

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

## NÁVRH PROJEKČNÍHO OSVĚTLOVAČE

DESIGN OF PROJECTION ILLUMINATOR

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ivana Přikrylová

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Antoš, Ph.D.

BRNO 2016

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav fyzikálního inženýrství
Studentka:	<b>Bc. Ivana Přikrylová</b>
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Přesná mechanika a optika
Vedoucí práce:	<b>Ing. Martin Antoš, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Návrh projekčního osvětlovače

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Neustále se zvyšující nároky na užité vlastnosti optických přístrojů určených k osvětlovacím účelům kladou vysoké nároky na kvalitu osvětlení. Vhodně navržený reflektor umožňuje směřovat světlo ze zdroje k dosažení zajištění požadované intenzity osvětlení v rovině předmětu. Geometrie reflektorů je obvykle tvořena několika odraznými fazetovanými plochami, což mnohdy vyžaduje intuitivní způsob návrhu. Řešení problematiky komplexního návrhu projekčního osvětlovače s využitím dostupné počítačové podpory je náplní této práce.

**Cíle diplomové práce:**

Navrhněte osvětlovací systém pro účely projekčního osvětlení. Jako zdroj světla zvolte metal-halogenovou výbojku. Dovoleno pokles intenzity osvětlení v předmětové rovině na kraji zorného pole je maximálně 50%. Velikost osvětlovaného předmětu volte do průměru 25 mm. Vzdálenost osvětleného předmětu od světelného zdroje by neměla překročit 200 mm. Návrh osvětlovače vytvářejte v návaznosti na vybraný projekční objektiv.

1. Ke zvolenému světelnému zdroji navrhněte vhodný optický systém k zajištění rovnoměrného osvětlení předmětu.

2. Proveďte optimalizaci reflektoru pro dosažení požadovaného rozložení intenzity osvětlení v předmětové rovině.

3. Výsledný návrh osvětlovače zhodnoťte v kombinaci s vybraným projekčním objektivem.

4. Navrhněte mechanické uložení vybraných optických prvků osvětlovače s ohledem na předpokládané provozní podmínky.

**Seznam literatury:**

DE YOUNG, Gary W. Exploring Reflection: Designing Light Reflectors for Uniform Illumination. (c) 2000 Society for Industrial and Applied Mathematics, 2000, 42(No. 4.): pp. 727–735.

FOURNIER, FLORIAN. FREEFORM REFLECTOR DESIGN WITH EXTENDED SOURCES. Florida, 2010. Disertační práce. B.S. Institut d'Optique, 2004 & M.S. University of Central Florida, 2008. Vedoucí práce Jannick P. Rolland.

VILÉM, J. Návrh a optimalizace varifokálního objektivu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, 2015. 94 s. Vedoucí Ing. Martin Antoš, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

---

prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

**Abstrakt:**

Cílem této práce je navrhnout vhodný reflektor koncentrující světelný svazek do kruhového otvoru ve cloně. Na světelný svazek za clonou jsou kladeny požadavky dobré účinnosti a současně dobré homogenity. Návrh reflektoru a následné analýzy byly zpracovány pomocí programu LightTools, který slouží k návrhu optických systémů. Reflektor byl navržen šesti různými metodami. Bylo navrženo několik hladkých reflektorů a několik fazetových reflektorů. Vybraný reflektor byl v závěru analyzován v kombinaci s varifokálním objektivem. Pro vybraný reflektor bylo navrženo mechanické uložení s ohledem na předpokládané provozní podmínky. Tato práce slouží jako podklad pro výrobu navrženého reflektoru.

**Summary:**

The aim of this diploma thesis is to design a suitable reflector concentrating a light beam into a circular hole in a gobo. The light beam behind the screen should have good efficiency and at the same time good homogeneity. For the reflector design and analysis a software for designing optical systems called LightTools was used. The reflector was designed by six different methods. Several smooth and several faceted reflectors were designed. The selected reflector was analyzed in combination with a varifocal lens. For selected reflector was designed mechanical store with respect to the anticipated operating conditions. This thesis serves as the basis for the producing of the reflector.

**Klíčová slova:**

Optický návrh, LightTools, reflektor, elipsoidní plocha

**Keywords:**

Optical design, LightTools, reflector, ellipsoidal surface

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením  
Ing. Martina Antoše, Ph.D. a uvedla v ní veškerou použitou literaturu a ostatní prameny.

Bc. Ivana Přikrylová

Ráda bych poděkovala Ing. Martinovi Antošovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při odborných konzultacích.

Bc. Ivana Přikrylová

## OBSAH:

1	Úvod.....	8
2	Cíle práce.....	10
3	Fotometrické a energetické veličiny a jejich jednotky.....	11
4	Geometrie reflektorů .....	13
5	Obecné teorie vytváření odrazného reflektoru .....	18
5.1	Řešení problému pro bodový zdroj .....	18
5.2	Řešení problému pro rozšířený zdroj .....	19
6	Fazetové reflektory.....	21
7	Optimalizační techniky .....	22
7.1	Metody optimalizace tvaru odrazných reflektorů .....	22
7.2	Metoda optimalizace elipsoidních reflektorů .....	23
7.3	Metoda skládání reflektoru z několika částí elipsoidů .....	25
8	Návrh reflektoru .....	27
8.1	Metoda užívající základních geometrických těles .....	28
8.2	Použití modulu „Freeform design feature“ .....	36
8.3	Použití modulu „Macro Focal Reflector“ .....	38
8.4	Tvorba fazetových reflektorů pomocí knihovny nástrojů .....	40
8.5	Vytváření reflektoru vložení 3D textury .....	46
8.6	Vytváření reflektoru skládáním elipsoidních ploch .....	53
8.7	Výsledné zhodnocení všech reflektorů .....	56
9	Zhodnocení vybraného reflektoru s projekčním objektivem .....	58
9.1	Ověření funkčnosti vybraných reflektorů s objektivem.....	59
9.2	Porovnání úhlové apertury .....	64
9.3	Toleranční analýzy .....	66
10	Návrh mechanického uchycení reflektoru.....	72
10.1	Technické požadavky na konstrukci .....	72
10.2	Podsestava reflektoru .....	72
10.3	Podsestava světelného zdroje .....	73
10.4	Celková sestava .....	74
11	Závěr.....	75
12	Seznam použité literatury .....	76
A	Seznámení s použitým programem LightTools .....	71
13	Seznam příloh.....	81

# 1 Úvod

Tato diplomová práce se zabývá optickým návrhem osvětlovacího systému. Součástí systému je reflektor, kterému byla věnována velká část práce. Navrhovaný reflektor má koncentrovat světlo ze zdroje do otvoru ve clonce. Clonka je umístěna přibližně 150 mm před zdrojem. Průměr kruhového otvoru clony je 25 mm. Jako zdroj zde byla použita metal-halogenidová výbojka. Pro výpočty a grafické zobrazení byl použit komerční program LightTools. Jde o program používaný pro návrh světelných systémů a pro práci se světelnými svazky. Program LightTools také umožňuje optimalizaci, nebo rendery vytvořených prvků.

Práce s programem LightTools a obecně s optickými systémy vyžaduje znalost základních veličin týkajících se světelných svazků. Nejdůležitějšími veličinami jsou svítivost, osvětlení a světelný tok. Popis jednotlivých veličin i vztah mezi nimi je uveden ve třetí kapitole práce.

Hledaný reflektor je pokryt odraznou vrstvou, která funguje jako zrcadlo. Ve čtvrté kapitole je zmíněna základní teorie o odrazu světla na vybraných zrcadlových plochách. Zmíněny jsou zrcadla kulová, paraboloidní, elipsoidní a hyperbolická. U všech typů jsou uvedeny základní optické a geometrické vlastnosti plochy.

V páté kapitole je zmíněno několik vyvinutých metod výpočtu odrazného reflektoru. Podobné metody jsou implementovány do programu LightTools. Pro pochopení základních principů, jak použitý program pracuje, bylo vhodné některé vybrané metody zmínit.

Kromě hladkých reflektorů, je možné použít i tzv. fazetové reflektory. Základní princip tvorby fazetových reflektorů je zmíněn v šesté kapitole. Fazetový reflektor je jedním z použitých a navržených reflektorů v této diplomové práci. Jde o reflektor složený z mnoha menších plošek, kde každá ploška může mít odlišný tvar. Každá ploška vytváří svůj obraz zdroje, výsledný obraz potom vzniká superpozicí obrazů z plošek reflektoru. Výhodou fazetových reflektorů je, že každá fazeta je schopna pokrýt celou cílovou oblast světelným tokem. Nastane-li potom například výrobní vada na jedné fazetě reflektoru, ve výsledném obrazu dojde pouze k mírnému poklesu hodnot osvětlení.

Program LightTools umožňuje použití optimalizace. Také proto je v kapitole sedm zmíněno několik obecných metod optimalizace reflektoru. Nejprve je zde zmíněno několik metod pro vytváření obecných reflektorů, dále metoda využívající znalosti geometrických vlastností paraboloidů a elipsoidů, a na závěr také metoda skládání reflektoru z více segmentů.

V osmé kapitole je stručně popsán použitý zdroj. V této diplomové práci je použita metal-halogenidová výbojka od firmy OSRAM. Pro získání výsledného reflektoru je použito šesti různých metod. Nejdříve bude reflektor tvořen jednoduchým elipsoidem, který bude následně optimalizován. V dalším kroku bude pro získání reflektoru použit modul „*Freeform design feature*“. Jde o modul, který počítá vhodný tvar reflektoru dle zadaných kritérií. Třetí metodou pro vytvoření reflektoru bude použití modulu „*Macro focal reflector*“. Jde o modul, který napočítá fazetové reflektory. Fazetové reflektory budou vytvářeny i v další metodě pomocí knihovny nástrojů. V této metodě bude testováno několik základních druhů mřížek pro vytváření fazet. Jako předposlední metoda vytváření reflektorů bude vytvoření 3D textury na hladký reflektor. Poslední vytvářený reflektor bude složen z několika elipsoidů.

Vybrané nejlepší reflektory vytvořené v kapitole 8 budou otestovány v kombinaci s varifokálním objektivem, ke kterému je reflektor navrhován. S nejlepším reflektorem budou provedeny toleranční analýzy zdroje a clony, které určí dovozené odchylky v konstrukci.

K výrobě reflektorů jsou asi nejčastěji používané materiály sklo, plast a hliník. V desáté kapitole je stručně popsán způsob výroby reflektoru použitého v této diplomové práci. Jde o skleněný reflektor s pokovenou vnitřní vrstvou. Výhodou skleněného reflektoru je odolnost proti vyšším provozním teplotám. V této kapitole je také uveden stručný popis

navržené konstrukce uchycení reflektoru a světelného zdroje s ohledem na požadované tolerance a provozní podmínky. Obsahem práce jsou také výrobní výkresy jednotlivých částí konstrukce.

Na závěr práce v dodatku A je kapitola seznamující čtenáře s prostředím programu LightTools. Byly zde stručně představeny jeho základní funkce a vlastnosti. Základní funkcí programu je tzv. trasování. Tato funkce ukazuje průběh světelných paprsků systémem a také ukazuje záznam osvětlení, nebo svítivosti na zvolené ploše. Důležitou podmínkou pro trasování je vytvoření alespoň jednoho světelného zdroje a alespoň jednoho detektoru. Zdrojů i detektorů je možné však možné vytvořit i více.

## 2 Cíle práce

Základním cílem této práce je zkoncentrovat světelný svazek, vycházející ze zdroje, pomocí reflektoru tak, aby clonou s otvorem prošlo co nejvíce světla. Svazek procházející clonou by měl mít vysoké maximum rozložené do širokého spotu. Svazek za clonou by měl být homogenní. Dovolенý pokles intenzity osvětlení na okraji svazku je maximálně 50%.

Pro dosažení daného cíle byl zvolen výpočetní program LightTools. Bylo využito několika metod dostupných v programu LightTools. Nejprve metoda, ve které byl vykreslen vhodný elipsoidní reflektor, který byl tvarově blízký odhadovanému řešení. Tvar reflektoru byl následně dle zvolených kritérií optimalizován. Jako další způsob dosažení cíle bylo využito modulu „*Freeform design feature*“. Jde o modul, který dle zadaných požadavků počítá ideální tvar reflektoru. Třetí testovanou metodou bylo použití modulu „*Macro Focal Reflector*“. Jde o modul, který vytváří fazetové reflektory. Další metodou byly opět vytvářeny fazetové reflektory, pro jejich vytvoření byla použita knihovna nástrojů. Jako další metoda bylo vytváření reflektorů se 3D texturou. Pro vytvoření textury byly vytvořeny vlastní entity. Poslední navrhovaný reflektor byl vytvořen složením několika elipsoidů.

Jedním z dalších cílů je zhodnocení vybraného reflektoru s projekčním objektivem. Jde tedy o ověření funkčnosti celého systému, reflektoru v kombinaci s projekčním objektivem, a zhodnocení účinnosti systému. Toto zhodnocení bylo provedeno pro několik vybraných reflektorů.

Jako poslední cíl bylo navržení uchycení reflektoru, které by vyhovovalo provozním podmínkám a dovoľovalo dostatečné seřizení jednotlivých částí vůči sobě. Předpokladem jsou vysoké provozní teploty a nutnost osového seřizení zdroje a reflektoru.

### 3 Fotometrické a energetické veličiny a jejich jednotky

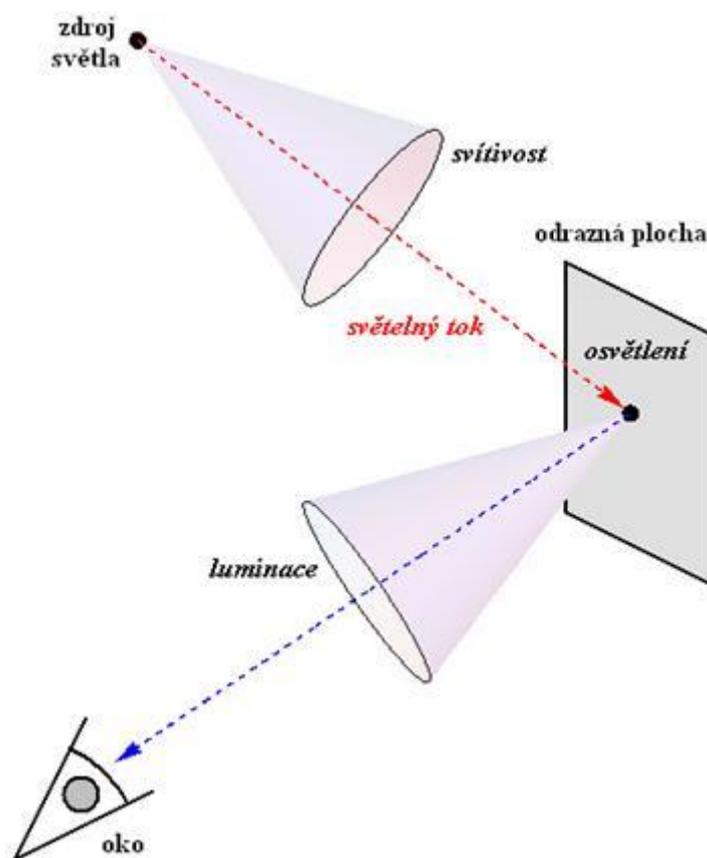
Fotometrie je část optiky, která se zabývá energií světelného zdroje a světelných svazků. Na rozdíl od energetických veličin, byl pro detekci fotometrie zvolen zdroj, který je citlivý ve stejné spektrální oblasti, jako lidské oko. Lidské oko je citlivé v oblasti vlnových délek od 380 nm do 780 nm dle [1], přičemž nejcitlivější je v oblasti žlutozeleného světla o vlnové délce 555 nm. Detektory jsou proto zaměřeny nejvíce na oblast žlutozeleného světla.

Základní energetická veličina se nazývá zářivý tok. Jde o množství zářivé energie, které projde plochou za jednotku času. Zářivá energie se šíří ze zdroje záření všemi směry rychlostí světla. Zářivý tok se značí  $\Phi_e$  a jeho jednotkou je Watt (W).

Fotometrické veličiny můžeme popsat podle obrázku 1. Světelný tok je fotometrická veličina odpovídající zářivému toku v energetických veličinách, udává celkovou velikost vyzářené energie světelného zdroje. Světelný tok („luminous flux“) je označován  $\Phi$  a jeho jednotkou jsou lumény (lm).

Vztah mezi fotometrickými a energetickými veličinami vyjadřuje světelná účinnost záření. Jde o podíl světelného a zářivého toku a značíme jej  $K$ .

Svítivost je množství světelného toku, které je vyzářeno do prostorového úhlu o velikosti jednoho steradiánu. Vyjadřuje rozložení světelného toku do různých směrů. Svítivost („luminance intensity“) je označována  $I$  a její jednotkou je kandela (cd). Hodnota svítivosti je nezávislá na vzdálenosti od zdroje.



Obr. 1: Základní fotometrické veličiny. Převzato z [2].

Energetickým ekvivalentem svítivosti je zářivost, značíme ji  $I_e$  a jednotkou je watt na steradián ( $W/sr$ ). Jde o schopnost bodového zdroje vyzařovat v daném směru.

Osvětlení udává světelný tok, který dopadne na plochu. Jde tedy o poměr světelného toku dopadajícího na plochu k dané ploše. Osvětlení („illuminance“) označujeme  $E$  a jeho jednotkou je lux ( $lx$ ).

Energetickým ekvivalentem osvětlení je intenzita ozařování, značíme ji  $E_e$  a jednotkou je watt na čtvereční metr ( $W/m^2$ ). Podobně jako u osvětlení jde o poměr zářivého toku na plošce, na kterou záření dopadá.

Jas, je množství světelného toku odraženého od plochy, nebo vyzářeného plošným zdrojem. Jde o poměr svítivosti a obsahu plochy, ze které je světlo vyzařováno, hodnota je závislá na úhlu odklonu detektoru od normály na plochu. Jas („luminance“) označujeme  $L$  a jeho jednotkou je nit ( $nt = cd/m^2$ ).

Jasu odpovídající energetickou veličinu nazýváme zář. Jde o poměr zářivosti dopadající na plochu a velikostí této plochy. Zář značíme  $L_e$  a jednotkou je watt na steradián a čtvereční metr ( $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$ ).

Poslední fotometrickou veličinou je tzv. světlení. Světlení je často zaměňováno s jasnem. Jde o množství světelného toku vyzářeného, nebo odraženého od plochy, světlení však není závislé na sklonu pohledu. Může se tedy stát, že pro jeden jas plošného zdroje, zaznamenáme více hodnot světlení. Hodnota světlení je méně objektivní a také méně používaná. Světlení („brightness“) je označováno  $M$  a jeho jednotkou je lumen na čtvereční metr ( $lm/m^2$ ).

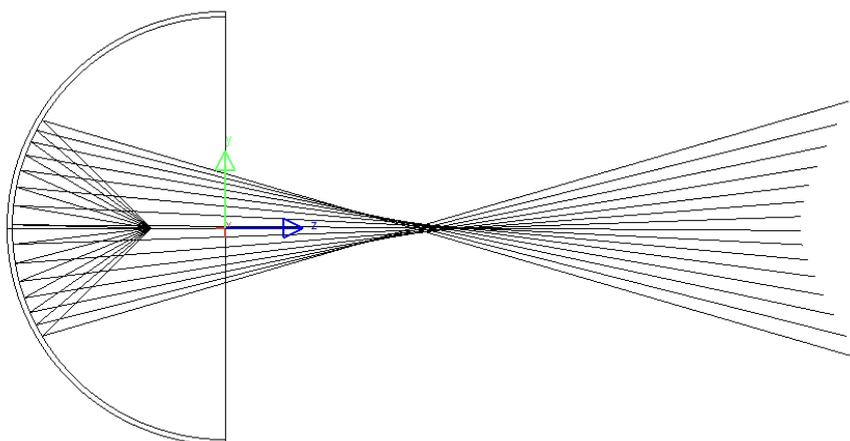
Energetickou veličinou odpovídající světlení je intenzita vyzařování. Značíme ji  $M_e$  a jednotkou intenzity vyzařování je watt na čtvereční metr ( $W/m^2$ ) [3].

## 4 Geometrie reflektorů

Osvětlovací systém uvedený v této diplomové práci zahrnuje odrazný vrstvený reflektor, který plní funkci zrcadla. Bylo by tedy vhodné se o některých typech zrcadel zmínit.

Zrcadlo je povrch, který odráží dopadající paprsky jedním směrem, takže při dokonalém povrchu zrcadla nejsou paprsky nijak rozptýleny. Průchod světla zrcadlem se vyjadřuje pomocí geometrické optiky [4]. Zrcadla se řídí dvěma jednoduchými zákony. Jde o zákon přímočarého šíření světla a zákon odrazu. Zákon přímočarého šíření světla říká, že ve stejnorodém optickém prostředí se světlo šíří přímočaře, ať už rovnoběžně, sbíhavě nebo rozbíhavě, a jednotlivé paprsky na sebe vzájemně nemají vliv a šíří se nezávisle jeden na druhém. Zákon odrazu říká, že úhel paprsku dopadajícího na plochu se rovná úhlu paprsku odraženého od plochy, zmíněné úhly jsou myšleny od normály zrcadla v místě dopadu [5].

Prvním z možných použitých tvarů reflektoru je použití části kulové plochy. Řez kulového zrcadla je zobrazen na obrázku 2. Nebude-li uvažováno zjednodušení paraxiálního prostoru, potom bodový zdroj nikdy nebude zobrazen opět do bodového obrazu, ale bude zobrazován do plošky [6].



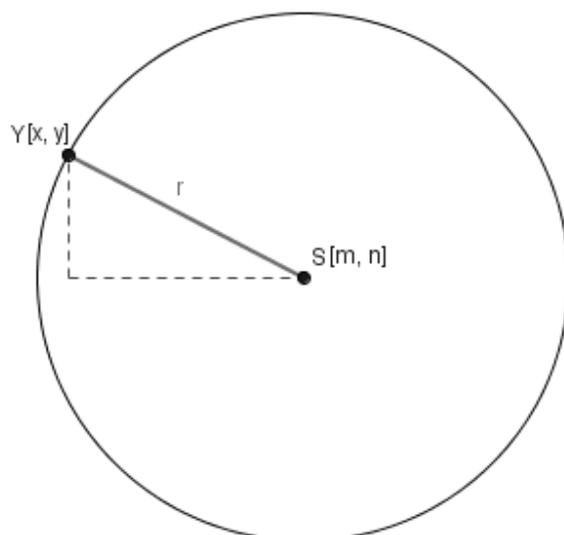
**Obr. 2:** Kulové zrcadlo.

Rovnice kružnice, ze které lze následně rotací vytvořit kouli je dle literatury [7] rovna:

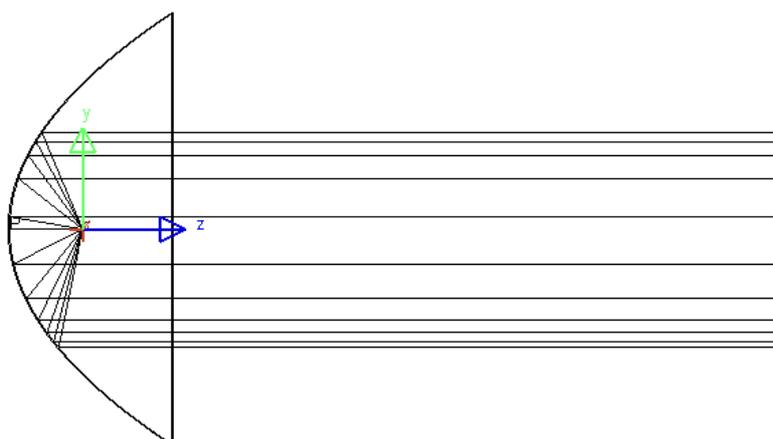
$$(x - m)^2 + (y - n)^2 = r^2, \quad (1)$$

kde  $x$  a  $y$  jsou souřadnice bodu na kružnici,  $m$  a  $n$  jsou souřadnice středu kružnice a  $r$  je poloměr kružnice. Hodnoty jsou zobrazeny na obrázku 3.

Další tvar, který je možné použít, je paraboloid. Paraboloidní zrcadlo (obrázek 4) je tvořeno rotačním paraboloidem, který vzniká rotací paraboly kolem své osy. Paraboloidní zrcadlo odráží paprsky přicházející z nekonečna, tedy rovnoběžně s osou paraboloidu, do svého ohniska. Opačně pak paprsky vycházející z ohniska odráží do směru rovnoběžného s osou, tedy rovné paprsky jdoucí do nekonečna. Pro tuto vlastnost bývá paraboloidní zrcadlo často využíváno v automobilových světlometech, projektorech, kapesních svítilnách a dalších. Pokud bychom v našem případě do ohniska paraboloidu umístili ideální bodový zdroj, dosáhli bychom rovnoměrného a homogenního osvětlení clony. V případě většího průměru reflektoru a současně menšího průměru otvoru na cloně, by došlo patrně k velkým ztrátám světla a tedy nízké účinnosti systému.



**Obr. 3:** Geometrická konstrukce kružnice. Upraveno podle [8].

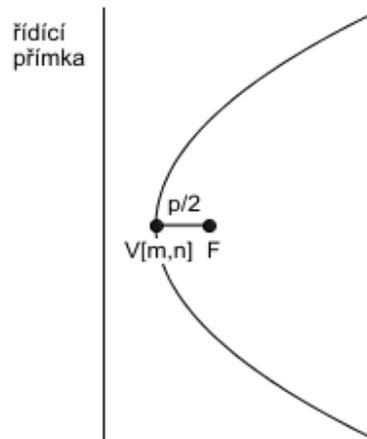


**Obr. 4:** Paraboloidní zrcadlo.

Rovnice paraboly, ze které lze následně rotací vytvořit paraboloid je dle literatury [7] rovna:

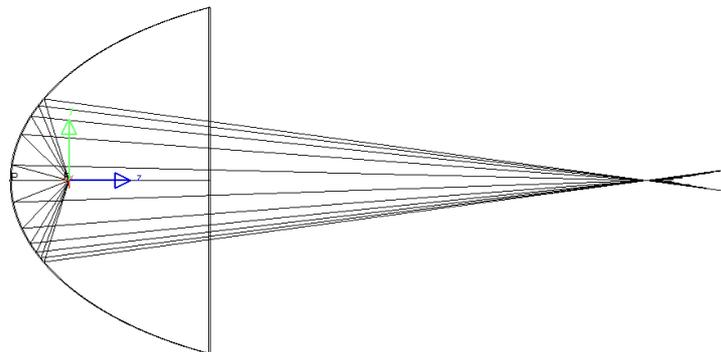
$$(y - n)^2 = 2p(x - m)^2, \quad (2)$$

kde  $x$  a  $y$  jsou souřadnice bodu na parabole,  $m$  a  $n$  jsou souřadnice vrcholu paraboly  $V$  a  $2p$  je parametr paraboly. Zmíněné hodnoty jsou zobrazeny na obrázku 5.



**Obr. 5:** Základní geometrie paraboly. Upraveno podle [8].

Dalším možným tvarem reflektoru je elipsoidní zrcadlo (obrázek 6), které je tvořeno neúplným rotačním elipsoidem. Rotační elipsoid, stejně jako elipsa, má dvě ohniska. Elipsoidní zrcadlo odráží paprsky vycházející z jednoho ohniska do druhého ohniska, toto je důležitá optická vlastnost, díky které byl pro navrhovaný reflektor zvolen elipsoid. V případě bodového zdroje umístěného do ohniska elipsoidu, se paprsky vycházející ze zdroje opět zkoncentrují v místě druhého ohniska elipsoidu. V případě, že by v rovině druhého ohniska (rovina by byla kolmá na osu elipsoidu) byla umístěna clona s otvorem, v ideálním případě by všechny paprsky procházeli otvorem ve cloně.

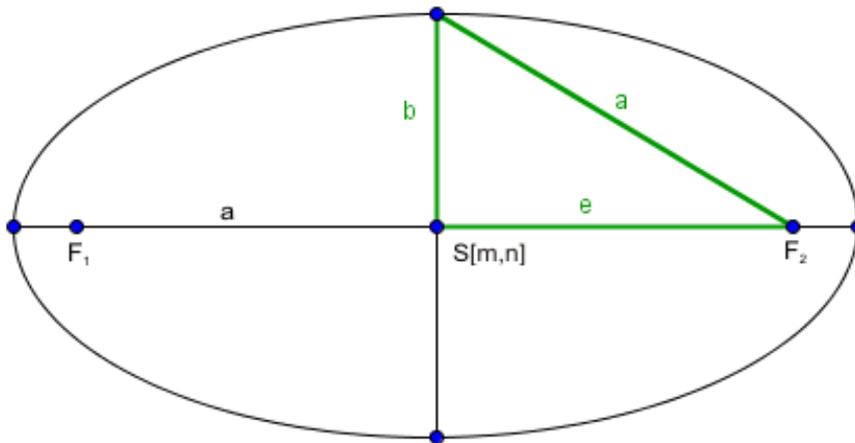


**Obr. 6:** Elipsoidní zrcadlo.

Rovnice elipsy, ze které lze následně rotací vytvořit elipsoid je dle literatury [7] rovna:

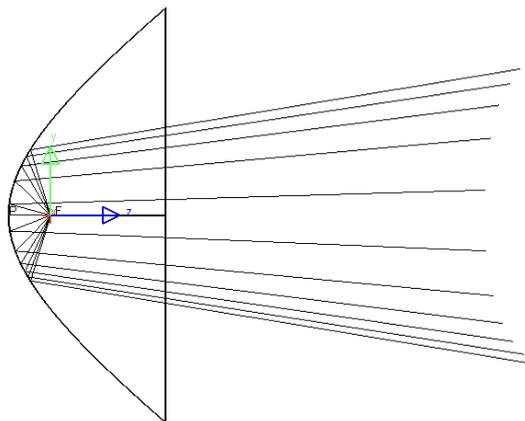
$$\frac{(x-m)^2}{a^2} + \frac{(y-n)^2}{b^2} = 1, \quad (3)$$

kde  $x$  a  $y$  jsou souřadnice bodu na elipse,  $m$  a  $n$  jsou souřadnice středu elipsy,  $a$  je hlavní poloosa a  $b$  je vedlejší poloosa elipsy. Zmíněné hodnoty jsou zobrazeny na obrázku 7, kde písmenem  $e$  je označena excentricita.



**Obr. 7:** Základní geometrie elipsy. Upraveno podle [8].

Jako poslední je možné použít hyperboloidní zrcadlo, které je zobrazeno na obrázku 8. Jde o zrcadlo, které světelný svazek z bodového zdroje rozptyluje. V této diplomové práci je však rozptyl nechtěný, proto nebude tento druh zrcadla uvažován.

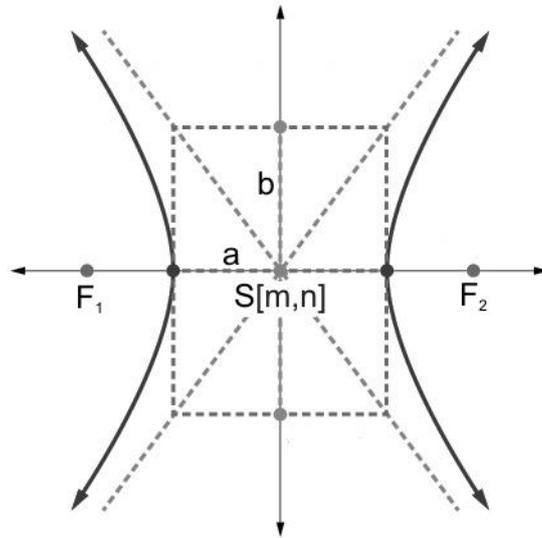


**Obr. 8:** Hyperbolické zrcadlo.

Rovnice hyperboly, ze které lze následně rotací vytvořit hyperboloid je dle literatury [7] rovna:

$$\frac{(x-m)^2}{a^2} - \frac{(y-n)^2}{b^2} = 1, \quad (4)$$

kde  $x$  a  $y$  jsou souřadnice bodu na hyperbole,  $m$  a  $n$  jsou souřadnice středu hyperboly,  $a$  je reálná poloosa a  $b$  je imaginární poloosa hyperboly. Zmíněné hodnoty jsou zobrazeny na obrázku 9.



