



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra měření

Světlovody pro osvětlování vnitřních prostor

Light pipes for illumination of interiors

Studijní program: Inteligentní budovy

Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D.

Bc. Martin Novotný

Praha 2016

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

Martin Novotný



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Martin Novotný**

Studijní program: **Inteligentní budovy**

Název tématu česky: **Světlovody pro osvětlování vnitřních prostor**

Název tématu anglicky: **Light Pipes for Illumination of Interiors**

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s teoretickými principy světlovodného vedení a proveďte rešerši polymerních optických vedení použitých pro osvětlování vnitřních prostor budov. Navrhněte technické řešení pro koncentrátor a difuzor pro navázání a vyvážání světla pro polymerní vlnovodné vedení. Realizujte navržené struktury světlovodného vedení v místních podmínkách. Diskutujte možnost praktického využití optického vedení v inteligentních budovách.

Seznam odborné literatury:

- [1] Darula, S.: Osvětlování světlovody, Grada 2009.
- [2] Pich, J., Moheňníková, J., Suchánek, P.: Osvětlení neosvětlitelných prostor, ERA, Brno 2004.
- [3] Zajíček, J.: Měření účinnosti dutého světlovodu, Bakalářská práce VUT Brno 2010.
- [4] Gonzales, P.V., Guerrero, G.S. at al.: Design and Optimization of Fiber Lenses in Plastic Optical Fibers for Indoor Illumination, SPIE Optical Engineering Applications, vol. 8834, 2013, 88340P-88340P-8.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D. (K13134)

Datum zadání diplomové práce: 16. září 2015

Platnost zadání do¹: 3. února 2017



Doc. Ing. Jan Holub, Ph.D.
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 16. 9. 2015

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

Poděkování

Rád bych poděkoval především vedoucímu mé diplomové práce, panu doc. Ing. Václavu Prajzlerovi, Ph.D. za cenné rady při řešení této práce a svůj čas, který mi věnoval při konzultacích. Dále pak panu Ing. Adamovi Bouřovi, Ph.D. z Katedry mikroelektroniky za konstrukci systému sledování slunce a pomoc při výrobě přípravků pro uchycení vstupních koncentrátorů, panu Miroslavu Horníkovi technikovi z Katedry mikroelektroniky za výrobu veškerých mechanických částí systému. Ing. Marku Bálskému, Ph.D. za rady ohledně osvětlení a poskytnuté materiály při výpočtu účinnosti systému. Dále panu Ing. Janu Volhejnovi z firmy Allux za poskytnutí prizmatického difuzoru a panu Ing. Petru Niesigovi z firmy Elkovo Čepelík za mikroprizmatický difuzor. A také firmě Madico za poskytnutí optických filtrů.

Název práce: Světlovody pro osvětlování vnitřních prostor

Autor: Bc. Martin Novotný

Katedra (ústav): Katedra měření

Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D.

e-mail vedoucího: xprajzler@fel.cvut.cz

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá návrhem, realizací a ověřením vlastností systému pro osvětlení vnitřních prostor pomocí slunečního světla zavedeného pomocí optických vláken. V úvodu práce je uvedeno seznámení s problematikou a popsání základního rozdělení systému světlovodných vedení. Jsou zde uvedeny již existující projekty pro osvětlení denním světlem. Hlavní část práce je zaměřena na návrh vlastního systému osvětlení, jeho analýza v programu OptiCAD pomocí paprskové metody. Výpočet účinnosti systému a následně výroba navrženého systému skládající se z více kroků. Vstupní část systému byla realizována z Fresnelových čoček o průměru 50 mm a 80 mm sloužící ke koncentraci optického záření. Pro přenos světla byly použity dva druhy optických vlnodů v podobě plastových optických vláken (POF) o průměru jádra vlákna 980 μm a 3 mm. Pro rozptyl světla do objektu byly použité dva druhy difuzoru (prizmatický z akrylového skla a mikroprizmatický z PMMA). A v závěru jsou uvedené měřicí metody použité pro analýzu vyrobeného systému denního osvětlení a na závěr jsou shrnuty dosažené výsledky.

Klíčová slova: systém denního osvětlení, Fresnelova čočka, optické vlákno, difuzor, optický filtr

Title: Light pipes for illumination of interiors

Author: Bc. Martin Novotný

Department: Department of Measurement

Supervisor: doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D.

Supervisor's e-mail address: xprajzler@fel.cvut.cz

Abstract:

The thesis deals with the design, implementation and verification of system properties for lightening of the interior space, using the sun light implemented by the optic fibers. The introduction deals with the explanation of the problem and with the description of the basic division of the light-pipe lines. The already existing projects for the lightening with the daylight are also introduced. The main part of the thesis is focused on the design of own lightening system, its' analyzes in the OptiCAD program, using the Ray tracing. The calculation of the efficacy of the system and subsequently the production of the designed system is consisting out of more steps. The entrance step of the system was implemented out of the Fresnel lens with the diameter of 50 and 80 mm, working for the concentration of the optical lightening. For the light transfer the two types of the optical waveguide in the form of plastic optical fibers (POF) with the core diameter of 980 μ m and 3 mm. Two diffusers have been used for the dispersion of the light into the building (the prismatic one out of the acryl glass and microprismic out of PMMA). The measuring methods used for the analyzes of the produced system and the results are introduced in the end of my thesis.

Keywords: daylighting system, Fresnel lens, optical fiber, diffuser, optical filter

Obsah

1. Úvod	6
1.1. Denní světlo.....	6
1.2. Fotometrické veličiny.....	8
1.3. Osvětlování vnitřních prostor.....	9
2. Systémy denního osvětlení budov.....	12
2.1. Světlovody.....	12
2.2. Aktivní osvětlovací systémy	14
2.3. Sledování polohy slunce.....	16
3. Příklady použití systémů denního osvětlení.....	18
3.1. Tubusové světlovody	18
3.2. PET lahve jako světlovodné vedení	20
3.3. Systém Himawari.....	21
3.4. Systém Parans	23
3.5. Systém Sollektor	25
3.6. Systém HSL.....	27
3.7. Systém z National Taiwan Univesity of Science and Technology, Taiwan	29
4. Postup při návrhu světlovodného vedení	31
4.1. Návrh světlovodného vedení s využitím čoček	31
4.2. Výpočet účinnosti systému denního osvětlení.....	34
4.3. Paprsková metoda (Ray tracing) - OptiCAD	37
4.4. Simulace v programu Opticad	38
5. Výroba světlovodného systému denního osvětlení	44
5.1. Sledování polohy slunce.....	46
6. Měření vlastností vyrobeného systému denního osvětlení.....	48
6.1. Měření transmisních spekter	48
6.2. Měření optických vlastností	50
6.3. Měření osvětlení.....	53
7. Závěr.....	57
Literatura	59
Seznam příloh.....	62

1. Úvod

Použití elektrického osvětlení pro potřeby v našich domácnostech a na pracovištích má významný podíl na celkové spotřebě energie v naší společnosti. Ve stejné době kdy máme zapnutá světla umělého osvětlení, dopadá během dne velké množství přirozeného světla ze slunce na střechu a stěny objektu kde se nacházíme, které zůstává nevyužito. Existují samozřejmě stavební prvky, kterými pouštíme světlo od slunce do objektů v podobě oken, transparentních stěn nebo částí střech. Ne vždy však je možné osvětlit i hůře dostupná místa v budově denním světlem. S tímto problémem mohou dobře posloužit takzvané světlovodné vedení, které jsou v dnešní době již čím dál více dostupnější.

Světlovodná vedení se využívají pro přenos denního světla do interiéru budov pomocí takzvaných světlovodů. Tento způsob osvětlení je více než 100 let starý, ale u předchozích návrhů se jednalo o světlovod s externím zdrojem světla, kterým byla oblouková lampa. Tento nápad však skončil velmi záhy a zůstalo tak u pouhých návrhů prototypů bez dalších větších úspěchů. První světlovod s využitím denního světla ze slunce se objevil během první poloviny 80. let 20. století [1].

Tato práce se zabývá využitím optických vláken jako světlovodných vedení. U existujících variant tohoto typu osvětlení jsou sluneční paprsky koncentrovány a usměrněny pomocí soustavy čoček v kombinaci se systémem sledování polohy slunce umístěného na střeše budovy, případně na fasádě budovy a poté přivedeny do budovy pomocí optického vlákna. Přivedené denní světlo má výhodu nejen v úspoře nákladů na energii, ale především z pohledu tvorby vhodného vnitřního prostředí v budovách a dosažení zrakové pohody.

Cílem práce je návrh, realizace a měření vlastností soustavy světlovodného vedení pro osvětlení vnitřních prostor. V první části je nutné navrhnout vstupní vazbu pro navázání světelných paprsků do světlovodného vedení. Jako světlovodné vedení je použito běžně dostupné optické vlákno z polymethylmethakrylátu (PMMA) o průměru jádra 980 μm . Dále je nutné navrhnout výstupní vazbu z optického vlákna, která slouží pro vyvázání světla z vlákna a jeho rovnoměrného rozprostření do prostoru. Po provedení těchto bodů nastane realizace navržené soustavy ze zvolených komponentů a následně změření vlastností světlovodné soustavy.

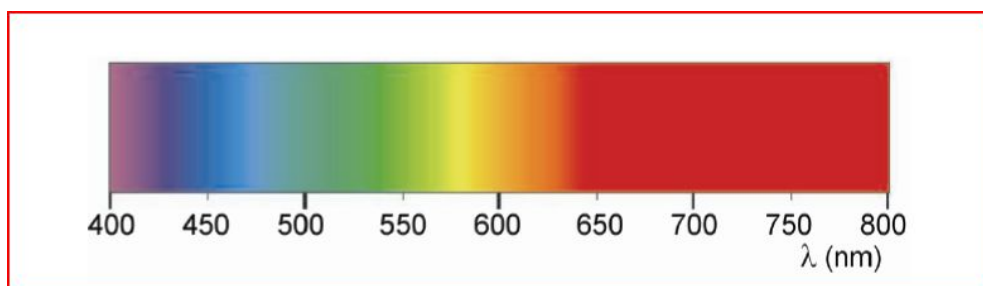
1.1. Denní světlo

Denní světlo je nezbytnou součástí lidského života a jeho účinky mají pozitivní vliv na lidský organismus. Odborné studie dokazují, že v prostorách s monotónní činností má dynamika denního světla silně motivující vliv na chování lidí [2].

Slunce je hlavním zdrojem denního záření, které je jednou z přirozených forem energie, které můžeme využívat. Světlo je součástí viditelné části spektra denního záření a je produktem slunečního elektromagnetického záření. Denní světlo je nejen vhodným energetickým zdrojem pro osvětlování prostorů, ale také nutným předpokladem k vytvoření zdravého prostředí pro život

živých organismů v interiérech. Vytvoření podmínek pro dosažení vhodných parametrů denního osvětlení je složitým úkolem, a to zejména proto, že se zde setkávají mnohdy protichůdné požadavky pracovníků různých profesí. Složitost je dána i tím, že denní světlo nejen umožňuje vidění osob v interiéru, ale současně spolu tvoří zdravé životní prostředí stimulací biorytmů organismů [3].

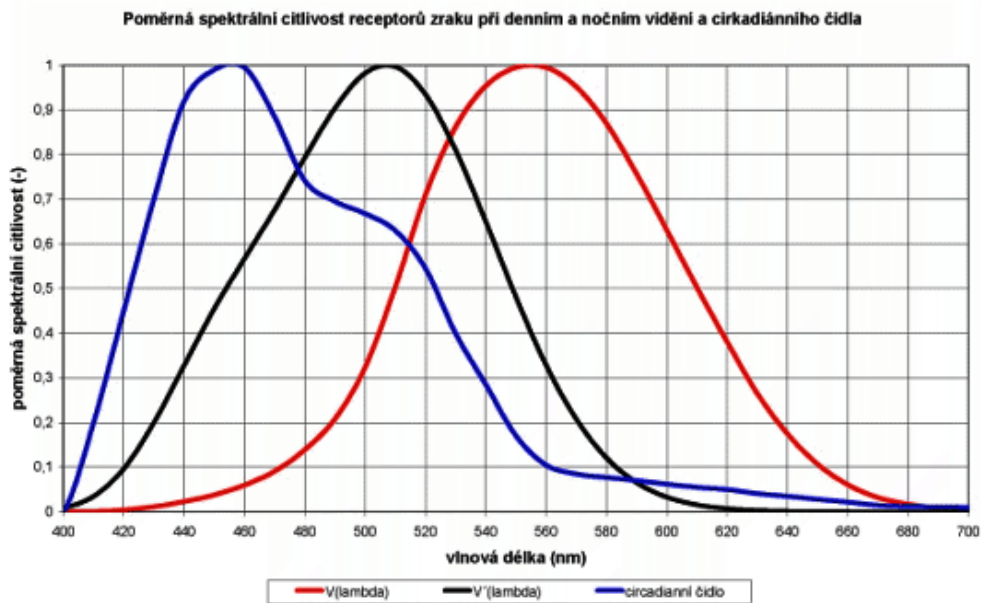
Sluneční záření obsahuje nejen viditelné světlo, ale i UV (ultrafialové) a IČ (infračervené) světlo a to v rozsahu vlnových délek od 100 do 10^6 nm. Viditelné světlo je v rozsahu 380 - 780 nm, avšak krajní vlnové délky nelze přesně definovat, protože se mohou měnit v závislosti na konkrétním pozorovateli. Spektrum denního světla je zobrazeno na obr. 1.1 jedná se o spojité spektrum s rovnoměrným rozložením barev.



Obr. 1.1.: Spektrum denního světla ve viditelné oblasti záření [3].

Lidské oko není stejně citlivé na záření různých vlnových délek. Průběh této závislosti i hranice viditelnosti jsou u různých osob odlišné. Nejvyšší citlivost oka při fotopickém denním vidění je určena citlivostí čípků a nejčastěji se při fotopickém vidění pohybuje okolo 555 nm. Citlivost se obvykle udává v poměrných hodnotách vztažených na maximální absolutní hodnotě citlivosti. Pro zajištění jednotnosti světelnotechnických výpočtů s ohledem na různou spektrální citlivost jednotlivých pozorovatelů přijala Mezinárodní komise pro osvětlování (CIE - International Commission on Illumination) dohodu o hodnotách poměrné spektrální citlivosti tzv. normálního pozorovatele. Průběh poměrné spektrální citlivosti oka normálního fotopického pozorovatele znázorňuje na obr. 1.2 červená křivka $V(\lambda)$ při vysokém adaptačním jasu (dle CIE 100 cd.m^{-2}) a černá křivka $V'(\lambda)$ pro noční skotopické vidění při velmi nízkém adaptačním jasu (CIE $10^{-5} \text{ cd.m}^{-2}$). Z průběhu křivek také plyne, že dochází k posunu maxima citlivosti oka při přechodu denního světla k soumraku ke kratším vlnovým délkám [3].

Modrá křivka je spektrální citlivosti třetího druhu receptorů, tj. čidel cirkadiálního systému C buněk, tyto receptory neslouží k vidění, ale k řízení biorytmů v těle, vykazuje maximum v oblasti vlnových délek 459 až 464 nm. V porovnání s křivkami spektrální citlivosti denního a nočního vidění, je citlivost receptorů C více soustředěna do oblasti ještě kratších vlnových délek [3].



Obr. 1.2.: Spektrální citlivost lidského oka [3].

1.2. Fotometrické veličiny

Vzhledem ke spektrální citlivosti lidského oka není vhodné použití k popisu účinků vjemu radiometrické (energetické) veličiny, jako je zářivý tok [W] nebo intenzita záření [W.m⁻²], ale veličiny fotometrické, které respektují vlnovou povahu světla a zohledňují vlastnosti lidského zrakového vnímání. Základní fotometrickou veličinou ve světelné technice je svítivost, odvozené veličiny jsou světelný tok, jas, intenzita osvětlení [2].

Světelný tok Φ [lm] kolik světla vyzáří do prostoru. Světelný výkon posuzovaný z hlediska lidského oka.

$$\Phi = K_m \cdot \int_{380}^{780} V(\lambda) \cdot \Phi_e \cdot d\lambda \quad (1.1)$$

Kde $K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ maximální hodnota spektrální světelné účinnosti o vlnové délce $\lambda_m = 555 \text{ nm}$ (hodnota stanovená pro fotometrického pozorovatele při fotopickém vidění), $V(\lambda)$ poměrná spektrální účinnost záření o vlnové délce λ , Φ_e zářivý tok zdroje [W] [2].

Svítivost I [cd] je základní fotometrickou jednotkou soustavy SI. Tato veličina udává, kolik světelného toku Φ vyzáří světelný zdroj do prostorového úhlu ω v určitém směru. Je definována vztahem [2]:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad (1.2)$$

kde I je svítivost [cd = lm·sr⁻¹], Φ je světelný tok [lm].

$\omega = A / r^2$ je prostorový úhel v [sr], který je definován jako úhel při vrcholu světelného kuželu, vymežující plochu $A = 1 \text{ m}^2$ z plochy koule o poloměru $r = 1 \text{ m}$ [2].

Intenzita osvětlení (osvětlenost) E [$\text{lx} = \text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$] určuje, jak je určitá plocha osvětlována, tzn. jak velký světelný tok Φ [lm] dopadá na osvětlovanou plochu A [m^2]. Osvětlenost na zvolené srovnávací rovině podle vztahu (1.3) se měří luxmetrem:

$$E = \frac{\Phi}{dA} = \frac{I}{r^2} \cos \theta \quad (1.3)$$

E je osvětlenost [lx], I je svítivost bodového zdroje [cd], r je vzdálenost [m], θ je úhel mezi normálou plochu řezu a směrem paprsku [$^\circ$].

Jas L [$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$] je měřítkem pro vjem světlosti svítícího nebo osvětlovaného tělesa, jak jej vnímá lidské oko a měří se jasoměrem. Základní vztah pro stanovení jasu je definován svítivostí (1.4), je však možné jej definovat i ze světelného toku a osvětlenosti:

$$L = \frac{dI}{dA \cdot \cos \theta} \quad (1.4)$$

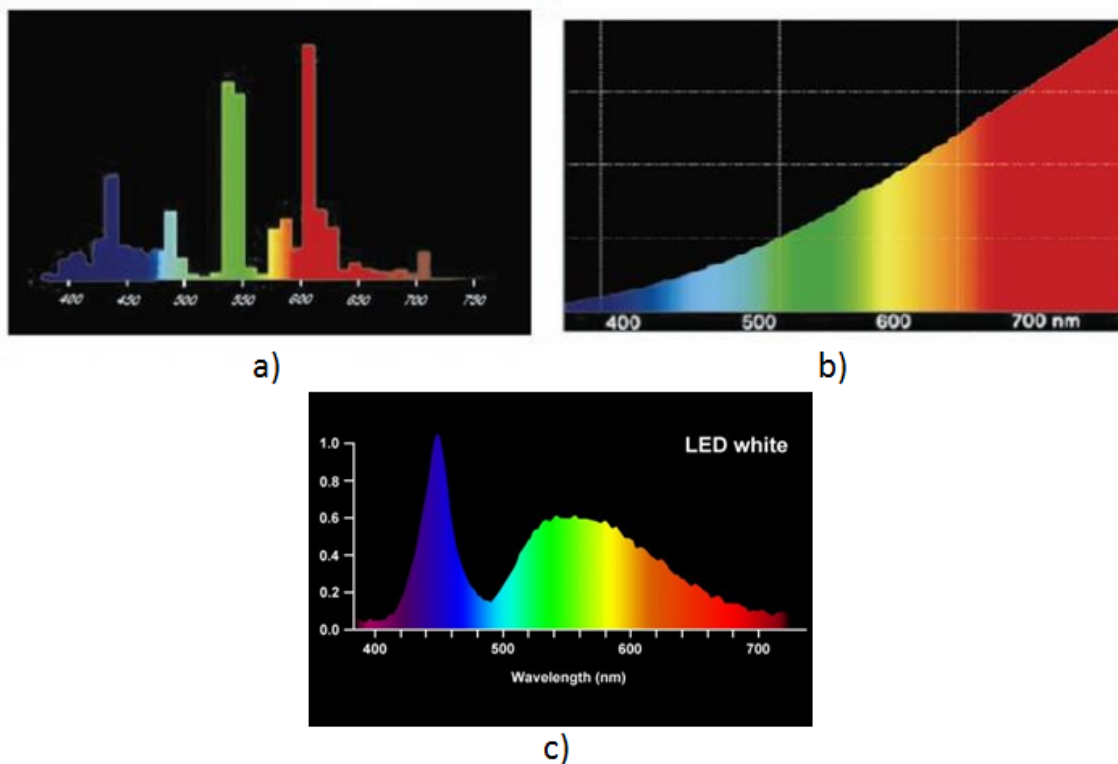
kde L je jas [$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$], dA je plocha řezu svazkem, který obsahuje daný bod. Plocha $dA' = dA \cdot \cos \theta$ představuje kolmý průmět elementu plochy ve směru k pozorovateli, θ je úhel normálou plochy řezu a směrem paprsku [2].

1.3. Osvětlování vnitřních prostor

Veškeré vykonávání lidských zrakových úkonů, aby byly dostatečné účinné a přesné, tak jim musí být poskytnuto dostatečné osvětlení. Základní dělení osvětlení je na denní osvětlení, umělé osvětlení nebo jejich kombinace. Úroveň viditelnosti a pohody požadovaná pro širokou řadu pracovních prostorů závisí na druhu a trvání činnosti. Požadavky na osvětlení vnitřních prostorů v určité etapě vývoje společnosti jsou kompromisem vycházejícím z obecných zákonitostí zrakového vnímání, rozsáhlých aplikačních experimentů a statistických šetření v reálných interiérech na jedné straně a z technických a ekonomických možností společnosti na straně druhé. Při odvozování světelně-technických parametrů osvětlovacích soustav se vychází ze dvou souhrnných kritérií charakterizujících úroveň vidění. Jedním z parametrů je zrakový výkon a druhým zraková pohoda. Zrakový výkon je určen spíše fyziologickými vlastnostmi lidského zraku a pro danou zrakovou činnost je poměrně objektivním měřítkem úrovně osvětlení, zpravidla vyhovujícím pro prostory určené pro jasně definovanou činnost, tedy pracovní prostory. Zraková pohoda zahrnuje i psychické činitele. Z tohoto hlediska je více ovlivněna subjektivními vlastnostmi uživatelů, a proto je upřednostňována v prostorách společenských, kulturních a oddechových (například v restauracích, kulturních domech, bytech apod.). Cílem osvětlení je vytváření zrakové pohody, což je příjemný a příznivý psychofyziologický stav organismu, vyvolaný optickou situací vnějšího prostředí, který odpovídá potřebám člověka při práci a při odpočinku, a umožňuje zraku optimálně plnit jeho funkci. Správné osvětlení, navržené podle zásad současné světelné techniky a respektující psychologické, fyziologické a biologické požadavky, ovlivňuje kvalitu práce, únavu a zdravotní stav lidského organismu [3].

Na obr. 1.3 a) je uvedeno spektrum zářivky, jedná se o nespojitě spektrum obsahující jednotlivé barvy spektra bodově. Životnost zářivek je silně ovlivněna počtem zapnutí. Oproti tomu na obr. 1.3 b) je spektrum žárovky spojitě, a tudíž vhodnější pro lidské oko. Velkou nevýhodou však

jsou velké tepelné ztráty při vzniku světla rozpálením wolframového vlákna v žárovce a výrazně nižší životnost. Na obr. 1.3 c) je zobrazeno spektrum bílé LED (Light-Emitting Diode) diody, jedná se o moderní způsob osvětlení, který je však ještě v oblasti vývoje, ale má velký potenciál rozvoje do budoucna. Typickým představitelem je bílá LED založena na modrém čipu a fosforovém konvertoru. Záření ve viditelné oblasti, které je vyzařováno z polovodiče, je modré barvy. Vyzařované spektrum se skládá z luminiscence modrého světla a fosforescence světla žlutého. Nastavováním vzájemného poměru luminiscence a fosforescence lze optimalizovat měrný výkon i index podání barev. Největším problémem LED je v současnosti odvod tepla z PN přechodu. Z tohoto důvodu se pohybují jednotlivé zdroje v oblasti příkonu jednotek wattů. Dalším problémem spojeným s odvodem tepla z PN přechodu je snižování světelného toku a životnosti se zvyšující se teplotou přechodu. Výhodou oproti klasickým světelným zdrojům je rychlejší náběh světelného toku, mechanická odolnost a nezávislost životnosti na spínání a stmívání [3].



Obr. 1.3.: Vlnové spektrum: a) žárovky [3], b) žárovky [3], c) Bílé LED diody [4].

