

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

NÁVRH A OPTIMALIZACE VARIFOKÁLNÍHO OBJEKTIVU

DESIGN AND OPTIMIZATION OF VARIFOCAL LENS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAN VILÉM

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MARTIN ANTOŠ, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav fyzikálního inženýrství
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jan Vilém

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Přesná mechanika a optika (2301T010)**

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 a optimalizace varifokálního objektivu

v anglickém jazyce:

Design and optimization of varifocal lens

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte objektiv s proměnnou ohniskovou vzdáleností k projekčním osvětlovacím účelům. K posouzení originality návrhu využijte srovnání s komerčně dostupným modelem objektivu z produkce firmy ROBE lighting, s. r. o. Velikost účinného průměru frontálního optického členu objektivu volte 90 mm. Počítejte s možností až čtyřnásobné změny velikosti ohniskové vzdálenosti objektivu. Při korekci optických aberací objektivu uvažujte zobrazení rovinného předmětu o průměru 24 mm. Konečnou optimalizaci optických vlastností objektivu proveďte pro určitý interval projekčních vzdáleností s ohledem na stanovený účel použití.

Práci veďte v těchto etapách:

1. Na základě předpokládaného způsobu použití stanovte požadavky na míru korekce nežádoucích optických aberací objektivu.
2. Proveďte optimalizaci optických parametrů navrženého objektivu s využitím komerčního programu pro počítačový návrh.
3. Precizujte požadavky na mechanické uložení optických členů s ohledem na pracovní podmínky a vliv okolního prostředí.
4. Vypracujte výkresovou dokumentaci k výrobě navržených mechanických komponent.

Cíle diplomové práce:

1. Optický návrh a optimalizace zobrazovacích charakteristik objektivu.
2. Návrh mechanického uložení optických prvků tubusu objektivu.

Seznam odborné literatury:

- [1] Schroder G., Technická optika, SNTL Praha, 1981.
- [2] Yoder, P., Mounting optics in optical instruments, SPIE Bellingham, 2008.
- [3] Kidger, M., Fundamental Optical Design, SPIE Bellingham, 2002.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Antoš, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 21.11.2014

L.S.

prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

LICENČNÍ SMLOUVA
POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO
uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan

Jméno a příjmení: Bc. Jan Vilém
Bytem: Rokytnice 424, 75501, Vsetín, Česká Republika
Narozen (datum a místo): 26.10.1988, Vsetín

(dále jen autor)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

se sídlem Technická 2896/2, Královo Pole, 61669, Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

prof. RNDr. Josef Šlapal, CSc.

(dále jen nabyvatel)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☒ diplomová práce
- ☐ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Návrh a optimalizace varifokálního objektivu

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Martin Antoš, Ph.D.

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství

Datum obhajoby VŠKP: 19.6.2012

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v¹:

- ☐ tištěné formě — počet exemplářů 3
- ☐ elektronické formě — počet exemplářů 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

¹hodící se zaškrtněte

Čl. 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedeného díla nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☐ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☒ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy

(z důvodu utajení v něm obsažených informací)

4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením §47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Čl. 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

Nabyvatel

Autor

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem a optimalizací varifokálního objektivu pro projekční osvětlovací účely. Vytváří návrh mechanického uložení varifokálního objektivu a výkresovou dokumentaci pro jeho výrobu. Práce vznikla ve spolupráci se společností Robe Lighting s.r.o., která specifikovala požadavek na návrh nového objektivu. Téma práce koresponduje s aktuální problematikou vývoje osvětlovací techniky, jež je specifickým odvětvím optického průmyslu. Pro vývoj osvětlovací techniky existuje velké množství ne-standardních podmínek, jak pro návrh, tak pro způsob použití optické soustavy. Tato práce si proto klade za cíl definovat zobrazovací vlastnosti projekčního osvětlovacího objektivu a na jejich základě vytváří nový návrh s korigovaným zkreslením.

Summary

The thesis deals with the design and optimization of varifocal lens for projection illuminating purposes, its mechanical design and manufacturing drawings. It was proceed in the cooperation with Robe Lighting s.r.o., which defined requirement for a new projective objective lens. Lighting fixtures development is a very specific industry with a number of unusual conditions for design and methods of using of the optical systems. In this paper conditions for imaging quality will be defined and a new design of the lens with corrected distortion will be created based on the definition of the conditions.

Klíčová slova

Optický návrh, Zemax, varifokální objektiv, projekční objektiv s proměnlivou ohniskovou vzdáleností, osvětlovací technika.

Keywords

Optical design, Zemax, varifocal lens, projection zoom lens, lighting fixture.

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

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Martina Antoše, Ph.D. s použitím literatury uvedené v seznamu literatury.

Bc. Jan Vilém

Děkuji všem, kteří se přímo i nepřímo podíleli na tom, že jsem mohl tuto práci dokončit, především Ing. Martinovi Antošovi, Ph.D. za odborné vedení.

Bc. Jan Vilém

OBSAH

1	Úvod	3
2	Současný stav poznání	4
2.1	Charakterizace osvětlovacích systémů	4
2.1.1	Wash	5
2.1.2	Spot	7
2.1.3	Beam	11
2.1.4	Efekt	12
2.2	Rozdělení podle funkce	12
2.2.1	Zobrazovací optika	12
2.2.2	Nezobrazovací optika	13
2.2.3	Zoom systém	15
3	Metodika hodnocení optických soustav	16
3.1	Etendue	16
3.1.1	Etendue v obecném tvaru	16
3.1.2	Etendue pro rotačně symetrickou plochu	17
3.2	Hodnocení kvality návrhu	17
3.3	Optické aberace a způsob jejich rozpoznání v návrhu	20
3.3.1	Sférická vada	21
3.3.2	Koma	22
3.3.3	Astigmatismus a zklenutí pole	24
3.3.4	Zkreslení	25
3.3.5	Shrnutí efektivity korekce vad na změně jednotlivých parametrů	26
3.4	Vliv provozních podmínek	27
3.4.1	Cementování čoček	27
3.4.2	Antireflexní vrstvy	27
4	Analýza současného stavu	29
4.1	Speciální podmínky	31
4.1.1	Teplota	31
4.1.2	UV	31
4.1.3	Velká světelnost	32
4.1.4	Snížená kvalita	33
4.1.5	Velké průměry čoček	34
4.1.6	Absence samostatné vnitřní aperturní clony	34
4.1.7	Netmelené dublety	34
4.2	Analýza referenčního objektivu	35
4.2.1	Základní parametry objektivu	37
4.2.2	Světelnost	38
5	Návrh objektivu	46
5.1	První návrhy	46
5.2	Zemax - nastavení meritní funkce	50
5.3	Finální návrh	52

5.3.1 Směřování dalšího vývoje	62
6 Mechanické uložení objektivu	63
7 Závěr	68
A Odvození neměnnosti Etendue v obecném tvaru	73
B Seznam příloh	75

1. ÚVOD

Tato diplomová práce se věnuje aktuálnímu tématu vývoje zařízení pro osvětlovací průmysl, který v posledních dvaceti letech zažívá výrazný rozmach a rozrůstá se do velmi žádaného a dynamického odvětví. Osvětlovací zařízení jsou poptávána v divadelním, televizním, sportovním, či například hudebním průmyslu. Mezi výrobci osvětlovacích zařízení existuje značná konkurence. Jejich vývojáři stojí před množstvím nestandardních podmínek určujících jak návrh, tak způsob použití.

Proto prvním cílem této práce je analyzovat tyto nestandardní podmínky a definovat limitní hodnoty pro kvalitu objektivu. Na základě takových podmínek vytvoříme komerční návrh varifokálního objektivu pro projekční osvětlovací účely, který bude sloužit pro potřeby společnosti Robe Lighting s.r.o. V její spolupráci návrh objektivu vznikl a společnost specifikovala požadavky na finální výrobek. Jejím základním požadavkem bylo snížení hodnoty minimálního výstupního úhlu a korekce zkreslení. Navržený objektiv by měl v budoucnu sloužit jako náhrada současného objektivu. Primární snahou je vyrobit lepší produkt k zajištění konkurenceschopnosti.

Hodnocení osvětlovacího objektivu vychází z rozboru komerčně dostupného objektivu z produkce Robe Lighting s.r.o., z měření a empirických znalostí. Součástí práce je mechanické uložení nového objektivu a výkresová dokumentace pro výrobu.

Práce je členěna do sedmi hlavních částí a příloh. Po úvodu 1 v části 2 je přiblížena problematika profesionálních osvětlovacích zařízení a provedeno jejich rozdělení podle druhu a funkce. V části 3 jsou analyzovány způsoby a kritéria hodnocení optické soustavy, vady a metody jejich korekce. Část 4 jako první z praktických částí zahrnuje popis vlivu nestandardních podmínek. Obsahuje také důležitou kapitolu s rozбором kvality referenčního objektivu. Časově nejnáročnější vývoj návrhu nového objektivu je shrnut v části 5. Je zde proveden rozbor vlastností nově navrženého objektivu, který je porovnán s referenčním objektivem z předchozí části. V části 6 je zpracováno mechanické uložení pro finální návrh tak, aby bylo zároveň jednoduché, splňovalo požadovaný účel a shodovalo se s metodami společnosti. V závěru práce 7 se nachází seznam použité literatury a doplněk A. V něm je zpracováno odvození neměnnosti Etendue v obecném tvaru, které slouží pro lepší pochopení tohoto vztahu. Bude také využito jako podklad pro další výzkum.