**Obr. 9:** Základní geometrie hyperboly. Upraveno podle [8].

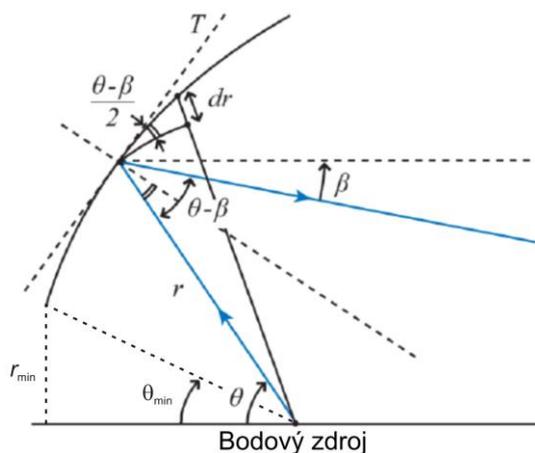
## 5 Obecné teorie vytváření odrazného reflektoru

Pro výpočet odrazného reflektoru bylo již vytvořeno několik výpočetních metod. Například výpočet reflektoru při použití bodového zdroje se zabývali ve svých pracích pánové Elmer [9] a Kush [10].

### 5.1 Řešení problému pro bodový zdroj

Pro rotačně symetrický reflektor, kde je uvažován bodový zdroj, lze úlohu pro výpočet plochy reflektoru zjednodušit. Úlohu lze převést na řešení v rovině. Bude tedy hledán profil reflektoru [11].

Úkolem tedy je najít profil reflektoru, který odráží paprsky vycházející z bodového zdroje na cílovou rovinu v konečné vzdálenosti.



**Obr. 10:** Náčrt reflektoru. Upraveno podle [11].

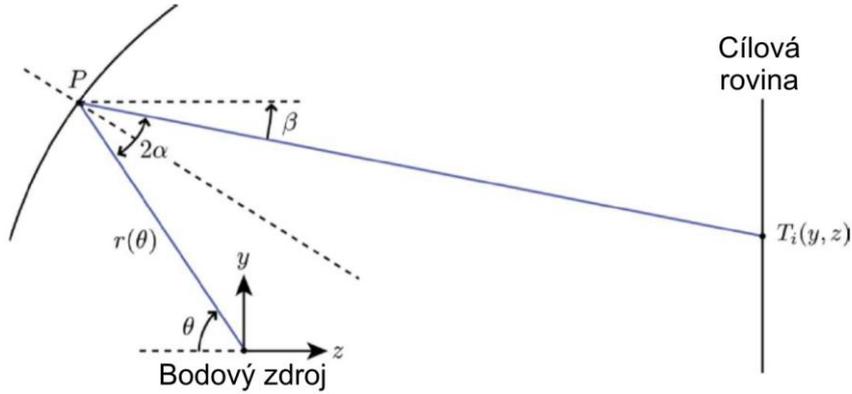
Podle obrázku 10 je možné definovat poloměr  $r$  reflektoru v daném bodě rovnicí:

$$\frac{dr}{r} = \operatorname{tg}\left(\frac{\theta - \beta}{2}\right) d\theta, \quad (5)$$

kde  $\theta$  a  $\beta$  jsou úhly určující směr chodu paprsku dle obrázku 10. Rovnice (5) dle literatury [11] lze přepsat do tvaru:

$$r(\theta) = r_{\min} \exp\left[\int_{\theta_{\min}}^{\theta} \operatorname{tg}\left(\frac{\theta - \beta}{2}\right) d\theta\right], \quad (6)$$

kde  $\theta_{\min}$  a  $r_{\min}$  jsou úhel a poloměr krajního bodu reflektoru, které jsou znázorněny v obrázku 10.



**Obr. 11:** Geometrie reflektoru s blízkou cílovou rovinou. Upraveno podle [11].

Z obrázku 11 dle literatury [11] je možné určit velikost úhlu  $\beta$  odraženého paprsku:

$$\beta = \arctg\left(\frac{r \sin(\theta) - y}{z + r \cos(\theta)}\right), \quad (7)$$

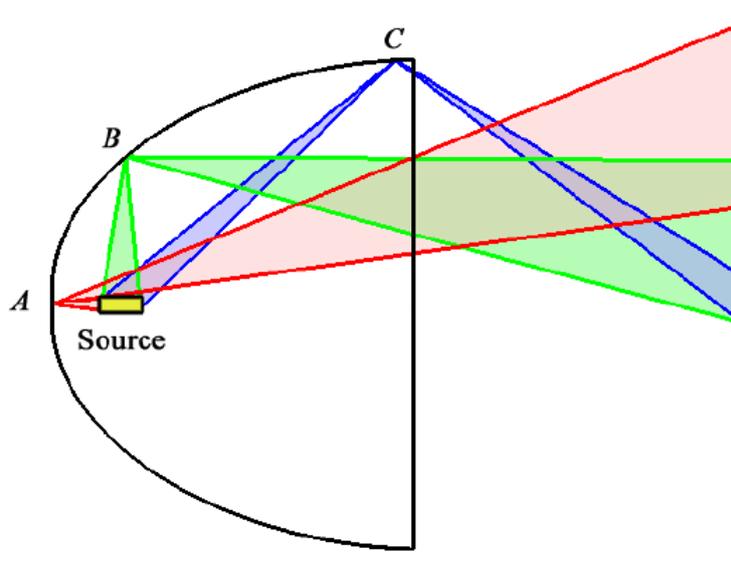
kde  $y$  a  $z$  jsou souřadnice bodu dopadu paprsku na detektor. Z rovnic (5) a (7) je možné získat diferenciální rovnici tvaru reflektoru:

$$\frac{dr}{d\theta} = r \operatorname{tg}\left[\frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \arctg\left(\frac{r \sin(\theta) - y}{z + r \cos(\theta)}\right)\right]. \quad (8)$$

Výše zmíněné rovnice jsou pro řešení 2D případu reflektoru s bodovým světelným zdrojem. Stejně řešení lze použít i pro hledání tvaru reflektoru ve 3D prostoru, pokud je možné použití translační nebo rotační symetrie. Prostorový reflektor lze poté získat z profilu reflektoru rotací kolem optické osy.

## 5.2 Řešení problému pro rozšířený zdroj

Rozšířený světelný zdroj je podle Elmera [9] zdroj, jehož obraz přesahuje 5% cílové velikosti. Odraz na reflektoru od rozšířeného zdroje je složitější než při použití bodového zdroje. Při použití bodového zdroje dochází v každém bodě reflektoru k odrazu jediného paprsku do cílové roviny. Při použití rozšířeného zdroje dochází v každém bodě reflektoru k odrazu paprsků dopadajících z celého zdroje. Odraz z rozšířeného zdroje ve třech bodech reflektoru je zobrazen na obrázku 12. Z obrázku lze vidět, že se zvětšující se vzdáleností odrazného bodu od zdroje dochází k zúžení cílového obrazu zdroje. Toto může vést k rozmazání hranice obrazu, intenzivnímu spotu ve středu obrazu anebo intenzivnímu propadu ve středu obrazu.



**Obr. 12:** Odraz rozšířeného zdroje na reflektoru. Upraveno podle [11].

Pro vytváření reflektorů s rozšířenými zdroji bylo vymyšleno mnoho výpočetních způsobů. V literatuře [11] je jich několik zhruba popsáno. Jedna z metod převedení 2D problému na 3D je tzv. 3D šicí metoda. Tato metoda užívá principu nalezení tvaru reflektoru a současně nalezení trajektorie mezi zdrojem a cílem. Vyžaduje platnost tří rovnic současně. Jde o rovnici pro zachování světelného toku:

$$\iint_S I(\vec{r}_{in}) d\Omega = \iint_T E(\vec{t}) dA, \quad (9)$$

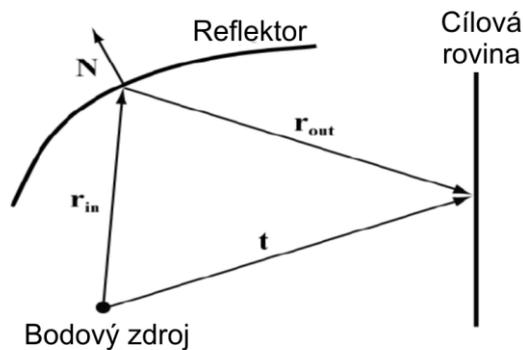
další rovnicí je zákon odrazu:

$$\vec{N} = \frac{\vec{r}_{out} - \vec{r}_{in}}{\sqrt{2(1 - \vec{r}_{out} \cdot \vec{r}_{in})}}, \quad (10)$$

a poslední rovnice určuje integrační podmínku:

$$\vec{N}(\nabla \times \vec{N}) = 0, \quad (11)$$

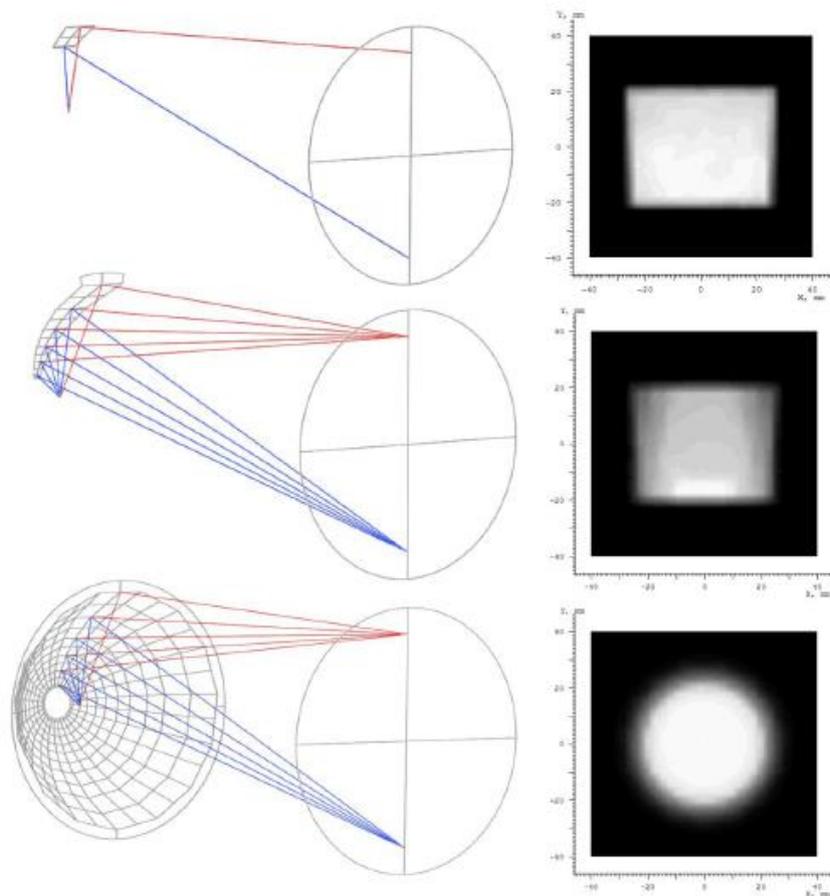
Všechny rovnice vycházejí z obrázku 13.



**Obr. 13:** Zobrazení použitých vektorů. Upraveno podle [11].

## 6 Fazetové reflektory

Pro vylepšení vlastností cílového obrazu lze vytvořit fazetový reflektor. Jde o reflektor tvořený drobnými ploškami, tzv. fazetami, které kopírují základní plochu reflektoru. Fazety nabývají různých tvarů, nejčastěji jsou používány čtyřúhelníkové fazety. Kromě základního tvaru fazet je nutno zvolit také náklon a prohnutí fazet. Zvolený tvar fazety ovlivňuje rozdělení osvětlení na cílovém obraze. Obrazy z jednotlivých fazet se skládají dohromady superpozicí. Po naskládání fazet v rotační symetrii, získáme obraz s postupným vyhasínáním do krajů. Pro bodový zdroj tvoří každá fazeta vlastní obraz. Máme-li rozšířený zdroj, skládání obrazů jednotlivých fazet probíhá pomocí konvoluce. Skládání obrazů jednotlivých fazet je znázorněno na obrázku 14 [11].



**Obr. 14:** Skládání obrazu při fazetovém reflektoru. Převzato z [11].

Obecný postup pro vytváření fazetového reflektoru začíná návrhem hladkého reflektoru, konkrétně tvarem jeho apertury a tvarem základní plochy, na kterou budou usazovány fazety. Následně je potřeba provést rozdělení cílového obrazu a reflektoru na jednotlivé segmenty o průměrném světelném toku. Je tedy třeba zvolit rozdělovací mřížku. Jednotlivé druhy mřížky budou zmíněny v kapitole 8.3. Přesný tvar fazet je určován pro každou fazetu jednotlivě. U každé fazety je zvolen náklon, křivost a válcovitost. Poté jsou jednotlivé fazety spojeny a meziprostory jsou vyplněny tak, aby byl reflektor uzavřený. Na závěr je ověřeno rozložení obrazu cíle, případně iterativně upraven tvar fazet.

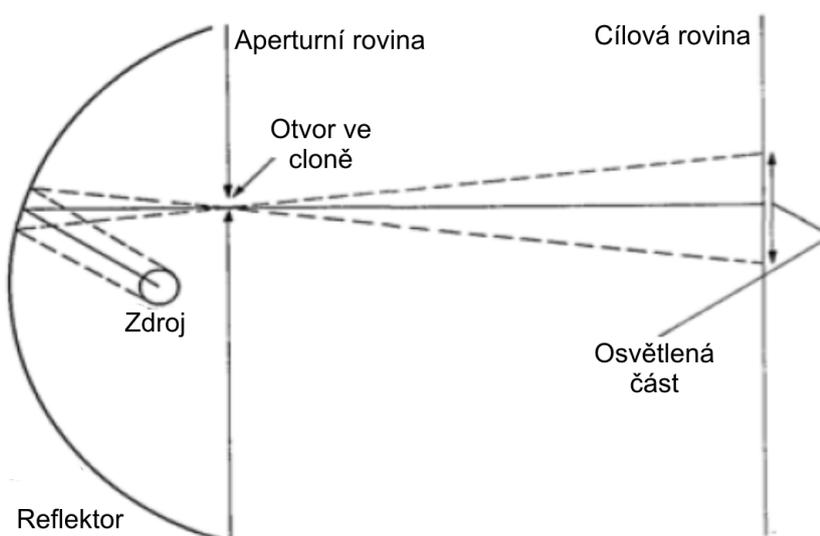
## 7 Optimalizační techniky

V poslední době některé programy zaměřené na design optických soustav neuvádějí pro výpočet optimalizaci. Jde například o programy LucidShape a ReflectorCAD. Optimalizace byla z těchto programů vypuštěna z důvodu zdlouhavého výpočtu a vysokého rizika zacyklení výpočtu. Tyto programy namísto optimalizace využívají rychlých iterací zadávaných přímo konstruktérem.

Program LightTools využívá optimalizační modul, který je však opatřen omezujícím kritériem. Vlastnosti optimalizace je potřeba vhodně volit, aby optimalizace byla konečná. Proto by bylo vhodné zmínit několik optimalizačních principů v následujících podkapitolách.

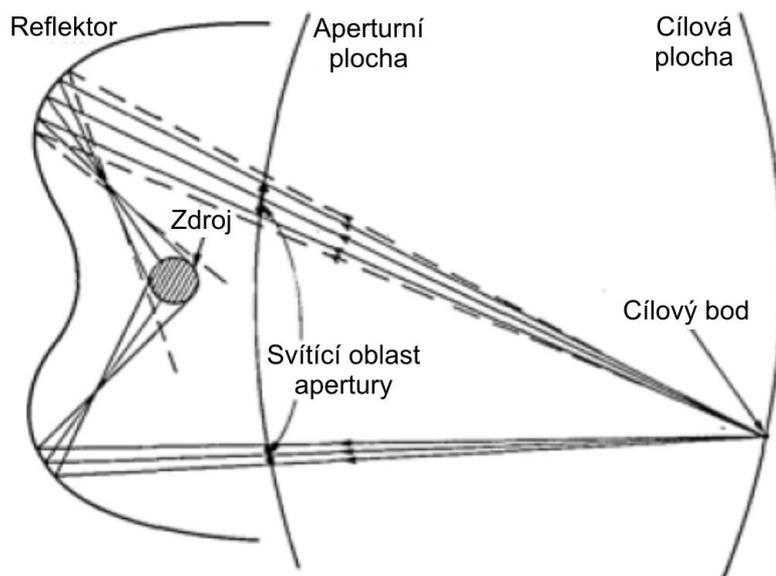
### 7.1 Metody optimalizace tvaru odrazných reflektorů

Již v roce 1972 popsal Vogl dvě základní optimalizační metody pro optimalizaci odrazných reflektorů. Tyto metody jsou popsány v literatuře [12]. První metoda, tzv. „field patch mode“, využívá clonu s bodovým otvorem. Tato clona je umístěna před reflektor do aperturní roviny. Je vypočten výsledný obraz zdroje procházející bodovým otvorem. Následně je clona přesunuta do jiné polohy a opět je vypočten obraz zdroje. Výsledný celkový obraz je získán superpozicí dílčích obrazů. Odchyšky mezi získaným a požadovaným obrazem jsou převedeny zpět do tvaru reflektoru. Konstrukce metody „field patch mode“ je zobrazena na obrázku 15.



**Obr. 15:** Nákres metody „field patch mode“. Upraveno podle [12].

Druhá metoda popsaná Voglem, tzv. „aperture flash mode“ [12], převede rychlým ohodnocením osvětlení na cílové rovině do aperturní roviny. Při optimalizaci je porovnáváno měřené a požadované záření na aperturní rovině. Rovnice pro výpočet reflektoru obsahuje korekční faktor. Tvar reflektoru je pomocí korekčního faktoru měněn tak, aby odchylka měřeného a požadovaného záření byla co nejmenší. Konstrukce metody „aperture flash mode“ je zobrazena na obrázku 16.



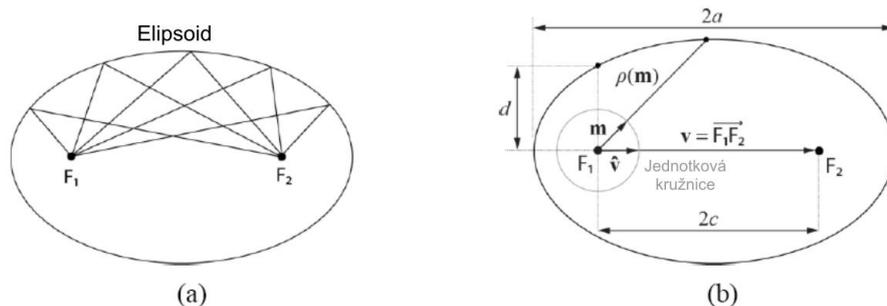
**Obr. 16:** Nákres metody „aperture flash mode“. Upraveno podle [12].

Později byly vypracovány další variace optimalizačních metod pro různé podmínky, ať už pro bodový zdroj, nebo rotační symetrii. Například Sikkens v literatuře [13] popsal poloautomatický optimalizační proces pro tvorbu fazetového reflektoru, převážně pro mlhové lampy v automobilovém inženýrství. Jeho optimalizační metoda obsahuje základní tři kroky. Nejprve uživatel určí základní tvar fazet a polohu obrazu na cílové rovině pro jednotlivé fazety. Určení základního tvaru fazety znamená zejména určit jejich pozici, náklon a základní křivku reflektoru, na které je fazeta postavena. Následně jsou jednotlivé fazety optimalizovány. Jako optimalizační proměnné jsou použity koeficienty polynomu určujícího tvar reflektoru. Se snižující se meritní funkcí stoupá počet trasovaných paprsků a také rozlišení cílového obrazu. Tento postup napomáhá proti zaseknutí optimalizace v lokálním minimu.

Další případy [14] přímé optimalizace jsou postaveny na mřížkové definici reflektorové plochy. Reflektorová plocha je rozdělena mřížkou na pole bodů. Vrcholy této mřížky jsou optimalizovány dle uživatelem zadané cílové oblasti. Množství vrcholů mřížky stoupá se zlepšením meritní funkce. Krok optimalizace se tedy s blížícím se výsledkem zjemňuje. Tato metoda je při vyšším počtu proměnných výpočetně náročná.

## 7.2 Metoda optimalizace elipsoidních reflektorů

Další metoda užívá kombinaci optimalizace a znalostí geometrických vlastností konstrukce paraboloidů a elipsoidů. Metodu popsanou v literatuře [15] vyvinul Olikier. Jak bylo zmíněno v kapitole 4, paprsky vycházející z jednoho ohniska elipsoidu jsou odraženy do druhého ohniska elipsoidu. V této metodě je uvažován bodový zdroj. Cílová plocha je rozdělena na pole bodů, jako kdyby se skládala z pixelů. Bodový zdroj je vložen do prvního ohniska elipsoidu  $F_1$  a druhé ohnisko elipsoidu  $F_2$  je vloženo do cílového bodu. Výsledný obraz zdroje je zobrazen v cílovém bodě. Podobně je možné vzít více elipsoidů pro každý bod na cílové ploše. Elipsoidy mají společnou polohu jednoho ohniska umístěného v bodovém zdroji.



**Obr. 17:** Vlastnosti elipsoidu. Průchod paprsků elipsoidem (a) a parametry elipsoidu (b). Upraveno podle [15].

Oliker [15] v této metodě vychází z rovnice elipsoidu v polárních souřadnicích:

$$\rho(m) = \frac{d}{1 - e\vec{m}\vec{v}}, \quad (12)$$

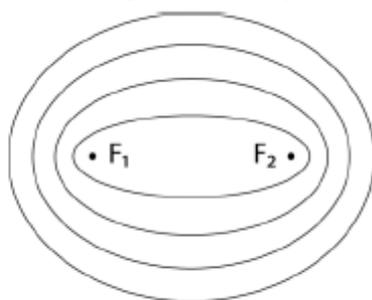
kde  $\rho$  [mm] je polární poloměr elipsoidu z ohniska  $F_1$ ,  $d$  je ohniskový parametr,  $\vec{m}$  je jednotkový vektor odpovídající směru chodu paprsků,  $e$  je excentricita a platí:

$$e = \sqrt{1 + \frac{d^2}{|\vec{v}|^2}} - \frac{d}{|\vec{v}|}, \quad 0 < e < 1. \quad (13)$$

Dále pro vektor mezi dvěma ohnisky platí:

$$\vec{v} = \overrightarrow{F_1F_2}, \quad \hat{v} = \frac{\vec{v}}{|\vec{v}|}, \quad (14)$$

Je-li určena poloha ohnisek, elipsoid stále není pevně určen. Je možné měnit ohniskový parametr. Ohniskový parametr je potom možné nazvat měřítkem elipsoidu. Elipsy o stejné poloze ohnisek ale s různým ohniskovým parametrem jsou zobrazeny na obrázku 18.



**Obr. 18:** Proměnný ohniskový parametr. Převzato z [15].

Oliker použil parametrizaci dle vztahů:

$$2a = d + \sqrt{|\vec{v}|^2 + d^2}, \quad 2c = |\vec{v}|. \quad (15)$$

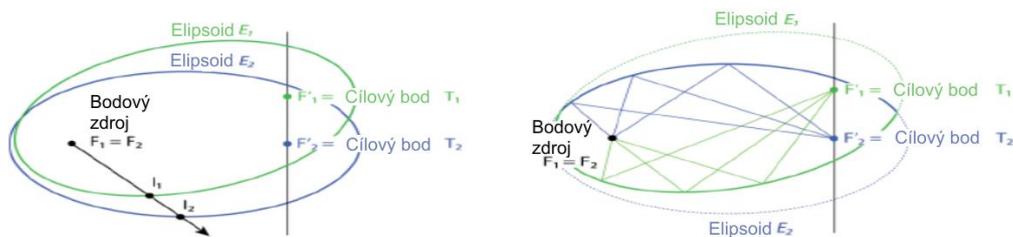
Ze vztahů (12) a (13) pak dostáváme vztah:

$$\rho(\vec{m}) = \frac{a^2 - c^2}{a - c\vec{m}\hat{v}}, \quad (16)$$

kde  $a$  je velikost vedlejší poloosy elipsoidu a  $2c$  je vzdálenost mezi dvěma ohnisky. Pro toto vyjádření elipsoidu je velikost vedlejší poloosy  $a$  brána jako měřítko elipsoidu.

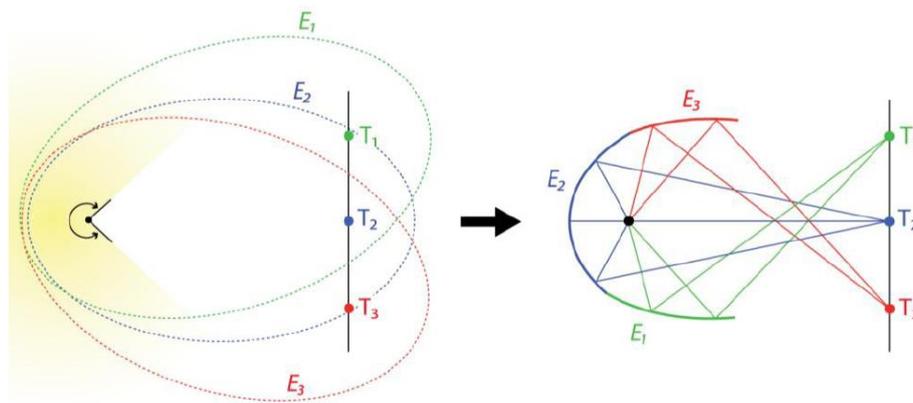
### 7.3 Metoda skládání reflektoru z několika částí elipsoidů

V této podkapitole bude vysvětlen princip vytváření reflektoru složeného z několika částí různých elipsoidů [15]. Jde o jednu z možností vytváření fazetových reflektorů. Tato metoda vychází z jednoho, tzv. referenčního elipsoidu, jehož jedno ohnisko leží ve zdroji, a druhé ohnisko se nachází na cílové rovině přímo v osovém bodě. K takovému elipsoidu může být přidáno několik dalších. Všechny elipsoidy budou mít první ohnisko umístěné ve zdroji a druhé ohnisko se bude nacházet na cílové rovině, avšak mimo osový bod jak je to zobrazeno na obrázku 19.



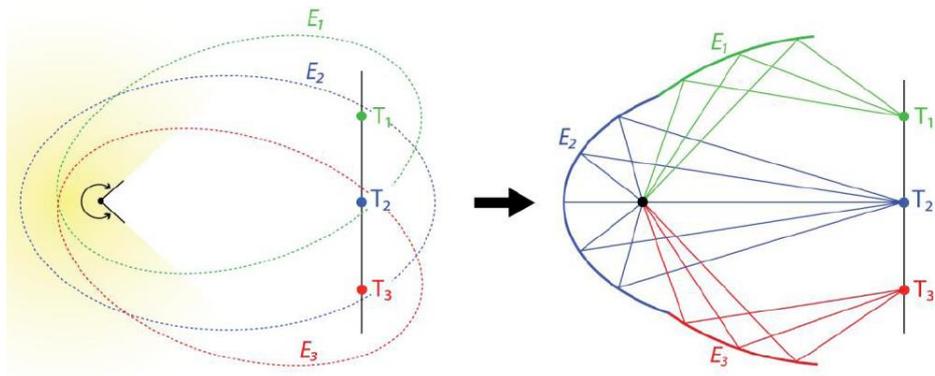
**Obr. 19:** Skládání elipsoidů. Upraveno podle [15].

Každý elipsoid zobrazí světelný zdroj právě do jednoho bodu na cílové rovině. Z každého elipsoidu bude vybrána vhodná část odrazné plochy. Jednotlivé části budou složeny do jednoho reflektoru. Takto složený odrazný reflektor může získat požadované rozdělení osvětlení v cíli. Příklad takto složeného reflektoru je uveden na obrázcích 20 a 21.



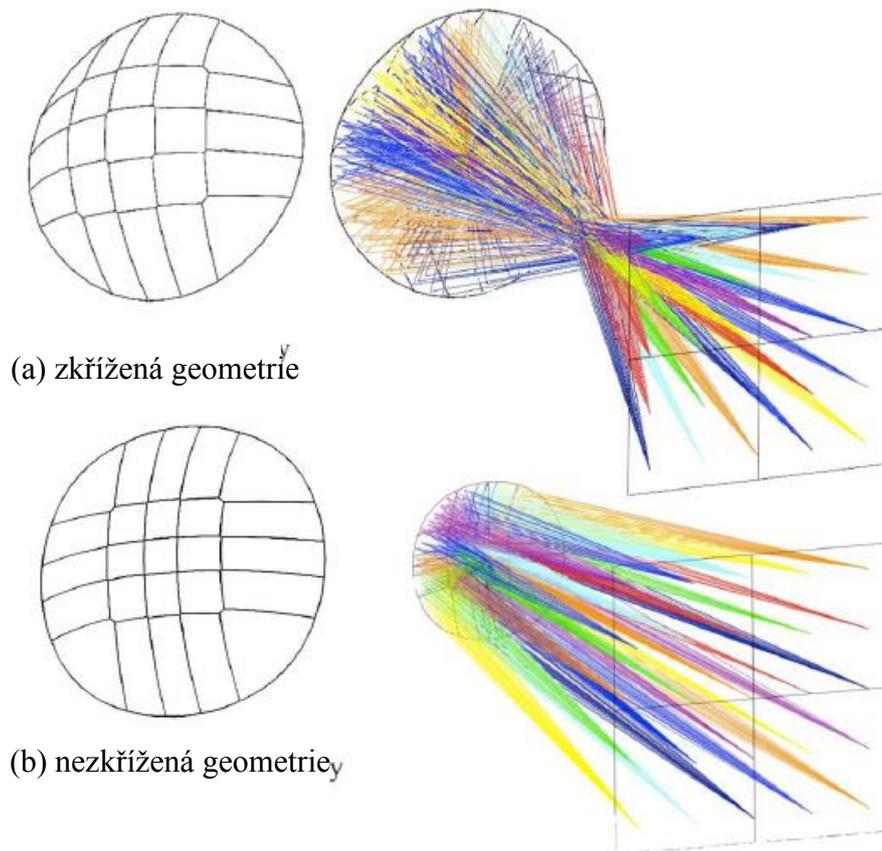
**Obr. 20:** Složený reflektor se zkříženými paprsky. Převzato z [15].

Při tomto skládání reflektoru jsou dvě možnosti volby reflektorové plochy. Je-li paprsek veden stejně jako na obrázku 19 vlevo, lze zvolit, zda paprsky budou odraženy již od bližšího elipsoidu, nebo od nejvzdálenějšího elipsoidu. V případě volby bližšího elipsoidu dojde ke křížení paprsků jako v obrázku 20. Při volbě nejvzdálenější odrazné plochy nebude trajektorie paprsků zkřížená, jak je zobrazeno na obrázku 21.



**Obr. 21:** Složený reflektor s přímými paprsky. Převzato z [15].

Na obrázku 22 je zobrazen odraz a rozložení světla v reflektoru složeném z 25 částí elipsoidů. Každá plocha reflektoru soustřeďuje odražené paprsky do jiného bodu v cílové rovině. V cílové rovině potom vzniká rovnoměrné čtvercové osvětlení.



**Obr. 22:** Příklady fazetového reflektoru. V části (a) se zkříženými paprsky a v části (b) s nezkříženými paprsky. Upraveno podle [15].