Intenzitu osvětlení navrhujeme na požadovaný zrakový výkon. Požadované intenzity osvětlení přiřazené k pracovním činnostem jsou uvedeny v tab. 1.1.

Tab. 1.1: Doporučené rozsahy osvětlenosti podle CIE [3].

Osvětlenost [lx]	Prostor, místo, druh činnosti
20-30-50	základní jednoduchá zraková orientace v prostředí
50-75-100	jednoduchá orientace, kratší doba jednoduché činnosti
100-150-200	prostory, které nejsou dlouhodobě užívány pro pracovní účely, obytné a společenské
200-300-500	zraková místa pro jednodušší, běžné pracovní úkoly (kanceláře, školy)
500-750-1000	zraková místa pro vizuálně náročnější déle trvající pracovní úkony
1000-1500-2000	zvláště náročné zrakové úkoly
více než 2000	velmi náročné zrakové úkoly

Z tabulky plyne, že čím je obtížnější zrakový výkon, tím je vyšší intenzita osvětlení na základě toho, že lidské oko musí rozlišovat menší detaily. Potřebná intenzita se zvyšuje s délkou zrakové činnosti, s rychlostí změn pozorovaného detailu a s menšími kontrasty pozorovaných ploch. Hodnoty osvětlenosti pro stejný zrakový výkon se rovněž zvyšuje s věkem člověka. Konkrétní hodnoty osvětlení jsou pro různé druhy činnosti uvedeny v normě ČSN EN 12464-1, která byla převzata z evropské normy pro osvětlování [3].

2. Systémy denního osvětlení budov

Sluneční záření má využití pro budovy již od starověku, avšak v posledních desetiletích se těší nebývalému zájmu. Od doby kdy dochází k vyšším požadavkům na úsporu energie a k propagaci alternativních energetických zdrojů, mezi kterými je sluneční záření jedním z hlavních představitelů.

Solární architektura používá důmyslné systémy využití sluneční energie, především často v souvislosti s tepelnými zisky budovy. Ovšem nejen z důvodů energetických je sluneční záření potřebné a důležité. Sluneční světlo je nenahraditelné pro veškerý pozemský život. Zajištění denního osvětlení a proslunění budov je jedním z hlavních požadavků na tvorbu vhodného vnitřního prostředí a je nadřazeno i požadavkům energetických úspor [5].

Základní rozdělení systémů pro osvětlení denním světlem je na pasivní a aktivní. Pasivní umožňují přístup slunečního záření do budov bez technických zařízení. Denní světlo je zajišťováno pouze pomocí vhodného stavebního a dispozičního řešení a volbou povrchových úprav v interiéru. Klasickým osvětlovacím prvkem jsou okna a transparentní stěny nebo části střech (střešní okna, světlíky nebo vikýře). V různých již existujících budovách nebo nových návrhů budov, nelze uvedené systémy použít ať už z důvodu stavby v uzavřených dvorech nebo poblíž velkých stínících překážek. Prosvětlení se v takových případech často řeší, klasickým návrhem osvětlovacích prvků využívající elektřinu, což však zvyšuje náklady na provoz budovy. Možnou variantou řešení je použití světlovodných potrubí nebo šachet nazývané světlovody, které sníží náklady na provoz budovy, jelikož není potřeba elektrické energie na jejich provoz [2, 5].

Aktivní osvětlovací systémy využívají technické zařízení za účelem maximálního světelného zisku pro budovy. Jedná se o promyšlenou variantu koncentrace slunečního záření a jeho následný přenos na místo určení osvětlení. Aktivní systémy mohou také obsahovat filtr UV nebo IR slunečního záření a přenášet do místnosti pouze viditelnou složku denního světla [2, 5].

2.1. Světlovody

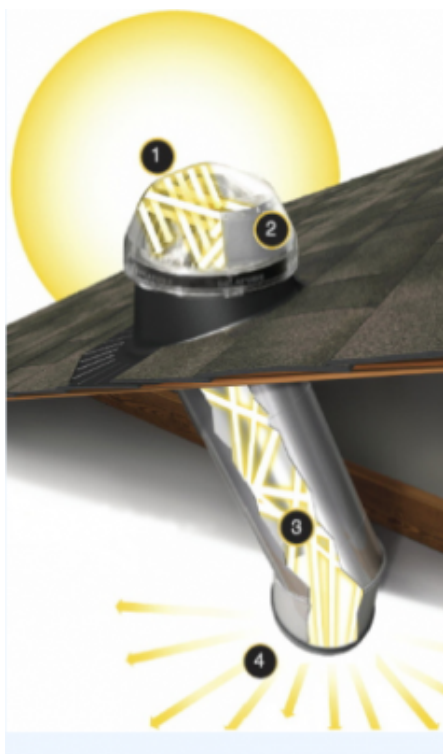
Světlovody jsou speciální trubicové systémy, které opticky spojují venkovní prostředí s interiérem. Tento způsob umožňuje vést denní světlo i do míst, kde by to jinak nebylo možné. Výhody využití světlovodů v budovách [5]:

- hygienické – osvětlení interiéru denním světlem;
- energetické – menší spotřeba elektrické energie;
- ekonomické – finanční úspora za nespotřebovanou energii.

Světlovodná vedení pracují na principu vedení denního světla do osvětlovaného prostoru s co nejmenšími ztrátami. Platí zde fyzikální a optické zákony. Jedná se především o zákony odrazu, dopadu a lomu světla.

Příkladem světlovodného vedení používaného v pasivních osvětlovacích systémech jsou takzvané vlnovodné trubky neboli tubusové světlovody. Ty obsahují pevné nepohyblivé části v podobě vstupní kopule z vysoce transparentního materiálu, pro přenos světla do objektu se používá válcový tubus a na výstupu systému je difuzor.

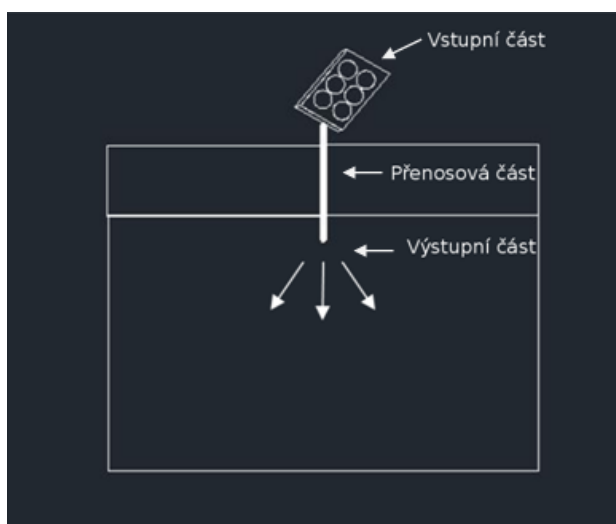
Na obr. 2.1 je zobrazen princip vedení světla ve světlovodném vedení. Přicházející světlo od Slunce (1) je zachyceno pomocí koncentrátoru (2), který lze realizovat z různých materiálů s rozličnými tvary. Podstatné však je, aby měla co největší světelnou propustnost. Nejčastěji používaná varianta je umístění kopule přímo na střeše a přicházející paprsky dopadají shora. Existují i varianty umístění kopule z boku domu na zdi, kde se však ukazuje, že dopadající světlo nemá potřebnou intenzitu. Dále pak jsou světelné paprsky přivedeny do tubusové části světlovodu (3), jeho vnitřní vrstva je pokryta materiálem s vysokou odrazivostí, aby byly minimalizovány ztráty ve vedení. Tubus může být až 50 m dlouhý a pomocí nastavitelných kolen lze měnit sklon světlovodného vedení až do úhlu 45°. V tubusu pak dochází k vícenásobným odrazům a světlo je přivedeno na výstup světlovodného vedení (4). Výstup světlovodného vedení je označován jako difuzor a slouží k rovnoměrnému rozptýlení světla. Výsledné světlo je příjemné, neoslňuje a nezkrasuje barvy. Jeho intenzitu lze regulovat pomocí ručního nebo elektrického stmívače. Světlovod tak dokáže nahradit výkon elektrického osvětlení v domech od 0,1 kW po 5 kW. Při použití kvalitních materiálů se uvádí životnost světlovodu až 25 let [6].



Obr. 2.1.: Ukázka světlovodu se vstupním koncentrátorem [6].

2.2. Aktivní osvětlovací systémy

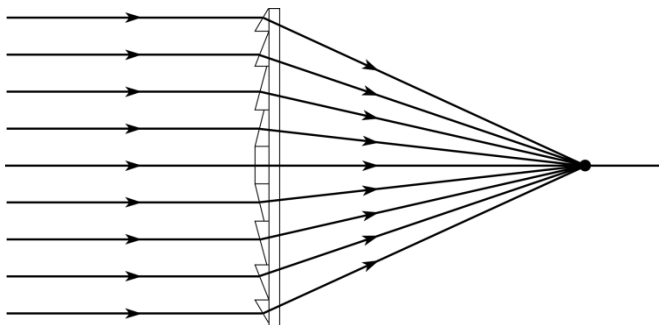
Ve své práci se zaměřím na aktivní osvětlovací systémy, které využívají ke koncentraci slunečního záření optických zrcadel nebo optických čoček s použitím systému pro sledování polohy slunce. Světlo je pak do budovy dopravováno pomocí optických kabelů a vláken. Ukázka systému na obrázku 2.2, kde vstupní část tvoří soustava čoček umístěná na střeše objektu, přenosovou část tvoří optický vlnovod, který přivede světlo do objektu a na výstupu systému je difuzor sloužící k rovnoměrnému rozptylu světla do osvětlovaného prostoru.



Obr. 2.2: Aktivní osvětlovací systém s použitím čoček.

Vstupní část systému

Sluneční kolektory jsou většinou velká parabolická zrcadla nebo optické čočky. Oba způsoby pracují podobným způsobem u zrcadel odražením a u čoček koncentrací slunečního záření do jejich ohniska, kde je umístěn přenosový prvek systému. Pro dosažení co nejvyšší účinnosti se využívá ovládacího systému jedno nebo dvouosého sledování polohy slunce. U optických čoček se nejčastěji používají Fresnelovy čočky (obr. 2.3), kde jsou jednotlivé přímkové oblasti, tzv. Fresnelovy zóny, původně jinak tlusté čočky stupňovitě posunuty, což způsobí koncentraci slunečních paprsků do ohniska, které je posunuto blíže ke skleněné ploše. Díky jejich malé tloušťce nevznikají skoro žádné ztráty absorpcí. Z tohoto důvodu jsou vhodné pro aplikace v oblasti osvětlení [5, 7].



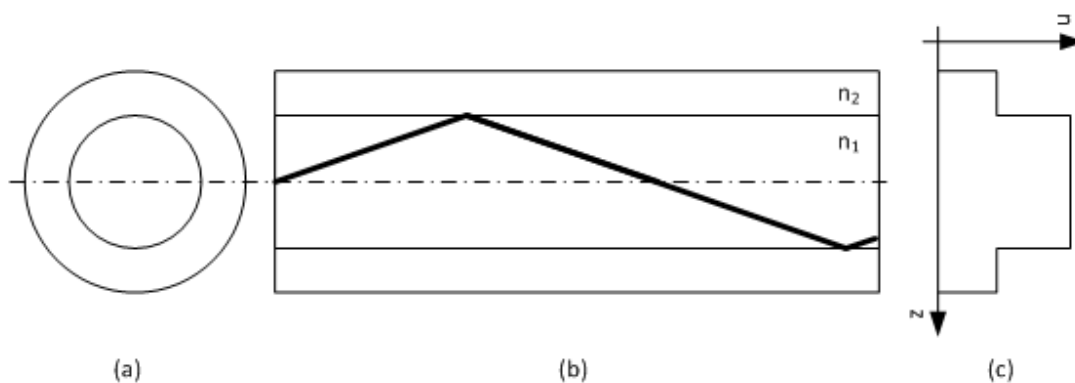
Obr. 2.3: Ukázka paprsků procházející Fresnelovou čočkou [5].

Přenosová část

Tato část systému slouží pro přenos slunečního záření mezi vstupní a výstupní částí celé soustavy. Jako přenosové medium bude sloužit v tomto případě optické vlákno.

Optické vlákno patří mezi optické vlnovody, jejich hlavní vlastností je schopnost podélně vést optické záření. Pro správnou funkci optického vlákna jako vlnovod, je nezbytně nutné použít pro výrobu opticky transparentní materiál s vysokou čistotou. A dále pak je třeba zajistit, aby se optické záření šířilo pouze v podélném směru a nepronikalo z vlnovodu bočními stěnami. Je tedy nezbytně nutné, aby byly zachovány základní zákony optiky [8].

Optický vláknový vlnovod se skládá z jádra a pláště (obr. 2.4a). Volba materiálu závisí na velikosti hodnoty indexu lomu, který musí být u jádra větší než u pláště. Toto uspořádání pak způsobuje šíření světla jádrem optického vlákna pomocí totálních odrazů (obr. 2.4b). Průběh indexu lomu v příčném řezu je znázorněn na obr. 2.4c [9, 10].



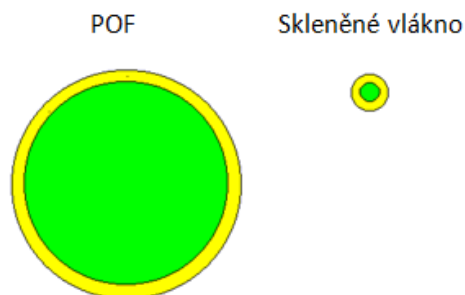
Obr. 2.4.: Optický vláknový vlnovod [9].

Index lomu světla n je bezrozměrná veličina a závisí na poměru rychlosti světla ve vakuu c ($3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) a rychlosti světla v daném prostředí.

$$n = c/v \quad (2.1)$$

Základní rozdělení vláken podle použitých materiálů na výrobu. Skleněná vlákna vyráběna na základě křemičitých sloučenin (SiO_2), jsou vhodná pro přenos informace na delší vzdálenost v optických komunikacích, vzhledem k nízkým hodnotám měrného optického útlumu.

Ve své práci se pak zaměřím na druhého zástupce svými parametry mnohem vhodnější pro přenos denního osvětlení plastové optické vlákno POF (Plastic Optical Fiber). Jedná se o mnohavidové vlákno používané v optické komunikaci pro přenos informace na kratší vzdálenost. Jádro POF vláken je vyrobeno s polymeru Polymetylmetakrylátu (PMMA) a plášť je tvořen ze silikonové pryskyřice. Index lomu jádra je přibližně 1,49 – 1,55 (PMMA) a pláště 1,41 – 1,46. Tyto vlákna navíc mají vysokou hodnotu numerické apertury (NA), takže se do nich lépe navazuje optické záření. Na obrázku 2.5 je porovnán celkový průměr jednovidového skleněného vlákna o rozměrech 9/125 μm (jádro/plášť) a průměr plastového vlákna nejčastěji vyráběn o 980/1000 μm . Pro dosažení požadovaného osvětlení použijí pro přenos světla svazek většího počtu vláken.



Obr. 2.5. Porovnání průměru POF vlákna a skleněného vlákna.

Výstupní část – difuzor

Na výstupu z optického vlákna se používají difuzory často jediná část, kterou lze v místnosti vidět. Do podhledu nebo do stěny je možno provést např. klasické kolmé vyústění, vyústění pod úhlem ji doplnit výstup světla nástavcem, který usměrní dopadající světlo. Záleží také na zabudování konce optického vlákna i na druhu zvoleného vyústění, aby mohlo být vycházející světlo správně nasměrováno, čehož lze využít například ve výstavnictví nebo osvětlení pracovního místa apod [5].

Filtr

Optické filtry jsou používány pro změnu spektrálních vlastností světelného záření. Při použití filtru je důležité zvolit optimální optický filtr, co se týče spektrálních vlastností, tepelné odolnosti a dalších fyzikálně-chemických vlastností k dosažení optimálních výsledků. Zvolení vhodného filtru je závislé na mnoha faktorech například vlnové délky, tvaru a šířky propouštěného pásma. Existující různé druhy filtrů: neutrální filtry, UV filtry, IR filtry, filtry z barevného skla, tepelné absorpční filtry atd.

2.3. Sledování polohy slunce

Tato část systému slouží k maximálnímu a efektivnímu využití energie dopadající na zemský povrch od slunce. Základní myšlenka systému je v neustálém monitoringu pohybu slunce po obloze po celý den.

Základní rozdělení systému sledování polohy slunce se dělí, podle směrů v jakých pracuje na jednoosé a dvouosé sledovací systémy. Jednoosý systém sledování polohy slunce sleduje polohu slunce po horizontu během celého dne od východu na západ. Dvouosý sleduje také polohu slunce během dne a navíc také umožňuje měnit horizontální úhel v závislosti polohy slunce na obloze. Většina těchto systémů obsahuje možnost vracení do výchozí polohy v době, kdy zapadne slunce a systém je připraven k sledování ihned po východu slunce [7].

Systémy s jednoosým sledováním polohy slunce nejsou ideální v aplikacích pro koncentraci světla. Tyto aplikace vyžadují precizní nastavení úhlu mezi sluncem a slunečním kolektorem k dosažení maximální účinnosti koncentrace světla do optických vláken. Větší přesnosti tak může být dosaženo s dvouosým systémem. Pro zajištění mechanického pohybu kolektorové části jsou

použity motory. Jejich řízení může být různými způsoby. Jedna z možností je přes počítač naprogramováním astronomických koordinačních informací o poloze slunce během celého roku pro určitou lokalitu. Nejčastěji se však používá ovládání přes senzory sledující polohu slunce. Přesnost těchto systémů pak závisí pozici, kvalitě a přesnosti těchto senzorů. Problémem pro systémy se senzory jsou klimatické podmínky. V případě velmi zatažené oblohy může dojít k přerušení sledování polohy slunce. Pro systémy ovládané počítačem tento stav nastat nemůže, ale jsou však mnohem dražší [7, 11].

Další možností je pak kombinace použití systému s naprogramovanými astronomickými informacemi a daty ze senzoru. Kde systém začíná vyhledávat maximální výstupní proud v okolí předpokládané vypočtené pozice. Tento maximální proud se porovnává s vypočtenou pozicí a na základě metody nejmenších čtverců dopočítá přesnou pozici. Největší problém u toho systému je přesnost hodin použitých jako časovou referenci v dopočítání polohy slunce [7, 11].

Pro všechny systémy sledování polohy je pak důležité z hlediska přesnosti, jak plynule se dokáže systém otáčet. To znamená s jak malými kroky motorku je systém schopný se otáčet.

3. Příklady použití systémů denního osvětlení

V této kapitole bych popsal doposud vyvinuté systémy se světlovody určenými pro osvětlení denním světlem. Jedná se o projekty z celého světa zaměřující se na oba zmíněné typy systému aktivního a pasivního osvětlení.

3.1. Tubusové světlovody

Příkladem zajímavé aplikace pasivních osvětlovacích systému je světlovodné vedení od firmy Lightway v budově Central Parku v Praze. Projekt osvětlení schodiště uvnitř budovy bez nutnosti přístupu k fasádě domu, a tím i zvýšení užitečných prostor budovy, byl instalován společností Lightway.

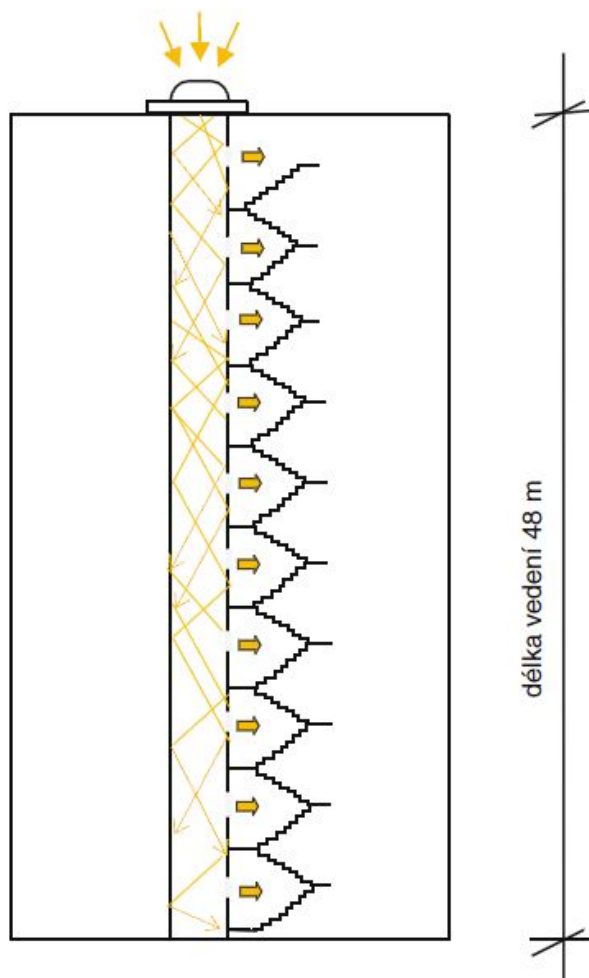
Na obr. 3.1 je fotografie budovy Central Parku v Praze s ukázkou osvětlení jednoho z mezipater světlovodným vedením.



Obr. 3.1.: Budova Central parku v Praze [6, 12].

Klasické světlovody se skládají z nástřešní hlavice, kruhového světlovodného tubusu a stropního difuzoru. Pro projekt Central Park v Praze k osvětlení schodišťového prostoru o výšce čtrnácti podlaží musel být však využit princip tzv. štěrbinových světlovodů, kde se světlo dostává do místností otvory v plášti světlovodného tubusu [6].

Pro osvětlení schodišťového prostoru byl vybrán světlovod Lightway Individual oválného typu s určeným tvarem odrazné plochy v bočních částech a s navazujícími rovnými plochami, které umožňují zhotovit výstup světla oknem ve vertikální rovině. V čelní stěně světlovodu jsou schodišťová okna opatřená dezénovaným sklem, které rozptyluje světlo do vnitřního prostoru každého podlaží. Na obr. 3.2 je schéma osvětlované budovy [6, 12].



Obr. 3.2.: Světlovod Lightway Individual [6, 12].

Požadavek na osvětlení schodišťového prostoru o celkové výšce 42,5 m jedním průběžným světlovodem je svým způsobem ojedinělý. Světlovod Lightway Individual se dočkal realizací v celkem deseti věžích tohoto komplexu. Je tedy možné konstatovat, že pro svou délku i množství realizací je prvním velkým takovýmto projektem v České republice, který lze zcela jistě označit za pozoruhodný i ve srovnání s realizacemi světlovodů v evropském měřítku [6, 12].

Základní charakteristiky posuzovaného schodišťového prostoru se světlovodem:

- délka posuzovaného prostoru 4 280 mm,
- šířka posuzovaného prostoru 2 125 mm,
- výška posuzovaného prostoru v rámci jednoho podlaží 3 000 mm,
- šířka světlovodu 1 200 mm,
- hloubka světlovodu 450 mm,
- poměr stran světlovodu 1:2,66,
- celková délka světlovodu 42 500 mm.

Rozměry oken ve schodišťovém prostoru jsou odstupňované:

- okna 600 × 600 mm v nejvyšších podlažích, tj. v 10. až 14.,
- okna 600 × 900 mm ve středních podlažích, tj. v 9. až 5.,

– okna 600 × 1 200 mm v nejnižších podlažích, tj. v 1. až 4.

Osvětlenost se měřila na střeše, v nejvyšším podlaží a také na mezipodestě mezi osmým a devátým nadzemním podlažím, v úrovni 850 mm nad podlahou. Měření bylo provedeno s luxmetrem Konica Minolta T-10. Hodnoty osvětlenosti schodišťového prostoru byly stanoveny za podmínek s venkovní osvětleností u kopulí světlovodu, která se měnila v rozmezí od 42 660 do 81 360 lx, průměrná osvětlenost byla 67 990 lx. Průměrná osvětlenost byla stanovena pro nejvyšší podlaží 225 lx a pro mezipodestu mezi osmým a devátým nadzemním podlažím 89 lx [6, 12].

Hlavním přínosem zmíněného světlovodu je skutečnost, že přivádí denní světlo s jeho dynamikou do obtížně dostupných částí budovy, a tím pozitivně ovlivňuje vnitřní prostředí a vytváří podmínky pro energeticky úspornější provoz [6].

