TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií

ČOČKY PRO ROVNOMĚRNÉ OSVĚTLENÍ POMOCÍ LED

Diplomová práce

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 3906T001 – Mechatronika

Autor práce: **Bc. Michal Šolc**
Vedoucí práce: doc. RNDr. Miroslav Šulc, Ph.D.

Liberec 2015

TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechatronics, Informatics
and Interdisciplinary Studies

LENS FOR UNIFORM LED ILLUMINATION

Diploma thesis

Study programme: N2612 – Electrical Engineering and Informatics
Study branch: 3906T001 – Mechatronics

Author: **Bc. Michal Šolc**
Supervisor: doc. RNDr. Miroslav Šulc, Ph.D.

Liberec 2015

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
Akademický rok: **2014/2015**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Bc. Michal Šolc**
Osobní číslo:	**M12000261**
Studijní program:	**N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Mechatronika**
Název tématu:	**Čočky pro rovnoměrné osvětlení pomocí LED**
Zadávající katedra:	**Ústav mechatroniky a technické informatiky**

Zásady pro vypracování:

1. Naučte se pracovat v prostředí optického sofware Zemax©.
2. Seznamte se modulem Illumination System Design programu Zemax©.
3. Navrhněte free form plochy pro zadané obdélníkové a hexagonální výstupy LED osvětlení.
4. Navrhněte a optimalizujte zadanou free form plochu.
5. Spolupracujte na realizaci prototypu LED osvětlení, využívající takovouto plochu.
6. Proměřte charakteristiky prototypu světelného zdroje a zhodnoťte jeho kvalitu.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby dokumentace**

Rozsah pracovní zprávy: **40–50 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

[1] **Zemax©, Optical Design Program, User's Manual, 2011.**

[2] **Malý P.: Optika. Karolinum, 2008, ISBN: 9788024613420.**

[3] **Smith W.: Modern lens design. McGraw Hill Professional, 2004, ISBN: 9780071438308.**

[4] **Zhenrong, Z., Xiang, H. and Xu, L.: Freeform surface lens for LED uniform illumination. Applied optics, Dec 2009, Vol. 48, No. 35, s. 6627-6634.**

[5] **Sun, L.iwei / Jin, S., Cen, S.: Free-form microlens for illumination applications. Applied optics, Oct 2009, Vol.48, No.29, s.5520-5527.**

[6] **Moiseev, M. A., Doskolovich, L. L. and Kazanskiy, N. L.: Design of high-efficient freeform LED lens for illumination of elongated rectangular regions. Optics express, May 2011 Vol. 19, No. S3, s. 225-233.**

[7] **Další časopisecká literatura dle zadání vedoucího BP.**

Vedoucí diplomové práce: **doc. RNDr. Miroslav Šulc, Ph.D.**
Katedra fyziky

Konzultant diplomové práce: **Mgr. Radek Melich, Ph.D.**
Ústav fyziky plazmatu AV ČR, Centrum Toptec

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **15. května 2015**

prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.
děkan

L.S.

doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 10. října 2014

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 15.5.2015

Podpis: M. Sova

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. RNDr. Miroslavu Šulcovi, Ph.D. za odborné vedení práce, poskytování cenných rad, informačních podkladů a za jeho ochotu a čas, který mi věnoval. Rovněž bych chtěl poděkovat konzultantovi Mgr. Radku Melichovi, Ph.D. z Ústavu fyziky plazmatu AV ČR za poskytování praktických zkušeností, odborných rad a pomoc při jejich správné interpretaci.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou generace rovnoměrného výstupního osvětlení pomocí LED. Cílem práce je seznámit se a naučit se pracovat s optickým programem OpticStudio 14 od společnosti ZEMAX a pomocí něho navrhnout a simulovat freeform čočku pro rovnoměrné obdélníkové výstupní LED osvětlení. Výsledkem je výroba čočky a proměření její vyzařovací charakteristiky. V práci je rovněž shrnut přehled freeform čoček, používané materiály, technologie výroby a povrchové úpravy čoček.

Čočka byla navržena v programu OpticStudio 14 od společnosti ZEMAX. K návrhu čočky jsem použil speciální mód s názvem NCS Roadway Lighting. Pro modelování čočky byla použita rovnice bikonické Zernikeho plochy s využitím Z-term kořenů. Potom byla nastavena meritní funkce, podle které byla čočka finálně optimalizována pro rovnoměrné obdélníkové osvětlení.

Na základě této práce bylo možné vyrobit freeform čočku pomocí přesné 3D tiskárny. Freeform čočka má rozměry 34 × 21 mm s výškou 12,5 mm, vyzařovací úhel 25 × 140 ° a osvětluje prostor o tvaru obdélníku s poměrem stran 10 : 1. Výsledné změřené parametry se shodují s parametry, které byly simulovány v OpticStudiu 14, což potvrzuje správný návrh a výrobu freeform čočky.

Klíčová slova

Freeform čočka
LED
Osvětlení
Simulace
Zemax OpticStudio 14
Vyzařovací charakteristika

Abstract

Focus of this diploma thesis is the topic of uniform rectangular LED illumination. The aim of this thesis is to get acquainted and learn to work with optical program OpticStudio 14 from ZEMAX Company and use it to design and simulate freeform lens for uniform rectangular LED illumination. The result of this process is the lens development and measurement of radiation characteristic of the lens. The thesis also contains overview of freeform lenses and summarization of used materials, production technology and lens coatings.

The lens was designed in program OpticStudio 14 from ZEMAX Company. I used a special mode called NCS Roadway Lighting for the lens design. Biconical Zernike surface with Z-term roots was used for the lens modelling. Then the merit function was set up, according to which the lens was finally optimized for uniform rectangular illumination.

Based on this design it would be possible to produce the freeform lens on precise 3D printer. The final dimension of the freeform lens is 34 × 21 mm with height 12,5 mm, the viewing angle is 25 × 140 ° and it illuminates the rectangular area with an aspect ratio 10 : 1. The final measured parameters are consisted with the parameters that have been simulated in OpticStudio 14 which proves the correctness of design and production of freeform lens.

Key words

Freeform lens
LED
Illumination
Simulation
Zemax OpticStudio 14
Light distribution

OBSAH

SEZNAM SYMBOLŮ, ZKRATEK A TERMÍNŮ 10

1 ÚVOD 11

2 PROBLEMATIKA FREEFORM ČOČEK 13

2.1 POROVNÁNÍ SVĚTELNÉHO VÝSTUPU SFÉRICKÉHO A FREEFORM POVRCHU 13

2.1.1 Freeform čočka složená ze sférických ploch 13

2.1.2 Freeform čočka složená z freeform ploch 14

2.2 VÝHODY A POUŽITÍ FREEFORM ČOČEK 17

2.2.1 Kombinace LED a freeform čoček 18

2.2.2 Osvětlení parkovišť a přechodů 19

2.2.3 Silniční a dálniční osvětlení 19

2.2.4 Osvětlení reklamních ploch a nápisů 22

2.2.5 Další využití freeform čoček 22

2.3 SOUČASNÉ DOSTUPNÉ FREEFORM ČOČKY A JEJICH PARAMETRY 23

2.3.1 Freeform čočky společnosti Gaggione 23

2.3.2 Freeform čočky společnosti LEDIL 24

2.3.3 Freeform čočky společnosti Carclo Optics 25

2.3.4 Freeform čočky společnosti LED-LINK 26

2.3.5 Freeform čočky společnosti Khatod Optoelectronic 27

3 TECHNOLOGIE VÝROBY FREEFORM ČOČKY 32

3.1 OPTICKÉ MATERIÁLY 32

3.2 POVRCHOVÉ ÚPRAVY ČOČEK 36

3.3 OBRÁBĚNÍ FORMY A TEPLOTNÍ OPTIMALIZACE 38

3.4 SÉRIOVÁ VÝROBA FREEFORM ČOČEK 39

4 OPTICKÉ PROGRAMY 40

4.1 POROVNÁNÍ PROGRAMŮ ZEMAX A MATLAB 41

4.1.1 Tvarování ploch v MATLAB 41

4.1.2 Tvarování ploch v ZEMAX 41

4.1.3 Import současných výkonových LED do programu ZEMAX 42

4.2 PROGRAM ZEMAX A NOVÉ OPTICSTUDIO 44

4.3 ZÁKLADNÍ NASTAVENÍ A FUNKCE V ZEMAX OPTICSTUDIO 14.2 46

4.3.1 Správa souborů 46

4.3.2 Základní nastavení ... *46*
4.3.3 Analýza ... *47*
4.3.4 Optimalizace ... *47*
5 NÁVRH FREEFORM PLOCHY ... **48**
5.1 POŽADAVKY NA OSVĚTLENÍ ... 48
5.2 VÝBĚR VHODNÉ LED A DEFINOVÁNÍ VELIKOSTI ČOČKY ... 49
5.2.1 Vlastnosti čipu LED a vliv na velikost čočky ... *49*
5.2.2 Rozbor ideální velikosti čočky ... *51*
5.2.3 Výběr ideální LED ... *52*
5.3 DEFINOVÁNÍ ZÁKLADNÍCH PLOCH ČOČKY ... 55
5.4 TVAROVÁNÍ POVRCHU ČOČKY ... 59
5.4.1 Vnější povrch čočky ... *61*
5.4.2 Vnitřní povrch čočky ... *62*
5.4.3 Počáteční trasování čočky ... *63*
5.4.4 Rozbor a experimentální optimalizace freeform čočky ... *64*
5.5 MERITNÍ FUNKCE ... 66
5.5.1 Počáteční nastavení meritní funkce ... *66*
5.5.2 Operandy meritní funkce ... *69*
5.5.3 Optimalizace pomocí meritní funkce ... *70*
5.6 VÝSLEDNÁ FREEFORM ČOČKA A JEJÍ SVĚTELNÁ MAPA ... 72
5.7 PROTOTYPOVÁ VÝROBA FREEFORM ČOČKY ... 74
6 MĚŘENÍ CHARAKTERISTIKY VYROBENÉ FREEFORM ČOČKY ... **76**
6.1 MĚŘENÍ POMOCÍ SPECTROMER AVASPEC - 128 ... 76
6.2 PŘÍPRAVA PRO MĚŘENÍ FREEFORM ČOČKY ... 76
6.3 MĚŘENÍ VYZAŘOVACÍ CHARAKTERISTIKY FREEFORM ČOČKY ... 77
6.4 POROVNÁNÍ SIMULOVANÉ A ZMĚŘENÉ SVĚTELNÉ MAPY ... 79
7 ZÁVĚR ... **80**
SEZNAM LITERATURY ... **82**
SEZNAM OBRÁZKŮ ... **89**
SEZNAM TABULEK ... **91**
SEZNAM PŘÍLOH ... **92**

Seznam symbolů, zkratek a termínů

AV	Akademie Věd
3D	3 Dimensional (trojdimenzionální)
AR	Anti-Reflection (antireflexní)
CAD	Computer Aided Design (počítačem podporované projektování)
CNC	Computer Numeric Control (počítačové číslicové řízení)
CRI	Color Rendering Index (index podání barev)
DMF	Design Merit Function (meritní funkce)
LED	Light Emitting Diode (světlo vyzařující dioda)
lm	lumen
lx	lux
ORA	Optical Research Associates
PC	Polykarbonát
PMMA	polymethylmetakrylát
RMS	Root Mean Square (efektivní hodnota)
PS	Polystyren
TDP	Thermal Design Power (navržený tepelný výkon)
TIR	Total Internal Reflection (totální vnitřní odraz)
TÜV	Technischer Überwachungs Verein (technické kontrolní sdružení)
V. sod.	Vysokotlaká sodíková

1 Úvod

Oblast světelných zdrojů a osvětlení mě během studia zaujala. Mým hlavním zájmem je především LED (Light Emitting Diode) technologie a její použití ve směrování světelného toku daným směrem. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl navázat na svoji bakalářskou práci o freeform čočkách.

Osvětlení LED se v dnešní době stává standardem ve všech odvětvích. Využití LED technologie je považováno za ekonomické a moderní osvětlení. Dosahuje finanční úspory pro svoji nízkou energetickou náročnost a dlouhou životnost. Nepřehlédnutelná je i nenáročná údržba a odolnost vůči světelným rázům. Dalším neopomenutelným faktorem je poměrně velká šetrnost k životnímu prostředí. Efektivita LED se stále zvyšuje a lze říci, že LED použité před 10 lety jsou dnes již zastaralé a mnoho výrobců poskytuje nové soupravy s moderními LED, které uspoří ještě více energie či mají lepší index podání barev. Díky spojení vysokého světelného výkonu, odolnosti vůči vnějším vlivům a dlouhé životnosti se LED standardně využívají v dálkových světlometech automobilu, projektorech a v jiných aplikacích vyžadujících vysokou intenzitu světla. Rychle rostoucí sériová produkce LED vede ke snížení výrobních nákladů, a proto se začínají rozšiřovat i do oblastí, kde je kladený vysoký důraz na cenu.

Důležitým prvkem u LED je sekundární optika. Moderní výkonné čipy LED se vyrábějí na keramickém podkladu a obsahují jen malou primární čočku, která světelný tok z čipu jen minimálně usměrní. Je nutné přidat sekundární čočku, která světelný tok usměrní do požadovaného místa. Lze použít standardní sférické či asférické čočky. Použití reflektoru u LED je nevýhodné, protože LED vyzařuje maximálně do 180 ° a na usměrnění těchto paprsků lze použít jen čočku, na reflektoru by vznikaly další odrazivé ztráty. Tato práce se zabývá moderními freeform čočkami, které jsou navrženy tak, že směrují paprsky jen na přesně definované místo, které má tvar například obdélníku. Oproti standardním sférickým či asférickým čočkám lze tak směrovat světelný tok například na reklamní plochu a zamezit tak úniku světelných paprsků do prostoru, kde jsou nevyužity, a tím zvýšit účinnost tohoto osvětlení. Jejich použití zároveň omezí světelné znečištění, které vzniká hlavně ve městech osvětlením nežádoucích ploch pouličními světly a září v okolí reklamních ploch. Freeform čočky jako výstupní osvětlení mají mnoho výhod a jejich uplatnění lze najít ve všech odvětvích.

Důraz při jejich výrobě musí být kladen na použitý materiál. Osvětlení se často vyskytuje v extrémních podmínkách a musí být zajištěna životnost použité optiky. Vhodným materiálem je sklo. Výroba skleněných čoček je však drahá. Proto se výrobci snaží vyvinout materiály z plastů, které by odolaly náročným podmínkám. Takovým materiálem je například PMMA, který lze snadno vstříknout do formy za nízkých teplot. Čočky je možné opatřit antireflexní povrchovou úpravou, která zajistí vysokou transmisi a tvoří tak perfektní modul.

Cílem diplomové práce je naučit se pracovat v prostředí optického programu OpticStudio 14 od společnosti ZEMAX a navrhnout freeform plochu pro zadané obdélníkové osvětlení s použitím LED. Navrženou plochu optimalizovat podle zadaných vstupních parametrů, výslednou freeform čočku simulovat v prostředí programu OpticStudio 14 a realizovat prototyp osvětlení. Vyhodnotit dosaženou kvalitu osvětlení a porovnat ji se simulačními daty. Za technické podpory centra TOPTEC může být čočka vyrobena na nejpřesnějších CNC strojích.

2 Problematika freeform čoček

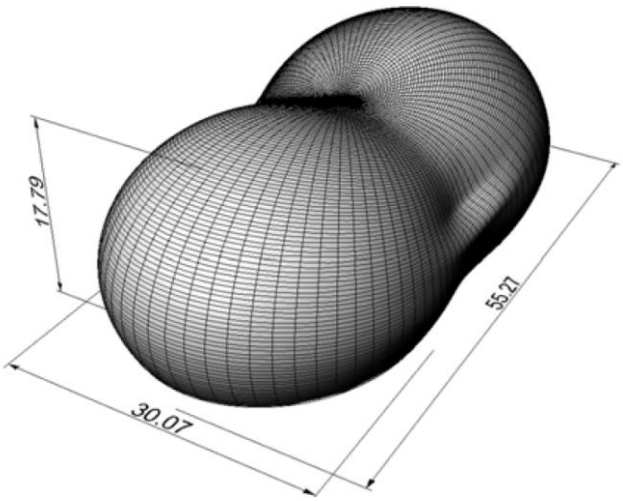
Freeform čočka je obecně složena z povrchů bez jakékoli lineární či rotační symetrie. Tyto povrchy se nazývají volné povrchy. Využívá se u nich dalších stupňů volnosti, které umožňují libovolný tvar plochy. Tyto volné plochy dovolují tvarovat freeform čočku tak, aby usměrnila vyzářené paprsky na přesně definované místo. V praxi se využívá osvětlení čtvercového, obdélníkového či hexagoniálního tvaru, což není s rotačně symetrickými čočkami možné. Freeform čočky tak řeší problematiku rovnoměrného, přesně definovaného rozložení světelného toku. Hlavním parametrem je světelná účinnost, která vyjadřuje, kolik procent světelného toku dopadlo na požadovanou plochu. U těchto čoček se pohybuje až kolem 90 %, což znamená, že pouze 10 % světelného toku dopadá mimo požadovanou plochu. Dalším parametrem je rovnoměrnost rozložení světelného toku, která se vyjadřuje pomocí RMS odchylky [2, 39, 40, 54, 73].

2.1 Porovnání světelného výstupu sférického a freeform povrchu

V následující kapitole je zobrazen rozdíl světelné mapy, kterou tvoří čočka složená pouze ze sférických povrchů a čočka složená z volných povrchů.

2.1.1 Freeform čočka složená ze sférických ploch

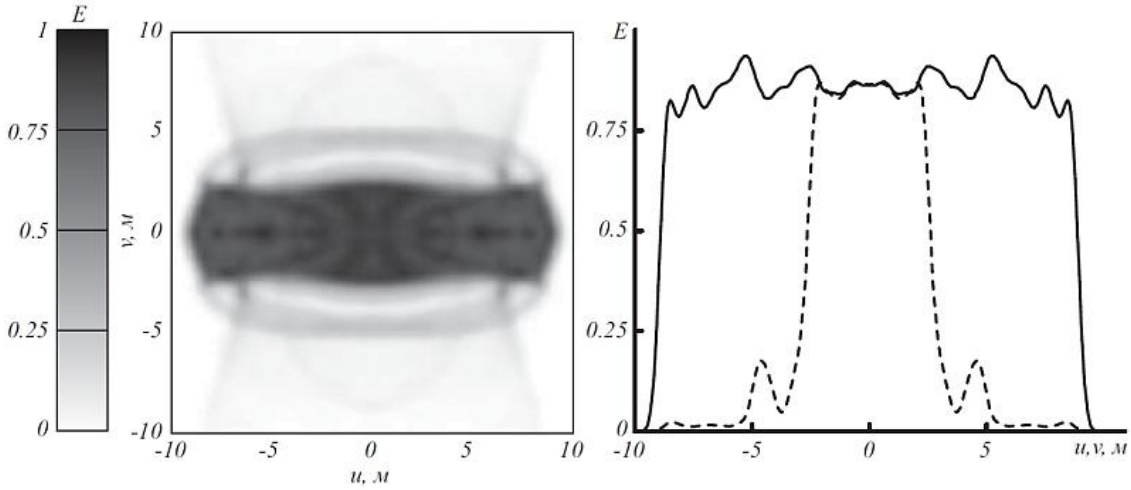
Na následujícím obrázku je zobrazena čočka složená pouze ze symetrických povrchů. Zde je využita kombinace dvou sférických povrchů.



Zdroj: [39]

Obr. 1: Sférická čočka s obdélníkovým výstupním osvětlením

Pomocí této čočky nelze dosáhnout ideálního obdélníkového tvaru. Světelná mapa tvořená čočkou je zobrazena na obrázku 2. Světelná účinnost je pouze 60 %. Mimo požadovanou plochu tedy dopadá 40 % světelného toku [39].



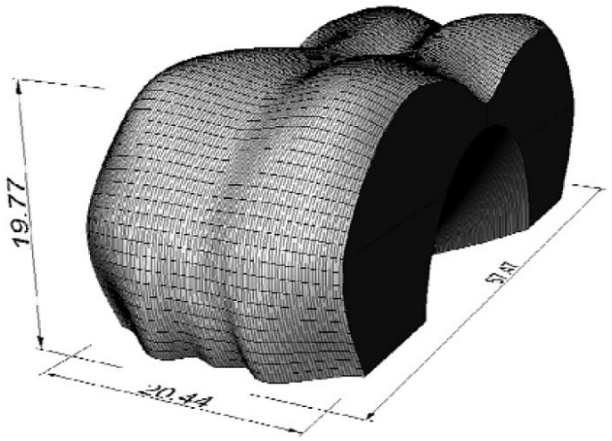
Zdroj: [39]

Obr. 2: Osvětlení pomocí sférické čočky

Kdybychom použili pouze jeden sférický povrch, tedy klasickou osově symetrickou čočku, výsledná světelná mapa by byla také symetrická a zdaleka by nebylo možné dosáhnout výše uvedené světelné mapy.

2.1.2 Freeform čočka složená z freeform ploch

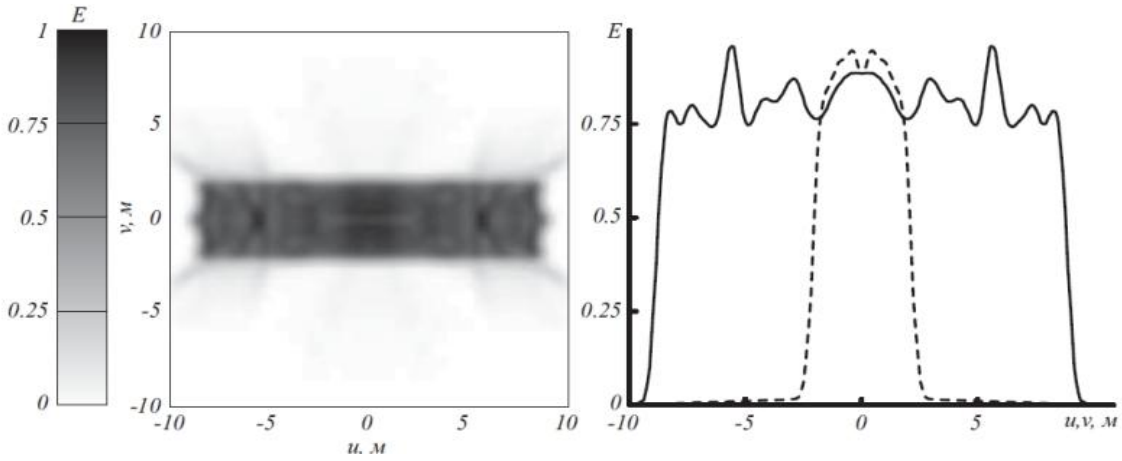
Freeform čočka s obdélníkovým výstupním osvětlením je zobrazena na obrázku 3. Rozměry freeform čočky jsou přibližně stejné jako u čočky složené ze sférických povrchů.



Zdroj: [39]

Obr. 3: Freeform čočka s obdélníkovým výstupním osvětlením

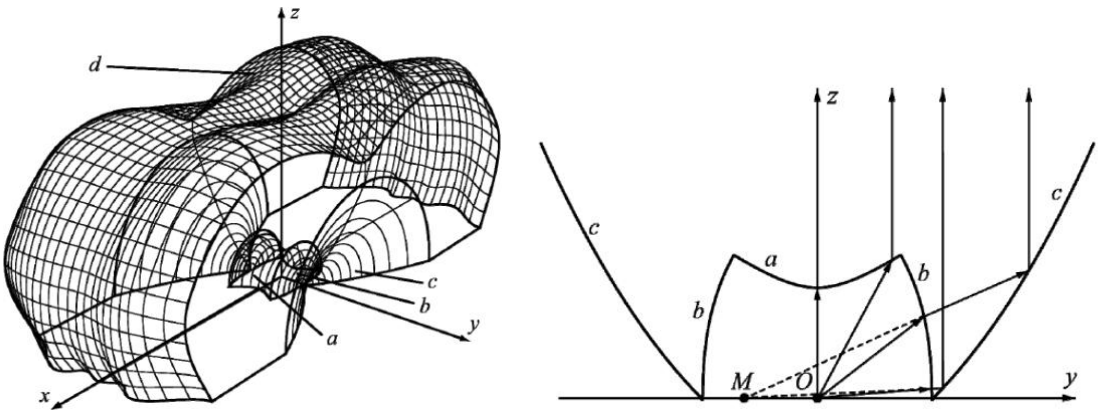
Obě čočky osvětlují přibližně stejně velkou plochu s rozměry 17 × 4 m ze vzdálenosti 3 metrů. Výsledná plocha osvětlená freeform čočkou velmi dobře vykresluje obdélníkový tvar. Světelná účinnost je v tomto případě přes 83 %. V obou případech byla pro simulaci použita LED XP-G od společnosti Cree.



Zdroj: [39]

Obr. 4: Osvětlení pomocí freeform čočky

Návrh a simulaci těchto čoček vytvářel Mikhaile A. Moiseev. Čočky jsou určeny pro aplikace, kde je nutná velmi protáhlá světelná mapa. Především tedy pro osvětlení pozemních komunikací. Konstrukce čočky je znázorněna na následujícím obrázku.



Zdroj: [40]

Obr. 5: Freeform čočka navrhnutá Moissevem

Struktura této čočky je složena z několika povrchů. Vnitřní část se skládá ze tří částí povrchů, v nichž se využívá totálního odrazu. Díky totálnímu odrazu je možné efektivně přesměrovat světelný tok na vnější část povrchu čočky. Vnější povrch čočky je tvořen freeform povrchem [40].

Řešením numerické metody **r** *(φ, y)* je vypočítán vnější povrch *d*. Plocha je pomocí této metody definována:

$$\mathbf{r}(\varphi, y) = (r(\varphi, y)\sin\varphi\,; y; r(\varphi, y)\cos\varphi)\,. \qquad (1)$$

Parametry funkce popisují vnější povrch *d*. Minimalizací funkce *f(***p***)* lze popsat vnější povrch *d* následovně

$$f(\mathbf{p}) = \|E(u, v, \mathbf{p}) - E_0(u, v)\| = \sqrt{\iint_{u,v}^{0} \left(E(u, v, \mathbf{p}) - E_0(u, v)\right)^2 du\, dv} \rightarrow min, \qquad (2)$$

kde *E (u, v,* **p***)* osvětlení na požadované ploše, *p* a *E₀ (u, v)* jsou parametry vnějšího povrchu *d*. Řešení rovnice (3) spočívá ve výpočtu osvětlení *E (u, v,* **p***)*. V případě bodového zdroje je výsledné osvětlení plochy

$$E(u, v, \mathbf{p}) = \int_{-y_{max}}^{y_{max}} \int_{-n/2}^{n/2} E'(\varphi, y) RT(\varphi, y, \mathbf{p}) \delta_6\left(\mathbf{u} - \mathbf{u}(\varphi, y, \mathbf{p})\right) d\varphi\, dy\,, \qquad (3)$$

kde *E' (φ, y)* je osvětlení pomyslné válcové plochy odpovídající vlnoploše s poloměrem *R* a osou *y*, *T (φ, y,* **p***)* je Fresnelův koeficient transmise pro paprsek vnějšího povrchu *d* procházející bodem *r (φ, y)* na vnějším povrchu *d*, **u** *(φ, y,* **p***)* je průsečík paprsku a roviny *z = f*, δ_{σ} je Gaussova funkce.

První část vnitřního povrchu s označením *a* tvoří hyperbola. Rovnice pro absolutní hodnotu $r_a(\beta)$ je dána vztahem

$$r_a(\beta) = r_{0_a} \frac{n_1 - n_2}{n_1 - n_2\, cos\, \beta}\,, \qquad (4)$$

kde r_{0a} je vzdálenost mezi světelným zdrojem a povrchem *a* ve směru osy *z*, β je úhel mezi vektorem a osou *z*, n_1 je index lomu prostředí a n_2 je index lomu optického prvku. Druhou část vnitřního povrchu *b* lze spočítat z rovnice

$$r_b(\beta) = n_1 - n_2\sqrt{r_b^2(\beta) + l^2 + 2r_b(\beta)l^2 \sin\beta} = \Psi_0\,, \qquad (5)$$

kde $r_b(\beta)$ je absolutní hodnota z části *b*, *l* je vzdálenost mezi reálným zdrojem *O* a jeho obrazem *M*, Ψ_0 je konstanta, která je definována profilem *a* a profilem *b* v horní části profilu *b*. Poslední část vnitřního povrchu *c* tvoří parabola s ohniskem v bodu *M* a využívá se zde totálního odrazu paprsků směrem k vnější ploše. Detail v řezu tohoto

vnitřního povrchu je znázorněn v pravé části obrázku 5. Na kuželovitou část povrchu *c* dopadají paprsky ze světelného zdroje pod takovým úhlem, aby nastal totální vnitřní odraz. Rovnice pro absolutní hodnotu $r_c(\gamma)$ je dána vztahem

$$r_c(\gamma) = \frac{2r_{0_c}}{1 - \sin\gamma}, \tag{6}$$

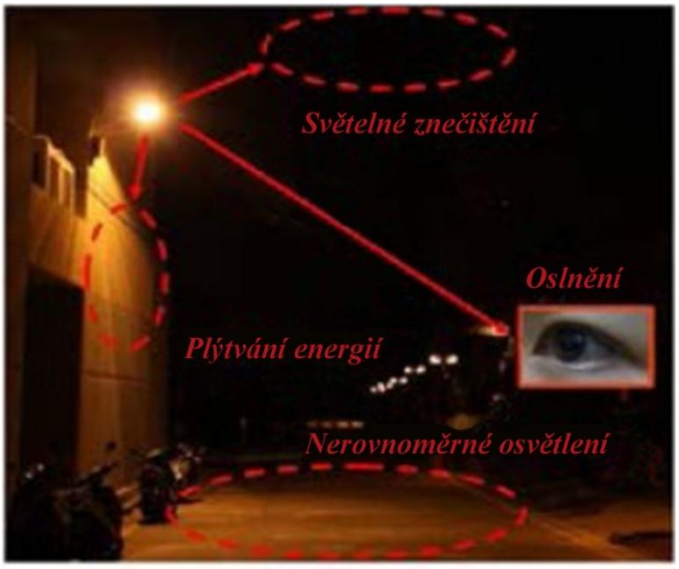
kde r_{0c} je konstanta definována profilem *b* a profilem *c* v horní části profilu *c*, γ je úhel mezi vektorem $r_c(\gamma)$ s počátkem v bodě M a osy *y* [40].

V naprosté většině freeform čoček produkovaných světovými výrobci je vnitřní povrch tvořen pouze jedním freeform povrchem a vnější povrch jednodušším freeform povrchem, připomínajícím kombinaci sférické či asférické plochy. Přehled běžně dostupných freeform čoček je shrnut v kapitole **2.3**.

2.2 Výhody a použití freeform čoček

Aplikace freeform čoček má široké využití díky možnosti libovolného definování výstupního osvětlení. Této výhody lze využít při osvětlování pozemních komunikací, přechodů, reklamních ploch a nápisů. Výhodou je neosvětlení nežádoucích ploch. Tím se eliminuje rušivé okolní světlo, čímž se zvýší celková světelná účinnost. Dnes si u většiny osvětlovacích systémů můžeme všimnout zbytečně osvětlených ploch, které vznikají použitím standardních rotačně symetrických čoček či reflektorů. Světelná účinnost u těchto čoček se pohybuje maximálně kolem 60 %. Tato účinnost se nesmí zaměnit s propustností materiálu čočky, která se pohybuje kolem 92 % u materiálů s indexem lomu 1,5, což je například PMMA, který je u čoček nejčastěji používán. Světelné ztráty Fresnelovými odrazy při průchodu paprsků čočkou jsou u tohoto materiálu 8 % [39, 63, 73].