Optický návrh je proveden v komerčním programu Zemax. Výkresová dokumentace je vyhotovena v programu SolidEdge. Oba programy mají licenci společnosti Robe Lighting s.r.o.

2. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

2.1. Charakterizace osvětlovacích systémů

V posledních dvaceti letech zaznamenává zábavní průmysl výrazný rozvoj. S rozvojem souvisí zvýšená poptávka po osvětlovací technice. Ta se hojně používá při natáčení filmů, v televizním průmyslu, v divadelním průmyslu či při nasvětlování koncertů, přehlídek a různých show. Používá se také pro architektonické nasvětlování, v klubech, fotoateliérech a obecně při veškerých společenských akcích. Poptávka po osvětlovací technice se dynamicky mění, a to jednak s vlnou toho, co je právě v módě, a zároveň s novými technologiemi a rozvojem výpočetní techniky. Během posledních deseti let se radikálně proměňují požadavky zákazníků na trhu osvětlovací techniky.

Proměna poptávky se projevuje ve zvýšených nárocích na osvětlovací techniku. Trh aktuálně požaduje nejvyšší kvalitu obrazu, které je možné dosáhnout, větší rozsah ohniskové vzdálenosti u projekčních zařízení 2.1.2, energetickou úspornost a zároveň dostupnou cenu. Také je nezbytné, aby zařízení obsahovalo stále se zvyšující množství kvalitních efektů viz. 2.1.4 [5, 41]. To vše za dodržení podmínky pro maximální světelnost, jelikož se stále jedná především o osvětlovací zařízení.

Výraznou změnu v průběhu posledních let prodělal vývoj nových zdrojů světla. Vedle klasických výbojek se na trhu objevily plazmové zdroje. Plazmové zdroje však byly rychle vystřídány LED technologií, která je v současnosti velice populární nejen v oblasti osvětlovací techniky. Za svou oblibu vděčí své dlouhé životnosti, barevné stálosti, energetické úspoře, rychlému zapnutí/vypnutí, plynulému dimrování¹ a vysoké účinnosti lumen/W. Už nyní dosahují vyšší svítivosti při použití barev než konvenční výbojková svítidla s barevnými filtry [7, 29, 38]. Společnosti jako Osram, Cree, Luminus či LedEngine intenzivně pracují na jejich vývoji a v dohledné budoucnosti můžeme očekávat jejich další zlepšení.

Na začátek je důležité vytyčit, že všechna zařízení, kterým se tato práce věnuje, jsou „high-end“ tedy pro profesionální špičkové užití. Abychom pochopili, v čem je vývoj v oblasti osvětlovacích zařízení důležitý, je nezbytné vysvětlit, jak se špičková svítidla liší od těch nejlevnějších.

Nejlevnější svítidla mají podobu výbojky s parabolickým reflektorem, krycím sklíčkem a zdrojem. Takové zařízení je sice levné, avšak nemůžeme od něj očekávat další funkce, jako změnu ohniskové vzdálenosti, změnu rozložení intenzity, změnu barev, dimrování a vytváření světelných efektů. Výše vyjmenované funkce mají pouze kvalitnější zařízení střední třídy. S multifunkčností ovšem roste optická a mechanická náročnost celého zařízení, zvětšuje se jeho velikost a váha a tvarem již připomínají svítidla z podkapitol 2.1.1 až 2.1.4.

Střední třída profesionálních svítidel v porovnání s těmi nejlepšími postrádá další nezbytné náležitosti. Korekce barevných vad a zkreslení, vysoký světelný výstup s adekvátním chlazením, množství a kvalita obsažených efektů nedosahují ideální úrovně. Výrobci zařízení střední třídy jsou často menší firmy s nedostatečným *know-how* z výzkumu a vývoje. Dosažení limitních hodnot je v oblasti osvětlovací techniky to nejnáročnější. I malý, ač velmi náročný, posun v limitech může zařízení dostat na zcela jinou úroveň oproti kon-

¹Snižování intenzity zdroje až na nulu.

2.1. CHARAKTERIZACE OSVĚTLOVACÍCH SYSTÉMU

kurenčním zařízením na trhu. Za limitní hodnoty můžeme považovat maximální korekci vad (především lehce pozorovatelné barevné vady či zkreslení), zvýšení svítivosti nebo maximální rozsah zoomu.

U profesionálních svítidel téměř nikdy neplní jedno zařízení pouze jedinou funkci, jako tomu je u levnějších verzí Zpravidla se dají použít jako víceúčelové svítidlo. Obvyklé jsou kombinace Wash/Beam nebo Beam/Wash. Popřípadě Spot s možností použití i jako Wash či Beam. Vše v kombinaci s množstvím efektů. To vše opět způsobuje další a nyní velmi výrazné zvýšení technické náročnosti konstrukce.

Návrh optiky pro podobná zařízení není triviální problém. Osvětlovací průmysl se rozrostl do rozměrů, kde někteří výrobci dosahují miliardových obrátů. Z těchto důvodů má zajisté praktický význam se podobnými problémy zabývat.

2.1.1. Wash

Svítidlo typu Wash je čistě osvětlovací (*illuminating*) nezobrazovací (*non-imaging*) zařízení. Jedno z možných provedení můžeme vidět na obrázku 2.1. Název „Wash“ je oficiální název pro podobný typ svítidel v osvětlovacím průmyslu [3].

Funkce

Hlavním účelem svítidla je vytvoření širokého paprsku světla. Rozložení svítivosti je homogenní přibližně do poloviny maximálního výstupního úhlu paprsku světla. Směrem k okrajům svítivost plynule klesá až k nule. Z toho důvodu se nevytváří definovaný okraj světelného paprsku. Absence kontrastního okraje je žádoucí a jeho vytvoření u wash svítidla je bráno jako chyba.

Základní a jediná funkce je osvětlovací. Používá se pro obecné účely, jako například nasvícení automobilů na výstavách nebo scény v divadle. Jako u většiny svítidel je velice typické použití v difuzním prostředí, například při hudebních vystoupeních, kdy je zamlžený prostor nasvětlen skupinou Wash světél, což způsobí efekt, že se celý prostor rozzáří jako na obrázku 2.2. Jak je vidět, intenzita i odstín barvy vypadají naprosto homogenně, což je požadovaný efekt. Na obrázku 2.7 z podkapitol 2.1.2 je vidět, jak vypadá výstup pro minimální úhel. Fialové světlo pochází z Wash svítidel, okraje jsou měkké a nektrastní.



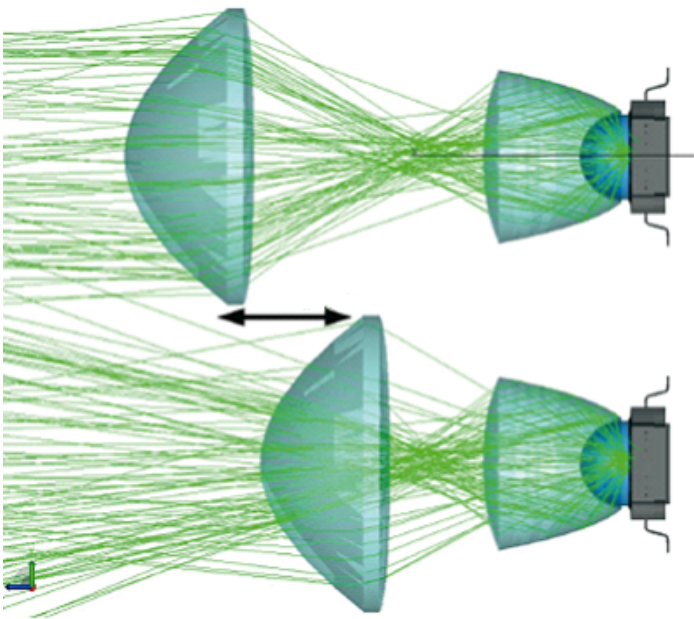
Obrázek 2.1: Typický příklad Wash svítidla. Robin 1200 LEDWash. Převzato z [42]

Optika



Obrázek 2.2: Příklad nasvícení scény zařízením typu Wash na koncertu Karla Gotta. V difuzním prostředí se projevuje jako modrá mlha pokrývající celou scénu. Převzato z [42]

koncept následující.



Obrázek 2.3: Nezobrazovací zoom optika použitá pro Wash svítidla ve dvou konfiguracích. Upraveno podle [43]

Pro vytvoření Wash svítidla by teoreticky stačilo použít zdroj světla a vhodně navržený reflektor, který vytvoří požadované rozložení intenzity. Osvětlovací technika je často mylně chápána tímto jednoduchým způsobem. Jak jsme se již zmínili, u high-end zařízení zákazník požaduje plynulou změnu výstupního úhlu v rozsahu až do 70° . Změny výstupního úhlu lze docílit použitím zoom optiky, která pro použití ve Wash svítidlech může být relativně jednoduchá, protože nepožadujeme žádnou tvorbu obrazu. Při použití RGBW LED čipu²) jako zdroje světla může být

Každý čip (nebo malá skupina čipů) má svou vlastní optickou soustavu skládající se ze dvou členů - statického kolektoru a pohyblivé zoom čočky viz. obrázek 2.3. Kolektor zachycuje světlo vycházející ze zdroje, které je emitováno pod úhlem 180° . Lineárním posuvem asférické zoom čočky dochází ke změně ohniskové vzdálenosti celé soustavy a tím pádem i ke změně výstupního úhlu. Optická soustava musí být navržena tak, aby v osvětlované rovině při změně ohniskové vzdálenosti bylo dodrženo požadované rozložení intenzity, musí mít homogenní barvy a především maximální optickou účinnost. Optický návrh lze provést pomocí trasovacího programu pro nezobrazovací optiku, například TracePro, ASAP nebo LightTools. Mechanický návrh a traso-

vání soustavy na obrázku 2.3 bylo vytvořeno v TracePro.