3.2. PET lahve jako světlovedné vedení

Další z možností pasivního osvětlení se rozšířil v důsledku nedostatku denního osvětlení a vysokých cen elektrické energie v chudinských čtvrtích na Filipínách za pomoci nadace My Shelter a jejich projektu „Litr světla“ v srpnu roku 2011. Hlavním důvodem je, že velká část obyvatel žije v chudobě ve slamech bez oken a možnosti přístupu připojení elektřiny. Lidé žijí v temných místnostech bez oken a v případě osvětlování pomocí svíček a loučí zde existuje velké riziko požárů. Proto bylo navrženo velmi jednoduché řešení, kde k přenosu světla postačí stará plastová láhev o objemu 1,5 litru nebo 2 litrů naplněna vodou s příměsí bělidla proti tvorbě řas zabudovaná do vlnité střechy domu. S tímto nápadem přišel Alfred Moser v roce 2002 se skupinou studentů z univerzity MIT - Massachusetts Institute of Technology ve městě Cambridge amerického státu Massachusetts. Takové to osvětlení se vyrovná jedné slabší 55 W žárovce. Projekt „Litr světla“ začínal s jedinou lahví, postupně se však rozšířil do více než 28 000 domácností a více než 70 000 lidem zpříjemnil bydlení na Filipínách v hlavním městě Manile. Nyní se tento projekt začíná rozšiřovat i do dalších zemí např. Peru, Kolumbie, Indie a dokonce i ve Švýcarsku. Nadace považuje Filipíny za pilotní projekt a svou základnu chce rozšířit po celém světě i za pomoci dobrovolníků. Na obr. 3.3 je uvedena fotografie již zabudovaného světlovodu z PET lahve v jednom z obydlí v Manile [6, 13].

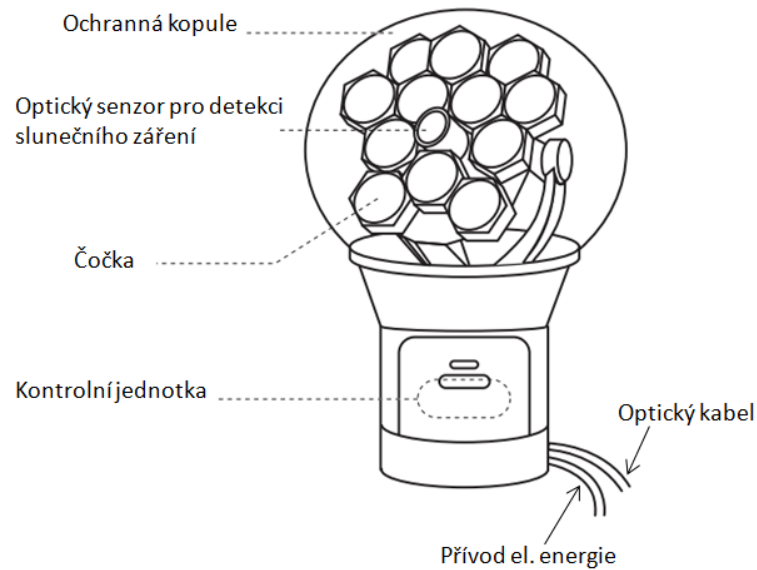


Obrázek.: 3.3. Ukázka světlovodu v Manile [6, 13].

3.3. Systém Himawari

Tento systém vnitřního osvětlení budov denním světlem byl navržen v Japonsku už v sedmdesátých letech minulého století. Jedná se o aktivní způsob osvětlení a funguje na principu koncentrace světla Fresnelovými čočkami do optických vláken, který vynalezl profesor Kei Mori a sestrojil první prototyp v roce 1979 [10]. Systém Himawari je uveden na obr. 3.4.

Zařízení Himawari obsahuje senzor sledování polohy slunce a podle něj natáčí sluneční kolektory v podobě Fresnelových čoček uspořádaných do podoby včelí plástve. V případě slunečného počasí je poloha určena přesně podle senzoru polohy slunce umístěného uprostřed kolektoru, zachycují sluneční záření. V případě že je zataženo, slunce je schováno pod mraky, mikroprocesor dopočítá polohu slunce, kde by se mělo nacházet podle vnitřních hodin. Kolektor je tak vždy alespoň přibližně natočen na aktuální pozici slunce, kdyby náhodou nastala situace, že se slunce objeví zpoza mraků [7].

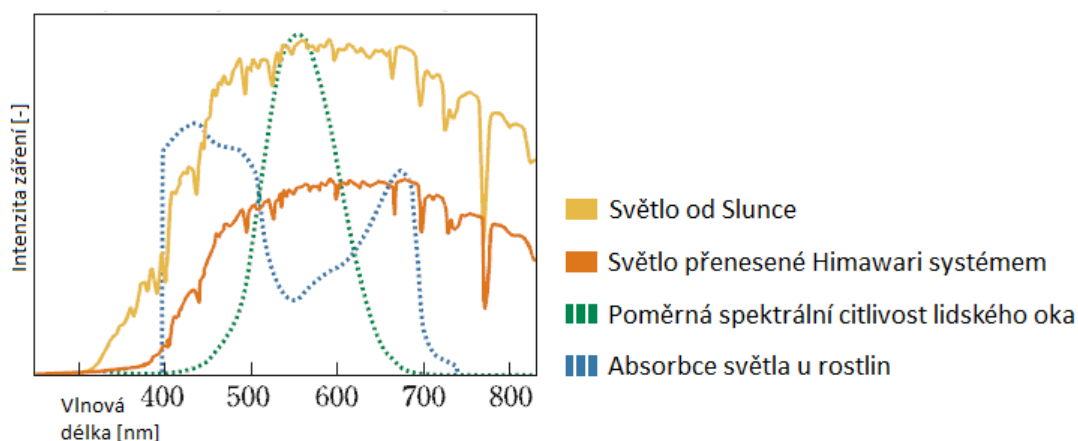


Obr. 3.4: Ukázka vstupní části systému Himawari [14].

Na každou Fresnelovu čočku o průměru 95 mm je napojeno jedno optické vlákno. Šest vláken je pak spojeno v jeden optický kabel. Jsou zde použita speciální křemenná vlákna o průměru jádra 1 mm a maximální délce 15 m, které se vyznačují velmi nízkými ztrátami, ale jsou také velmi drahé v porovnání s plastovými vlákny. Maximální poloměr ohybu vláken je udáván 300 mm. To tedy tvoří nejmenší dostupnou verzi Himawari světlovodného systému v podobě šesti čoček ve vstupním kolektoru. Dostupné jsou i větší verze systému a to vždy v násobku čísla šest podle daného počtu čoček na vstupu [7, 15].

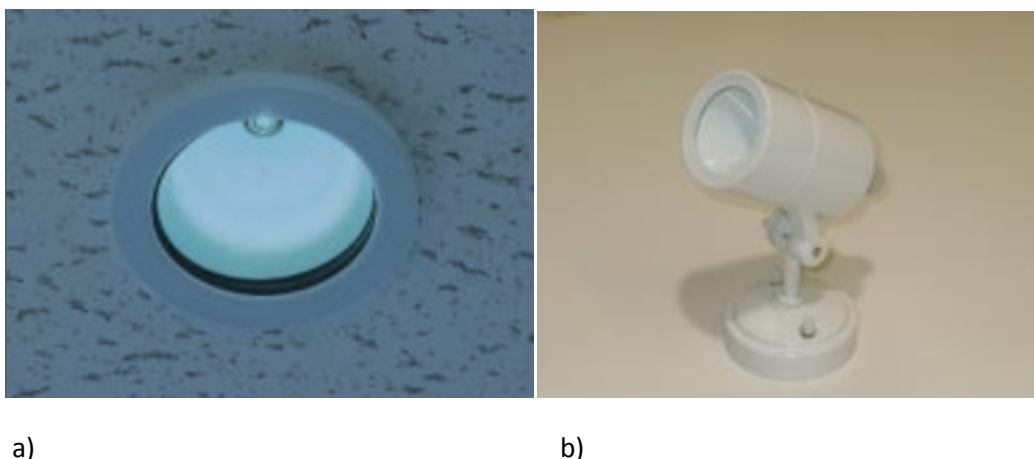
Pokud na sluneční kolektor složený ze soustavy Fresnelových čoček dopadá světlo při venkovní velikosti osvětlenosti 98 000 lx od Slunce, přeneseme jeden kabel o 6 vláknech světelný tok o velikosti 1630 lm [7].

Sluneční záření přenášené do objektu dosahuje vysokých parametrů s ohledem na kvalitu přenášeného světla obr. 3.5. Světlo má přirozenou barvu a nemůže být nahrazeno jakýmkoliv umělým osvětlením. Ochranná kopule obklopující celé vnější zařízení slouží především jako ochrana před mechanickým poškozením vnitřních částí a dokáže také pohltit UV záření. Přenášené světlo obsahuje především viditelné paprsky, druh světla vhodný pro fotosyntézu u rostlin [7].



Obr. 3.5: Porovnání kvality světla od Slunce a záření přenášeného Himawari systémem [14].

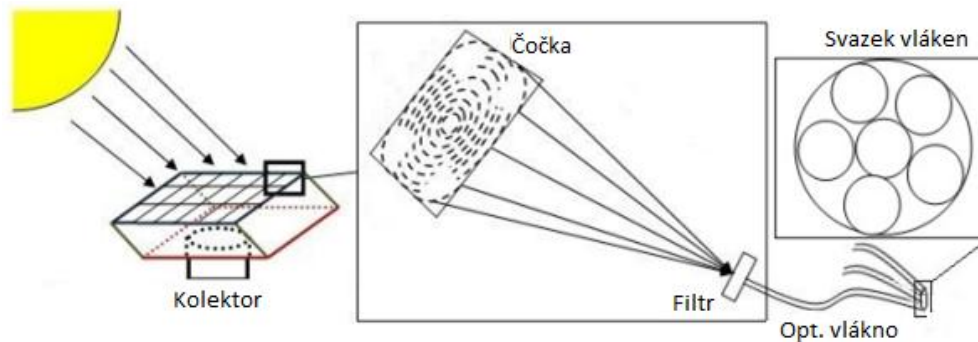
Výstup světla do osvětlovaného objektu je možné řešit několika způsoby. Bez žádného difuzoru je světlo vyzářeno pod úhlem 58° z konce kabelu. Ve vzdálenosti dvou metru od optického kabelu, ozáří kruhový prostor o průměru 2,2 m (plocha $3,8 \text{ m}^2$) intenzitou osvětlení průměrně 500 lx. Nebo je možné použít výstupní optické prvky ukázka na obr. 3.6. Použití systému Himawari je velmi široké od běžného osvětlení pokojů v rodinném domě, kanceláří po osvětlení veřejného prostoru jako jsou nákupní centra nebo podzemního parkoviště [14].



Obr. 3.6: Výstup z vlákna – a) bodové b) bodové s možností natočení [14].

3.4. Systém Parans

Tento aktivní způsob osvětlení vyvinula společnost Parans Solar Lighting, která byla založena v roce 2002 ve Švédsku. První prototyp toho zařízení SP1 byl vyroben v roce 2004 ve spolupráci s Technickou univerzitou v Gothenburgu. Produkt měl původně sloužit pro přivedení denního světla do školních tříd a zkvalitnit tak jejich vnitřní prostředí [16]. Ukázka systému na obr. 3.7.



Obr. 3.7: Ukázka světlovodného vedení systému Parans [16].

Princip funkce je obdobný jako u Himawari systému jen s tím rozdílem, že zde se používají POF vlákna s průměrem jádra 980 μm a maximální délkou 20 m. Jednotlivá vlákna o průměru 1,5 mm jsou uspořádána do svazku po 6 vedoucích od každé z čoček. Plastová vlákna mají sice vyšší ztráty světla než skleněná vlákna, ale na druhou stranu se s nimi dá lépe pracovat, maximální poloměr ohybu je 50 mm a jsou levnější. Výrobce uvádí ztráty světla přenosem a absorpcí 4,5 % na metr délky vlákna. [16, 17].

Jeden kabel o 6 vláknech dodává světelný tok (při 100 000 lx venkovní osvětlenosti) 350-700 lm, záleží na délce kabelu. Maximální délka kabelu je 20 m, delší kabely se pak nepoužívají z důvodu velkých světelných ztrát. Pro srovnání běžná 40 W žárovka má světelný tok okolo 500 lm a 60 W žárovka má světelný tok okolo 800 lm [17].

Použité čočky jsou zde Fresnelovy o velikosti 65 x 65 mm.

Dalším rozdílem pak zde je, že se používá odrazivý filtr UV (ultrafialové) a NIR (blízké infračervené) záření, který ale propouští viditelnou složku světla. Propustnost viditelné složky záření je vysoká s nízkými ztrátami, kvůli antireflexní vrstvě pro viditelnou složku [16].

Výstup do místnosti je řešen třemi druhy difuzorů. Na obrázku 3.8a,b je ukázka prvních dvou jedná se o desku z matného PMMA s výřezem z hranolu, který rozptyluje světlo po místnosti. Přívod světla pro L1 small tvoří 1 kabel. A pro L1 Medium, které má obdobnou konstrukci je 2x větší a používají se 2 kabely. Třetí možností je bodové svítidlo obr. 3.8c s hliníkovým reflektorem a čočkou, kterým je možné otáčet. Čočka pak koncentruje světlo do prostoru kruhovým paprskem o velikosti 30 stupňů [17].



Obr. 3.8: Typy difuzorů - Svítidla a) L1 Small, b) L1 Medium, c) L3 Spotlight [17].

Pro případ když je obloha zatažená nebo je noc a není dostatek slunečního záření, nabízí Parans hybridní variantu osvětlení. Jedná se o doplnění vnitřního osvětlení moderními LED diodami, které mají tu funkci doplnění osvětlení v případě nedostatku slunečního světla a stejně tak mohou plnit svítit nezávisle na Slunci.

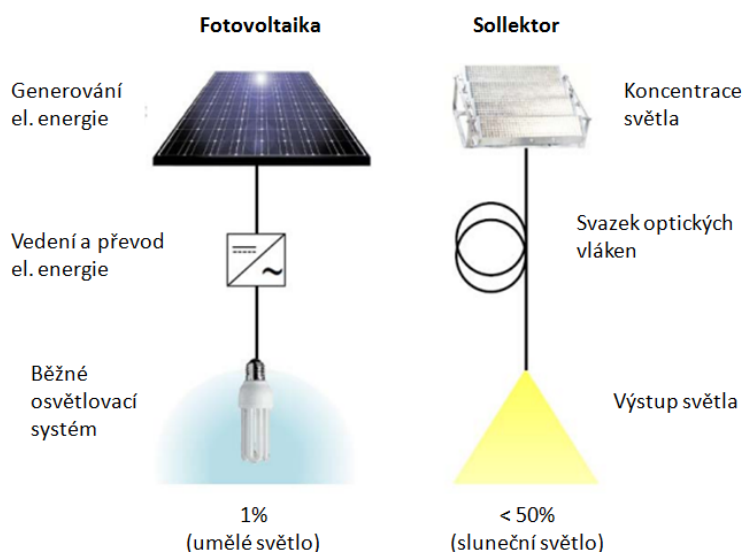
3.5. Systém Sollektor

Další z aktivních systému osvětlení pod názvem Sollektor využívající optické vlákna jako medium pro přenos denního osvětlení do vnitřních objektů. Německé skupiny vědců pod vedením profesora Hanse Poisela experta přes osvětlení z univerzity Georg-Simon-Ohma aplikovaných věd z Norimberku. V několika posledních letech vyvinul za přispění studentů zařízení pro přenos světla, které se umístí na střechu budovy (obr. 3.9) [18].



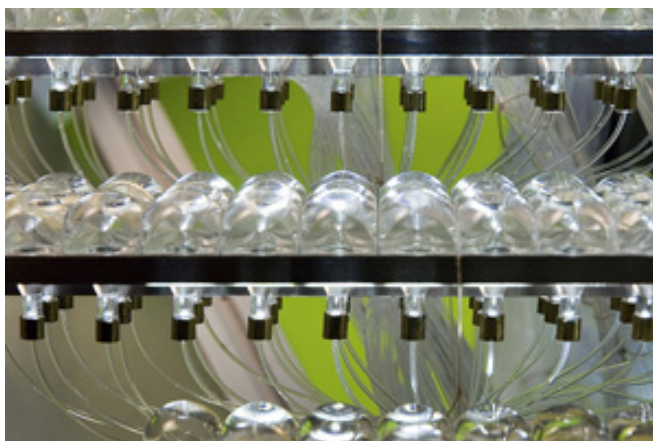
Obr. 3.9: Osvětlení objektu systémem Sollektor [18].

V porovnání s jinými metodami využití sluneční energie jako jsou fotovoltaické nebo solární systémy, kde je sluneční záření už na vstupu do systému převáděno na jiné formy energie a dochází tak ke značným ztrátám při převodu pracuje Sollektor s originální formou energie, jsou tedy vyloučeny ztráty při převodu a nízké přenosové ztráty. Při výrobě elektrické energie fotovoltaickým článkem a následný převod na umělé světlo je 99 % slunečního světla ztraceno, oproti tomu Sollektor vykazuje účinnost více, než 50 % viz obr. 3.10 [18, 19].



Obr. 3.10: Porovnání Sollektoru s fotovoltaickými články [19]

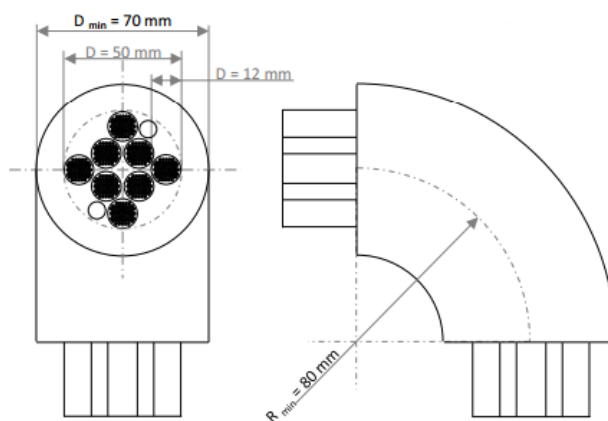
Zařízení umístěné na střeše domu obsahuje řádově stovky čoček (zaleží na typu zařízení), které zachytí světelné paprsky. Jedna čočka optický koncentrátor zadrží sluneční svit na ploše 17,5 mm x 17,5 mm. Celá tato vstupní část je řízena a otáčí se podle polohy slunce. Jedná se o dvouosý systém se senzorem vyhledávající polohu Slunce, data ze senzoru pak vyhodnocuje mikrokontrolér. Na výstupu z těchto koncentrátorů jsou umístěna polymerní optická vlákna o průměru jádra 1 mm, která rozvedou světlo po objektu do příslušných stropních svítidel a to až na vzdálenost 20 m. Ukázka navázání světla do vláken z koncentrátorů je na obr. 3.11 [18, 20].



Obr. 3.11: Ukázka navázání světla do vláken [18].

Důležitým faktorem pak je, že se přenáší pouze viditelná část spektra světla. Ultrafialová a infračervená část spektra je absorbována, nepřenáší se tak do objektu přebytečné teplo [16, 18].

Obrázek 3.12 uspořádání vláken systému Sollektor. Během slunečního dne v Norimberku při venkovní osvětlenosti 100 000 lx přenesl systém o 600 čočkách světelný tok o velikosti 6000 lm viditelného světla do objektu [20].



Obr. 3.12: Uspořádání vláken systému Sollektor [20].

3.6. Systém HSL

Dalším z existujících projektů osvětlení denním světlem za pomoci optických vláken je HSL (Hybrid solar lighting). Tento aktivní způsob osvětlení pomocí zařízení, bylo vyvinuto v Oak Ridge národní laboratoři v Tennessee v USA. První prototyp spatřil světlo světa v roce 2002 [21].

Jedná se o trochu jiný systém denního osvětlení, než ty které byly dosud známé. Zahrnuje i klasický způsob osvětlení za pomoci elektrické energie v případě nedostatku denního světla od slunce [21, 22].

Ukázka systému je na obr. 3.13 vstupní kolektorová část obsahuje velké parabolické zrcadlo o průměru 1 m původně z velmi kvalitního skla, které však bylo velmi drahé. Postupně se tak přešlo na plastová parabolická zrcadla, která jsou mnohem levnější a lze je vyrábět ve větším množství [21, 22].

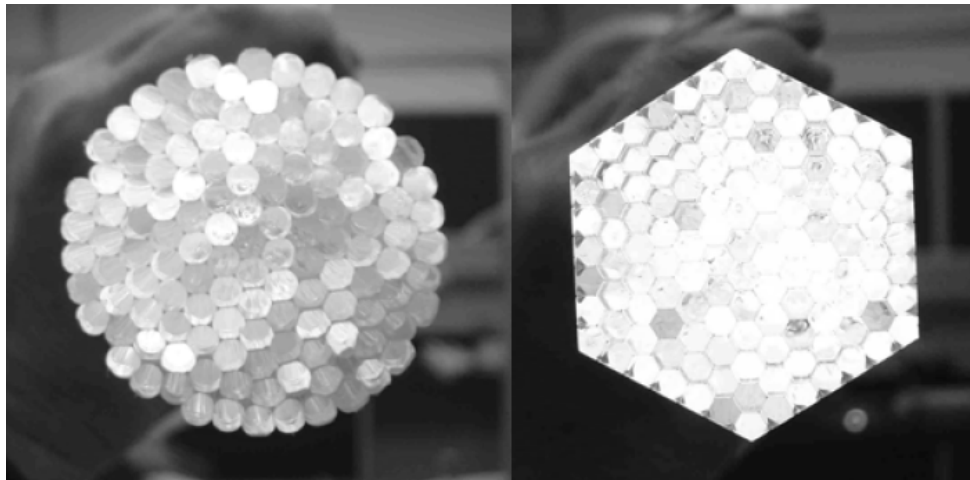
Další nezbytnou částí systému je druhé sekundární zrcadlo odrážející světlo z primárního zrcadlo do systému. Toto zrcadlo bylo navrženo s diachromatickým pláštěm, který odrážel pouze viditelnou složku světla a IR složku světla nechal projít skrze zrcadlo pryč [21, 22].

Pro sledování polohy slunce byl použit dvouosý systém s otevřenou smyčkou, kde byla přesně naprogramována zeměpisná délka, šířka, datum a čas. Zařízení tak bylo schopno udržovat polohovací přesnost bez jakékoliv zpětné vazby snímače polohy [21, 22].



Obr. 3.13: Vstupní část HSL systému [21].

Pro přenos světla od kolektorové části do objektu byla použita optická vlákna s velkým průměrem jádra. U prvního prototypu, vlákna z polymethacrylate (PMA) s průměrem jádra 12 mm. Použitím jednoho jádra tyto vlnovody eliminovali optickou ztrátu balením do svazku optických vláken. Postupně však byly nahrazeny vlákny s menším průměrem 3 mm z polymethylmethacrylatu (PMMA) s ohledem na nepatrně horší optické vlastnosti, ale mnohem lepší flexibilitou [13]. Z těchto vláken byl vytvořen svazek 127 vláken z PMMA o tloušťce vlákna 3 mm na obr.3.14a). U novější verze pak bylo vytvořeno uspořádání vláken do šestiúhelníku na obr. 3.14b) [23].



a)

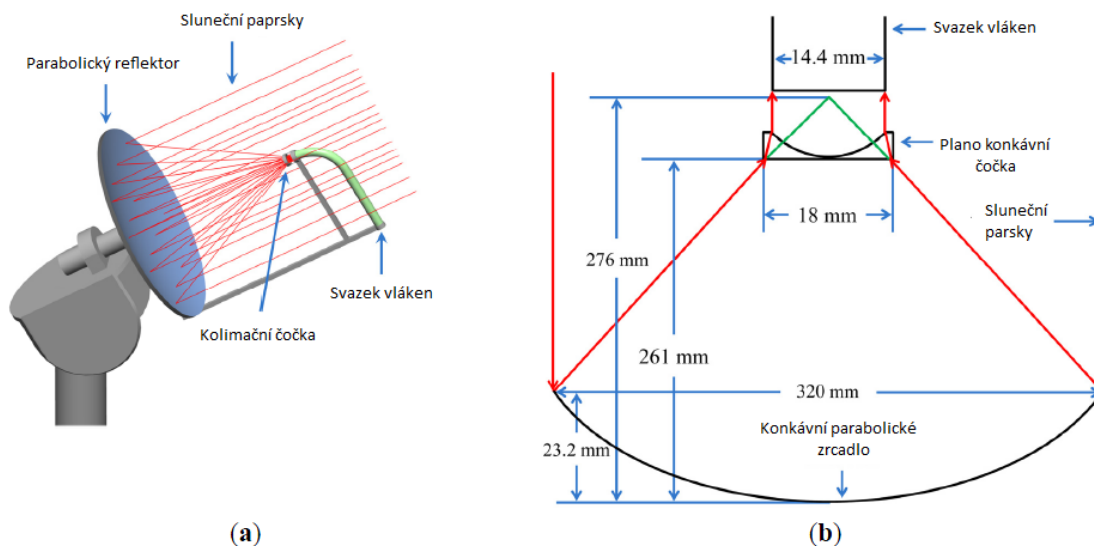
b)

Obr. 3.14.: Uspořádání vláken HSL: a) do kruhu b) do šestiúhelníku [23].