Na obrázku 6 je vidět standardní svítidlo, která má rotačně symetrickou vyzařovací charakteristiku. Umístění takového svítidla je zcela nevhodné. Svítidlo zbytečně přesvětluje zeď pod ní. Zároveň produkuje rušivé světlo do prostoru. Na požadovanou plochu pod svítidlem dopadá v tomto případě pouze zlomek z celkového vyzářeného světelného toku.



Zdroj: [58]

Obr. 6: Standardní pouliční svítidlo

Použitím freeform čoček lze eliminovat světelné ztráty, které jsou způsobeny osvětlením nežádoucích ploch, a ušetřit tak provozní náklady světelných systémů. V následujících podkapitolách je shrnuto základní použití freeform čoček.

2.2.1 Kombinace LED a freeform čoček

Klasické světelné zdroje, jako halogenové a xenonové výbojky, mají sférickou vyzařovací charakteristiku. Vyzařují ve všech směrech a není možné u nich použít pouze jednu čočku pro usměrnění všech paprsků. Pro tyto světelné zdroje musí být použit reflektor, aby všechny paprsky usměrnil na požadované místo. Nebo je možné využít kombinaci reflektoru a čočky. Nevýhodou použití reflektoru jsou jeho světelné ztráty, které se pohybují nejčastěji okolo 5 - 30 % v závislosti na kvalitě reflektivity povrchu či jeho povrchových úprav. Světelné zdroje typu LED vyzařují maximálně do úhlu 180 °, přičemž nejvyšší intenzita je v ose čipu LED a poté kosinově klesá. Vyzařovací úhel u výkonových LED je většinou 120 °, což znamená, že při tomto vyzařovacím úhlu klesla intenzita vyzářených paprsků pod 50 %. Čočka umístěná v blízkosti LED je schopná usměrnit většinu paprsků vyzářených z LED bez nutnosti použití přídavného reflektoru. Moderní návrhy čoček pro LED jsou konstruovány tak, že čočka obklopí celou LED a usměrní prakticky všechny vyzářené paprsky. Světelné ztráty jsou způsobeny pouze propustností materiálu čočky. Kombinace LED a freeform čočky je moderní řešení budoucích nízkoenergetických svítidel [9, 64].

2.2.2 Osvětlení parkovišť a přechodů

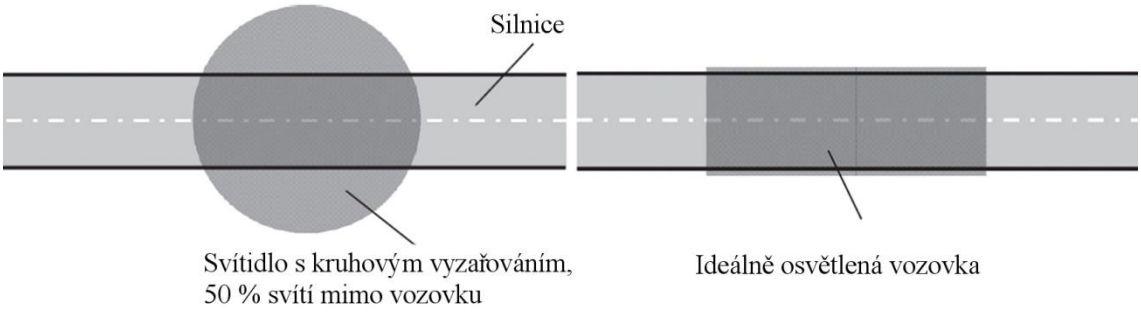
Ze studie ministerstva dopravy vyplývá, že kvalitním osvětlením přechodů lze snížit počet úmrtí na třetinu. Osvětlení přechodů se tak stalo podporovaným projektem. Při nízkém osvětlení přechodu se snižuje schopnost lidského oka rozlišit kontrast a pravděpodobnost přehlédnutí chodce se zvyšuje. Pokud se několikanásobně zvýší osvětlení přechodu, lze předejít přehlédnutí chodce a snížit pravděpodobnost srážky chodce s autem. Díky freeform čočkám lze osvětlit pouze přechod, zvýšit tak potřebný kontrast a zároveň neosvětlovat prostor mimo přechod a ušetřit tak až 50 % provozních nákladů v porovnání se standardními svítidly, jak je shrnuto v tabulce 1 [29, 34].

Zdroj: [29]

Obr. 7: Přechod osvětlený freeform čočkami

2.2.3 Silniční a dálniční osvětlení

Obdobným způsobem je možné osvětlit i pozemní komunikace. Rozdíl osvětlení při použití standardního svítidla s rotačně symetrickou distribucí světla a svítidla využívající technologii freeform je dobře znázorněno na obrázku 8 [28, 63].

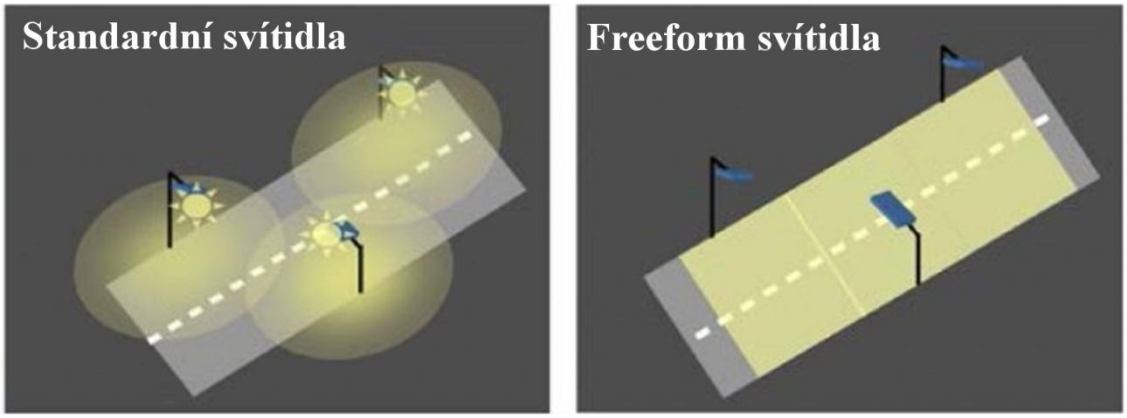


Zdroj: [28]

Obr. 8: Porovnání osvětlení klasickým reflektorem s freeform čočkou

V případě standardního svítidla dopadá na vozovku přibližně 50 % světelného toku. S využitím freeform čoček je možné vhodně zvolit vyzařovací charakteristiku a usměrnit až 90 % světelného toku pro osvětlení vozovky. Jako v minulém případě je možné ušetřit až 50 % nákladů. Pokud bychom použili moderní freeform čočky s velmi protáhlou vyzařovací charakteristikou, mohou být mezi stožáry větší rozestupy a tím se ušetří i náklady při jejich instalaci.

Příklad systému využívající technologii freeform je znázorněn na obrázku 10 vpravo. Jedná se o nahrazení standardních pouličních svítidel moderními svítidly s freeform čočkami.



Zdroj: [58]

Obr. 9: Uspořádání pouličních svítidel

Zdroj: [36]

Obr. 10: Porovnání osvětlení klasickými reflektory s freeform čočkami

Reálný příklad potvrzuje simulační obrázky. Je jasně patrný rozdíl v osvětlení jednotlivých částí prostoru. Standardní pouliční svítidla s monochromatickými vysokotlakými výbojkami osvětlují široké okolí vozovky a přispívají k rušivému

nočnímu znečištění. Svítidla s freeform čočkami osvětlují pouze vozovku a její blízké okolí. Přehled jednotlivých světelných systémů je shrnut v tabulce 1 [48].

Tab. 1. Porovnání světelného toku při použití různých řešení osvětlení

	Standardní reflektor	**Standardní reflektor**	**Freeform čočka**	**XPS řešení od Cree**
Světelný zdroj	Vysokotlaká sodíková výbojka	V. sod. výbojka se zlepšeným podáním barev	LED Cree XM-L2 U2	LED Cree MT-G
CRI	20	60	85	70
Příkon	100 W	100 W	100 W	101 W
Účinnost	130 lm/W	95 lm/W	146 lm/W	100 lm/W
Světelný tok	13 000 lm	9 500 lm	14 600 lm	10 680 lm
Ztráty na reflektoru	15 %	15 %	-	-
Ztráty na čočce	8 %	8 %	8 %	-
Světelná účinnost	50 %	50 %	83 %	83 %
Životnost	23 000 hodin	23 000 hodin	100 000 hodin	100 000 hodin
Světelný tok dopadající na danou plochu	**5 083 lm**	**3 910 lm**	**11 148 lm**	**8 864 lm**

Zdroj: [9, 16, 17, 18, 46, 48, 64, 70]

Ze srovnávací tabulky jsou patrné rozdíly celkového světelného toku dopadajícího na požadovanou plochu. Systém využívající kombinaci nejmodernějších LED s freeform čočkami dosahuje při stejném příkonu 100 W více jak dvojnásobného světelného toku dopadajícího na danou plochu. Společnost Cree nabízí pouliční svítidla, která dosahují podobného světelného toku, pokud započítáme stejnou světelnou účinnost freeform čoček. Pokud bychom nahradili standardní vysokotlaké sodíkové výbojky LED a chtěli zachovat stejné osvětlení, bude potřeba příkon pod 50 W oproti 100 W sodíkové výbojce. Výhodou moderních LED je jejich vysoký index podání barev, což je hodnota věrnosti barev osvětlená nějakým zdrojem v porovnání ve světle Slunce. Standardně dostupné LED mají index podání barev 80, ale existují i LED s indexem podání barev vyšším jak 90. V případě vysokotlakých výbojek je index podání barev 20. Rozpoznat barvy pod tímto monochromatickým typicky oranžovým zářením není možné. V pozdější době byla uvedena na trh novější vysokotlaká výbojka se zlepšeným podáním barev. Hodnota se zvýšila na 60, což je stále méně než u LED. Došlo však ke snížení účinnost na 95 lm/W [9, 16, 17, 18, 46, 48, 64, 70].

2.2.4 Osvětlení reklamních ploch a nápisů

Reklamní plochy a nápisy hrají nemalou položku v osvětlovací technice. Problematika je velmi podobná jako u osvětlení pozemních komunikací. Je nutné rovnoměrně osvětlit obdélníkové plochy a minimalizovat vyzařování mimo danou plochu. Tím se nebude znečišťovat obloha rušivým světem a také se uspoří náklady na provoz. Moderním trendem jsou takzvané Ostrovní systémy, které jsou umístěny mimo dosah veřejné sítě a jsou tak zcela závislé na vlastním napájení z fotovoltaických panelů. Zde je kladen důraz na maximální efektivitu celého zařízení. Kombinace úsporných LED a freeform čočky s vysokou světelnou účinností je v obdobných systémech hlavním kandidátem.

2.2.5 Další využití freeform čoček

Dále mohou být LED využity v projektorových lampách, kde lze vyměnit xenonovou výbojku za LED s vhodnou čočkou. Výhodou zde také je životnost LED oproti xenonové výbojce. Pro projektory vyrábí společnost LUMINUS speciální LED s čipem, který má poměr stran 16 : 9. Lze tedy pomocí čočky lépe usměrnit světelný tok na požadovanou plochu.

Zdroj: [21]

Obr. 11: LED LUMINUS SST90 s čipem 16:9

V dnešní době je každý automobil vyšší třídy vybaven hlavními světlomety s využitím LED technologie a tudíž i freeform čočkami. S LED technologií přichází i nový desing světlometů s většími možnostmi využití v adaptivních světlometech. Vysoký výkon LED ale přináší i určité nevýhody, jako jsou zejména vysoké nároky na chlazení LED v motorovém prostoru, což sebou nese i celkovou vyšší hmotnost reflektoru. Další nevýhody jsou odmlžení reflektoru, vysoká přesnost usazení čoček, a tím vyšší cena reflektoru.

Zdroj: [30, 42]

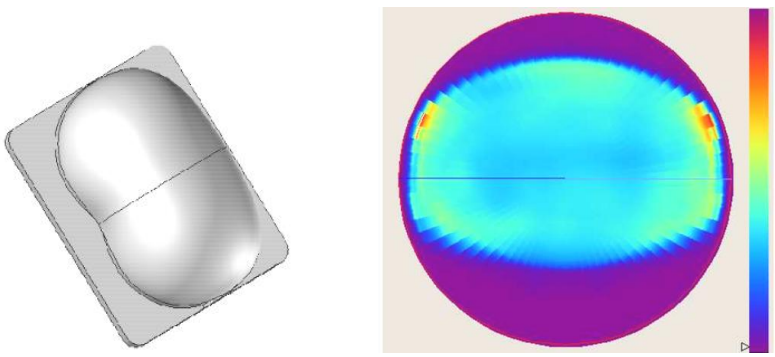
Obr. 12: Světlomet automobilu s freeform čočkami

2.3 Současné dostupné freeform čočky a jejich parametry

Výrobců čoček je velké množství. Mezi nejznámější patří CARCLO, LEDIL, GAGGIONE, KHATOD. Velkým výrobcem kvalitních čoček je i čínský LED-LINK. Od každého výrobce vyberu jeden příklad freeform čočky s nejlepší vyzařovací charakteristikou. Většina výrobců z těchto jednotlivých čoček skládá pole buď ze stejných čoček nebo z různých druhů čoček dohromady. Z velké části pak tyto společnosti nabízí výrobu čoček dle vlastního návrhu zákazníka.

2.3.1 Freeform čočky společnosti Gaggione

Společnost Gaggione se sídlem ve Francii podporuje výrobu freeform čoček a několik příkladů uvádí na svých stránkách. Zaměřují se spíše na výrobu čoček navržených zákazníkem, kde aplikují své výrobní zkušenosti se vstřikováním freeform čoček do forem. Na obrázku 13 můžeme vidět univerzální čočku pro LED s čipy 1 - 4 mm^2 s rozměry 33,1 × 26 mm a výškou 12,77 mm. Světelná mapa má při použití LED čipu o velikosti 2 mm^2 velice strmé hrany, ovšem výsledný obdélník není moc protažený a lze si všimnout výrazného zaoblení podélné hrany [61].



Zdroj: [61]

Obr. 13: Freeform čočka LLP01A1AA a její světelná mapa

2.3.2 Freeform čočky společnosti LEDIL

Velmi široký sortiment několika desítek freeform čoček má finská společnost LEDIL. Vhodnou řadou čoček je Strada SQ T, která nabízí poměrně rovnoměrnou a ohraničenou vyzařovací charakteristiku, která je znázorněna na obr 14. U této čočky bohužel LEDIL nenabízí náhled světelné mapy. Přibližné rozměry freeform čočky jsou 25 × 20 mm a výška 8,3 mm [6].

Zdroj: [6]

Obr. 14: Světelná mapa freeform čočky STRADA SQ T3

Dalším typem freeform čoček, které LEDIL vyrábí je řada FLARE. Tyto zvláštně tvarované freeform čočky mají velmi strmý přechod jasu v příčném směru. Jejich světelná mapa je podélně velmi protáhlá, ovšem jas v podélném směru pozvolna gausovsky klesá. Z tohoto důvodu není vhodná pro osvětlení obdélníkové plochy jako je například billboard. Díky protáhlému tvaru je vhodná pro osvětlení komunikací. Jednotlivé světelné mapy je možné přes sebe podélně přeložit a dosáhnout tak velmi

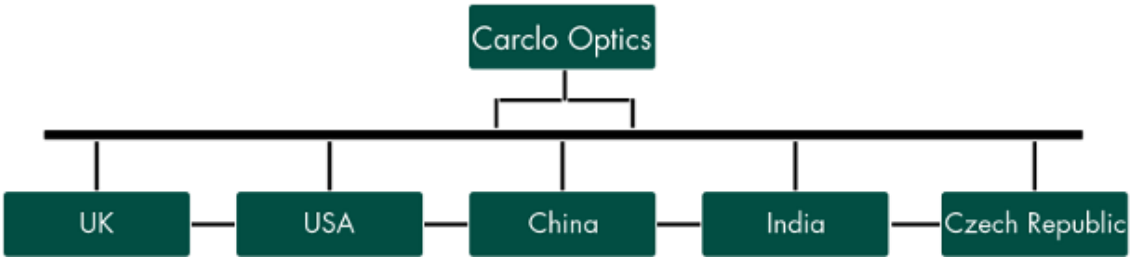
vyrovnané světelné mapy. Čočka FLARE s rozměry 33,05 × 33,95 mm a výškou 16,68 mm a přesným označením 12868 je znázorněna na obrázku 14 [7].

Zdroj: [7]

Obr. 15: Freeform čočka FLARE 12868 a její světelná mapa

2.3.3 Freeform čočky společnosti Carclo Optics

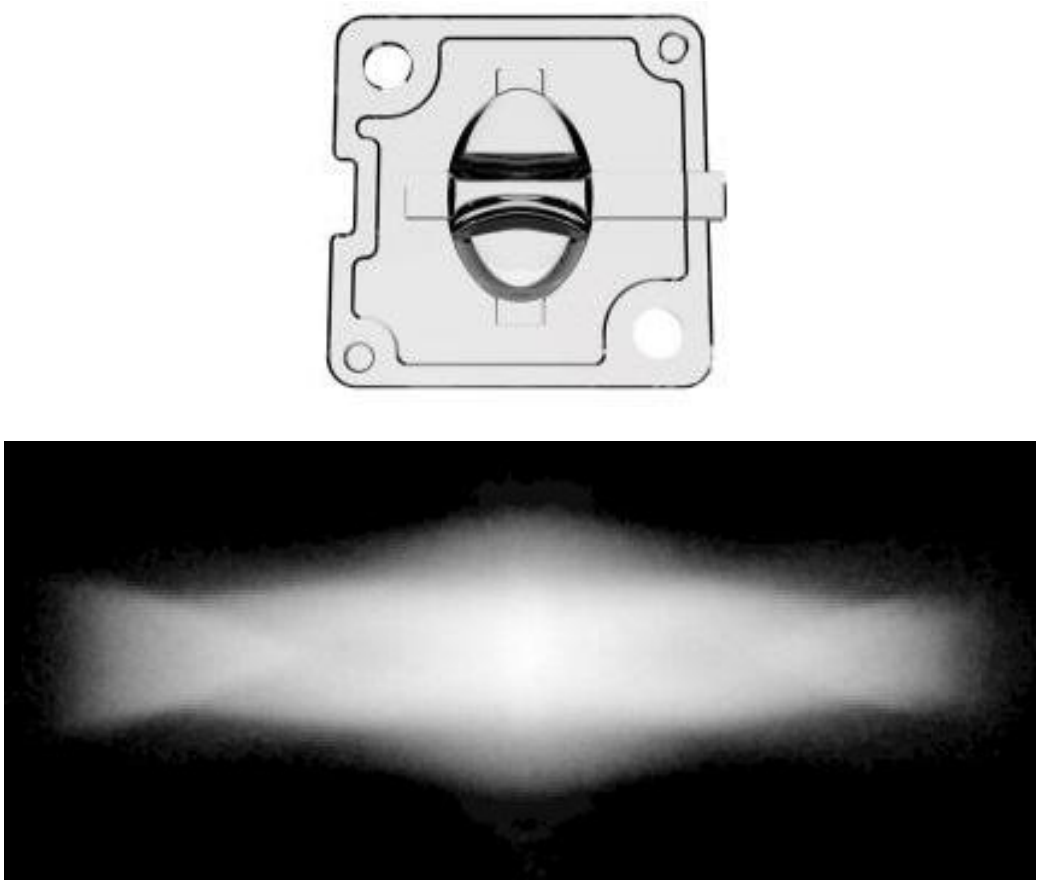
Dalším výrobcem freeform čoček je společnost Carclo Optics se sídlem ve Velké Británii. Zajímavostí je, že společnost přímo na jejich stránkách prezentuje hlavní výrobní a skladové závody, které se nacházejí v UK, USA, Číně, Indii a České republice, jak je vidět na obrázku níže.



Zdroj: [1]

Obr. 16: Skladové a výrobní závody Carclo Optic

Carclo produkuje malou řadu několika freeform čoček. Na obrázku 17 je vidět čočka CARCLO 25.0 mm Elliptical I Medium Freeform s typovým označením 12763. Světelná mapa je poměrně protáhlá, ovšem z důvodu špatného usměrnění paprsků, které vycházejí příčně z LED, se vytváří kolem středu nežádoucí rozšíření, jak je popsáno v minulé podkapitole. Rozměry celé montážní destičky a freeform čočkou jsou 25 × 25 mm a výškou 5,65 mm [19].

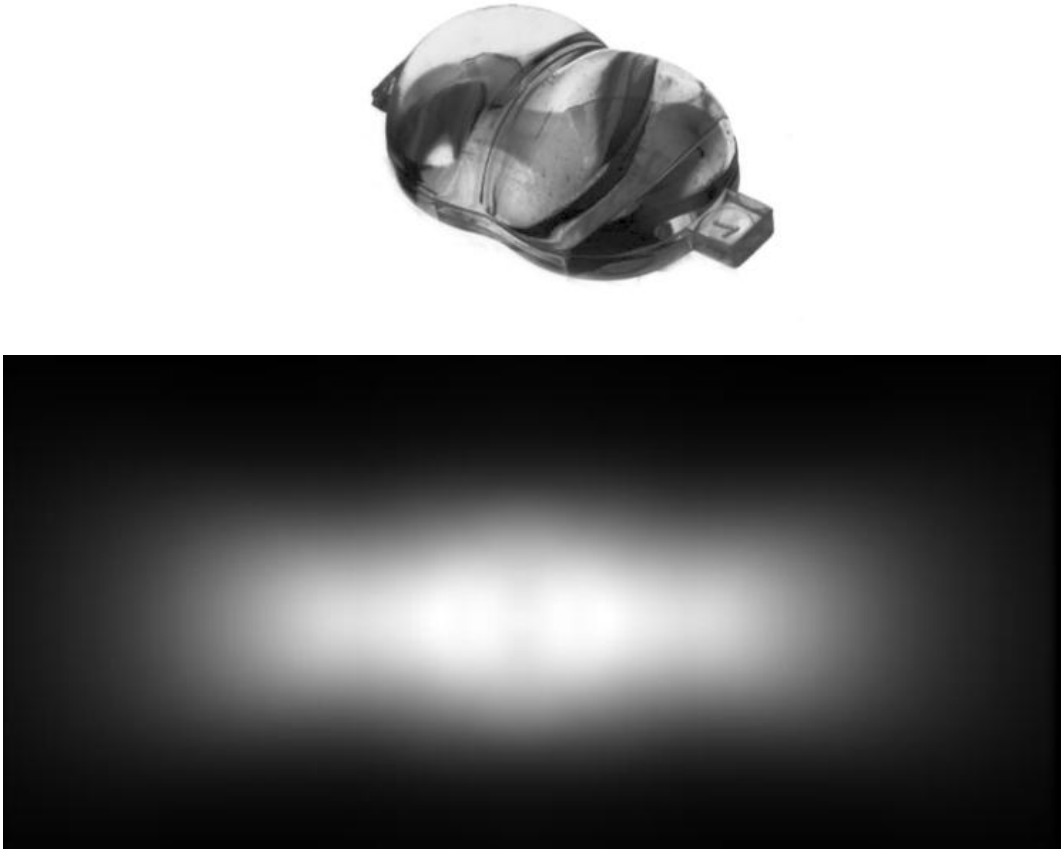


Zdroj: [19]

Obr. 17: Freeform čočka Elliptical I Medium 12763 a její světelná mapa

2.3.4 Freeform čočky společnosti LED-LINK

Freeform čočku od společnosti LED-LINK můžeme vidět na obrázku 18. LED-LINK má srovnatelně rozsáhlý sortiment nabízených freeform čoček jako finský LEDIL. Světelná mapa čočky na obrázku 18 má neostré okraje. To je způsobeno velmi malými rozměry 18 × 8,95 mm a výškou pouhých 6,2 mm. Rozšíření v oblasti středu a větší rozostření u okrajů světelné mapy odpovídá čočce se dvěmi sférickými plochami, jak je popsáno v předešlé podkapitole [33].



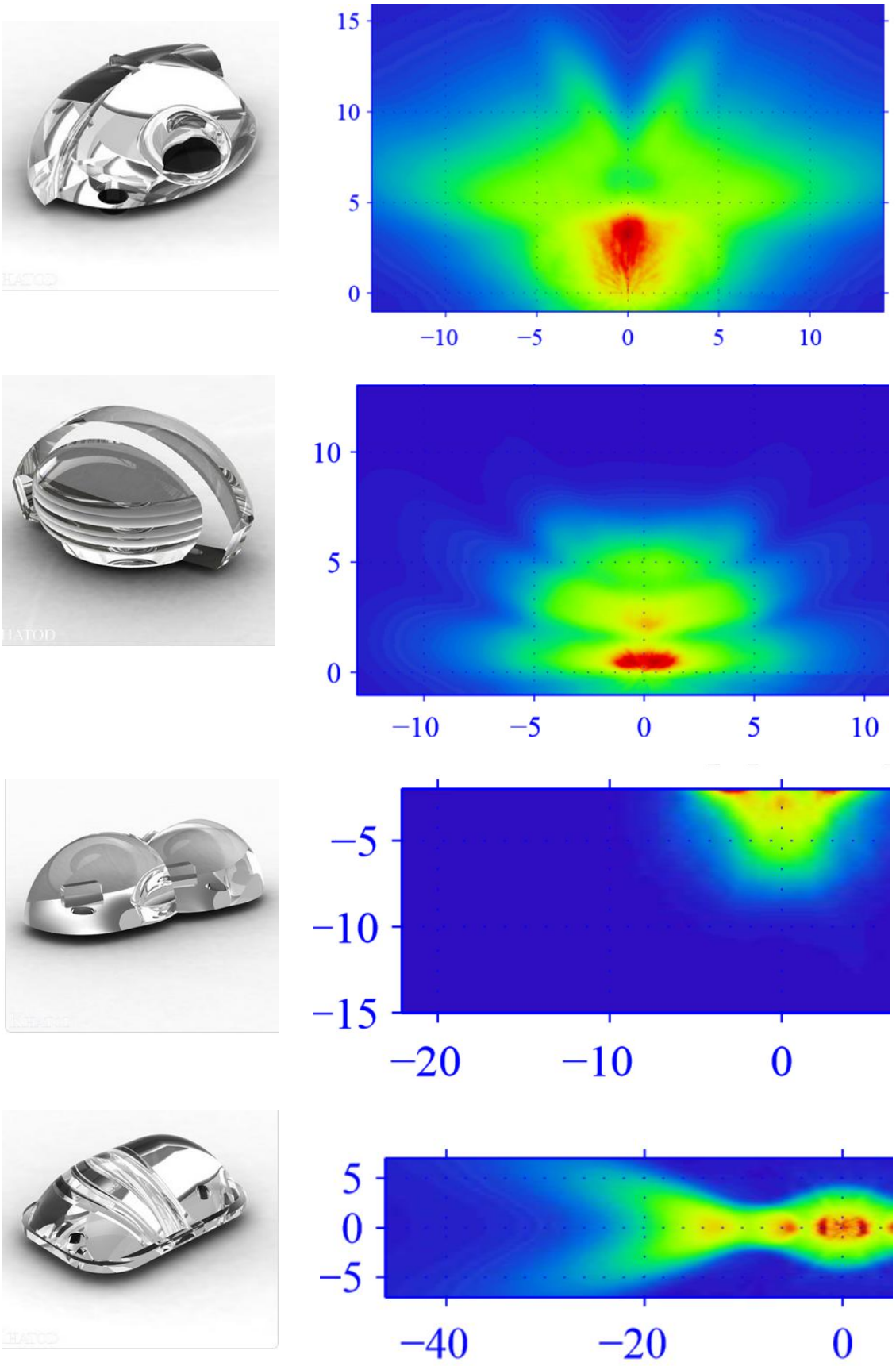
Zdroj: [33]

Obr. 18: Freeform čočka LL01CR-OG85150L02 a světelná mapa

Přehled freeform čoček společnosti LED-LINK najdete v příloze číslo 2. U každé freeform čočky je uveden vyzařovací úhel, rozměry a seznam typů LED, pro které je freeform čočka vhodná.

2.3.5 Freeform čočky společnosti Khatod Optoelectronic

Italským výrobcem čoček je Khatod Optoelectronic. Tato společnost šla jiným směrem v návrhu freeform čoček. Společnost se nezajímala o precizní návrh freeform čočky, a ani optimalizaci výstupní světelné mapy, ale vyrobila několik druhů freeform čoček, které mají zvláštní výstupní světelnou mapu a nelze v ní najít žádnou rovnoměrnost a pro obdélníkové osvětlení se zdají být nepoužitelné. Tento sortiment asi 10 čoček má tvořit systém GALILEO, který Khatod vyzdvihuje na svých stránkách jako průkopník ve světě osvětlení. Myšlenka spojení několika druhů freeform čoček vypadá velmi dobře, ovšem skládání čoček do polí již normálně aplikují i ostatní výrobci. Na následujících obrázcích jsou jednotlivé čočky systému GALILEO. Obrázky jsou převzaty z datasheetů a některé z nich jsou oříznuté a mají rozdílné měřítko [23].

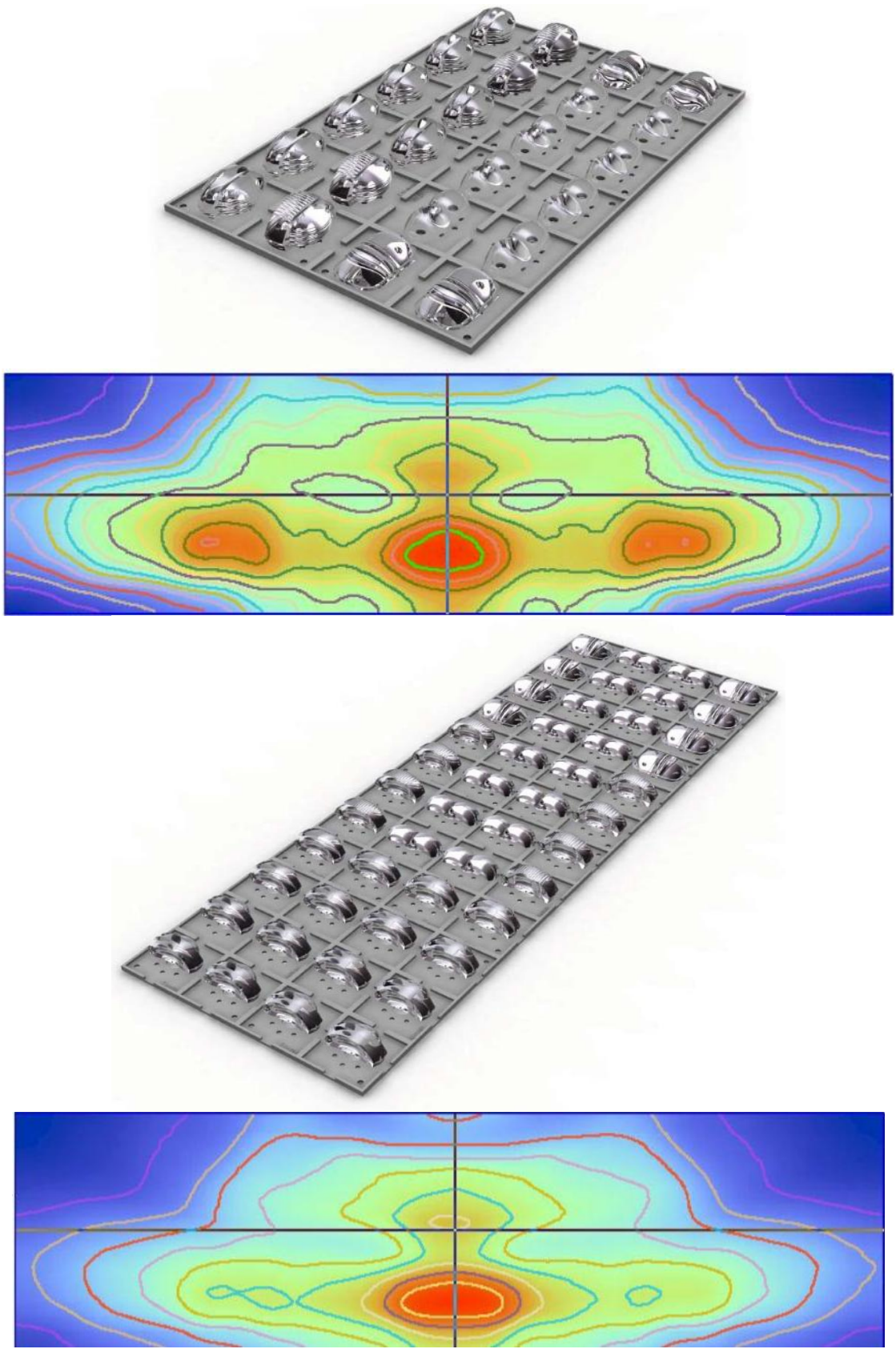


Zdroj: [23]

Obr. 19: Freeform čočky a světelné mapy PLS1355, PSL1289, PLS1290, PLS1299

Tento směr vývoje freeform čoček nemá určitě budoucnost, jedná se spíše o velmi levný návrh osvětlení, protože například výstupní světelnou mapu čočky typu 1299 je možné vytvořit v ZEMAXu za pár hodin vložením vhodné plochy a nastavením několika její parametrů. Na tuto čočku, a ani pravděpodobně na ostatní čočky, nebyla použita žádná optimalizace pomocí meritní funkce, která by čočku mohla alespoň částečně optimalizovat. Meritní funkce je totiž velmi náročná na nastavení jednotlivých parametrů tak, aby fungovaly správně a podle našich představ.