²Čtyřbarevný Red-Green-Blue-White čip vyvinutý speciálně pro zábavní průmysl.

Hodnotící kritéria kvality wash svítidla

Jako hlavní hodnotící kritéria hotového svítidla se uvádí především:

- rozsah a plynulost zoomu
- maximální světelný tok [lm]
- homogenita barev a intenzity na výstupu
- množství obsažených efektů
- index podání barev - CRI (*color rendering index*)

Podstatné, ale již méně důležité, jsou i další parametry jako možnost servisu, spolehlivost, teplota a hlučnost. Mimo jiné lze z výčtu kritérií usoudit, že úspěch svítidla vychází převážně z optického návrhu, kde jsou téměř všechny nejdůležitější parametry navrženy a nasimulovány v softwaru ještě předtím, než začne vznikat první mechanický návrh.

2.1.2. Spot

Spot svítidlo je osvětlovací projekční a zobrazovací zařízení. Od wash svítidel se liší svou funkcí a použitou optikou. Obecně se používá jako multifunkční zařízení. Je plně ovládáno přes 8 bitový DMX512 port s motorizovaným pohybem v osách X a Y. Běžně se označuje jako „osvětlovací hlavice“, byť známější je anglický ekvivalent „*moving head*“. Pohybujeme-li se v oblasti výroby osvětlovací techniky s klasickými výbojkovými nebo LED zdroji, jedná se o nejnáročnější možnou konstrukci se kterou se můžeme setkat. Zařízení typu spot je nejkomplexnější a nejdražší.

Funkce

První ze základních funkcí Spot svítidla je vytvoření úzkého svazku paprsků o značné intenzitě³ jako na obrázku 2.7. Paprsek má kontrastní okraje a velkou intenzitu, a proto je na scéně dobře viditelný do velké vzdálenosti. Efektu je docíleno tehdy, kdy předmět leží v rovině obrazu zdroje - právě zde dostáváme největší intenzitu na nejmenší ploše. V předmětové rovině je umístěna kruhová clonka, která po zobrazení objektivem vytváří v prostoru kontrastní okraje. Při použití klasického hladkého reflektoru bychom viděli obraz zdroje. Použitím fazetovaného reflektoru dochází k rozostření obrazu za účelem potlačení rušivého působení obrazu clony.



Obrázek 2.4: Typický příklad Spot svítidla. MMX Blade z produkce Robe Lighting. Převzato z [42]

³Intenzita může dosahovat hodnoty až 900 000 luxů ve vzdálenosti 5 m od svítidla. Pro jednodušší porovnání - intenzita přímého slunečního záření je 150 000 luxů.



Obrázek 2.5: *Světelný paprsek pro velký výstupní úhel. Nasvícení scény Královské akademie divadelních umění v Londýně. Převzato z [42]*

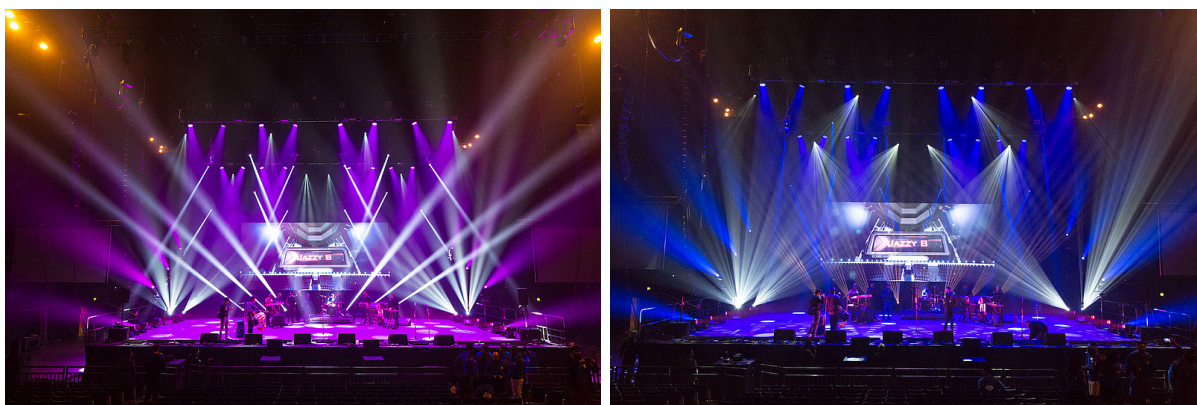
Druhou funkcí Spot svítidla je vytvoření obrazu zařazením rovinného předmětu do roviny ostření. Je možné tak docílit dvou efektů. Prvním z nich je prosté vytvoření obrazu stínítka, jak je patrné na obrázku 2.6A). Obraz je zde vytvořen v rovině podlahy jeviště. Zároveň je přítomen i druhý - prostorový efekt viz. obrázek 2.6B). V difuzním prostředí lze tento efekt vidět po celé délce a ne jen v rovině obrazu. Vlivem tvaru předmětu se výstupní paprsek po určité vzdálenosti od svítidla rozdělí na několik menších paprsků. Zobrazením jiných předmětů lze dosahovat nepřeborného množství tvarů, některé lze vidět na předchozích obrázcích 2.2 a 2.7.

Třetí funkcí Spot svítidla je možnost nastavením ohniskové vzdálenosti objektivu měnit zorný úhel. Změna ohniskové vzdálenosti je spojitá. Typický rozsah projekčních vzdáleností se pohybuje v rozsahu 3 m až nekonečno. Změnou ohniskové vzdálenosti objektivu dojde i ke změně roviny ostření, jelikož je v zařízení použit varifokální objektiv [26, 35]. Příklad objektivu v nastavení s malou ohniskovou vzdáleností a velkým výstupním úhlem je na obrázku 2.5.

2.1. CHARAKTERIZACE OSVĚTLOVACÍCH SYSTÉMŮ



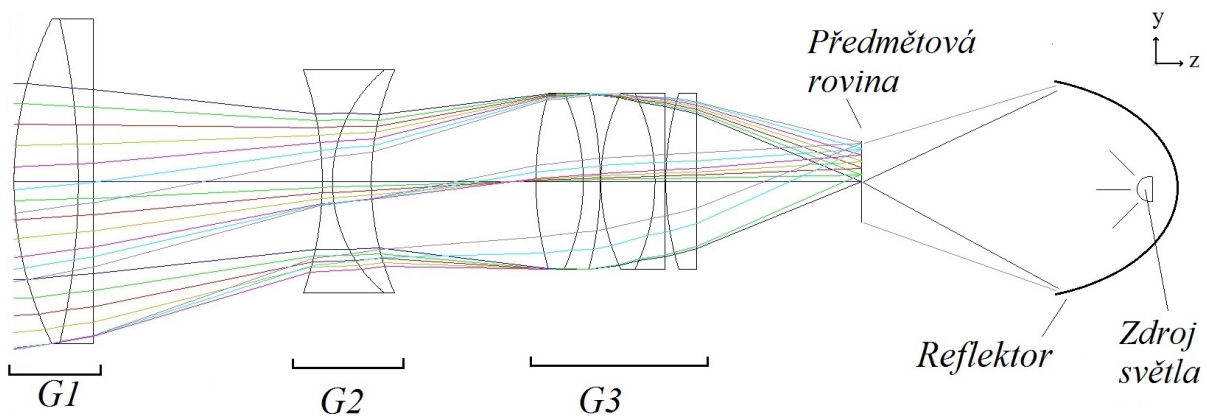
Obrázek 2.6: Příklad zobrazení předmětu ve tvaru mřížky, takzvaného Goba [4], v lehce difuzním prostředí. Vyfoceno v divadle Colliseum v Madridu. A) Zobrazení na rovinu. B) Zobrazení v prostoru. Upraveno podle [42]



Obrázek 2.7: Shodná scéna. Minimální úhel (vlevo). Použití Goba (vpravo) pro dosažení prostoro-
vého efektu. Příklad použití spot světel na představení v aréně Wembley v Londýně.

Optika

Ve Spot svítidlech je použita optická soustava skládající se ze zdroje světla - LED zdroje či metal-halidové výbojky, eliptického reflektoru a objektivu s proměnlivou ohniskovou vzdáleností. Jedná se o takzvaný *varifokální objektiv* (viz. kapitola 2.2.3). Jak je patrné z obrázku 2.8, varifokální objektiv pro projekční účely se skládá ze tří členů: G_1 s kladnou ohniskovou vzdáleností, G_2 se zápornou ohniskovou vzdáleností a G_3 s kladnou ohniskovou vzdáleností. Člen G_1 je nepohyblivý, členy G_2 a G_3 jsou pohyblivé v lineární ose shodné s optickou osou. Pohyb členu G_2 slouží ke změně ohniskové vzdálenosti a nazývá se *variátor*⁴ [16]. Člen G_3 se nazývá *kompensátor* [16] a slouží ke změně roviny ostření, jak v předmětové, tak v obrazové rovině. Do předmětového prostoru se umísťuje více předmětů (až čtyři možné roviny v rozmezí 20 mm), na které je možné ostřit objektivem a zobrazit je do projekční vzdálenosti tří metrů až nekonečno s možností pětinasobné změny zvětšení [42]. Objektivy s více pohyblivými členy, které jsou standardní v projekční a zobrazovací fotografické optice, se v osvětlovací technice téměř nepoužívají [2] - především díky vyšším nákladům a složitému mechanismu změny ohniskové vzdálenosti a ostření. Koncept pouze se dvěma pohyblivými členy má výhodu, že změna ohniskové vzdálenosti a změna roviny ostření je kontrolována pouze pohybem jednoho členu. V případě, že se soustava skládá z více pohyblivých členů, je nutné pohyb některých členů svázat mechanicky a ovládat je pouze jedním motorem, a nebo použít motor pro každý člen zvlášť a svázat vzájemný pohyb softwarově. Oba případy vedou ke komplikacím, zvýšené ceně a náročnosti na výrobu.