3.7. Systém z National Taiwan University of Science and Technology, Taiwan

Zřejmě nejnovější publikací systému využívající optická vlákna k přenosu slunečního záření do objektu prezentovali pánové Irfan Ullah a Allen Jong-Woei Whang z National Taiwan University of Science and Technology v červenci roku 2015 [24].

Hlavní myšlenkou tohoto systému je koncentrace a usměrnění slunečního záření do svazku optických vláken. Velké parabolické zrcadlo koncentruje sluneční záření do malé plochy v podobě svazku optických vláken. Ukázka systému na obr. 3.15a). Odlišným prvkem oproti jiným podobným zařízením je zde kolimační čočka umístěná před optická vlákna (obr. 3.15b). Tato plosko-vypuklá čočka slouží k usměrnění optického záření a rovnoměrnému rozložení světelného záření. Každé z optických vláken ponese stejně velký světelný tok a na výstupu z vláken je tak zajištěno stejnoměrné rozložení světelného záření přenášeného do osvětlovaného prostoru [24, 25].



Obr. 3.15: Ukázka systému z National Taiwan University of Science and Technology na Taiwanu [24].

Byly zde použity dva druhy vláken pro odstranění problému s přehříváním křemenná vlákna a plastová vlákna POF pro většinu přenosové části s ohledem na jejich nižší cenu, flexibilitu a pro lepší vhodnost použití ve strukturované kabeláži v budovách. Křemenná vlákna o průměru jádra 1,457 mm a průměr pláště 1,8 mm. Plastová vlákna POF průměr jádra 1,98 mm a pláště 2 mm. Jeden tento systém obsahuje 55 optických vláken spojených do svazku. Jedná se zatím pouze o prototyp, jehož cílem je dosáhnout rovnoměrnou osvětlenost větší než 500 lx pro velkou plochu. Uvádí zatím pouze vypočtený světelný tok 11255 lm pro venkovní osvětlenost 110 000lx [24, 25].

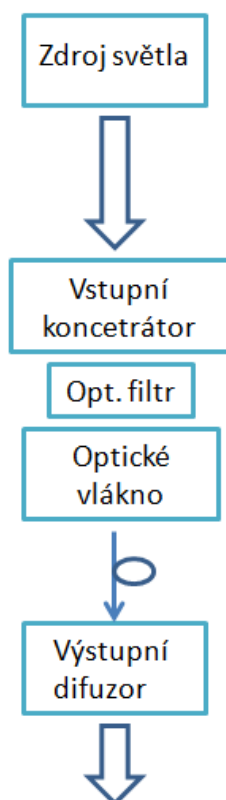
4. Postup při návrhu světlovodného vedení

Návrh systému světlovodného vedení vychází z již existujících projektů popsaných v kapitole 3. V této kapitole je popsán můj návrh systému světlovodných vedení pro osvětlování vnitřních prostor. Pro navržený systém je spočítána účinnost systému. V programu OptiCAD je navržená struktura světlovodného vedení pro jednu čočku na vstupu odsimulována paprskovou metodou.

4.1. Návrh světlovodného vedení s využitím čoček

Jedním z hlavních cílů práce je navrhnout a vyrobit funkční model systému denního osvětlení pro osvětlení vnitřních prostor s využitím polymerních optických vlnodů. Pro navázání světla do polymerních optických vláken jsem použil vstupní koncentrátor v podobě Fresnelových čoček.

Na obrázku 4.1 je naznačeno schéma navržené soustavy pro přenos denního osvětlení.



Obr. 4.1: Navržená soustava světlovodného vedení.

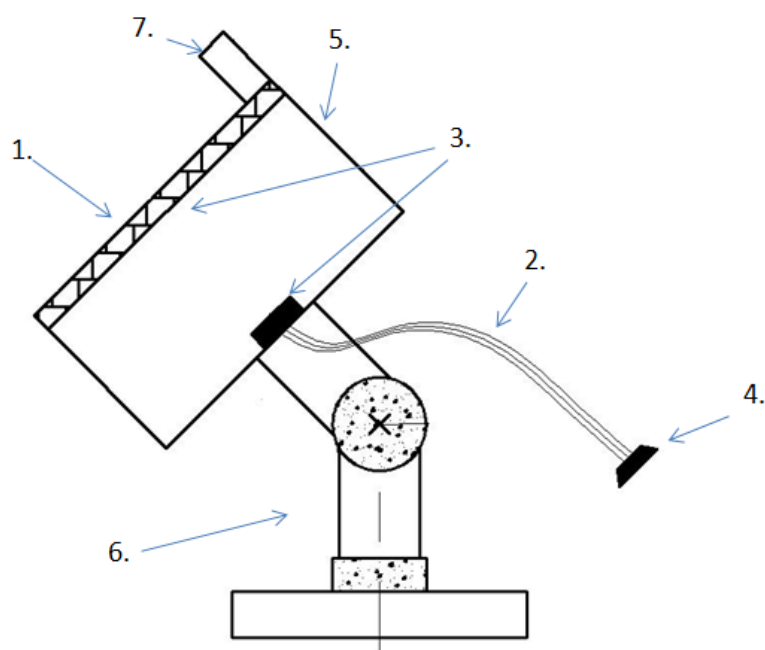
Zdroj světla: V ideálních podmínkách využití Slunce jako zdroje světla. V laboratorních podmínkách využití dostupných zdrojů v podobě žárovek.

Vstupní koncentrátor: Slouží k navázání světla do vláken. Jako vhodné se zdají být některé z Fresnelových čoček (fokusační čočky), které dosahují lepší účinnosti přenosu světla než obyčejné vypuklé čočky.

Filtr: Neméně důležitou částí systému je použití vhodného optického filtru, aby došlo k odstínění nežádoucího UV a NIR (blízké infračervené $0,76 - 1,4\mu\text{m}$) záření a dále prošlo jen viditelné záření. Dalším důvodem je předejití přehřátí a následnému zničení optického vlákna obzvláště při použití vláken z PMMA, které má nižší tepelnou odolnost než sklo. Existují různé druhy filtrů, v mém případě se jeví jako vyhovující použití některého z fóliových protislunečních filtrů od firmy Madico (viz. příloha A).

Vláknový vlnovod (Optické vlákno): Použití dostupných POF vláken každé jedno vlákno zachytí záření z jedné Fresnelovy čočky. Důležité je přesné umístění vlákna do ohniskové vzdálenosti fokusační čočky.

Výstupní difuzor: Slouží k rozprostření světla do místnosti. V určité variantě pokud nejde o rovnoměrné rozprostření světla do místnosti, nemusí být difuzor použit.



Obr. 4.2.: Schéma navrženého systému denního osvětlení.

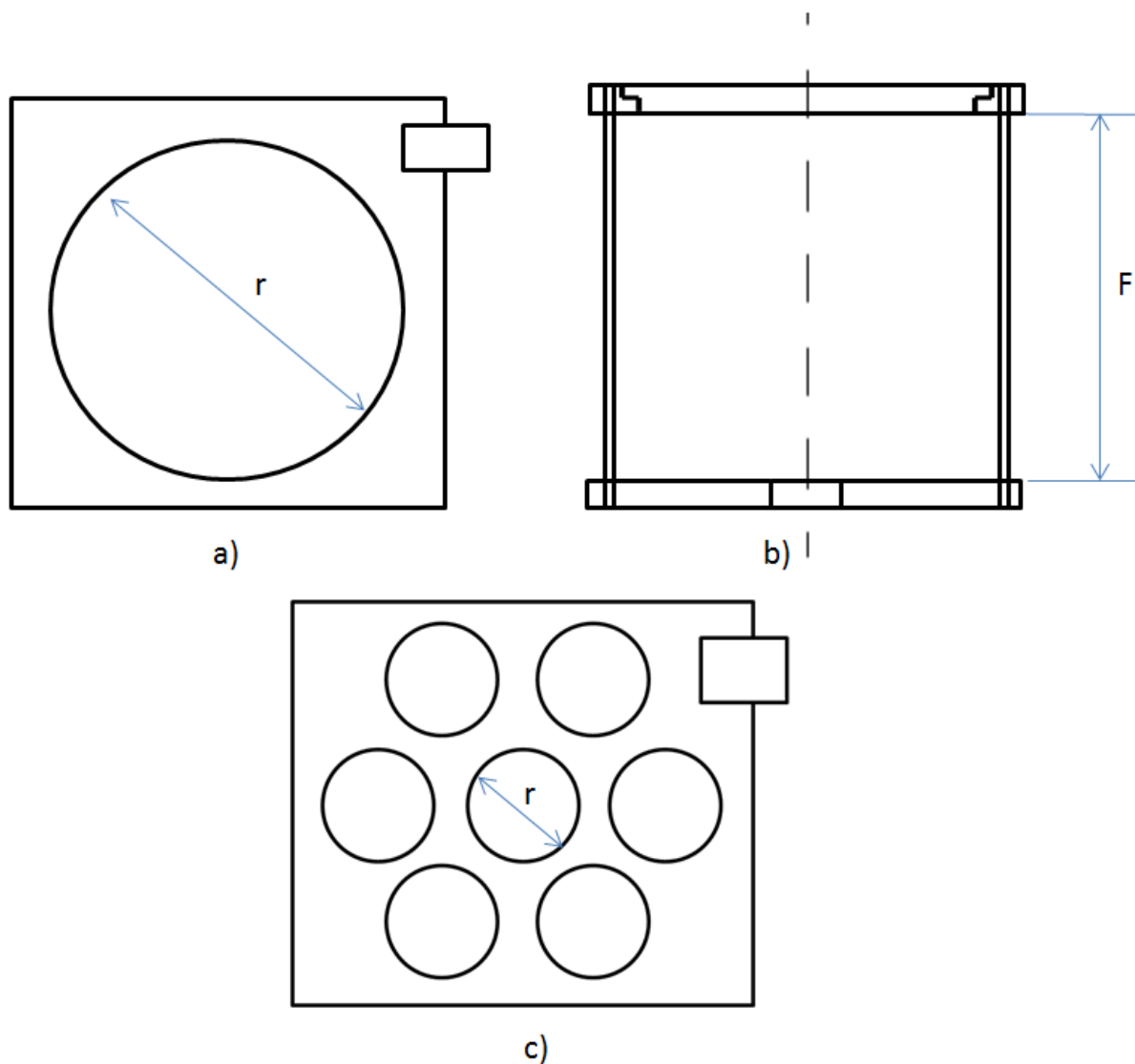
Na obr. 4.2 je zobrazen řez kompletní strukturou navrženého systému pro denní osvětlení, systém je rozdělen na dvě části. První část je optická část (označení 1-5), optická část je doplněna elektrickou (6-7). Do optické části patří výše zmíněné prvky v (1) jsou umístěny fokusační čočky (Fresnelovy čočky), (2) je optické vlákno nebo jejich svazek, (3) optický filtr, (4) difuzor, (5) přípravek pro uchycení optických prvků. Elektrická část (6) se skládá ze stojanu pro umístění přípravku s optickými prvky a dále obsahuje řídicí elektroniku k ovládnutí natáčení přípravku za zdrojem světla (Slunce). V (7) je umístěn senzor sledování polohy slunce, který je spojen s řídicí elektronikou a podle něj se celý systém automaticky otáčí za zdrojem světla (Slunce).

Na obr. 4.3 je návrh přípravku pro uchycení jedné čočky. Na obr. 4.3a) je zobrazen pohled shora na přípravek pro vložení fokusační čočky o poloměru r . Na obr. 4.3b) je pohled na přípravek z boku, do jeho vrchní části se vloží čočka určená ke koncentraci světla do spodní části přípravku,

kde se vloží optické vlákno, které přenesse koncentrované optické záření od čočky do osvětlovaného místa. Spodní a vrchní část přípravku jsou od sebe odděleny distančními tyčkami o délce F , odpovídající ohniskové vzdálenosti dané čočky.

Pro svou práci mám k dispozici sedm kusů Fresnelových čoček, na základě toho je na obr. 4.3c) návrh většího přípravku pro umístění sedmi čoček. Jedná se pouze o pohled shora o rozložení čoček o průměru r . Pohled z boku se nebude lišit od přípravku pro jednu čočku.

U obr. 4.3a) a 4.3c) je v pravém horním rohu naznačen obdélník, jedná se o místo pro připevnění sledovacího zařízení popsaného v kapitole 5.1.



Obr. 4.3: Návrh přípravků pro uchycení čoček a optického vlákna: a) Přípravek pro jednu fokusační čočku – pohled shora, b) Přípravek pro jednu fokusační čočku – pohled z boku c) Přípravek pro sedm fokusačních čoček – pohled shora.

4.2. Výpočet účinnosti systému denního osvětlení

Tento výpočet má sloužit k přibližnému určení účinnosti navrhovaného systému. U kterého jsem vycházel z dostupných parametrů použitých prvků, jenž jsem zpracoval pro lepší přehlednost do tabulek.

Vstupní část – Čočky (viz. příloha A)

V tabulce 4.1 jsou uvedeny základní parametry použitých čoček pro výpočet účinnosti systému. V prvním řádku je uveden průměr použité čočky v mm, v druhém řádku je uvedena ohnisková vzdálenost v mm a v třetím řádku je zapsán počet použitých čoček. Pro všechny čočky platí činitel prostupu světla $\tau_1 = 0,8$ [5].

Tab. 4.1: Základní parametry čoček pro výpočet účinnosti systému (viz. příloha A).

průměr čoček d [mm]	50	50	80	80
ohnisková vzdálenost F [mm]	40	40	70	70
počet čoček [ks]	1	7	1	7

Přenosová část – Optické vlákno (viz. příloha A)

V tabulce 4.2 jsou uvedeny parametry použitého optického vlákna pro výpočet účinnosti systému. V prvním řádku je uveden průměr použitého vlákna v mm, v druhém a třetím řádku je délka použitého vlákna v m, ve čtvrtém a pátém řádku index lomu jádra respektive index lomu obalu optického vlákna.

Tab. 4.2: Základní parametry použitého optického vlákna (viz. příloha A).

průměr vlákna d [mm]	1
délka vlákna l_1 [m]	1
délka vlákna l_2 [m]	10
index lomu světla jádra n_j [-]	1,49
index lomu světla obal n_o [-]	1,41

Výstupní část – Mikroprizmatický difuzor (viz. příloha A)

Pro použitý mikroprizmatický difuzor platí činitel prostupu světla difuzorem $\tau_2 = 0,9$ [5].

Jako vstupní hodnotu pro výpočet účinnosti systému jsem bral hodnotu intenzity slunečního záření I , dopadajícího na zemský povrch $200 - 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ z toho pak je pouze 44% viditelného světla, které je pro lidské oko viditelné [5].

Zde je ukázka výpočtu pro jednu čočku o průměru 50 mm, činitel prostup světla čočkou $\tau_1 = 0,8$, intenzita slunečního záření $I = 200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Délka optického vlákna $l_1 = 1 \text{ m}$ a $l_2 = 10 \text{ m}$:

Intenzita slunečního záření: $I = 200 \cdot 0,44 = 88 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

Plocha, na kterou dopadá sluneční záření:

$$S = \pi \cdot \frac{d^2}{4} = 3,14 \cdot \frac{0,05^2}{4} = 1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (4.1)$$

Sluneční záření dopadající na plochu čočky:

$$P_1 = I \cdot S = 88 \cdot 1,96 \cdot 10^{-3} = 0,173 \text{ W} \quad (4.2)$$

Prostupu světla čočkou:

$$P_{1\tau} = P_1 \cdot \tau = 0,8 \cdot 0,39 = 0,138 \text{ W} \quad (4.3)$$

Fresnelův odraz - ztráty odrazem při navázáním světla do vlákna:

$$R = \left[\frac{n_j - n_{vz}}{n_j + n_{vz}} \right]^2 = \left[\frac{1,49 - 1}{1,49 + 1} \right]^2 = 0,04 \quad (4.4)$$

$$P_{1\tau R} = P_{1\tau} \cdot R = 0,138 \cdot 0,96 = 0,133 \text{ W} \quad (4.5)$$

Ztráty – ve vlákne (zaprášené a nevyleštěné konce vláken), útlum filtru – 20% [5].

$$P_{1\tau R1} = P_{1\tau R} \cdot 0,8 = 0,31 \cdot 0,8 = 0,106 \text{ W} \quad (4.6)$$

Útlum světla absorpcí v optickém vlákne:

$$P_2 = P_{1\tau R} \cdot 10^{-\frac{\alpha \cdot l_1}{10}} = 0,106 \cdot 10^{-\frac{0,15 \cdot 1}{10}} = 0,103 \text{ W pro } l = 1 \text{ m} \quad (4.7)$$

$$P_{210} = P_{1\tau R} \cdot 10^{-\frac{\alpha \cdot l_2}{10}} = 0,106 \cdot 10^{-\frac{0,15 \cdot 10}{10}} = 0,075 \text{ W pro } l = 10 \text{ m} \quad (4.8)$$

Prostup světla difuzorem:

$$P_{2\tau} = P_2 \cdot \tau_2 = 0,9 \cdot 0,103 = 0,092 \text{ W} \quad (4.9)$$

$$P_{210\tau} = P_2 \cdot \tau_2 = 0,9 \cdot 0,075 = 0,068 \text{ W} \quad (4.10)$$

Pro přepočítání výstupních hodnot $P_{2\tau}$ a $P_{210\tau}$ ve wattech na světelný tok v lumenech využijí rovnici (1.1) uvedené v kapitole 1.2:

$$\Phi = K_m \cdot \int_{380}^{780} V(\lambda) \cdot \Phi_e \cdot d\lambda \quad (4.11)$$

Kde $K_m = 683 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ maximální hodnota spektrální světelné účinnosti o vlnové délce $\lambda_m = 555 \text{ nm}$ (hodnota stanovená pro fotometrického pozorovatele při fotopickém vidění), $V(\lambda)$ poměrná spektrální účinnost záření o vlnové délce λ z tabulky uvedené v příloze C, Φ_e zářivý tok zdroje [W] v mém případě dosadím hodnoty $P_{2\tau}$ a $P_{210\tau}$ [2, 24].

$$\Phi = 20 \text{ lm pro } P = 0,092 \text{ W a } l = 1 \text{ m}$$

$$\Phi = 14 \text{ lm pro } P = 0,075 \text{ W a } l = 10 \text{ m}$$

V tab. 4.3 jsou zobrazeny vypočtené hodnoty pro vstupní intenzitu slunečního záření $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, dopadající na plochu čočky. V druhém sloupci jsou hodnoty pro jednu čočku o průměru 50 mm, v třetím sloupci jsou hodnoty pro 80 mm čočku na vstupu systému. Ve čtvrtém a pátém sloupci jsou hodnoty pro maximální konfiguraci systému osvětlení pro sedm čoček na vstupu. Výstupní hodnoty jsou uvedeny pro délku optického vlákna 1 m a 10 m, hodnoty jsou udány ve wattech třetí a čtvrtý řádek. V pátém a šestém řádku tabulky jsou hodnoty přepočtené na hodnotu světelného toku v lumenech.

Tab. 4.3: Vypočtené hodnoty přenášené systémem pro intenzitu záření $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

d [mm] průměr čoček na vstupu	50	80	7 x 50	7 x 80
Φ_e [W] pro délku opt. vlákna $l_1 = 1 \text{ m}$	0,092	0,236	0,646	1,653
Φ_e [W] pro délku opt. vlákna $l_2 = 10 \text{ m}$	0,068	0,173	0,473	1,212
Φ [lm] pro délku opt. vlákna $l_1 = 1 \text{ m}$	20	46	124	320
Φ [lm] pro délku opt. vlákna $l_2 = 10 \text{ m}$	14	34	92	234

Intenzita záření $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ je v poledne při zatažené obloze. Vypočtené hodnoty světelného toku z tab. 4.3 v konfiguraci sedmi čoček na vstupu o průměru 80 mm odpovídají přibližně světelnému toku obyčejné 25 W žárovky, který se udává 200 - 250 lm. V porovnání s novějším typem osvětlení v podobě LED žárovek postačí při světelného toku 200 – 250 lm LED žárovka s příkonem 4 – 6 W a hlavně také mají mnohem delší životnost než obyčejné žárovky [27].

Vypočtené údaje v tab. 4.4 jsou uvedeny obdobně jako v předchozí tabulce, pro hodnotu střední intenzity dopadajícího slunečního záření $602 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Tato hodnota střední intenzity slunečního záření odpovídá jasnému dni, který se udává v rozmezí 600 – 1000 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ [5].

Tab. 4.4: Vypočtené hodnoty přenášené systémem pro intenzitu záření $602 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

d [mm] průměr čoček na vstupu	50	80	7 x 50	7 x 80
Φ_e [W] pro délku opt. vlákna $l_1 = 1 \text{ m}$	0,278	0,711	1,981	4,952
Φ_e [W] pro délku opt. vlákna $l_2 = 10 \text{ m}$	0,203	0,521	1,452	3,629
Φ [lm] pro délku opt. vlákna $l_1 = 1 \text{ m}$	54	138	383	956
Φ [lm] pro délku opt. vlákna $l_2 = 10 \text{ m}$	40	101	281	701

Vypočtené hodnoty světelného toku z tab. 4.4 pro konfiguraci sedmi čoček na vstupu o průměru 80 mm pro délku optického vlákna $l_1 = 1 \text{ m}$ odpovídá obyčejné 75 W žárovce, jehož hodnota je v rozmezí 900 - 1000 lm. A pro délku optického vlákna $l_2 = 10 \text{ m}$ odpovídá hodnotě 60 W žárovce, který je 700 - 800 lm. V porovnání s moderním typem osvětlení LED žárovkami odpovídají hodnoty světelného toku 900 – 1000 lm LED žárovce o příkonu 12 – 16 W. Pro světelný tok 700 - 800 lm odpovídá LED žárovce o příkonu 9 – 12 W [27].

Vypočtené údaje v tab. 4.5 odpovídají vstupní hodnotě intenzity slunečního záření $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, tato hodnota odpovídá jasnému dni v poledne v letních měsících.

Tab. 4.5: Vypočtené hodnoty přenášené systémem pro intenzitu záření $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

d [mm] Průměr čoček na vstupu	50	80	7 x 50	7 x 80
Φ_e [W] pro délku opt. vlákna $l_1 = 1 \text{ m}$	0,461	1,181	3,229	8,266
Φ_e [W] pro délku opt. vlákna $l_2 = 10 \text{ m}$	0,338	0,865	2,366	6,058
Φ [lm] pro délku opt. vlákna $l_1 = 1 \text{ m}$	89	228	624	1588
Φ [lm] pro délku opt. vlákna $l_2 = 10 \text{ m}$	66	167	457	1170

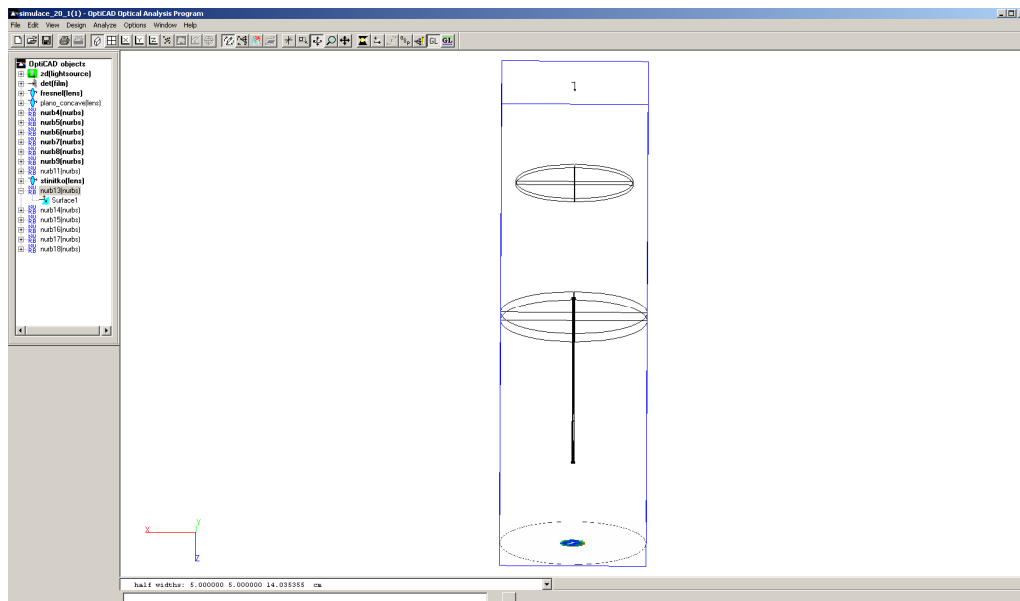
Z tabulky 4.5 vyplývá opět pro kombinaci sedmi čoček na vstupu o průměru 80 mm, že tyto dosažené hodnoty odpovídají přibližně hodnotě světelného toku 100 W obyčejné žárovky, jenž se udává na 1300 – 1700 lm. V porovnání s LED žárovkami při světelném toku 1300 - 1700 lm odpovídají LED žárovce o příkonu 16 – 20 W [27].