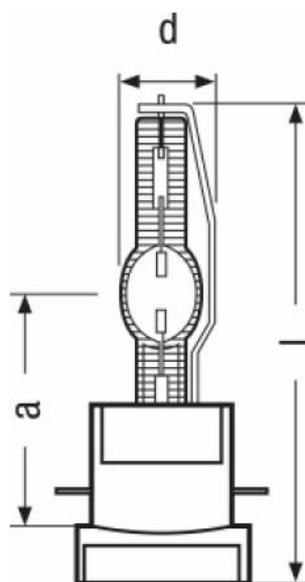
## 8 Návrh reflektoru

Použitým zdrojem je metal-halogenidová výbojka. Výbojka se skládá ze skleněné trubičky, ve které je přítomen plyn, a keramické základny. Do skleněné trubičky jsou zavedeny elektrody. Po přivedení proudu na elektrody dochází k hoření plynu ve výbojce. Proud procházející plynem excituje příměsi plynu (halogenidy) a rtuť, které následně emitují excitační energii ve formě světelné záření. Zvolená výbojka je od firmy OSRAM a má označení „Lok-it! HTI 1500W/60/P50“. Základní technické parametry jsou zmíněny v tabulce 1. Podrobnější technické parametry výbojky jsou v příloze 1 a 2 [16].

Jmenovitý výkon	1500 W
Jmenovité napětí	100 V
Jmenovitý proud	15 A
Teplota chromatičnosti	6000 K
Světelný tok	$1,35 \cdot 10^5$ lm
Mezera mezi elektrodami	5 mm

**Tab. 1:** Technické parametry metal-halogenidové výbojky.

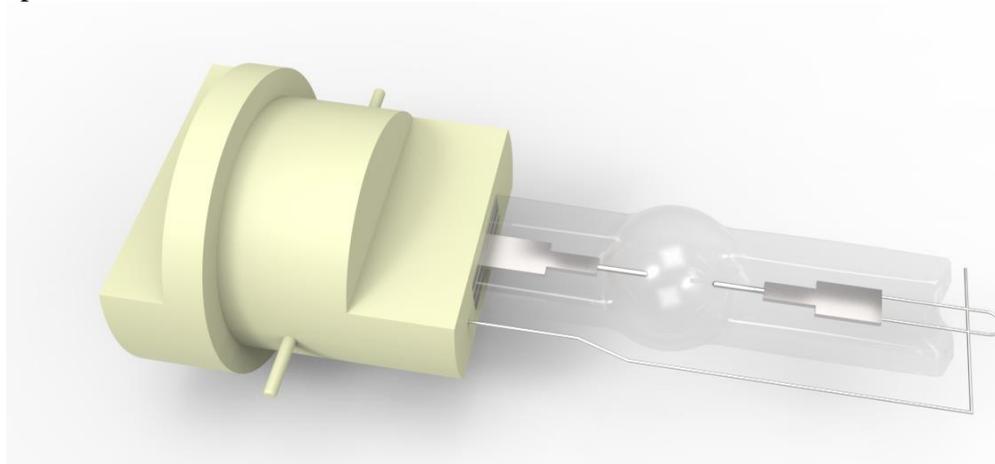
Základní rozměry použité výbojky jsou zobrazeny na obrázku 23. Konstrukce zvolené výbojky byla vykreslena ve 3D modelovacím programu CATIA (obrázek 24) a vložena do prostředí LT. Pro simulaci světelného zdroje v programu LT byla vytvořena zářící válcová plocha, která svými parametry nejvíce odpovídá reálnému zdroji. Válcová plocha má délku 5 mm a průměr 1 mm. Střed zdroje byl umístěn do počátku souřadnicového systému programu LT.



a	65 mm
d	23 mm
l	128 mm

**Obr. 23:** Základní rozměry světelného zdroje. Převzato z přílohy 1.

Dle zadání byla v programu LT vykreslena clona s průměrem otvoru 25 mm, která byla umístěna do vzdálenosti 150 mm od hořené výbojky. Pro vytvoření geometrie reflektoru, bylo použito šesti různých metod. První metoda využívá pouze základní geometrická tělesa, druhá metoda využívá modul Freeform design feature pro výpočet hladkého reflektoru. Další metodou bylo užití modulu Macro focal reflector, tento modul vytváří fazetový reflektor. Čtvrtá metoda vytváří fazetové reflektory tentokrát pomocí knihovny nástrojů. Další metoda vytváří opět fazetový reflektor vkládáním 3D textury. Poslední metodou bylo složení výsledného reflektoru z více elipsoidů. Zmíněné metody budou popsány v následujících podkapitolách.



**Obr. 24:** Render metal-halidové výbojky.

### 8.1 Metoda užívající základních geometrických těles

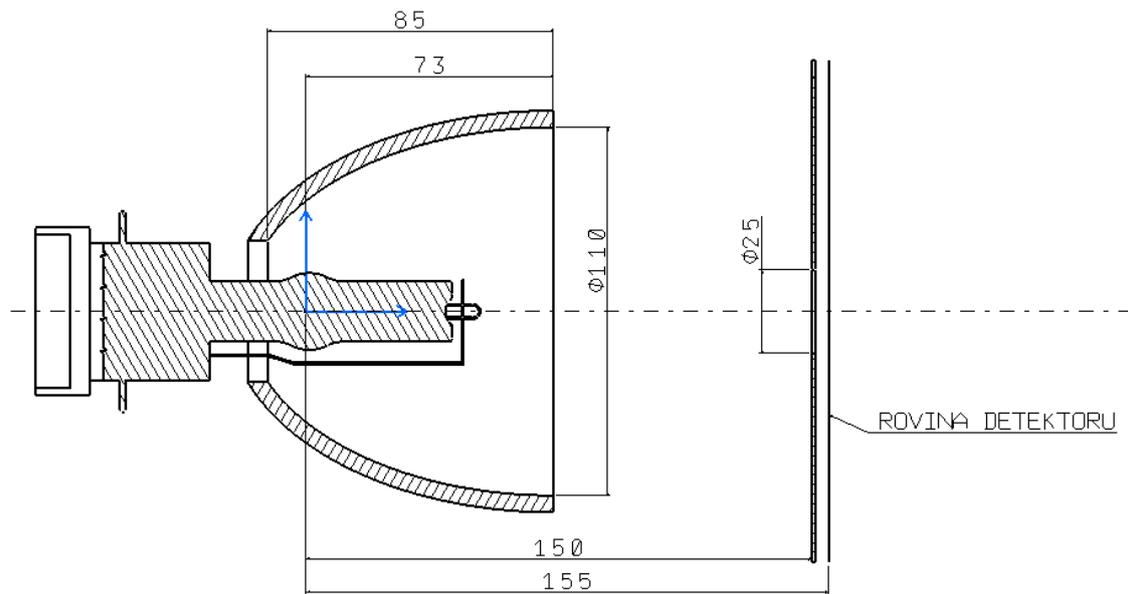
Geometrie reflektoru lze vytvořit několika způsoby. V první metodě byl vykreslen rotační elipsoid. Ohnisková vzdálenost elipsoidu byla nastavena podle požadované vzdálenosti zdroje od clony, tedy 150 mm. Délka vedlejší poloosy elipsoidu byla zvolena v délce 90 mm. Optické vlastnosti elipsoidu jsou popsány v kapitole 4. Elipsoid je s výhodou používán při potřebě koncentrovat paprsky z bodového zdroje do cílového bodu. Zmíněný zdroj však není bodový, proto elipsoid nezobrazuje zdroj do bodu, ale do plošky.

Ve vzdálenosti 150 mm od počátku souřadnicového systému ve směru optické osy byla umístěna clona s kruhovým otvorem o průměru 25 mm. Detektorová rovina, na které byly zaznamenávány hodnoty světelného toku a osvětlení, byla umístěna do vzdálenosti 155 mm od počátku souřadnic, ve směru optické osy. Základní rozměry sestavy jsou zobrazeny v obrázku 25.

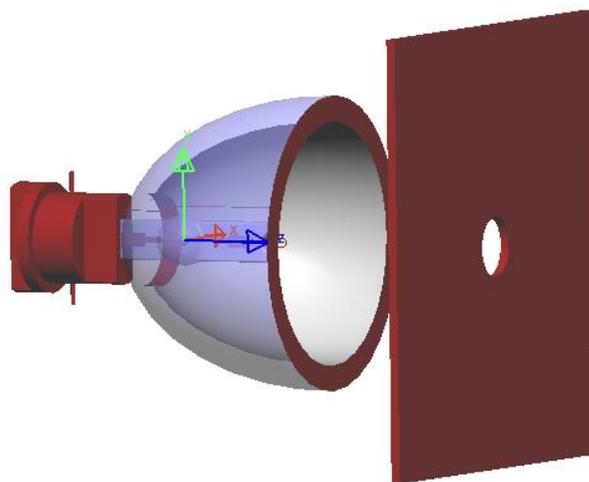
S prvním reflektorem byla provedena analýza rozdílných zdrojů. Reflektor byl trasován postupně s ideálním bodovým zdrojem, válcovým zdrojem a válcovým zdrojem včetně geometrie výbojky. Nákres systému je zobrazen na obrázku 26. Barevnost obrázku je zvolena podle optických vlastností materiálu, hnědou barvou jsou zobrazeny absorpční části, průsvitné části, jako je sklo, jsou zobrazeny částečně průhledně a odrazné zrcadlové plochy jsou zobrazeny šedou barvou.

Pro všechny zdroje byl vykreslen graf rozložení svítivosti. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3, svítivost vyjadřuje rozložení světelného toku do různých směrů. Zaznamenané hodnoty svítivosti se vykreslí od bodu zdroje jako vektor do příslušného směru. Jsou-li takto vykresleny vektory v rovině, je získáno rozložení svítivosti v dané rovině. Pro všechny použité zdroje bylo vykresleno rozložení svítivosti ve dvou vzájemně kolmých rovinách. Poloha rovin vůči zdroji je zobrazena na obrázku 27, jde o roviny x-z (zelená) a y-z (modrá). Rozložení svítivosti bodového zdroje je zobrazeno na obrázku 28. Bodový zdroj vyzařuje do všech směrů stejnou hodnotou světelného toku, graf rozložení svítivosti je tedy kruhový

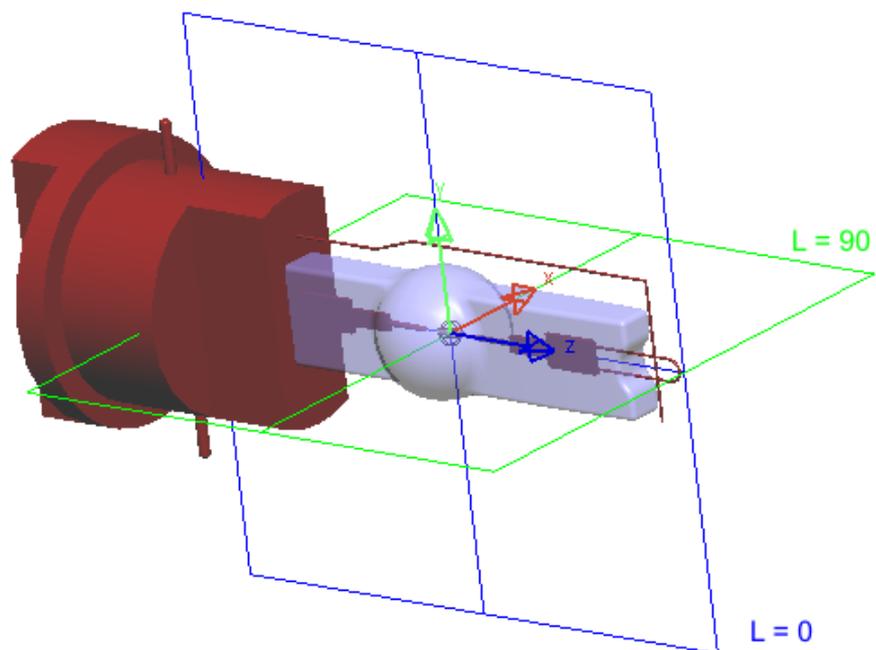
v obou kolmých rovinách. Rozložení svítivosti válcového zdroje je zobrazeno na obrázku 29. Rozměry válcové plochy jsou odpovídající prostoru hoření mezi elektrodami výbojky, průměr válce je 1 mm a délka válce 5 mm. Vyzařující plocha je pouze plášť válce, podstavy válce světlo nevyzařují, proto rozložení svítivosti již není kruhové. Na obrázku 30 je rozložení svítivosti válcového zdroje s geometrií výbojky. Při porovnání obrázku 29 a 30 je vidět, jak geometrie výbojky ovlivňuje vyzařování zdroje.



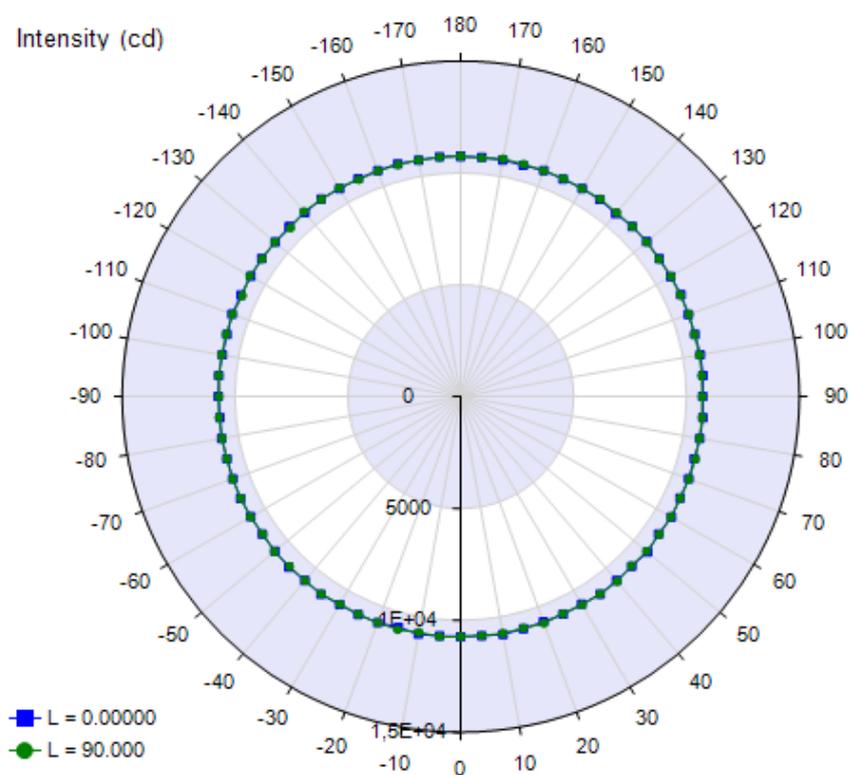
**Obr. 25:** Náskres počátečních rozměrů.



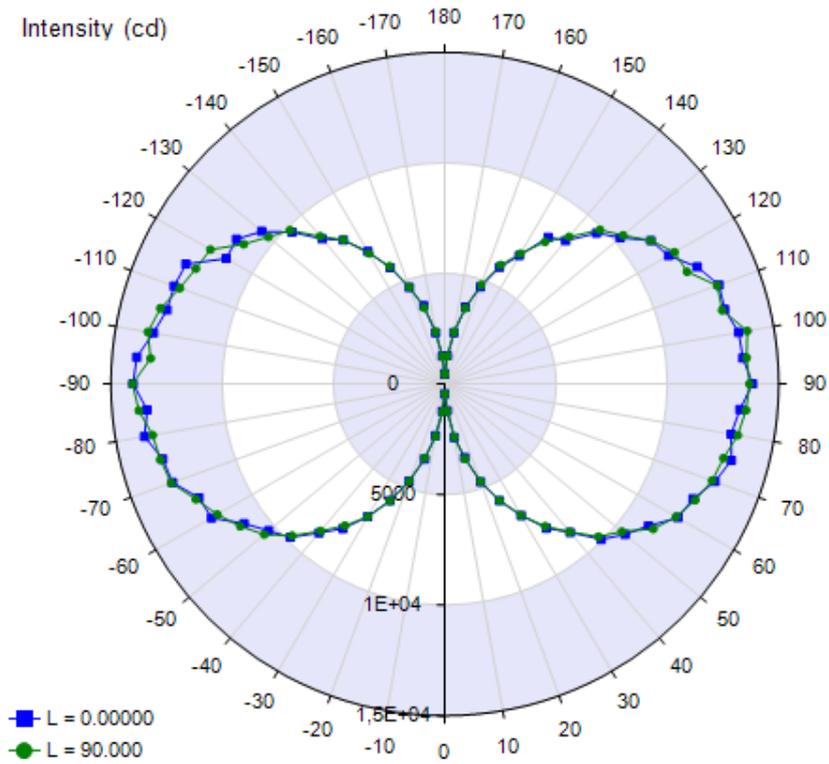
**Obr. 26:** Vykreslení základní geometrie se zdrojem a clonou.



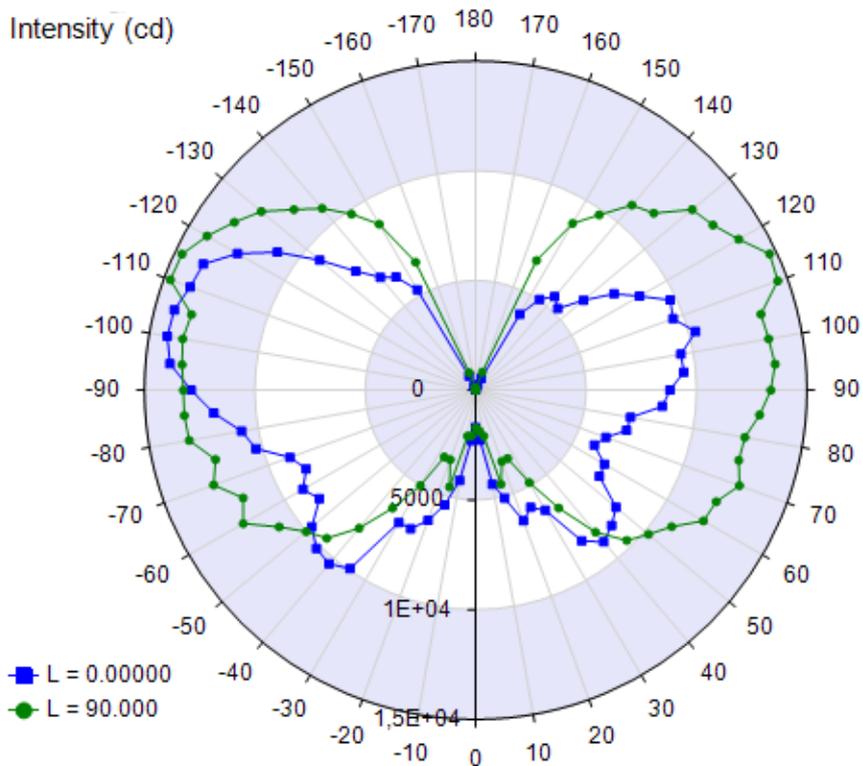
**Obr. 27:** Poloha podkladových rovin pro grafy rozložení svítivosti.



**Obr. 28:** Graf rozložení svítivosti bodového zdroje.

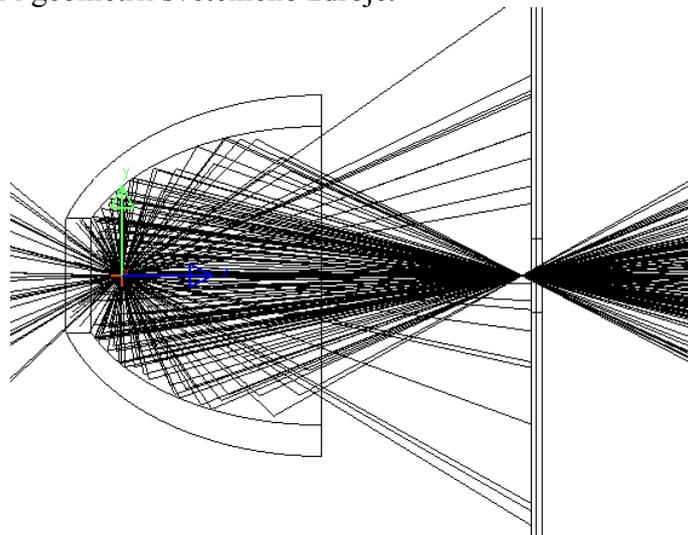


**Obr. 29:** Graf rozložení svítivosti válcového zdroje.

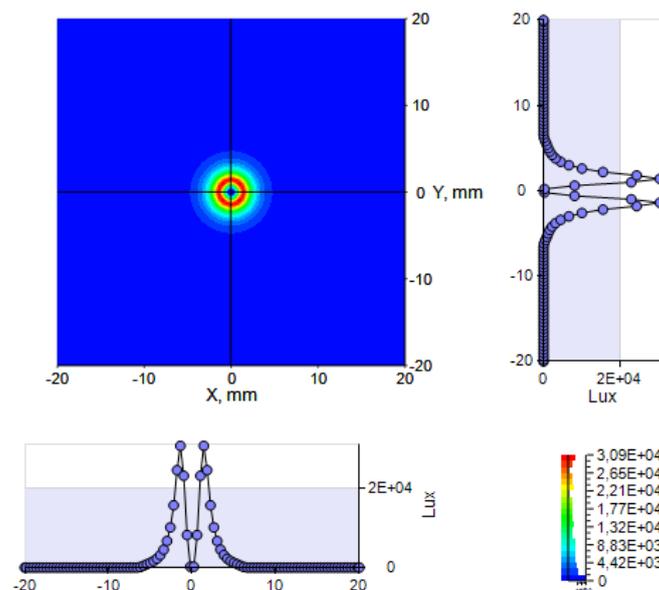


**Obr. 30:** Graf rozložení svítivosti válcového zdroje s geometrií výbojky.

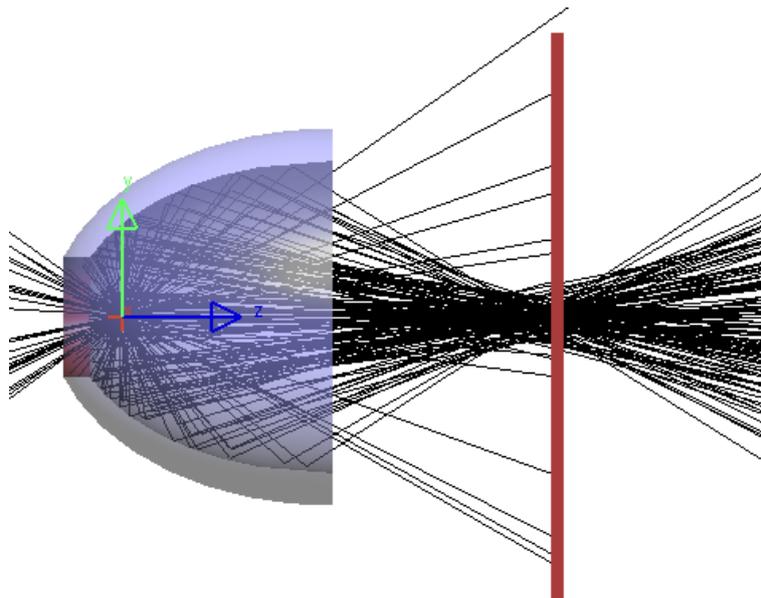
Výsledky trasování jednotlivých zdrojů lze vidět na obrázcích 31 až 36. Na obrázcích 31, 33 a 35 jsou zobrazeny průběhy paprsků systémem. Na obrázcích 32, 34 a 36 jsou zobrazeny grafy osvětlení v rovině detektoru. V grafu jsou pro větší názornost zobrazeny také dva vzájemně kolmé řezy, které prochází osou systému. Všechna trasování byla provedena se stejným množstvím paprsků. Pro dostatečnou jemnost grafu a současně časově přiměřeně náročný výpočet byl zvolen počet paprsků 2 miliony. Z obrázků jde vidět, že bodový zdroj vytvoří bodový spot před clonou a za clonou se paprsky rozbíhají. Svazek válcového zdroje je širší a má vyšší účinnost. Systémem tedy prošlo více světla. Po přidání geometrie výbojky dochází ke snížení účinnosti systému hlavně kvůli odstínění paprsků jdoucích přímo ze zdroje do clonky. Srovnání hodnot jednotlivých případů je zobrazeno v tabulce 2 níže. Výsledky simulací s válcovým zdrojem a zobrazenou geometrií světelného zdroje jsou nejbližší předpokládaným reálným výsledkům. Proto budou v dalších simulacích reflektory trasovány s válcovým zdrojem i geometrií světelného zdroje.



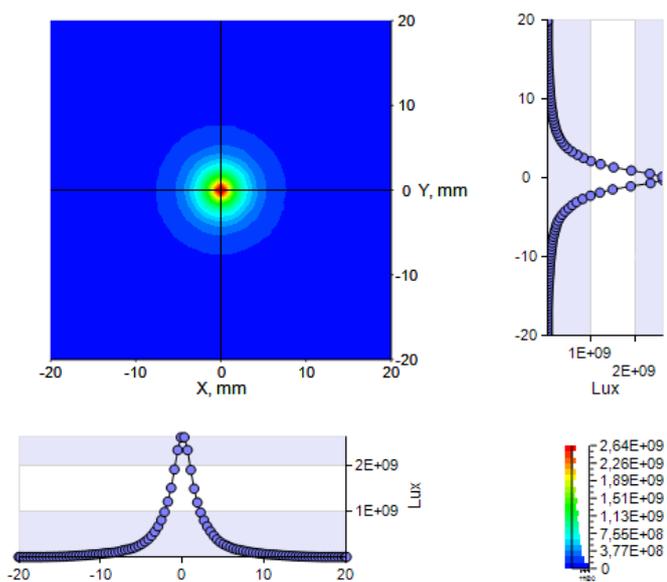
**Obr. 31:** Bodový zdroj – průběh paprsků.



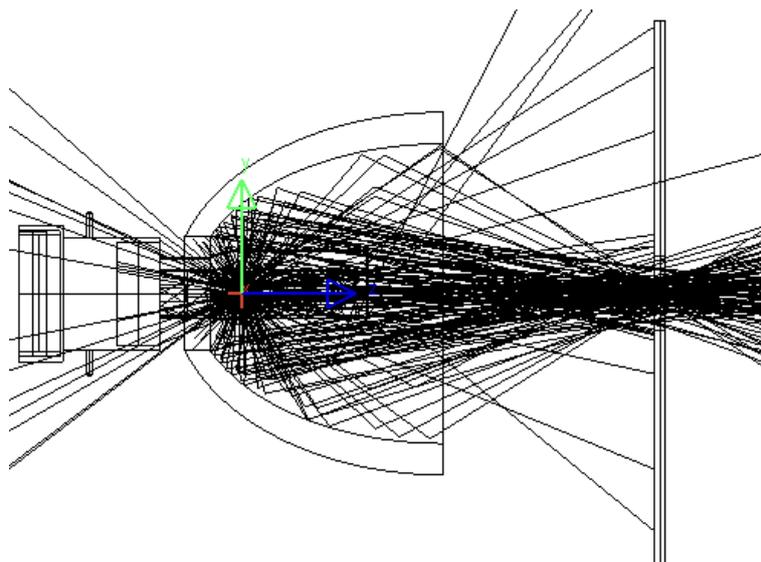
**Obr. 32:** Bodový zdroj - osvětlení na detektoru.



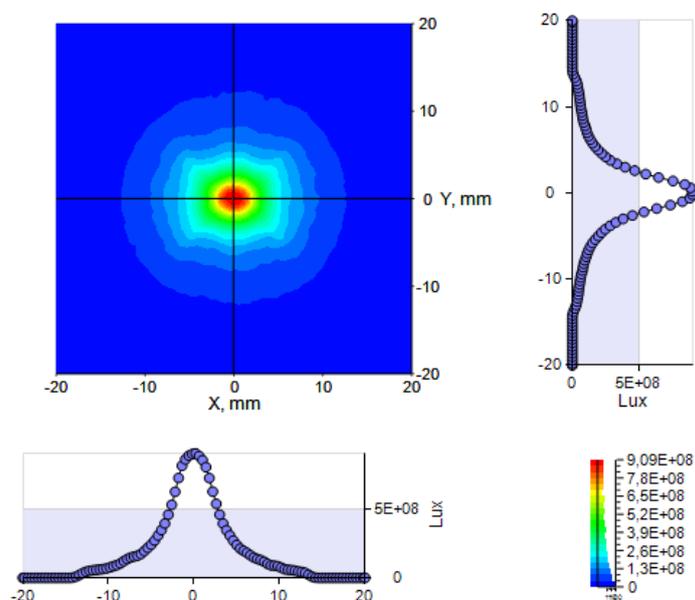
**Obr. 33:** Válcový zdroj – průběh paprsků.



**Obr. 34:** Válcový zdroj - osvětlení na detektoru.



**Obr. 35:** Válcový zdroj s geometrií výbojky – průběh paprsků.



**Obr. 36:** Válcový zdroj s geometrií výbojky - osvětlení na detektoru.

Druh použitého zdroje	Tok zdroje [lm]	Tok na detektoru za clonou [lm]	Účinnost systému [%]	Maximální osvětlení na detektoru za clonou [lx]
Bodový zdroj	1	0,64	64	30907
Válcový zdroj	$1,35 \cdot 10^5$	95935	71	$1,51 \cdot 10^9$
Válcový zdroj s geometrií výbojky	$1,35 \cdot 10^5$	75428	56	$9,09 \cdot 10^8$

**Tab. 2:** Srovnání použitých zdrojů

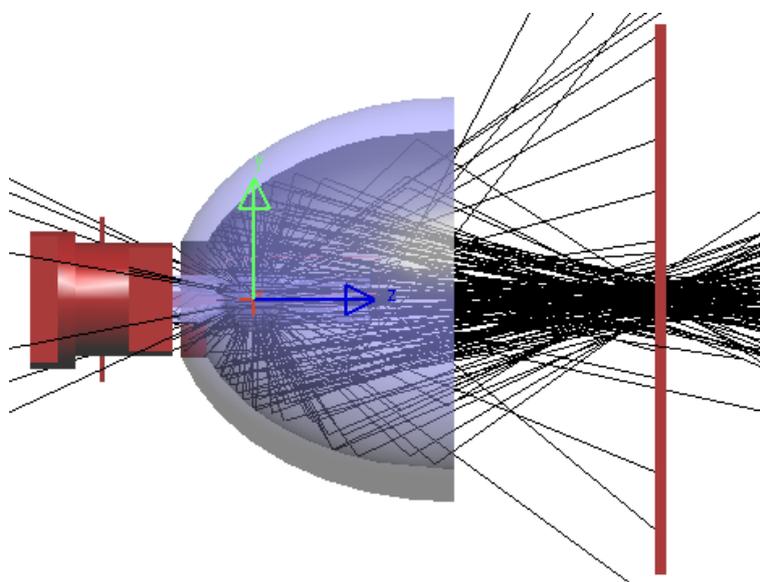
Z výsledků trasování jde vidět, že bylo dosaženo poměrně velké účinnosti systému, rozložení svazku za clonou je však nevyhovující. Ideální tvar svazku za clonou by bylo homogenní pokrytí celého otvoru maximální hodnotou osvětlení. Trasovaný reflektor pro větší přehlednost bude označen reflektor A.

Pro získání vyšší účinnosti a současně větší homogenity osvětlení byla použita optimalizace. Před spuštěním optimalizačního modulu je třeba vhodně zvolit parametry optimalizace. Jde o tzv. „merit function“, neboli meritní funkci, a „optimization variables“, jinak optimalizační proměnné. Meritní funkce je funkce, která obsahuje optimalizační proměnné a současně určuje požadované cílové hodnoty. Optimalizační proměnné jsou vhodně zvolené parametry reflektoru, které budou během optimalizace měněny v zadaném rozsahu.