Obrázek 2.8: Schéma optické osy spot svítidla. Použitý varifokální objektiv je z produkce firmy Robe Lighting s.r.o.

Hodnotící kritéria kvality spot svítidla

Základní hodnocení kvality vychází z funkcí svítidla. Zákazník požaduje:

- Maximální intenzitu při nastavení nejmenšího výstupního úhlu.
- Možnost změny ohniskové vzdálenosti, standardem je čtyřnásobná nebo pětinasobná změna ohniskové vzdálenosti. Výjimkou není ani devítinasobná.

⁴Můžeme nalézt i pod synonymem „varifokátor“.

- Dostatečnou kvalitu projekce. To znamená dodržení dostatečného kontrastu obrazu, velikosti zbytkových vad a velikosti zkreslení (především u divadelních aplikací).
- Definované rozložení intenzity. V tomto případě záleží na současném trendu. Jednou variantou je homogenní rozložení intenzity ve výstupním paprsku a druhou je vytvoření takzvaného „hotspotu“ - značného nárůstu intenzity ve středu oproti okrajům světelného svazku.

2.1.3. Beam

Hlavním účelem Beam zařízení je možnost vytvoření intenzivního úzkého paprsku světla. Existují tři metody, kterými je možné jej vyrobit.

- (a) První metoda spočívá v použití jednoduché optické soustavy, která vytváří obraz pouze při nastavení největší ohniskové vzdálenosti. Tím je dosaženo nejmenšího výstupního úhlu světelného svazku a vznikne nám takzvaný „beam“⁵. Při zvětšení výstupního úhlu paprsku kresba úplně zaniká a zařízení funguje jako Wash.



- (b) Druhá metoda pracuje s částečným (nedokonalým) vytvořením obrazu v celém rozsahu změny ohniskové vzdálenosti, které se docílí za použití jednoduché varifokální soustavy. Typické je použití Fresnelovy čočky jako výstupní čočky. Zobrazením goba pak lze vytvářet jistý prostorový efekt, ale mluvit o klasické projekci již může být kontroverzní díky výrazným vadám.

Obrázek 2.9: Beam svítidlo. Od zařízení typu Spot jej lze na první pohled odlišit díky použití Fresnelovy čočky v předním členu optiky. Převzato z [42]

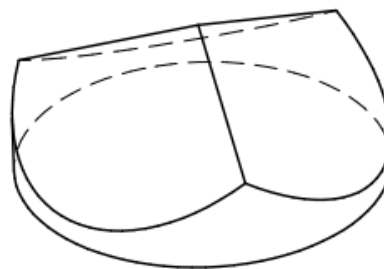
- (c) Třetí metoda zahrnuje použití složitějšího objektivu se zvětšeným průměrem přední optiky (až 200 mm). Lze tím dosáhnout podstatně větších světlostí za cenu výrazného zhoršení kvality obrazu. Do optické cesty je úmyslně vloženo difúzní sklíčko, čímž jsou „zamaskovány“ vzniklé vady. Ačkoliv zařazením difuzoru přijdeme o tvorbu obrazu, získáme velice účinné zařízení se světelným objektivem s možností měnit výstupní úhel paprsku a tvarovat jej pomocí goba.

Nekontrastní okraje jsou u beam svítidel akceptovatelné a do jisté míry se dá říct, že i žádoucí. Typické jsou velké průměry výstupní optiky a použití Fresnelových čoček. Fresnelovy čočky jsou při průměru výstupní optiky přes 150 mm velkou výhodou oproti klasickým skleněným čočkám díky své nízké váze.

⁵Pozn. anglicky „Beam“ = svazek paprsků.

2.1.4. Efekt

Efektová zařízení jsou speciálním druhem Spot či Wash svítidel. Liší se na základě faktu, že na úkor svítivosti vytvářejí prostorový světelný efekt. Efektem může být například rozdělení svazku paprsků pomocí *prismy* - optického hranolu. Pomocí prismy se světelný svazek paprsků rozdělí na více svazků o nižší svítivosti. Zařazením prizmy z obrázku 2.10 do optické soustavy docílíme rozdělení výstupních paprsků na tři paprsky, kde jeden má přibližně 1/3 intenzity původního paprsku. Podobných efektů je možné dosáhnout zařazením goba, prisma ale neblokuje žádné paprsky a má lepší účinnost. Samotná efektová svítidla a i jednotlivé efekty lze rozdělit na statické a dynamické. Statický efekt vytváří atmosféru, dynamický efekt vytváří rytmus. Příkladem statického efektu může být zobrazení goba na projekční plochu. Dynamickým efektem by potom bylo jeho *strobování* - rychlé rozsvěcování/zhasínání, nebo jeho rotace docílená mechanickou rotací goba [32].



Obrázek 2.10: Schéma třífasetové prizmy pro rozdělení světelného svazku. [42]

Již v úvodu bylo zmíněno, že současná „highendová“ svítidla jsou multifunkční - mohou být schopna pracovat jako všechny čtyři typy výše zmíněných zařízení. Množství obsažených efektů zvyšuje úspěšnost svítidla.

2.2. Rozdělení podle funkce

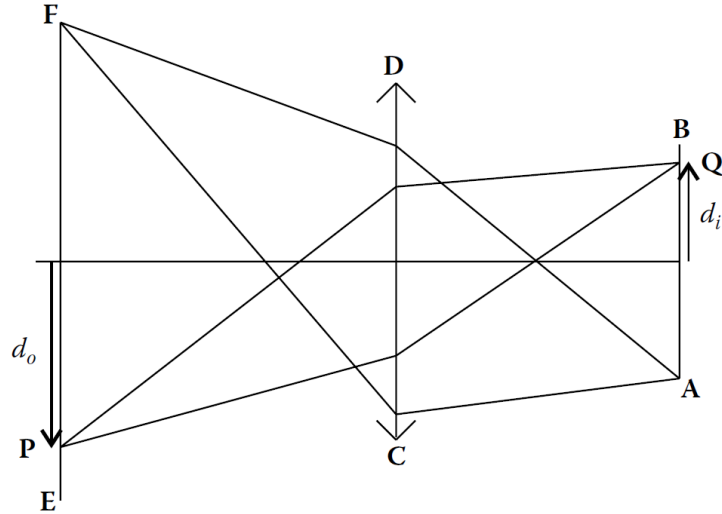
2.2.1. Zobrazovací optika

Zobrazovací optika se skládá ze skupiny lámavých a odrazných ploch, které obecně bývají rotačně symetrické a mají společnou optickou osu. Celý zobrazovací systém se potom skládá ze tří částí: předmětu, optiky a obrazu. Světlo z předmětu (nebo jeho část) se láme a odráží podle zákonu geometrické optiky za účelem vytvoření jeho obrazu [23, 6].

Tento systém lze podle Chavése a Goodmana [6, 11] definovat následovně. Předmět vnímáme jako skupinu bodů, které vyzařují světlo v určitém směru. Světlo z každého bodu (a nebo jen jeho část) je zachyceno optikou a soustředěno na příslušný bod obrazu. Uvažujeme-li případ na obrázku 2.11, tak každý bod **P** ležící na předmětu **EF** se zobrazí optikou **CD** jako **Q** na obraz **AB** tak, že pro vzdálenosti d_0 a d_i platí rovnice [6]:

$$d_i = M d_0 \quad (2.1)$$

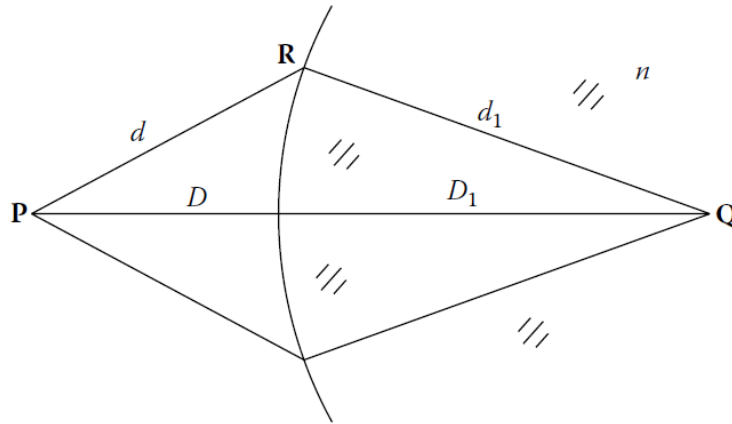
M je zvětšení optické soustavy. Vztah 2.1 zaručí vytvoření obrazu v obrazové rovině.



Obrázek 2.11: Schéma zobrazovací optiky. EF je předmět, CD zobrazovací optika a AB je obraz. Pro krajní body platí, že E se zobrazí na B a F se zobrazí na A . Převzato z [6]

2.2.2. Nezobrazovací optika

Pro správnou definici nezobrazovací optiky musíme začít od začátku. Začneme od zobrazení jednoho bodu optickou plochou. K tomu se dá využít Descartesův ovál (*Cartesian oval*) [24] viz. obrázek 2.12, který nám zaručí zobrazení bodu P do Q bez sférické vady.