4.3. Paprsková metoda (Ray tracing) - OptiCAD

Paprsková metoda pracuje na principu dopadajících a odražených paprsku na rozhraní dvou různých prostředí popsané Snellovým zákonem. Jedná se o geometrické zobrazení dráhy paprsku. Velký počet paprsků simuluje zdroj světla, např. diodu, v mém případě předdefinovaný zdroj sluncem, který je součástí simulačního programu. Každý paprsek má vlastní délku dráhy a směr. Závisí tedy na úhlech paprsku, které vstupují do objektu (do vlnovodu). Pomocí detektoru můžeme v simulačním programu zobrazit histogram na místě, kde chceme zjistit výkon a místo dopadajících paprsků. Tímto způsobem můžeme analyzovat navržené struktury. Pokud chceme dosáhnout co největší přesnosti simulace, je potřeba strukturou nechat projít velké množství paprsků (řádově miliony) a simulace je tedy velmi náročná na výpočetní výkon [6, 28].

Zmíněnou metodou pracuje program OptiCAD. Jedná se o nesequenční simulační, optický, analytický a vizualizační software od firmy OptiCAD Corporation. Tento program provádí analýzu pomocí odrazu paprsku, lomu, rozptylu a polarizace světla na libovolně umístěné optické komponentě v prostoru [6, 28].

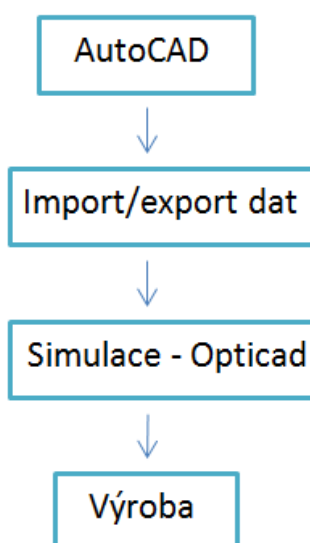
Základní knihovna programu obsahuje několik typu základních optických komponent (například optické čočky, zrcadla, hranoly atd.). Pro neobvyklý tvar navrhovaného světlovodu by bylo velmi obtížné sestavit z těchto základních komponent požadovanou strukturu, proto tato knihovna nebyla využita. Program dále umožňuje použít světelné zdroje, které mohou být bodové, plošné, objemové či řadové. Při simulaci můžeme použít již výrobcem přednastavené základní zdroje, nebo je nadefinovat pomocí tabulek, anebo pomocí matematických rovnic. Ukázka prostředí programu OptiCAD je zobrazena na obr. 4.4, na kterém vidíme importovaný motiv umístěný ve větší části pracovní plochy. Vlevo na obr. 4.4 je uveden počet použitých komponent, které obsahuje motiv světlovodného vedení (zdroje a detektory atd.) [6, 28].



Obr. 4.4.: Ukázka prostředí programu OptiCAD.

4.4. Simulace v programu Opticad

Navržený systém světlovodného vedení jsem postupně odsimuloval v programu OptiCAD, kde jsem postupoval následujícím způsobem (naznačeno na obr. 4.5). V prvním kroku proběhlo nakreslení 3D výkresu vláknového vlnovodu o určitém tvaru v programu AutoCAD 2013. Poté dojde k exportu dat v požadovaném formátu vhodném pro simulační program OptiCAD. V programu OptiCAD se importuje soubor s vláknovým vlnovodem s určitými souřadnicemi a dojde k doplnění soustavy o optické prvky. Ty budou sloužit pro lepší navázání světla do vedení a dojde k zvýšení účinnosti přenosu světla. V programu OptiCAD pak dojde k analýze celé soustavy pomocí paprskové metody. Případný další postup pak je výroba soustavy z reálných prvků.



Obr. 4.5.: Postup při modelování světlovodného vedení.

V programu AutoCAD 2013 jsem si vytvořil základní strukturu pro vedení paprsků světla. Vláknový vlnovod o průměru 1 mm a délce 1 m, ke kterému jsem umístil stínítko, jenž má za úkol zabránit nežádoucím únikům paprsků světla mimo navržené vedení.

Po otevření programu Opticad jsem importoval danou strukturu a k ní umístil zdroj světla. Jako zdroj světla jsem použil přednastavený sluneční zdroj a umístil ho ve vzdálenosti 20 cm od vedení. Výkon zdroje nastavený podle hodnot intenzity dopadajícího slunečního záření na plochu čočky.

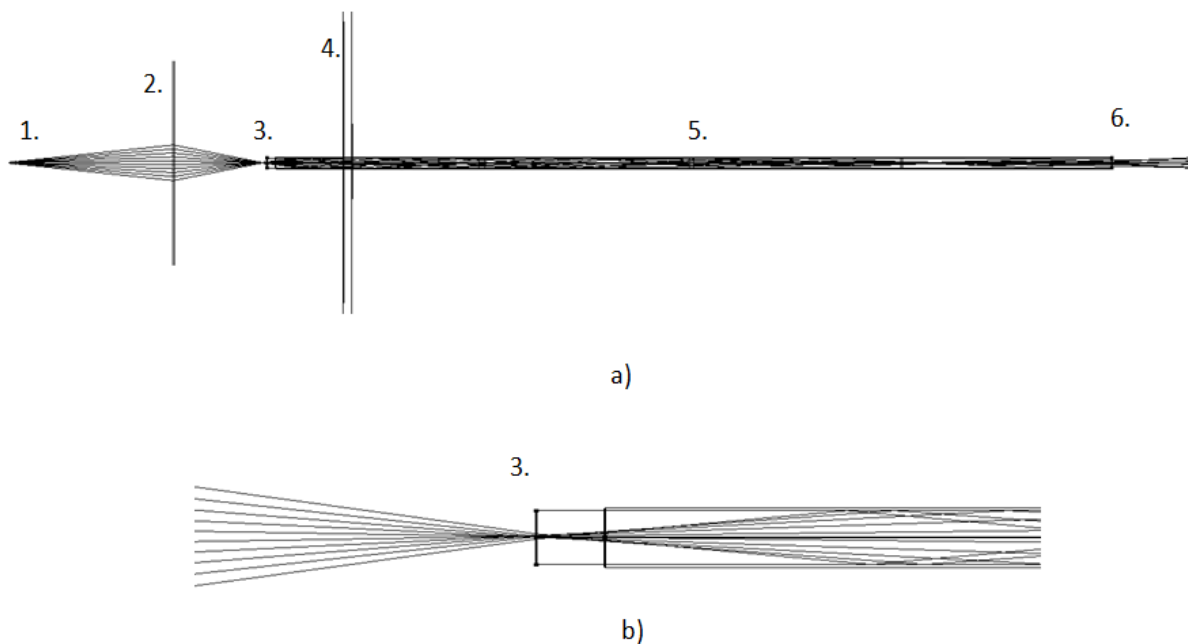
Následně jsem nadefinoval Fresnelovu čočku, z knihovny vybral sférickou čočku a následným nastavením z ní udělal Fresnelovu. Pro simulaci jsem použil dva druhy čoček o průměru 50 mm a ohniskové vzdálenosti 40 mm a větší čočku o průměru 80 mm a ohniskové vzdálenosti 70 mm.

Dalším krokem bylo umístění detektoru, který zaznamená výsledné údaje. Zvolil jsem plošný detektor, označený v programu jako film. Film může být buď kruhový, nebo pravoúhlé plochy. Využil jsem čtvercový o rozměrech stran 10 cm na výstupu z vedení a druhý o velikosti 40 cm ve vzdálenosti 1 m od výstupu z vedení.

Bylo nutné také nadefinovat index lomu vedení podle materiálu vláknového vlnovodu PMMA (Polymethylmethakrylát) $n = 1,49$ a index lomu pláště $n = 1,41$. Stínítko nastavené na 100 % absorpce, aby žádné paprsky neprocházely mimo světlovodné vedení.

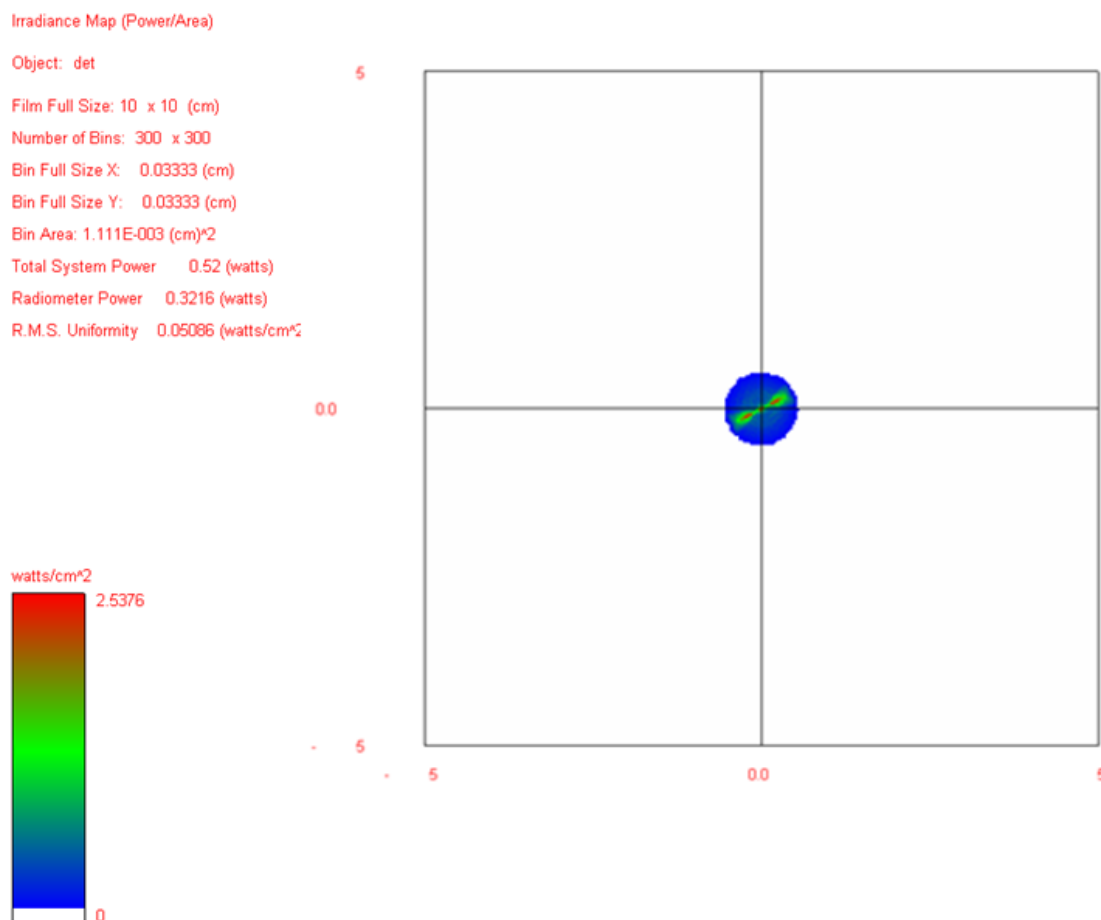
Pro vlastní simulaci jsem nastavil zdroj na počet paprsků v ose x 2000 a v ose y 2000, což se mi zdá dostačující počet, při tomto počtu paprsků trvá jedna simulace 15 min.

Ukázka analyzované soustavy je zobrazena na obr. 4.6a) kde 1. je zdroj světla, 2. fokusační čočka usměrnění paprsky od zdroje do ohniska čočky, 3. Je umístěn začátek optického vlnovodu do ohniska čočky, 4. stínítko s vlnovodným vedením, stínítko zachytí nežádoucí paprsky a na výstupu z optického vlnovodu jsou pouze paprsky přenášené vlnovodem 5., v bodě 6. prošlé paprsky světla skrz vedení dopadající na detektor. Na obrázku 4.6b) je detail průchodu světelných paprsků při vstupu do světlovodného vedení, jejich lom na rozhraní prostředí s jiným indexem lomu.



Obr. 4.6.: Paprsková metoda : a) světlovodné vedení v programu Opticad, b) detail při navázání paprsků do optického vlnovodu.

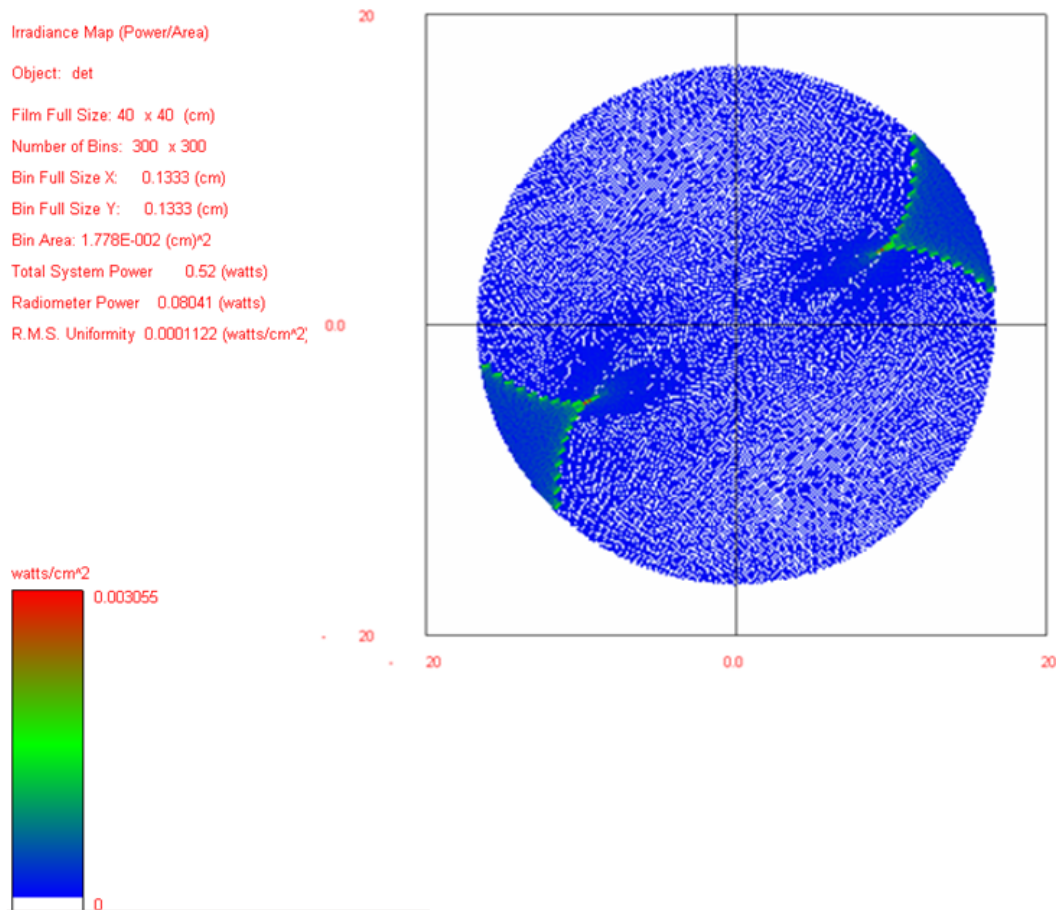
Na obrázku 4.7 je zobrazen pohled na detektor o rozměrech 10x10 cm umístěn na výstupu z vedení. V jeho pravé části obrázku jsou barevně odlišeny intenzity záření procházející navržených systémem podle velikosti. A v levé jeho části údaje o velikosti, citlivosti, dopadajícím zářivém toku a hodnota zářivého toku na 1cm² detektoru.



Obr. 4.7.: Pohled na detektor 5x5 cm na výstupu z vedení.

Při pohledu na detektor obr. 4.7 vpravo je vidět úzký svazek paprsků vystupující z vlákna s poměrně rovnoměrně rozloženým zářivým tokem světla.

Na obrázku 4.8 je ukázán pohled na detektor o velikosti 40x40 cm umístěný ve vzdálenosti 1 m od konce vláknového vlnovodu. Zde je vidět velký rozptyl paprsků vystupující z vlnovodu.



Obr. 4.8.: Detektor 20x20 cm umístěný ve vzdálenosti 1 m od konce vedení.

V tab. 4.6 jsou vypočtené hodnoty z programu OptiCAD, pro vlákno o průměru 1 mm, délce $l = 1$ m a průměru vstupních čoček 50 a 80 mm. V druhém a třetím sloupci jsou hodnoty pro intenzitu záření dopadající na zemský povrch $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, ve čtvrtém, pátém sloupci pro intenzitu slunečního záření $602 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, šestém a sedmém sloupci pro intenzitu záření $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Ve třetím řádku jsou hodnoty vstupního zářivého toku dopadajícího na vstupní čočku ve (W). Ve čtvrtém a pátém řádku jsou zaznamenány hodnoty zářivého toku ve (W), na výstupu z vlákna výstupní hodnota I. a ve vzdálenosti 1 m výstupní hodnota II., paprsků prošlých vláknem dopadajících na detektor.

Tab. 4.6.: Tabulka odsimulovaných hodnot ve watttech.

průměr čočky na vstupu [mm]	50	80	50	80	50	80
I [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] Intenzita slunečního záření	200	200	602	602	1000	1000
Φ_e [W] Vstupní hodnota	0,17	0,44	0,52	1,32	0,864	2,21
Φ_e [W] Výstupní hodnota I. [W]	0,1	0,26	0,32	0,93	0,55	1,78
Φ_e [W] Výstupní hodnota II. [W]	0,01	0,04	0,08	0,23	0,16	0,81

- I. Výstupní hodnota zářivého toku z vlákna.
- II. Výstupní hodnota zářivého toku ve vzdálenosti 1 m.

V tab. 4.7 jsou odsimulované hodnoty v lumenech při totožném nastavení soustavy.

Tab. 4.7.: Tabulka odsimulovaných hodnot v lumenech.

d [mm] průměr čočky na vstupu	50	80	50	80	50	80
I [$W \cdot m^{-2}$] Intenzita slunečního záření	200	200	602	602	1000	1000
Φ [lm] Vstupní hodnota	33,1	85	100,4	256,7	166,7	426,6
Φ [lm] Výstupní hodnota I.	24,3	51,5	62,1	178,5	110,7	298,1
Φ [lm] Výstupní hodnota II.	3,1	8,2	15,52	44,63	61	181,8

- I. Výstupní hodnota světelného toku na výstupu z vlákna.
- II. Výstupní hodnota světelného toku ve vzdálenosti 1 m.

Z odsimulovaných hodnot pro různé hodnoty intenzity záření lze říci, že zářivý tok (W) a světelný tok (lm) výrazně klesá se vzdáleností umístěného detektoru.

Při porovnání hodnot vypočtených programem OptiCAD pro intenzitu dopadajícího záření $1000 W \cdot m^{-2}$ při průměru 80 mm čočky na vstupu, odpovídá světelný tok 298,1 lm na výstupu z vlákna obyčejné žárovce 25 W žárovce. Světelný tok 25 W žárovky je udáván v rozmezí 200 – 250 lm, který odpovídá LED žárovce o příkonu 4 – 6 W [27].

5. Výroba světlovodného systému denního osvětlení

Tato kapitola je rozdělena na dvě části, kde první část se týká použitých součástek a mechanické výroby samotného přípravku pro optickou část přípravku a druhá elektrická část pojednává o výrobě systému sledování polohy slunce.

Optická část:

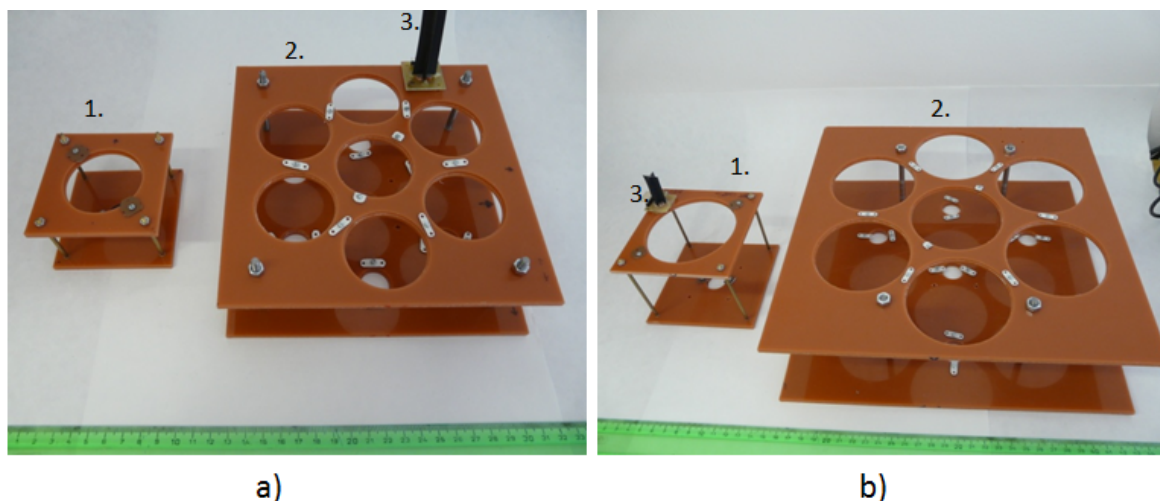
Vstupní koncentrátor tedy prvek, který má sloužit ke koncentraci a navázání světla do optických vlnovodů, byly použity Fresnelovy čočky vhodné pro použití v aplikacích s koncentrací světla. Čočky jsou vyrobeny z materiálu Polymethylmethakrylátu (PMMA) a jejich tloušťka je 2 mm. Zakoupeny byly menší čočky o průměru 50 mm, ohniskové vzdálenosti 40 mm, větší čočky o průměru 80 mm a ohniskové vzdálenosti 70 mm (více v příloze A).

Vláknové vlnovody byly použity dva druhy plastových optických vláken. Jedno o průměru jádra 980 μm určená převážně pro komunikační účely. A druhé velkopřůměrové vlákno o průměru jádra 3 mm určené pro použití v osvětlovací technice. Optická vlákna mohou být umístěna samostatně nebo ve svazku skládající se z více vláken a slouží k přivedení slunečního záření do místa osvětlení (více v příloze A).

Mezi vstupní koncentrátor a optické vlákno může být vložen optický filtr. K dispozici jsem měl různé protisluneční fólie od firmy Madico, u kterých byla změřena transmisní spektra (kapitola 6.1.) A na základě toho byly vybrány tři s nejlepšími vlastnostmi, které byly použity pro další měření.

Vyrobené přípravy pro uchycení Fresnelových čoček a optických vláken jsou znázorněny na obr. 5.1. Přípravky se dělí na vrchní a spodní část. Ve vrchní části jsou umístěny Fresnelovy čočky a do spodní části jsou vloženy vstupní strany optických vláken. Optická vlákna jsou umístěna do ohniskové vzdálenosti použitých čoček. Spodní a vrchní část přípravku je od sebe oddělena distančními sloupky umístěných v rozích přípravku.

Důležité pro navázání co největšího množství světla je přesné nastavení ohniskové vzdálenosti mezi čočkou a vstupem optického vlákna. Nastavení optimální ohniskové vzdálenosti je uděláno přes distanční sloupky. Ve spodní části přípravku jsou distanční sloupky uchyceny napevno a v horní část pomocí dvou matek, mezi kterými je horní část umístěna lze doladit optimální ohniskovou vzdálenost.



Obr. 5.1.: Přípravky pro uchycení čoček a vstupních stran optických vláken a) Fresnelovy čočky o průměru 50 mm, b) Fresnelovy čočky o průměru 80 mm.

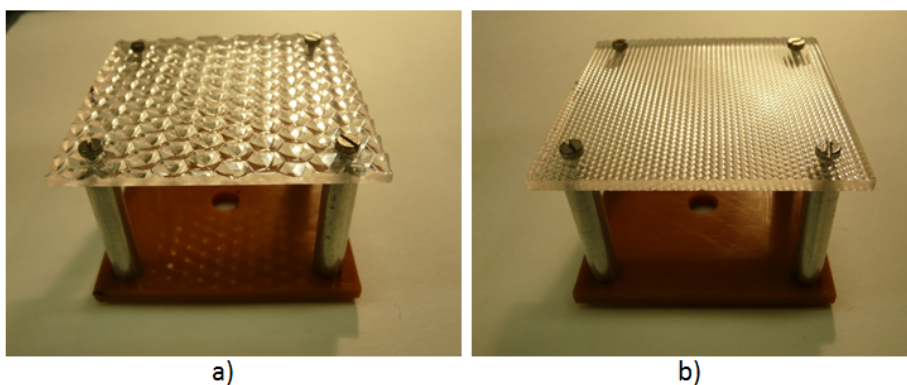
Obr. 5.1a) v bodě 1. je přípravek pro uchycení jedné 50 mm Fresnelovy čočky, v bodě 2. je přípravek pro uchycení sedmi Fresnelových čoček o průměru 50 mm a bodě 3. je připevněno sledovací zařízení polohy zdroje světla (více popsáno v kapitole 5.1). Na obr. 5.1b) v bodě 1. je přípravek pro jednu 80 mm čočku, v bodě 2. je přípravek pro uchycení sedmi Fresnelových čoček o průměru 80 mm a v místě 3. přichyceno sledovací zařízení zdroje světla (více popsáno v kapitole 5.1). Tyto přípravky byly vyhotoveny v mechanické dílně Katedry mikroelektroniky.