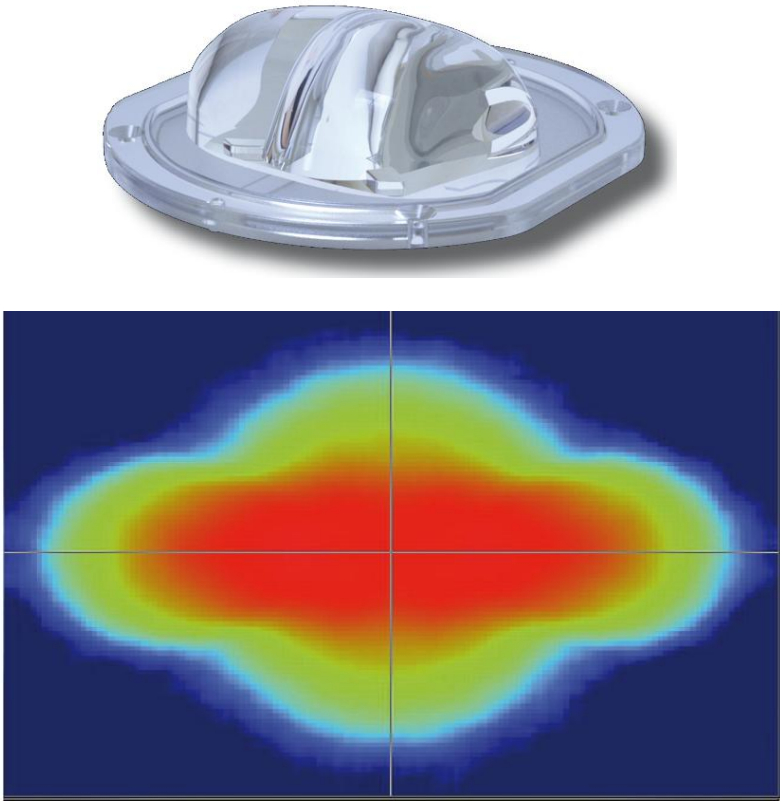
Je až s podivem, že se společnosti Khatod podařilo z těchto freeform čoček složit pole čoček generující světelné mapy uvedené na další straně. Skládání jednotlivých světelných map komplikuje odlišné měřítko každé světelné mapy. Z bližšího prozkoumání jednotlivých freeform čoček a jejich světelných map vyplývá, že tyto mapy opravdu lze složit. Výsledné osvětlení sice není příliš rovnoměrné a ohraničené, ale pravděpodobně bude poskytovat příznivou cenu, což zákazník ocení. Výsledné světelné mapy postačují pro osvětlení pozemních komunikací. Žádná norma totiž nepřikazuje precizní a rovnoměrné osvětlení pozemních komunikací, a tak je směr společnosti Khatod vlastně opodstatněný. Výrobou několika jednoduchým typů freeform čoček Khatod umožňuje vytvořit moduly s velkou škálou světelných map. Tento způsob však nepřináší žádný přínos v oblasti přesného směrování světelného toku [24, 25, 59, 20].



Zdroj: [24, 144]

Obr. 20: Čočka a světelná mapa freeform pole čoček GAL24LP6SM a GAL224LP6SM

Jediným typem freeform čočky od Khatod s částečně obdélníkovým výstupním osvětlením je PL1765SR - Type I na obrázku níže.



Zdroj: [56]

Obr. 21: Světelná mapa a freeform čočka PL1765SR - Type I

Tato čočka s rozměry 87,97 × 52,46 mm a výškou 31,36 mm je určena pro multičipové LED s příkonem až 50 W a tudíž výsledná světelná mapa neposkytuje ideální obdélník. Usměrnit světelný tok z velké multičipové LED je obtížné.

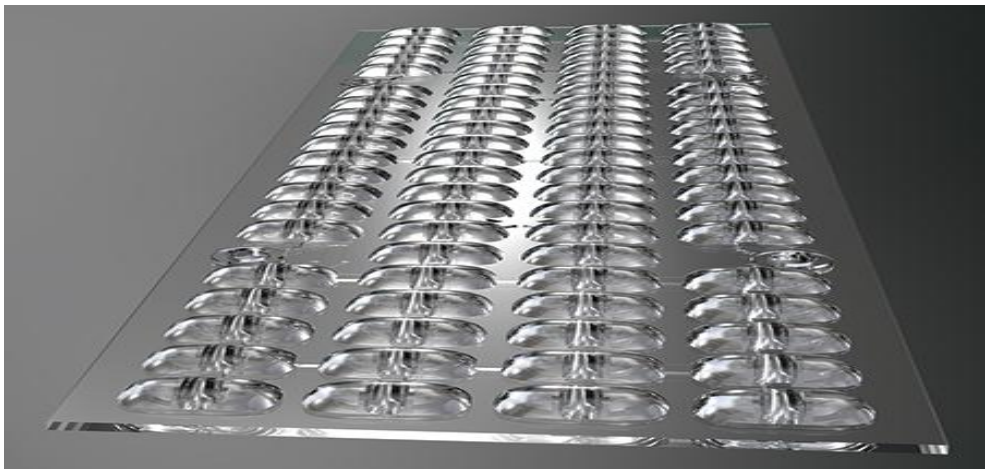
3 Technologie výroby freeform čočky

3.1 Optické materiály

Výběr optického materiálu závisí na optických a mechanických požadavcích konečného produktu s ohledem na celkové náklady. Čočky mohou být vyrobeny z minerálních skel nebo organických plastů. Ideální požadavky na materiály čoček jsou následující:

- Průhledný na všech viditelných vlnových délkách
- Homogenní (jednotné fyzické i chemické složení)
- Vysoký index lomu
- Nízká disperze
- Fyzikálně a chemicky stabilní
- Lehké
- Odolný proti poškrábání a nárazu

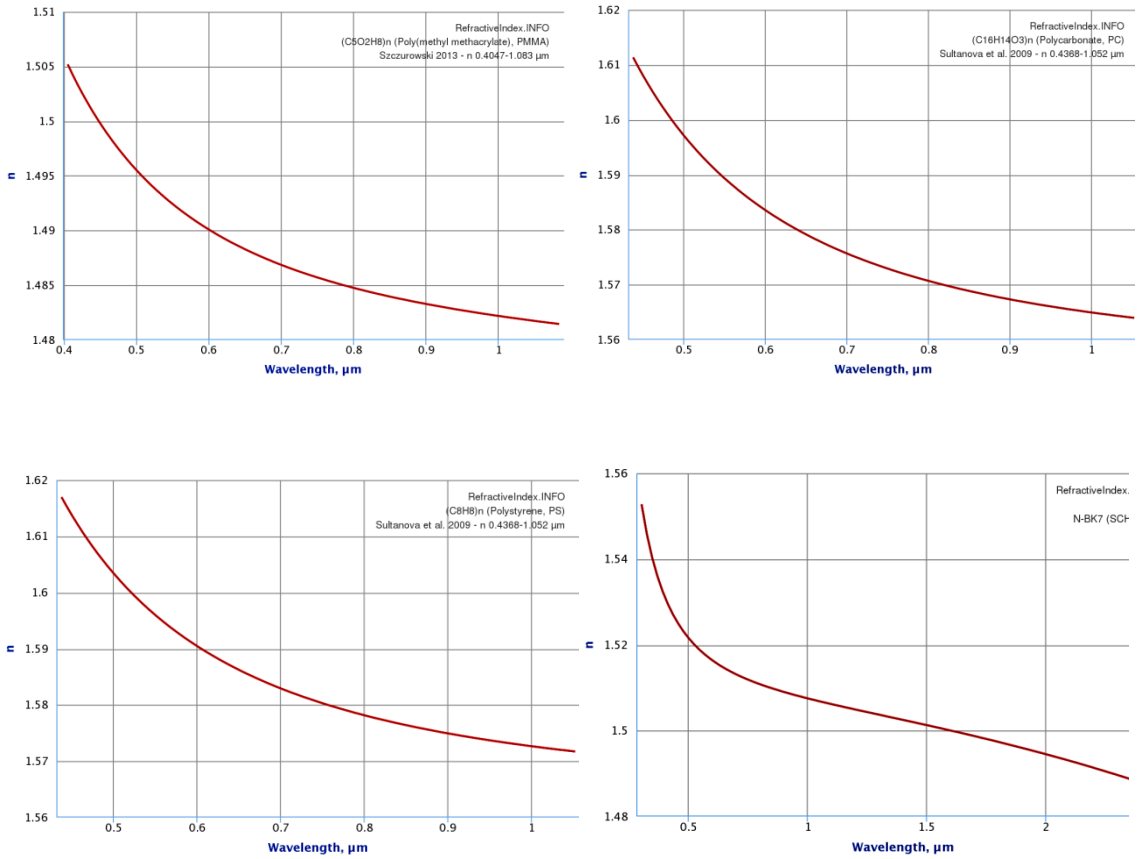
Kvalita materiálu čočky je charakterizována pomocí transmise a disperze vyjádřeného Abeeho číslem. Minerální skla jsou nejlepší optické materiály z hlediska přesnosti výroby. Díky malé tepelné roztažnosti skel je možné vyrobit relativně velké a velmi přesné čočky. Organické plasty se většinou používají na systémy s menšími nároky na optickou přesnost. Přesné velké plastové čočky je technologicky náročné vyrobit, a tak je vhodnější vytvořit pole menších čoček o velikosti i několika desítek centimetrů, které se vhodně kombinují s použitím více menších čipů LED [27, 47].



Zdroj: [3]

Obr. 22: Pole freeform čoček

Nejčastěji se používá polymetylmetakrylát (PMMA), polykarbonát (PC), polystyren (PS) nebo minerální sklo. Materiál PMMA je průhledný syntetický polymer vyrobený z metakrylátu s vlastnostmi termoplastu. Je to ekonomická alternativa polykarbonátu. Je křehčí a náchylnější na poškrábání, ale neobsahuje potenciálně škodlivý bisfenol-A, který je obsažen v polykarbonátu. Výhodou PMMA je jeho snadné zpracování a nízké náklady. Polykarbonát je termoplastický polymer, který odolává vyšším teplotám a je transparentnější než některé druhy skel. Indexy lomů nejčastěji používaných materiálů jsou zobrazeny na obrázku 23. Červená křivka znázorňuje změnu indexu lomu v závislosti na vlnové délce procházejícího záření [37, 51, 52, 66].



Zdroj: [50]

Obr. 23: Index lomů materiálů PMMA, PC, PS, N-BK7

V současné době existuje mnoho optických materiálů a jejich různých modifikací. Výrobci běžně označují vlastní vyvinuté optické materiály jako náhrady za komerčně známé materiály a garantují jejich možnou zaměnitelnost díky obdobnému indexu lomu. Například při použití optického materiálu pro výrobu čoček pro osvětlovací účely neznamená nepatrná změna indexu lomu výraznou změnu vlastností vyrobené čočky.

Základní vlastnosti nejčastěji používaných optických materiálů jsou shrnuty v tabulce 2.

Tab. 2: Vlastnosti optických materiálů

Optický materiál	**Index lomu** [-]	**Abbé číslo** [-]	**Specifická hmotnost** [g/cm^3]
Crown glass	1,523	58	2,54
1.6 glass	1,601	25	2,62
1.7 glass	1,701	30	2,93
1.8 glass	1,805	40	3,37
PMMA	1,491	59,2	1,17
PC	1,585	29,1	1,20
PS	1,592	30,5	1,05
SAN	1,567	35,4	1,09
CR-39	1,499	58,0	1,32
NAS-21	1,571	35,5	1,08
Optorez 1330	1,509	52,0	1,19
Polyolefin	1,531	56,5	1,01
Styrene	1,519	42,9	0,91
VeroClear	1,470	-	1,18

Zdroj: [35, 37, 38, 52, 49, 51, 27, 65, 66]

Nejpřísnější nároky na optický materiál jsou kladeny v oční optice, kde jsou velmi důležité vynikající optické vlastnosti, ale i mechanické vlastnosti jako je nízká hmotnost, chemická odolnost a odolnost proti poškrábání či nárazu. Speciálně pro oční optiku byl vyvinut materiál CR-39, který slučuje výhody všech materiálů. V oční optice se materiál PMMA již nepoužívá, kvalitní čočky jsou tvořeny právě z CR-39, který se blíží kvalitě minerálního skla, ale je o polovinu lehčí, nepropouští širokospektrální UV a není křehký. Oproti PMMA či PC je více odolný proti oděru, chemicky stabilnější a není možné ho rozlomit na menší části, tento materiál se pouze ohne. Na obrázku 24 je vidět rozdíl při ohnutí materiálu PMMA a CR-39. Materiál CR-39 se ani při maximálním ohybu nezlomí a nemohou tak vzniknout ostré úlomky. Všechny údaje jsou obecně shrnuty v tabulce 3 [15, 38].

Zdroj: [13]

Obr. 24: Materiál CR-39 vpravo na obrázku

Tab. 3. Vlastnosti optických materiálů, přibližné srovnání

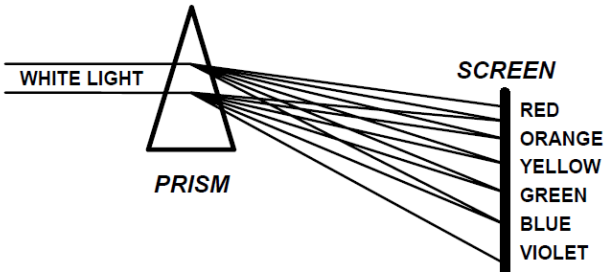
Vlastnost	Glass	PC	PMMA	CR-39
Vynikající optické vlastnosti	Ano	Ne	Ne	Ano
Hmotnost a pevnost	Ne	Ano	Ano	Ano
Odolnost proti poškrábání	Ano	Ne	Ne	Ano
Odolnost proti prasknutí	Ne	Ne	Ne	Ano
Chemická odolnost	Ano	Ne	Ne	Ano
Odolnost proti stárnutí	Ano	Ne	Ne	Ano
Odolný proti gamma záření	Ano	Ne	Ne	Ano
Široká škála barev	Ne	Ano	Ano	Ano
98 % absorbce 380 nm záření	Ne	Ne	Ne	Ano

Zdroj: [15, 60, 12]

Důležitým údajem optického materiálu je disperzní mohutnost daného materiálu v oblasti viditelného záření. Tu udává Abbeovo číslo, které je definováno:

$$V = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}, \tag{7}$$

kde n_D, n_F a n_C je index lomu příslušného materiálu na vlnových délkách odpovídajících Frauenhoferovým čarám D, F a C (tj. 589,2 nm, 486,1 nm a 656,3 nm). Čím je hodnota V vyšší, tím menší má materiál disperzi a je tedy vhodnější pro použití při konstrukci čoček. Běžné hodnoty Abbeova čísla jsou v rozsahu cca 20 až 70. Grafické znázornění disperze na optickém elementu je znázorněno na obrázku 25 [62].



Zdroj: [38]

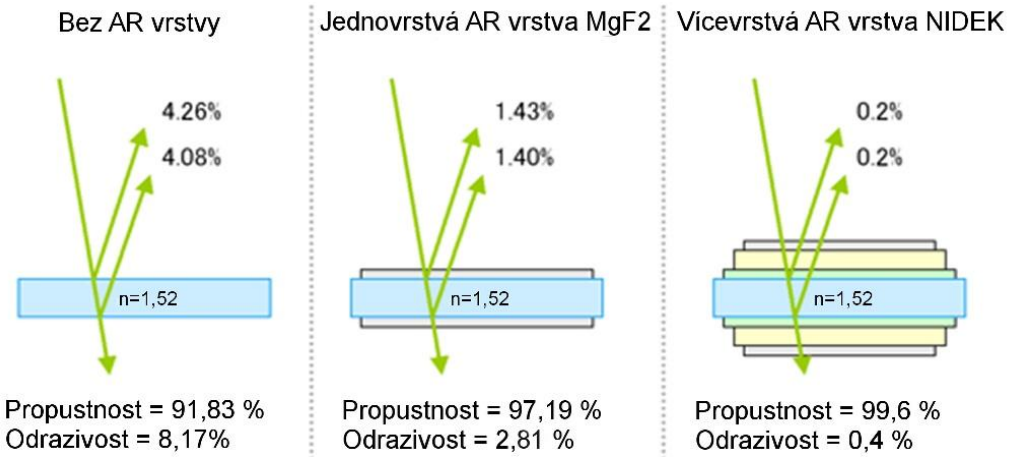
Obr. 25: Disperze světla na hranolu

3.2 Povrchové úpravy čoček

Důležitou povrchovou úpravou je antireflexní vrstva. To je vrstva aplikovaná na povrch čočky pro eliminaci odrazů. Obecně platí, že když paprsek zasáhne povrch, část energie se odrazí, část projde povrchem a v závislosti na vlastnostech povrchu se část vstřebá. Na rozhraní běžného skla s indexem lomu 1,52 a vzduchu se bez této úpravy odrazí: [22]

$$R_S = \left|\frac{n_1 cos\phi_i - n_2 cos\phi_t}{n_1 cos\phi_i + n_2 cos\phi_t}\right| = \left|\frac{n_1 cos\phi_i - n_2\sqrt{1-\left(\frac{n_1}{n_2} sin\phi_i\right)^2}}{n_1 cos\phi_i + n_2\sqrt{1-\left(\frac{n_1}{n_2} sin\phi_i\right)^2}}\right|^2 \quad (8)$$

Paprsek procházející čočkou projde tímto rozhraním dvakrát. Celkové odrazivé ztráty na čočce jsou tedy přes 8 %. V případě soustavy čoček jako je např. fotografický objektiv, je naprosto nutné nanést antireflexní vrstvy, jinak by ztráty procházejícího světla byly příliš vysoké. Nejjednodušší antireflexní vrstva je jednovrstvá. Index lomu této vrstvy se musí rovnat druhé odmocnině indexu lomu optického materiálu a tloušťka vrstvy musí být přesně rovna λ/4 vlnové délky procházejícího světla. Tím docílíme posunutí dvou vln o polovinu vlnové délky a vlny se na základě interferenčního principu eliminují. Dále ještě musí být splněna amplitudová podmínka obou vln, tzn. velikost amplitud obou vln musí být stejná. V případě skla o indexu lomu 1,52 je ideální použít materiál pro antireflexní vrstvu o indexu lomu 1,235, ovšem neexistují vhodné pevné materiály s takto nízkým indexem lomu. Nejbližší materiál s vhodnými fyzikálními vlastnostmi pro antireflexní vrstvu je fluorid hořečnatý MgF_2 s indexem 1,38. Antireflexních vrstev je možné nanést velký počet a docílit tak celkové transmise přes 99,5 %. Přesné složení materiálů, jejich tloušťky a pořadí výrobci tají. Příklad antireflexní vrstvy u běžného skla s indexem lomu 1,52 je znázorněn na obrázku 26 [35, 65].

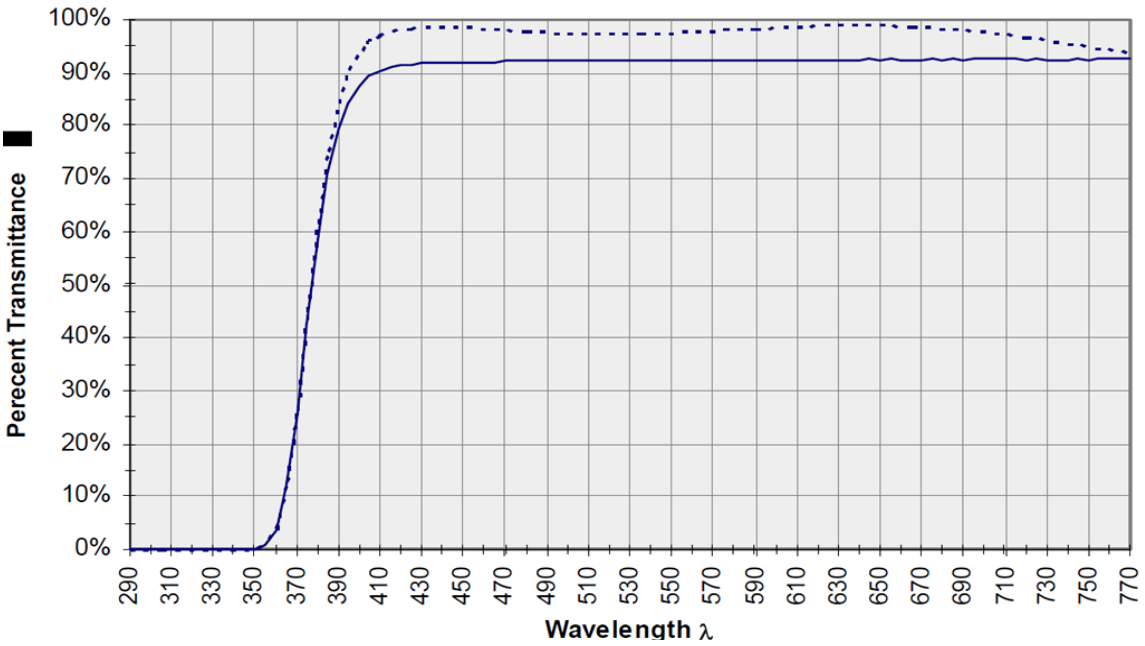


Zdroj: [43]

Obr. 26: Antireflexní vrstvy společnosti NIDEK

Z obrázku vidíme porovnání odrazivých ztrát běžného skla oproti ztrátám při použití antirefexních vrstev. Antireflexní vrstvy se nanáší u minerálních skel vakuově obdobně jako u plastových materiálů. U minerálních čoček se může využívat vyšší teploty než v případě plastových materiálů s maximální teplotou 200 °C [47].

Příklad antireflexní vrstvy nanesené na materiálu CR-39 je zobrazen na obrázku 27. Můžeme si všimnout, že CR-39 má na všech viditelných vlnových délkách propustnost přibližně 92 %, což odpovídá indexu lomu kolem 1,5. Po nanesení antireflexní vrstvy se propustnost zvýší [38].



Zdroj: [38]

Obr. 27: Účinek antireflexní vrstvy

Existuje ještě absorbující antireflexní vrstva. Ta se ale aplikuje na materiály, u kterých není důležitá celková transmise, ale pouze minimální odrazivost. V naprosté většině čoček pro osvětlovací systémy není třeba takovou vrstvu aplikovat a proto se jí nebudeme zabývat.

3.3 Obrábění formy a teplotní optimalizace

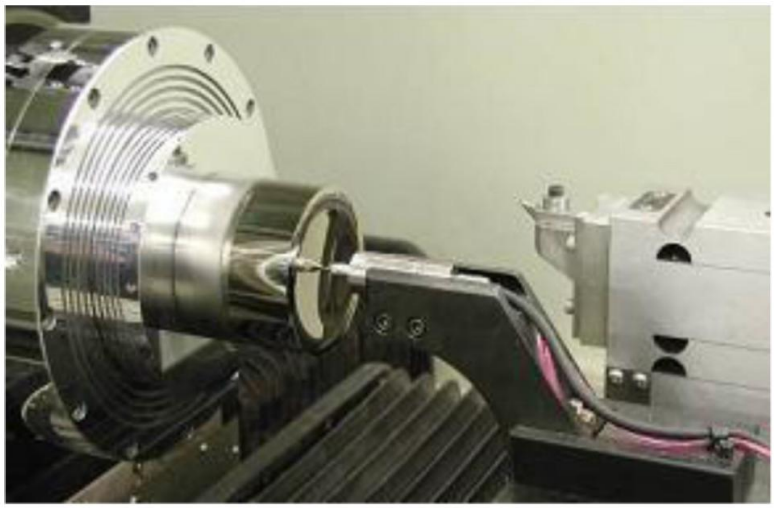
Při výrobě prototypové čočky se zprvu nevyrábí kovová forma, ale obrábí se přímo materiál, z kterého bude čočka vyrobena. Výroba kovové formy se provádí až pro sériovou výrobu čoček. Materiál forem či čoček se nejprve připraví na standardních CNC soustruzích či frézkách a až finální přesný povrch se obrábí na ultra přesných CNC zařízeních. Pro obrábění jednoduchých sférických, asférických či jiných rotačně symetrických čoček je možné použít pouze jedné rotační osy a druhé posuvné osy. Jedná se o dvouosý soustruh. Existují i zařízení, která využitím pouze dvou os dokážou vyrobit například čočku s drážkami. Výhodou těchto zařízení je nižší pořizovací cena. Při výrobě složitějších čoček je nutné použít více os. Tříosé systémy umožňují vyrábět nesymetrické tvary. Většina CNC zařízení umožňuje rozšíření až na pět os. S takovými zařízeními je možné vyrábět prakticky všechny tvary, včetně freeform čoček [21, 55].

Výzkumné centrum TOPTEC v Turnově disponuje ultra přesným CNC 350FG od firmy Nanotech. Toto CNC zařízení je přímo určeno pro výrobu freeform čoček. Standardně je vybaveno třemi osami, které lze rozšířit až na pět os [44].

Zdroj: [44]

Obr. 28: CNC 350FG firmy Nanotech

Dosahuje finální přesnosti až 3 nm. Při této vysoké přesnosti musí být zaručena konstantní teplota okolí a použitých materiálů. Jako materiál obráběcího nástroje se standardně používá diamant. Obrábění povrchů freeform čoček na CNC 350FG je vidět na obrázku níže. Proces obrábění může trvat několik desítek minut či hodin v závislosti na nastavené přesnosti a velikosti obráběné formy [21, 44, 55].



Zdroj: [44]

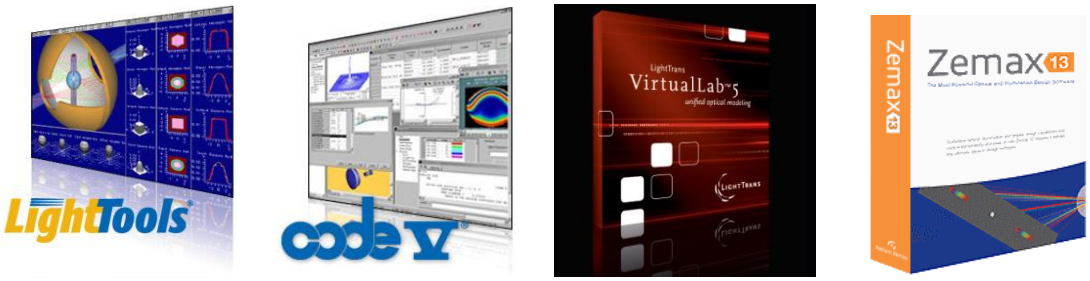
Obr. 29: Příklad obrábění na CNC Nanotech 350FG

3.4 Sériová výroba freeform čoček

Sériová výroba čoček se provádí vstřikováním, lisováním nebo odléváním za vysoké teploty a tlaku. V centru TOPTEC se čočky vyrábějí lisovací metodou, což je nejčastější způsob výroby. Při výrobě se používá materiál ve formě granulátu. Vlivem teplot až 300 °C materiál měkne a dostává se na tvarovací teplotu. Při této teplotě je vtlačován do specielních forem. Forma je poté uzavřena a ochlazuje se. Po otevření formy je výsledkem finální výrobek. Výsledný povrch čočky je možné zpřesnit leštěním či broušením [67, 68].

4 Optické programy

Pro modelování optických soustav a čoček se používají optické programy. Návrhy jednoduchých sférických či asférických čoček a soustav z nich složených podporují všechny významné programy. V poslední době začínají programy podporovat i návrhy speciální freeform čoček, které představují volný povrch s několika stupni volnosti. Umožňují tak libovolnou možnost tvarování pomocí optického programu. Nejznámější programy jsou shrnuty na obrázku 30.



Zdroj: [32, 45, 53, 57]

Obr. 30: Přehled optických programů

Ve většině programů lze skládat pole čoček z elementů v nich vytvořených a tím lze také v uspokojivé míře dosáhnout požadovaného obdélníkového osvětlení. VirtualLab(LightTrans) je jedním z programů, které přišly jako první na trh s možností tvarování volného povrchu. Funguje na metodě „Ray tracing“. Metoda spočívá ve sledování paprsků, které se postupně odráží a lomí v systému směrem ven. VirtualLab umožňuje zadat volnou plochu pouhým zadáním vzorce. To umožňuje rychlé modelování prvků s vlastním definovaným volným povrchem. Program zahrnuje jevy jako jsou interference, difrakce a polarizace [26].

Optické programy CODE V a LightTools lze přímo propojit s výkonným 3D softwarem SolidWorks, v kterém je možné vytvořit všechny ostatní komponenty, čímž je umožněno vytvořit celý projekt například pouličního osvětlení. Dalším známým a centrem TopTec používaným programem je ZEMAX, který se používá pro nejmodernější návrh a analýzu zobrazovacích systémů jako jsou fotografické objektivy, osvětlovací systémy apod. Ale také je možné modelovat optické prvky, jako jsou jednoduché čočky, asférické čočky, gradientní indexní čočky, zrcadla, difrakčních elementy a od verze 13 je možné modelovat freeform čočky. Využívá metodu trasování

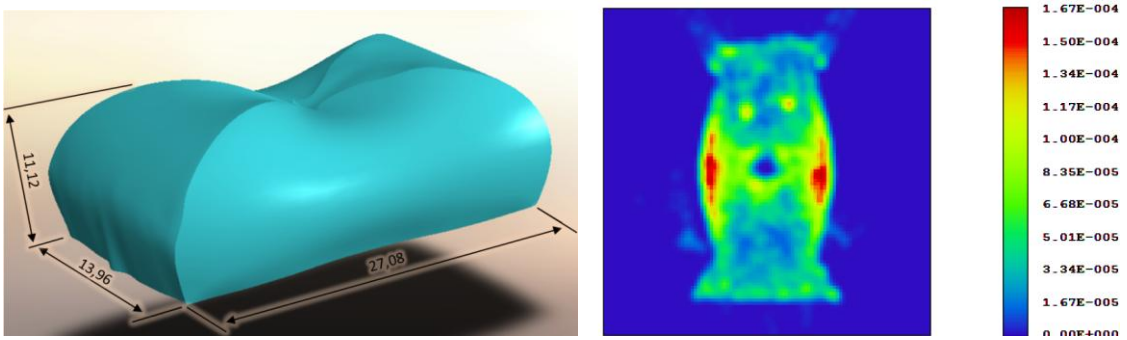
paprsku tzv. "Ray tracing“. ZEMAX umožňuje simulovat účinek různých antireflexních vrstev [16, 26, 71].