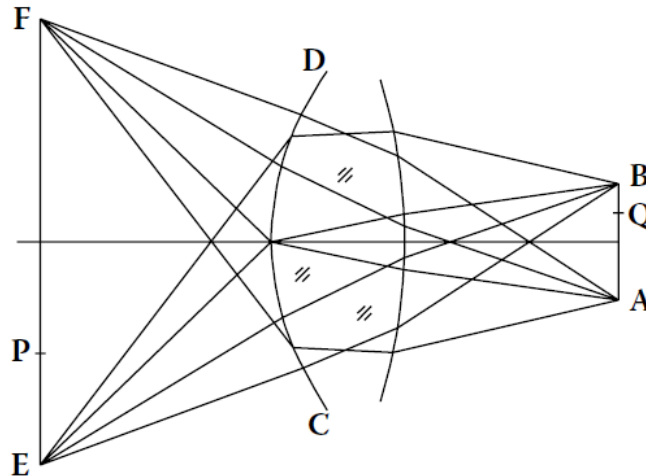


Obrázek 2.12: Descartesův ovál. Upraveno podle [6]

Chceme-li zobrazit další bod, není již stejný ovál dostačující a musíme přidat další plochu. Nyní jsme dostali optickou soustavu z obrázku 2.13, která zaručuje zobrazení dvou bodů EF optickou soustavou CD na AB . Tato podmínka ale neplatí pro obecnou dvojici bodů P a Q jako v případě zobrazovací optiky. Bez splnění této podmínky nedojde k vytvoření obrazu a mluvíme o nezobrazovací optice. Nicméně i přes absenci tvorby obrazu má soustava důležitou vlastnost, že veškeré světlo vycházející mezi body E a F je přeneseno optikou CD do prostoru mezi A a B .

Paprsky vycházející z E a F se nazývají okrajové paprsky, EF se nazývá zdroj světla a AB se může nazývat například povrch přijímače (*Receiver*) [6].

Pro vytvoření zobrazovacího systému je nutné dodržení mnoha podmínek. Tím je určena náročnost takového návrhu. Abychom mohli zaručit dokonalé zobrazení všech bodů



Obrázek 2.13: Schéma nezobrazovací optiky. Převzato z [6]

předmětu, museli bychom použít velice složitý systém, který by mohl mít eventuálně až nekonečné množství čoček [39]. V praxi není žádná optika dokonalá vlivem zbytkových aberací. Optický návrhář musí navrhnout parametry optiky tak, aby splňovala všechny požadavky pro účel použití [23]. Pokud tvorbu obrazu nepožadujeme a jde nám pouze o přenesení energie ze zdroje, stačí dodržet podmínku okrajových paprsků a optický systém je tím pádem mnohem jednodušší a pouze s pomocí několika proměnných lze dosáhnout ideálního výsledku [6]. Toho se využívá při návrhu osvětlovacích systémů, kondenzorů, kolimátorů a pod.

Nezobrazovací optika je zde uvedena z několika důvodů. Předmětem práce je návrh objektivu pro osvětlovací účely, což je obecně bráno jako aplikace nezobrazovací optiky. Proto budeme objektiv navrhovat v souladu s některými podmínkami nezobrazovací optiky. Konkrétně se zaměříme se na maximální sběr světla z osvětleného předmětu. Aby nedošlo k omylu musíme zdůraznit, že navrhovaný objektiv je zobrazovací soustava a budeme v jeho návrhu požadovat podmínku tvorby obrazu. Návrh se tím pádem stane mnohem složitějším. Díky výše zmíněným vlastnostem se nám ale budou hodit některé vztahy z nezobrazovací optiky. Jedná se o Etendue podmínku a návrh pomocí okrajových paprsků. Zvolení zdroje světla, způsob sběru světla a osvětlení předmětu, míchání barev, rozložení intenzity a homogenita v obrazové rovině, to vše jsou další netriviální problémy optického návrhu nezobrazovací optiky. Jejich návrh a optimalizace značně ovlivňují výsledné vlastnosti celého osvětlovacího zařízení. Díky jejich důležitosti se o nich v této práci zmíníme, ale jen okrajově v částech 4 a 5.3.

V práci se nezabýváme návrhem reflektoru pro sběr světla, který je po návrhu projekčního objektivu dalším tématem pro náš výzkum. Pro jeho budoucí návrh jsme ale máme připravené podklady, především detailní rozbor podmínky Etendue, kterou při návrhu budeme využívat.

2.2.3. Zoom systém

Zoom systém je optická soustava, která posuvem jednoho nebo více členů dokáže změnit svou ohniskovou vzdálenost. Tato změna je plynulá a soustava si zachovává dostatečnou kvalitu obrazu po celé délce změny své ohniskové vzdálenosti. Zároveň se při změně ohniskové vzdálenosti nemění poloha obrazu ani poloha pupil a aperturní clony [20, 22, 36, 25]. Zoom čočky se pak dále dělí na základě jeho optické a mechanické konstrukce.

Existuje ještě jedna skupina čoček, která dokáže změnit ohniskovou vzdálenost na základě změny svého tvaru, například po průchodu elektrického proudu. Tento druh čoček se nazývá *adaptivní optika* [25]. Touto skupinou čoček se však nebudeme zabývat.

Opticky kompenzovaný zoom systém

Změna ohniskové vzdálenosti se provádí pohybem dvou nebo více členů, jež se pohybují společně (jejich pohyb je mechanicky svázán k sobě). Systém musí být navržen tak, aby se poloha obrazové roviny měnila jen minimálně, to znamená méně je než hloubka ostrosti. Takový systém je velice výhodný kvůli nízké mechanické náročnosti pohybu. Nicméně bývá obecně větší, než mechanicky kompenzovaný systém [20, 22, 36]. Pro zaostření na blízký předmět je nutné provést posuv některé z vnitřních čoček.

Mechanicky kompenzovaný zoom systém

Při změně ohniskové vzdálenosti se minimálně jeden člen pohybuje nelineárně vůči ostatním pohybujícím se členům. Poloha tohoto členu musí být zajištěna mechanicky - odtud vychází název systému. Mechanická konstrukce je složitá z hlediska návrhu a přesnosti výroby a montáže.

Varifokální systém

V rámci optického návrhu se jedná o mechanicky kompenzovaný zoom systém. Liší se z mechanického hlediska odebráním mechanismu pro zachování polohy obrazové roviny [36]. Tím se celý systém značně zjednoduší. Běžně se používá v aplikacích, kde není nutné zachování polohy obrazové roviny, jako je projekční optika, nebo pro některé fotografické objektivy. Pro použití v kamerovém objektivu by tato konstrukce nebyla vhodná. Při natáčení videa nemáme prostor na přeastření objektivu při změně zoomu.

3. METODIKA HODNOCENÍ OPTICKÝCH SOUSTAV

3.1. Etendue

Jedná se o převzatý název z francouzského slova *Étendue*, které v překladu znamená „rozsah, rozloha“ či „rozměr“. Etendue je hojně využívaná vlastnost světla a typická aplikace nezobrazovací optiky [2, 6, 39]. Ve své podstatě popisuje tvar a směr šíření světla při průchodu optickou soustavou. Vyskytuje se i pod jinými názvy jako „*acceptance*“, „*extent*“, „*Lagrange invariant*“, „*optical invariant*“ nebo „*throughput*“ [2, 39].

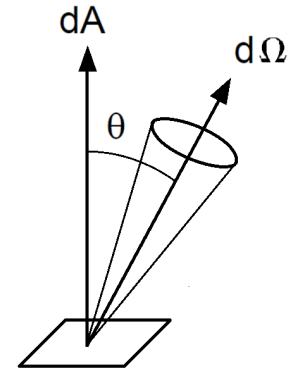
3.1.1. Etendue v obecném tvaru

Definice [34]:

$$E = \int dU = \iiint\int dx dy dp dq = \iint n^2 dA \cos\theta d\Omega \quad (3.1)$$

Kde n je index lomu, dA je elementární ploška, θ odchylka prostorového úhlu od normály a $d\Omega$ element prostorového úhlu.

Podmínka zachování Etendue (*Etendue conservation*) hraje významnou roli nejen v nezobrazovací optice, ale i klasické mechanice, radiometrii a fotometrii, termodynamice a přenosu tepla. My jej využijeme v návrhu objektivu při volbě minimálního výstupního úhlu, světelnosti a při určení maximálního průměru optiky viz. odstavce 4.1.3 a kapitola 5.3. V literatuře se často vyskytuje jen intuitivní odvození bez důkazu, že tento vztah musí platit a že je Etendue neměnné v celé optické soustavě a nemůže se zmenšit [6, 36]. Vzhledem k jisté absenci pojmu v české literatuře se pokusíme uvést rigorózní odvození neměnnosti Etendue v optické soustavě v obecném tvaru (*Generalised Etendue*) podle [1, 2, 6, 39]. Odvození je vhodné pro lepší pochopení Etendue, ale samotný matematický postup důkazu není přímo důležitý pro tuto práci a uvádíme jej jen v dodatku A.



Obrázek 3.1: *Etendue*. Vztah mezi dA , θ a $d\Omega$.