Vstupní část optických vláken je uchycena ve spodní části přípravku. Optická vlákna mohou být použita samostatně nebo ve svazku, detail uchycení vstupní části svazku optických vláken o průměru jádra 980 μm ve spodní části přípravku je na obr. 5.2.



Obr. 5.2.: Detail uchycení svazku optických vláken.

Výstup z optických vláken může být zakončen difuzorem, který slouží k rozptýlení slunečního záření v místě osvětlení. Pro tyto účely byly vyrobeny dva druhy výstupních difuzorů. První z desky akrylového skla prizmatického (obr. 5.3a) dodané firmou Allux a druhý z desky mikroprizmatického z PMMA (obr. 5.3b) od firmy Elkovo Čepelík.

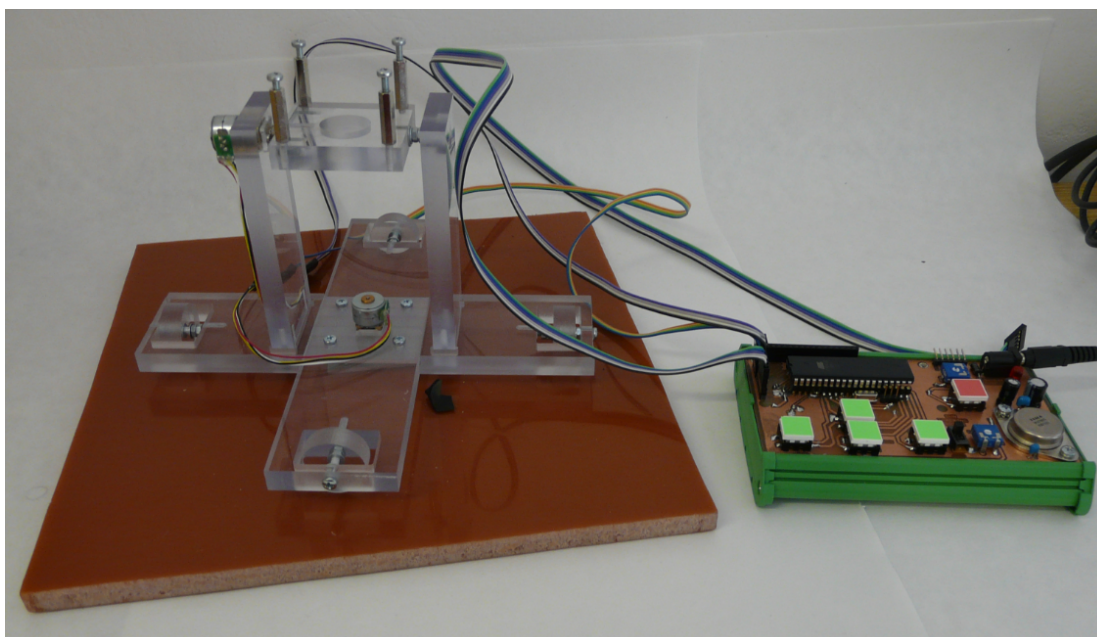


Obr. 5.3.: Výstupní difuzory a) Prizmatický difuzor, b) Mikroprizmatický difuzor.

5.1. Sledování polohy slunce

Tato část systému obsahuje držák pro uchycení přípravku z kapitoly 5. a společně s řídicí elektronikou lze manuálně ovládat natáčení přípravku na obr. 5.4. Tato část dále obsahuje možnost automatického natáčení za zdrojem světla, využívá k tomu sledovací zařízení popsané v této kapitole.

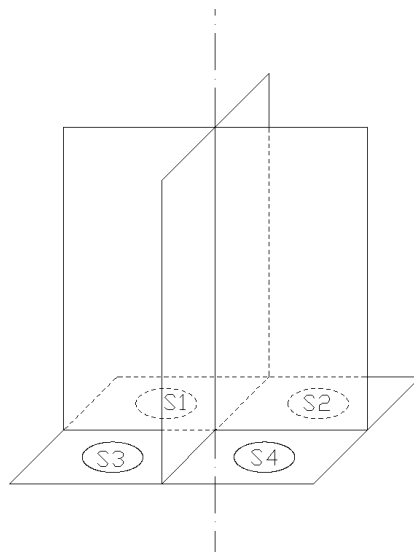
Celá tato část byla zkonstruována na Katedře mikroelektroniky ČVUT.



Obr. 5.4. Stojan na uchycení přípravku s optickými prvky s ovládací elektronikou pro jeho natáčení.

Aby bylo dosaženo maximální účinnosti navázání světla do svazku optických vláken, je systém vybaven monitorovacím zařízením, které sleduje aktuální polohu slunce a upravuje náklon přípravku s uchycenými čočkami tak, aby světlo v jejím ohnisku směřovalo vždy do svazku optických vláken. Sledovací zařízení je pevně spojeno s držákem čočky a je tvořeno čtyřmi detektory světla S1 až S4 (fotoodpory) (obr. 5.5), které jsou uspořádány do čtverce, jehož

jedna strana je vodorovná s horizontem a rovina čtverce je totožná s rovinou čočky. Lze rozlišit vždy dvě dvojice senzorů. Podle obrázku 5.5 tvoří senzory S1 a S2 horní dvojici, senzory S3 a S4 spodní dvojici, senzory S1 a S3 levou dvojici, senzory S2 a S4 pravou dvojici. Senzory jsou od sebe odděleny neprůsvitnými přepážkami, které tvoří kříž se středem mezi senzory. V případě osvětlení tohoto kříže z horní strany vzniká stín, který je vrhán vždy na některé ze senzorů. Pouze v případě, že stín dopadá přesně v ose kříže, tedy kolmo na rovinu senzorů a rovinu čočky, není zastíněn žádný senzor. Vyhledávací systém tedy porovnává výstupní signály ze senzorů světla S1 až S4 a upravuje náklon a natočení držáku čočky a vyhledávacího zařízení tak, aby nebyl zastíněn žádný ze senzorů. Pro vyhodnocení nutnosti změny úhlu náklonu ve vertikální rovině se porovnávají signály z horní a spodní dvojice senzorů tak, že se vždy porovnávají signály toho z dvojice, který odpovídá většímu osvětlení. Pro změnu úhlu natočení se porovnávají signály z levé a pravé dvojice senzorů a opět se pro porovnání z každé dvojice vybere ten signál, který odpovídá většímu osvětlení. Po každém porovnání se provede změna náklonu a natočení směrem k více osvětlenému senzoru o jeden minimální krok (cca 1 úhlový stupeň). Poté se opět porovnají signály ze senzorů. Takto se pokračuje v cyklu až do chvíle, kdy jsou signály ze všech senzorů stejné, tedy na žádný ze senzorů není vržen stín z oddělovacích přepážek. Přesnost úhlu natočení vůči dopadajícímu světlu je dána výškou oddělovacích přepážek, vzdáleností mezi senzory a minimálním krokem změny úhlu náklonu a natočení. Pro vyšší přesnost nastavení úhlu je potřeba mít minimální vzdálenost mezi senzory a maximálně prodloužit oddělovací přepážky mezi senzory směrem ke zdroji světla (Slunci). Minimální krok změny úhlu natočení a náklonu se volí tak, aby světlo v ohnisku čočky dopadalo na optická vlákna s dostatečnou rezervou v toleranci.



Obr. 5.5: Sledovací zařízení.

Naklápění lavice je uskutečněno dvěma krokovými motory. Oba krokové motory jsou vybaveny převody, které zabezpečují dostatečnou jemnost pohybu a zároveň stabilizují polohu v době, kdy jsou motory vypnuté.

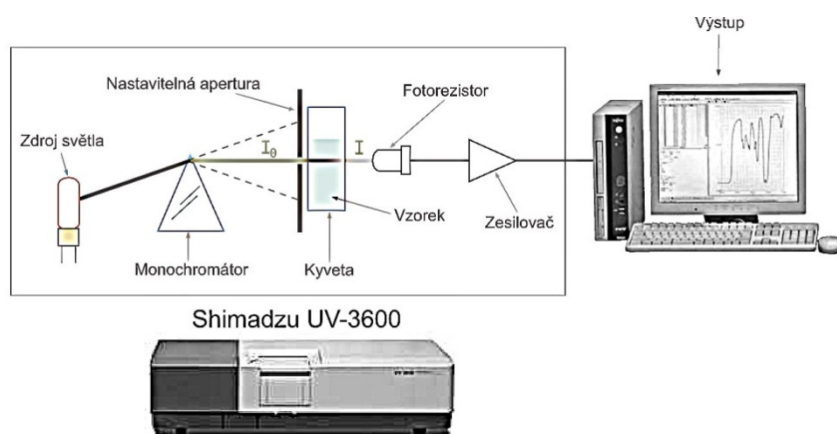
Pro řízení motorů i vyhodnocení signálů ze senzorů je použit mikrokontrolér ATMEGA32 se zabudovaným A/D převodníkem a budiče krokového motoru LV8548MC.

6. Měření vlastností vyrobeného systému denního osvětlení

Měření vyrobených zařízení pro osvětlení místnosti denním světlem proběhlo ve dvou různých prostředích a to v laboratorních podmínkách, při použití zdroje světla obyčejné žárovky a ve venkovních podmínkách s využitím slunečních paprsků od Slunce jako zdroje světla.

6.1. Měření transmisních spekter

Nejdříve jsem se však zaměřil na stanovení transmisních spekter použitých filtrů. Měření proběhlo na Katedře fyzikální elektroniky fakulty Jaderné a fyzikálně inženýrské v Praze na Karlově náměstí pomocí přístroje od firmy Shimadzu typ UV 3600. Pracoviště pro měření transmisních spekter je uvedeno na obrázku 6.1 a měření proběhlo v rozsahu vlnových délek od 300 nm do 1000 nm. Transmisní spektra byla změřena pro filtry v podobě dostupných protislunečních fólií z důvodu výběru vhodného filtru, aby došlo k odstínění UV a NIR záření a co nejmenšímu zkreslení přenášeného záření.



Obr. 6.1.: Schéma aparatury se spektrometrem Shimadzu UV-3600 použité pro měření transmisních spekter [29].

Princip zařízení pro měření transmisních spekter:

Polychromatické světlo z vhodného zdroje prochází přes Czerného Turnerův monochromátor. Prochází přes vzorek a dopadá na detektor. Světlo vycházející ze zdroje prochází měřeným vzorkem a dopadá na detektor (UV a viditelné záření – R-928 fotonásobič, IR–InGaAs fotodioda a chlazené PbS fotovodivé prvky). Intenzita se vyhodnotí pomocí systému převodníků a zpracuje softwarem v počítači [29].

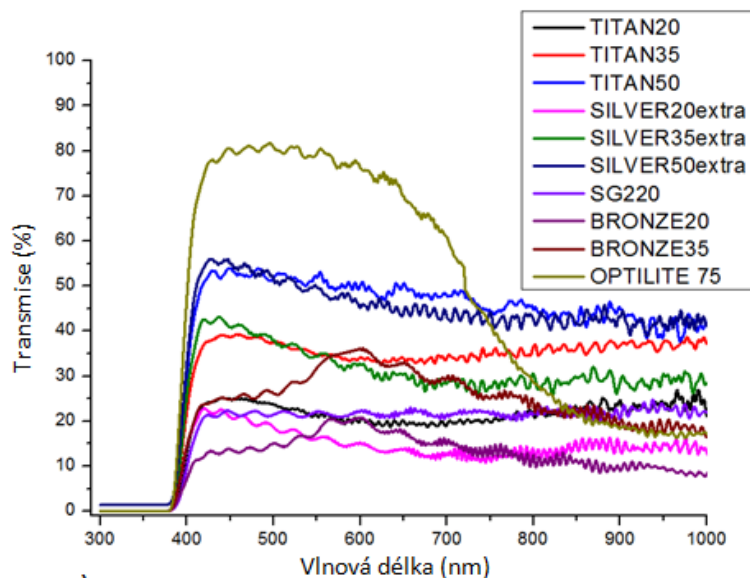
Množství světla určité vlnové délky, které prošlo vzorkem, popisuje veličina transmitance. Ta je definovaná jako [29]:

$$T = \frac{I}{I_0} , \quad (6.1)$$

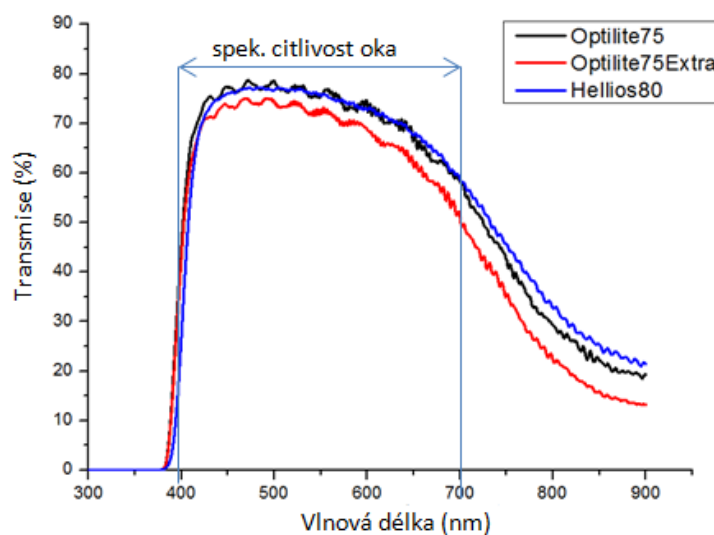
kde T je transmittance, I je intenzita světla, které prošlo vzorkem, I_0 je intenzita světla, které do vzorku vstoupilo.

První měření proběhlo s různými druhy protislunečních fólií od firmy Madico. Graf naměřených hodnot je zobrazen na obr. 6.2a). Nejlépe v tomto měření dopadla fólie Optilite 75.

Druhé měření pak proběhlo pouze s vybranými třemi druhy fólií (obr. 6.2b).



a)



b)

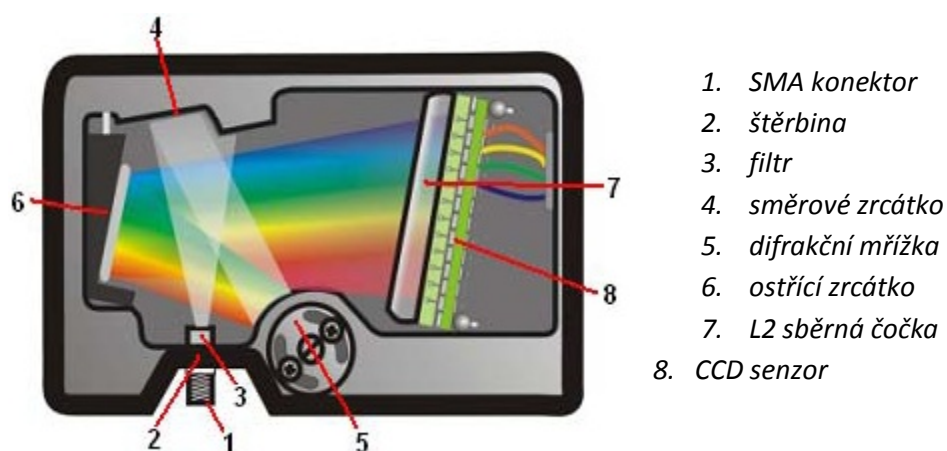
Obr. 6.2.: Naměřené hodnoty protislunečních fólií Madico: a) přehled protislunečních fólií Madico, b) vybrané fólie s nejlepšími vlastnostmi.

Na obr. 6.2b) je vyznačena spektrální citlivost oka normálního fotopického pozorovatele 400 – 700 nm. Fólie Optilite75 a fólie Helios80 dosahují obdobných výsledků a zdají se pro mé účely jako nejvhodnější. Vybrané fólie přenesou nejvíce světla ve viditelném spektru, pohltí UV záření před 380 nm a významně pohltí NIR složku světla za 780 nm.

6.2. Měření optických vlastností

Toto měření jsem uskutečnil dvěma způsoby. Nejdříve jsem prováděl měření na Katedře mikroelektroniky ČVUT FEL v Praze pomocí spektrálního analyzátoru OceanOptics USB2000 s využitím optické lavice a jako zdroj světla byla použita žárovka. Měření proběhlo v laboratoři Planárních optoelektronických a optických integrovaných struktur (PLANIO). Jedná se o místnosti se zatměnými okny, aby nedošlo k narušení měření vlivem venkovního světla. A v další části pak ve venkovním prostoru v areálu školy ČVUT s využitím denního světla od Slunce.

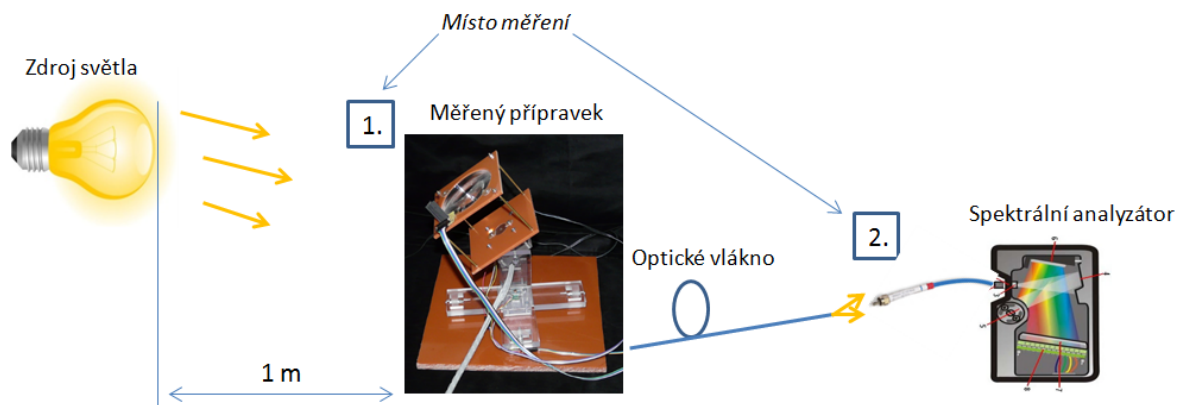
Tento analyzátor pracuje v rozsahu vlnových délek od 300 nm do 870 nm se spektrálním rozlišením až 0,3 nm. Princip spektrálního analyzátoru je uveden na obr. 6.3.:



Obr. 6.3.: Ilustrace funkce spektrometru OceanOptics USB2000 [6].

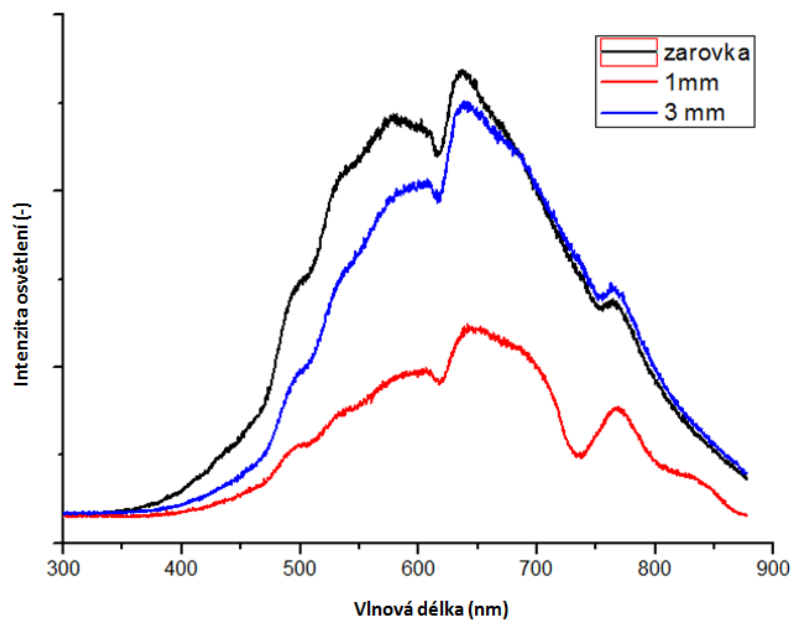
Optickým vláknem přivedeme zdroj světla do SMA konektoru (1). Štěrbina (2) reguluje množství propouštěného světla, popř. upravuje spektrální rozsah, filtr (3) vymezuje pracovní oblast na předdefinovaný rozsah vlnových délek. Směrové zrcátko (4) zaměří dopadající světlo na difrakční mřížku (5), kde dojde k vlnovému rozkladu světla. Je zřejmé, že volbou difrakčních mřížek s různou mřížkovou hustotou máme možnost měnit rozsah a citlivost spektrálního analyzátoru. Rozložené spektrum je dále soustředěno ostřícím zrcátkem (6) na L2 sběrnou čočku nebo přímo na CCD čip (dle konfigurace spektrálního analyzátoru). Analyzátor je řízen přes počítač pomocí software OOIBase32 [6].

Princip měření je naznačen na obr. 6.4. Pro měření v laboratoři byla použita žárovka o výkonu 40 W, její spektrum bylo změřeno před vstupem do přípravku bod 1. měření. Žárovka svítí na měřící přípravek, kde Fresnelovy čočky usměrní záření do optických vláken a na konci vlákna je změřena spektrální charakteristika prošlého světla (místo 2. měření).



Obr. 6.4.: Schéma měření spektrálních charakteristik v laboratoři.

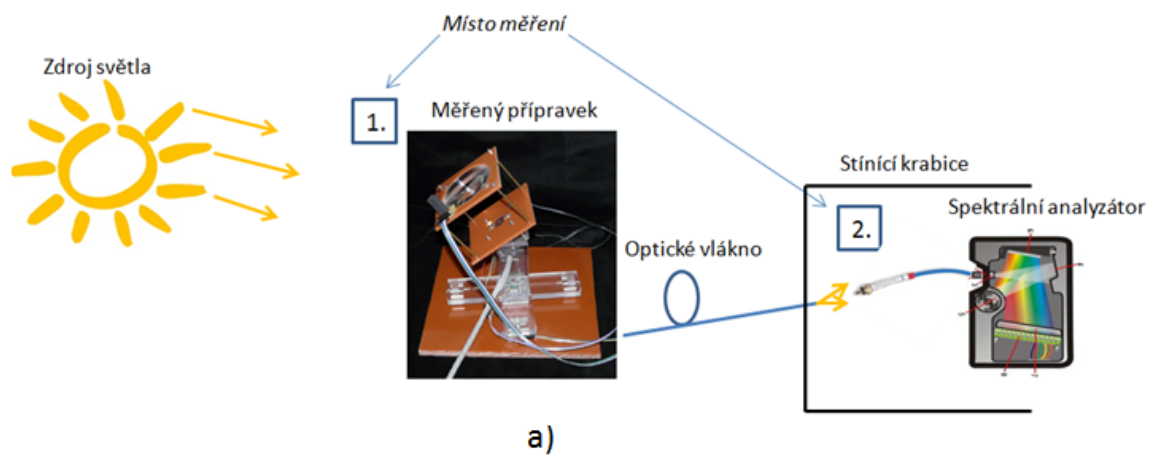
Spektrální charakteristika před vstupem do přípravku a spektrální charakteristika prošlého světla vláknem pro 1 mm a 3 mm vlákno je porovnána v grafu na obr. 6.5.



Obr. 6.5: Naměřené spektrální hodnoty v laboratorních podmínkách.

Z naměřených hodnot na obr. 6.5 lze říci, že průchodem světla žárovky vlákem se jeho spektrum nezmění, mění se pouze velikost intenzity záření.

Venkovní měření probíhalo podle obr. 6.6a). Pro venkovní měření bylo vytvořeno pracoviště zobrazené na obr. 6.6b). Kde v horní části na pojízdném vozíku je umístěn přípravek pro měření osvětlení. A dolní částí měřicí krabice zastíněná neprůsvitnou látkou, aby nedošlo k narušení měření vlivem okolního světla. Přípravek pro venkovní měření byl doplněn o optický filtr Helios80, který byl umístěn za vstupní čočku.