Při návrhu reflektoru jsou pouze dvě vhodné možnosti volby meritní funkce. Jako první možnost je nastavení požadovaného osvětlení na detektoru, například vysoké maximum osvětlení, nebo konstantní hodnotu osvětlení a tím docílit homogenity osvětlení. Jako druhá je možnost volby polohy specifických paprsků, jde o určení cílové oblasti na detektoru, tedy vymezení polohy dopadu okrajových paprsků.

Pro volbu optimalizačních proměnných bývají nejčastěji voleny hodnoty, které určují tvar reflektoru, např. koeficienty polynomu, nebo proměnné, které určují tvar cílového obrazu, např. předepsané rozložení osvětlení na detektoru. Se stoupajícím množstvím proměnných a počtu trasovaných paprsků narůstá náročnost optimalizace, je proto potřeba volit vhodný počet proměnných i paprsků, aby došlo k dostatečné optimalizaci a současně aby optimalizace proběhla v konečném čase.

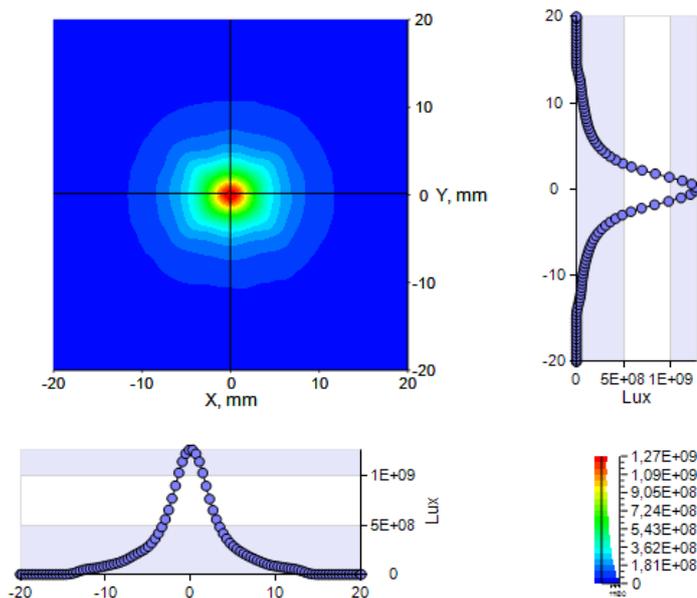
Zde byly jako parametry optimalizace zvoleny parametry elipsoidu. Jde o ohniskovou vzdálenost a délku vedlejší osy elipsoidu. Jako meritní funkce optimalizace byla zvolena velikost světelného toku a současně průměrné osvětlení. Meritní funkce bude tedy usilovat o největší světelný tok a současně o nejvyšší průměrné osvětlení na detektoru.



**Obr. 37:** Průběh paprsků při užití reflektoru B.

Po optimalizaci má reflektor, který označíme jako reflektor B, ohniskovou vzdálenost 145 mm a délku hlavní poloosy 103,20 mm. Průběh paprsků systémem je zobrazen na obrázku 37 a graf osvětlení po optimalizaci je zobrazen na obrázku 38. Hodnota dopadajícího toku za clonou stoupla na 88 930 lm. Účinnost systému je nyní 66%. Porovnáním obrázků 36 a 38 lze vidět, že šířka svazku se téměř nezměnila. Maximální hodnota osvětlení však

vzrostla na  $1,27 \cdot 10^9$  lx. Optimalizací tedy došlo ke zvýšení účinnosti systému, zvýšení hodnot osvětlení v cílové rovině, ale nedošlo k rozšíření světelného svazku.

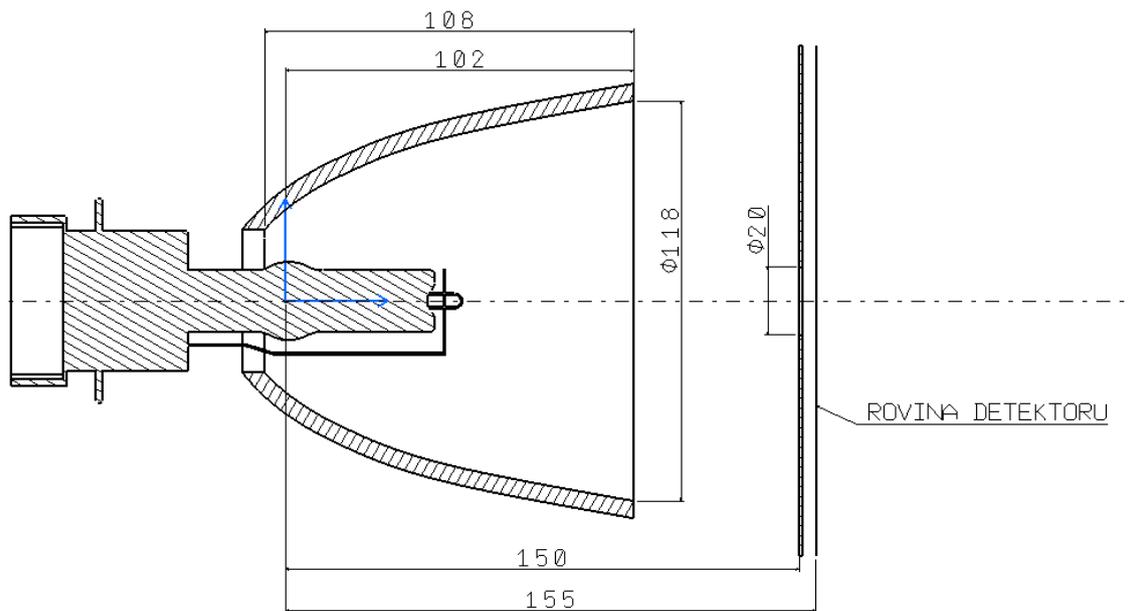


**Obr. 38:** Osvětlení na detektoru za clonou při použití reflektoru B.

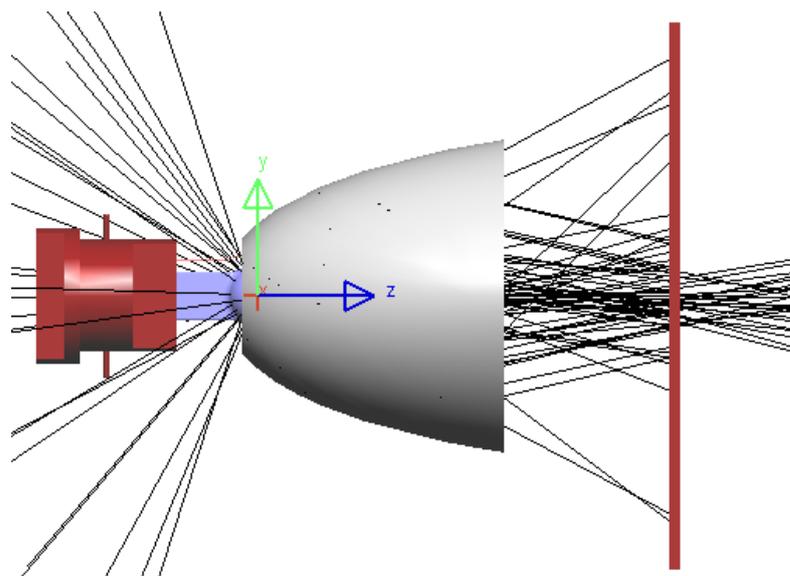
## 8.2 Použití modulu „Freeform design feature“

Další metodou jak je možno vytvořit reflektor, je pomocí modulu "Freeform design feature". Tento reflektor pro přehlednost označíme reflektor C. Modul „Freeform design Feature“ je modul pro výpočet tvaru reflektoru podle zadaných kritérií. Vstupní hodnoty pro výpočet reflektoru se týkají určení světelného zdroje a požadovaného obrazu na detektoru. Jako světelný zdroj byl zvolen bodový zdroj s rovnoměrným rozložením toku a vyzařováním do všech směrů. Světelný zdroj je umístěn do počátku souřadnicového systému. Směr šíření paprsků za reflektorem byl zvolen křížený pro získání úzkého spotu v rovině clony. Dále byla nastavena vzdálenost vrcholu plochy od světelného zdroje na 15 mm. Detektorová rovina byla nastavena do vzdálenosti 150 mm od zdroje, cílový obraz v rovině detektoru osvětlení má být kruhová plocha o průměru 20 mm. Zkreslení výchozích hodnot je zobrazeno na obrázku 39.

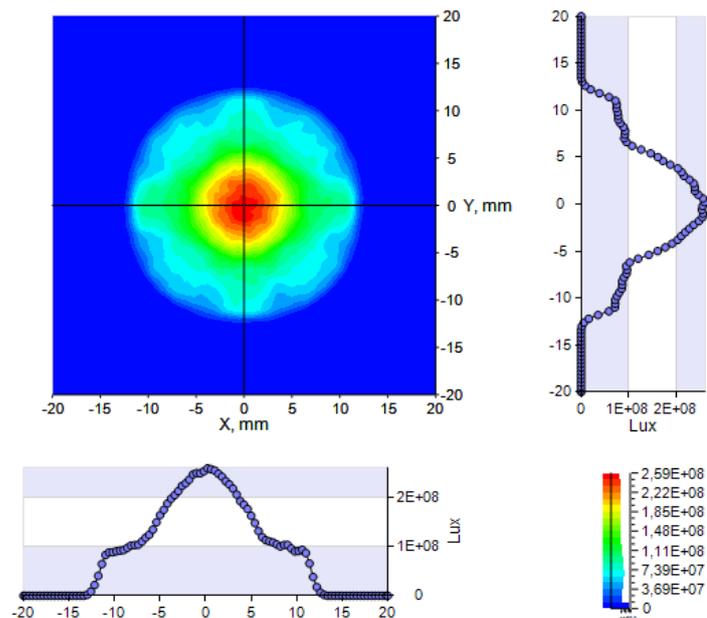
Reflektor C vytvořený modulem „Freeform Design Feature“ je zobrazený na obrázku 40 včetně průběhu paprsků systémem. Na obrázku 41 je zobrazeno osvětlení za stínítkem. Hodnota světelného toku dopadajícího na rovinu za clonou je 46 404 lm. Účinnost systému je tedy 34%. Celková účinnost systému oproti předchozímu reflektoru B klesla přibližně na polovinu. Oproti předchozímu reflektoru došlo k rozšíření svazku a snížení maxima osvětlení na  $2,59 \cdot 10^8$  lx.



**Obr. 39:** Vykreslení zadaných rozměrů.



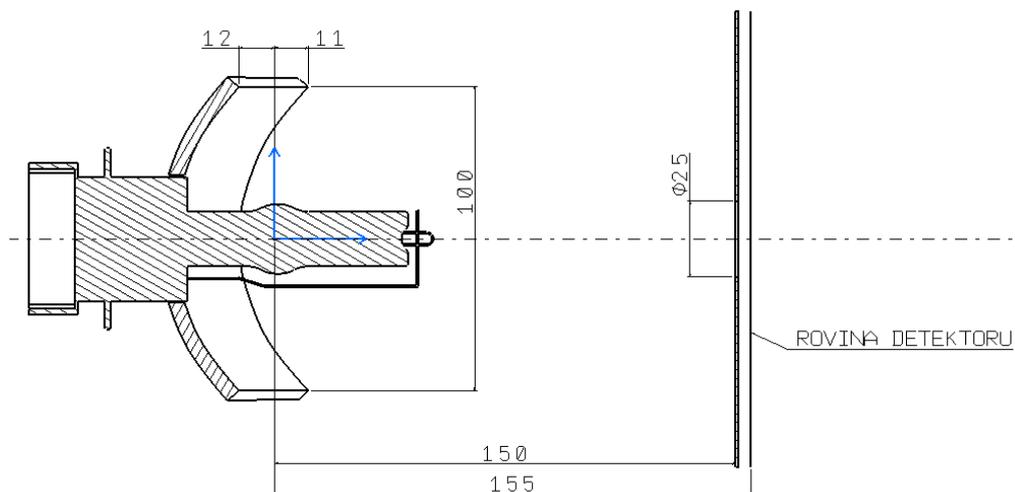
**Obr. 40:** Průběh paprsků při použití reflektoru C.



**Obr. 41:** Osvětlení na detektoru za clonou při použití reflektoru C.

### 8.3 Použití modulu „*Macro Focal Reflector*“

Další použitou metodou pro vytvoření reflektoru je použití modulu „*Macro Focal Reflector*“. Jde o modul, který vytváří fazetový reflektor. Základní rozměry reflektoru jsou zobrazeny na obrázku 42. Tento reflektor označíme jako reflektor D.

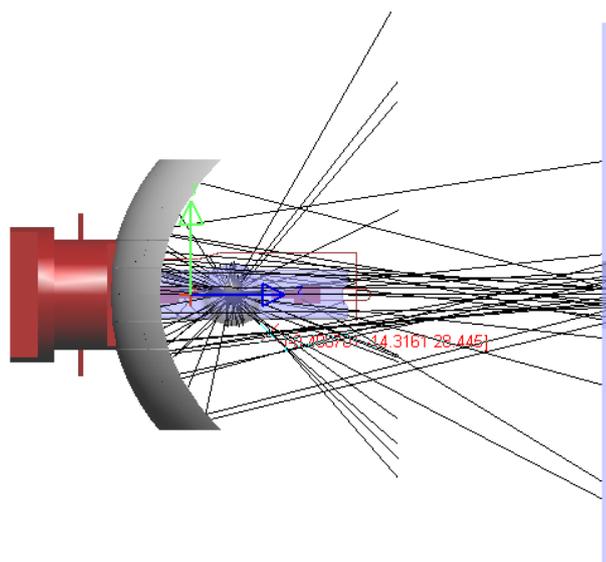


**Obr. 42:** Rozměry reflektoru D.

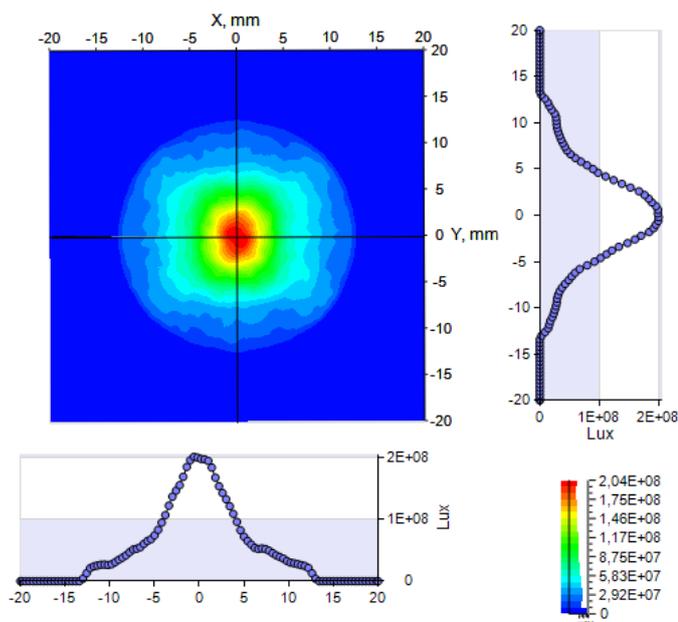
Před vypočtením samotného reflektoru je potřeba tak jako u předchozího modulu vložit vstupní hodnoty pro výpočet. Na výběr je z několika možných tvarů mřížek, podle kterých budou následně vytvářeny fazety reflektoru. První je mřížka Classic. Jde o pravoúhlou síť obdélkových polí s možností volby šířky sloupců i řádků. Další je mřížka Zonal. Jde o pravoúhlou mřížku, která je rozdělena do několika částí, zón, kde každá část může mít jiné nastavení mřížky. Další mřížkou je Polar. Jde o rotačně symetrickou mřížku okolo optické osy reflektoru. Poslední druh mřížky zvaný Global používá síť sférických souřadnic. V této diplomové práci byla zvolena mřížka Classic. Modul umožňuje nastavit polohu fazet, množství fazet, jejich tvar a způsob vyplnění prostoru mezi fazetami. Modul

dovoluje nastavovat vlastnosti fazet hromadně, nebo jednotlivě a umožňuje jednotlivé fazety vypínat pro pohodlnější ladění fazet.

Výsledné osvětlení fazetového reflektoru D za clonou je zobrazeno na obrázku 44 a vykreslení paprsků systémem je zobrazeno na obrázku 43. Dopadající tok na detektorové rovině za clonou má hodnotu 26 719 lm. Účinnost systému je tedy 20%. Jde zatím o nejnižší účinnost ze všech zmíněných systémů. Je to dáno hlavně tvarem reflektoru, který je málo vydutý. Hodnota maximálního osvětlení je  $2,04 \cdot 10^8$  lx, tedy i hodnota osvětlení v tomto případě klesla. V následující podkapitole budou zmíněny fazetové reflektory vytvářené jiným nástrojem programu LighTools, které budou hlubšího tvaru.



**Obr. 43:** Průběh paprsků při použití reflektoru D.



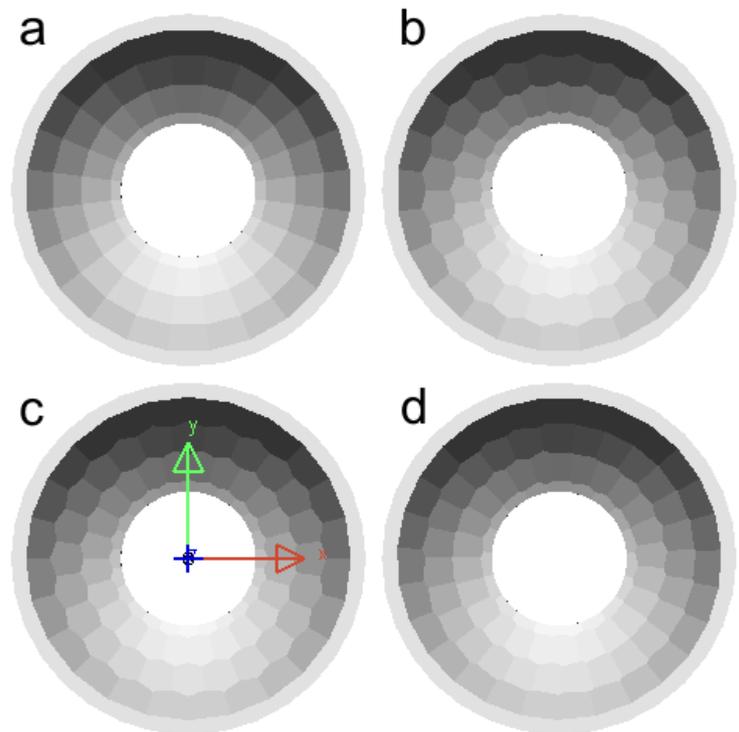
**Obr. 44:** Osvětlení na detektoru za clonou při použití reflektoru D.

## 8.4 Tvorba fazetových reflektorů pomocí knihovny nástrojů

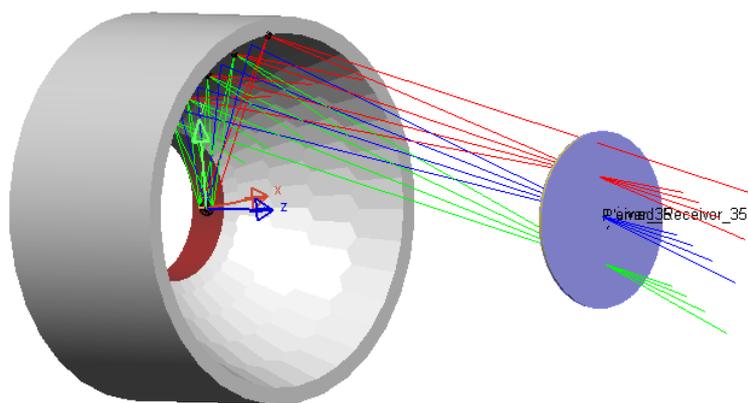
V programu LightTools existuje více metod vytváření fazetových reflektorů. Po metodě zmíněné v podkapitole 8.3 bude nyní představena další. V této kapitole bude pro vytváření reflektorů použita knihovna nástrojů.

V modulu lze nastavovat směr tažení reflektoru, tedy jde-li o reflektor lineárně tažený, nebo reflektor s rotační symetrií. V této práci jde o rotační symetrii. V modulu je možné nastavit způsob skládání fazet po řadách. Jednotlivé způsoby jsou vykresleny v obrázku 45. Jako první možnost je skládání jednotlivých řad fazet za sebou bez použití rotace. Vzorový reflektor je zobrazen v části *a*. Další možnost skládání řad fazet je zobrazena v části *b*. V tomto reflektoru jsou šířky všech fazet v řadě shodné a každá další řada je pootočená o polovinu šířky fazety. Třetí volba vkládání fazet je zobrazena v části *c*. Je zde volena ideální šířka fazet pro jednotlivé řady. Poslední možnost skládání fazet je uživatelem volitelné pootočení řad v reflektoru. Tento případ je zobrazen v části *d*. Dále je v modulu možné vložit počet fazet v první řadě reflektoru u hrdla, je však možné toto nastavení nechat vygenerovat modulem. Dále je možné upravovat pootáčení a šířku skládaných fazet.

Jako další vstupní hodnoty pro modul jsou základní vlastnosti reflektoru, světelného zdroje a detektoru. Pro reflektor je nastavován průměr otvoru u vrcholu reflektoru pro vkládání zdroje, průměr širší části reflektoru, a úhlové rozšíření reflektoru. Pro detektor je nastavována vzdálenost od světelného zdroje po detektor a poloměr cílového obrazu. Pro světelný zdroj se předpokládá válcová plocha, je možné zvolit poloměr a délku. Zdroj i detektor je možné nechat vykreslit v geometrii. Modul umí také vykreslit hlavní paprsky v geometrii tak, jak je zobrazeno na obrázku 46.

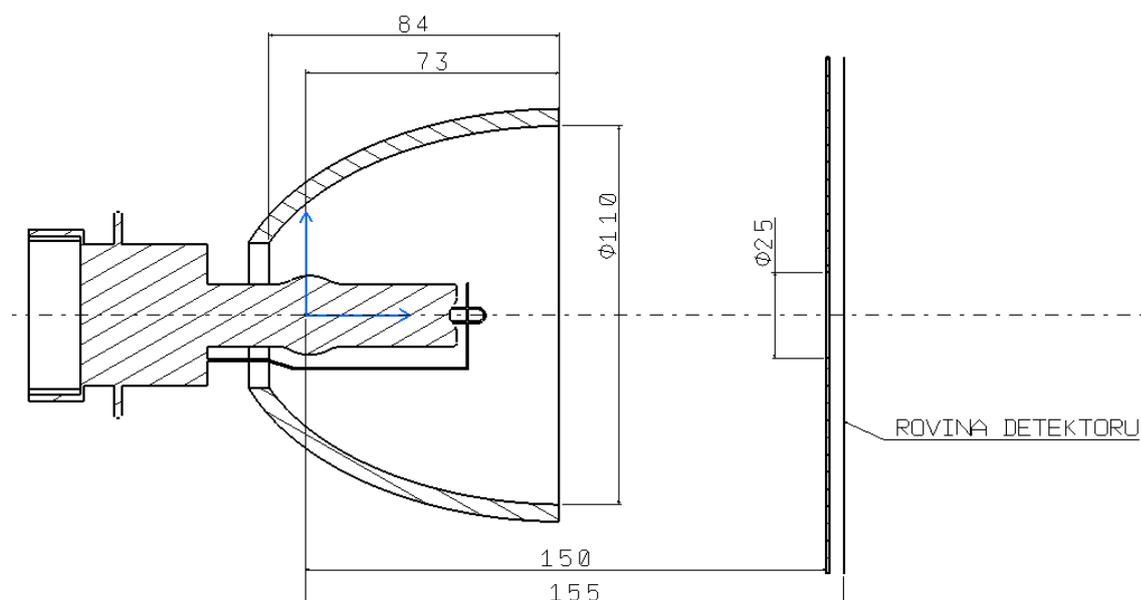


**Obr. 45:** Příklady použitých sítí fazetových reflektorů.



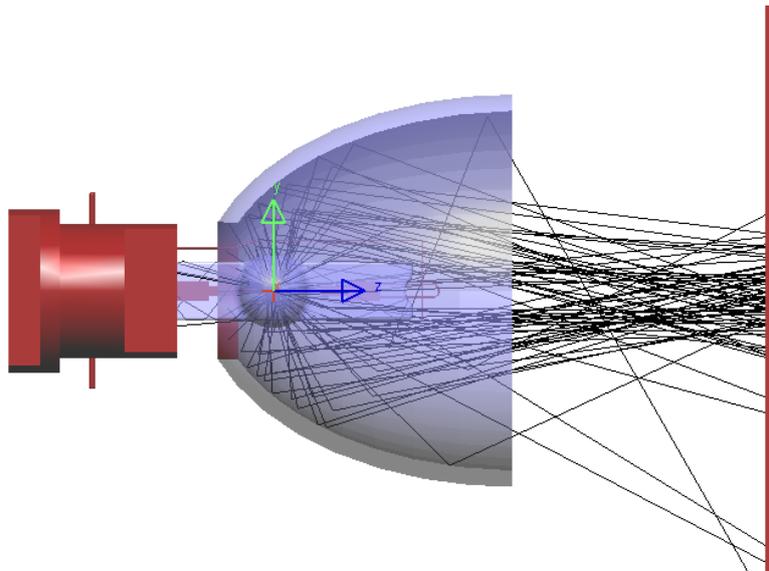
**Obr. 46:** Zobrazení paprsků v reflektoru

Pro všechny reflektory byla zvolena rotační symetrie. Pro podkladový reflektor byl zvolen větší poloměr reflektoru na 55 mm, poloměr u hrdla reflektoru na 21 mm, rozšiřující úhel 37°, vzdálenost detektoru od zdroje 150 mm, poloměr cílového obrazu na 12,5 mm, válcový světelný zdroj o poloměru 0,5 mm a délce 5 mm. Všechny reflektory jsou složeny ze 462 fazet rozložených do 11 řad. Výchozí geometrie je zobrazena na obrázku 47.

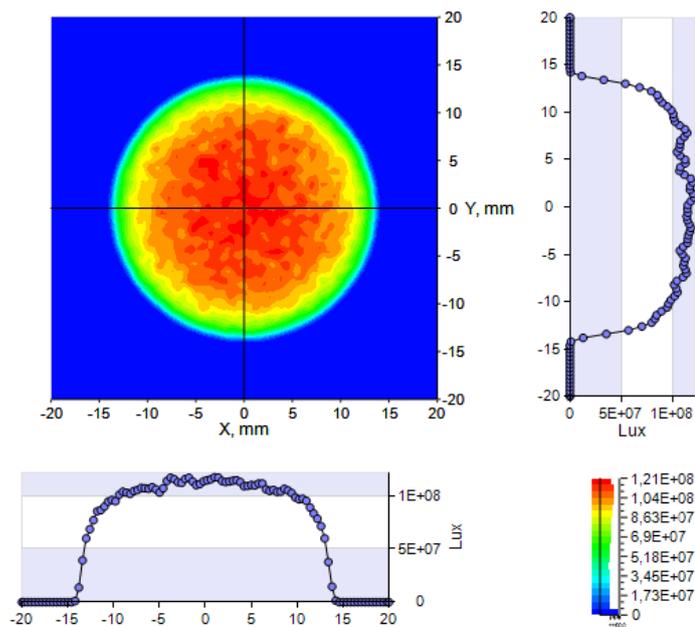


**Obr. 47:** Vykreslení zadaných rozměrů.

Jako první trasovaný fazetový reflektor byl zvolen reflektor bez pootáčení řad fazet. Reflektor bude označen E. Průchod paprsků systémem je zobrazen na obrázku 48. Výsledky trasování jsou zobrazeny na obrázku 49. Světelný tok dopadající na detektorovou rovinu je 54 314 lm, účinnost systému je tedy 40%. V porovnání s hladkým reflektorem B účinnost klesla. Výsledná homogenita osvětlení za clonou je výrazně lepší. Světelný svazek osvětluje celý prostor otvoru ve cloně homogenně. Maximální hodnota osvětlení je  $1,21 \cdot 10^8$  lx.



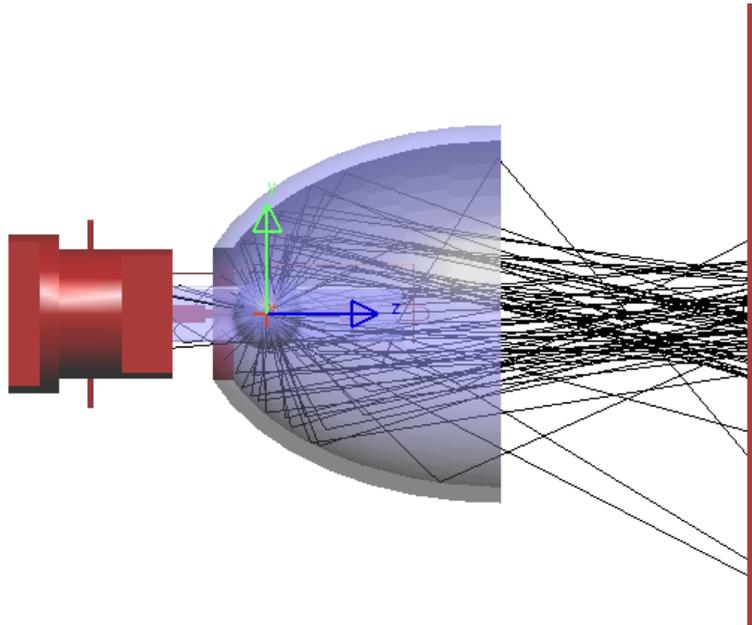
**Obr. 48:** Průchod paprsků systémem s reflektorem E.



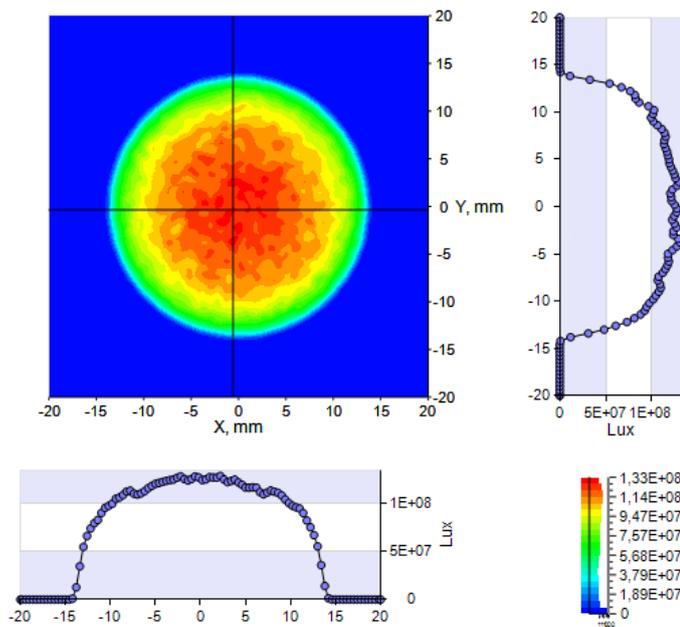
**Obr. 49:** Reflektor E - osvětlení za clonou.

Druhý trasovaný reflektor byl vytvořen z fazet o stejné šířce, kde každá nová řada fazet je pootočena o poloviční šířku fazety. Vytvořená geometrie reflektoru s průchozími paprsky, je zobrazena na obrázku 50. Reflektor bude označen F.

Obrázek 51 obsahuje výsledky trasování. Hodnota toku na detektoru za clonou je 55 574 lm. Účinnost systému je 41%. Maximální osvětlení má hodnotu  $1,33 \cdot 10^8$  lx. Homogenita osvětlení při porovnání obrázků 49 a 51 u krajů otvoru mírně klesla. Došlo tedy k větší koncentraci paprsků směrem do středu otvoru.