4.1 Porovnání programů ZEMAX a MATLAB

Předchozí návrh freefrorm čočky jsem v mé bakalářské práci navrhoval v programu MATLAB. Tento program je vhodný pro matematické operace s maticemi a lze ho dobře využít na návrh a tvarování ploch freeform čočky. Oproti programu ZEMAX, který je přímo stvořen pro práci s optickými elementy, má mnoho nevýhod.

4.1.1 Tvarování ploch v MATLAB

Při návrhu freeform čočky jsem se inspiroval návrhem popsaným J. Arasou, který vychází ze Snellova zákona lomu. Tento druh algoritmu rozkládá povrch čočky na jednotlivé řezy. Pro každý řez čočky se řeší úloha rovnoměrného osvětlení v rovině řezu. Po vypočítání profilu tohoto řezu se počítá další profil řezu, který je posunut o úhlový krok podél středové osy. V programu MATLAB jsem tak vytvořil množiny bodů, které reprezentují povrch čočky. Tyto množiny jsem musel v programu SolidWorks proložit plochami a vytvořit těleso, které se mohlo simulovat v ZEMAX. Dosažené výsledky byly dobré. Jakékoliv zobrazení grafů a čoček v programu MATLAB je nutné naprogramovat.



Obr. 31: Freeform čočka vytvořená v MATLAB

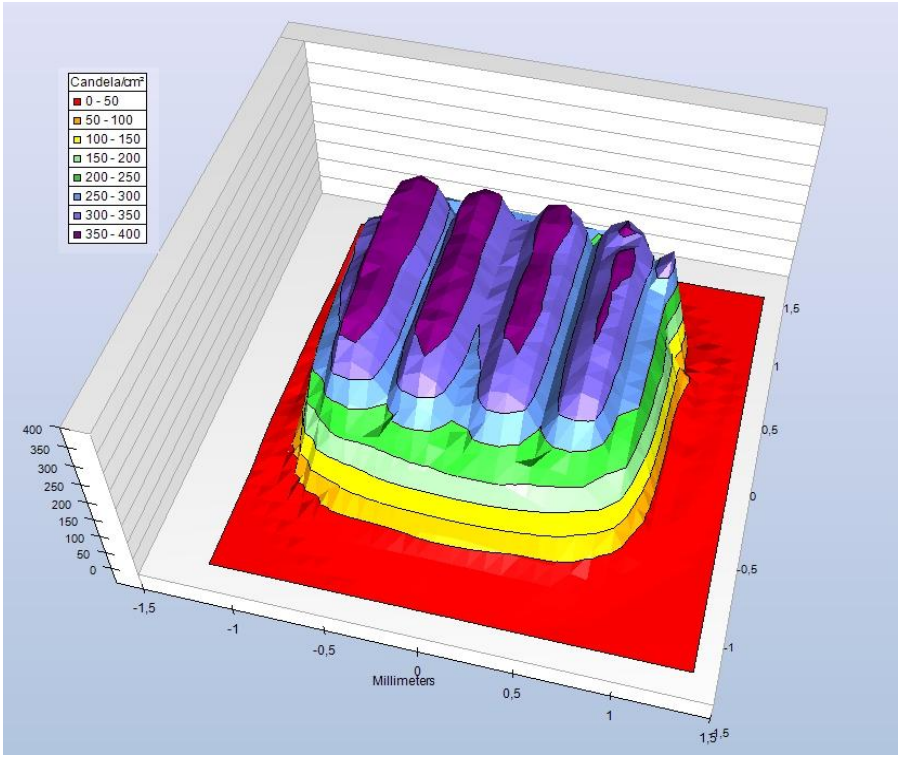
4.1.2 Tvarování ploch v ZEMAX

Současný ZEMAX nyní podporuje i návrh freeform ploch. ZEMAX má oproti MATLABu mnoho výhod. Je přímo stvořen pro navrhování optických systémů a tudíž obsahuje veškeré optimalizace ploch, různé jevy jako polarizace, interference, reflexe a rovněž má mnoho předem definovaných materiálů. Dále umožňuje přehledně zobrazit

simulovaná data v grafech a zobrazit celou soustavu v 3D. Implementovat všechny tyto údaje a optimalizace do programu MATLAB by bylo velmi náročné [71].

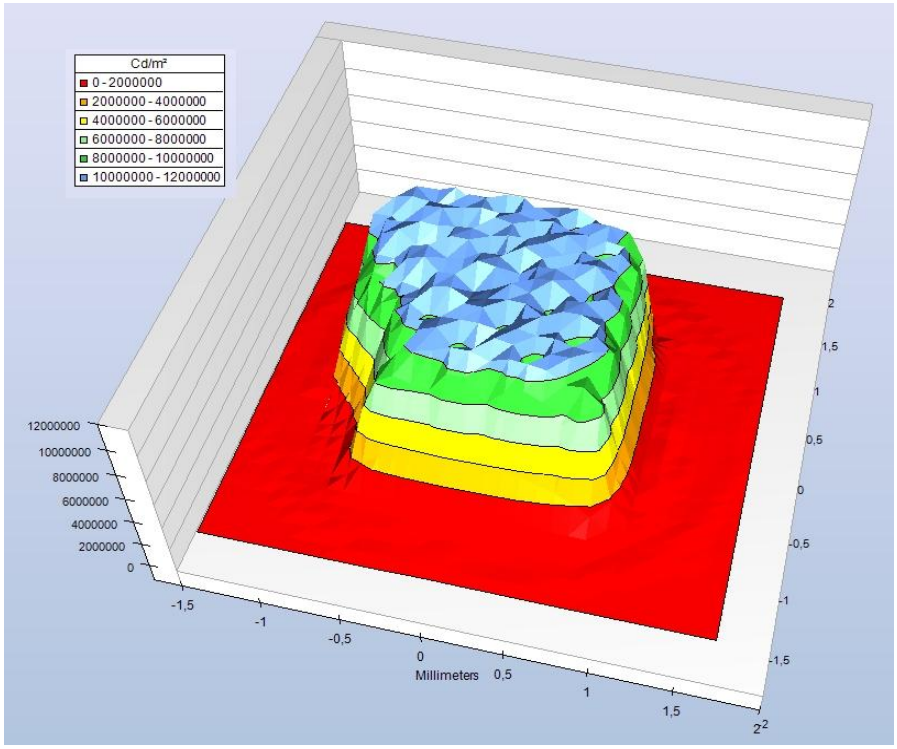
4.1.3 Import současných výkonových LED do programu ZEMAX

Na obrázcích 31 a 32 vygenerovaných programem ProSource můžeme vidět intenzitu v jednotlivých místech čipu. Na obrázku 24 je znázorněna intenzita vyzařování čipu LED Cree XP-G a lze si všimnout, že intenzita není v celém čipu stejná. V pravé části čipu u přívodních vodičů dosahuje čip vyšší intenzity. To je způsobené nestejným napájením čipu, proudová hustota v čipu tak není rovnoměrná a efektivita v různých částech čipu je rozdílná. V částech čipu s vyšší hustotou proudu je efektivita nižší a v částech čipu s nižší hustotou proudu je efektivita vyšší. Toto rozdílné rozložení intenzity závislé na proudové hustotě je nevýhodné z hlediska celkové účinnosti, ale i lokálního zahřívání čipu [11, 71].



Obr. 31: Intenzita čipu LED Cree XP-G

V nové generaci čipů společnost Cree, která využívá technologii Sc3, je čip napájen rovnoměrně a intenzita v jednotlivých místech čipu je prakticky stejná. Společnost Cree tím dosáhla ideálního rozložení proudové hustoty v celém čipu a vyrovnání účinnosti, která se zvýšila až o 10 %, což je nárůst, který Cree průměrně dosahuje za 2 roky. Intenzita vyzařování LED čipu Cree XP-G2 je znázorněna na obrázku 32.



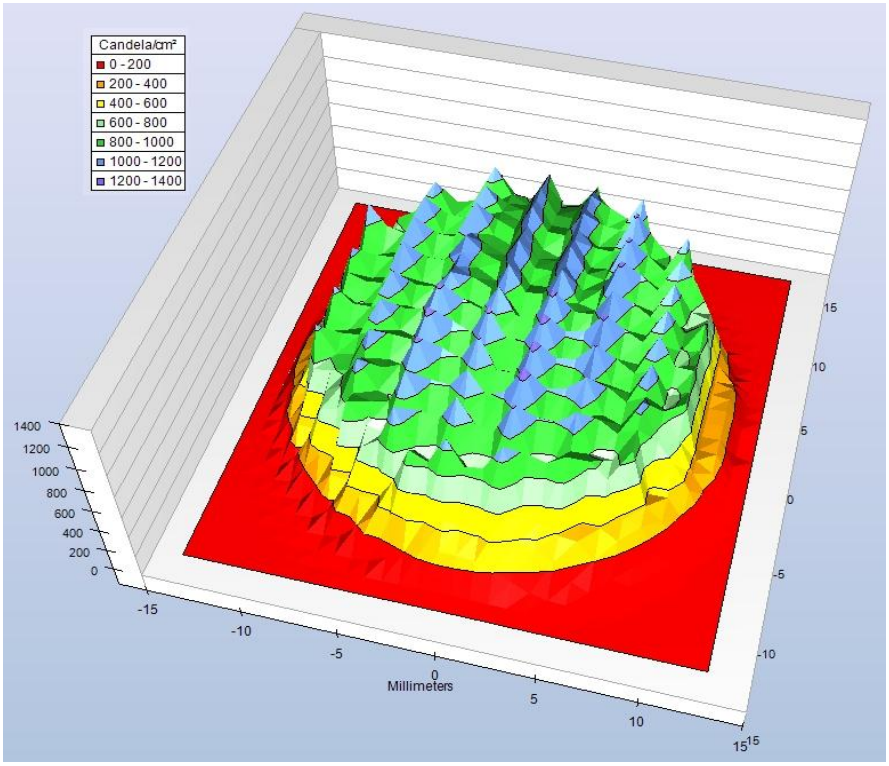
Obr. 32: Intenzita čipu LED Cree XP-G2

Pro poměrně velkou část aplikací, kde je potřeba vysoký světelný tok, se používají multičipové LED. V těchto LED je použito větší množství méně výkonných čipů, které se vyrábějí osvědčenou technologií a jsou tak levnější, než jeden výkonný čip. Tyto multičipové LED obsahují i desítky čipů a mohou mít výkon až stovky wattů. Na obrázku 33 je v měřítku 1 : 1 srovnání LED Cree XP-G2 s 2 mm^2 čipem o výkonu 5 wattů se světelným tokem 512 lumen o rozměrech 3,5 × 3,5 mm a multičipové LED CXA3590 o výkonu 150 wattů se světelným tokem až 18 000 lumen a rozměrech 34,85 × 34,85 mm [11].

Zdroj: [11, 10]

Obr. 33: Porovnání LED Cree XP-G2 a CXA3590

Intenzita vyzařování multičipové LED Cree CXA3590 je znázorněna na obrázku 35. Z důvodu použití několika desítek méně výkonných čipů je charakteristika velmi nevyrovnaná.

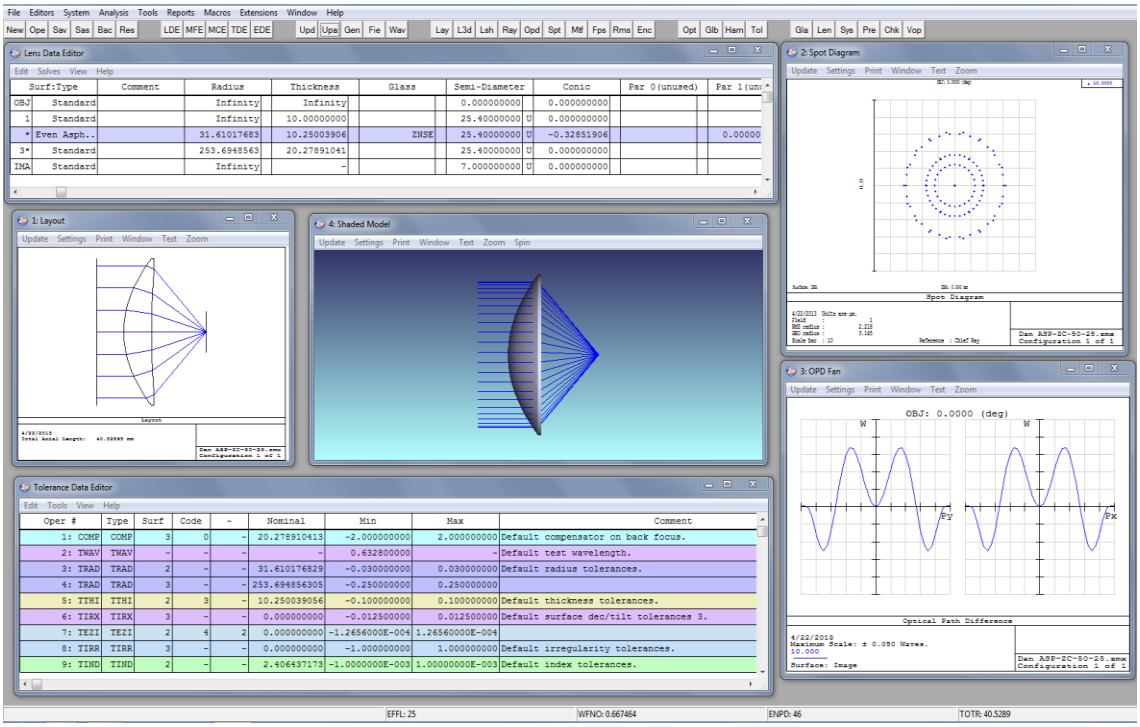


Obr. 34: Intenzita čipu LED Cree CXA3590

Tato data je možné importovat do programu ZEMAX v jediném souboru a optimalizovat povrch čočky pro konkrétní velikost čipu, což vede ještě k větší přesnosti výsledné čočky. Většina výrobců LED poskytuje dokumentaci s přesnou vyzařovací charakteristikou LED. Přesný popis importu datového souboru je popsán v kapitole ***4.2.3***. Naprogramovat v MATLAB optimalizaci čočky pro jednočipovou LED by podle těchto dat bylo možné, ovšem bylo by to velmi komplikované a časově náročné na výpočet optimalizace.

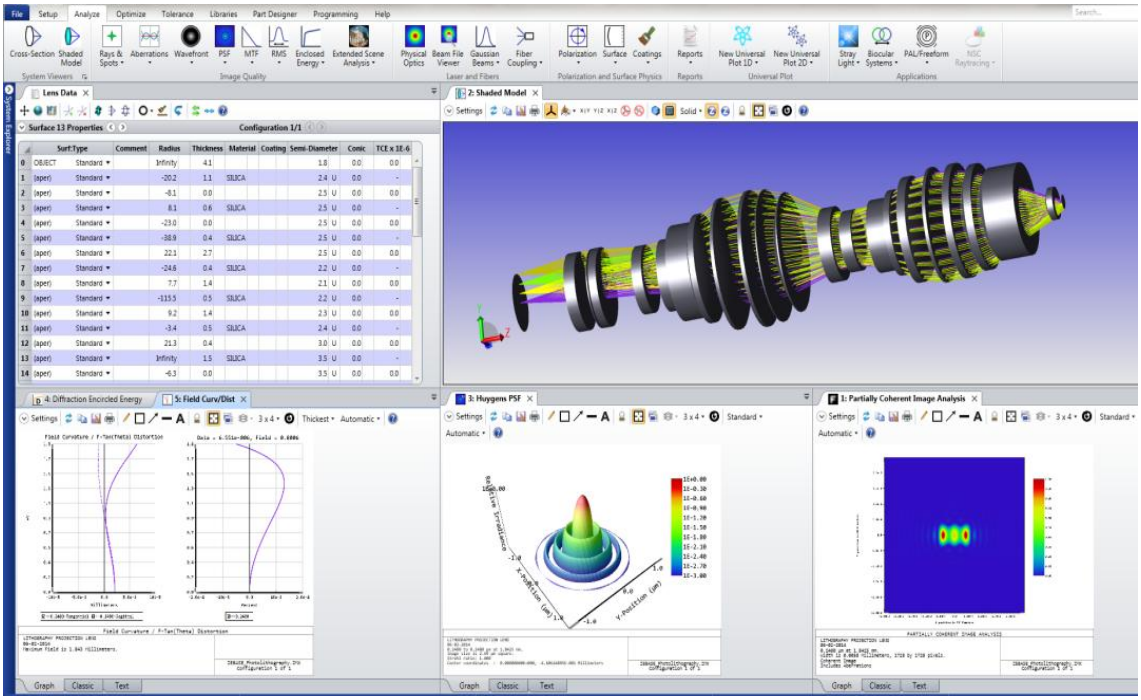
4.2 Program ZEMAX a nové OpticStudio

Společnost ZEMAX představila nový program s názvem OpticStudio. Je to nástupce standardního softwaru ZEMAX 13. OpticStudio 14 má nové grafické rozhraní pro maximální produktivitu. Toto nové rozhraní umožňuje přehledné zobrazení všech funkcí. Díky rychlému a intuitivnímu vyhledání potřebné funkce je návrh optického systému rychlejší, čímž se sníží náklady a doba potřebná k inovacím. Z výzkumu na studentech, používajících OpticStudio, bylo zjištěno, že potřebovali výrazně kratší dobu na práci. V průměru byla doba kratší o dvě třetiny než v minulých letech. Starší prostředí programu ZEMAX je zobrazeno na obrázku 35 [26, 71, 72].



Obr. 35: Prostředí ZEMAX 13

Na dalším obrázku je zobrazeno nové intuitivní uživatelské rozhraní v kombinaci s řadou funkcí, které jsou přehledně uspořádané a snadno dostupné.



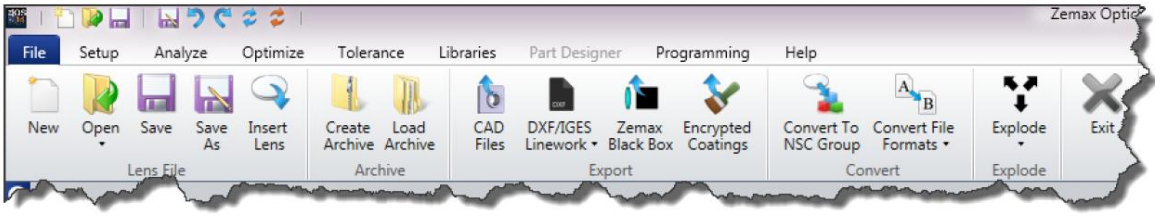
Obr. 36: Prostředí OpticStudio 14.2

4.3 Základní nastavení a funkce v ZEMAX OpticStudio 14.2

V této podkapitole bude velmi stručně popsáno základní nastavení a funkce programu ZEMAX OpticStudio 14.2. Popisovat budu pouze nastavení, která jsou nutná pro tvarování freeform čočky.

4.3.1 Správa souborů

Správa souborů jako je otevření a ukládání souborů se nachází pod záložkou "File". ZEMAX OpticStudio ukládá soubory s koncovkou ZMX. Spolu s tímto souborem se uloží i konfigurační soubory typu CFG a SES, které si například pomatují nastavení otevřených oken v OpticStudiu. Ikony v rámečku Export umožňují exportovat soubory do 3D CAD programů. Je možné exportovat soubory typu STEP, IGES,SAT a STL. Funkce ZEMAX Black Box umožňuje šifrovat povrchy ploch, které mohou být poskytnuty jiným uživatelům OpticStudia, ale neodhalí jejich přesnou konstrukci [72].

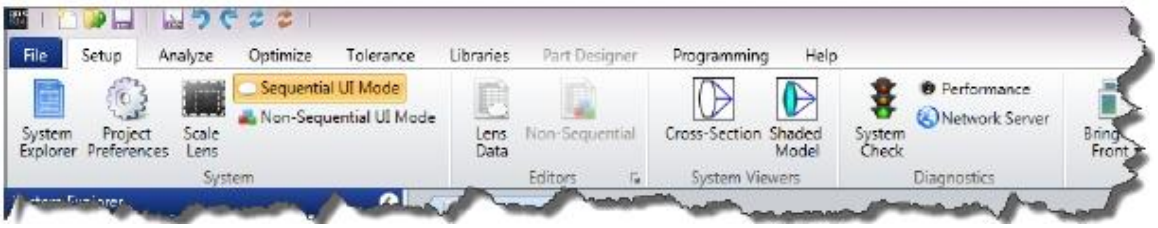


Zdroj: [72]

Obr. 37: Záložka File v OpticStudiu

4.3.2 Základní nastavení

V záložce "Setup" lze volit sekvencionální či nesekvencionální režim. Freeform čočku budu modelovat v nesekvenčním módu. Tento režim je vhodný pro tvarování těles s objemem. Režim se nastaví kliknutím na "Non-sequental UI mode". Tím aktivujeme další potřebné funkce [72].

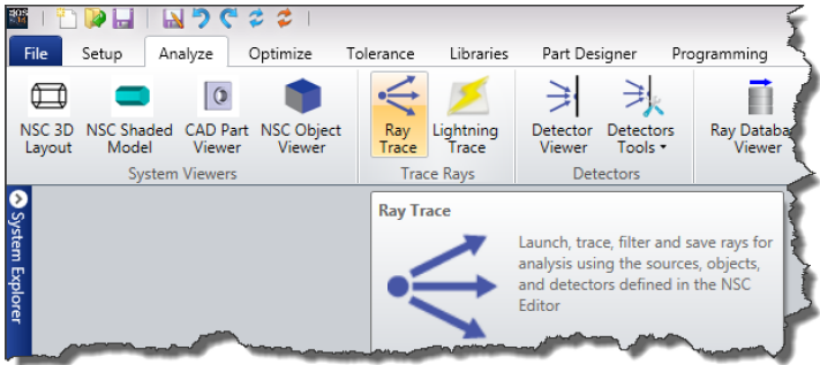


Zdroj: [72]

Obr. 38: Záložka Setup v OpticStudiu

4.3.3 *Analýza*

Nejvíce budu pracovat se záložkou "Analyze". V rámečku "System Viewers" je možné různě zobrazit modelovaný optický systém. Zde si aktivujeme "NSC Shaded Model", který vykreslí v 3D optický systém. Rámeček "Trace Rays" umožňuje zobrazení trasovaných paprsků na předem definovaném detektoru po průchodu optickým systémem. Je možné zvolit komplexní metodu nesekvenciálního módu "Ray trace", a nebo rychlejší variantu "Lighting Trace", pokud máme zdroj, který lze aproximovat bodovým zdrojem. Při každé změně v optickém systému musíme znovu kliknout na danou ikonku, abychom znovu vykreslili paprsky. Zde si aktivujeme "detektor Viewer" kliknutím na příslušnou ikonu [72].



Zdroj: [72]

Obr. 39: Záložka "Analyze" v OpticStudiu

4.3.4 *Optimalizace*

Poslední záložka, kterou využiji při návrhu čočky je "Optimize". V této záložce kliknu na ikonu "Optimize!", která spustí automatickou optimalizaci čočky pomocí nastavené meritní funkce. Je možné využít manuální optimalizaci kliknutím na "Manual Adjustment" a pomocí posuvníků měnit hodnotu koeficientů daných ploch čočky [72].

Zdroj: [72]

Obr. 40: Záložka Setup v OpticStudiu

5 Návrh freeform plochy

V této kapitole se budu věnovat návrhu freeform čočky se světelným zdrojem typu LED. Budu se snažit usměrnit veškerý světelný tok vycházející z LED tak, aby směřoval na požadovanou plochu.

5.1 Požadavky na osvětlení

Vlastnosti a výhody freeform optik jsou shrnuty v kapitole **2.2.** Z této kapitoly vyplývá, že je výhodné freeform čočky použít pro plochy, které mají být nasvětleny do obdélníku. V této práci se budu zabývat vytvořením freeform čoček pro nasvícení obdélníkového billboardu, cyklostezek a osvětlení silničních a dálničních komunikací.

Billboardy mají většinou rozměry v poměru kolem 1 : 2 a vyžadují rovnoměrné osvětlení. V dnešní době stále převažuje osvětlení reklamních ploch pomocí několika bodových světel. Nevýhodou tohoto systému osvětlení je především nepodporování samotné technologie LED a neméně důležitou nevýhodou je absence freeform čočky, která dokáže uspořit desítky procent světelného toku. Úspory však nejsou jen v celkové energetické spotřebě použité technologie, ale i v mechanické instalaci světelných zdrojů. V případě freeform technologie postačí na osvětlení billboardu pouze jediný světelný zdroj. Obdobný problém se týká pouličního, silničního a dálničního osvětlení. Zde je ale kladen důraz na maximální protažení osvětlené plochy. Standardní pouliční svítidlo má přibližně kruhovou vyzařovací charakteristiku a je málo vhodné pro osvětlení silnice. S jedinou freeform čočkou je možné nahradit dvě standardní silniční či dálniční svítidla, přičemž díky protáhlé vyzařovací charakteristice nasvítí tentýž prostor. Ušetří se tak 50 % nákladů při instalaci menšího množství stožárů. Prostor, který by měla freeform čočka nasvítit, by měl být minimálně 30 × 5 metrů či ideálně 50 × 5 metrů. Stejnou vyzařovací charakteristiku vyžaduje i nasvícení reklamních nápisů společností. Tyto nápisy rovněž vyžadují velmi protáhlou vyzařovací charakteristiku v poměru 10 : 1 a více. V současnosti je naprostá většina nápisů nasvícená i více jak 10 bočními světlomety proto, aby se docílilo alespoň částečně vytvořit obdélníkovou světelnou mapu na budově společnosti. I přesto z estetického hlediska některé nápisy nejsou rovnoměrně nasvětleny a nereprezentují dobře danou společnost. Obdobně jako u billboardů by se instalací pouhého jediného freeform světlometu šetřila velká část nákladů oproti instalaci desítek standardních světlometů.

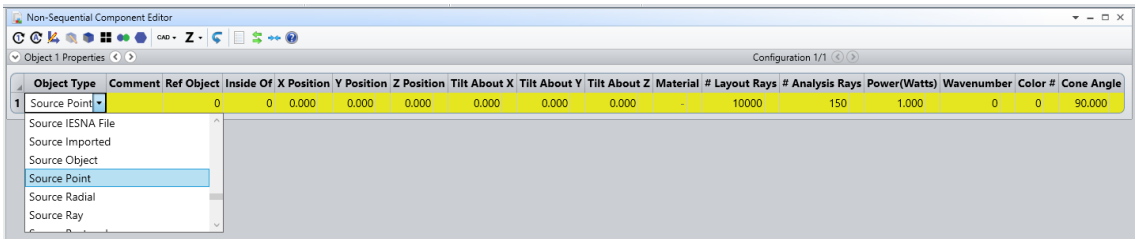
5.2 Výběr vhodné LED a definování velikosti čočky

V dnešní době vyrábí LED velké množství společností a jednotlivé LED jsou velmi odlišné. Jejich parametrům jsou popsány v kapitole ***4.1.3***

5.2.1 Vlastnosti čipu LED a vliv na velikost čočky

Velikost čočky se musí zvolit vzhledem k použité LED a rozměru jejího čipu. Ve většině firemních materiálů lze dohledat potřebné údaje. Nejrozšířenější výkonové čipy jsou o velikosti 1 - 4 mm^2. Důležitým údajem je proudová hustota čipu. Tento údaj výrobce většinou neuvádí, ale lze jej jednoduše spočítat ze znalosti velikosti čipu a maximálního proudu LED. Čím vyšší je proudová hustota čipu, tím vyšší bývá množství vyzářených lumen z jednotky plochy, což udává jas světelného zdroje. Samozřejmě záleží na účinnosti LED. Nejvyšší účinnosti dnes dosahují čipy od společnosti Cree. Nejnovější LED od společnosti Cree je LED XP-L, která má čip o velikosti 4 mm^2 v pouzdru 3,5 × 3,5 mm. Dnes je již běžně dostupná varianta XP-L s binovým označením V6, ta dosahuje účinnosti přes 200 lm/W při výkonu 1 W, což odpovídá proudu přibližně 350 mA. Proudová hustota při tomto výkonu je 0,125 A/mm^2. Při maximální proudu LED účinnost klesá. V případě Cree XP-L je maximální proud 3 A, při kterém dosahuje účinnosti 110 lm/W a celkového světelného toku 1226 lumen při příkonu 10 W. V laboratorních podmínkách Cree dosáhla světového rekordu s účinností 303 lm/W při proudu 350 mA, velikost čipu a proudovou hustotu Cree neuvádí [8].

Fyzikálně platí, že se ideálně tvarují paprsky z co nejmenší plochy, tedy z bodu. Pro úplný popis každého objektu v ZEMAXu je vytvořen "Non-Sequential Components Editor", v kterém každý řádek reprezentuje nastavení objektu v optickém systému. Pro zdroj typu bod vybereme z nabídky "Source point". Tento bod vyzařuje paprsky do kužele. Úhel kužele může být v rozmezí 0 - 180 stupňů.



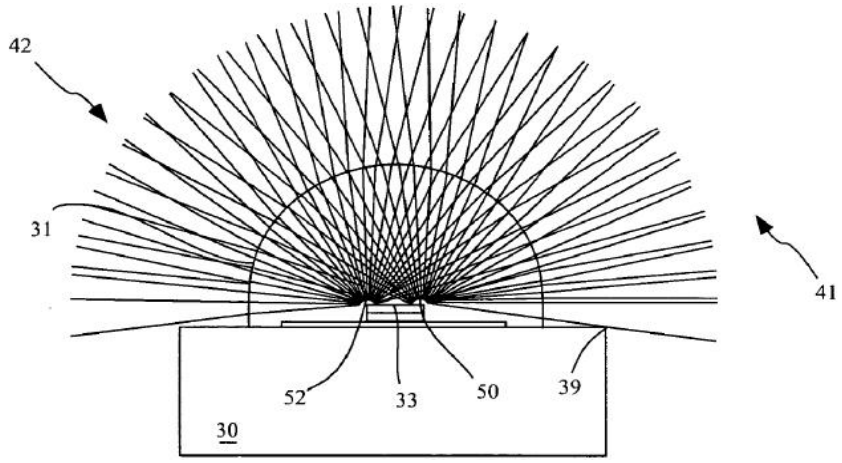
Obr. 41: Objekt "Source point" v Non-Sequential Components Editor

Prvních 10 sloupců je u všech objektů stejných a znamenají pozici, otočení bodu v prostoru a optický materiál. Po těchto 10 sloupcích následují sloupce, které jsou specifické pro každý objekt. Významy sloupců "Source point" jsou shrnuty v následující tabulce.