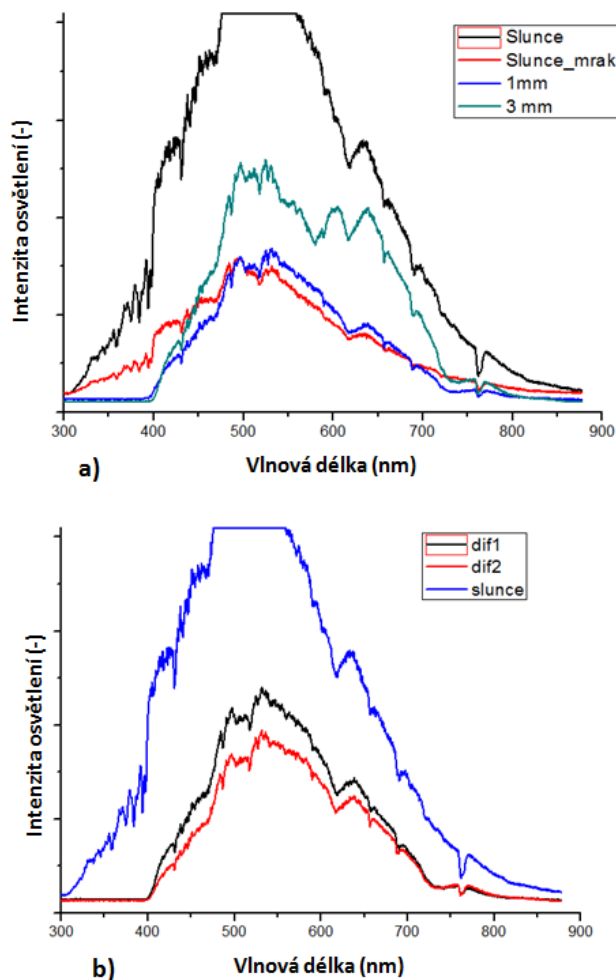
a)



b)

Obr. 6.6: Venkovní měření: a) Schéma měření ve venkovním prostředí, b) Pracoviště pro venkovní měření.

Na obr. 6.7a) jsou zobrazeny naměřené spektrální charakteristiky pro použitá optická vlákna, v porovnání s naměřenou spektrální charakteristikou slunečního záření. Na obr. 6.7b) jsou naměřená spektra pro přípravek doplněný na výstupu z optických vláken o oba typy vyrobených difuzorů. Dif1 se jedná o přípravek s mikroprizmatickým difuzorem a přípravek dif2 se jedná o přípravek s prizmatickým difuzorem.

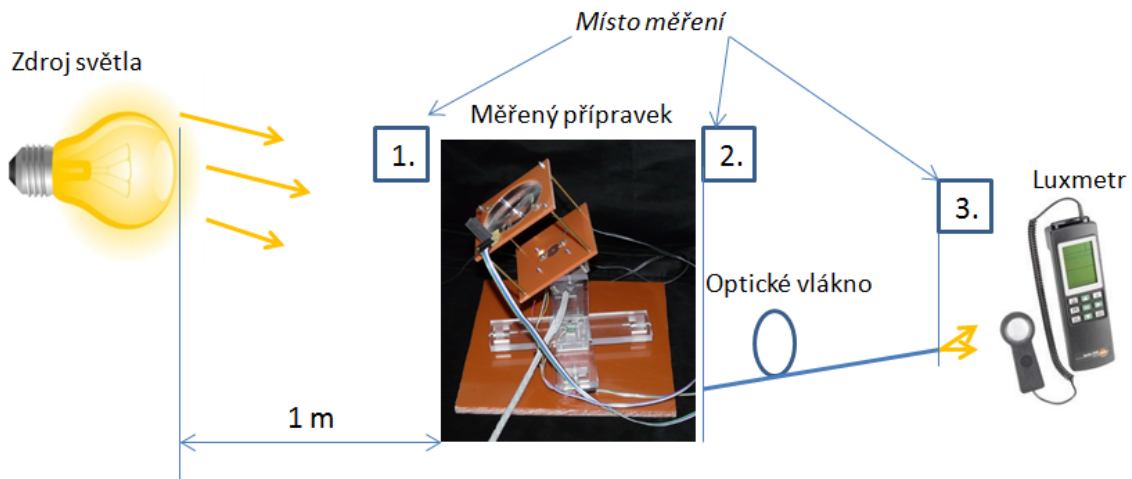


Obr. 6.7.: Spektrální charakteristika při venkovním měření: a) použitá vlákna b) použité difuzory.

V obou případech je pro spektrální charakteristiku slunečního záření, spektrální analyzátor přesycen pro vlnovou délku okolo 500 nm. Při porovnání tvaru spekter se křivky příliš neliší, lze tedy říci, že světlo prošlé systémem změnilo své spektrum pouze minimálně. Na obr. 6.7b) je pak dobře vidět vliv použitého optického filtru, kdy spektrum prošlé systémem, křivky dif1 a dif2 začínají až od vlnové délky přibližně 400 nm. Je tak dosaženo pohlčení UV složky slunečního záření.

6.3. Měření osvětlení

Měření proběhlo na Katedře mikroelektroniky v laboratoři PLANIO se zatměnými okny, aby nedošlo ke zkreslení měření vlivem venkovního světla. A dále s využitím optické lavice, na kterou jsem umístil vyrobený měřený přípravek a ve vzdálenosti 1 m, jsem umístil zdroj světla 40 W žárovku napájenou síťovým napětím. Před měřeným přípravkem jsem pomocí luxmetru Testo 545 měřil intenzitu osvětlení bod 1., poté záření koncentrované čočkou před vstupem do vlákna bod 2. a procházející záření optickým vláken bod 3. Schéma měření je uvedeno na obr. 6.8.



Obr. 6.8: Schéma měření luxmetrem Testo 545 v laboratoři.

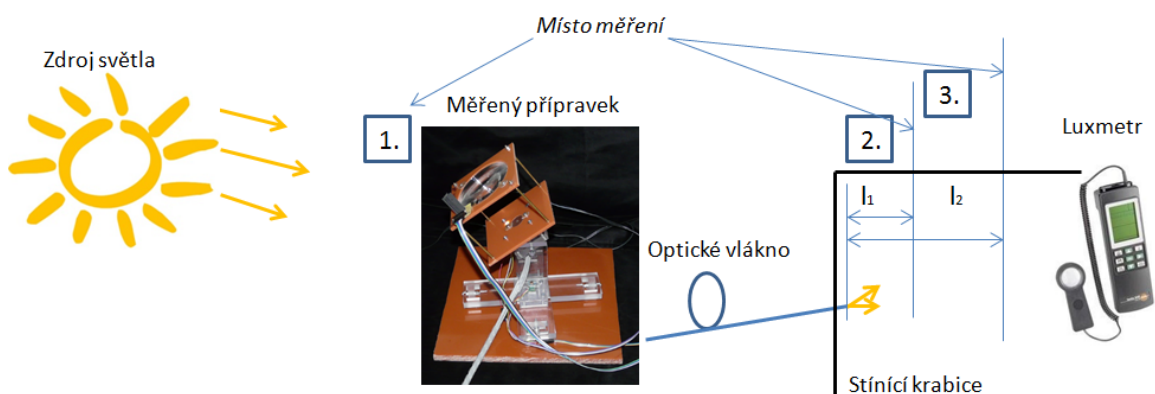
U tohoto měření jsem použil vyrobené přípravky s průměrem vstupní čočky 50, 80 mm a různých typů POF vláken. Plastová optická vlákna s průměrem jádra 980 μm . Z těchto vláken jsem utvořil svazek sedmi vláken uspořádaných do kruhu o průměru 3 mm. Druhý typ optického vlákna pak s průměrem jádra 3 mm toto vlákno je určeno pro aplikace v oblasti osvětlování. Délka vláken pro měření byla 1 m. Naměřené hodnoty intenzity osvětlení jsem zaznamenal do tab. 6.1.

Tab. 6.1: Naměřené hodnoty osvětlenosti v laboratoři luxmetrem Testo 545.

Průměr čočky [mm]	Optické vlákno [mm]	Místo měření 1. [lx]	Místo měření 2. [lx]	Místo měření 3. [lx]
50	7 x 1	72	410	173
50	3	71	410	189
80	7 x 1	70	890	335
80	3	71	890	351

Z naměřených hodnot v tab. 6.1 lze říci, že přípravek s 80 mm Fresnelovou čočkou na vstupu dosahuje větších hodnot naměřené intenzity osvětlení, což je dáno větší plochou, na kterou světlo dopadá. Co se týče použitých optických vláken, nepatrně lepší hodnoty vycházejí pro vlákna o průměru 3 mm.

Druhou část měření osvětlenosti luxmetrem Testo 545 jsem provedl ve venkovním areálu školy ČVUT s využitím slunečního záření jako zdroje světla. Ukázka měřícího pracoviště obr. 6.6b). Schéma měření naznačeno na obr. 6.9. Měření luxmetrem proběhlo ve třech bodech, před vstupem do přípravku bod 1., měření prošlého optického záření za přípravkem s optickým vláknem bod 2. ve vzdálenosti l_1 a měření ve vzdálenosti $l_2 = 10$ cm bod 3.



Obr. 6.9.: Schéma měření osvětlenosti ve venkovním prostředí luxmetrem Testo 545.

V tab. 6.2 jsou uvedeny hodnoty naměřené osvětlenosti pro různé hodnoty venkovní osvětlenosti, pro hodnotu 110 000 lx se jednalo o jasný slunečný den. Naopak pro hodnotu 20 000 lx se jednalo o zatažený den s minimálním slunečním svitem skrze mraky.

Tab. 6.2: Naměřené hodnoty osvětlenosti ve venkovním prostředí.

Venkovní osvětlenost [lx]	Průměr čočky [mm]	Optické vlákna [mm]	Výstup z vlákna l_1 [lx]	Výstup z vlákna l_2 [lx]
110000	50	7 x 1	2108	276
110000	50	3	3230	390
110000	80	7 x 1	24343	8202
110000	80	3	41103	13519
20000	50	7 x 1	570	51
20000	50	3	610	63
20000	80	7 x 1	813	87
20000	80	3	838	95

Z naměřených hodnot v tab. 6.2 je při venkovní osvětlenosti 110 000 lx, vidět mnohem větší rozdíl mezi přípravkem s 50 mm a 80 mm čočkou na vstupu. Přípravek s 80 mm čočkou na vstupu dosahuje několikanásobně větší hodnoty intenzity osvětlení. Při porovnání naměřených hodnot ve vzdálenosti na výstupu vlákna l_1 a l_2 , je vidět že intenzita osvětlení klesá se vzdáleností od zdroje světla. A při porovnání použitých optických vláken vychází lépe vlákno o průměru 3 mm. Naměřené hodnoty při venkovní osvětlenosti 20 000 lx, pak ukazují výrazné snížení naměřené osvětlenosti.

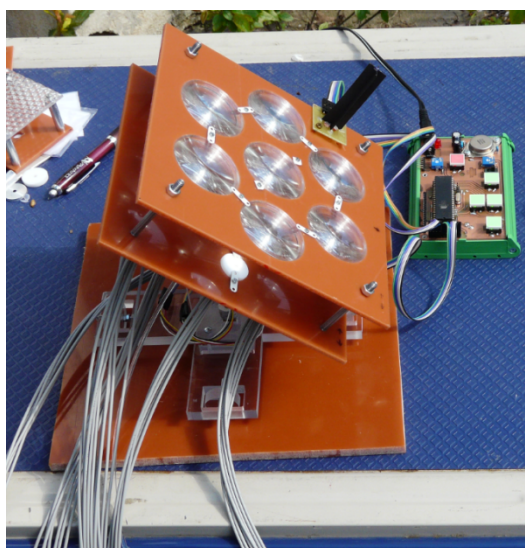
V tab. 6.3 jsou naměřené hodnoty osvětlenosti luxmetrem Testo 545 při použití vyrobených difuzorů na výstupu z optických vláken. Osvětlenost byla měřena ve vzdálenosti 10 cm od měřeného difuzoru při venkovní intenzitě osvětlení 110 000 lx.

Tab. 6.3: Naměřené hodnoty při použití difuzorů na výstupu z vlákna.

Venkovní osvětlenost [lx]	Průměr čočky [mm]	Optické vlákna[mm]	Dif1 mikroprizma [lx]	Dif2 prizma [lx]
110000	50	7 x 1	320	369
110000	50	3	425	327
110000	80	7 x 1	2212	1405
110000	80	3	3103	1252

Při porovnání hodnot z tab. 6.2 a tab. 6.3 vycházejí hodnoty osvětlenosti nižší v tab. 6.3, z důvodu rozptylu světla do většího prostoru při použití prizmatického a mikroprizmatického difuzoru.

V závěru jsem pak změřil intenzitu osvětlení pro přípravek se sedmi čočkami na vstupu o průměru 50 mm (obr. 6.10), při použití vláken o průměru 980 μm . V ohniskové vzdálenosti každé čočky byl umístěn svazek sedmi vláken o délce 1 metr, na výstupu z vlákna byla změřena intenzita osvětlení luxmetrem Testo 545 ve vzdálenosti l_1 a měření ve vzdálenosti $l_2 = 10$ cm.



Obr. 6.10: Přípravek pro měření sedmi čoček o průměru 50 mm se sledovacím zařízením polohy slunce.

V tab. 6.4 jsou naměřené hodnoty venkovní osvětlenosti při 60 000 lx, při polojasné obloze. Byly změřeny pouze hodnoty pro vlákna o průměru jádra 980 μm v důvodu zhoršujících se meteorologických podmínek. Pro dosažení podrobnějších výsledků by bylo třeba provést další měření.

Tab. 6.4: Naměřené hodnoty venkovní osvětlenosti pro přípravek se sedmi čočkami na vstupu.

Venkovní osvětlenost [lx]	Průměr čočky [mm]	Optické vlákna[mm]	Výstup z vlákna l_1 [lx]	Výstup z vlákna l_2 [lx]
60000	7 x 50	49 x 1	13051	2153

7. Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo navrhnout systém denního osvětlení s využitím polymerních optických vláken.

V úvodu diplomové práce jsem se zaměřil na seznámení s problematikou osvětlení světlovodnými systémy. V hlavní části práce jsem provedl návrh systému pro osvětlení vnitřních prostor. Skládající se ze vstupního koncentrátoru v podobě Fresnelových čoček, přenosové části z polymerních optických vláken o průměru jádra 980 μm určený převážně pro použití v optických komunikačních systémech na krátkou vzdálenost a zatím bez výstupního difuzoru. Takto navržený systém jsem modeloval v programu OptiCAD paprskovou metodou. Dále jsem provedl výpočet předpokládané účinnosti systému. Výpočet účinnosti systému jsem provedl pro 4 různé varianty podle počtu, typu Fresnelových čoček a pro různé hodnoty intenzity dopadajícího slunečního záření. Nejlepšího výsledku dosahuje varianta se sedmi čočkami o průměru 80 mm, kdy byla na vstupu intenzita dopadajícího slunečního záření $1\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (tato intenzita slunečního záření odpovídá v poledne jasnému slunečnému dni v letních měsících). Pro délku optického vlákna 1 m vychází světelný tok 1588 lm. Běžná 100 W žárovka dosahuje světelného toku 1300 – 1700 lm. V porovnání s LED žárovkami při stejném světelném toku odpovídá LED žárovce o příkonu 16 - 20 W [27].

Při porovnání hodnot při výpočtu v programu OptiCAD a mém výpočtu vycházejí nepatrně lepší hodnoty pro simulace na počítači, což je dáno absencí difuzoru při modelování a zřejmě přesnějším způsobem výpočtu. Například pro konfiguraci systému pro jednu čočku o průměru 80 mm na vstupu, intenzitě slunečního záření $602\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, délce vlákna 1 m vychází vypočtená hodnota světelného toku programem OptiCAD 178,5 lm a mnou vypočtená hodnota světelného toku 138 lm.

Byly vyrobeny 4 druhy optických přípravků pro uchycení vstupních koncentrátoru, vstupu optických vláken, stojan pro uchycení optického přípravku společně s elektronikou pro ovládání natáčení stojanu a možností automatického natáčení za zdrojem světla.

Pro dva menší přípravky na osazení jednou Fresnelovou čočkou o průměru 50 mm a 80 mm byly změřeny vlastnosti v laboratoři při použití světelného zdroje v podobě žárovky. Po vložení optického vlákna do přípravku byla změřena spektrální charakteristika spektrálním analyzátozem OceanOptics USB2000, při porovnání naměřených hodnot vychází pro obě použitá vlákna o průměru 980 μm a druhé o průměru 3 mm v porovnání se zdrojem světla, že nedojde ke změně přenášeného spektra. Pro měření intenzity osvětlení v laboratoři byly vyrobeny z vláken o průměru 980 μm svazky o sedmi vláknech uspořádané do kruhu, pro dosažení vyšší intenzity osvětlení. Při porovnání naměřených hodnot intenzity osvětlení luxmetrem Testo545 pro vlákna o průměru 3 mm a sedmi vláknech o průměru 980 μm , vycházejí větší hodnoty intenzity osvětlení pro vlákna o průměru 3 mm.

Při venkovním měření bylo nutné přípravky doplnit o optické filtry z důvodu ochrany optických vláken před nežádoucím vlivem UV a NIR záření. U optických filtrů byly změřeny transmisní spektra, která vyšly nejlépe pro 3 druhy fólie Optilite 75, Optilite75extra a Helios80. Tyto fólie dosahují podobných vlastností, kdy odfiltrují nežádoucí složku UV záření a přenáší pouze spektrum

od 380 nm do 800 nm s největší účinností. Filtr částečně přenáší i složku NIR, ale s velkým útlumem a nedojde tak ke zničení optického vlákna z PMMA vlivem přehřátí.

Při venkovním měření byly změřeny vlastnosti vyrobených přípravků doplněny o vyrobené prizmatické a mikroprizmatické výstupní difuzory. Při měření spektrální analyzátozem USB2000 byl problém s přesycením analyzátozem při měření spektra slunečního záření. Jinak při porovnání naměřených hodnot vychází stejně jako v laboratorních podmínkách, že navržený systém osvětlení nezmění spektrum přenášeného záření.

Naměřené hodnoty osvětlenosti luxmetrem Testo 545 při venkovních měření vycházejí nejlépe pro přípravek osazený 80 mm Fresnelovou čočkou a s 3 mm optickým vláknem. Přípravek se sedmi čočkami o průměru 50 mm na vstupu se podařilo změřit pouze pro intenzitu osvětlení při polojasné obloze při osvětlení 60 000 lx. Větší přípravek pro sedm 80 mm čoček nebyl změřen z důvodu, že stojan s krokovými motory neutáhl jeho váhu.

Systém sledování polohy slunce při použití ve venkovních podmínkách dokázal najít podle sledovacího zařízení zdroj světla automaticky, ale většinou bylo třeba doladit tlačítka přesně polohu, aby optická část směřovala přímo do středu zdroje světla.

V případě použití světlovodných vedení v budovách jde o zajímavou alternativu osvětlení přirozeným denním světlem. Ušetřilo by to i náklady na energie při provozu v porovnání s klasickým způsobem osvětlení. Nevýhodou však je nestálost osvětlení v závislosti na venkovních podmínkách.

Na základě této práce byla podána přihláška užitného vzoru PUV 2016-32249.

Literatura

- [1] Historie osvětlení [online]. [cit. 20.9.2015]. Dostupné z WWW: <http://www.teslux.cz/historie-osvetleni>.
- [2] DARULA, Stanislav. *Osvětlování světlovody*. 1. vyd. Praha: Grada, 2009, 160 s. ISBN 978-80-247-2459-1.
- [3] SOKANSKÝ, Karel, Tomáš NOVÁK, Marek BÁLSKÝ, et al. *Světelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [4] LED Modul 120 Watt (LED Modul 120 Watt (2:1 weiss/blau) mit 2 Zuleitungen. BSLED [online]. [cit. 15. 08. 2015]. Dostupné z www: <http://www.bsled.de/products-mainmenu-64/aquarium-led-module/led-modul-120-watt-21-weissblau-mit-2-zuleitungen.html>.
- [5] PLCH, Jiří, Petr SUCHÁNEK a Jitka MOHELNÍKOVÁ. *Osvětlení neosvětlitelných prostor*. Brno: ERA group, 2004. ISBN 80-865-1782-9.
- [6] Novotný, Martin. *Modelování a návrh světlovodného vedení pro ekonomické osvětlování budov budoucnosti*. Praha: ČVUT 2013. Bakalářská práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, Katedra mikroelektroniky.
- [7] ANDRÉ, Erik a Jutta SCHADE. *Daylighting by optical fiber* [online]. Luleå University of Technology, 2002 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://pure.ltu.se/portal/files/30890792/LTU-EX-02260-SE.pdf>. Master's Thesis.
- [8] BOHÁČ, Leoš a Michal LUCKI., M. *Optické komunikační systémy*. Praha: 2010. Skriptum, ČVUT, Fakulta elektrotechnická.
- [9] FAJKUS, Marcel. Optické vlákna [online]. [cit. 10.11.2015] dostupné z www: <http://opte.imatte.cz/teorie/opticke-vlakna/90-opticke-vlakna>.
- [10] SCHRÖFEL, Josef a Karel NOVOTNÝ. *Optické vlnovody*. Praha: SNTL/ALFA Praha 1986. 232 s.
- [11] WERRING, Christopher G. *Design and application of fiber optic daylighting system* [online]. Kansas State University, 2009 [cit. 2016-01-19]. Dostupné z: <https://krex.k-state.edu/dspace/bitstream/handle/2097/1473/Werring?sequence=1>
- [12] Plch, J., Mohelníková, J., *Denní osvětlení schodišťového prostoruvýškové budovy atypickým světlovodem*. Světlo. 2009,03, str. 22-23. ISSN 1212-0812.
- [13] Liter of light. My Shelter Foundation [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://aliteroflight.org/about-us>
- [14] Solar lighting system. *Himawari* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.himawari-net.co.jp/e-pdf/Himawari-Proposal-New-140207.pdf>

- [15] MAXEY, Curt, Melissa V. LAPSA, Philip BOUDREAUX, Duncan D. EARL, John MORRIS a Tanya BUNCH. *Hybrid Solar Lighting: Final Technical Report and Results of Field Trial Program* [online]. Oak Ridge Institute for Science, 2008 [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: http://web.ornl.gov/sci/btc/pdfs/maxey_doc12657_hsl_08.pdf
- [16] LINGFORS, David. *Illumination properties and energy savings of a solar fiber optic lighting system balanced by artificial lights* [online]. Uppsala University, 2012 [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:639649/FULLTEXT03>
- [17] HALLQVIST, Rebecca a Magnus RENSTRÖM. *Development of a Hybrid Luminaire for Parans Solar Lighting* [online]. Chalmers University of Technology Göteborg, 2011 [cit. 2015-12]. Dostupné z: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/188715/188715.pdf>. Master's Thesis.
- [18] Let the Sun shine in. [online]. [cit. 15.10.2015] dostupné z [www](http://www.siemens.com/innovation/apps/pof_microsite/_pof-spring-2011/_html_en/lighting-systems.html): http://www.siemens.com/innovation/apps/pof_microsite/_pof-spring-2011/_html_en/lighting-systems.html.
- [19] *Elements 40: Seeing by the light of day* [online]. 2012, (3) [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://corporate.evonik.be/sites/dc/Downloadcenter/Evonik/Global/en/Magazines/elements/element-s-40.pdf>
- [20] Daylighting with POF. [online]. [cit. 15.5.2015] dostupné z [www](http://www.pofac.fhnuernberg.de/downloads/sollektor/2007/POF07_Paper_Daylighting.pdf): http://www.pofac.fhnuernberg.de/downloads/sollektor/2007/POF07_Paper_Daylighting.pdf
- [21] MAXEY, Kurt. *Hybrid Solar Lighting* [online]. Oak Ridge National Laboratory in Tennessee, 2008 [cit. 2016-25-1]. Dostupné z: <http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=33892>
- [22] Cool light on hot days: Fiber optic bring the Sun indoors. *Jiangxi Daisheng POF Co.* [online]. [cit. 2016-03-03]. Dostupné z: <http://www.dspof.com/en/support-pgdetail-153.html>
- [23] MAXEY, Curt, Melissa V. LAPSA, Philip BOUDREAUX, Duncan D. EARL, John MORRIS a Tanya BUNCH. *Hybrid Solar Lighting: Final Technical Report and Results of Field Trial Program* [online]. Oak Ridge Institute for Science, 2008 [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: http://web.ornl.gov/sci/btc/pdfs/maxey_doc12657_hsl_08.pdf
- [24] ULLAH, Irfan a Allen Jong-Woei WHANG. *Development of Optical Fiber-Based Daylighting System and Its Comparison* [online]. National Taiwan University of Science and Technology, 2015 [cit. 2016-03-19]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1073/8/7/7185/htm>
- [25] ULLAH, Irfan a Seoyong SHIN. *Development of Optical Fiber-based Daylighting System with Uniform Illumination* [online]. Myongji University Korea, 2013 [cit. 2016-03-19]. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/josk/abstract.cfm?uri=josk-16-3-247>
- [26] Pavloušek, Jiří. *Určení a využití horizontální osvětlenosti v průběhu roku*. Praha: ČVUT 2014. Bakalářská práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky.
- [27] *Žárovky* [online]. 2015 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.wikina.cz/a/%C5%BD%C3%A1rovky>

[28] Ngoc Kien, Pham. *Návrh mnohavidové optické rozbočnice pomocí metody RayTrancing*. Praha: ČVUT 2012. Diplomová práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, Katedra mikroelektroniky.