V našem případě budeme počítat Etendue na ploše stínítka a čočky. Správně bychom měli využít vztah 3.3 definující Etendue a výslednou hodnotu získat integrací přes celou plochu. To je sice možné, ale zdoluhavé a pro běžnou práci značně složité. Zároveň by i přes veškerou snahu nebyly výsledky přesné díky některým faktorům, které nejsou v rovnici zahrnuty. Nezmínili jsme se o faktu, že hodnota Etendue může při průchodu optickou soustavou vzrůst, nikoliv však klesnout. Typickým příkladem je například použití difuzoru, který zvětší úhly paprsků a tím pádem i hodnotu dU . I když se ale vyhneme použití difuzoru, vnáší nám nepřesnost fakt, že Etendue nepočítá s vadami čoček a uvažuje dokonalé zobrazení. To může (převážně v nezobrazovací optice, kde nejsou vady korigované) hrát významnou roli, jelikož se každý bod zobrazí jako ploška a zvýší tím hodnotu Eten-

due. Pro přesný výpočet musíme uvažovat malé úhly a nebo dobře korigovanou optickou soustavu [2].

3.1.2. Etendue pro rotačně symetrickou plochu

Nyní použijeme rovnici obecného Etendue 3.3 a upravme si jej pro běžný výpočet. Využíváme rotační symetrie soustavy - povrch osvětleného předmětu (goba) je rotačně symetrická plocha, což nám značně usnadnilo integraci. Dostáváme:

$$E = nS_o \sin(\theta) \sin(\Phi) \quad (3.2)$$

kde θ je horizontální úhel, Φ vertikální úhel a S_o je povrch. Pro rovnoměrné pokrytí je $\theta = \Phi = \alpha$ a platí:

$$\begin{aligned} nS_o \sin^2(\alpha) &= n'S'_o \sin^2(\alpha') \\ \pi r^2 \sin^2(\alpha) &= \pi r'^2 \sin^2(\alpha') \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$r' = \sqrt{\frac{r^2 \sin^2(\alpha)}{\sin^2(\alpha')}} = \frac{r \sin(\alpha)}{\sin(\alpha')}$$

$$r' = \frac{r \sin(\alpha)}{\sin(\alpha')} ; \quad \alpha = \arcsin \frac{r' \sin(\alpha')}{r}$$

Tímto jsme dostali vzorec pro výpočet průměru (resp. poloměru) optiky r' , kde r je poloměr goba, α úhel světla vystupujícího z goba a α' výstupní úhel zařízení. Všimněme si, že jsme odvodili vztah pro *Lagrangeův invariant*.

V kombinaci s rovnicí pro výpočet clonového čísla [36]

$$F/\# = \frac{\text{průměr vstupní pupily}}{\text{ohnisková vzdálenost}} = \frac{2 \cdot r'}{f} \quad (3.4)$$

dostáváme nástroj pro výpočet průměr maximálního průměru optiky a maximální numerické apertury pro námi zvolené clonové číslo, jelikož hodnoty α , r , $F/\#$, f známe.

3.2. Hodnocení kvality návrhu

Zobrazovací vlastnosti optických systémů jsou reprezentovány různými grafy. Ty jsou součástí softwaru pro optický návrh [28]. Podle těchto grafů lze určit jak velikost jednotlivých aberací, tak celkovou kvalitu soustavy a její ostrost. Velikost aberací i kvalitu lze odečíst z aberačních grafů (*aberration plots*). Pro určení kvality také slouží funkce přenosu kontrastu MTF (*MTF - Modul transfer function*) [19]. Názvy a styl grafů jsou převzaty ze softwaru Zemax, jelikož ten je použit pro optický návrh v praktické části. U těchto grafů zachováme původní vzhled a nebudeme je překládat, jedná se o standardní formu grafů a software není v českém jazyce dostupný.

Funkce přenosu kontrastu MTF

MTF je nejčastěji používaným kritériem hodnocení kvality optických soustav pro obecné zobrazovací účely. OTF (*Optical transfer function*) je poměr kontrastu obrazu ku kontrastu předmětu. Graf MTF je pak závislost OTF na frekvenci (udávané v počtu zobrazených čar na milimetr).

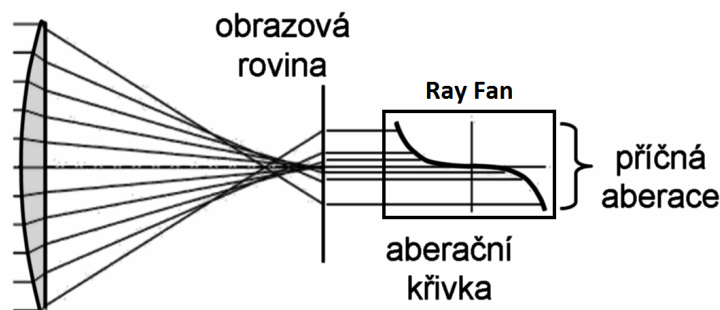
$$\text{OTF} = \frac{\text{Kontrast obrazu}}{\text{Kontrast předmětu}} \quad (3.5)$$

$$\text{Kontrast} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (3.6)$$

Kde $I_{\max}$ je maximální intenzita a $I_{\min}$ je minimální intenzita. Příklady MTF nachází nejlepším využití u dobře korigovaných soustav.

Ray Fan

Ray Fan udává velikost příčných aberací v závislosti na pupile (a vlnové délce světla). Tento graf poskytuje kompletní informace o druhu, stupni a o relativním přínosu jednotlivých vad a také o celkové kvalitě návrhu. Je nedocenitelnou pomůckou pro optického návrháře [27]. Číst z tohoto grafu ovšem není jednoduché a optický návrhář musí mít mnoho zkušeností, aby z něj ihned rozpoznal přínos sférické vady, astigmatismu, komy, zklenutí pole, barevné vady polohy a barevné vady velikosti obrazu. V mnoha případech může také určit stupeň vady [9]. Skýtá také výhody oproti MTF. První výhodou je možnost rozpoznání druhu vad, které přispívají ke zhoršení obrazu, což MTF neumožňuje. Druhou výhodou je rychlost vykreslení tohoto grafu. Na obrázku 3.2 můžeme vidět, jakým způsobem Ray Fan vzniká.

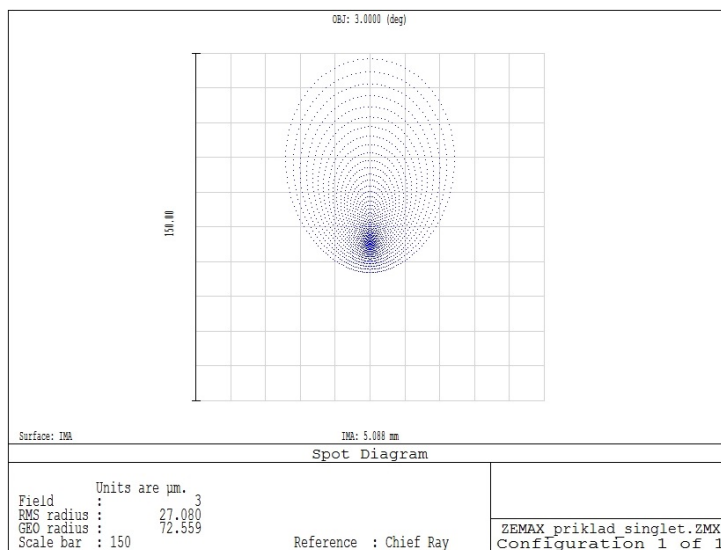


Obrázek 3.2: Graf příčných aberací pro nekorigovanou sférickou vadu, takzvaný Ray Fan. Převzato z [28]

Spot diagram

Spot diagram se snaží vytvořit vizuální interpretaci tvaru rozmazané plošky vzniklé v obrazové rovině po zobrazení bodového zdroje optickou soustavou. Vzniká protrasováním několika stovek až tisíců paprsků [33]. Z tohoto grafu je někdy u reálných soustav složité rozpoznat o jaké aberace se jedná [19]. Reálný tvar se totiž často liší od učebnicových příkladů. Důležitou funkcí grafu je určení průměru spotu¹. Z velikosti spotů lze vyčíslit, jak kvalitní je optická soustava a jak moc se blíží fyzikálně dokonalé soustavě, u které jsou hodnoty aberací pod difrakčním limitem² [28].

Zemax uvádí dva druhy spotu. Prvním druhem je *RMS Spot* (*Root Mean Square*), který udává velikost průměru kroužku vzniklého aritmetickým průměrem polohy všech bodů Spot diagramu. V této oblasti je soustředěna většina paprsků. Dalším druhem je *GEO spot*, který udává maximální průměr spotu.



Obrázek 3.3: Příklad Spot diagramu pro mimoosový paprsek. Dává přehled o tvaru obrazu bodového zdroje, kvalitě zobrazení a vlivu jednotlivých aberací.

Zklenutí a zkreslení

Graf příčných aberací Ray Fan je velmi silný nástroj pro analýzu aberací optické soustavy. I přesto však existují situace, kde je vhodné analyzovat podélné aberace. Dobrým příkladem je zklenutí pole a astigmatismus, které jsou lépe viditelné právě v grafech podélných aberací [12]. Graf *zklenutí pole* (*Field Curvature*) je graf závislosti podélných aberací na poloměru obrazu. Graf *zkreslení* (*Distortion*) je závislost procentuální velikosti zkreslení na velikosti pole (předmětu).

Longitudinal Aberration

Jedná se o graf závislosti velikosti podélných aberací na pupile (a vlnové délce světla).