Tab. 4. Význam sloupců "Source point" v OpticStudiu

Sloupec	Název sloupce	Popis významu sloupců
1	Layout Rays	Určuje kolik náhodných paprsků bude simulováno ze zdroje při vytváření rozvržení grafů.
2	Analysis Rays	Určuje kolik náhodných paprsků bude simulováno ze zdroje při vytváření analýzy.
3	Power (units)	Celkový výkon definující rozsah zdroje.
4	Wavenumber	Pořadové číslo vlnové délky, která je použita při trasování náhodných paprsků. Nula znamená monochromatické.
5	Color #	Barva pera, která se použije při kreslení paprsků z tohoto zdroje
6	Cone angle	Poloviční úhel ve stupních

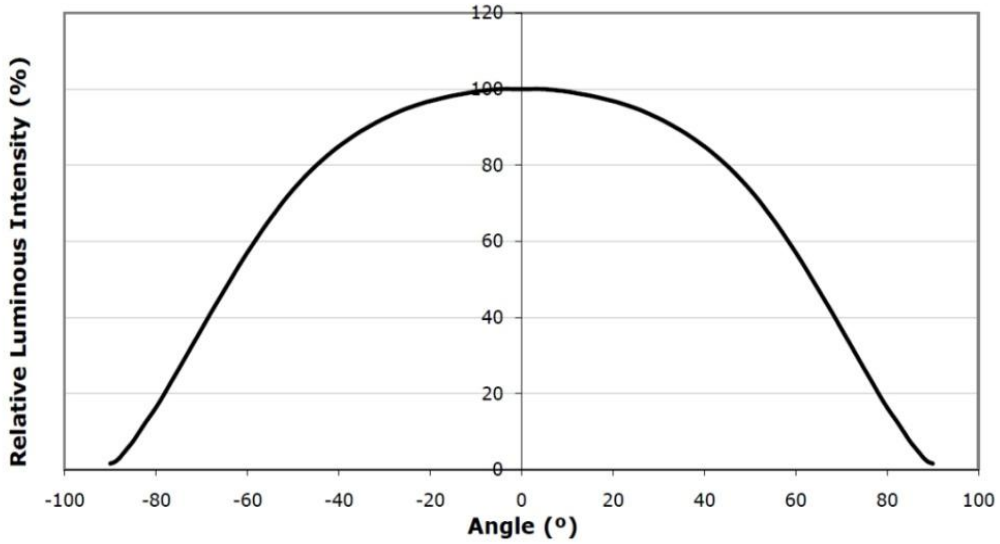
Takto zvolený bod slouží pro základní simulaci a představu vyzařování paprsků. To však v praxi není technologicky možné, protože každý zdroj světla má určitou vyzařovací plochu. Reálný LED čip má výrazně odlišné parametry. Světlo z LED čipu 33 se šíří do prostoru v úhlu 180 °. Na obrázku 42 je vidět určitá plocha LED čipu 33 a jsou zde znázorněny paprsky 41 a 42, které se šíří z pravé části LED čipu 50 a z levé části LED čipu 52. Tyto paprsky 41 a 42 mají odlišný úhel dopadu na sekundární optiku a je tedy třeba tuto optiku optimalizovat pro LED čip s definovanou plochou. Čip teoreticky může svítit i do většího úhlu než 180 °, jak je vidět na obrázku 42. Intenzita světla je ale jen velmi malá a při návrhu čočky ji můžeme zanedbat. Čím větší bude čip LED tím je potřeba větší čočka pro usměrnění paprsků [31].



Zdroj: [31]

Obr. 42: LED čip

Nejvyšší intenzita paprsků je vyzářena v ose čipu a s vyšším vyzařovacím úhlem intenzita přibližně kosinově klesá. Intenzita v ±90 ° je prakticky nulová. Vyzařovací charakteristiku LED Cree XM-L2 můžeme vidět na obrázku 43. Každý výrobce umožňuje stáhnout datový soubor, který obsahuje přesnou vyzařovací charakteristiku dané LED.



Zdroj: [9]

Obr. 43: Polární charakteristika LED Cree XM-L2

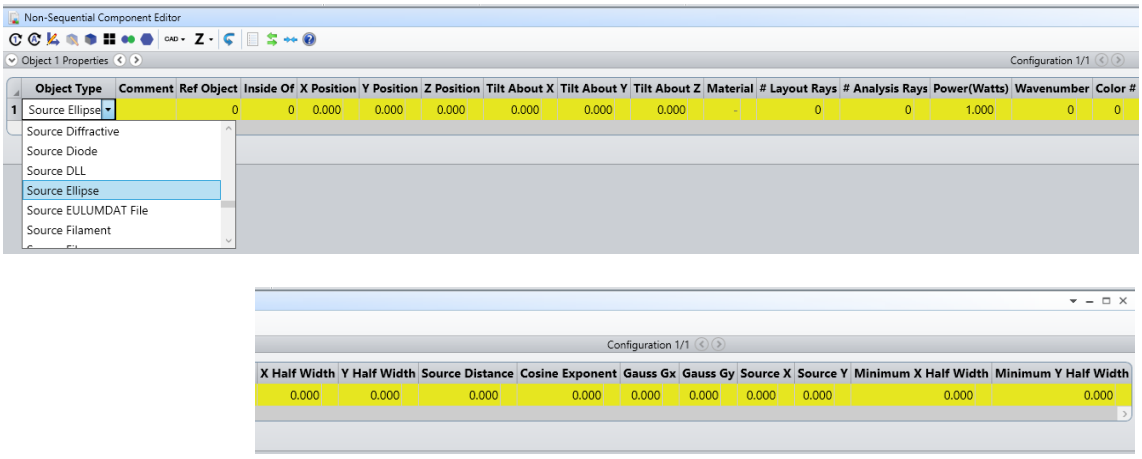
5.2.2 Rozbor ideální velikosti čočky

U malých čipů do velikosti 1 mm^2 postačí velikost optiky do 20 mm. Pro čipy o velikosti 2 - 4 mm^2 je vhodné volit větší optiku s rozměry alespoň 30 mm, abychom dosáhli lepšího usměrnění paprsků. U multičipových LED, složených až z několika

desítek čipů s rozměry vyzařovací plochy až 100 mm^2, je vhodné volit čočky s co největšími rozměry, abychom dosáhli uspokojivého usměrnění paprsků. Výrobci vyrábějí čočky s rozměry 50 až 100 mm. Vyrobit větší přesné optické prvky je technologicky náročné, a je lepší použít pole menších čoček. Kvůli velké vyzařovací ploše a nutnosti použití velké čočky, jsou multičipové LED nevhodné pro přesné směrování paprsků na danou plochu. Na obrázku 33 v kapitole ***4.1.3*** jsou jasně vidět rozdíly vyzařovací plochy jednočipové LED a výkonné multičipové LED.

5.2.3 Výběr ideální LED

V mé práci jsem se rozhodl použít jednočipovou LED XM-L2 od společnosti Cree. Tato LED je velmi podobná Cree XP-L, avšak 4 mm^2 čip je uložen do většího pouzdra o velikosti 5 × 5 mm. Maximální proud LED je 3 A, což při propustném napětí 3,5 V odpovídá výkonu přibližně 10 W. Efektivita XM-L2 s binovým označením U2 je 186 lm/W při výkonu 1 W a při maximálním výkonu 10 W dosahuje účinnosti 116 lm/W a světelného výkonu 1198 lumen při teplotě čipu 85 °C. Pro přibližné definování LED je možné nastavit objekt "Source Rectangle", který můžeme vhodně nastavit tak, aby splňoval parametry dané LED. Stejným postupem jako u výběru bodu vybereme z nabídky "Source Rectangle", čímž se nám do editoru vloží [9].



Obr. 44: Objekt "Source Rectangle" v Non-Sequential Components Editor

Tento typ světelného zdroje má plochý obdélníkový povrch, který vyzařuje paprsky. Je možné vybrat ze tří rozdílných distribucí světelného toku:

a) Všechny paprsky vyzařují z bodu umístěného kdekoliv vzhledem ke zdroji. Umístění tohoto bodu je definováno v tabulce parametrů níže. V tomto režimu zdroj funguje jako virtuální bodový zdroj.

b) Intenzita vyzářených paprsků z povrchu klesá podle rovnice
$$I(\phi) \approx I_0(cos\phi)^{Cn}, \quad (9)$$
kde exponent C_n nemusí být celé číslo a může nabývat v rozsahu 0 -100. Čím více budeme zvyšovat hodnotu exponentu, tím užší bude distribuce světelného toku. Distribuce světelného toku je rotačně symetrická.

c) Intenzita paprsků je rozdělena podle Gaussovy křivky a je popsána rovnicí
$$I(l,m) \approx I_0 e^{-(G_x l^2 + G_y m^2)}, \quad (10)$$
kde l a m jsou směry kosinových paprsků ve směrech x a y. G_x a G_y jsou konstanty. Tato distribuce může být použita pro zdroj, který je odlišný ve směrech x a y. Zvyšováním hodnot G_x a G_y se zúží distribuce světelného toku v příslušných směrech.

Zvolení jedné z možnosti určíme nastavením příslušných parametrů. Pokud zvolíme C_n vyšší než jedna automaticky se zvolí kosinová distribuce bez ohledu na nastavení G_x a G_y. Pokud bude C_n nulové a G_x a G_y nenulový zdroj se bude chovat s rozložením paprsků podle Gaussovy křivky. Jestliže necháme všechny parametry nulové, automaticky se zvolí možnost virtuální bodový zdroj. Parametry pro definování zdroje jsou shrnuty v tabulce 5. Sloupce 1 až 5 jsou identické se sloupci "Source point" v tabulce 4.

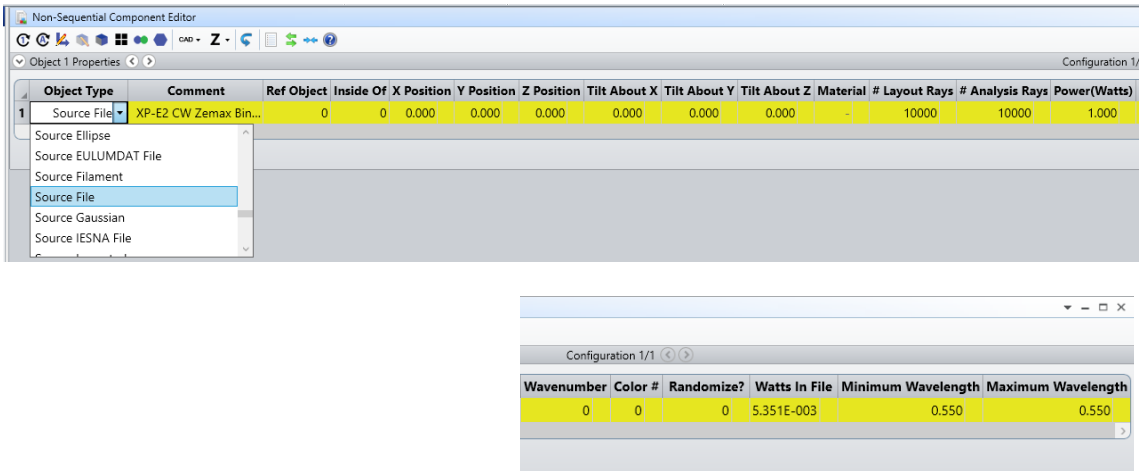
Tab. 5. Význam sloupců "Source Rectangle" v OpticStudiu

Sloupec	Název sloupce	Popis významu sloupců
6	X Half Width	Poloviční rozměr čočky ve směru X.
7	Y Half Width	Poloviční rozměr čočky ve směru Y.
8	Source Distance	Vzdálenost bodového zdroje od zdrojového objektu ve směru Z. Hodnota může být kladná nebo záporná. Je-li nulová, paprsky jsou kolimovány. Je-li kladná, bodový zdroj leží za objektem. Je aktivní pouze, když C_n, G_x a G_y je nulové.
9	Cosine Exponent	Velikost kosinového exponentu.
10	Gaussian Gx	X term Gaussovské distribuce. Je ignorováno, když C_n není nulové.
11	Gaussian Gy	Y term Gaussovské distribuce. Je ignorováno, když C_n není nulové.

12	Source X	Souřadnice bodu X, který vyzařuje paprsky. Pokud je parametr C_n nula, je Source X kosinový směr X kolimovaného svazku paprsků. Je aktivní pouze, když C_n, G_x a G_y je nulové.
13	Source Y	Souřadnice bodu Y, který vyzařuje paprsky. Pokud je parametr C_n nula, je Source Y kosinový směr Y kolimovaného svazku paprsků. Je aktivní pouze, když C_n, G_x a G_y je nulové.

V případě, že je zdroj modelován jako virtuální bodový zdroj, přispívají hodnoty X a Y Half Width a X a Y Source k výpočtu úhlového rozložení zdroje.

Jednodušší možností je stáhnout soubor ve formátu SDF, který by měla většina výrobců LED podporovat. Tento soubor vždy reprezentuje konkrétní LED. Soubor je nutné umístit do adresáře v programu ZEMAX <data>\Objects\Sources\Source Files folder. Poté zvolíme z nabídky "Source file", vybereme příslušný soubor ve formátu SDF. U takto načteného souboru není možné provádět změny. Můžeme měnit pouze počet paprsků zdroje. Parametry vidíme na obrázku 45.



Obr. 45: Objekt "Source file" v Non-Sequential Components Editor

Významy jednotlivých sloupců zdroje jsou shrnuty v tabulce 6. Sloupce 1 až 5 jsou identické se sloupci objektu "Source point" v tabulce 4.

Tab. 6. Význam sloupců "Source File" v OpticStudiu

Sloupec	Název sloupce	Popis významu sloupců
6	Cone angle	Poloviční úhel ve stupních
7	Power In File	Referenční hodnota pro celkový výkon stanovena programem ZEMAX při čtení souboru. Neměla by se měnit. Pokud je parametr nulový, jedná se o polychromatický zdroj a skutečná síla je daná parametrem 3.
8	Minimum Wavelength	Referenční hodnota pro minimální vlnovou délku v nm, je stanovena programem ZEMAX při čtení souboru a neměla by se měnit.
9	Maximum Wavelength	Referenční hodnota pro maximální vlnovou délku v nm, je stanovena programem ZEMAX při čtení souboru a neměla by se měnit.

Binární soubor SDF je možné vytvořit přeložením textového souboru. Maximální počet paprsků v souboru je 1 000 000 s velikostí 32 MB. ZEMAX automaticky konvertuje textový soubor do binárního souboru SDF, protože čtení z tohoto souboru je 20 × rychlejší a je o 30 % menší.

Pro dostatečné usměrnění paprsků by měla vyhovovat čočka o velikosti 30 mm. Já zvolím jako počáteční rozměry čočky 35 × 20 mm. Během navrhování je možné rozměry čočky měnit. Zadání rozměrů čočky se budu věnovat v následující kapitole.

5.3 Definování základních ploch čočky

V optice se pro s výhodou pro popis ploch používá Zernikova formalismu. Tímto matematickým vyjádřením lze popsat většinu povrchů a optických vad generovaných při výrobě. Povrch je popsán rovnicí:

$$R_n^m(\rho) = \sum_{i=0}^{\frac{n-|m|}{2}} (-1)^5 \frac{(\mathrm{n-s})!}{\mathrm{s}!\left(\frac{\mathrm{n+|m|}}{2}-\mathrm{s}\right)!\left(\frac{\mathrm{n-|m|}}{2}-\mathrm{s}\right)!} \rho^{\mathrm{n-2s}} \qquad (11)$$

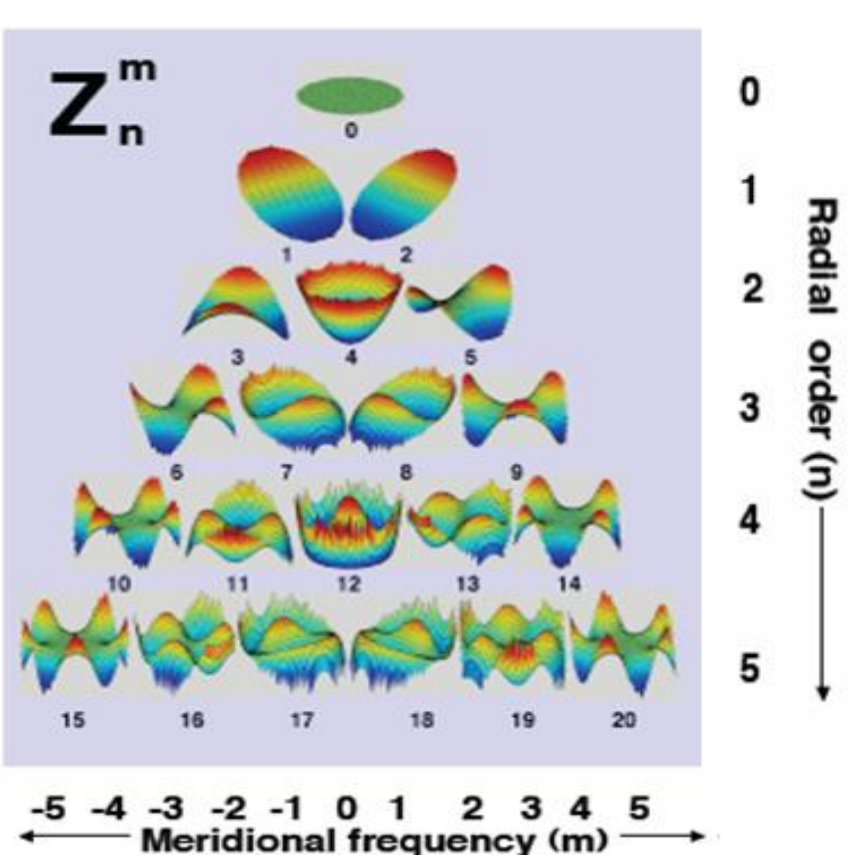
Tuto rovnici lze definovat pomocí Z-termů. Každý Z-term ovlivňuje určitou část plochy a představuje optickou vadu. Čísla Z-termů a jejich matematický popis je shrnut v tabulce 7 [59].

Tab. 7. Význam jednotlivých Z-termů

#	Polynom	(n,m)	Název vady
0		(0,0)	
1	$\rho \cdot cos\,(\phi)$	(1,1)	Otočení X
2	$\rho \cdot sin\,(\phi)$	(1,-1)	Otočení Y
3	$\rho^2 \cdot cos\,(2 \cdot \phi)$	(2, 2)	Astigmatismus X
4	$2 \cdot \rho^2 - 1$	(2, 2)	Síla ostření
5	$\rho^2 \cdot sin\,(2 \cdot \phi)$	(2, 0)	Astigmatismus Y
6	$\rho^3 \cdot cos\,(3 \cdot \phi)$	(3,3)	Trefoil Y
7	$(2 \cdot \rho^3 - 2 \cdot \rho) \cdot cos(\phi)$	(3, 1)	Coma X
8	$(2 \cdot \rho^3 - 2 \cdot \rho) \cdot sin(\phi)$	(3, -1)	Coma Y
9	$\rho^3 \cdot sin\,(3 \cdot \phi)$	(3, -3)	Trefoil Y
10	$\rho^4 \cdot cos\,(4 \cdot \phi)$	(4, 4)	Tetrafoil X
11	$(4 \cdot \rho^4 - 3 \cdot \rho^2) \cdot cos(\phi)$	(4, 2)	Sekundární astigmatismus X
12	$6 \cdot \rho^4 - 6 \cdot \rho^2 + 1$	(4, 0)	Primární sféra
13	$(4 \cdot \rho^4 - 3 \cdot \rho^2) \cdot sin(2 \cdot \phi)$	(4, -2)	Sekundární astigmatismus Y
14	$\rho^4 \cdot sin\,(4 \cdot \phi)$	(4, -4)	Tetrafoil Y
15	$\rho^5 \cdot cos\,(5 \cdot \phi)$	(5, 5)	Pentafoil X
16	$(5 \cdot \rho^5 - 4 \cdot \rho^3) \cdot cos(3 \cdot \phi)$	(5, 3)	Sekundární trefoil X
17	$(10 \cdot \rho^5 - 12 \cdot \rho^3 + 3 \cdot \rho) \cdot cos(\phi)$	(5, 1)	Sekundární coma X
18	$(10 \cdot \rho^5 - 12 \cdot \rho^3 + 3 \cdot \rho) \cdot sin(\phi)$	(5, -1)	Sekundární coma Y
19	$(5 \cdot \rho^5 - 4 \cdot \rho^3) \cdot sin(3 \cdot \phi)$	(5, -3)	Sekundární trefoil Y
20	$\rho^5 \cdot sin(5 \cdot \phi)$	(5, -5)	Pentafoil Y

Zdroj: [59]

Graficky znázorněné vlivy jednotlivých Z-termů jsou znázorněny na následujícím obrázku.



Zdroj: [59]

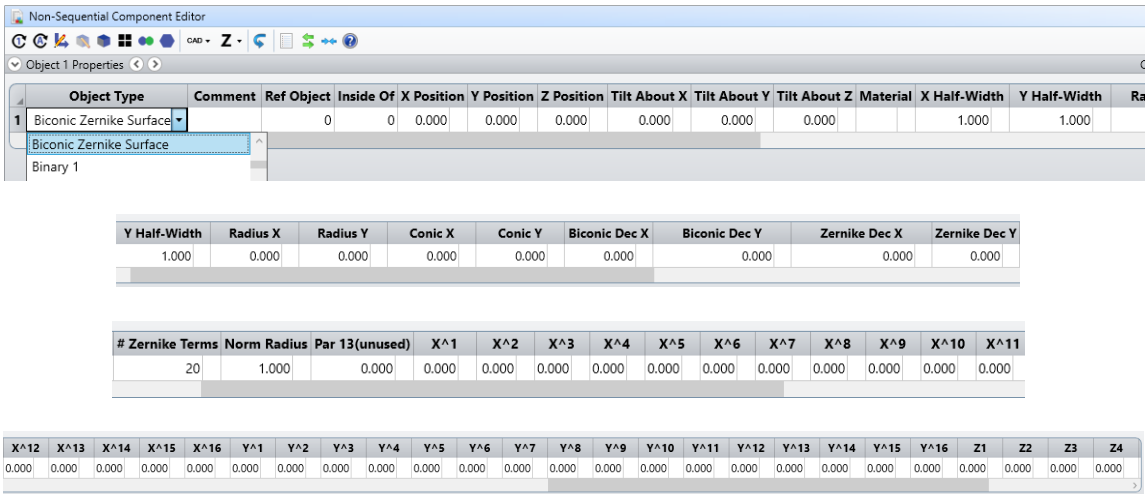
Obr. 46: Znázornění jednotlivých Z-termů

ZEMAX umožňuje jako plochu zvolit bikonickou Zernikovu čočku. Oproti standardní Zernikeho ploše má tato plocha navíc ještě 16 asférických koeficientů. Pro tvarování freeform čočky je tento povrch v OpticStudiu nejvhodnější. Lze ho nejlépe tvarovat do prakticky libovolného tvaru. Rovnice popisující bikonickou Zernikovu čočku má tvar:

$$z = \frac{c_x x^2 + c_y y^2}{1+\sqrt{1-(1+k_x)c_x^2 c^2-(1-k_y)c_y^2 y^2}} + \sum_{i=1}^{16} \alpha_i x^i + \sum_{i=1}^{16} \beta_i y^i + \sum_{i=1}^{16} A_i Z_i(\rho, \varphi)\,, \quad (12)$$

kde $c_x = \frac{1}{R_x}$, $c_x = \frac{1}{R_x}$

R_x a R_y jsou poloměry zakřivení ve směru y a x, k_x a k_y jsou kónické konstanty v x a y asférických koeficientech, N je počet Zernikeho koeficientů v sérii, A_i je koeficient i^{th} Zernikeho radiální souřadnice. Kliknutím pravým tlačítkem myši na řádek v "Non-Sequential Components Editor" přidáme další objekt v optickém systému a tuto čočku zvolíme výběrem "Biconic Zernike Lens". Následující parametry v řádku na obrázku 47 přesně definují bikonickou Zernikovu čočku v OpticStudiu.



Obr. 47: Objekt "Biconic Zernike Lens" v Non-Sequential Components Editor

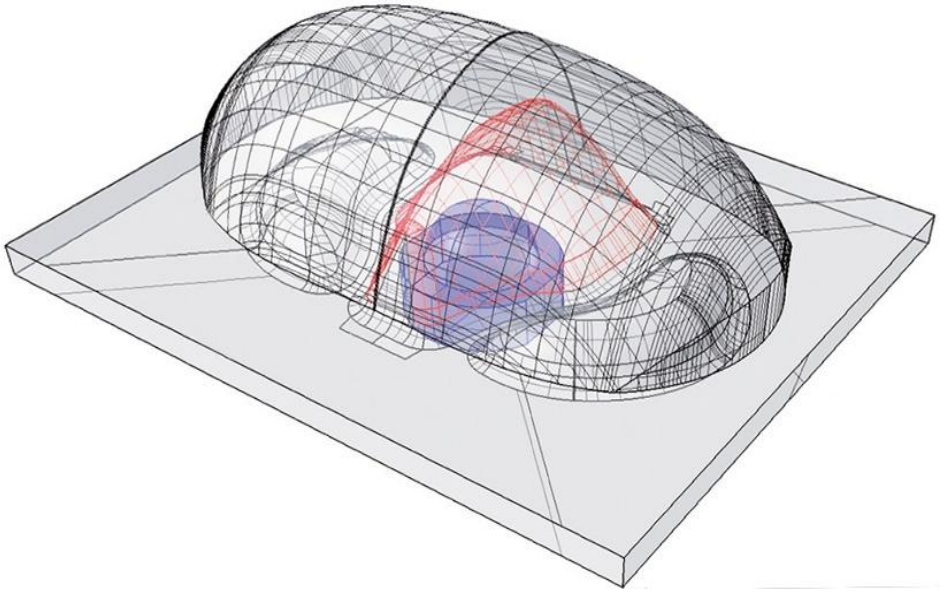
Jednotlivé významy sloupců jsou shrnuty v tabulce 8. Standardně je ve sloupci 12 nastavena nula, která představuje nulový počet Z-termů. Přepsáním této hodnoty se nám zobrazí požadovaný počet Z-termů.

Tab. 8. Význam sloupců "Biconic Zernike Lens" v OpticStudiu

Sloupec	Název sloupce	Popis významu sloupců
1	X Half-Height	Poloviční rozměr čočky ve směru X.
2	Y Half-Width	Poloviční rozměr čočky ve směru Y. Pokud je parametr nulový, bude vnější tvar čočky kruhový. Pokud je parametr pozitivní, bude vnější tvar čočky obdélníkový. Pokud je záporný, bude vnější tvar čočky eliptický.
3	Thickness	Tloušťka středu čočky.
4, 5		Nevyužito.
6	Front Radius	Přední rádius křivosti. Nulový parametr představuje plochu.
7	Front Conic	Přední kónická konstanta.
8, 9	Rear Radius X,Y	Zadní poloměr strany ve směru X/Y. Nulový parametr představuje plochu.
10, 11	Rear Conic X,Y	Zadní kónická strana ve směru X/Y.
12	Zernike Terms	Počet standardních Zernikeho termů.
13	Norm radius	Normalizační rádius Zernikeho termů.
14 - 29	X^1- X^16	Asférické koeficienty ve směru x.

30 - 45	Y^1- Y^16	Asférické koeficienty ve směru y.
46 a výše	Z1 - Zx	Zernikeho standardní koeficienty.

Čočka se bude skládat ze dvou freeform povrchů, z vnitřního a z vnějšího. Vnitřní povrch vhodně zalomí paprsky do optického materiálu a vnější povrch usměrní paprsky na požadované místo. Na obrázku je naznačena freeform čočka, vnitřní povrch je znázorněn červeně. Oba povrchy budu volit jako freeform plochy.



Zdroj: [14]

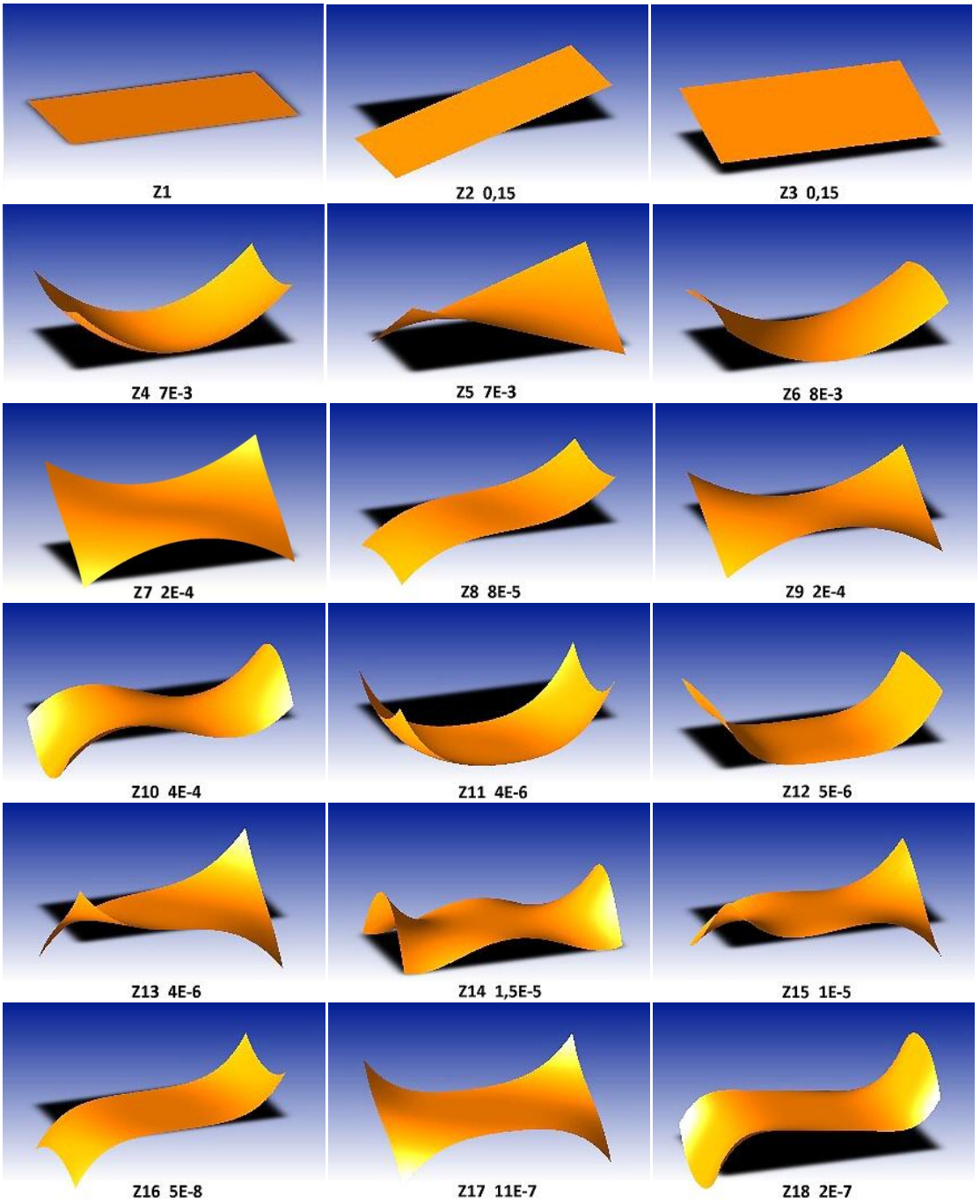
Obr. 48: Schéma povrchů freeform čočky

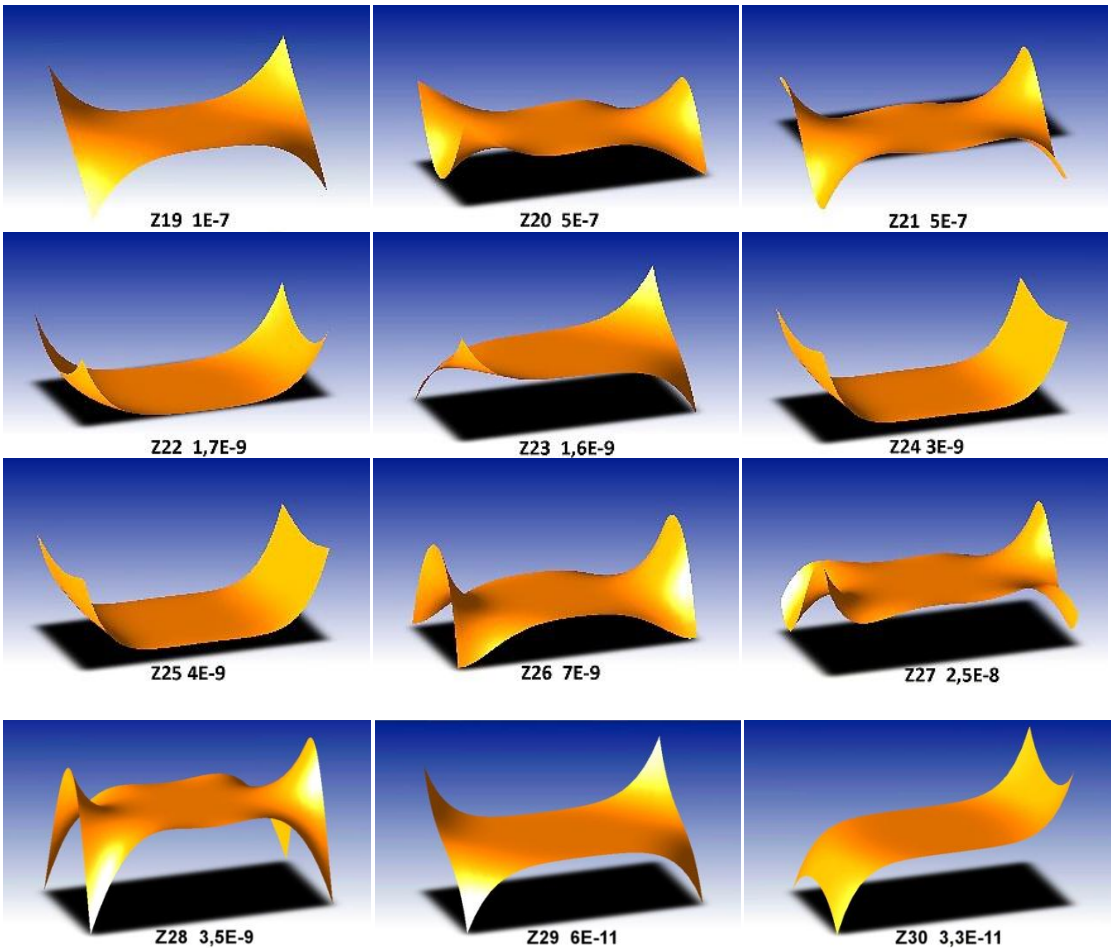
Při návrhu freeform čočky je nutné brát ohledy na vyrobitelnost všech ploch čočky. Více tomuto problému bylo věnováno v kapitole **3.3**.