[29] Grexa, Juraj. *Teoretický návrh optické odbočnice*. Praha: ČVUT 2010. Diplomová práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, Katedra mikroelektroniky.

Seznam příloh

A – Seznam použitých komponent pro optickou část systému

B - Simulace v programu OptiCAD

C – Tabulka poměrné světelné účinnosti monochromatického záření

Příloha A – Seznam použitých komponent pro optickou část systému

Fresnelovy čočky:

- 7 kusů, průměr 50 mm, ohnisková vzdálenost 40 mm, tloušťka 2 mm, materiál PMMA
- 7 kusů, průměr 80 mm, ohnisková vzdálenost 70 mm, tloušťka 2 mm, materiál PMMA

Více informací dostupných z:

<http://www.ebay.com/itm/1X-Fresnel-Lens-DIY-TV-Projection-Solar-Cooker-Outdoor-Fire-High-Light-Condenser-/201250107683?var=&hash=item2edb70f123>

Optické POF vlákna:

- Typ vlákna: PFU-UD1001-22V – délka 100m, průměr jádra 1 mm, optický útlum $\alpha = 0,15$ dB/m (650 nm)

Více informací dostupných z:

http://www.amstechnologies.com/fileadmin/amsmedia/downloads/Plastic_Optical_Fibers_All.pdf

- Typ vlákna: EH-3.0-meter – délka 16 m, průměr jádra 3 mm

Více informací dostupných z:

http://www.ebay.com/itm/2M-3mm-end-glow-light-optical-fiber-optic-cable-for-RGB-colorful-light-transfer-/201481799645?hash=item2ee94047dd%3Ag%3AathoAAOSwo0JWGQV0&nma=true&si=UjVIPDfnqXCkHkjYxEhInGTbwJA%253D&orig_cvip=true&rt=nc&_trksid=p2047675.l2557

Optické filtry :

Protisluneční folie Madico:

Typ fólie	Zadržaná sluneční energie	Přenos viditelného světla
SILVER 20 XTRA.	78%	20%
SILVER 35 XTRA.	68%	32%
SILVER 50 XTRA.	56%	50%
TITAN 20 XTRA.	74%	19%
TITAN 35 XTRA.	61%	35%
TITAN 50 XTRA.	53%	51%
BRONZE 20 XTRA.	78%	20%
BRONZE 35 XTRA.	71%	32%
OPTILITE 75 XTRA.	47%	75%
HELIOS 80	55%	70%

Více informací dostupných z:

<http://madico.cz/externi-folie/>

Difuzory:

- Akrylové sklo prizmatické - od firmy Allux činitel prostupu světla $\tau = 0,9$

Více informací z:

<http://www.svetlovod.cz/proc-allux/dvojity-stropni-difuzer/>

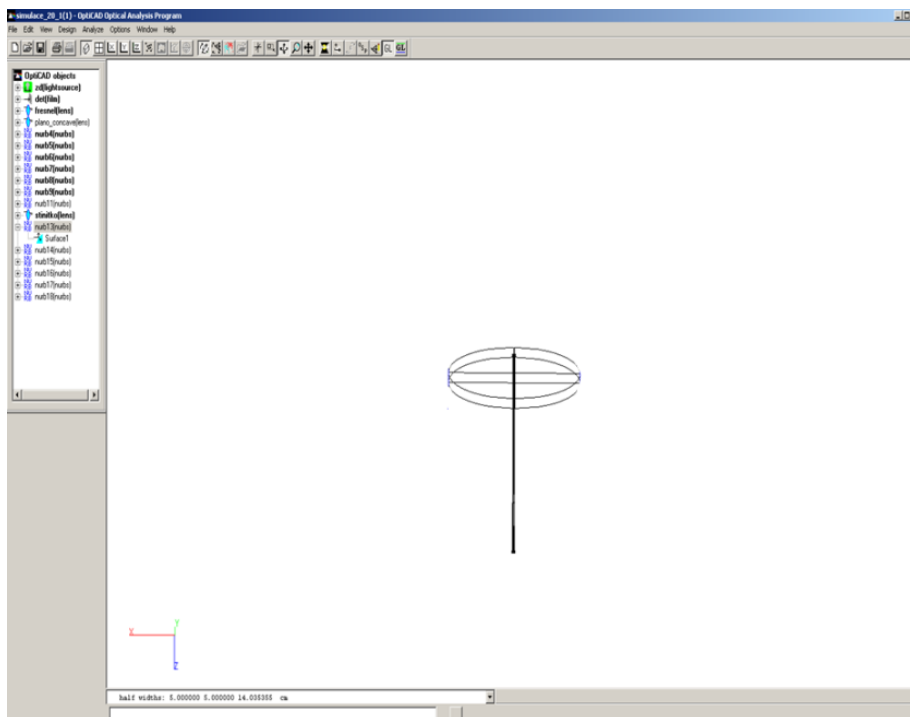
- Mikroprizmatický – Elkovo Čepelík činitel prostupu světla $\tau = 0,9$

Více informací z:

http://www.bwf-group.de/en/bwf-profiles/products/product_news/bwf_diamondprism.html

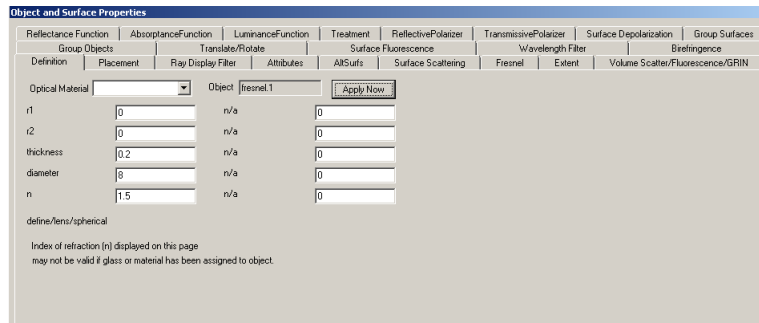
Příloha B – Simulace v programu OptiCAD

Pro simulování světlovodného vedení v programu OptiCAD je třeba, si nejdříve navrhnout strukturu vedení, která bude přenášet optické záření. Knihovna programu obsahuje pouze některé z optických prvků v podobě čoček, zrcadel, hranolů atd. Ostatní optické prvky je možné navrhnout jejich 3-D strukturu v některém z programů pro projektování nebo konstruování CAD. A ve vhodném formátu exportovat do programu OptiCAD. Přeš volbu v hlavní menu File – ImportCAD. Nakreslená struktura se objeví uprostřed pracovní plochy a jednotlivé vrstvy struktury se zobrazí v levém panelu (obr. B. 1).



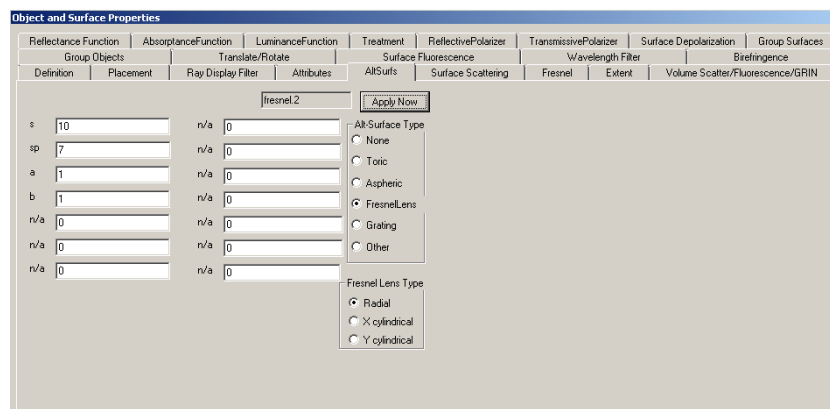
obr. B. 1.: Základní pracovní plocha OptiCAD

Navrženou strukturu je třeba doplnit o Fresnelovu čočku, aby vznikl menší systém světlovodného vedení s čočkou. Fresnelova čočka se v programu OptiCAD vytváří ze sférické čočky, kterou do pracovní plochy vložíš přes menu Design – Spherical lens. Zvolíš název a po potvrzení se v levém panelu se objeví vložená čočka. Rozkliknutím názvu čočky vyskočí základní nabídka. Pokud chceš nastavit Fresnelovu čočku o těchto parametrech – průměr 80 mm, ohnisková vzdálenost 70 mm, tloušťka 2 mm. V záložce Definition nastavíš tyto hodnoty $r_1 = 0$, $r_2 = 0$, thickness = 0,2, diameter = 8 a $n = 1,49$ (index lomu světla materiálu) (obr. B.2). Přejdeš do záložky Placement, zaškrtnutím Activated a in place, vložíš čočku do pracovního prostoru. A přes souřadnice x,y,z a jejich úhly zvolíš polohu čočky, potvrdíš tlačítkem Apply Now.



Obr. B. 2: Nastavení sférické čočky.

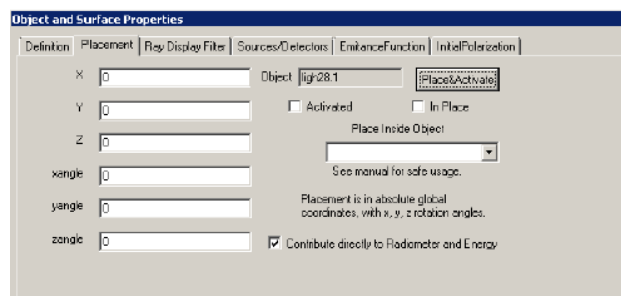
Proto, aby vznikla z obyčejné sférické čočky Fresnelova, musím dvakrát kliknout na jméno čočky v levém panelu. Vyskočí jednotlivé vrstvy, z kterých se čočka skládá, vyberu Surface 2. Objeví se nabídka Object and Surface Properties (Obr. B. 3).



Obr. B. 3: Vznik Fresnelovy čočky ze sférické.

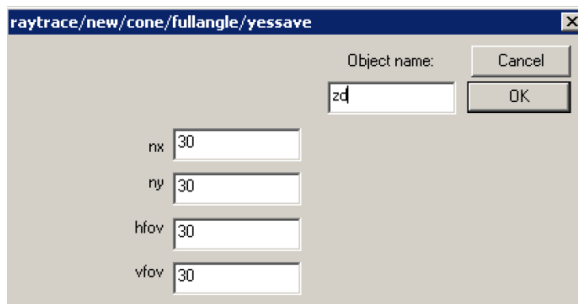
V této nabídce vyberu záložku AltSurfs, v nabídce uprostřed zvolím Alt - Surface Type vyberu FresnelLens a Fresnel Lens Type zvolím Radial. Poté napíšu do řádku s_p ohniskovou vzdálenost čočky ($s_p=7$) a do řádku s zvolím vzdálenost čočky od zdroje světla. Vše potvrdím tlačítkem Apply Now.

Poté již jen doplním navrženou soustavu o zdroj světla a detektor v hlavním menu Design-Lightsource/Film. U zdroje světla lze v záložce Sources/Detector zvolit některý z předdefinovaných zdrojů světla. A v záložce Placement zvolit souřadnice umístění v prostoru a potvrdit tlačítkem Place/Activate(Obr. B.4). V detektoru lze v nabídce Definition nastavit jeho rozměry.

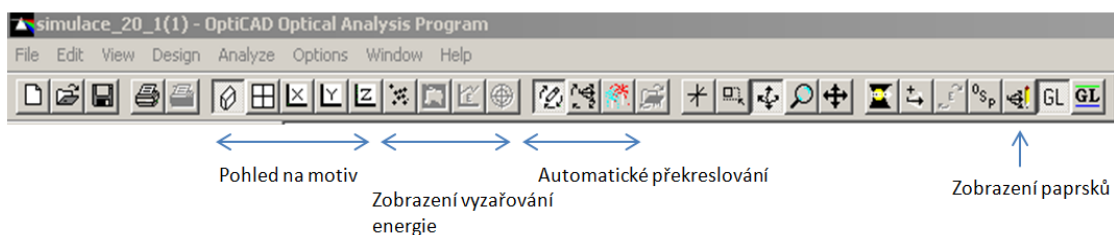


Obr. B. 4: Umístění do pracovní plochy zdroj/detektor.

Poté můžeme přestoupit k analýze celé soustavy, která se spouští aktivováním zdroje světla. Před spuštěním zdroje je vhodné nastavit citlivost detektoru v hlavní nabídce možnost Analyze-Radiometer-AttachIrradiance, protože když to provedeme po proběhnutí simulace, je velmi pomalá reakce programu. Vhodné je také vypnout ve vrchním menu automatické překreslování simulace a vypnutí zobrazení jednotlivých paprsků (program automaticky vypne, nastavíme-li více než 50000 paprsků). V nabídce Analyze zvolíme možnost Raytracing – Fullangle a v nabídce na obr. B. 5 nastavíme počet paprsku v ose x (nx) a v ose y (ny) a spustíme simulaci.



Po proběhnutí simulace si v horní liště (obr. B. 5) vybereme z nabídky, co požadujeme za výsledek.



Příloha C - Poměrná světelná účinnost monochromatického záření [24].

λ [nm]	$V(\lambda)$ [-]	λ [nm]	$V(\lambda)$ [-]	λ [nm]	$V(\lambda)$ [-]
390	4.1462E-04	537	9.2693E-01	684	1.3581E-02
391	5.0283E-04	538	9.3667E-01	685	1.2616E-02
392	6.0850E-04	539	9.4595E-01	686	1.1707E-02
393	7.3444E-04	540	9.5447E-01	687	1.0856E-02
394	8.8374E-04	541	9.6198E-01	688	1.0065E-02
395	1.0597E-03	542	9.6844E-01	689	9.3334E-03
396	1.2655E-03	543	9.7383E-01	690	8.6613E-03
397	1.5048E-03	544	9.7815E-01	691	8.0461E-03
398	1.7805E-03	545	9.8141E-01	692	7.4811E-03
399	2.0956E-03	546	9.8367E-01	693	6.9600E-03
400	2.4522E-03	547	9.8521E-01	694	6.4771E-03
401	2.8522E-03	548	9.8638E-01	695	6.0277E-03
402	3.2991E-03	549	9.8754E-01	696	5.6082E-03
403	3.7975E-03	550	9.8902E-01	697	5.2167E-03
404	4.3528E-03	551	9.9108E-01	698	4.8518E-03
405	4.9717E-03	552	9.9349E-01	699	4.5120E-03
406	5.6610E-03	553	9.9592E-01	700	4.1959E-03
407	6.4216E-03	554	9.9802E-01	701	3.9021E-03
408	7.2503E-03	555	9.9946E-01	702	3.6284E-03
409	8.1402E-03	556	9.9999E-01	703	3.3730E-03
410	9.0799E-03	557	9.9976E-01	704	3.1343E-03
411	1.0056E-02	558	9.9898E-01	705	2.9109E-03
412	1.1065E-02	559	9.9791E-01	706	2.7015E-03
413	1.2105E-02	560	9.9677E-01	707	2.5058E-03
414	1.3180E-02	561	9.9574E-01	708	2.3232E-03
415	1.4294E-02	562	9.9471E-01	709	2.1533E-03
416	1.5450E-02	563	9.9355E-01	710	1.9956E-03
417	1.6641E-02	564	9.9212E-01	711	1.8493E-03
418	1.7853E-02	565	9.9026E-01	712	1.7140E-03
419	1.9070E-02	566	9.8786E-01	713	1.5889E-03
420	2.0274E-02	567	9.8493E-01	714	1.4735E-03
421	2.1448E-02	568	9.8150E-01	715	1.3670E-03
422	2.2600E-02	569	9.7760E-01	716	1.2690E-03
423	2.3748E-02	570	9.7326E-01	717	1.1784E-03
424	2.4913E-02	571	9.6848E-01	718	1.0946E-03
425	2.6121E-02	572	9.6314E-01	719	1.0169E-03
426	2.7399E-02	573	9.5711E-01	720	9.4473E-04
427	2.8750E-02	574	9.5025E-01	721	8.7752E-04
428	3.0169E-02	575	9.4246E-01	722	8.1504E-04
429	3.1651E-02	576	9.3369E-01	723	7.5708E-04
430	3.3190E-02	577	9.2429E-01	724	7.0338E-04
431	3.4779E-02	578	9.1467E-01	725	6.5371E-04
432	3.6415E-02	579	9.0523E-01	726	6.0781E-04

433	3.8096E-02	580	8.9636E-01	727	5.6534E-04
434	3.9818E-02	581	8.8831E-01	728	5.2601E-04
435	4.1579E-02	582	8.8085E-01	729	4.8951E-04
436	4.3371E-02	583	8.7365E-01	730	4.5560E-04
437	4.5172E-02	584	8.6638E-01	731	4.2406E-04
438	4.6954E-02	585	8.5872E-01	732	3.9469E-04
439	4.8687E-02	586	8.5043E-01	733	3.6732E-04
440	5.0337E-02	587	8.4151E-01	734	3.4179E-04
441	5.1876E-02	588	8.3201E-01	735	3.1797E-04
442	5.3322E-02	589	8.2202E-01	736	2.9574E-04
443	5.4706E-02	590	8.1159E-01	737	2.7506E-04
444	5.6063E-02	591	8.0079E-01	738	2.5586E-04
445	5.7434E-02	592	7.8965E-01	739	2.3811E-04
446	5.8851E-02	593	7.7821E-01	740	2.2175E-04
447	6.0308E-02	594	7.6647E-01	741	2.0667E-04
448	6.1786E-02	595	7.5448E-01	742	1.9275E-04
449	6.3266E-02	596	7.4225E-01	743	1.7983E-04
450	6.4724E-02	597	7.2982E-01	744	1.6780E-04
451	6.6148E-02	598	7.1725E-01	745	1.5656E-04
452	6.7573E-02	599	7.0458E-01	746	1.4602E-04
453	6.9049E-02	600	6.9186E-01	747	1.3615E-04
454	7.0633E-02	601	6.7910E-01	748	1.2695E-04
455	7.2383E-02	602	6.6629E-01	749	1.1837E-04
456	7.4360E-02	603	6.5336E-01	750	1.1039E-04
457	7.6594E-02	604	6.4028E-01	751	1.0299E-04
458	7.9114E-02	605	6.2701E-01	752	9.6118E-05
459	8.1954E-02	606	6.1352E-01	753	8.9733E-05
460	8.5148E-02	607	5.9985E-01	754	8.3797E-05
461	8.8727E-02	608	5.8607E-01	755	7.8274E-05
462	9.2660E-02	609	5.7223E-01	756	7.3133E-05
463	9.6897E-02	610	5.5838E-01	757	6.8341E-05
464	1.0138E-01	611	5.4455E-01	758	6.3870E-05
465	1.0601E-01	612	5.3077E-01	759	5.9694E-05
466	1.1074E-01	613	5.1701E-01	760	5.5789E-05
467	1.1551E-01	614	5.0329E-01	761	5.2135E-05
468	1.2031E-01	615	4.8960E-01	762	4.8722E-05
469	1.2512E-01	616	4.7594E-01	763	4.5539E-05
470	1.2990E-01	617	4.6240E-01	764	4.2574E-05
471	1.3463E-01	618	4.4902E-01	765	3.9819E-05
472	1.3933E-01	619	4.3586E-01	766	3.7259E-05
473	1.4402E-01	620	4.2299E-01	767	3.4875E-05
474	1.4874E-01	621	4.1042E-01	768	3.2648E-05
475	1.5351E-01	622	3.9804E-01	769	3.0561E-05
476	1.5836E-01	623	3.8573E-01	770	2.8602E-05
477	1.6332E-01	624	3.7339E-01	771	2.6758E-05
478	1.6838E-01	625	3.6092E-01	772	2.5029E-05

479	1.7354E-01	626	3.4829E-01	773	2.3414E-05
480	1.7881E-01	627	3.3557E-01	774	2.1909E-05
481	1.8418E-01	628	3.2290E-01	775	2.0513E-05
482	1.8966E-01	629	3.1037E-01	776	1.9219E-05
483	1.9521E-01	630	2.9809E-01	777	1.8018E-05
484	2.0083E-01	631	2.8612E-01	778	1.6899E-05
485	2.0648E-01	632	2.7448E-01	779	1.5853E-05
486	2.1218E-01	633	2.6320E-01	780	1.4872E-05
487	2.1803E-01	634	2.5226E-01	781	1.3951E-05
488	2.2416E-01	635	2.4169E-01	782	1.3085E-05
489	2.3073E-01	636	2.3148E-01	783	1.2730E-05
490	2.3792E-01	637	2.2164E-01	784	1.1512E-05
491	2.4587E-01	638	2.1216E-01	785	1.0800E-05
492	2.5460E-01	639	2.0305E-01	786	1.0134E-05
493	2.6408E-01	640	1.9431E-01	787	9.5099E-06
494	2.7425E-01	641	1.8592E-01	788	8.9256E-06
495	2.8507E-01	642	1.7783E-01	789	8.3779E-06
496	2.9648E-01	643	1.6997E-01	790	7.8639E-06
497	3.0850E-01	644	1.6228E-01	791	7.3815E-06
498	3.2114E-01	645	1.5474E-01	792	6.9291E-06
499	3.3442E-01	646	1.4731E-01	793	6.5051E-06
500	3.4835E-01	647	1.4002E-01	794	6.1082E-06
501	3.6296E-01	648	1.3290E-01	795	5.7369E-06
502	3.7823E-01	649	1.2599E-01	796	5.3898E-06
503	3.9414E-01	650	1.1931E-01	797	5.0653E-06
504	4.1066E-01	651	1.1288E-01	798	4.7617E-06
505	4.2776E-01	652	1.0671E-01	799	4.4776E-06
506	4.4540E-01	653	1.0081E-01	800	4.2116E-06
507	4.6354E-01	654	9.5167E-02	801	3.9625E-06
508	4.8214E-01	655	8.9796E-02	802	3.7287E-06
509	5.0114E-01	656	8.4690E-02	803	3.5089E-06
510	5.2050E-01	657	7.9840E-02	804	3.3019E-06
511	5.4014E-01	658	7.5234E-02	805	3.1066E-06
512	5.6002E-01	659	7.0861E-02	806	2.9221E-06
513	5.8010E-01	660	6.6710E-02	807	2.7482E-06
514	6.0032E-01	661	6.2774E-02	808	2.5846E-06
515	6.2063E-01	662	5.9042E-02	809	2.4309E-06
516	6.4094E-01	663	5.5507E-02	810	2.2868E-06
517	6.6108E-01	664	5.2161E-02	811	2.1519E-06
518	6.8081E-01	665	4.8997E-02	812	2.0257E-06
519	6.9990E-01	666	4.6006E-02	813	1.9075E-06
520	7.1809E-01	667	4.3179E-02	814	1.7968E-06
521	7.3516E-01	668	4.0508E-02	815	1.6932E-06
522	7.5118E-01	669	3.7984E-02	816	1.5960E-06
523	7.6631E-01	670	3.5600E-02	817	1.5049E-06
524	7.8074E-01	671	3.3349E-02	818	1.4193E-06

525	7.9465E-01	672	3.1223E-02	819	1.3386E-06
526	8.0821E-01	673	2.9218E-02	820	1.2626E-06
527	8.2138E-01	674	2.7326E-02	821	1.1908E-06
528	8.3407E-01	675	2.5542E-02	822	1.1230E-06
529	8.4617E-01	676	2.3861E-02	823	1.0592E-06
530	8.5758E-01	677	2.2279E-02	824	9.9895E-07
531	8.6824E-01	678	2.0790E-02	825	9.4225E-07
532	8.7831E-01	679	1.9392E-02	826	8.8888E-07
533	8.8799E-01	680	1.8079E-02	827	8.3867E-07
534	8.9752E-01	681	1.6848E-02	828	7.9145E-07
535	9.0714E-01	682	1.5692E-02	829	7.4708E-07
536	9.1700E-01	683	1.4605E-02	830	7.0539E-07