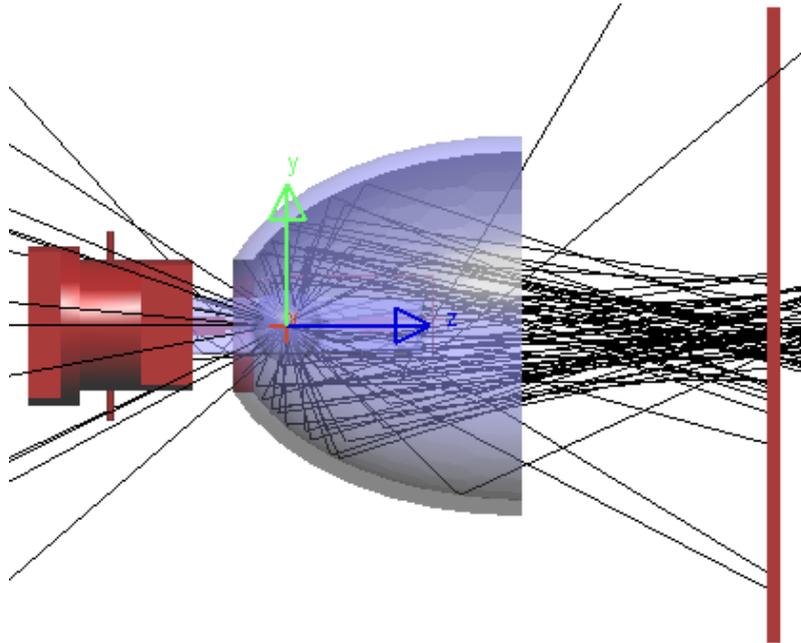


**Obr. 50:** Průchod paprsků systémem s reflektorem F.

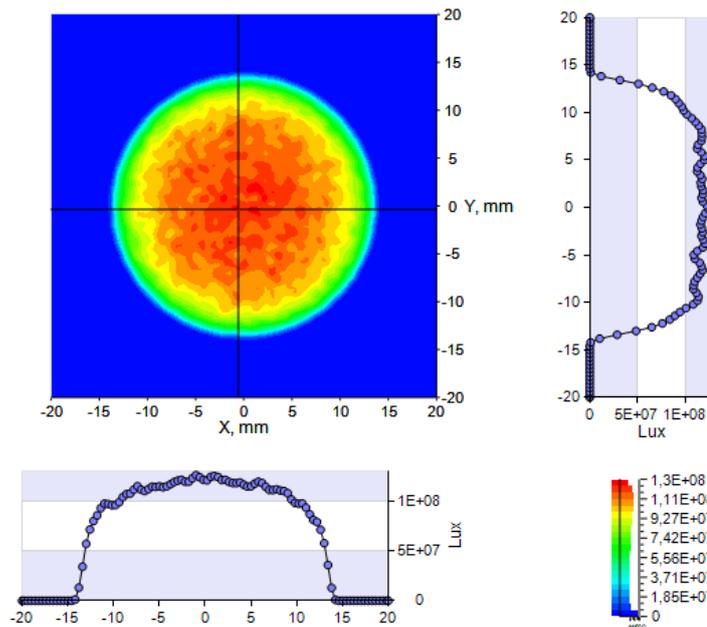


**Obr. 51:** Reflektor F - osvětlení za clonou.

Třetí fazetový reflektor G byl vytvořen pomocí funkce, která počítá ideální šířku fazet. Vykreslení reflektoru je zobrazeno na obrázku 52. Výsledky trasování jsou zobrazeny na obrázku 53. Celkový tok, který dopadl na detektorovou rovinu, je 56 022 lm. Účinnost systému je 41%. Maximální hodnota osvětlení  $1,3 \cdot 10^8$  lx. Hodnoty jsou velice blízké předchozímu případu.

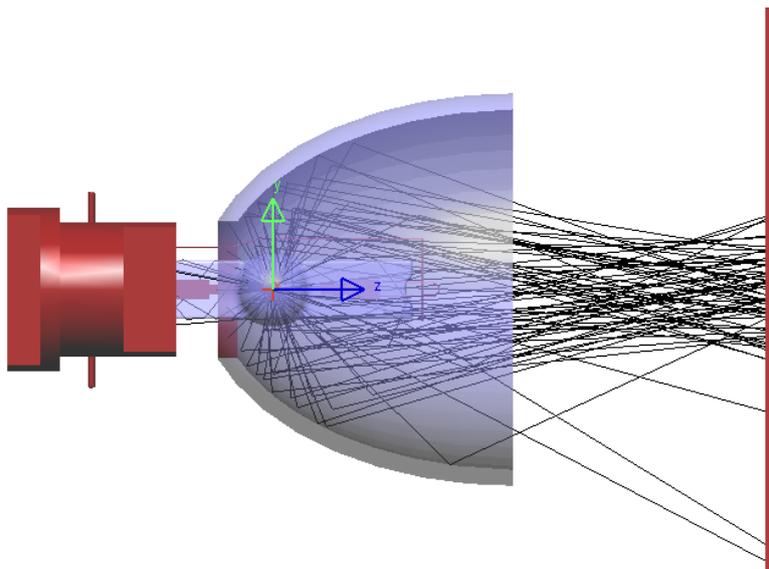


**Obr. 52:** Průchod paprsků systémem s reflektorem G.

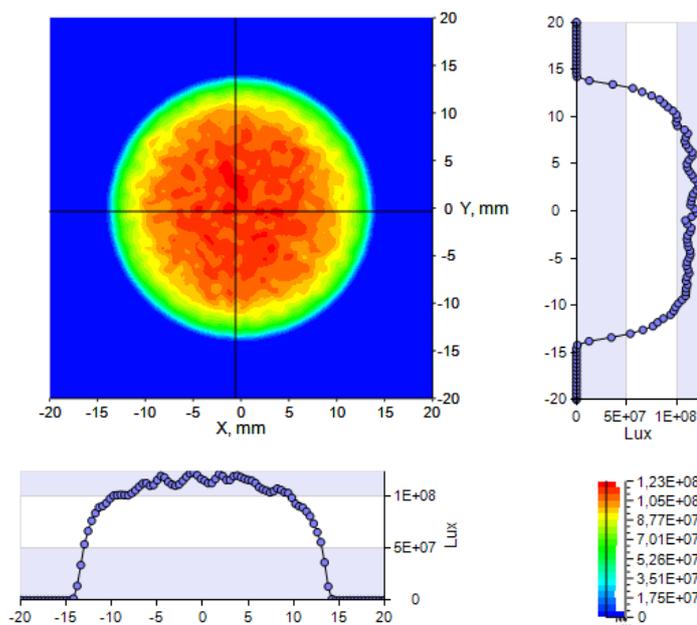


**Obr. 53:** Reflektor G - osvětlení za clonou.

Poslední testovaný fazetový reflektor H, vytvářený pomocí knihovny nástrojů, byl navržen pomocí funkce uživatelem ovládaného pootáčení fazetových řad. Pootáčení fazet bylo nastaveno na hodnotu 1. Vykreslení reflektoru je zobrazeno na obrázku 54. Graf osvětlení v rovině za clonou je zobrazen na obrázku 55. Hodnota dopadajícího toku na detektor je 54 516 lm, účinnost systému 40% a maximum osvětlení je  $1,28 \cdot 10^8$  lx. Výsledné hodnoty jsou mírně nižší než u předchozího reflektoru G, rozdíly jsou však natolik malé, že jsou reflektory srovnatelné.



**Obr. 54:** Průchod paprsků systémem s reflektorem H.



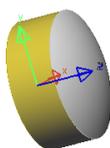
**Obr. 55:** Reflektor H - osvětlení za clonou.

Fazetové reflektory mají prozatím nejlepší homogenitu osvětlení na detektoru za clonou. Výsledné hodnoty fazetových reflektorů jsou si velice podobné.

## 8.5 Vytváření reflektoru vložení 3D textury

Program LT umožňuje vytvořit různé oblé tvary, které lze následně uložit jako entitu. Entita je datový formát, který LightTools využívá pro ukládání geometrie. Později lze uloženou entitu načíst do otevřeného souboru například jako 3D texturu.

V této práci byla jako entita vytvořena válcová plocha o průměru 10 mm a tloušťce 5 mm, kde jedna krajní plocha je rovinná a druhá sférická o poloměru 10 mm. Vzhled vytvořené entity je zobrazen na obrázku 56.

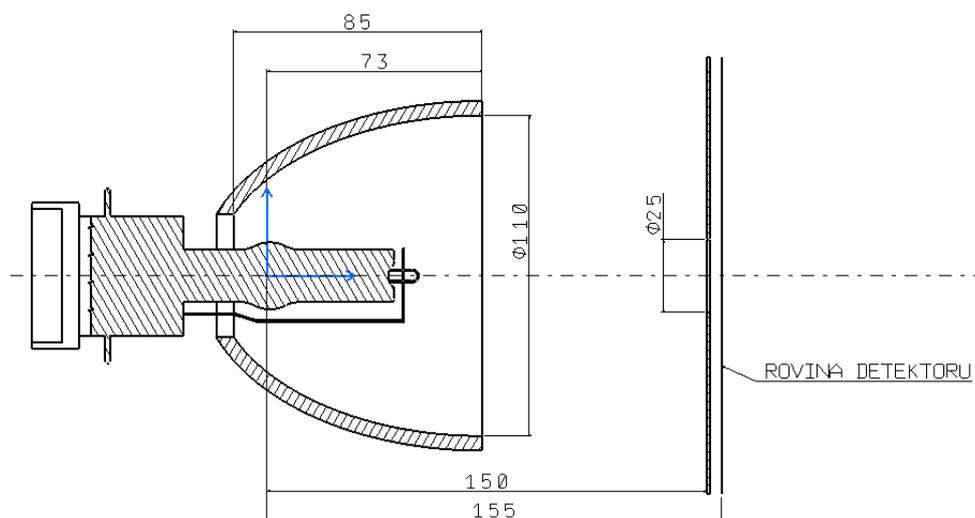


Obr. 56: Vzhled vytvořené entity.

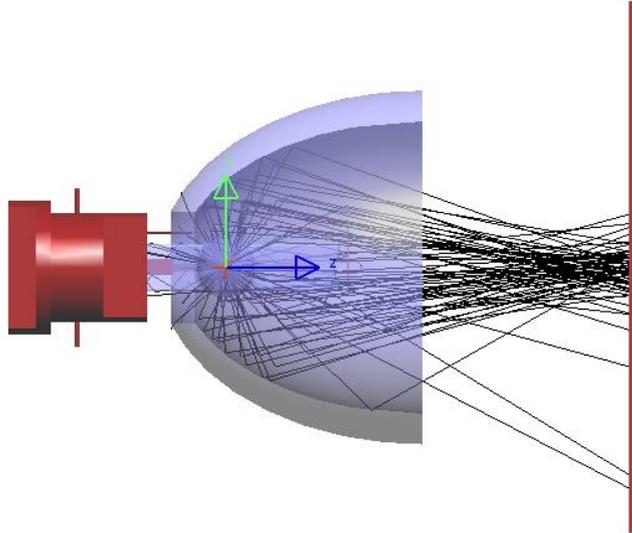
Modul pro vkládání 3D textury vloží jednu zvolenou entitu, kterou nakopíruje dle zadaných požadavků na zvolenou referenční plochu. Je tedy třeba mít přichystanou výchozí plochu, na kterou jsou entity vkládány. Geometrické vlastnosti entit lze měnit i po vytvoření 3D textury. Reflektor s 3D texturou lze tedy bez větších problémů optimalizovat.

Pro texturu je nutné nastavit optické vlastnosti, nejčastěji se přiřazuje zrcadlový povrch textury. Pro vytvoření textury je nutné zvolit tvar sítě, podle které jsou skládány entity vedle sebe. Tvar sítě může být např. pravoúhlý, pravoúhlý s posunem, nebo šestiúhelníkový. Je možné zvolit, zda entita bude přičtena k základní ploše a bude z ní vystupovat, nebo bude od plochy odečtena a vzniknou díry v ploše. V neposlední řadě je možné upravit polohu entit, například zasunout entitu hlouběji do podkladové plochy, nebo entitu pootočit podle své osy.

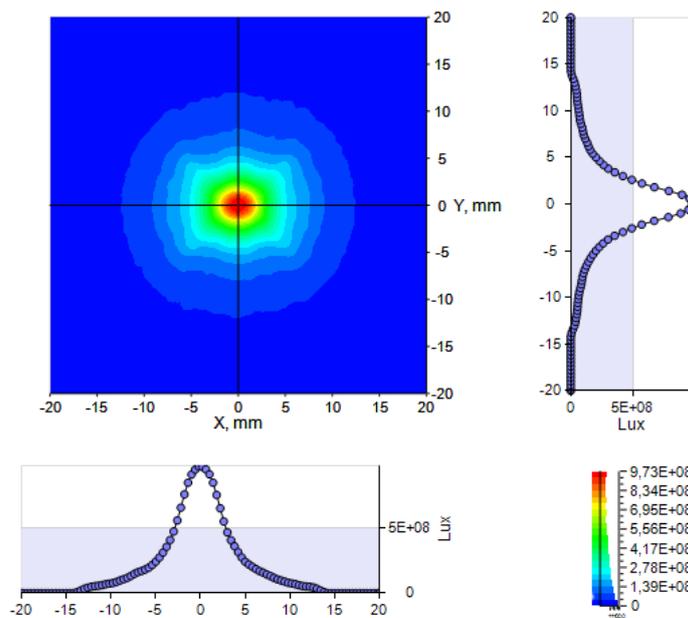
Jako první byl trasován samotný podkladový reflektor pro získání výsledků potřebných pro srovnání účinnosti reflektoru s texturou. Jde o hladký elipsoidní reflektor s označením I, jehož ohnisková vzdálenost je 147 mm a délka hlavní poloosy je 92 mm. Rozměry podkladového reflektoru jsou zobrazeny na obrázku 57.



Obr. 57: Nákres rozměrů podkladového reflektoru I.



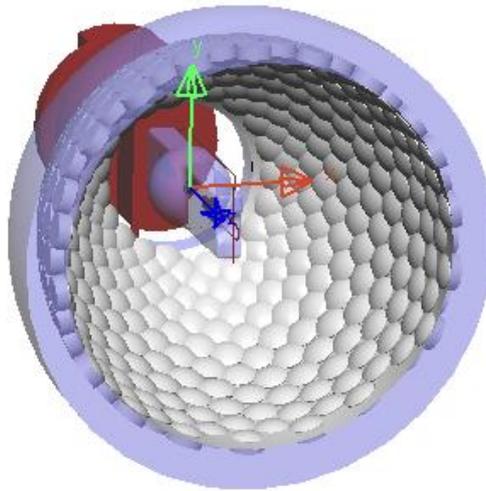
**Obr. 58:** Průběh paprsků systémem s reflektorem I.



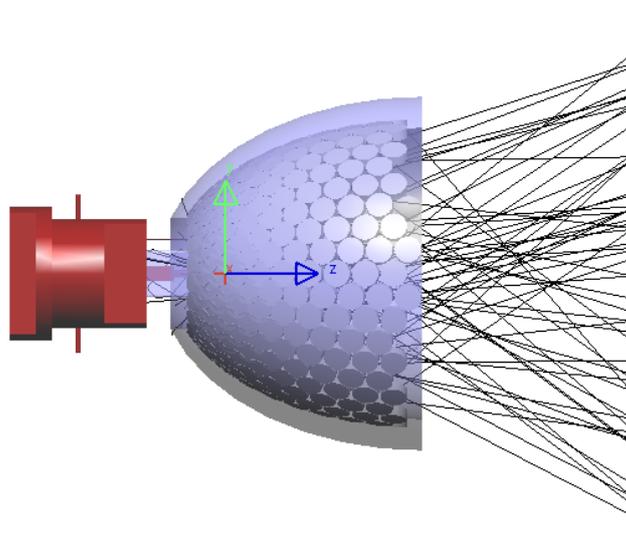
**Obr. 59:** Reflektor I - osvětlení za clonou.

Výsledky trasování s reflektorem I jsou zobrazeny na obrázcích 58 a 59. Světelný tok, který byl zaznamenán na detektoru za stínítkem, má hodnotu 77 504 lm, účinnost systému je tedy 57% a maximum zaznamenaného osvětlení je  $9,73 \cdot 10^8$  lx.

První fazetový reflektor, s označením J, využívá sférickou část válcové entity o poloměru 10 mm. Pro texturu byla zvolena šestiúhelníková síť. Jednotlivé entity jsou zasunuty do reflektoru o 3 mm. Vzhled výsledného reflektoru je zobrazen na obrázku 60. Výsledný světelný tok dopadající na rovinu detektoru je 5 242 lm, účinnost systému jsou 4% a maximální osvětlení na rovině detektoru je  $4,6 \cdot 10^7$  lx. Výsledky trasování jsou zobrazeny na obrázcích 61 a 62. Z průběhu paprsků i z výsledných zmíněných hodnot lze vidět, že povrch entit byl příliš zaoblený a došlo k výraznému rozptylu světla. Takováto textura je tedy nevhodná pro koncentraci paprsků.

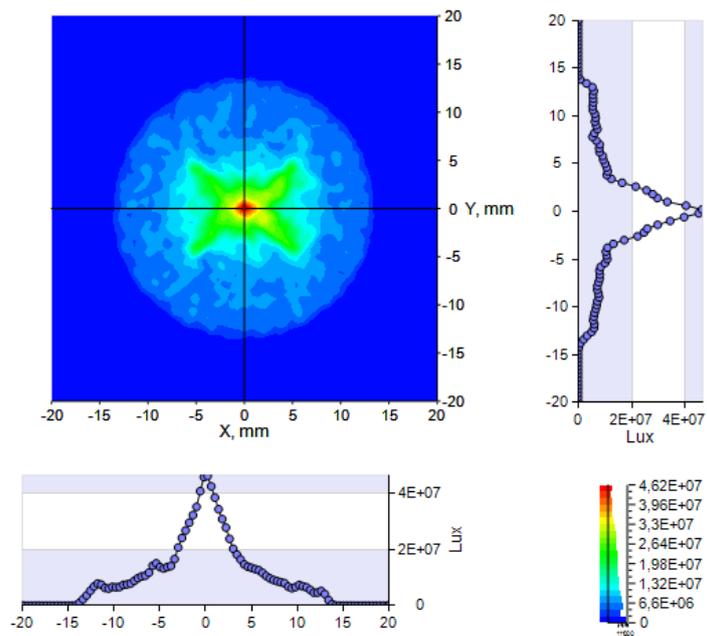


**Obr. 60:** Vzhled reflektoru J.

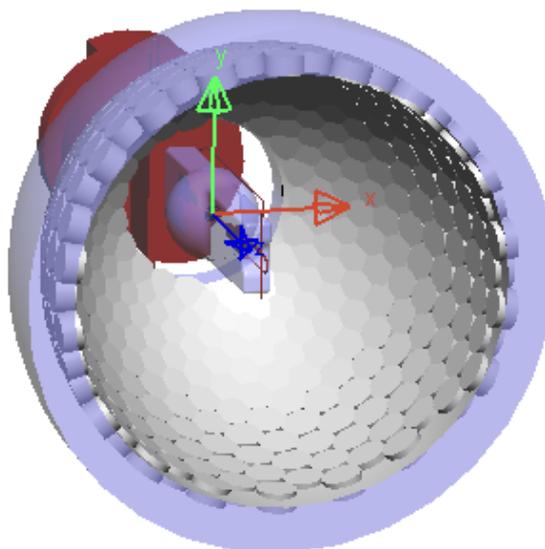


**Obr. 61:** Průběh paprsků systémem s reflektorem J.

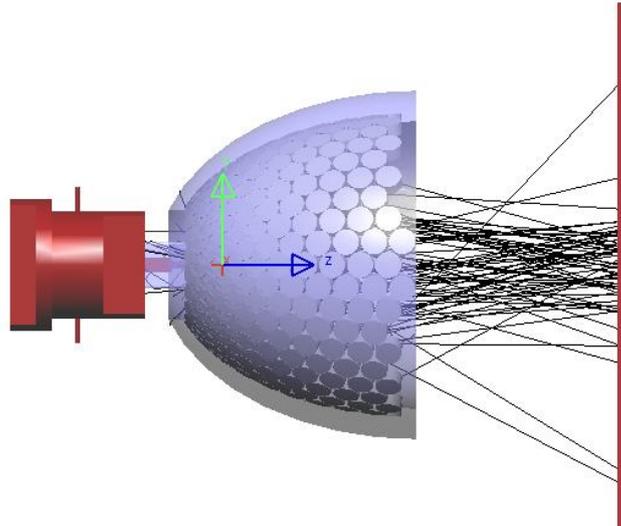
Druhý reflektor, s označením K, se 3D texturou vychází z entity použité v prvním případě. Sféra entity byla zrušena. Textura tedy vychází z válcových ploch. Stejně jako v předchozím případě je použita šestiúhelníková síť. Reflektor s texturou je zobrazen na obrázku 63. Výsledky trasování jsou zobrazeny na obrázcích 64 a 65. Výsledný tok na detektorové rovině má hodnotu 46 443 lm, účinnost systému je tedy 34%. Maximální hodnota osvětlení zaznamenaná na detektorové rovině je  $1,21 \cdot 10^8$  lx. Výsledné hodnoty jsou nižší než hodnoty předchozího reflektoru J i než hodnoty výchozího hladkého reflektoru I. Rozložení světla v otvoru je však výrazně lepší.



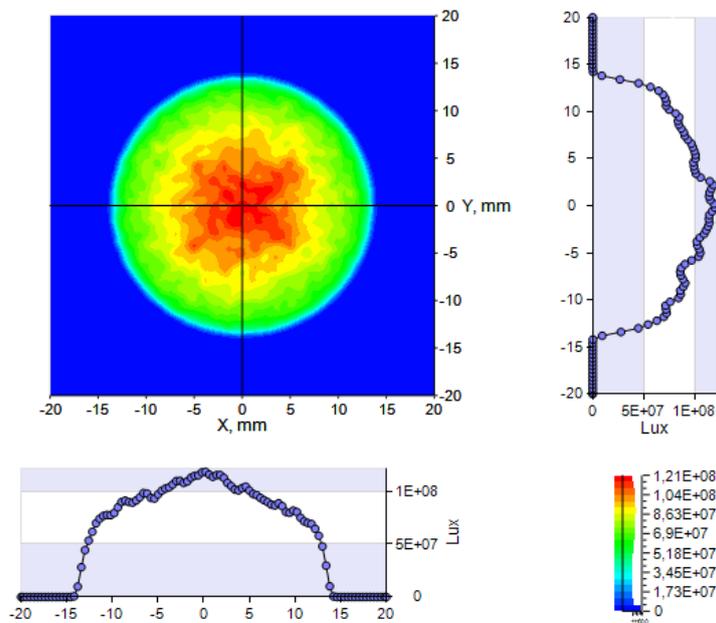
**Obr. 62:** Reflektor J – osvětlení za clonou.



**Obr. 63:** Vzhled reflektoru K.

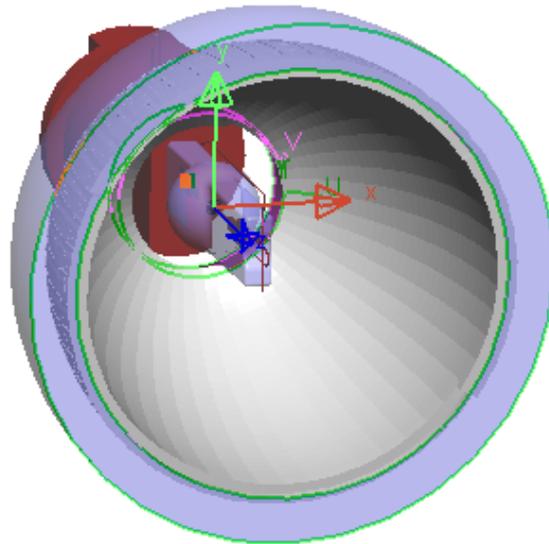


**Obr. 64:** Průběh paprsků systémem s reflektorem K.

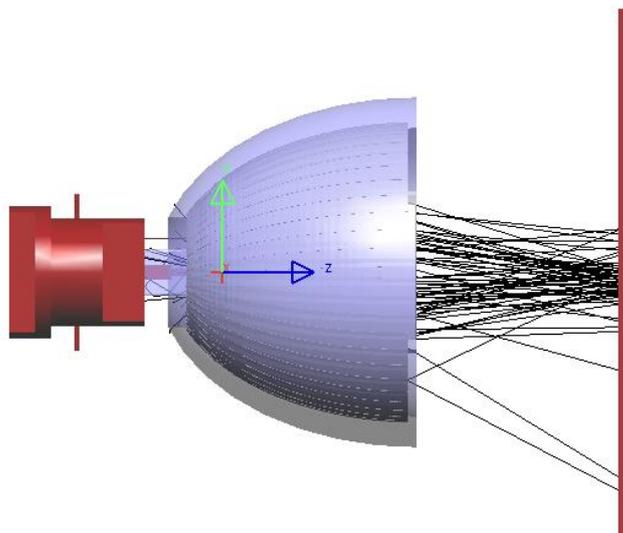


**Obr. 65:** Reflektor K – osvětlení za clonou.

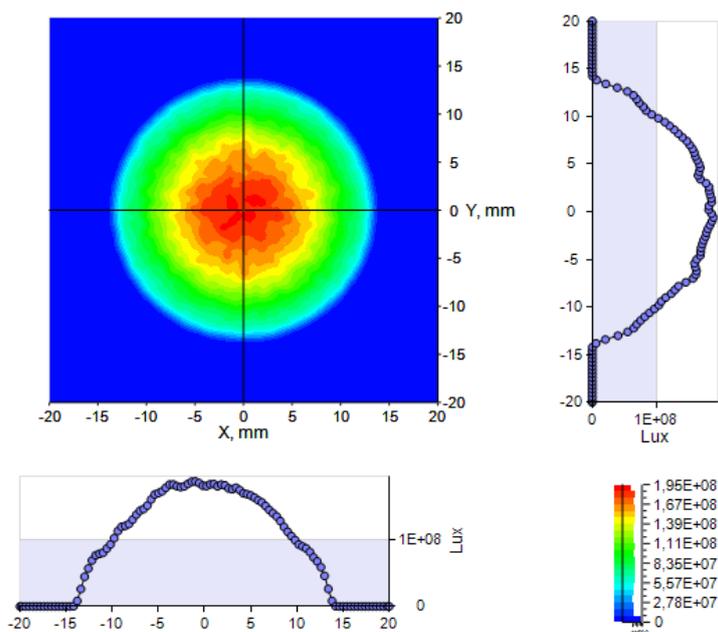
Třetí reflektor, s označením L, se 3D texturou místo kruhové entity používá kvádřovou entitu o hranách 10 mm a tloušťce 5 mm. Entita je opět rovinná bez zaoblení. Pro skládání entit byla využita pravoúhlá síť. Výsledný reflektor je zobrazen na obrázku 66. Výsledky trasování jsou zobrazeny na obrázcích 67 a 68. Hodnota dopadajícího světelného toku na detektorovou rovinu za clonou je 62 309 lm, účinnost systému je 46%. Hodnota maximálního toku zaznamenaného na detektoru je  $1,95 \cdot 10^8$  lx. Oproti výsledkům předchozího reflektoru K stoupla maximální hodnota osvětlení a také účinnost systému. Homogenita osvětlení se mírně zhoršila.



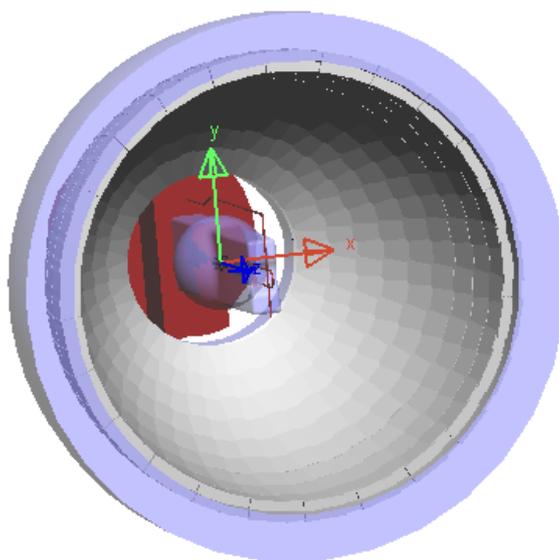
**Obr. 66:** Vzhled reflektoru L.



**Obr. 67:** Průběh paprsků systémem s reflektorem L.



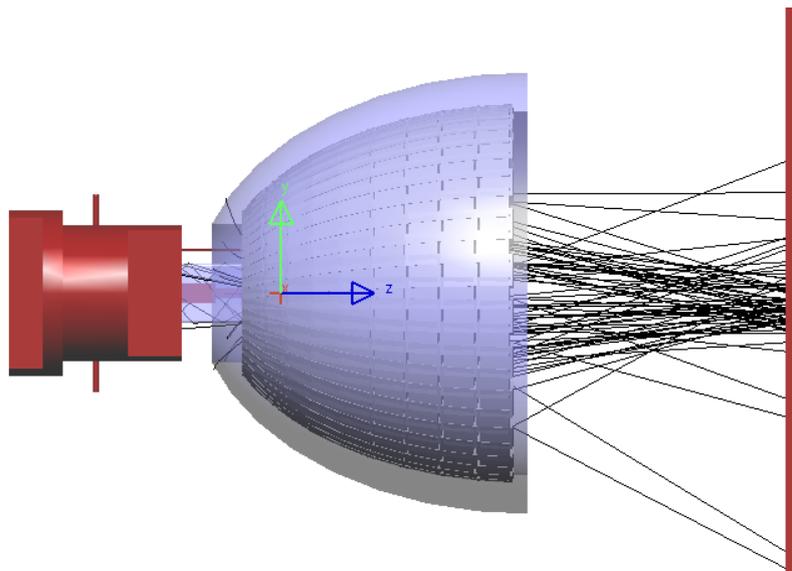
**Obr. 68:** Reflektor L - osvětlení za clonou.



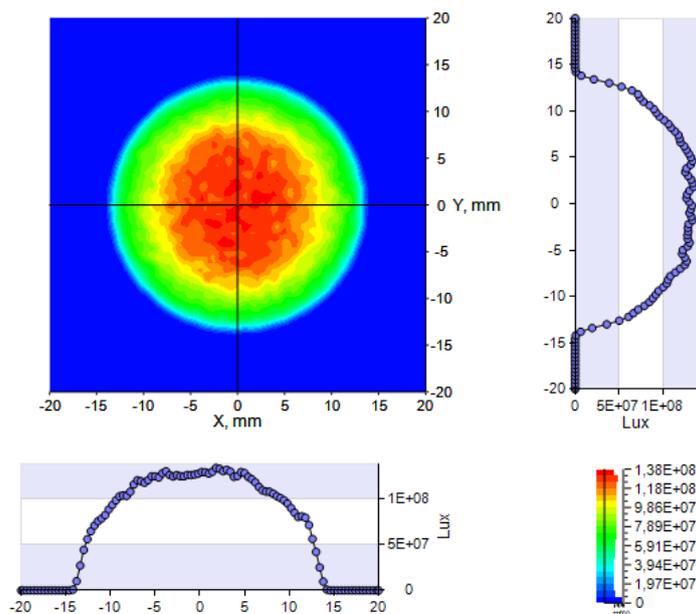
**Obr. 69:** Vzhled reflektoru M.

Další reflektor, s označením M, využívá opět kvádrou entitu s rovinným povrchem a délkou hrany 10 mm. Nyní bude použita pravoúhlá síť s posunem. Posun každé řady bude proveden ve směru osy X o 0,01 mm. Reflektor je vykreslený na obrázku 69. Výsledky trasování reflektoru jsou zobrazeny na obrázcích 70 a 71. Na detektorovou rovinu za clonou dopadl světelný tok 53 006 lm, účinnost systému je tedy 39%. Maximální hodnota zaznamenaného osvětlení je  $1,38 \cdot 10^8$  lx.

Z reflektorů vytvářených pomocí 3D textury má reflektor L největší účinnost a současně také největší maximum. Reflektor M má však nejlepší homogenitu osvětlení otvoru ve clonce.



