále patrné mírné zvýšení osvětlenosti podlahy vybraného prostoru v blízkosti stěny tvořené lakovaným dřevem 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 podlaze vybraného prostoru oběma metodami v následující tabulce (tab. 4-2).

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

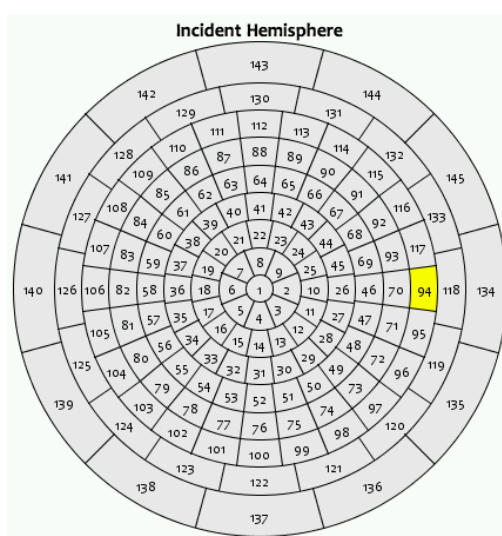
tab. 4-2: Souhrnné výsledky výpočtu rozložení osvětlenosti na podlaze vybraného prostoru po jednorázovém odrazu světla vypočtené metodou radiozity a s využitím ekvivalentních svítidel.

Vypočtené hodnoty dvousměrové odrazové distribuční funkce $f_{BRDF}(\alpha, \beta, \gamma)$ popisující měřený vzorek materiálu jsou graficky znázorněny na následujícím obrázku (obr. 4-4) křivkami odpovídajícími průběhu dvousměrové odrazové distribuční funkce $f_{BRDF}(0^\circ, \beta, \gamma)$ pro jednotlivé úhly dopadu světla β a úhly natočení $\alpha = 0^\circ$. Čárkovaně jsou znázorněny směry dopadu světla.

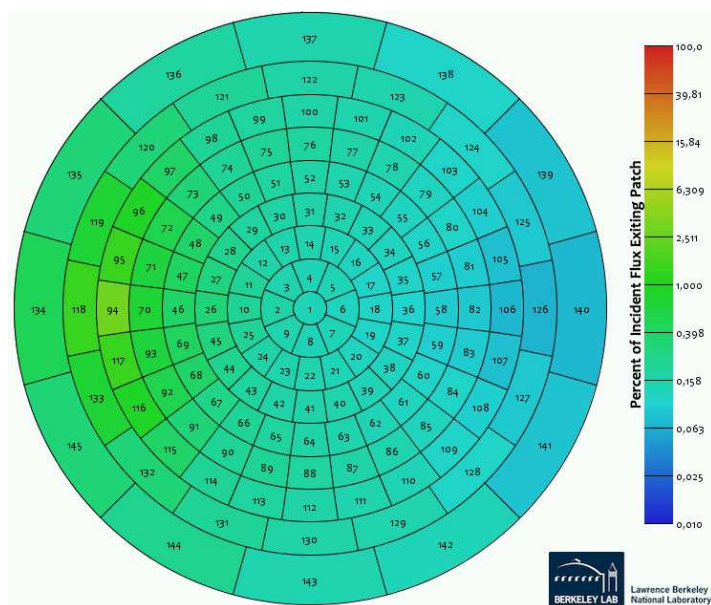


obr. 4-4: Funkční hodnoty dvousměrové odrazové distribuční funkce $f(0^\circ, \beta, \gamma)$ v polárních souřadnicích odpovídající jednotlivým úhlům dopadu světla β pro úhly natočení $\alpha = 0^\circ$.

Hodnoty dvousměrových distribučních funkcí zaznamenané navrženou metodikou ve formátu XML 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 BSDFViewer 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 vzorku bodovým zdrojem světla umístěným ve směru definovaném zvoleným segmentem ve zdrojovém poloprostoru. Ukázky hodnot dvousměrové odrazové distribuční funkce měřeného vzorku zaznamenané v systému Klemsových segmentů jsou zobrazeny na obr. 4-5 a obr. 4-6.



obr. 4-5: Segment zdroje č. 94 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. 94 ve škále poměrných hodnot (%).