5.4 Tvarování povrchu čočky

Jeden ze dvou největších problémů je co nejlépe natvarovat freeform čočku pro simulaci a optimalizaci v OpticStudiu. Žádný optický program nefunguje tak, že se určí požadovaná výstupní světelná mapa a přibližné rozměry čočky a program poté sám vygeneruje kompletní návrh freeform čočky. Je nutné experimentálním nastavením vymodelovat čočku tak, aby co nejlépe osvětlovala daný prostor. Po další optimalizaci se musí naprogramovat meritní funkce, podle které bude program freeform čočku optimalizovat. Meritní funkce bude popsána v následující kapitole.

Obecná Zernikova plocha a bikonická Zernikova čočka v OpticStudiu se liší. Čísla jednotlivých Z-termů Zernikovy plochy neodpovídají číslování Z-termů v OpticStudiu. Existuje tabulka, která převádí čísla Z-termů Zernikeho plochy na čísla odpovídající Z-termům bikonické Zernikeho čočky v OpticStudiu. Pro představu, jaký vliv mají jednotlivé Z-termy na plochu v OpticStudiu, jsem si nasimuloval prvních 30 Z-termů na ploše o velikosti požadované čočky 35 × 20 mm, jak je vidět na obrázku 49. Vždy jsem nastavoval pouze jediný Z-term. Číslo Z-termu a nastavená hodnota je vždy v každém obrázku.



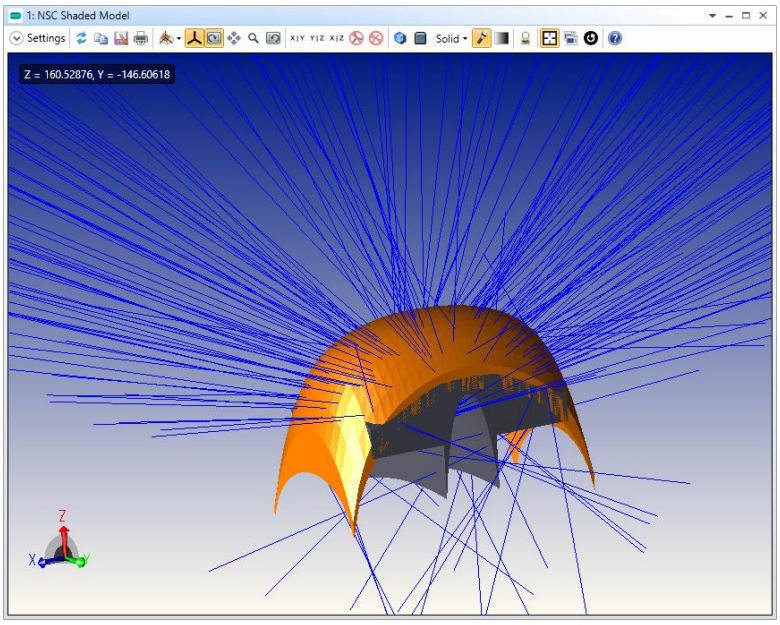


Obr. 49: Znázornění jednotlivých Z-termů v OpticStudiu

Z těchto údajů je dobře vidět vliv jednotlivých Z-termů. Kombinací těchto Z-termů je možné vytvořit návrh freeform čočky. Pokud budeme chtít rovnoměrně osvětlenou obdélníkovou plochu, nesmíme použít nesymetrické Z-termy. Můžeme využít pouze Z-termy s čísly 4, 6, 11, 12, 14, 21, 24, 25, 28 a 28. U některých Z-termů si lze všimnout jejich podobnosti. Rozdíl mezi těmito Z-termy se dá přirovnat k rozdílu řádu u standardních funkcí.

5.4.1 Vnější povrch čočky

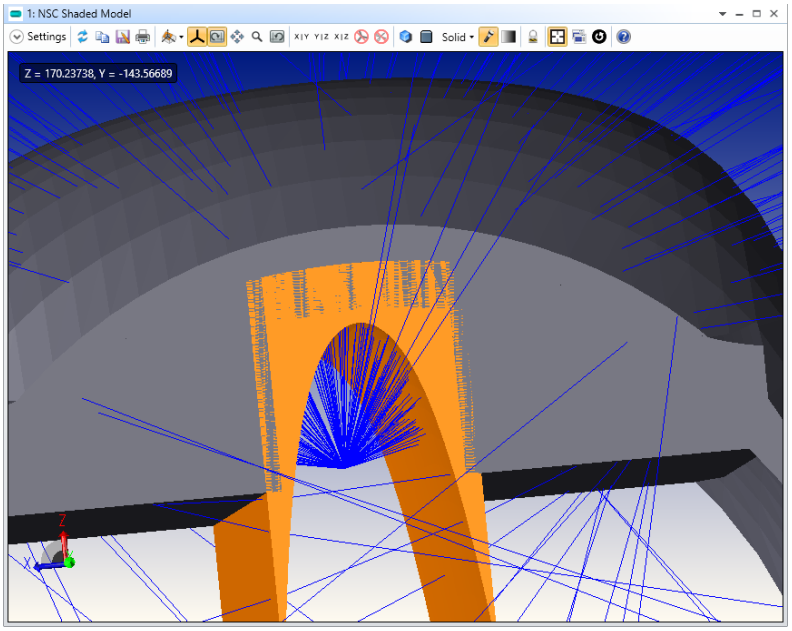
Při tvarování vnějšího povrchu se budu snažit docílit ideálního tvaru, popsaného v předchozích kapitolách. Pro základní konvexní tvar čočky využiji asférické koeficienty několika řádů a poté některé Z-termy. První návrh vnější plochy freeform čočky je zobrazen na obrázku 50.



Obr. 50: Vnější povrch freeform čočky

5.4.2 Vnitřní povrch čočky

Pro vnitřní povrch vložím do systému další objekt typu bikonické Zernikeho čočky a otočím ji o 180 °. Tuto plochu musím vytvarovat tak, aby zachytila ideálně všechny paprsky vyzářené z LED a vhodně je zalomila do optického materiálu. Pro tuto vnitřní část zvolím povrch připomínající parabolu. Z důvodu prototypové výroby čočky na přesné 3D tiskárně, nechám tento vzniklý tunel otevřený, kvůli následnému leštění povrchu čočky.

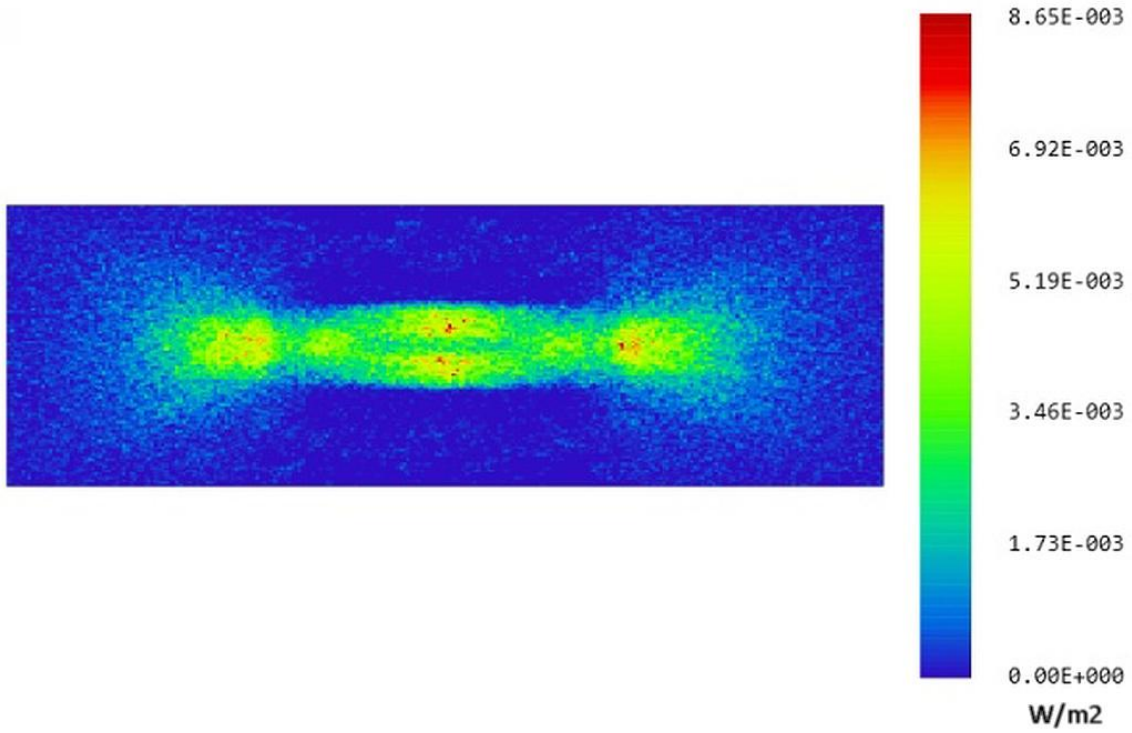


Obr. 51: Vnitřní povrch freeform čočky

Kvůli částečnému překrývání čoček využiji funkce Boolean. Tato funkce umožní vložit do systému další objekt, vzniklý sloučením více objektů do sebe. Je možné čočky sečíst nebo odečíst. V tomto případě je nutné čočky od sebe odečíst a tím nám vznikne freeform čočka, kterou mohu poprvé protrasovat paprsky.

5.4.3 Počáteční trasování čočky

Výsledek prvních simulací je zobrazen na detektoru ve falešných barvách, který je znázorněn na obrázku 52.

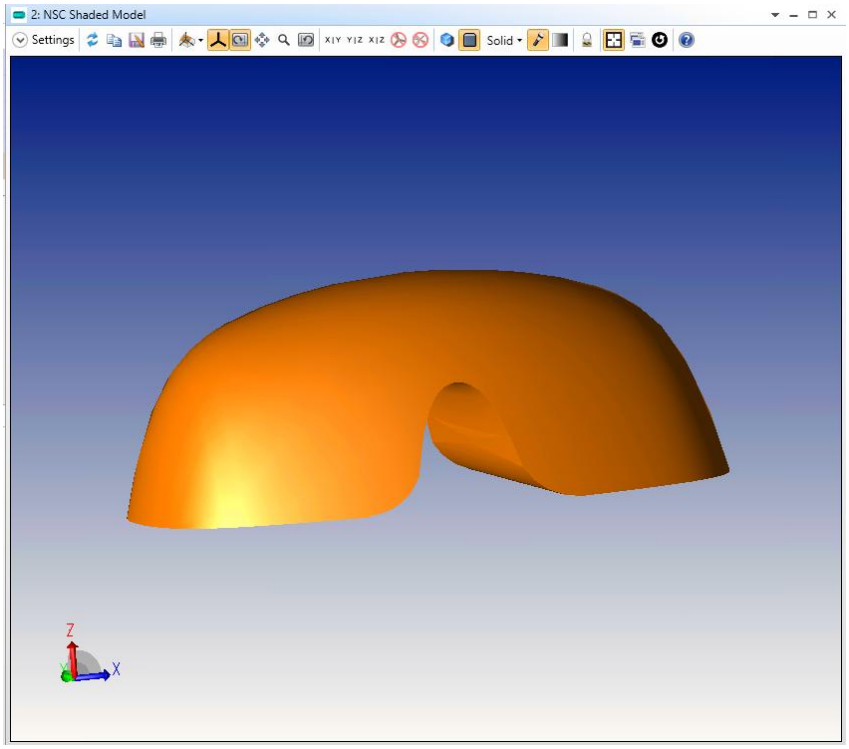


Obr. 52: Výsledek prvních simulací

Z obrázku je patrné, že výsledná světelná mapa, kterou čočka vykreslí na detektoru, je velmi špatná. Nastavení jednotlivých ploch se musí pozměnit tak, aby se výsledná světelná mapa blížila obdélníku. V čočce pravděpodobně dochází i k vnitřním odrazům, které se projevují jako nerovnoměrná místa na detektoru. Pro zjištění totálních odrazů v čočce jednoduše postačí drátový model čočky. Vhodným nastavením počtu zobrazených paprsků lze přehledně vidět jak se paprsky lomí na rozhraní vzduchu a PMMA materiálu čočky, který jsme pro čočku zvolili. Více o optických materiálech je popsáno v kapitole **3.1**.

5.4.4 *Rozbor a experimentální optimalizace freeform čočky*

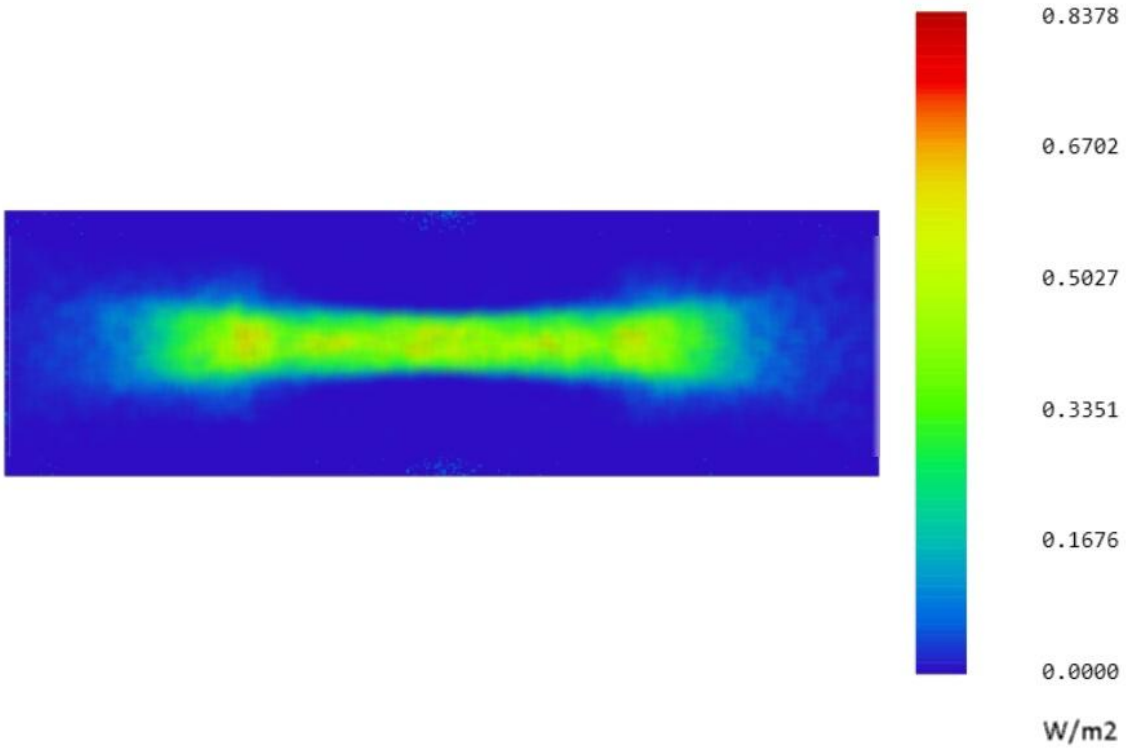
Na detektoru si je možné všimnout několika míst s nerovnoměrnou intenzitou. Vysoká intenzita ve středu světelné mapy vzniká tím, že LED vyzařuje paprsky s nejvyšší intenzitou ve své ose a poté postupně klesá. V další optimalizaci je nutné vnitřní povrch upravit tak, aby paprsky vycházející z čipu LED pod malým úhlem plocha přesměrovala do většího vyzařovacího úhlu a docílilo se tím rozprostření intenzity na větší plochu. Dvě příčné přesvětlené plochy vznikají ze dvou poloměrů, které nevhodně fokusují paprsky. Je nutné tyto poloměry zvětšit tak, aby rozprostřely paprsky více do stran. Pro optimální vytvarování povrchů musíme tvarovat oba povrchy najednou. Vznikne tak mnoho možností řešení, z nichž mnohá nejsou správnou cestou. Po mnoha experimentálních nastavení obou povrchů jsem jako nevhodnější zvolil tvar na následujícím obrázku.



Obr. 53: Experimentálně navržená freeform čočka

Vnější poloměry ploch jsem více zaoblil a pomocí Z-termů tvaroval okraje čočky tak, aby paprsky dopadající na detektor tvořily světelnou mapu připomínající obdélník. Současně jsem přizpůsoboval vnitřní freeform plochu, aby vhodně lomila paprsky a nedocházelo k totálnímu odrazu paprsků uvnitř freeform čočky a zároveň rozprostřela paprsky vycházející ze středu osy čipu LED tak, aby netvořily uprostřed na detektoru přepálený bod. Výsledná světelná mapa na detektoru tvoří přibližný obdélník. Světelná

mapa navržené freeform čočky, která je výsledkem experimentální optimalizace, má uspokojivé hodnoty.



Obr. 54: Výsledek experimentálně navržené čočky

Takto připravená freeform čočka je vhodná pro další optimalizace pomocí meritní funkce. Pokud bychom čočku nepřipravili do takovéto podoby, bylo by velmi složité naprogramovat meritní funkci tak, aby dokázala čočku nadále optimalizovat. Experimentální nastavení vnější bikonické Zernikeho čočky je shrnuto v tabulce 9. Jsou v ní uvedeny pouze sloupce s nenulovou hodnotou.

Tab. 9. Experimentální nastavení sloupců "Biconic Zernike Lens"

Sloupec	Název sloupce	Nastavená hodnota
1	X Half-Height	8,000
2	Y Half-Width	16,500
3	Thickness	6,000
6	Front Radius	-18,000
7	Front Conic	10,000
8	Rear Radius X	37,000

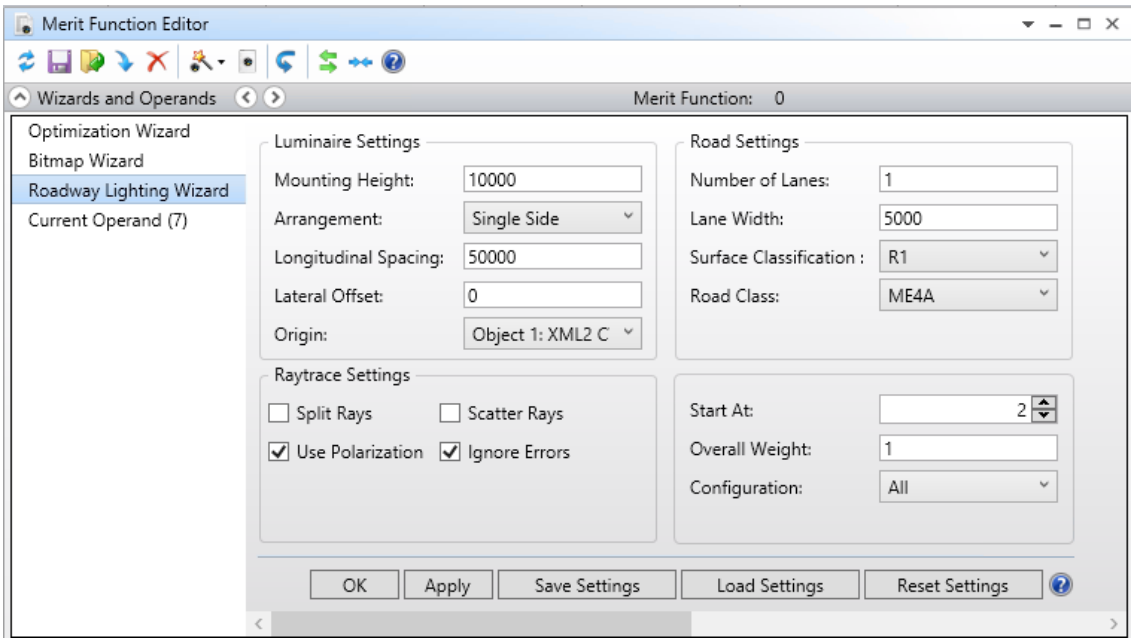
9	Rear Radius Y	-22,000
10	Zernike Terms	30
13	Norm radius	1,000
15	Rear X^2	-0,020
17	Rear X^4	-1,20E-004
23	Rear X^10	-4,79E-012
32	Rear Y^2	-0,014
34	Rear Y^4	-5,91E-004
51	Z4	-2,00E-003
59	Z12	3,00E-006
61	Z14	1,45E-005
65	Z18	5,00E-008

5.5 Meritní funkce

Závěrečnou částí návrhu freeform čočky je použití meritní funkce. Jak již bylo zmiňováno, je nutné freeform čočku co nejlépe připravit pro automatickou optimalizaci v OpticStudiu pomocí meritní funkce. Pro tuto automatickou optimalizaci se musí meritní funkce naprogramovat. Pro každou čočku je meritní funkce specifická. V OpticStudiu je pro návrh meritní funkce freeform čoček pro pouliční či dálniční osvětlení vytvořen speciální mód s názvem NCS Roadway Lighting. Tento mód jsme si již aktivovali při spouštění OpticStudia a teď ho využijeme při návrhu meritní funkce.

5.5.1 Počáteční nastavení meritní funkce

Pro konkrétní typ osvětlení je nejprve nutné zadat počáteční hodnoty v nastavení "Merit Function Editor" v záložce "Roadway Lighting Wizard", jak je vidět na obrázku 55. Část tohoto nastavení je dostupná i v záložce "Analyze" výběrem "Roadway Lighting" v hlavním okně OpticStudia.



Obr. 55: Nastavení Merit Function Editor

Blok "Luminaire Settings" představuje nastavení lampy vzhledem k vozovce. Kolonka "Mounting Height" udává výšku svítidla nad vozovkou. Zadáme hodnotu 10 000, což představuje 10 metrů. Uspořádání světel je možné vybrat v kolonce "Arrangement" výběrem "Single Side", "Double Side" nebo "Staggered". Vzdálenost mezi stožáry svítidel na téže straně vozovky se nastavuje zadáním hodnoty do kolonky "Longitudinal Spacing", což platí pro jednostranné a dvoustranné osvětlení vozovky. U osvětlení vozovky typu "Staggered", což je dvoustranné osvětlení se střídáním stožárů na stranách, je brána vzdálenost mezi světelnými zdroji na protilehlých stranách. Já jsem zvolil jednostranné osvětlení s 50 metrovou vzdáleností světelných zdrojů od sebe. Kolonka "Lateral Offset" představuje odsazení svítidla od okraje vozovky. Počáteční svítidlo souřadného systému lze vybrat v kolonce "Origin".

Nastavení vlastností a parametrů vozovky se nastavuje v bloku "Road Settings". Výpočet osvětlení v programu ZEMAX se počítá podle CIE 140-2000. Počet jízdních pruhů lze zadat do kolonky "Number of Lanes" a šířku každého pruhu do kolonky "Lane Width". Já jsem nastavil pouze 1 jízdní pruh s šířkou 5 metrů, abych docílil obdélníkového tvaru světelné mapy s poměrem stran 10 : 1. Typ povrchu vozovky a jeho odlesk se nastaví parametrem R1, R2, R3 a R4 v "Surface Classification". Rovnoměrnost a intenzita osvětlení se nastaví výběrem možností ME1, ME3A,...,CE3, CE4 v "Road Class". Tyto třídy představují kritéria pro osvětlení vozovky od nejpřísnějších, po nejvíce uvolněné. Výběr třídy je závislý na několika faktorech

jako rychlost vozidel, objem dopravního proudu a obtížnosti navigace. Třídy ME jsou určeny pro uživatele motorových vozidel s vysokými až středními rychlostmi. Přehled parametrů tříd ME je shrnut v tabulce 10.

Tab. 10. ME třídy osvětlení vozovky

	Svítivost [cd/m^2]				
Třída ME	**Minimální osvětlení**	**Průměrné osvětlení**	**Podélná rovnoměrnost**	**Práh přírůstku**	**Prostorový poměr**
ME1	≥ 2.0	≥ 0.40	≥ 0.70	≥ 0.50	≤ 10 %
ME2	≥ 1.5	≥ 0.40	≥ 0.70	≥ 0.50	≤ 10 %
ME3A	≥ 1.0	≥ 0.40	≥ 0.70	≥ 0.50	≤ 15 %
ME3B	≥ 1.0	≥ 0.40	≥ 0.60	≥ 0.50	≤ 15 %
ME3C	≥ 1.0	≥ 0.40	≥ 0.50	≥ 0.50	≤ 15 %
ME4A	≥ 0.75	≥ 0.40	≥ 0.60	≥ 0.60	≤ 15 %
ME4B	≥ 0.75	≥ 0.40	≥ 0.50	≥ 0.50	≤ 15 %
ME5	≥ 0.50	≥ 0.35	≥ 0.40	≥ 0.50	-
ME6	≥ 0.3	≥ 0.35	≥ 0.40	≥ 0.50	≤ 15 %

Zdroj: [20]

Třídy CE jsou určeny pro uživatele motorových vozidel v konfliktních oblastech jako jsou kruhové objezdy a křižovatky. Tyto třídy je také možné použít pro osvětlení přechodů pro chodce a cyklistických tras. Parametry jednotlivých tříd CE jsou shrnuty v tabulce 11.

Tab. 11. CE třídy osvětlení vozovky

	Horizontální osvětlení		
Třídy CE	**Průměrné osvětlení**	**Minimální osvětlení**	**Celková rovnoměrnost**
CE0	≥ 50.0 lux	-	≥ 0.40
CE1	≥ 30.0 lux	-	≥ 0.40
CE2	≥ 20.0 lux	-	≥ 0.40
CE3	≥ 15.0 lux	-	≥ 0.40
CE5	≥ 7.50 lux	-	≥ 0.40

Zdroj: [20]

Hlavní rozdíly mezi jednotlivými třídami ME a CE jsou v celkovém osvětlení vozovky. Velikost intenzity osvětlení lze v ZEMAXu zvýšit změnou výkonu LED, abychom s jednou čočkou dosáhli požadovaného osvětlení. V reálném použití je možné řadit freeform čočky paralelně vedle sebe a vytvořit tak pole čoček s celkovým vyšším světelným tokem. Při návrhu zvolím třídu ME4A.

Pokud při návrhu freeform čočky chceme zahrnout polarizaci, musíme zaškrtnout "Use Polarization" v bloku "Raytrace Settings". V tomto bloku ještě zaškrtneme "Ignore Errors" a tím docílíme, že v případě chyby některého z paprsků se neukončí výpočet. Standardně ve většině optických systémů vznikají paprsky, které nejsou ideálně optimalizovány a ztratí se například v čočce. Pokud je ztracená energie vzhledem k celkové energii světelného zdroje malá, je možné vzniklé chyby bezpečně ignorovat.

V bloku "Start At Settings" lze vybrat od jakého řádku má meritní funkce začít a určit celkovou váhu operandů.

5.5.2 Operandy meritní funkce

Programování meritní funkce je usnadněno oknem "Merit Function Editor", které je zobrazeno na obrázku 56. Nastavení předešlých údajů se promítne v příslušných operandech v "Merit Function Editor".

Merit Function Editor

Wizards and Operands Merit Function: 0

	Type		Data	# Lanes	Lane Width	Spacing	Offset	Arrange	Surf. Class	Target	Weight	Value	% Contrib
1	DMFS												
2	BLNK	Sequential merit function: Roadway Lighting (CIE 140-2000)											
3	NSTW	0	0	1	1	1	1.000E+004			0.000	0.000	0.000	0.000
4	NSRW		0	1	5000.000	5.000E+004	0.000	0	0	0.000	0.000	1.023E+005	0.000
5	NSRW		1	1	5000.000	5.000E+004	0.000	0	0	0.000	0.000	0.454	0.000
6	NSRW		2	1	5000.000	5.000E+004	0.000	0	0	0.000	0.000	0.609	0.000
7	NSRW		3	1	5000.000	5.000E+004	0.000	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000
8	NSRW		4	1	5000.000	5.000E+004	0.000	0	0	0.000	0.000	0.688	0.000
9	NSRW		5	1	5000.000	5.000E+004	0.000	0	0	0.000	0.000	9.839E+005	0.000
10	NSRW		6	1	5000.000	5.000E+004	0.000	0	0	0.000	0.000	4.029E+005	0.000
11	NSRW		7	1	5000.000	5.000E+004	0.000	0	0	0.000	0.000	0.409	0.000
12	OPGT	4								0.750	2.000	0.750	0.000
13	OPGT	5								0.400	2.000	0.400	0.000
14	OPGT	6								0.600	1.000	0.600	0.000
15	OPLT	7								15.000	1.000	15.000	0.000
16	OPGT	8								0.600	1.000	0.600	0.000

Obr. 56: Merit Function Editor

V "Merit Function Editor" je předvoleno základních osm operandů typu NSRW a jeden operand NSTW, které jsou přímo určeny pro čočky s obdélníkovým výstupním osvětlením. Operand NSTW musí být bezpodmínečně umístěn před operandy typu NSRW. Názvy sloupců operandu NSTW korespondují s nastavením v bloku "Raytrace Settings" v záložce "Roadway Lighting Wizard" v počátečním nastavení "Merit Function Editor". Přesný význam dalších osmi operandů NSRW je shrnut v následující tabulce.