Obr. 70: Průběh paprsků systémem s reflektorem M.

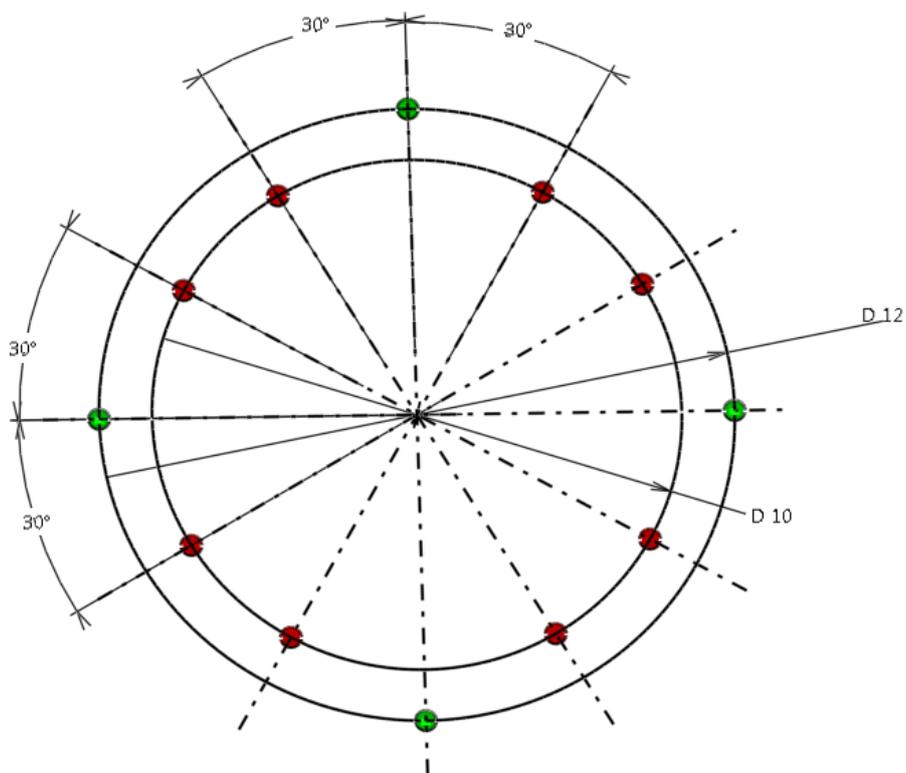


Obr. 71: Reflektor M - osvětlení za clonou.

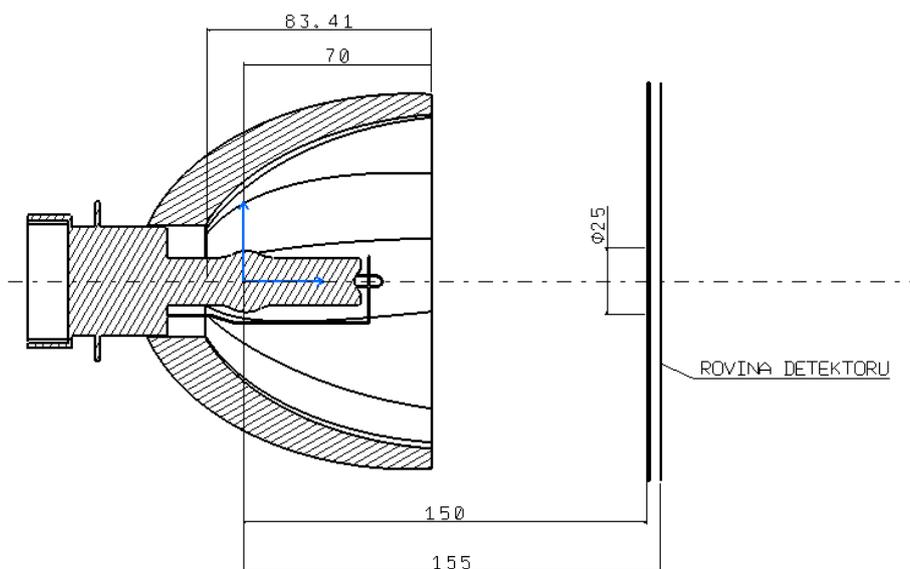
## 8.6 Vytváření reflektoru skládáním elipsoidních ploch

Poslední reflektor byl sestaven z částí několika elipsoidů. Princip metody byl popsán již dříve v kapitole 7.3. Odrazná plocha reflektoru se skládá z celkem 12 elipsoidů. Všechny elipsoidy mají první ohnisko v počátku souřadnic a druhé ohnisko v rovině clony vzdálené 150 mm od světelného zdroje. Poloha druhých ohnisek v rovině clony je zobrazena na obrázku 72. Čtyři elipsoidy mají ohniskovou vzdálenost 151,5 mm a hlavní poloosu 95 mm. Druhá ohniska těchto elipsoidů jsou od optické osy vzdáleny 12 mm a na obrázku 72 jsou vyznačeny zelenými kolečky. Zbýlých osm elipsoidů má ohniskovou vzdálenost 150,5 mm a hlavní poloosu 95 mm. Druhá ohniska těchto elipsoidů jsou od optické osy vzdáleny 10 mm a na obrázku 72 jsou vyznačeny červenými kolečky. Elipsoidy jsou rozloženy s rotační symetrií

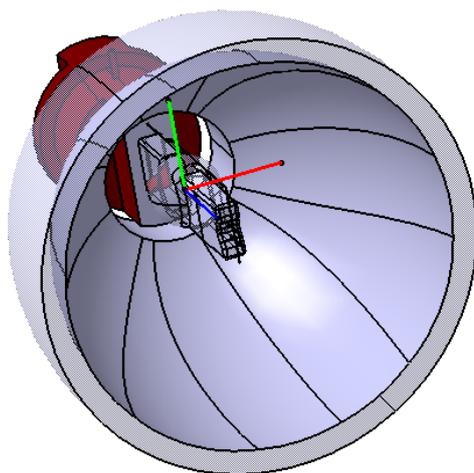
po 30°. Výsledný reflektor je pro přehlednost označen písmenem N. Základní rozměry sestavy s reflektorem N jsou zobrazeny na obrázku 73. Náčres reflektoru je zobrazen na obrázku 74.



**Obr. 72:** Rozvržení poloh ohnisek elipsoidů.

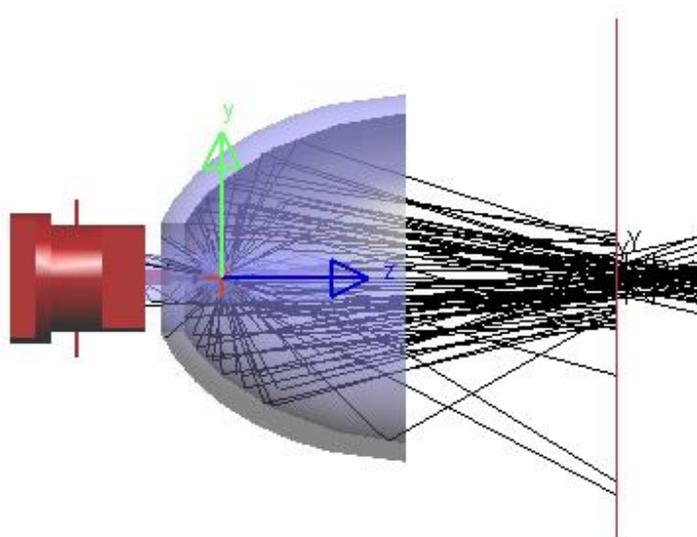


**Obr. 73:** Náčres rozměrů reflektoru N.

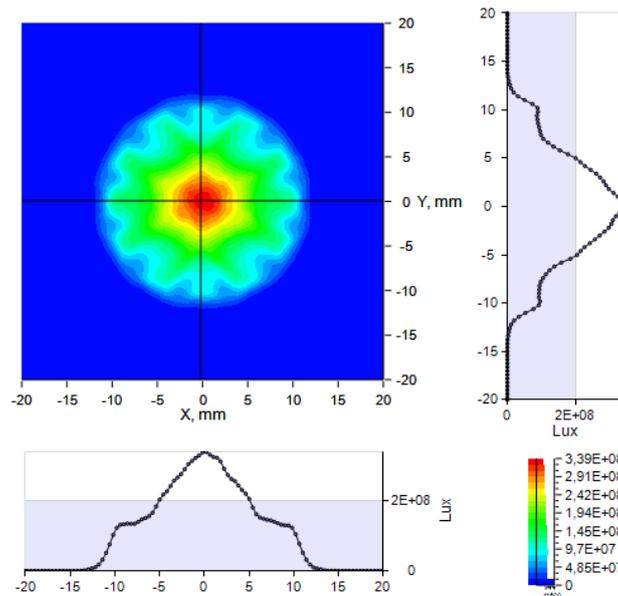


**Obr. 74:** Zobrazení reflektoru N.

Výsledný průběh paprsků systémem je zobrazen na obrázku 75. Výsledné osvětlení na rovině detektoru za clonou je zobrazeno na obrázku 76. Světelný tok zaznamenaný na detektoru je 57 624 lm, účinnost systému je tedy 43% a maximální zaznamenané osvětlení je  $3,39 \cdot 10^8$  lx.



**Obr. 75:** Průběh paprsků systémem s reflektorem N.



**Obr. 76:** Osvětlení na detektoru za clonou při použití reflektoru N.

### 8.7 Výsledné zhodnocení všech reflektorů

Výsledné hodnoty z trasování všech reflektorů jsou shrnuty v tabulce 3. Ze všech reflektorů má reflektor B nejvyšší účinnost systému, má však současně nejhorší homogenitu osvětlení. Dobrou homogenitu osvětlení na detektoru mají dle kritéria poklesu hodnot na okraji zorného pole reflektory E, F, G, H, K a M.

Označení reflektoru	Stručný popis reflektoru	Hloubka, průměr reflektoru [mm]	Světelný tok [lm]	Účinnost [%]	Maximum osvětlení [lx]	Okrajové osvětlení [lx]	Pokles osvětlení na kraji zorného pole [%]
A	hladký, elipsoidní	85 Ø 110	75428	56	$9,09 \cdot 10^8$	$3,64 \cdot 10^7$	96
B	hladký, elipsoidní	90 Ø 124	88930	66	$1,27 \cdot 10^9$	$5,08 \cdot 10^7$	96
C	hladký	108 Ø 118	46404	34	$2,59 \cdot 10^8$	$4,14 \cdot 10^7$	84
D	fazetový	40 Ø 100	26719	20	$2,04 \cdot 10^8$	$2,45 \cdot 10^7$	88
E	fazetový	84 Ø 110	54314	40	$1,21 \cdot 10^8$	$8,11 \cdot 10^7$	33
F	fazetový	84 Ø 110	55574	41	$1,33 \cdot 10^8$	$7,71 \cdot 10^7$	42
G	fazetový	84 Ø 110	56022	41	$1,30 \cdot 10^8$	$8,19 \cdot 10^7$	37
H	fazetový	84 Ø 110	54516	40	$1,28 \cdot 10^8$	$7,17 \cdot 10^7$	44
I	hladký	85 Ø 110	77504	57	$9,73 \cdot 10^8$	$3,89 \cdot 10^7$	96
J	se 3D texturou	85 Ø 110	5242	4	$4,60 \cdot 10^7$	$5,52 \cdot 10^6$	88
K	se 3D texturou	85 Ø 110	46443	34	$1,21 \cdot 10^8$	$6,29 \cdot 10^7$	48
L	se 3D texturou	85 Ø 110	62309	46	$1,95 \cdot 10^8$	$5,66 \cdot 10^7$	71
M	se 3D texturou	85 Ø 110	53006	39	$1,38 \cdot 10^8$	$7,45 \cdot 10^7$	46
N	složené elipsoidy	83 Ø 126	57624	43	$3,39 \cdot 10^8$	$3,39 \cdot 10^6$	99

**Tab. 3:** Souhrn výsledných hodnot trasovaných reflektorů.

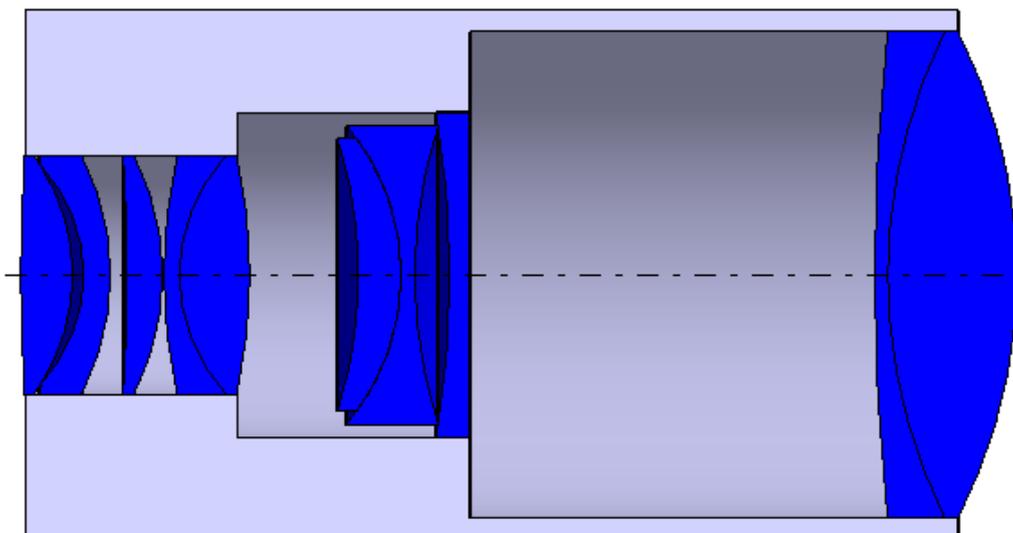
## 9 Zhodnocení vybraného reflektoru s projekčním objektivem

Navrhované reflektory v předchozí kapitole byly vytvářeny v návaznosti na diplomovou práci Návrh a optimalizace varifokálního objektivu [17]. Ve zmíněné diplomové práci byl vyvinut varifokální objektiv. Výsledný varifokální objektiv byl dle hodnot z diplomové práce vykreslen v programu LightTools. Optické vlastnosti objektivu jsou zobrazeny na obrázku 77 a objektiv vykreslený v programu LightTools je zobrazen na obrázku 78.

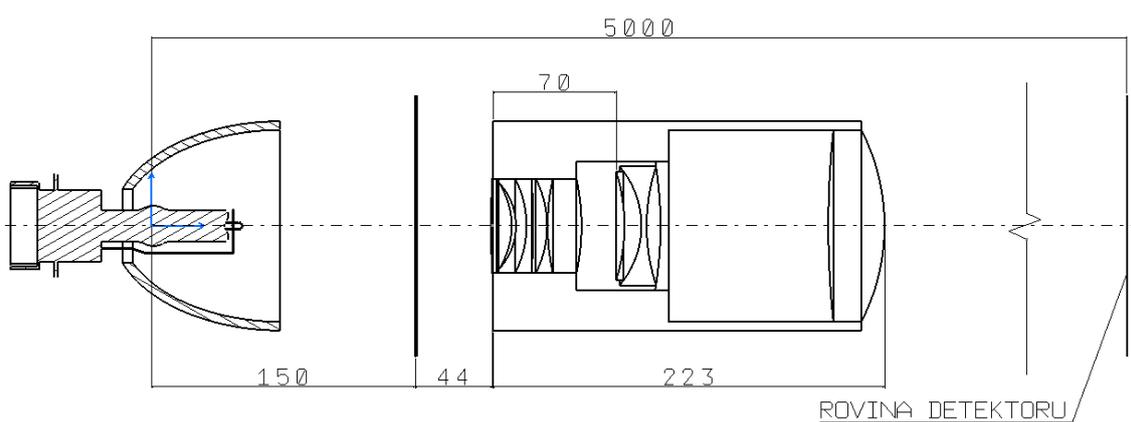
Surf: Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ		Infinity	Infinity		Infinity
1		Infinity	0,000		0,0
2	čočka 1	124,907	29,000	N-BK7	55,0
3	čočka 2	-120,825	3,000	F7	55,0
4		-519,713	110,939		55,0
5	čočka 3	Infinity	4,500	N-LAF3	37,0
6		224,364	7,900		33,9
7	čočka 4	-111,237	3,000	N-SK16	34,0
8	čočka 5	53,198	9,600	SF6	33,0
9		104,175	10,455		31,0
10	čočka 6	126,319	15,800	N-BK7	27,0
11	čočka 7	-40,144	3,500	SF1	27,0
12		-124,394	0,300		27,0
13	čočka 8	60,139	8,000	N-SK16	27,0
14	distance 1	413,553	3,700		27,0
15	čočka 9	59,521	6,000	SF1	27,0
16	distance 2	36,576	2,500		25,0
17	čočka 10	46,144	11,700	N-BAK4	27,0
18		-470,038	37,106		27,0
IMA		Infinity	-		12,0

**Obr. 77:** Parametry objektivu. Upraveno podle [17].

Na obrázku 79 jsou vykresleny základní rozměry celé soustavy při ostření objektivu na vzdálenost 5 m. Detektor osvětlení je umístěn do roviny ostrosti, tedy do vzdálenosti 5 m podél optické osy.



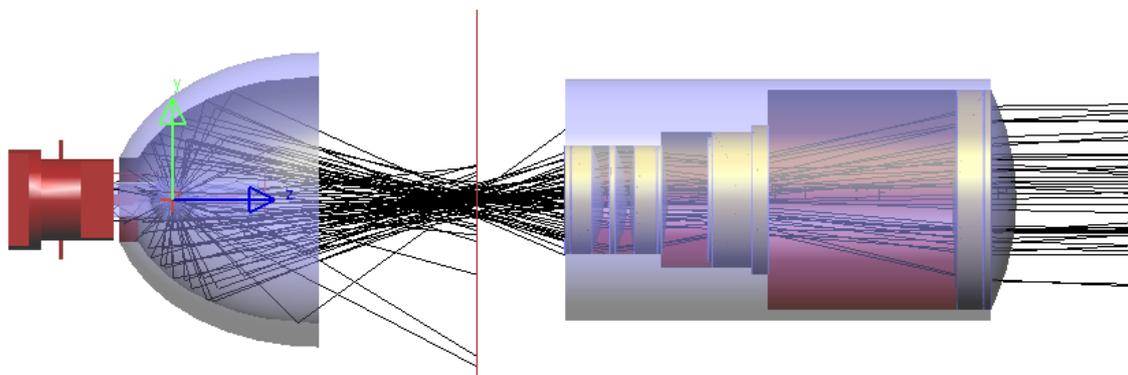
**Obr. 78:** Objektiv vykreslený v programu LightTools.



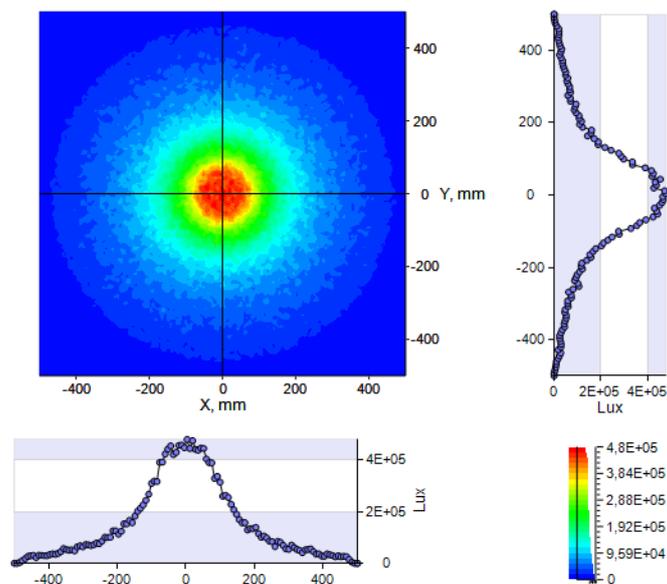
**Obr. 79:** Náčrt základních rozměrů soustavy pro ostření objektivu na 5 m.

### 9.1 Ověření funkčnosti vybraných reflektorů s objektivem

Podle výsledných hodnot z kapitoly 8 bylo vybráno pět reflektorů pro otestování systému společně s objektivem.



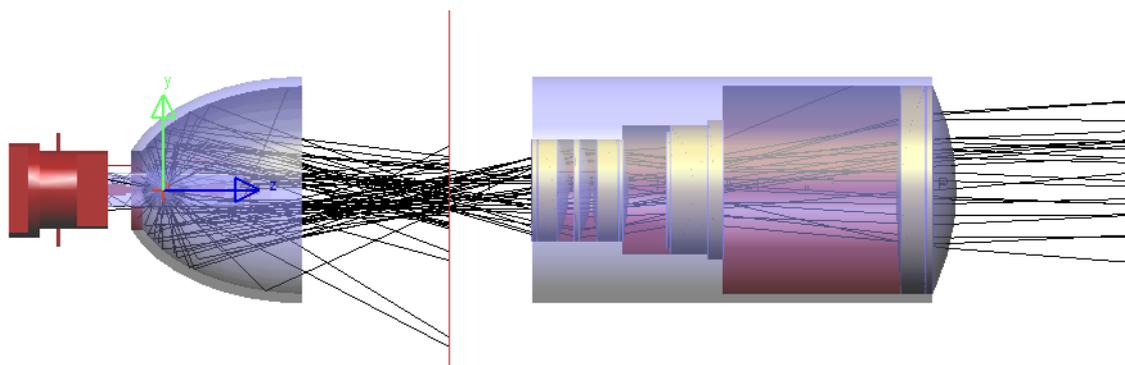
**Obr. 80:** Průchod paprsků systémem s reflektorem B.



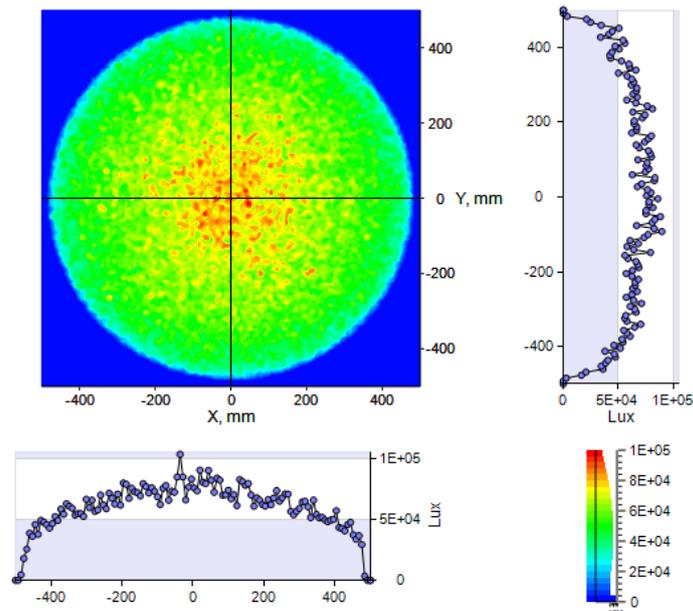
**Obr. 81:** Graf osvětlení za objektivem s reflektorem B.

Jako první byl vybrán hladký reflektor B. Tento reflektor byl vybrán pro nejvyšší účinnost. Průběh paprsků systémem je zobrazen na obrázku 80. Výsledný graf osvětlení v rovině detektoru 5 m za objektivem je zobrazen na obrázku 81. Hodnota světelného toku za systémem je 49 399 lm, účinnost celého systému je 37%. Maximální hodnota osvětlení za objektivem je  $4,80 \cdot 10^5$  lx.

Jako druhý reflektor byl vybrán fazetový reflektor E, který byl vybrán pro svou homogenitu osvětlení za clonou. Paprsky průchozí celým systémem jsou zobrazeny na obrázku 82 a výsledný graf osvětlení je zobrazen na obrázku 83. Dopadající světelný tok na detektor za objektivem má hodnotu 32 229 lm, účinnost systému je 24%. Maximální hodnota osvětlení na detektoru je  $1,05 \cdot 10^5$  lx.

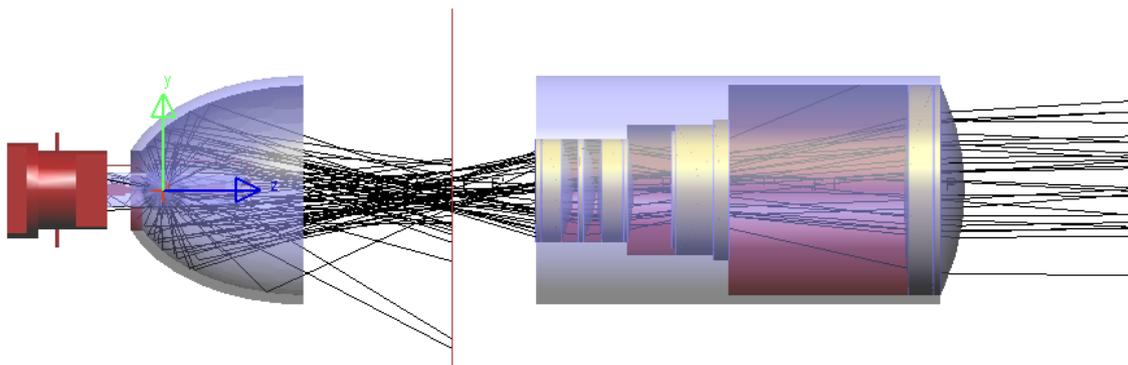


**Obr. 82:** Průchod paprsků systémem s reflektorem E.

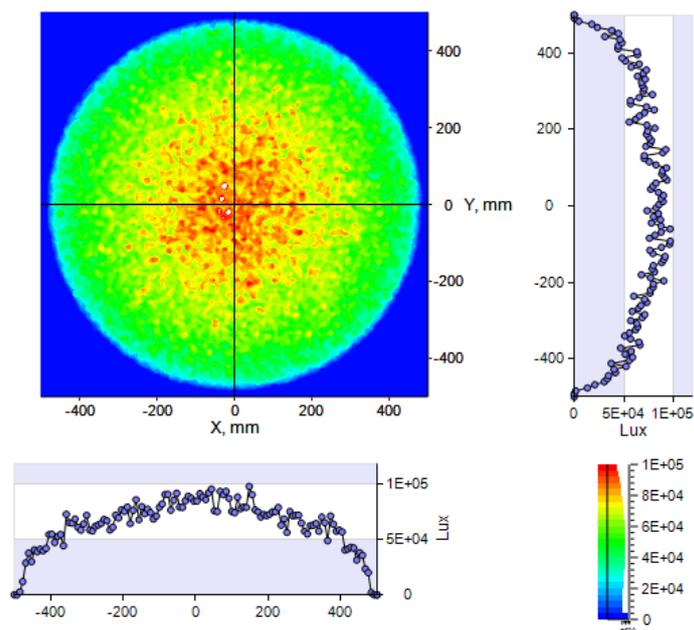


**Obr. 83:** Graf osvětlení za objektivem s reflektorem E.

Jako třetí reflektor zvolený reflektor je fazetový reflektor G. Tento reflektor byl vybrán pro dobrou homogenitu a současně nejvyšší maximální osvětlení v kapitole 8.4. Zobrazení systému i s trasovanými paprsky je zobrazeno na obrázku 84 a výsledný graf osvětlení je zobrazen na obrázku 85. Celkový světelný tok, který prošel systémem, má hodnotu 34 095 lm, účinnost systému je tedy 25%. Maximální hodnota osvětlení v rovině detektoru je  $1,19 \cdot 10^5$  lx. Reflektor G má tedy větší účinnost i maximum než reflektor E.

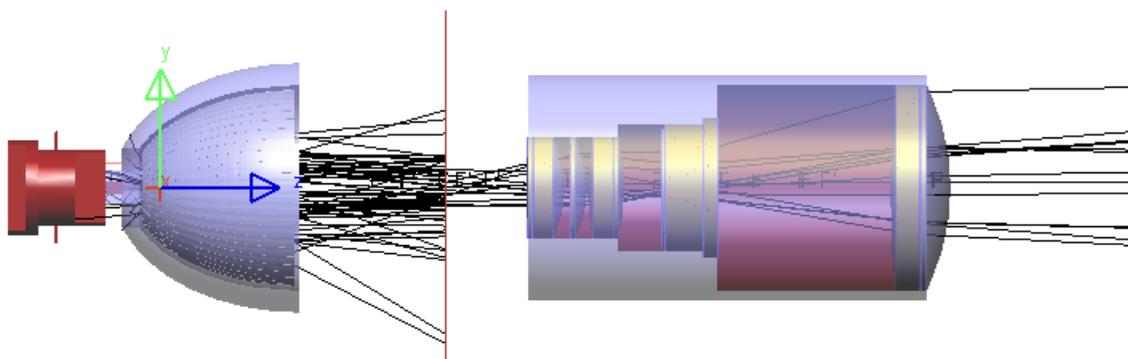


**Obr. 84:** Průchod paprsků systémem s reflektorem G.

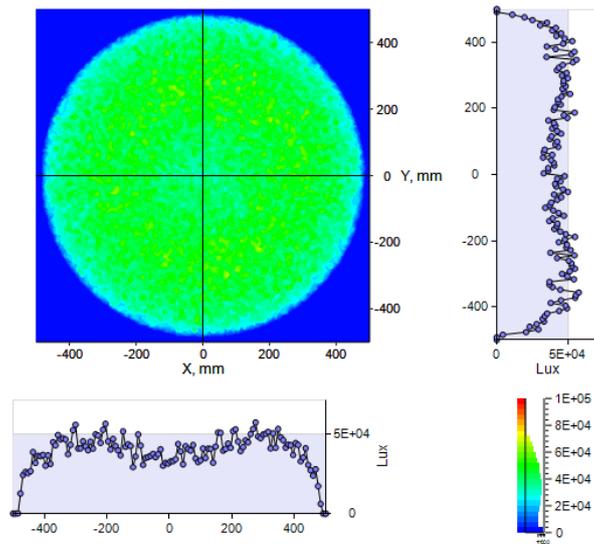


**Obr. 85:** Graf osvětlení za objektivem s reflektorem G.

Čtvrtý vybraný reflektor je reflektor L. Jde o reflektor se 3D texturou, která vychází ze čtvercové entity. Průchod paprsků systémem je zobrazen na obrázku 86 a graf osvětlení na rovině detektoru za objektivem je zobrazen na obrázku 87. Světelný tok dopadající na rovinu detektoru za objektivem je 23 694 lm, účinnost systému je 18%. Hodnota maximálního osvětlení je  $3,97 \cdot 10^4$  lx. Jde tedy zatím o nejnižší účinnost i maximum osvětlení z trasovaných reflektorů společně s objektivem.