Následující tabulka (tab. 4-3) 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 definovaným navrženou metodikou záznamu hodnot dvousměrové odrazové distribuční funkce do souboru ve formátu XML.

Plocha scény	Model odrazu na stěně 1	E_s (lx)	E_{min} (lx)	E_{max} (lx)	$\frac{E_{min}}{E_m}$ (-)
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. 4-3: 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. 4-3 potvrzují předpoklad, že v případě, kdy je stěna 1 popsána empirickým modelem odrazu světla (změřenými hodnotami dvousměrové odrazové distribuční funkce zaznamenanými do souboru XML) se středním činitelem odrazu 0,4 a s výraznou zrcadlovou složkou (viz obr. 4-3), 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.

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 odrážejícího 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 realizované navrženou metodou ve vybraném prostoru, ve kterém dochází k mnohonásobným odrazům světla od obecně odrážejících 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
- měřeními 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 indikatrix jasu a následným výpočtem indikatrix svítivosti a dvousměrové odrazové distribuční funkce (BRDF) jsem vytvořil model skutečného odrazu světla pro vybraný materiál,
- vypočtené hodnoty indikatrix svítivosti jsem zaznamenal do příložených souborů Eulumdat a vypočtené hodnoty dvousměrové odrazové distribuční funkce do matice hodnot ve formátu XML, 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 skutečnost, že nezbytnou podmínkou pro dosažení přesných výsledků světelně technických výpočtů je 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 přístroje, 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 přístroji 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 s přístrojem 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 v tezích použité literatury

- [1] J. Habel a kol., Světlo a osvětlování, Praha: FCC Public, 2013.
- [2] J. Žára, B. Beneš, J. Sochor a P. Felkel, Moderní počítačová grafika, Brno: Computer Press, 2004.
- [3] V. Appl, Globální osvětlovací metody v architektonické vizualizaci, Brno: Ústav techniky tvorby FA VUT, 2007.
- [4] L. Proňková, Monte Carlo radiační metody, Praha: Univerzita Karlova v Praze, Matematicko-fyzikální fakulta, 2003.
- [5] Z. Jelínek, Algoritmy pro výpočet globálního osvětlení, Brno: Masarykova univerzita, Fakulta informatiky, 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] J. Klems, „A New Method for Predicting the Solar Heat Gain of Complex Fenestration Systems,“ ASHRAE Winter Meeting, New Orleans, 1994.
- [8] Carli, Inc., „Calculation of optical properties for a venetian blind type of shading device,“ Millers Falls, 2006.
- [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] J. H. Klems a J. L. Warner, „Measurement of Bidirectional Optical Properties of Complex Shading Device,“ Lawrence Berkley Laboratory, University of California, Berkley, 1995.
- [12] G. W. Larson a R. Shakespeare, Rendering with radiance: the art and science of lighting visualization, San Francisco: Morgan Kaufmann, 1998.
- [13] J. Málek, Odrazné vlastnosti světelně činných materiálů, Praha: ČVUT v Praze, FEL, 2007.

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.

Summary

In this thesis I introduce the method of measurement of light reflection characteristics and the construction method of light reflection model. A light reflection is very important part of calculation of indoor illumination. Therefore it is important to design a method of measurement of luminous intensity indicatrix, which describes the interaction of light with a surface.

I also design a method of bidirectional reflection distribution function recording to describe and simplify measured data. Measured data were recorded in a format compatible with modern software for lighting design. In the last part of the thesis I compare two methods of multiple light reflections calculation. The results of these two methods of light calculations I compare with the results of illuminance measurements in the real room.

Resumé

Pro přesný popis procesu mnohonásobných odrazů probíhajících v daném prostoru je při výpočtech světelně technických veličin nutné co nejdokonaleji zadat odrazné vlastnosti světelně činných materiálů účastnících se tohoto procesu. Odrazné vlastnosti světelně činných materiálů ovlivňují celkový světelný tok dopadající na srovnávací rovinu. Ve své práci jsem se proto zaměřil na návrh metodiky měření a zejména záznamu odrazných charakteristik světelně činných materiálů tak, aby bylo možné je dále využít ve světelně technických výpočetních programech. Dále jsem se věnoval porovnání výsledků výpočtu mnohonásobných odrazů dosažených různými výpočetními metodami a programy, zejména porovnání metody radiozity a metody sledování paprsku.