Clonové číslo (*F-number*, $F/\#$)

Základní parametr objektivu používaný pro hodnocení světelnosti objektivu. Je definován jako poměr ohniskové vzdálenosti f a průměru výstupní pupily D .

$$F/\# = \frac{f}{D} \quad (3.7)$$

¹spot je obraz bodového zdroje popsáný v úvodu tohoto odstavce, český ekvivalent k tomuto pojmu neexistuje, běžně se používá název *spot*

²difrakční limit je určen takzvaným *Airiho kroužkem* (*diskem*) minimální velikost spotu daná difrakcí na kruhové objímce optiky [20, 9, 12, 19]

3.3. OPTICKÉ ABERACE A ZPŮSOB JEJICH ROZPOZNÁNÍ V NÁVRHU

V Zemaxu nalezneme parametr světelnosti v Systémových datech: Reports → System data → F/#.

3.3. Optické aberace a způsob jejich rozpoznání v návrhu

V následující kapitole se zaměříme na popis vad, se kterými se při návrhu objektivu potýkáme. Jedná se o rozsáhlé téma a bylo o něm napsáno mnoho knih. Popis jednotlivých aberací je velice dobře zpracovaný a jednoduše dohledatelný např. v [20, 22, 17, 10, 21, 23, 19] a dalších. Jelikož se při návrhu s jednotlivými aberacemi setkávat budeme, místy intenzivně, považuji za vhodné se o nich v této práci zmínit. Z výše uvedených důvodů se více zaměříme na jejich praktický význam a rozpoznání v optickém návrhu.

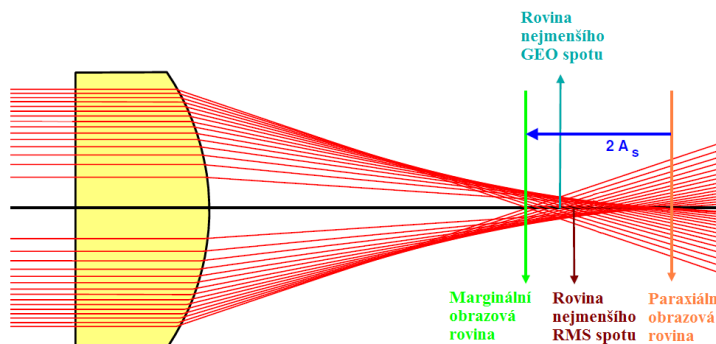
Optické vady lze kategorizovat do několika skupin a to na *příčné* a *podélné* vady, nebo na vady *geometrické* a vady *vlnoplochy*. Dále na vady pro osový nebo mimoosový bod. Pro účely této práce provedeme dělení vad na do dvou skupin a to na vady *monochromatické* a vady *barevné*. Monochromatické se dále dělí na *vady ostrosti obrazu* a *vady měřítka zobrazení (zkreslení)* [31]. Monochromatické vady vznikají díky použití sférických čoček a díky přirozené tendenci optiky zakřívovat obrazovou rovinu. Se vzrůstajícím polem nebo průměrem pupily dochází k větším odchylkám od ideálního zobrazení. Bod se díky tomu zobrazí jako rozostřená ploška [20, 17].

Druhou skupinu tvoří barevné vady, které vznikají v optické soustavě díky závislosti indexu lomu na vlnové délce světla. Tento fyzikální jev se nazývá *disperze*. Obecně platí, že index lomu materiálu roste se zkracující se vlnovou délkou světla [36].

Měříme-li aberace podél optické osy, mluvíme o *podélných aberacích (longitudinal aberration)*. My budeme častěji určovat *příčné aberace (lateral/transverse aberrations)*, které si můžeme jednoduše představit jako poloměr rozmazané plošky vzniklé zobrazením bodového zdroje optickou soustavou [9, 6].

3.3.1. Sfěrická vada

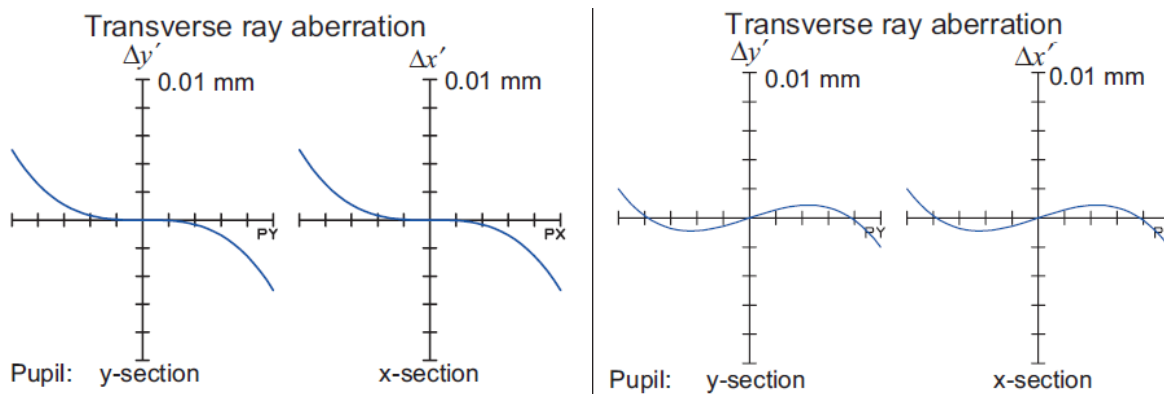
Světlo dopadající na sférickou optickou plochu infinitezimálně blízko optické osy se zobrazí do polohy paraxiální obrazové roviny. Pro široce rozevřené svazky paprsků je poloha ohniska funkcí dopadové výšky paprsku na optickou plochu [31]. Pokud je sférická vada takzvaně *podkorigovaná*, vzdálenost ohniska se zmenšuje s rostoucí dopadovou výškou (nastává pro kladnou čočku) viz. obrázek 3.4. Pokud je sférická vada *překorigovaná*, vzdálenost ohniska naopak roste s rostoucí dopadovou výškou (nastává pro zápornou čočku).



Obrázek 3.4: Sfěrická vada. Upraveno podle [12]

Existuje několik metod korekce sférické vady. První metodou je zvýšení počtu lámavých ploch při zachování stejné optické mohutnosti. Tím docílíme zmenšení dopadového úhlu (*angle of incidence*) a tím pádem i korekce sférické vady. Obsáhlý, leč jednoduchý popis zmenšení sférické vady zvýšením počtu lámavých ploch lze najít v [9] nebo [12].

Další metodou pro zmenšení spotu vlivem sférické vady je aplikace *defokusu*. Mírným podostřením dosáhneme zmenšení RMS spotu³, jak lze vidět i z ray fanu⁴ níže 3.5. Tímto způsobem ovšem nedojde k samotné korekci vady, pouze jejího vlivu a ke zlepšení obrazu. To je vhodné pro optimalizaci finálního návrhu.



Obrázek 3.5: Ray fan pro paraxiálně zaostřenou soustavu (vlevo) a po mírném podostření stejné soustavy (vpravo). Z grafů lze odečíst, že se zmenšila maximální velikost spotu se asi na polovinu. Upraveno podle [14]

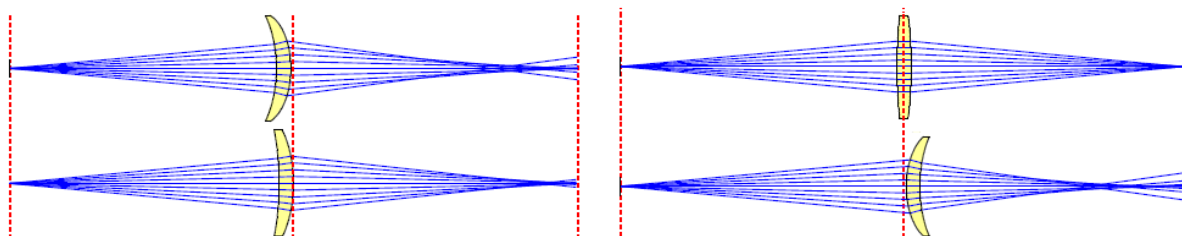
Dalším způsobem korekce je volba zakřivení čočky při zachování ohniskové vzdálenosti. Je známo, že je možno sférickou vadu plně korigovat (i překorigovat) soustavou čoček

³Spot diagram - graf polohy parsků po průchodu optickou soustavou. Více v podkapitole 2.1.2

⁴Graf závislosti dopadové výšky paprsku do roviny obrazu v závislosti na pupile. Více v kapitole 3.2

3.3. OPTICKÉ ABERACE A ZPŮSOB JEJICH ROZPOZNÁNÍ V NÁVRHU

stejného materiálu a různého zakřivení [9]. Pro korekci vady lze také použít nekorigovaná čočka v kombinaci s překorigovanou čočkou (rozptylkou) stejného materiálu [21]. Zajímavý příklad můžeme vidět na obrázku 3.6, kde jsou čtyři možná zakřivení singletu při zachování stejné ohniskové vzdálenosti. Jak je z obrázku patrné, každé zakřivení má jinou velikost sférické vady. Optický návrhář musí mít tyto vlastnosti čoček neustále na paměti, obzvláště při větších úpravách optické soustavy nebo při tvorbě počátečního návrhu pro další optimalizaci. V praxi se používá kombinace metod nazývaná „power splitting“. Pro



Obrázek 3.6: Sférická vada. Upraveno podle [12]

korekci sférické vady se čočka rozdělí na dvě a druhá čočka se vhodně zakříví, aby došlo ke korekci [15].