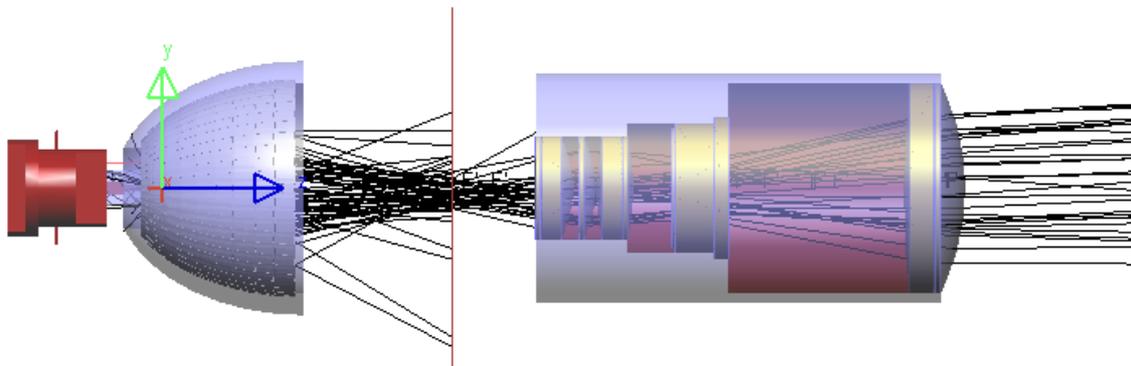


**Obr. 86:** Průchod paprsků systémem s reflektorem L.

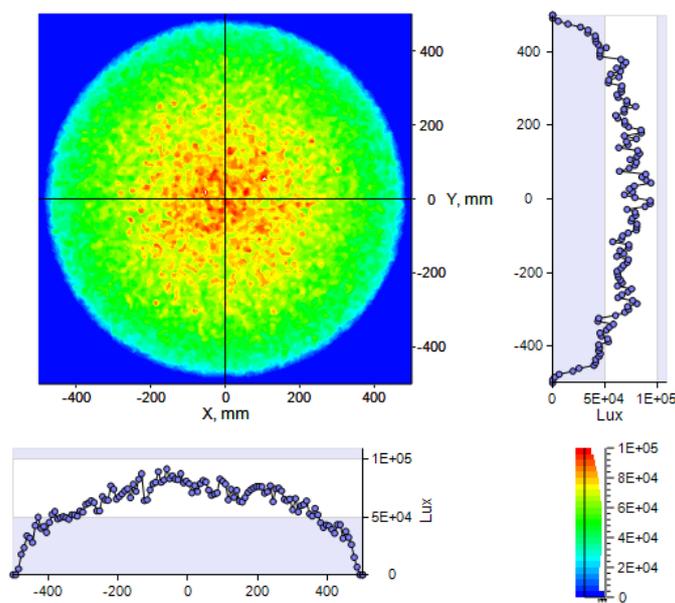


**Obr. 87:** Graf osvětlení za objektivem s reflektorem L.

Poslední reflektor testovaný s objektivem je reflektor M. Průchod paprsků systémem je zobrazen na obrázku 88. Graf osvětlení na detektoru za objektivem je zobrazen na obrázku 89. Celkový světelný tok zaznamenaný na detektorové rovině nabývá hodnoty 32 743 lm, účinnost systému je 24%. Hodnota maximálního osvětlení na detektorové rovině je  $6,949 \cdot 10^4$  lx.



**Obr. 88:** Průchod paprsků systémem s reflektorem M.



**Obr. 89:** Graf osvětlení za objektivem s reflektorem M.

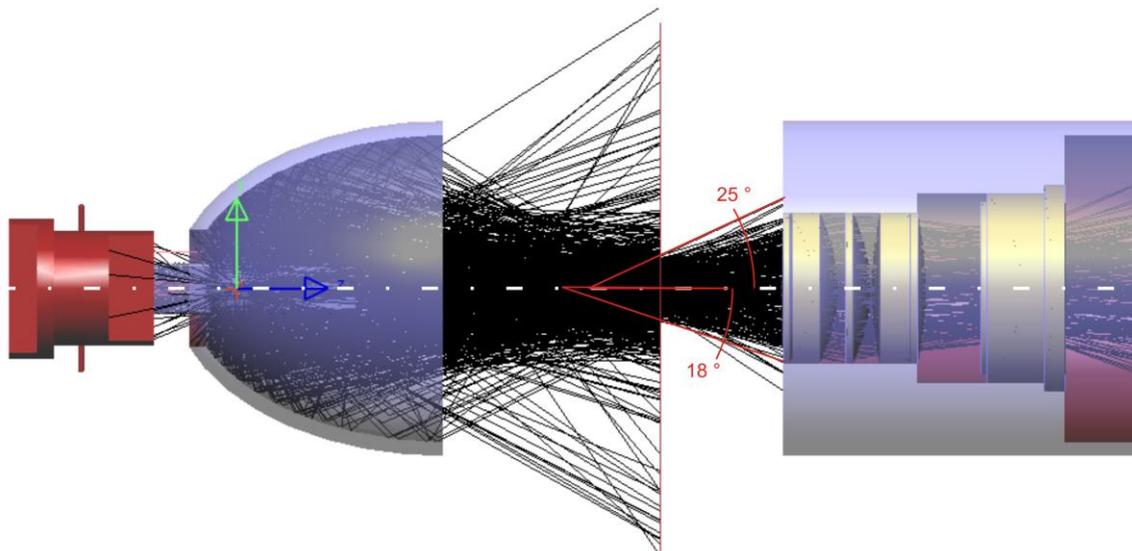
Souhrn všech získaných hodnot z trasování je uveden v tabulce 4. Reflektor B dosáhl nejvyšší účinnosti celkového systému a současně nejvyššího maxima osvětlení, má však nejhorší homogenitu osvětlení na detektoru ve vzdálenosti 5 m od objektivu. Dobrou účinnost a současně dobrou homogenitu osvětlení má reflektor G. Pro další zkoumání bude uvažován pouze reflektor G.

Označení reflektoru	Stručný popis reflektoru	Hloubka, průměr reflektoru [mm]	Světelný tok [lm]	Účinnost [%]	Maximum osvětlení [lx]
B	hladký, elipsoidní	90, Ø124	49399	37	$4,80 \cdot 10^5$
E	fazetový	84, Ø110	32229	24	$1,05 \cdot 10^5$
G	fazetový	84, Ø110	34095	25	$1,19 \cdot 10^5$
L	se 3D texturou	85, Ø110	23690	18	$7,17 \cdot 10^4$
M	se 3D texturou	85, Ø110	32673	24	$1,09 \cdot 10^5$

**Tab. 4:** Souhrn výsledných hodnot trasovaných reflektorů v kombinaci s objektivem

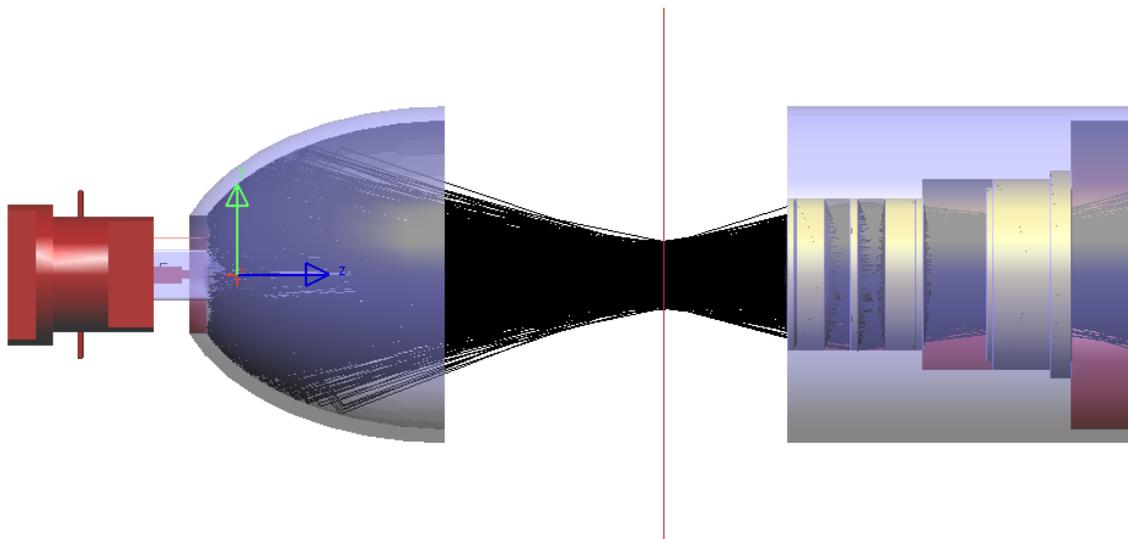
## 9.2 Porovnání úhlové apertury

V programu LightTools byla proměřena úhlová apertura objektivu v porovnání s vybraným reflektorem. Apertura objektivu je  $18^\circ$  a dosažená úhlová apertura reflektoru je  $25^\circ$ . Náhled paprsků s vyznačenými aperturními úhly je zobrazen na obrázku 90. Reflektor má větší aperturu, dochází tedy ke ztrátě světla. Ztráty světla při vstupu světelného svazku do objektivu nejsou vysoké.

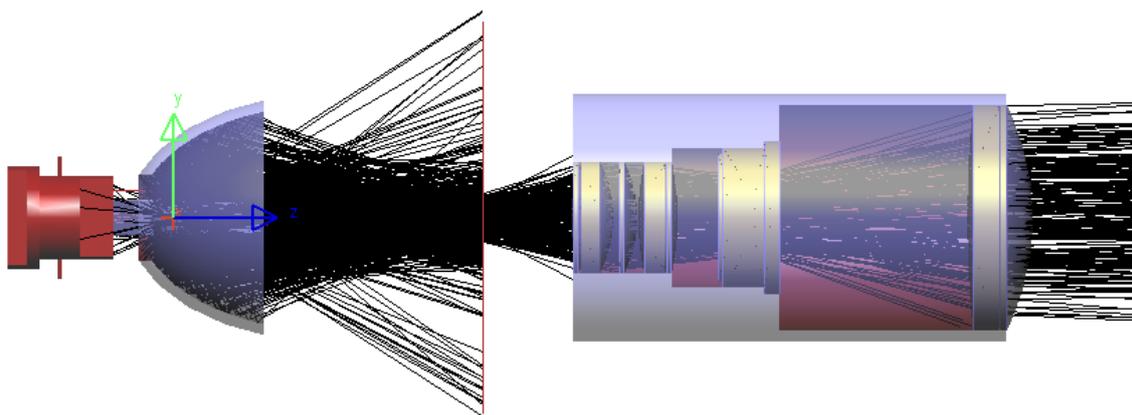


**Obr. 90:** Ukázka aperturních úhlů.

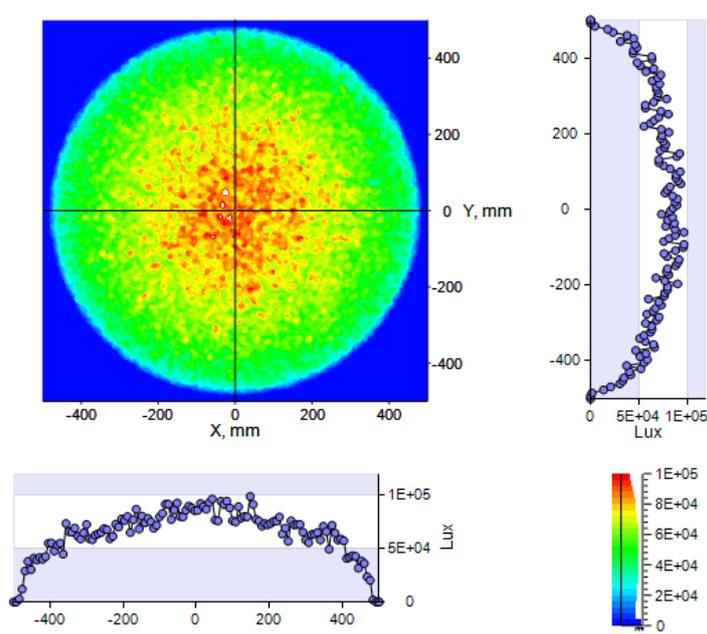
Na obrázku 91 jsou zobrazeny pouze paprsky, které systémem prochází. Z obrázku jde vidět, že okrajová část reflektoru neodráží žádné paprsky jdoucí přes celý optický systém. Může se tedy při výrobě reflektoru ušetřit jeho zkrácením. Reflektor byl zkrácen o 29,5 mm ve směru optické osy. Výsledný průchod paprsků zkráceným reflektorem je zobrazen na obrázku 92. Výsledný graf osvětlení zkráceného reflektoru je zobrazen na obrázku 88. Celkový tok zaznamenaný na detektoru za objektivem je 34 092 lm, účinnost systému je tedy 25%. Maximální zaznamenaná hodnota osvětlení na detektoru je  $1,19 \cdot 10^5$  lx. Výsledné hodnoty se po zkrácení nijak výrazně nezměnily, zkrácení reflektoru tedy nemá žádný účinek na kvalitu zobrazení.



**Obr. 91:** Zobrazení paprsků průchozích systémem.



**Obr. 92:** Průchod paprsků zkráceným reflektorem.



**Obr. 93:** Graf osvětlení za objektivem se zkráceným reflektorem.

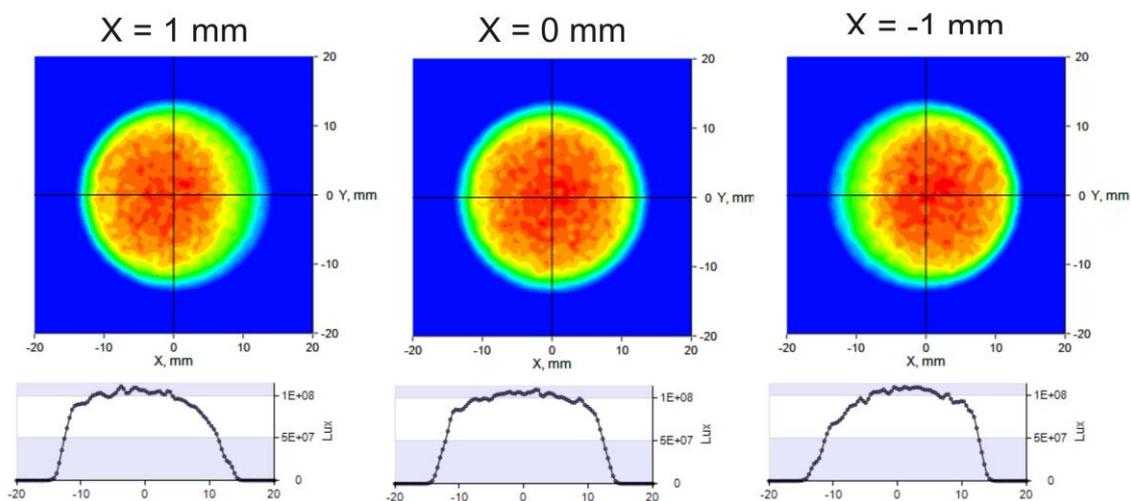
### 9.3 Toleranční analýzy

Aby mohly být vymezeny výrobní vůle, je třeba provést analýzu posunu zdroje a posunu clony. Pro všechny analýzy byl trasován zkrácený reflektor G.

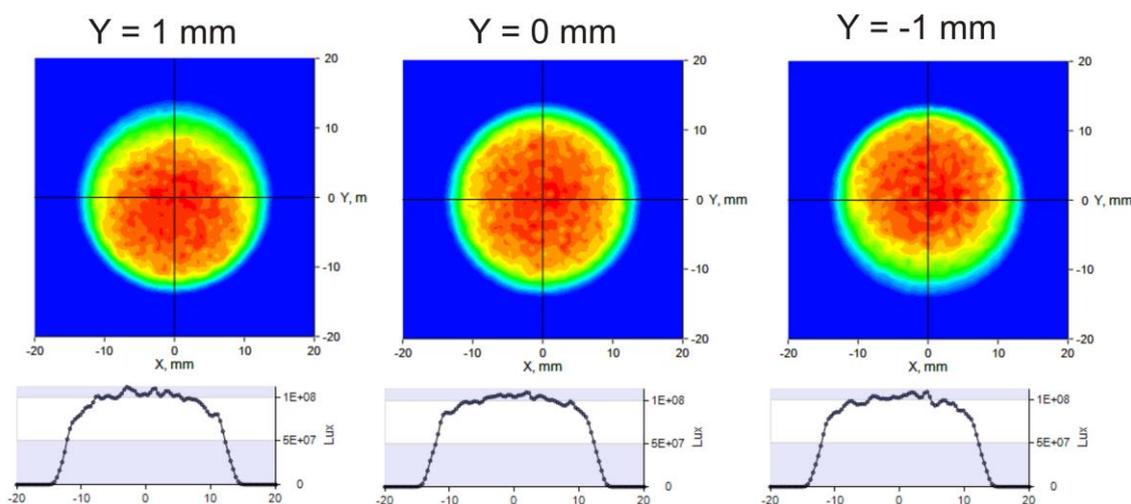
První byla provedena analýza posunu zdroje vůči reflektoru. Při trasování nebyl uvažován objektiv. Detektorová rovina byla umístěna do vzdálenosti 155 mm od zdroje. Posun zdroje byl prováděn ve třech směrech, v ose  $z$ , která je totožná s optickou osou, a v osách  $x$  a  $y$  v rovině kolmé na optickou osu. Výsledné hodnoty jsou zobrazeny v tabulce 5. Pro posuny v osách  $x$  a  $y$  jsou zobrazeny grafy osvětlení na obrázcích 94 a 95. Z grafů jde vidět, že homogenita osvětlení se v daném směru zhorší. Ve směru optické osy (osy  $z$ ) homogenita zůstává stejná, dochází jen k poklesu světelného toku a maxima osvětlení. Účinnost ve všech směrech klesla maximálně o 2%, tato ztráta je zanedbatelná.

Souřadnicový posun [mm]			Světelný tok [lm]	Účinnost [%]	Maximum osvětlení [lx]
X	Y	Z			
0	0	0	46675	35	$1,14 \cdot 10^8$
1	0	0	44295	33	$1,14 \cdot 10^8$
-1	0	0	44289	33	$1,13 \cdot 10^8$
0	1	0	44159	33	$1,12 \cdot 10^8$
0	-1	0	44220	33	$1,12 \cdot 10^8$
0	0	1	46110	34	$1,13 \cdot 10^8$
0	0	-1	43930	33	$1,07 \cdot 10^8$

**Tab. 5:** Výsledky analýzy posunu zdroje.



**Obr. 94:** Grafy osvětlení analýzy zdroje ve směru osy x.



**Obr. 95:** Grafy osvětlení analýzy zdroje ve směru osy y.

Další byla provedena analýza posunu clony ve směru optické osy. Analýza byla provedena za stejných podmínek jako v předchozím případě. Výsledné hodnoty jsou

zobrazeny v souhrnné tabulce 6. Výchozí hodnota má souřadnici  $Z = 150$  mm. Posunem clony nevzniká výrazný úbytek účinnosti vůči výchozí poloze, účinnost systému klesne maximálně o 1%.

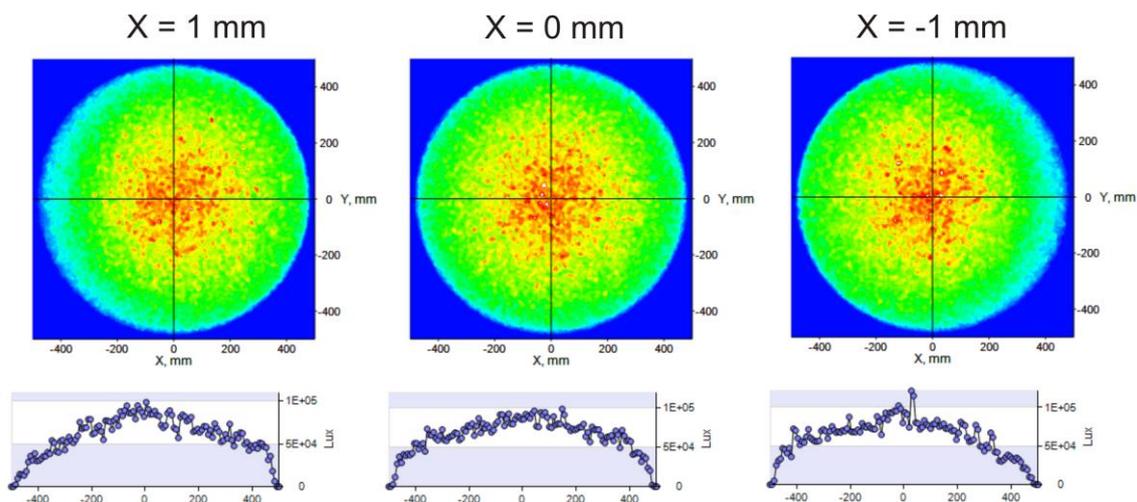
Z souřadnice [mm]	Světelný tok [lm]	Účinnost [%]	Maximum osvětlení [lx]
153	45637	34	$1,11 \cdot 10^8$
152	45989	34	$1,11 \cdot 10^8$
151	46338	34	$1,16 \cdot 10^8$
<b>150</b>	<b>46675</b>	<b>35</b>	<b><math>1,14 \cdot 10^8</math></b>
149	47005	35	$1,15 \cdot 10^8$
148	47318	35	$1,17 \cdot 10^8$
147	47600	35	$1,18 \cdot 10^8$

**Tab. 6:** Výsledky analýzy posunu clony.

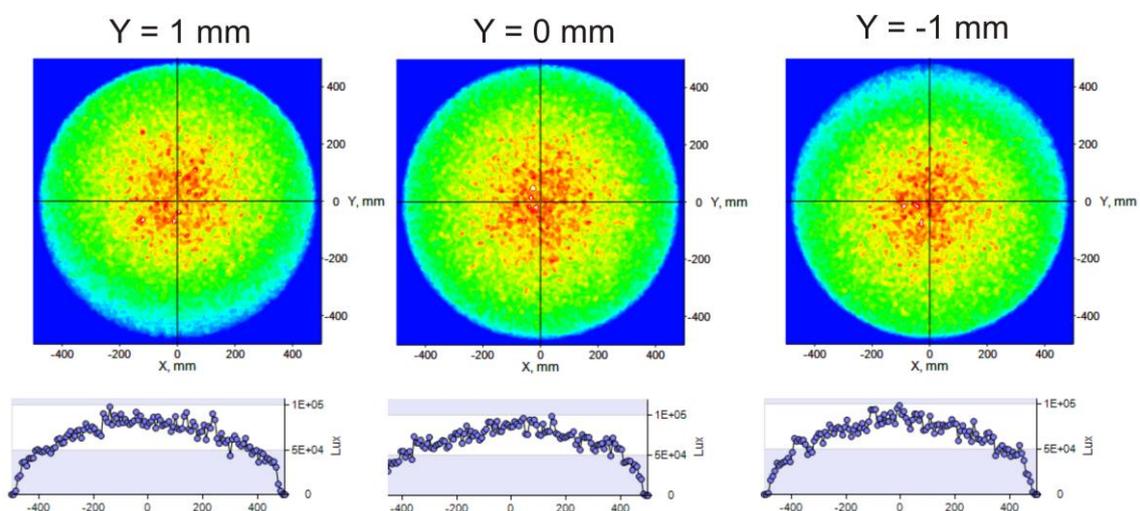
Jako další byla provedena analýza posunu zdroje ve všech osách, tentokrát s přítomností objektivu. Sestava byla uspořádána podle hodnot z obrázku 79. Objektiv byl zaostřen na vzdálenost 5 m, kam byla umístěna detektorová rovina. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 7. Grafy osvětlení posunů v osách x a y jsou zobrazeny na obrázcích 96 a 97. Z výsledků tabulky lze vidět, že při posunu o 1 mm do jakéhokoli směru, se celková účinnost snižuje maximálně o 1%. Ztráty při posuvu zdroje jsou zanedbatelné. Potřebná přesnost uložení zdroje je tedy  $\pm 1$  mm.

Souřadnicový posun [mm]			Světelný tok [lm]	Účinnost [%]	Maximum osvětlení [lx]
X	Y	Z			
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>34092</b>	<b>25</b>	<b><math>1,19 \cdot 10^5</math></b>
1	0	0	32161	24	$1,1 \cdot 10^5$
-1	0	0	32178	24	$1,22 \cdot 10^5$
0	1	0	32091	24	$1,07 \cdot 10^5$
0	-1	0	32135	24	$1,06 \cdot 10^5$
0	0	1	32264	24	$1,19 \cdot 10^5$
0	0	-1	33013	24	$1,11 \cdot 10^5$

**Tab. 7:** Výsledné hodnoty analýzy zdroje s objektivem zaostřeným do 5 m.



**Obr. 96:** Grafy osvětlení analýzy zdroje ve směru osy x s objektivem zaostřeným do 5 m.



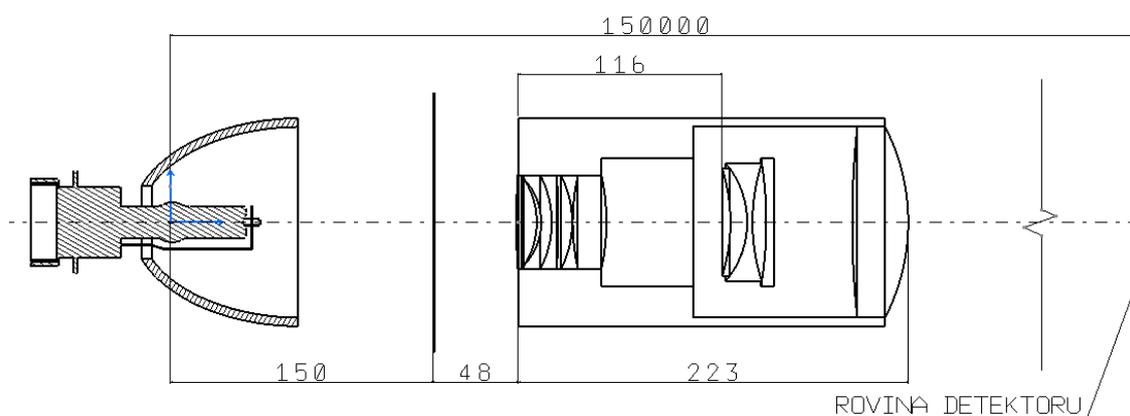
**Obr. 97:** Grafy osvětlení analýzy zdroje ve směru osy y s objektivem zaostřeným do 5 m.

Další analýza ověřuje vliv posunu clony ve směru optické osy v sestavě s objektivem zaostřeným do vzdálenosti 5 m. Výsledky trasování jsou zobrazeny v tabulce 8. Výchozí pozice clony je 150 mm. Na každou stranu byly provedeny tři posuny po 1 mm. Z výsledků v tabulce lze vidět, že účinnost ani maximální hodnota osvětlení se s posunem nemění, dochází pouze k malým rozdílům v hodnotách světelného toku.

Poslední dvě analýzy budou trasovány s objektivem zaostřeným do 150 m. Náčrt rozměrů soustavy je zobrazen na obrázku 98. Detektorová rovina je umístěna do vzdálenosti 150 m od světelného zdroje. Výsledky analýzy posunu zdroje v souřadných osách jsou uvedeny v tabulce 9. Výsledná účinnost klesá maximálně o 2%.

Z souřadnice [mm]	Světelný tok [lm]	Účinnost [%]	Maximum osvětlení [lx]
153	34121	25	$1,19 \cdot 10^5$
152	34133	25	$1,19 \cdot 10^5$
151	34122	25	$1,19 \cdot 10^5$
<b>150</b>	<b>34091</b>	<b>25</b>	<b><math>1,19 \cdot 10^5</math></b>
149	34037	25	$1,19 \cdot 10^5$
148	33970	25	$1,19 \cdot 10^5$
147	33865	25	$1,19 \cdot 10^5$

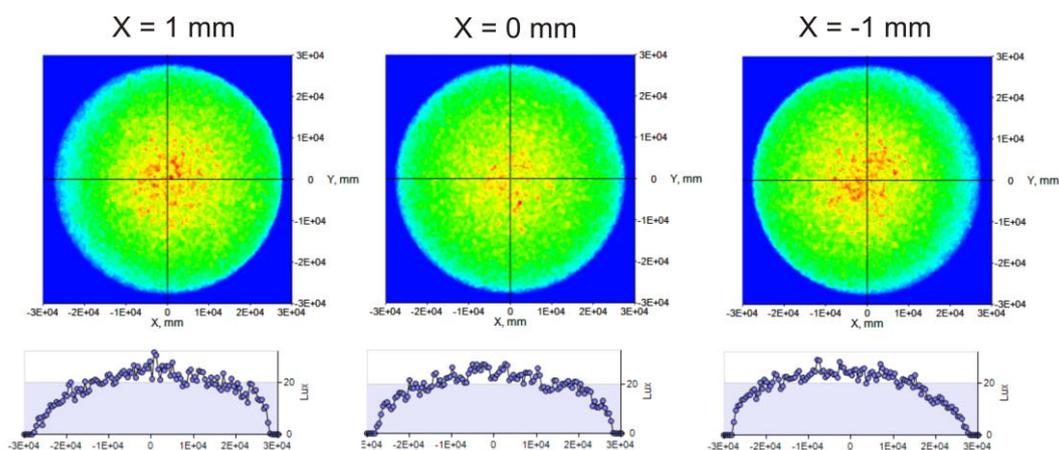
**Tab. 8:** Výsledné hodnoty analýzy posunu clony s objektivem zaostřeným do 5 m



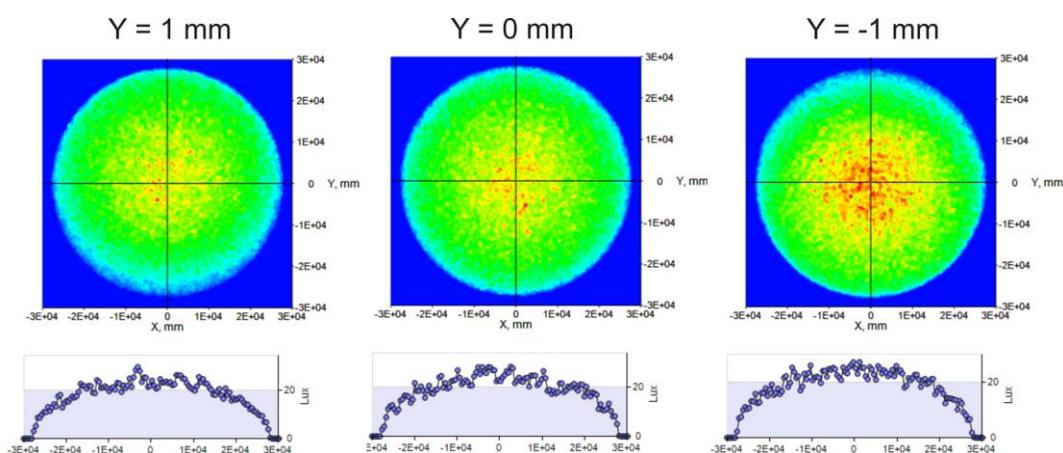
**Obr. 98:** Náčrt základních rozměrů soustavy pro ostření objektivu na 150 m.

Souřadnicový posun [mm]			Světelný tok [lm]	Účinnost [%]	Maximum osvětlení [lx]
X	Y	Z			
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>33739</b>	<b>25</b>	<b>34,1</b>
1	0	0	31860	24	31,8
-1	0	0	31865	24	32
0	1	0	31781	24	34,5
0	-1	0	31820	24	30,2
0	0	1	31684	23	36,3
0	0	-1	32884	24	30,9

**Tab. 9:** Výsledné hodnoty analýzy zdroje s objektivem zaostřeným do 150 m



**Obr. 99:** Grafy osvětlení analýzy zdroje ve směru osy x s objektivem zaostřeným do 150 m.



**Obr. 100:** Grafy osvětlení analýzy zdroje ve směru osy y s objektivem zaostřeným do 150 m.

Poslední analýza je trasována s objektivem zaostřeným do vzdálenosti 150 m. Jde o analýzu posunu clony ve směru optické osy. Výchozí pozice clony je 150 mm. Z výsledných hodnot zobrazených v tabulce 10 jde vidět, že dochází k malým změnám ve světelném toku, které ale nemají vliv na celkovou účinnost systému.

Z souřadnice [mm]	Světelný tok [lm]	Účinnost [%]	Maximum osvětlení [lx]
153	34023	25	34,1
152	33962	25	34,1
151	33863	25	34,1
<b>150</b>	<b>33739</b>	<b>25</b>	<b>34,1</b>
149	33581	25	34,1
148	33404	25	34,1
147	33178	25	34,1

**Tab. 10:** Výsledné hodnoty analýzy posunu clony s objektivem zaostřeným do 150 m.

## 10 Návrh mechanického uchycení reflektoru

### 10.1 Technické požadavky na konstrukci

Navrhovaný reflektor je rotačně symetrický kolem své optické osy. Při uchycování reflektoru, tedy není potřeba řešit jeho natočení. Je potřeba dodržet pouze souosost reflektoru, zdroje, clony a dalších navazujících optických částí.