Tab. 12. Význam operandů NRSW

Číslo operandu NSRW	Význam operandu
0	Průměrný jas
1	Celková rovnoměrnost jasu
2	Podélná rovnoměrnost jasu
3	Prahový přírůstek
4	Prostorový poměr
5	Průměrná intenzita osvětlení
6	Minimální intenzita osvětlení
7	Horizontální rovnoměrnost jasu

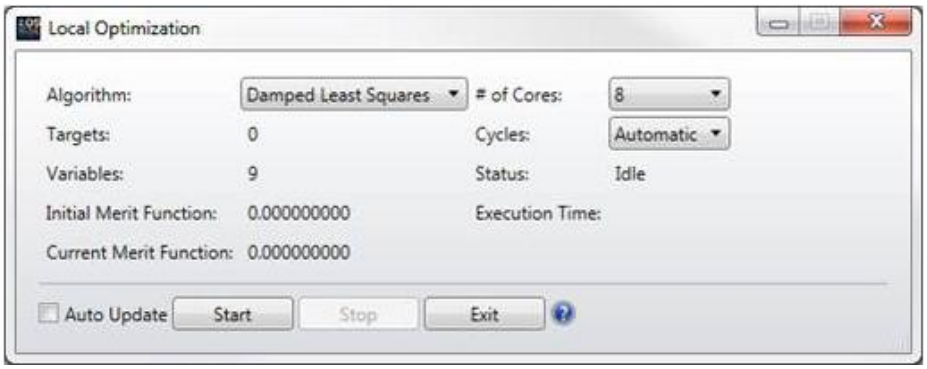
Další operandy v pořadí jsou OPGT a OPLT. První sloupec operandu OPGT odkazuje na řádek, ke kterému patří. Význam operandu je *větší než* námi zadaná hodnota. U těchto operandů je možné zadat finální hodnotu a váhu operandů NSRW pro optimalizaci čočky pomocí meritní funkce. Operand OPLT funguje stejně, akorát má význam *menší než* námi zadaná hodnota. Do meritní funkce je možné přidat další jiné operandy.

5.5.3 Optimalizace pomocí meritní funkce

Díky předešlým údajům a informacím je možné začít vytvářet meritní funkci podle našich představ. Nastavení meritní funkce spočívá v kombinacích finálních hodnot a jejich vah u všech použitých operandů. Toto nastavování je velice zdlouhavé, protože každou kombinaci musíme vyzkoušet spuštěním meritní funkce, která bude automaticky optimalizovat povrch freeform čočky. Hledání optimálního nastavení všech operandů může být někdy velmi náročné a nemusí se podařit najít vhodné řešení.

V tomto případě musíme pozměnit výchozí plochy freeform čočky, či zmírnit nároky ve třídě osvětlení vozovky.

Aby mohla meritní funkce pozměnit parametry použitých ploch freeform čočky, musíme je v "Non-Sequential Components Editor" označit jako proměnné. Optimalizace námi nastavenou meritní funkcí se provádí kliknutím na ikonu "Optimize!" v záložce "Optimize" v hlavním okně OpticStudia. Pro optimalizaci využívá OpticStudio metodu tlumených nejmenších čtverců nebo metodu největšího spádu. Konečný výsledek metod je závislý na počátečním bodu nastavení meritní funkce. Metoda tlumených nejmenších čtverců vypočítává derivace funkce k určení směru v prostoru, který vytváří menší meritní funkci. Metoda největšího spádu používá ortonormalizaci proměnných a diskrétních vzorků ke snížení meritní funkce a nepočítá derivace meritní funkce. Tato metoda většinou překoná metodu tlumených nejmenších čtverců a vede k rychlejšímu řešení. Metodu zvolíme výběrem " Orthogonal Descent" v kolonce "Algorithm". Dále můžeme určit počet jader procesoru a počet cyklů. Pokud nezvolíme počet cyklů, optimalizace se bude provádět v nekonečné smyčce až do stisknutí tlačítka Stop.



Obr. 57: Optimalizace

Po dokončení optimalizace se zobrazí aktuální hodnota meritní funkce a přepíší se hodnoty operandů v "Merit Function Editor", kde se zobrazí procentuální splnění zadaných kritérií. Výsledná změna hodnot bikonické Zernikeho čočky je uvedena v tabulce 13. Výsledkem jsou pozměněné plochy freeform čočky.

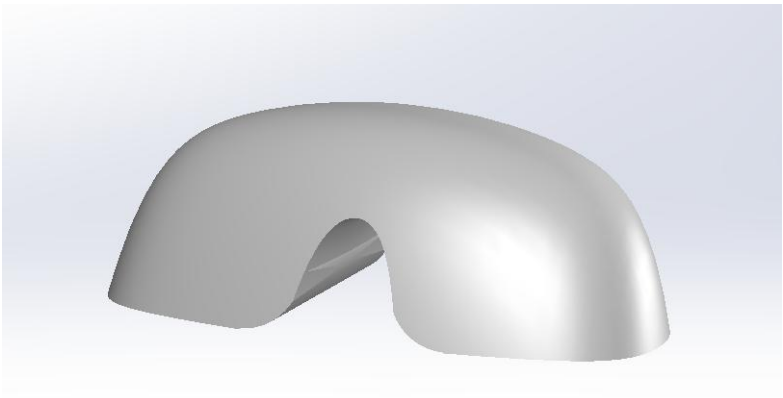
Tab. 13. Nové parametry bikonické Zernikeho čočky vnějšího povrchu

Sloupec	Název sloupce	Nastavená hodnota
1	X Half-Height	8,000
2	Y Half-Width	16,500

3	Thickness	6,000
6	Front Radius	-18,000
7	Front Conic	10,000
8	Rear Radius X	36,823
9	Rear Radius Y	-22,213
10	Zernike Terms	30
13	Norm radius	1,000
15	Rear X^2	-0,021
17	Rear X^4	-1,19E-004
23	Rear X^10	-4,78E-012
32	Rear Y^2	-0,014
34	Rear Y^4	-5,91E-004
51	Z4	-2,05E-003
59	Z12	3,01E-006
61	Z14	1,45E-005
65	Z18	4,97E-008

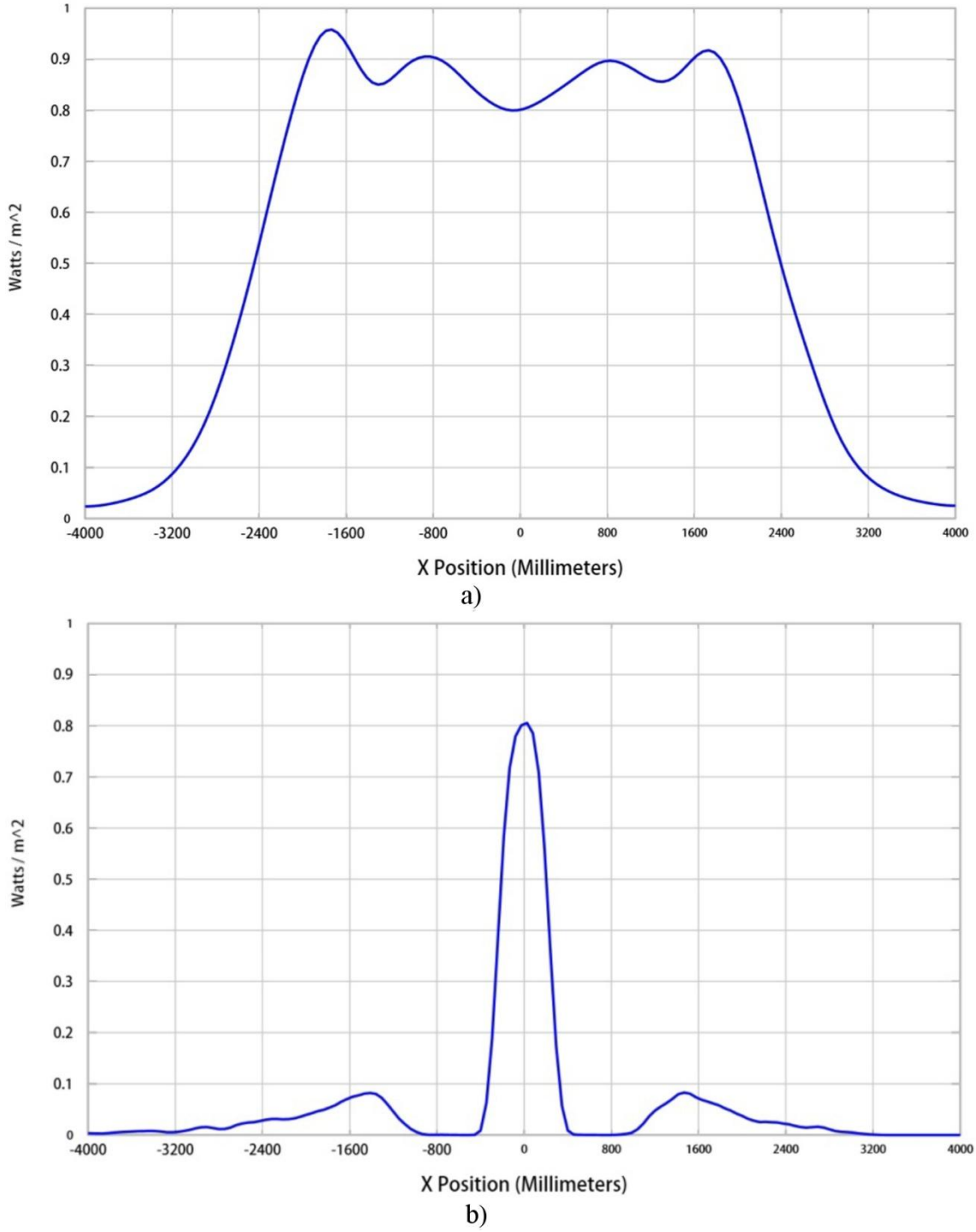
5.6 Výsledná freeform čočka a její světelná mapa

Freeform čočku jsem exportoval do formátu STEP, který je vhodný pro většinu CAD programů. Náhled výsledné freeform čočky v programu SolidWors je zobrazen na následujícím obrázku. V programu SolidWorks je možné čočku nadále upravovat. Například vytvořit pomocné plošky tak, aby bylo možné čočku vyrobit na CNC zařízení či 3D tiskárně. Konečné rozměry freeform čočky jsou 34 × 21 mm s výškou 12,5 mm.



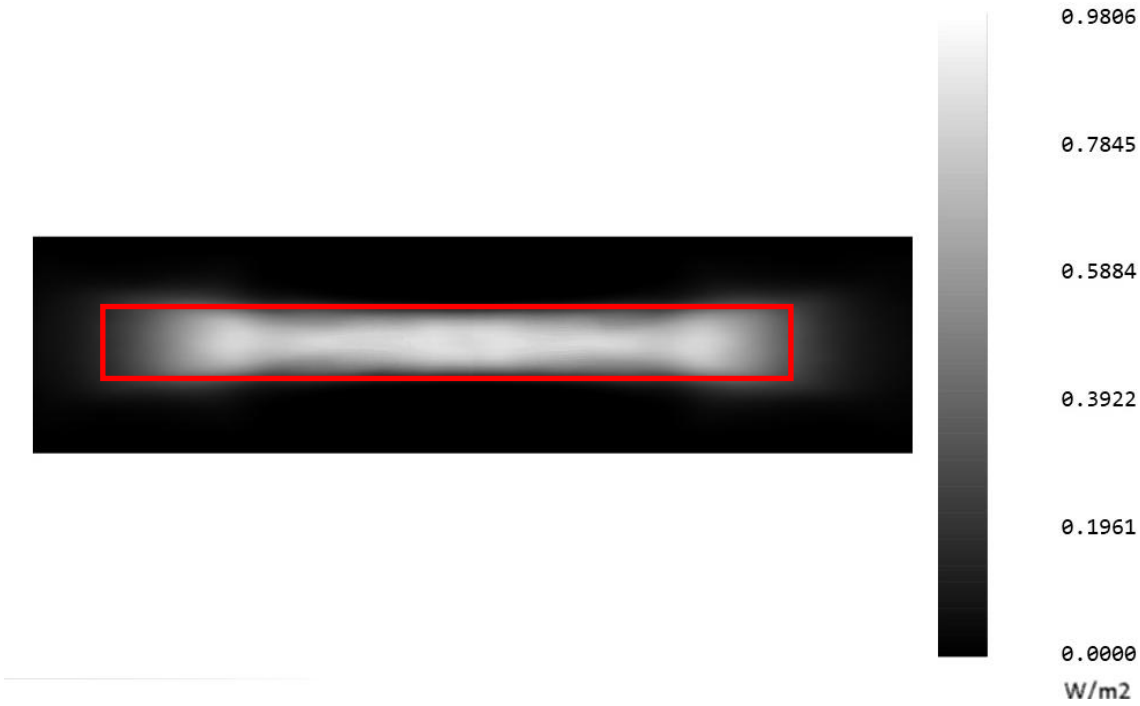
Obr. 58: Výsledná freeform čočka

Simulované vyzařovací charakteristiky freeform čočky ze vzdálenosti 1metru ve vertikálním a horizontálním směru jsou zobrazeny na obrázku 59. Díky optimalizaci se zvýšila rovnoměrnost osvětlení. Pro simulování byla použita LED XM-L2 od společnosti Cree. V obou grafech je na ose X shodné měřítko. Vyzařovací úhel čočky se měří do poklesu intenzity osvětlení na 50 %. Freeform čočka, umístěná ve vzdálenosti 1 metr od projekční roviny, bude osvětlovat plochu 5,3 × 0,5 metru.



Obr. 59: Simulace a) podélného a b) příčného rozložení intenzity osvětlení

Světelná mapa výsledné freeform čočky je zobrazená na obrázku 60. Zvýrazněný červený obdélník má poměr stran 10 : 1. Z výšky 10 metrů má osvícená plocha rozměry přibližně 53 × 5 metru, přičemž do červeně ohraničené plochy dopadá 81 % světelného toku vyzářeného z LED.



Obr. 60: Simulovaná světelná mapa navržené freeform čočky

Podařilo se tak navrhnout freeform čočku s velmi protáhlou světelnou mapou. Takováto světelná mapa je vhodná zejména pro osvětlení cyklostezky či pro osvětlení pozemních komunikací. Tato freeform čočka umožňuje nahradit standardní sodíková svítidla, která jsou například umístěna dál od sebe a intenzita osvětlení komunikace mezi jednotlivými svítidly je prakticky nulová. Pomocí freeform čoček lze vytvořit rovnoměrné osvětlení této komunikace. Dále umožňuje instalaci nového osvětlení s většími rozestupy stožárů, čímž šetří náklady na vybudování nového osvětlení.

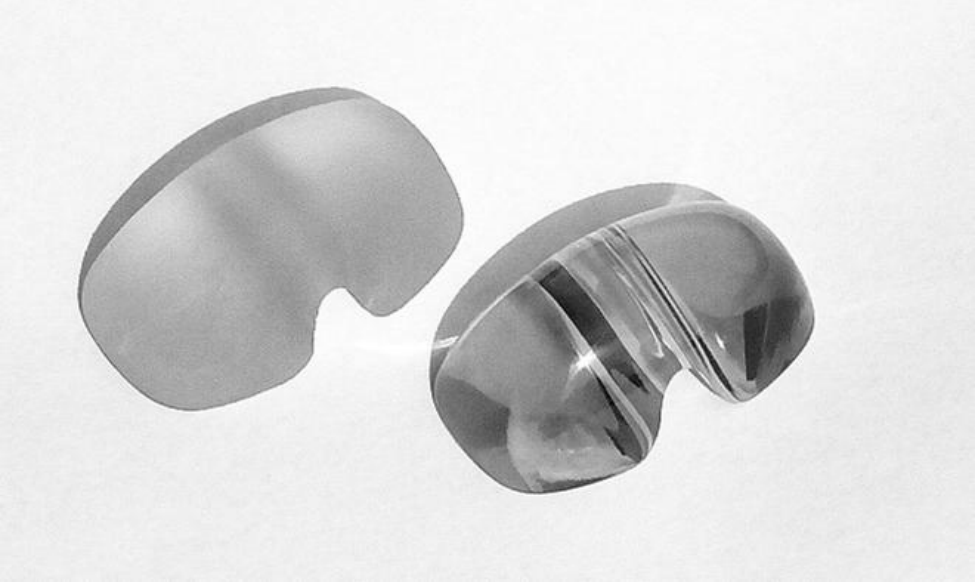
5.7 Prototypová výroba freeform čočky

Takto navrženou freeform čočku je možné vyrobit na ultra přesném CNC Nanotech 350FG v centru Toptec v Turnově. Z důvodu časově náročné přípravy pro obrábění freeform čočky a vytíženosti tohoto stroje byl prototyp čočky vyroben na přesné 3D tiskárně. Jedná se o tiskárnu CINNEX 500, která jako optický materiál používá VeroClear s indexem lomu 1,47. Tímto materiálem lze nahradit standardní PMMA materiál pro výrobu čoček s indexem lomu 1,49. Tiskárna využívá technologii

PolyJet, která umožňuje dosáhnout přesnost povrchu až 16 µm, což je tolerance, která má sice vliv na výslednou světelnou mapu, ovšem její změny by ji neměly výrazně ovlivnit [49].

Náklady na vytištění jedné freeform čočky se pohybují kolem 500 Kč bez DPH, což je 100 × méně než v případě přípravy obrobku na klasickém CNC a jeho následném obrábění na CNC Nanotech 350FG a vytvoření přesné freeform čočky. Náklady na výrobu kovové formy pro sériovou výrobu jsou přibližně 200 × vyšší oproti vytištění 3D tiskárnou v závisloti na materiálu a velikosti formy [41].

Na obrázku 61 můžeme vidět vyrobené freeform čočky. Vlevo na obrázku je vidět přímo vytištěná freeform čočka s matným povrchem, který se musí vyleštit pomocí leštidla. Na obrázku vpravo je dosažen dokonale lesklý povrch za pomoci leštidla Cerox.



Obr. 61: Vyrobené freeform čočky

Experimentálním vytištěním freeform čočky a jejího následného vyleštění a proměření v kapitole 6 jsme vyzkoušeli prototypovou výrobu čoček na velmi přesných 3D tiskárnách. Tímto způsobem je možné ušetřit značné náklady pro vytvoření prototypu čočky pro potřeby osvětlení.

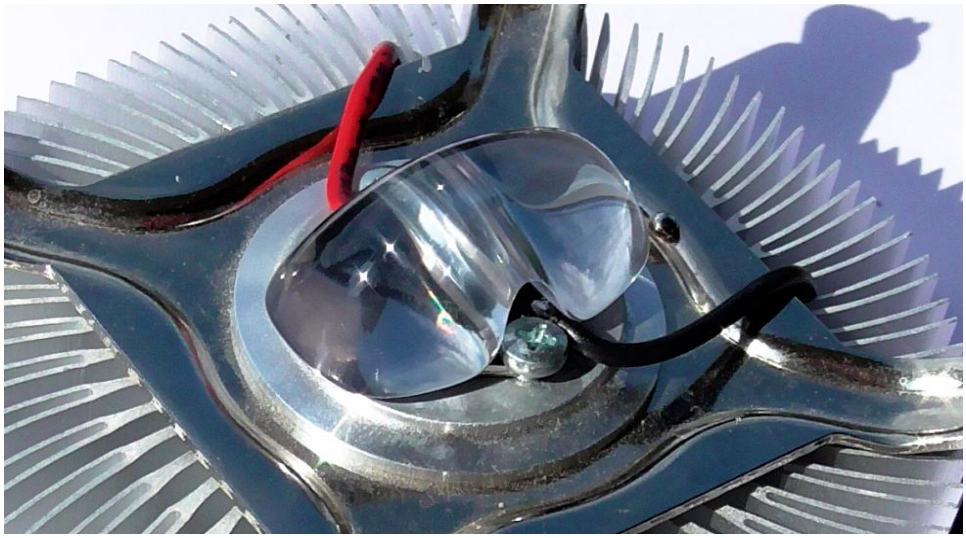
6 Měření charakteristiky vyrobené freeform čočky

6.1 Měření pomocí Spectromer AvaSpec - 128

Vyzařovací charakteristiku freeform čočky jsem změřil pomocí spektrometru AvaSpec - 128. Sonda spektrometru sloužila jako detektor záření. Sondu jsem upevnil jsem do souřadnicového systému. Abych eliminoval vliv chyby způsobené dopadem paprsků pod různým úhlem, upevnil jsem na sondu difuzor. Spektrometr AvaSpec - 128 lze připojit k PC přes rozhraní USB2. Tím lze jednoduše odečítat aktuální hodnoty osvětlení sondy a ukládat je do datového souboru pro vytvoření grafů. Měření freeform čočky probíhalo v zatemněné místnosti, kvůli potlačení rušivého okolního světla. Pro měření vyzařovací charakteristiky byla sonda s difuzorem umístěna 1 m od měřené freeform čočky [4].

6.2 Příprava pro měření freeform čočky

LED s výkonem vyšším jak 1 W je nutné chladit. S rostoucí teplotou se výrazně snižuje produkovaný světelný tok. Pokud by čip dosáhl teploty vyšší jak 140 °C, dojde k nevratnému poškození čipu. Zvolenou LED Cree XM-L2 jsem připájel na měděné DPS pro dokonalý odvod tepla z čipu LED. Ke chlazení LED je použit chladič, který je určen primárně pro procesory s TDP 50 W. LED má čip o velikosti 2×2 mm a produkuje světelný tok s 1198 lumen při proudu 3000 mA, který odpovídá přibližně výkonu 10 W. LED byla napájena stabilizovaným zdrojem MATRIX s omezením proudu. LED s freeform čočkou, upevněnou na chladiči, je na obrázku 62.



Obr. 62: LED Cree XM-L2 s freeform čočkou připevněnou na chladiči

6.3 Měření vyzařovací charakteristiky freeform čočky

Změřené vyzařovací charakteristiky freeform čočky ve podélném a příčném směru jsou uvedeny tabulkách 14 a 15. Osvětlené vzdálenosti v obou směrech jsou přepočteny ze vzdálenosti 1 metru od LED s freeform čočkou.

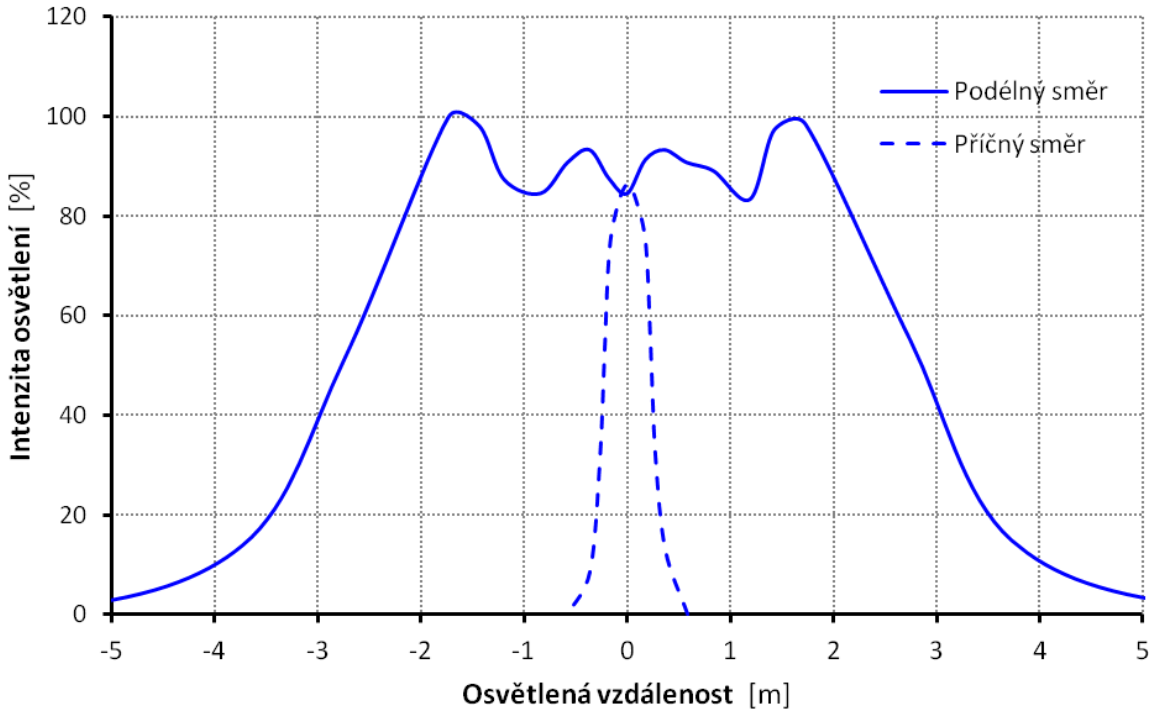
Tab. 14: Naměřená data v podélném směru

Vyzařovací úhel [°]	**Intenzita osvětlení** [%]	**Osvětlená vzdálenost** [m]
85	0,2	11,47
80	1,5	5,76
75	14,8	3,86
70	53,1	2,92
60	98,6	2,00
55	97,4	1,74
50	83,4	1,56
40	89,1	1,31
30	90,9	1,15
20	93,4	1,06
10	91,4	1,02
0	84,6	1,00
-10	87,6	1,02
-20	93,4	1,06
-30	90,9	1,15
-40	84,6	1,31
-50	87,4	1,56
-55	98,1	1,74
-60	100,0	2,00
-70	51,1	2,92
-75	13,8	3,86
-80	1,0	5,76
-85	0,1	11,47

Tab. 15. Naměřená data v příčném směru

Vyzařovací úhel [°]	Intenzita osvětlení [%]	Osvětlená vzdálenost [m]
20	13,0	0,36
15	32,0	0,27
12,5	54,2	0,22
10	74,2	0,18
5	82,7	0,09
0	86,3	0,00
-5	82,7	-0,09
-10	73,2	-0,18
-12,5	53,3	-0,22
-15	31,1	-0,27
-20	8,7	-0,36

Údaje z tabulek jsem zpracoval do grafu přehledně znázorňujícího průběh intenzity osvětlení v závislosti na vzdálenosti od freeform čočky.



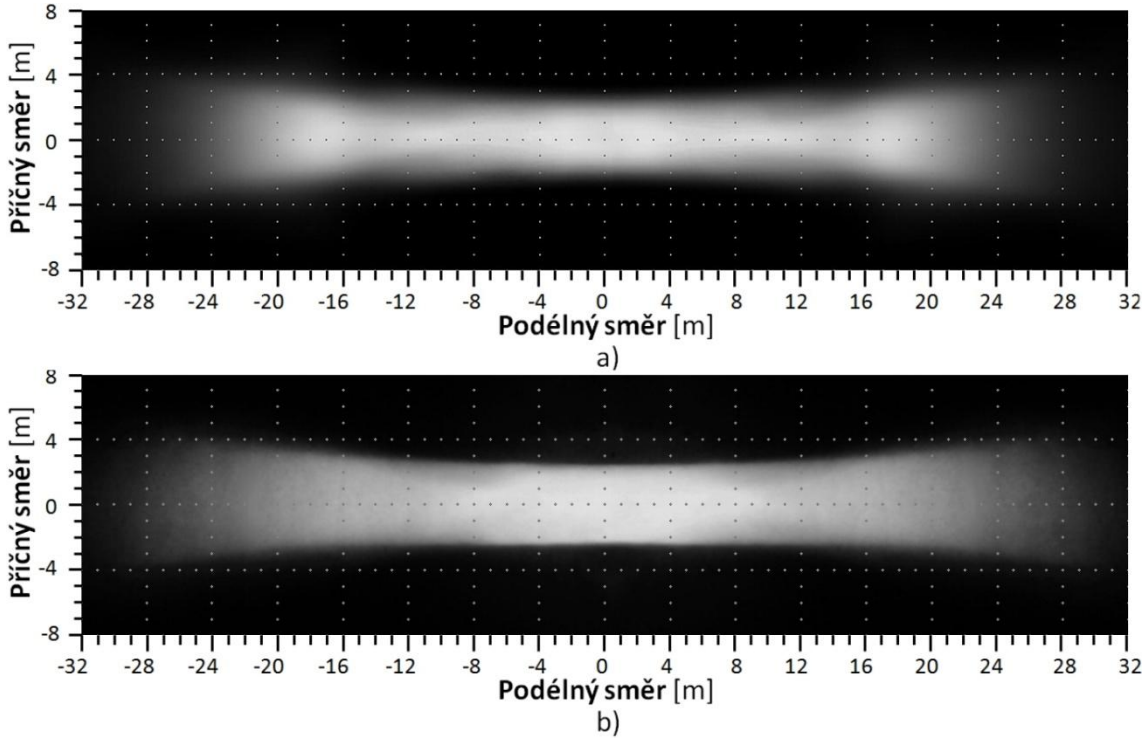
Obr. 63: Graf s podélným a příčným rozložením intenzity osvětlení

Z naměřených dat vyplvá, že na stínítku ze vzdálenosti 1 metru zobrazuje freeform čočka přibližný obdélník o rozměrech 5,8 × 0,48 metru. Vyzařovací úhly čočky jsou 25 × 140 °. Čočka ze vzdálenosti 10 metrů bude osvětlovat část komunikace o rozměrech 58 × 4,8 metru. Změřená data se tedy shodují s výsledky získanými simulacemi v programu ZEMAX OpticStudio 14. Graf intenzity osvětlení v závislosti na úhlu vyzařování je přiložen v příloze číslo 3.

Nepatrný rozdíl v délce osvětlení v horizontálním směru může být způsoben větší citlivostí sondy na paprsky dopadající pod velkým úhlem vlivem přidání difuzoru. Nezanedbatelný vliv na výsledný povrch freeform čočky má přesnost 3D tiskárny a následné leštění povrchu a také přesnost umístění čočky vzhledem k LED čipu.

6.4 Porovnání simulované a změřené světelné mapy

Na obrázku 64 je vidět vykreslená světelná mapa na stínítku. Pro lepší názornost jsou světelné mapy ve vyšším rozlišení přiloženy v příloze číslo 4. Výslednou světelnou mapu jsem porovnal se simulací freeform čočky v programu ZEMAX OpticStudio 14. Z porovnání je zřejmé, že simulace odpovídá reálně vyrobené freeform čočce. Rozložení světelné intenzity je velmi dobře homogenní s ostrými okraji, vezmeme-li v úvahu, že se jedná o LED s poměrně velkým 4 mm^2 čipem a freeform čočkou o standardních rozměrech 34 × 21 mm s výškou jen 12,5 mm.



Obr. 64: Porovnání a) simulované a b) změřené světelné mapy

7 Závěr

V diplomové práci jsem se zabýval problematikou moderních freeform čoček, které jsou navrženy pro přesné rozložení světelného toku na definovanou plochu. Zamezí se tak zbytečným světelným ztrátám vzniklým osvětlením nežádoucích ploch.

V první části práce je popsán přínos freeform čoček v osvětlovací technice jak z hlediska technické pokročilosti, tak i z hlediska ekonomických úspor. Rovněž jsem shrnul přehled různých optických materiálů, ze kterých by mohla být čočka vyrobena a dále koncové povrchové úpravy čoček, jako je například antireflexní vrstva, která umožňuje transmisi až 99,5 %.

Hlavní cílem práce bylo naučit se pracovat v novém prostředí programu OpticStudio 14 od společnosti ZEMAX, navrhnout freeform čočku pro LED se zadanými vstupními parametry a realizovat prototyp navržené freeform čočky. K navrhování freeform čočky jsem využil modul NCS Roadway Lighting, který je součástí programu ZEMAX - OpticStudio 14 a usnadní celý postup navrhování freeform čočky. Nové grafické rozhraní tohoto programu jsem srovnal se starší verzí programu ZEMAX 13 a s programem MATLAB, ve kterém jsem navrhoval algoritmus v bakalářské práci. Dle zadání jsem zvolil ideální obdélníkovou světelnou mapu, která představuje požadované reálné osvětlení. V OpticStudiu 14 jsem zvolil vhodnou LED, načetl potřebná data a definoval detektor snímající dopadající paprsky. Následně jsem definoval základní bikonické Zernikeho plochy pro modelování freeform čočky a ze znalosti rovnice bikonické Zernikeho plochy jsem experimentálním postupem nastavil koeficienty rovnice tak, aby vycházející paprsky z LED tvořily na detektoru rozpoznatelný obdélník. Dalším experimentálním nastavením pomocí třiceti zvolených Z-termů rovnice jsem upravil freeform čočku tak, aby vykreslená světelná mapa na detektoru tvořila ohraničený obdélník. Pro takto připravený návrh jsem musel vytvořit a nastavit meritní funkci, podle které byla čočka finálně optimalizována pro rovnoměrné obdélníkové osvětlení. Simulací výsledné čočky jsem ověřil parametry zadání.