Použitým světelným zdrojem je metal-halogenidová výbojka od firmy OSRAM. Popis světelného zdroje je zmíněn v kapitole 8. Technický list zvolené výbojky „Lok-it! HTI 1500W/60/P50“ je přiložen k této diplomové práci jako příloha 1 a 2. Pro snadné uchycení zdroje je použit lampový držák od stejné firmy. Technický list lampového držáku je součástí přílohy 2.

Teplota světelného zdroje může dosahovat až 450°C. Materiál jednotlivých prvků konstrukce je potřeba volit s dostatečnou teplotní odolností.

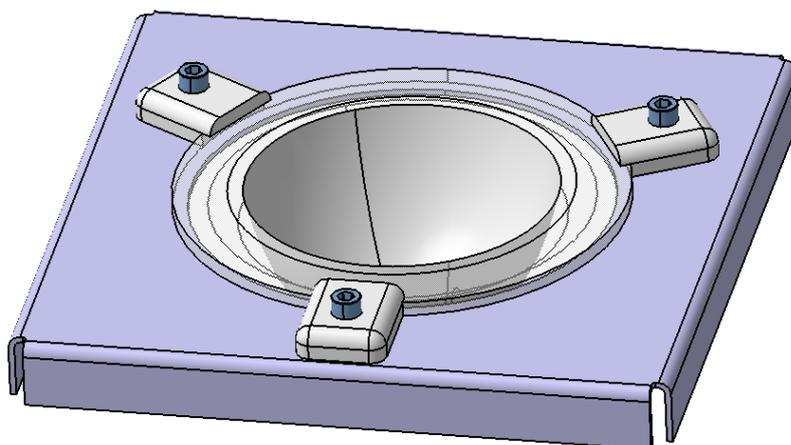
Navržené části je třeba přichytit ke konstrukci projekčního osvětlovače, která je v této práci simulována pomocí čtyř ocelových čtvercových trubek (jåkly) o rozměrech 30x30 mm a tloušťce stěny 2 mm.

Podle provedených analýz v kapitole 9 je potřeba optické prvky uložit s přesností maximálně  $\pm 1$  mm.

### 10.2 Podsestava reflektoru

Jako materiál reflektoru bylo pro vysokou teplotní a chemickou odolnost zvoleno borosilikátové sklo [18]. Pro získání odrazného reflektoru bude skleněný reflektor pokoven. Pro pokovení reflektoru je uvažována metoda vakuového napařování částic kovu. Kovený materiál je vložen do vakua, kde jsou na něj nanášeny velmi tenké kovové vrstvy. Nanášení kovové vrstvy probíhá metodou napařování, dle literatury [19]. Ve vakuové komoře je spolu s reflektorem umístěn kov, který se po zahřátí odpařuje. Odpařené atomy, případně molekuly, usedají na nejbližší chladnější prvek, v tomto případě skleněný reflektor. Nanesená vrstva přesně kopíruje povrch skla. Je tak získána odrazná vrstva reflektoru.

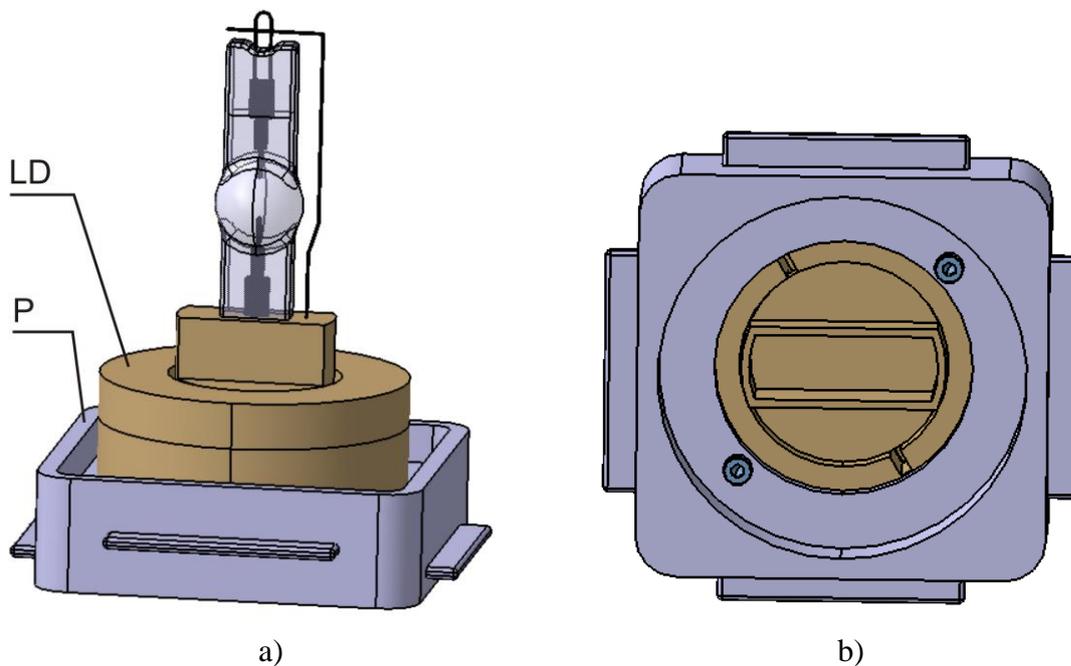
Výrobní výkres reflektoru je součástí diplomové práce jako příloha 3. Reflektor je vsunut do kruhového otvoru plechu (příloha 4) a přišroubován pomocí úchyťů (příloha 5) ve třech bodech. Podsestava reflektoru je zobrazena na obrázku 101.



Obr. 101: Podsestava reflektoru.

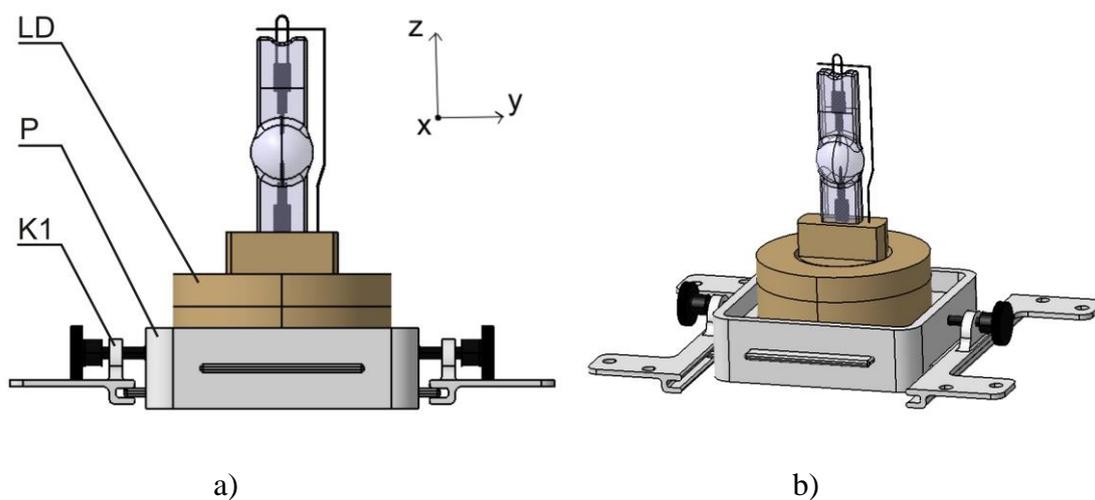
### 10.3 Podsestava světelného zdroje

Jak bylo již zmíněno, světelný zdroj bude přichycen do lampového držáku od výrobce OSRAM. Lampový držák je pevně přichycen šrouby k pojezdu, přichycení je znázorněno na obrázku 102.



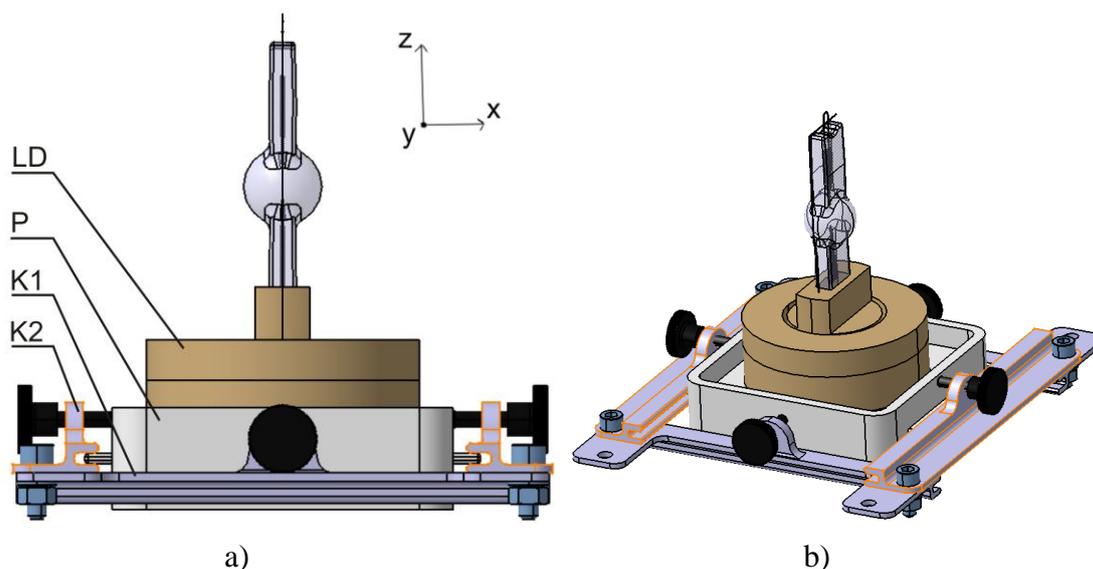
**Obr. 102:** Přichycení lampového držáku k pojezdu. LD – lampový držák, P – pojezd.

Pojezd je opatřen z každé strany podlouhlým výstupkem. Na obrázku 103 jsou k pojezdu připojeny dvě kolejnice\_1, symetricky ze dvou stran. Kolejnice\_1 obsahují drážku, ve které se může pojezd pohybovat. Poloha pojezdu ve směru osy x je libovolná. Poloha pojezdu ve směru osy y je určena šrouby, které jemným tlakem přesně určí polohu pojezdu.



**Obr. 103:** Spojení pojezdu s kolejnicí\_1. LD – lampový držák, P – pojezd, K1 – kolejnice\_1.

Ke kolejnicím\_1 se přišroubují dvě kolejnice\_2 podle obrázku 104. V kolejnici\_2 je drážka, která je nasazena na výstupek na pojezdu. Kolejnice\_2 dovolují volný pohyb pojezdu ve směru osy y a ve směru osy x je poloha pojezdu určena přítlačnými šrouby.

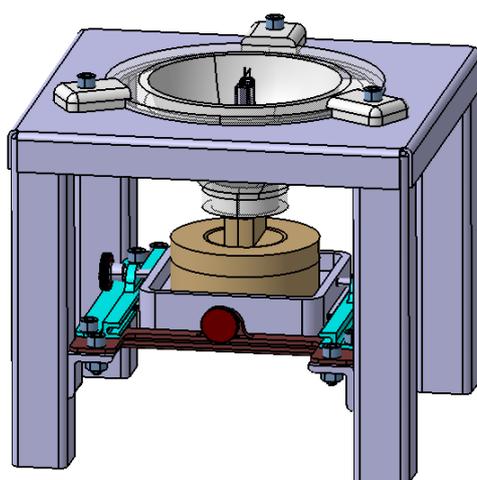


**Obr. 104:** Spojení pojezdu s kolejnicí 2. LD – lampový držák, P – pojezd, K1 – kolejnice\_1, K2 - kolejnice\_2.

Popsaná konstrukce umožňuje přesné umístění pojezdu se světelným zdrojem v osách x a y pomocí 4 přítlačných šroubů. Výrobní výkresy všech částí jsou umístěny v přílohách 3 - 10.

#### 10.4 Celková sestava

Celková sestava je zobrazena na obrázku 105. Výrobní výkres sestavy je obsažen v příloze 10. K nosným jáklům bude přivařen plech z podsestavy reflektoru. Ve spodní části jáklů budou přivařeny 4 L-profilů o velikosti 25x25 mm a tloušťce 4 mm. Podsestava světelného zdroje bude přišroubována k L-profilům.



**Obr. 105:** Sestava

## 11 Závěr

Tato diplomová práce je zaměřena na vývoj osvětlovacího systému s podporou optického programu LightTools. Součástí osvětlovacího systému je reflektor. Vývoji reflektoru byla věnována velká část práce. Bylo navrženo několik metod výpočtu reflektoru. Výsledné reflektory byly porovnávány podle účinnosti systému a hodnoty poklesu osvětlení u hranice obrazu do 50%. Celkem bylo navrženo 14 reflektorů.

Nejvyšší účinnost systému měl optimalizovaný hladký reflektor. V detektorové rovině měl ale ostrý spot. Ze strany homogenity osvětlení měly nejlepší výsledky fazetové reflektory. Je to dáno hlavně tím, že každá fazeta zobrazuje světelný zdroj do celé roviny cílového obrazu, zatím co u hladkého reflektoru každá část reflektoru pokrývá jen malou část výsledného obrazu. Výsledný graf osvětlení je superpozicí grafů z jednotlivých fazet.

Z výsledků trasování samotných reflektorů bylo vybráno pět reflektorů s nejlepšími výsledky. Vybrané reflektory byly vyhodnoceny v kombinaci s varifokálním reflektorem. Podle výsledků trasování současně s varifokálním objektivem byl vybrán nejlepší reflektor. Nejlepší reflektor je fazetový reflektor s dobrou účinností systému a současně dobrou homogenitou osvětlení.

S vybraným reflektorem byla provedena toleranční analýza posunu zdroje ve všech souřadnicových směrech. Analýza byla provedena pro samostatný reflektor i v kombinaci s varifokálním objektivem. Z výsledků analýzy bylo zjištěno, že účinnost systému se s posunem zdroje nijak výrazně neliší, maximální rozdíl v účinnosti jsou 2% při posunu do  $\pm 1\text{mm}$ . Dochází však ke zhoršení homogenity obrazu.

Dále byla provedena analýza posunu roviny clony ve směru optické osy sestavy. Tato analýza opět ukázala, že k výrazným poklesům účinnosti nedochází.

V této diplomové práci bylo navrženo uchycení světelného zdroje a reflektoru v projekčním osvětlovači. Při návrhu konstrukce byla uvažována přesnost  $\pm 1\text{mm}$ . Základní konstrukce lampy byla simulována čtyřmi čtvercovými jákly. Na tyto jákly byla navázána konstrukce, která umožňuje přesné seřízení polohy světelného zdroje a reflektoru. Ke všem navrženým částem konstrukce byly vytvořeny výrobní výkresy.

## 12 Seznam použité literatury

- [1] MIKŠ, A.: *Aplikovaná optika*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 230 s. ISBN 978-80-01-04254-0.
- [2] REICHL, J.: *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2015-09-15]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/535-fotometricke-veliciny%2030.8>
- [3] HAVELKA, B.: *Geometrická optika*. 1. vyd. Praha: ČSAV, 1956, 289 s.
- [4] HALLIDAY, D., RESNICK, R. a WALKER, J.: *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2000, xxiv, 1198, [52] s. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1869-9.
- [5] DE YOUNG, G. W.: *Exploring Reflection: Designing Light Reflectors for Uniform Illumination*. (c) 2000 Society for Industrial and Applied Mathematics, 2000, **42**(No. 4.): pp. 727–735.
- [6] PYCH, S.: *Návrh a analýza optických prvků v programu OSLO*. Olomouc, 2010. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Prof. RNDr. Zdeněk Bouchal, Dr.
- [7] BARTSCH, H. a MALÝ, V.: *Matematické vzorce*. 3. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, Nakladatelství Alfa, N.P., Bratislava, 1971.
- [8] Analytická geometrie: Kružnice. *Matematika pro každého* [online]. Praha, 2008 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <https://maths.cz/clanky/analyticka-geometrie-kruznice.html>
- [9] ELMER, W. B.: *The optical design of reflectors*, 2nd ed. (Wiley, New York, 1980)
- [10] KUSCH, O.: *Computer-aided optical design of illuminating and irradiating devices* (ASLAN Publishing House, Moscow, 1993).
- [11] FOURNIER, F.: *FREEFORM REFLECTOR DESIGN WITH EXTENDED SOURCES*. Florida, 2010. Disertační práce. B.S. Institut d'Optique, 2004 & M.S. University of Central Florida, 2008. Vedoucí práce Jannick P. Rolland.
- [12] VOGL, T. P., LINTNER, L. C., PEGIS, R. J., WALDBAUER, W. M. and UNVALA, H. A.: *Semiautomatic design of illuminating systems*, Appl. Opt. 11(5), 1087 (1972).
- [13] SIKKENS, M. and NUYENS, P.: *Structured design method for automotive lamp reflectors*, presented at Current Developments in Lens Design and Optical Engineering IV, San Diego, CA, USA, SPIE Vol. 5173 (2003).
- [14] PATOW, G., PUEYO, X. and VINACUA, A.: *User-guided inverse reflector design*, Computers & Graphics 31(3), 501-515 (2007).
- [15] MICHAELIS, D., KUDAEV, S., STEINKOPF, R., GEBHARDT, A., SCHREIBER, P. and BRAUER, A.: *Incoherent beam shaping with freeform mirror*, presented at Nonimaging Optics and Efficient Illumination Systems V, San Diego, CA, USA, SPIE Vol. 7059 (2008).

- [16] Princip fungování vysokotlakých výbojek. *Webové stránky společnosti OSRAM* [online]. Mnichov: OSRAM GmbH, 2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: [http://www.osram.cz/osram\\_cz/novinky-a-znalosti/vysokotlake-vybojky/technicke-informace/princip-fungovani-vysokotlakych-vybojek/index.jsp](http://www.osram.cz/osram_cz/novinky-a-znalosti/vysokotlake-vybojky/technicke-informace/princip-fungovani-vysokotlakych-vybojek/index.jsp)
- [17] VILÉM, J.: *Návrh a optimalizace varifokálního objektivu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, 2015. 94 s. Vedoucí Ing. Martin Antoš, Ph.D.
- [18] Vlastnosti použitých skel. *TECHNOSKLO* [online]. Držkov, 2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.technosklo.com/cz/index.php?page=ke-stazeni/laboratorni-sklo/vlastnosti-pouzitych-skel>
- [19] MILICHOVSKÝ, M.: *Vlastnosti kovových vrstev realizovaných vakuovým napařováním*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Josef Šandera, Ph.D.

## A Seznámení s použitým programem LightTools

LightTools, zkráceně LT, je program určený k navrhování a modelování optických prvků a soustav. Optické prvky a soustavy lze vytvářet přímo v prostředí LT, nebo je importovat z CAD prostředí například pomocí formátu step (\*.stp). Program obsahuje databázi základních světelných zdrojů, ale také umožňuje implementovat zdroje vlastní, případně si zdroj vytvořit přímo v prostředí programu. V programu je možno trasovat paprsky danou optickou soustavou a výsledný obraz si analyzovat. Optickou soustavu je možné optimalizovat dle zvolených požadavků. Jednotlivým optickým prvkům je potřeba přiřadit materiálové a optické vlastnosti, jedná se hlavně o schopnost materiálu odrazet a pohlcovat světlo.

Program LT je využíván pro zjištění chodu světelných paprsků optickým systémem, jde o tzv. trasování. Základním parametrem trasování je volba množství světelných paprsků, které budou simulovat průchod systémem. Počet paprsků pro jednotlivá trasování je potřeba vhodně volit. Zvýšením počtu paprsků se zvyšuje přesnost výsledku trasování, ale současně se prodlužuje doba výpočtu. Při testování mnoha iterací je vhodné volit nižší počet paprsků pro rychlejší výpočet. Zvolenou výslednou iteraci je dobré ověřit trasováním s vyšším počtem paprsků a tedy přesnějším výsledkem. V oblasti zobrazené geometrie lze zviditelnit průchod trasovaných paprsků optickým systémem. Množství zobrazených paprsků lze zvolit v parametrech trasování. Pomocí zobrazených paprsků lze odhalit některé chyby ve vytvořeném optickém systému, například výrazná ztráta světla v systému, nebo vznik parazitních paprsků nechtěným odrazem.

LT umožňuje dva způsoby trasování. Precizní paprskové trasování a zrychlené paprskové trasování. Výchozí nastavení programu je přednastaveno s precizním módem trasování. V precizním módu paprsky protínají přesně vyjádřené plochy, výsledky trasování jsou tedy nejpresnější. Toto trasování je vhodné používat pro systém s požadavkem vysoké přesnosti, jako např. systém přenosu obrazu, nebo přední světelné systémy se speciálními požadavky na tvar svazku. Precizní mód však může být časově náročný, obzvláště pokud model obsahuje více prvků.

Ve zrychleném trasovacím módu protínají paprsky přibližně určené plochy pro usnadnění a urychlení trasování. Rychlost tohoto módu může být výrazně vyšší. Zrychlený trasovací mód je vhodné využívat při návrhu konceptu systému, pro rychlé získání přibližných výsledků. Také jej lze použít v optických systémech, které nevyžadují vysokou přesnost výsledku. Zrychlený mód je možné aplikovat na celou geometrii, nebo pouze na zvolené části, ostatní části budou trasovány precizním módem. Vzhledem k nízkému množství prvků soustavy byl v této diplomové práci použit výpočet pomocí precizního módu.

Podmínkou k trasování v optické soustavě je vložení alespoň jednoho světelného zdroje a současně alespoň jednoho detektoru. Světelné zdroje pro LT lze vkládat z přednastavené knihovny zdrojů, nebo lze vytvořit vlastní světelný zdroj. Jako detektor světelných paprsků lze zvolit libovolnou plochu systému, lze vytvořit detektor na ploše v prostoru v konečné vzdálenosti od systému, nebo je možné vložit tzv. „far field receiver“. Jde o vzdálený detektor, který zaznamenává paprsky jdoucí do nekonečna. Na detektoru v konečné vzdálenosti lze zaznamenávat veličiny svítivost a osvětlení, zatímco na vzdáleném detektoru lze zaznamenávat pouze svítivost, tedy úhel dopadu světelného paprsku. Jako vzdálený detektor bývá nejčastěji volena kulová plocha se sférickými, nebo úhlovými souřadnicemi. Detektor v konečné vzdálenosti nejčastěji používá rovinnou plochu s pravoúhlým souřadnicovým systémem.

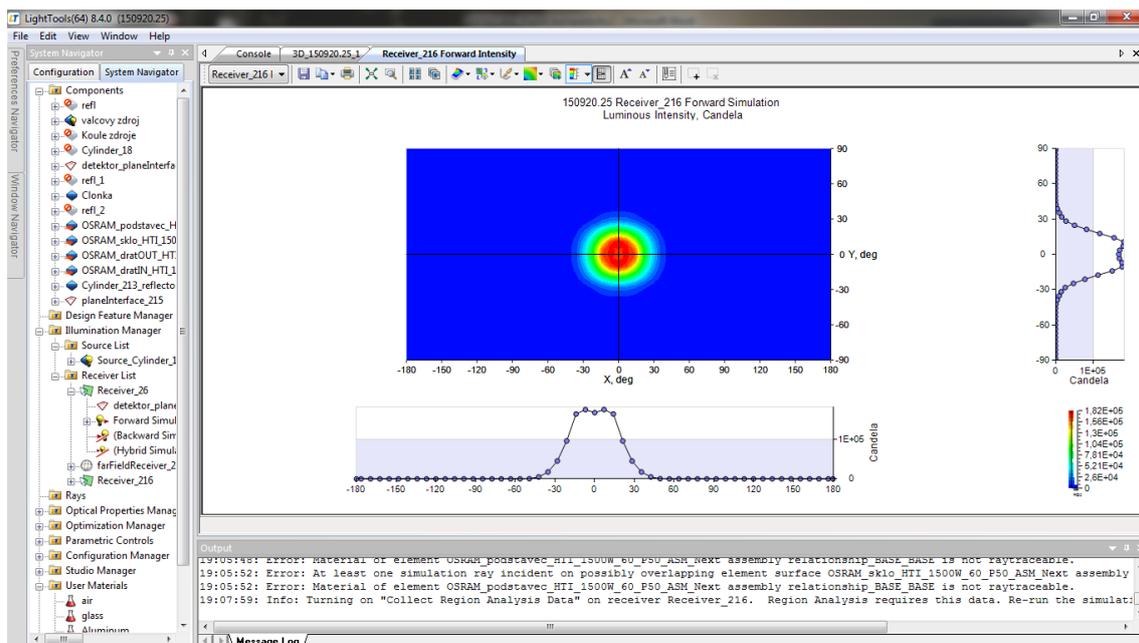
V LT je možné provádět i zpětné trasování. Zpětné trasování se provádí v případě, kdy je potřeba zjistit optickou dráhu paprsků vybraných v rovině detektoru. Pro aplikování zpětného trasování je zapnout volbu uchovávání paprsků. Vybrané paprsky jsou zobrazeny současně s geometrií.

LT využívá dvě možnosti analyzování výsledků. Jde o záznam osvětlení a svítivosti. Analýza pomocí záznamu osvětlení je možná pouze pro plošný detektor v krátké vzdálenosti od zdroje. Jde o zaznamenané osvětlení, které dopadne na plochu detektoru, zaznamenává se pouze prostorové rozdělení osvětlení. Pro výpočet je použita pravoúhlá mřížka. Pokud detektor není rovinný, ale sférický, použitá mřížka se promítne kolmo na detektor.

Analýzu pomocí svítivosti je možné využít jak pro detektor v krátké vzdálenosti, tak pro vzdálený detektor. Jde o jedinou analýzu pro detekci na vzdáleném detektoru. Při této analýze se zaznamenává směr, ze kterého dopadají světelné paprsky na detektor. Analýza pomocí svítivosti užívá mřížku se sférickými souřadnicemi.

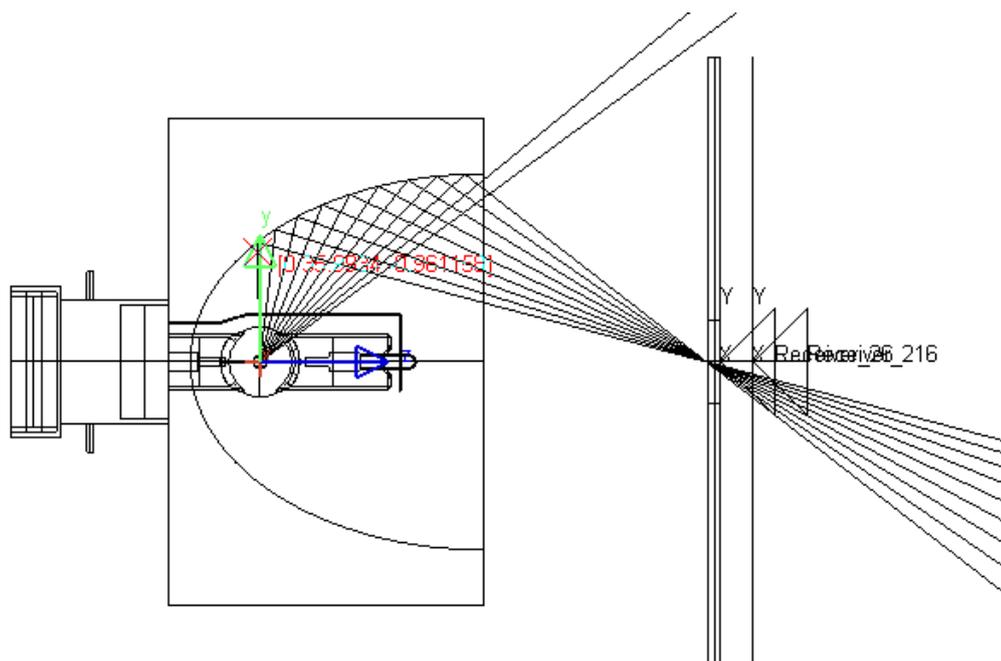
Program LT generuje výsledky analýzy v grafické nebo numerické podobě. Grafická výstupní data jsou ve formě grafu a to čárového, rastrového, plošného, nebo rozptylového. Numerické podoby výstupu pak získáváme v podobě tabulek hodnot, které jsou současně podklady pro zmíněné grafy.

Nejpoužívanější grafy v LT jsou rozložení svítivosti (osvětlení) a graf řezů svítivosti („intensity slice chart“). Rozložení svítivosti, nebo osvětlení, je zobrazováno v prostředí „LumViewer“, které je použito v této diplomové práci. Prostředí „LumViewer“ je zobrazeno na obrázku 106. Toto prostředí umožňuje volbu vzhledu zobrazení grafu. Je možno navolit barevnou škálu, její minimální a maximální hodnoty, nebo krok. Výsledný graf lze z programu exportovat buď přímo jako obrázek, nebo v podobě tabulky numerických hodnot.



**Obr. 106:** Prostředí LumViewer.

V programu LT lze, kromě zobrazení všech paprsků po trasování a zobrazení vybraných paprsků ze zpětného trasování, zobrazit také jednotlivé paprsky. Jde o funkci zobrazenou na obrázku 107. Tato funkce je vhodná pro ladění optické soustavy, je třeba zvolit polohu zdroje, směr chodu a množství výchozích paprsků. Výsledkem je přehledné zobrazení odrazů a směrů paprsků. Tato funkce umožňuje pro větší přehlednost nastavit různé zbarvení paprsků. Výhodou je okamžitý výsledek bez zdlouhavého trasování soustavy.



**Obr. 107:** Zobrazení trasy paprsků.

Výsledky trasování se ukládají jako přesné paprskové souřadnice, nebo směrové kosiny paprsků (dle druhu analýzy zmíněné výše). Tyto hodnoty se ukládají do jednotlivých buněk mřížky. Množství a velikost buněk v mřížce určují přesnost a rozlišení mřížky. Volbou velké buňky v mřížce, je získána vyšší přesnost, neboť každá buňka bude obsahovat více paprsků, rozlišení mřížky pak bude vzhledem k nízkému počtu buněk nižší. Naopak volbou malé buňky, se získá nižší přesnost, neboť každá buňka bude obsahovat méně paprsků, rozlišení mřížky bude díky většímu množství buněk vyšší. Je vhodné volit kompromis pro zachování dostatečné přesnosti i rozlišení.

Před trasováním je třeba v LT zvolit velikost mřížky, tedy množství buněk v obou směrech mřížky. Program LT počítá odhad chyby výpočtu pro zadanou velikost detektoru a zadané množství buněk. Tento odhad chyby může být využit pro kontrolu, zda rozlišení a přesnost budou dostačující. Odhad chyby lze spočítat z rovnice:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\left(\sum_N (f^2)\right)}}{\sum_N f}, \quad (17)$$

kde  $\varepsilon$  je odhad chyby,  $N$  je počet paprsků v buňce s maximálním osvětlením a  $f$  hodnota maximálního osvětlení paprsků. Daná rovnice je pouze hrubým odhadem chyby a je počítána pouze z buněk s vysokými hodnotami svítivosti, nebo osvětlení. Ideální hodnota cílové chyby je v okolí 5%. Volbu velikostí buněk a zobrazení odhadu chyby lze upravovat ve vlastnostech detektoru.

## 13 Seznam příloh

Příloha 1:	Technický list světelného zdroje 1
Příloha 2:	Technický list světelného zdroje 2
Příloha 3:	Výrobní výkres: Reflektor
Příloha 4:	Výrobní výkres: Plech
Příloha 5:	Výrobní výkres: Úchyt
Příloha 6:	Výrobní výkres: Pojezd
Příloha 7:	Výrobní výkres: Kolejnice 1
Příloha 8:	Výrobní výkres: Kolejnice 2
Příloha 9:	Kusovník
Příloha 10:	Výrobní výkres: Sestava – konstrukce

### Obsah přiloženého CD:

- Text práce
- Výrobní výkresy
- Zdrojová data pro program LightTools
- Modely navržených reflektorů ve formátu .stp