V České republice se v současné době podle mých znalostí návrhem a výrobou freeform čoček pro potřeby osvětlování žádná společnost nezabývá. Výzkumné centrum TOPTEC v Turnově, které je součástí Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, disponuje potřebným vybavením pro výrobu přesných freeform čoček. Pomocí ultra přesných

CNC zařízení v centru TOPTEC je toto centrum schopno vyrobit a následně ověřit kvalitu světelné účinnosti pomocí přesných měřících zařízení. Ale z důvodu náročnosti přípravy pro výrobu čočky a vytíženosti CNC strojů byla první prototypová čočka vytištěna pomocí přesné 3D tiskárny a poté vyleštěna. Výsledná freeform čočka má rozměry 34 × 21 mm s výškou 12,5 mm.

Vyzařovací charakteristiku vyrobené freeform čočky s obdélníkovým výstupním osvětlením jsem změřil v závěru práce. Protože samotná měřící sonda je velice citlivá na úhel dopadu paprsků a na navázání paprsků do optického vlákna, musel jsem při měření na sondu upevnit difuzor. Bylo změřeno, že čočka má vyzařovací úhel 25 × 140 ° a osvětluje prostor o tvaru obdélníku s poměrem stran 10 : 1. Tyto změřené parametry se shodují s parametry, které byly simulovány v ZEMAX OpticStudiu 14. To potvrzuje správný návrh a výrobu freeform čočky.

Seznam literatury

[1] *About us* [online]. CARCLO Optics [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: <http://www.carclo-optics.com/about-us>.

[2] ARASA J., OTEO E., FERNÁNDEZ-DORADO J., BLANCO P., PIZARRO C., DIAZJ. A. *New iterative flux based in the design strategy for freeform surfaces generation for LED lighting technology,* 8. 9. 2011, Proc. of SPIE, Vol. 8170, 817004-13.

[3] *Asymmetrical Wide Plain Freeform* [online]. CARCLO Optics [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: <http://www.carclo-optics.com/about-us>.

[4] *AvaSpec-128 Ultrafast Fiber Optic Spectrometer* [online].[cit. 2015-05-01]. Dostupné z: < http://www.avantes.com/Food-Technology/AvaSpec-128-Fiber-Optic-Spectrometer/Detailed-product-flyer.html>.

[5] BASS, Michael. *Handbook of optics*. 2nd ed. /. New York: McGraw-Hill, c1995-c2001, 4 v. ISBN 00713645604.

[6] *C13508_STRADA-SQ-T2* [online]. c2011-2014 LEDIL [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: < http://www.ledil.com/node/2/p/13400>.

[7] *C12868_FLARE-MAXI* [online]. c2011-2014 LEDIL [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: < http://www.ledil.com/node/2/p/7440>.

[8] *Cree First to Break 300 Lumens-Per-Watt Barrier* [online]. 24. 4. 2014 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: < http://www.cree.com/News-and-Events/Cree-News/Press-Releases/2014/March/300LPW-LED-barrier >.

[9] *Cree® Xlamp® XM-L2 LEDs* [online]. c2012 - 2014 [cit. 2015-03-13]. Dostupné z: <http://www.cree.com/~/media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/Data%20and%20Binning/XLampXML2.pdf>.

[10] *Cree® XLamp® CXA3590 LED* [online]. c2013 - 2015 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: <http://www.cree.com/~/media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/Data%20and%20Binning/ds%20CXA3590.pdf>.

[11] *Cree XLamp XP-G2 LEDs* [online]. c2012-2015 Cree, Inc. [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: <http://www.cree.com/~/media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/Data%20and%20Binning/XLampXPG2.pdf>.

[12] *CR-39® monomer* [online]. c2015 PPG Industries [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.ppg.com/optical/opticalproducts/opticalmaterials/Pages/CR-39.aspx>.

[13] CR39 Plastic Lenses VS Polycarbonate. In: *Youtube* [online]. 12. 4. 2013 [cit. 2015-03-10]. Kanál uživatele iCare Eyewear. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=ZoQaogwmx6U>.

[14] *Design of Freeform Optics* [online]. [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.ilt.fraunhofer.de/en/publication-and-press/brochures/b_design-of-freeform-optics.html>.

[15] *Display readout windows optical filters* [online]. [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://alcat.typepad.com/opi/display--readout-windows----optical--filters-----adc-cast-optical-sheet-display-applications----the--continual-adv.html>.

[16] DVOŘÁČEK, V. Světelné zdroje - halogenidové výbojky (část 1). *SVĚTLO-časopis pro světelnou a osvětlovací techniku.* 2009, roč. 12, č. 1, s. 36-38, ISSN 1212-0812.

[17] DVOŘÁČEK, V. Světelné zdroje - halogenidové výbojky (část 2). *SVĚTLO-časopis pro světelnou a osvětlovací techniku.* 2009, roč. 12, č. 2, s. 48-49, ISSN 1212-0812.

[18] DVOŘÁČEK, V.Světelné zdroje - vysokotlaké výbojky. *SVĚTLO-časopis pro světelnou a osvětlovací techniku.* 2009, roč. 12, č. 2, s. 40-42, ISSN 1212-0812.

[19] *Elliptical I Medium Freeform* [online]. CARCLO Optics [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: < http://www.carclo-optics.com/optic-12763?opticfamily=mini%20hubble>.

[20] EN 1838:1999. *Lighting Applications: Emergency Lighting*. 2013. Österreichisches Normungsinstitut, Heinestraße 38, 1020 Wien: Austrian Standards Institute.

[21] FANG, F.Z., X.D. ZHANG, A. WECKENMANN, G.X. ZHANG a C. EVANS. Manufacturing and measurement of freeform optics. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2013, vol. 62, issue 2, s. 823-846 [cit. 2015-05-15]. DOI: 10.1016/j.cirp.2013.05.003.

[22] *Fresnelovy vzorce a jevy na rozhraní dvou prostředí I* [online]. [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: <http://biomolecules.mff.cuni.cz/files/courses/Fresnelovy_vzorce_I.pdf>.

[23] *Galileo Optical System Lenses* [online]. Khatod Optoelectronic Srl [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: <http://www.khatod.com/Khatod/searchdetail.aspx?N,436,0,0,0,0,1>.

[24] *Galileo Optical System Lenses* [online]. 18. 1. 2010 [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: <http://www.khatod.com/Khatod/publictempstorage/gal24lp6smtestreport234048.pdf>.

[25] *Galileo Optical System Lenses* [online]. 18. 1. 2010 [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: <http://www.khatod.com/Khatod/publictempstorage/gal224lp6smtestreport6601992.pdf>.

[26] *Getting Started Using ZEMAX* [online]. [cit. 2014-11-01]. Dostupné z: <http://www.radiantzemax.com/downloads/Getting%20Started%20With%20ZEMAX_version2.1.pdf>.

[27] HARPER, Charles A. *Modern plastics handbook*. New York: McGraw-Hill, c2000, 1 v. (various pagings). ISBN 0070267146-.

[28] JIANG, Jinbo, Sandy TO, W.B. LEE a Benny CHEUNG. Optical design of a freeform TIR lens for LED streetlight. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* [online]. 2010, vol. 121, issue 19, s. 1761-1765 [cit. 2015-05-14]. DOI: 10.1016/j.ijleo.2009.04.009.

[29] KORMOŠOVÁ, I. *Osvětlené přechody uleví chodcům i řidičům* [online]. 16. 4. 2013 [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: <http://www.policie.cz/clanek/osvetlene-prechody-ulevi-chodcum-i-ridicum.aspx>.

[30] *LED Sled: Audi R8 now offers fully LED headlamps* [online]. 31. 5. 2008 [cit. 2015-01-22]. Dostupné z: <http://www.caranddriver.com/photos-media/452837/2012-kia-k9-headlight-photo-452853>.

[31] Light Prescriptions Innovators, LLC, Altadena, CA (US). *COMPACT FOLDED-OPTICS ILLUMINATION LENS*. USA, US7,181,378B2. 20. 2. 2007.

[32] *LightTools Illumination Design Software* [online]. c2014 Sysnopsys [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: < http://optics.synopsys.com/lighttools/ >.

[33] *LL01CR-OG85450L02* [online]. c2010 [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: <http://www.ledlink-optics.com/MockupDetail.aspx?ID=3088D1E613C944789778927CE9F86000>.

[34] MAIXNER, T. Osvětlení přechodů pro chodce. *SVĚTLO-časopis pro světelnou a osvětlovací techniku.* 2012, roč. 15, č. 1, s. 26-28, ISSN 1212-0812.

[35] MALÝ, Petr. *Optika*. Vyd. 1. Praha: Karolinum, 2008, 361 s. ISBN 978-80-246-1342-0.

[36] MAŘAN, J. *Veřejné osvětlení - není LED jako LED* [online]. c2007-2011 [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://www.ledmania.cz/led-techinfo/verejne-osvetleni-neni-led-jako-led>.

[37] *Materials* [online]. c2013 Emco Plastic, Inc. [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: <http://www.emcoplastics.com/materials/>.

[38] MEISTER, Darryl; SHEEDY, James E. *Introduction to Ophthalmic Optics*. SOLA Optical USA, 2000.

[39] MOISEEV, M. A., DOSKOLOVICH,L. L., KAZANSKIY,N. L. *Design of high-efficient freeform LED lens for illumination of elongated rectangular regions.* OPTICS EXPRESS, 9. 5. 2011,Vol. 19, No. S3.

[40] MOISEEV, M. A., LEONID L. DOSKOLOVICH, NIKOLAY L. KAZANSKIY. *Design of high-efficient freeform LED lens for road illumination.* Proc. of SPIE, 9. 5. 2011,Vol. 8170, 817009-1.

[41] MELICH, Radek. Osobní pohovor. Turnov, 15.4.2015.

[42] *More Images of the Kia K9* [online]. 18. 4. 2012 [cit. 2014-11-24].Dostupné z: <http://blog.caranddriver.com/more-images-of-the-kia-k9/>.

[43] *Multi coating* [online]. NIDEK CO., LTD. [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://www.nidek-intl.com/coating/images/about_ar.gif>.

[44] *Nanotech 350FG* [online]. c2013 Moore Nanotechnology Systems, LLC [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://www.nanotechsys.com/machines/nanotech-350fg- freeform-generator/>.

[45] *New Features and Applications* [online]. c2014 Lighttrans [cit. 2014-11-04]. Dostupné z: <http://www.lighttrans.com/944.html>.

[46] Nové xenonové výbojky pro ještě lepší vidění v noci. *SVĚTLO-časopis pro světelnou a osvětlovací techniku.* 2010, roč. 13, č. 3, s. 24, ISSN 1212-0812

[47] *Optical materials & surfaces* [online]. LEDIL [cit.2015-04-20]. Dostupné z: <http://www.ledil.com/datasheets/Optical_materials_&_surfaces.pdf>.

[48] PANCHARTEK, R. Porovnání 62 W LED svítidla a 70 W svítidla s vysokotlakou sodíkovou výbojkou v praxi. *SVĚTLO-časopis pro světelnou a osvětlovací techniku.* 2011, roč. 14, č. 5, s. 10-11, ISSN 1212-0812.

[49] POKORNÝ, P., ŠAFKA, J. *Objet Connex 500* [online]. 5.1.2015 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z WWW: <http://www.kvs.tul.cz/getFile/case:get/id:14536>.

[50] POLYANSKIY, M. *Refractive Index INFO* [online]. c2008-2015 [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://refractiveindex.info/>.

[51] *Polystyrene (PS)* [online]. c2013-2015[cit.2015-03-28]. Dostupné z: <http://www.makeitfrom.com/material-properties/Polystyrene-PS/>.

[52] *Properties of Optical Plastic Materials* [online]. c2003-2014 Plastic Optics [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://www.plasticoptics.com/optical-plastic-materials.html>.

[53] *Radiant Zemax Announces Zemax 13 – New Advances in Software for Optical and Illumination Design* [online]. 5.2.2013 [cit. 2015-02-19]. Dostupné z: <http://www.opli.net/magazine/eo/2013/news/zemax13.aspx>.

[54] RIES, H., MUSCHAWECK, J. *Tailored freeform optical surface*. J. Opt. Soc. Am. A, March 2002, Vol. 19, No. 3, s. 590-595.

[55] ROGERS, K., ROBLEE, J. *Freeform Machining with Precitech Servo Tool Options* [online]. [cit.2015-04-22]. Dostupné z:

<http://www.precitech.com/pressroom/FreeformmachiningwithPrecitechServoTools052505.pdf>.

[56] *SiO3 Street Series* [online]. March 2014 [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: <http://ledopticsdesign.com/sites/default/files/shop//elements//PL1766SR//sio3siliconelensesproductbrief206494346139037230427502886O.pdf>.

[57] *SPIE Optics + Photonics 2013* [online]. c2014 Sysnopsys [cit. 2014-10-24]. Dostupné z: < http://optics.synopsys.com/events/spie-optics-photonics-2013.html >.

[58] STAFF, D. *Precision in street lighting* [online]. 13. 5. 2013 [cit. 2014-12-08. Dostupné z: < http://www.dmass.net/2013/05/13/resource-fix-precision-in-streetlighting/>.

[59] STARK, T. *Zernike Polynomials* [online]. 14. 5. 2015 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://www.starkeffects.com/zernikepoly.shtml>.

[60] *Story of CR-39!* [online]. 14. 7. 2011 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://ophthalmiclenses.blogspot.co.at/2011/07/story-of-cr-39.html>

[61] *Street Lighting Lens LLP01A1AA* [online]. GAGGIONE [cit. 2015-01-06]. Dostupné z: <http://www.lednlight.com/downloads_lnl/lednlight_en_Street_Lighting_Datasheet.pdf>.

[62] SULTANOVA, N. G., S. N. KASAROVA a I. D. NIKOLOV. 2013. Characterization of optical properties of optical polymers. In: *Optical and Quantum Electronics* [online]. roč. 45, s. 221-232 [cit. 2015-04-14]. DOI: 10.1007/s11082-012-9616-6. ISSN 0306-8919. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/s11082-012-9616-6.

[63] SUN, L.,JIN, S., CEN, S. *Fee-form microlens for illumination applications.* Applied optics, Oct 2009, Vol. 48, No. 29, s.5520-5527.

[64] TAYLOR, A. E. F. *Illumination Fundamentals* [online]. c2000 Rensselaer Polytechnic Institute [cit. 2015-01-20]. Dostupné z: <http://www.opticalres.com/lt/illuminationfund.pdf>.

[65] VESELÝ, P., ŠIMOVIĆ, P., PETROVÁ, S. *Antireflexní úprava* [online]. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z:

<http://is.muni.cz/do/rect/el/estud/lf/js12/vyroba_cocek/web/pages/03-2-03_antireflex.html>.

[66] VESELÝ, P., ŠIMOVIĆ, P., PETROVÁ, S. *Polymethylmethakrylát (PMMA)* [online]. [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://is.muni.cz/do/rect/el/estud/lf/js12/vyroba_cocek/web/pages/01-2-05_pmma.html>.

[67] VESELÝ, P., ŠIMOVIĆ, P., PETROVÁ, S. *Základní rozdělení výroby brýlových čoček* [online]. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://is.muni.cz/do/rect/el/estud/lf/js12/vyroba_cocek/web/pages/02-1_rozdeleni.html#liti>.

[68] WANG, Yongzhang, Xiongbo MA, Liangji CHEN a Zhenyu HAN. Realization Methodology of a 5-axis Spline Interpolator in an Open CNC System. *Chinese Journal of Aeronautics* [online]. 2007, vol. 20, issue 4, s. 362-369 [cit. 2015-05-15]. DOI: 10.1016/s1000-9361(07)60056-9.

[70] *XPS Series LED street Lights* [online]. c2014 Cree [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: <http://www.cree.com/~/media/Files/Cree/Lighting/Brochures%20and%20Catalogs/XSPLaunchBrochureWEB.pdf>.

[71] ZEMAX, Optical Desing Program, user's Manual, 2011.

[72] ZEMAX OpticStudio 14, Optical Desing Program, user's Manual, 2014.

[73] ZHENRONG, Z., XIANG, H., Xu, L. Freeform surface lens for LED uniform illumination. Applied optics, Dec 2009, Vol. 48, No. 35, s. 6627-6634.

Seznam obrázků

Obr. 1: Sférická čočka s obdélníkovým výstupním osvětlením 13
Obr. 2: Osvětlení pomocí sférické čočky 14
Obr. 3: Freeform čočka s obdélníkovým výstupním osvětlením 14
Obr. 4: Osvětlení pomocí freeform čočky 15
Obr. 5: Freeform čočka navrhnutá Moissevem 15
Obr. 6: Standardní pouliční svítidlo 18
Obr. 7: Přechod osvětlený freeform čočkami 19
Obr. 8: Porovnání osvětlení klasickým reflektorem s freeform čočkou 19
Obr. 9: Uspořádání pouličních svítidel 20
Obr. 10: Porovnání osvětlení klasickými reflektory s freeform čočkami 20
Obr. 11: LED LUMINUS SST90 s čipem 16:9 22
Obr. 12: Světlomet automobilu s freeform čočkami 23
Obr. 13: Freeform čočka LLP01A1AA a její světelná mapa 23
Obr. 14: Světelná mapa freeform čočky STRADA SQ T3 24
Obr. 15: Freeform čočka FLARE 12868 a její světelná mapa 25
Obr. 16: Skladové a výrobní závody Carclo Optic 25
Obr. 17: Freeform čočka Elliptical I Medium 12763 a její světelná mapa 26
Obr. 18: Freeform čočka LL01CR-OG85150L02 a světelná mapa 27
Obr. 19: Freeform čočky a světelné mapy PLS1355, PSL1289, PLS1290, PLS1299 28
Obr. 20: Čočka a světelná mapa freeform pole čoček GAL24LP6SM a GAL224LP6SM 30
Obr. 21: Světelná mapa a freeform čočka PL1765SR - Type I 31
Obr. 22: Pole freeform čoček 32
Obr. 23: Index lomů materiálů PMMA, PC, PS, N-BK7 33
Obr. 24: Materiál CR-39 vpravo na obrázku 35
Obr. 25: Disperze světla na hranolu 36
Obr. 26: Antireflexní vrstvy společnosti NIDEK 37
Obr. 27: Účinek antireflexní vrstvy 37
Obr. 28: CNC 350FG firmy Nanotech 38
Obr. 29: Příklad obrábění na CNC Nanotech 350FG 39
Obr. 30: Přehled optických programů 40
Obr. 31: Freeform čočka vytvořená v MATLAB 41

Obr. 31: Intenzita čipu LED Cree XP-G 42
Obr. 32: Intenzita čipu LED Cree XP-G2 43
Obr. 33: Porovnání LED Cree XP-G2 a CXA3590 43
Obr. 34: Intenzita čipu LED Cree CXA3590 44
Obr. 35: Prostředí ZEMAX 13 45
Obr. 36: Prostředí OpticStudio 14.2 45
Obr. 37: Záložka File v OpticStudiu 46
Obr. 38: Záložka Setup v OpticStudiu 46
Obr. 39: Záložka "Analyze" v OpticStudiu 47
Obr. 40: Záložka Setup v OpticStudiu 47
Obr. 41: Objekt "Source point" v Non-Sequential Components Editor 49
Obr. 42: LED čip 51
Obr. 43: Polární charakteristika LED Cree XM-L2 51
Obr. 44: Objekt "Source Rectangle" v Non-Sequential Components Editor 52
Obr. 45: Objekt "Source file" v Non-Sequential Components Editor 54
Obr. 46: Znázornění jednotlivých Z-termů 57
Obr. 47: Objekt "Biconic Zernike Lens" v Non-Sequential Components Editor 58
Obr. 48: Schéma povrchů freeform čočky 59
Obr. 49: Znázornění jednotlivých Z-termů v OpticStudiu 61
Obr. 50: Vnější povrch freeform čočky 62
Obr. 51: Vnitřní povrch freeform čočky 62
Obr. 52: Výsledek prvních simulací 63
Obr. 53: Experimentálně navržená freeform čočka 64
Obr. 54: Výsledek experimentálně navržené čočky 65
Obr. 55: Nastavení Merit Function Editor 67
Obr. 56: Merit Function Editor 69
Obr. 57: Optimalizace 71
Obr. 58: Výsledná freeform čočka 72
Obr. 59: Simulace a) podélného a b) příčného rozložení intenzity osvětlení 73
Obr. 60: Simulovaná světelná mapa navržené freeform čočky 74
Obr. 61: Vyrobené freeform čočky 75
Obr. 62: LED Cree XM-L2 s freeform čočkou připevněnou na chladiči 76
Obr. 63: Graf s podélným a příčným rozložením intenzity osvětlení 78
Obr. 64: Porovnání a) simulované a b) změřené světelné mapy 79

Seznam tabulek

Tab. 1. Porovnání světelného toku při použití různých řešení osvětlení 21
Tab. 2: Vlastnosti optických materiálů 34
Tab. 3. Vlastnosti optických materiálů, přibližné srovnání 35
Tab. 4. Význam sloupců "Source point" v OpticStudiu 50
Tab. 5. Význam sloupců "Source Rectangle" v OpticStudiu 53
Tab. 6. Význam sloupců "Source File" v OpticStudiu 55
Tab. 7. Význam jednotlivých Z-termů 56
Tab. 8. Význam sloupců "Biconic Zernike Lens" v OpticStudiu 58
Tab. 9. Experimentální nastavení sloupců "Biconic Zernike Lens" 65
Tab. 10. ME třídy osvětlení vozovky 68
Tab. 11. CE třídy osvětlení vozovky 68
Tab. 12. Význam operandů NRSW 70
Tab. 13. Nové parametry bikonické Zernikeho čočky vnějšího povrchu 71
Tab. 14: Naměřená data v podélném směru 77
Tab. 15. Naměřená data v příčném směru 78

Seznam příloh

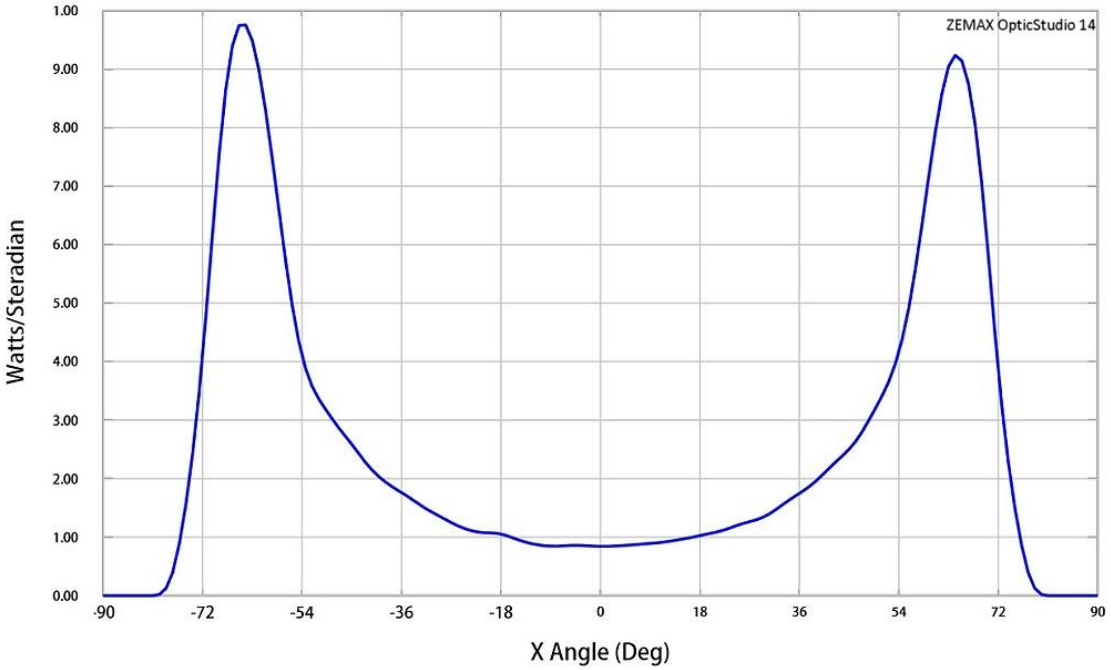
Příloha č. 1	Obsah přiloženého CD
Příloha č. 2	Přehled freeform čoček společnosti LEDLINK
Příloha č. 3	Porovnání a) simulované a b) změřené vyzařovací charakteristiky
Příloha č. 4	Porovnání a) simulované a b) změřené světelné mapy

Příloha č. 1 - Obsah přiloženého CD

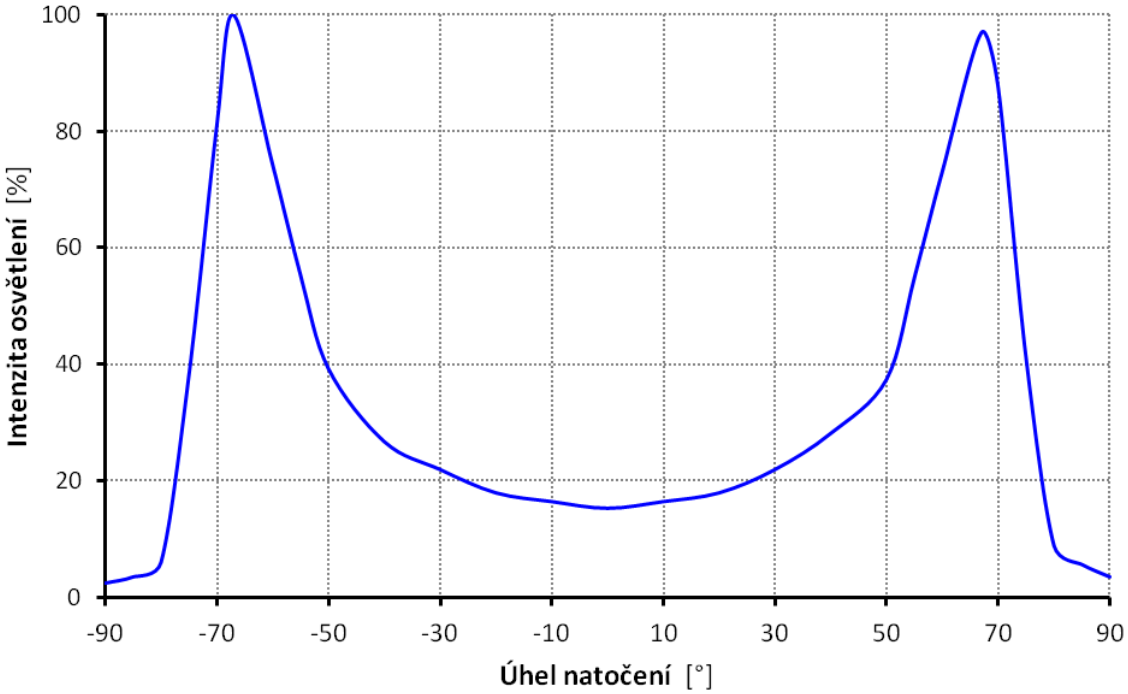
- Michal_Solc_Diplomova_prace_2015.pdf
- Kopie_zadani_diplomove_prace.pdf

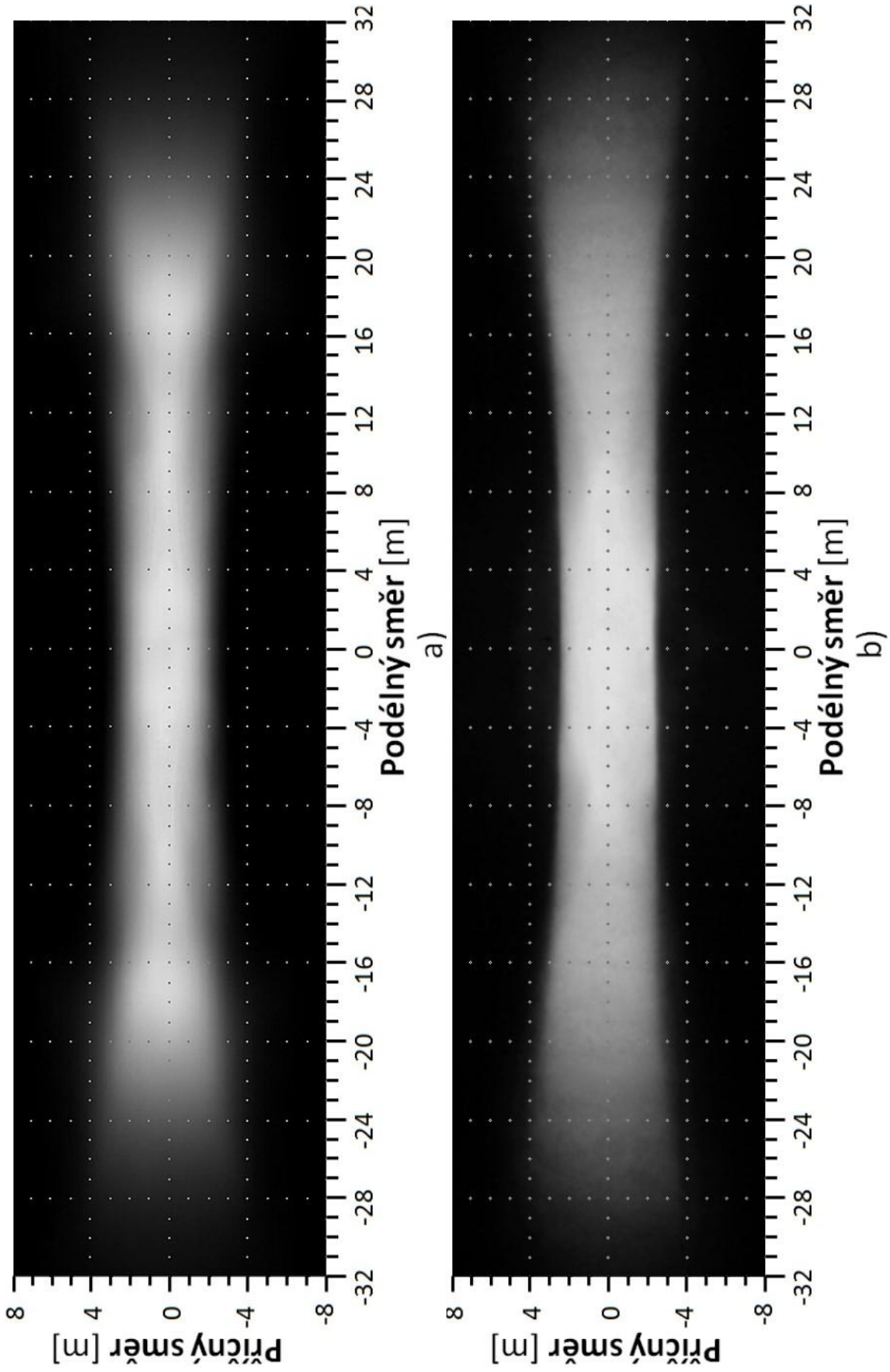
Příloha č. 2 - Přehled freeform čoček společnosti LED-LINK

Příloha č. 3 - Porovnání a) simulované a b) změřené vyzařovací charakteristiky



a)



b)

Příloha č. 4 - Porovnání a) simulované a b) změřené světelné mapy