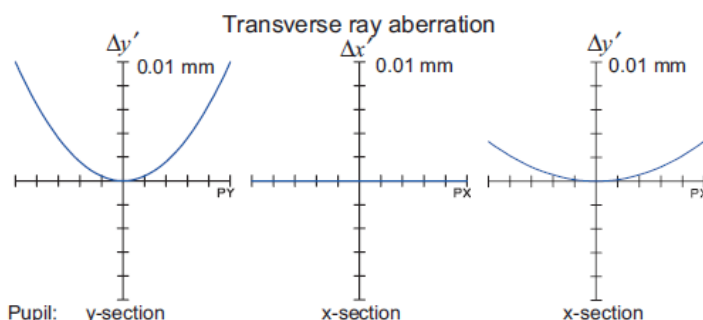
Pro doplnění můžeme uvést ještě jednu metodu korekce sférické vady. Tou je správné nastavení materiálu, kde lze také dosáhnout lepších výsledků s nižší hodnotou sférické vady. Příklady a vliv lze najít v [12, 15]

3.3.2. Koma

Nyní uvažujme i mimoosové paprsky. Na komu se dá pohlížet jako na změnu zvětšení v závislosti na poloze zóny pupily⁵ [20]. Jedná se o nesymetrickou sférickou aberaci způsobenou širokým mimoosovým paprskem.

Pomocí ray fanu se dá primární koma identifikovat díky typickým vlastnostem [23, 12], těmi jsou:

- typický průběh ray fanu (srovnání sférické vady na obr. 3.5 a komy na obr. 3.7).
- x -ový přínos v sagitální rovině je pro příčné aberace roven nule
- koma jako jediná aberace má přínos v y -ovém směru v sagitální rovině
- v tangenciální rovině roste koma s polynomem druhého stupně (třetího pro podélné aberace)



Obrázek 3.7: Ray Fan - koma. Upraveno podle [12]

⁵Množina bodů se stejnou vzdáleností od středu pupily viz. 3.8.

3.3. OPTICKÉ ABERACE A ZPŮSOB JEJICH ROZPOZNÁNÍ V NÁVRHU

Další vlastnost se projevuje ve spot diagramu, kde má koma typický průběh spotu viz. obrázek 3.8 vpravo. Odtud také, jak je známo, pochází název „koma“, jelikož spot diagram připomíná kometu. Na obrázku 3.8 vlevo vidíme jednotlivé zóny pupily a vpravo jejich příspěvek ve spot diagramu. Jednotlivé zóny doslova vytváří kruh ve spot diagramu, který se zvětšuje s rostoucí polohou v pupile. Většina paprsků (55%) je soustředěno v první třetině, to znamená ve špičce komy [13].

Příspěvek tangenciální a sagitální komy lze opět vidět na obrázku 3.8 vpravo. Sagitální koma tvoří asi třetinu celkového příspěvku [12] komy (označena červenou šipkou). Tangenciální příspěvek označen modrou šipkou. Koma se dělí na kladnou a zápornou, podle orientace „chvostu“ ve spot diagramu. Zakřivení čoček má vliv na směr orientace komy. [?kinder?].

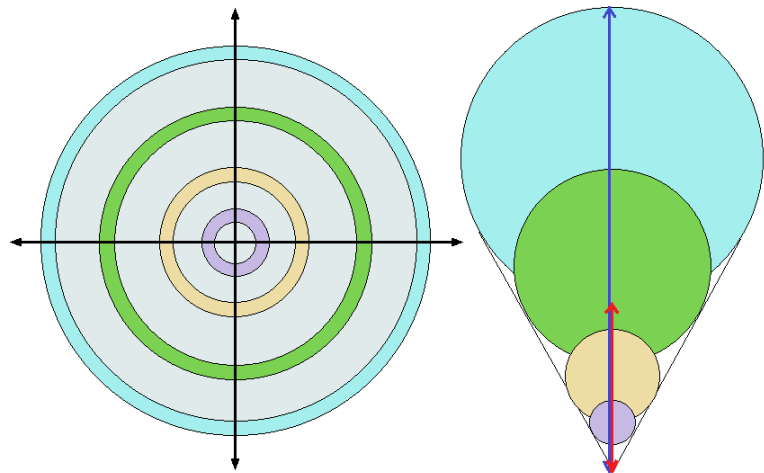
Pro systémy s velkým zorným úhlem je složité komu korigovat [12, 14]

Koma má nejmenší velikost spotu v paraxiální obrazové rovině. Defokusem se nedá zlepšit velikost spotu tak jak tomu bylo v případě sférické vady v podkapitole 3.3.1.

Optimalizovat velikost komy lze následujícím způsobem [15]:

- volbou zakřivení čoček (hraje významnou roli),
- nastavením polohy pupily,
- nahrazení tmelených dubletů dublety se vzduchovou mezerou⁶,
- volbou optických skel,
- využitím symetrie optické soustavy.

Dlaší metoda korekce komy spočívá v přidání nové optické plochy, která se nastaví tak, aby vytvářela komu s opačnou orientací. Tím se zredukuje celková hodnota komy v systému [19].



Obrázek 3.8: Vlevo vidíme plochu pupily. Jednotlivé zóny pupily jsou označeny barevně. Jejich příspěvek ve spot diagramu komy je vidět vpravo na grafu spotu.

⁶Rozdělením tmelených dubletů vytvoříme dva nové stupně volnosti. Nevýhodou při použití úzké vzduchové mezery je citlivost na přesné uložení.

3.3.3. Astigmatismus a zklenutí pole

Astigmatismus vzniká díky rozdílným rovinám ostření v tangenciální a sagitální rovině jako funkce velikosti předmětu [23, 12, 21]. Velikost astigmatismu je jejich podélný rozdíl. Zklenutí pole odráží přirozenou tendenci optických systémů mít zakřivenou obrazovou rovinu, tak jak je tomu například v lidském oku. Udává tedy vztah mezi velikostí předmětu a pro něj příslušným zakřivením obrazu v tangenciální a sagitální rovině. Astigmatismus a zklenutí se často uvádějí společně. Při návrhu se odečítají ze stejného grafu (*Field curvature*).

Korekce astigmatismu lze dosáhnout nastavením polohy clony a také nastavením mezer mezi čočkami. Pro jednu čočku vyústí korekce astigmatismu v nárůst velikosti komy a sférické vady, proto je nutné použít více čoček [19]. Korekcí astigmatismu nedocílíme současně korekce zklenutí pole [15].

Astigmatismus není způsoben nepřesností výroby. [13]

Korekce zklenutí přímo souvisí s takzvanou *Petzvalovou plochou*. Její poloměr r_P je pro k tenkých čoček dán *Petzvalovým součtem* [31]:

$$\frac{1}{r_P} = \sum_{x=1}^k \frac{1}{n_x f'_x} \quad (3.8)$$

Nulový součet nebo hodnota blízko nule znamená vyrovnané obrazové pole [31].

Existují tři techniky pro korekci zklenutí. První technika využívá nastavení indexu lomu pro snížení Petzvalova součtu. Kombinací kladné čočky s vysokým indexem lomu a záporné čočky s nízkým indexem lomu dosáhneme podstatně nižší hodnoty Petzvalova součtu, než při použití jedné čočky. Následkem je velké zakřivení čoček a proto se v praxi používá jen zřídka.

Druhým způsobem korekce je použití dvou čoček o optické mohutnosti $+K_1$ a $-K_1$ (se stejnou mohutností, ale opačným znaménkem), které jsou od sebe ve vzdálenosti d . Tento systém dvou čoček má kladnou optickou mohutnost, ale Petzvalova suma je rovna nule [19].

Třetí způsob je založen na použití tlusté meniskové čočky. Použijeme-li stejné zakřivení na obou stranách čočky, je Petzvalův součet roven nule, ale optická mohutnost je kladná. Je zřejmé, že zde máme metodu návrhu čočky s kladnou ohniskovou vzdáleností a nulovým Petzvalovým součtem, která může být použita pro snížení celkové hodnoty Petzvalovy sumy u soustav s kladnou ohniskovou vzdáleností. Hlavní nevýhodou tohoto principu je ale fakt, že čočka musí být velice tlustá, aby byla korekce dostatečná. Tlustá čočka je drahá a těžká [19].

3.3.4. Zkreslení

Zkreslení je aberace čistě geometrického původu. Nezpůsobuje rozmazání obrazu. Jeho velikost koresponduje s velikostí sférické aberace hlavního paprsku [14]. Velikost zkreslení obrazu D se udává v procentech a vypočte se jako:

$$D = \frac{y'_{real} - y'_{ideal}}{y'_{ideal}} \quad (3.9)$$

Kde y'_{real} je reálná velikost obrazu a y'_{ideal} je velikost obrazu bez zkreslení [20, 22, 23].

Zkreslení třetího řádu roste s třetí mocninou velikosti zorného úhlu [9]. Proto při návrhu bude kritická korekce zkreslení pro minimální hodnotu ohniskové vzdálenosti⁷.

Zkreslení se nezlepší zacloněním objektivu [27]. Pro korekci bude nutné správné nastavení správné kombinace skel a poloměrů křivosti. Vhodné je také využití symetrie optické soustavy.

Seidelovy koeficienty

Seidelova teorie nachází velké uplatnění při návrhu optických soustav. Existují metody návrhu pomocí aberací třetího řádu. My budeme využívat hodnoty Seidelových sum $S_I - S_V$, C_I a C_{II} pro určení přínosu primárních aberací. V následující tabulce je popsán stupeň růstu jednotlivých aberací v závislosti na růstu apertury a pole [12].

Aberace	Seidelův součet	Příčné aberace		Podélné aberace	
		Apertura	Pole	Apertura	Pole
Sférická vada	S_I	3	0	2	0
Koma	S_{II}	2	1	1	1
Astigmatismus	S_{III}	1	2	0	2
Sklenutí pole	S_{IV}	1	2	0	2
Zkreslení	S_V	0	3	-	-
Barevná vada polohy	C_I	1	0	0	0
Barevná vada velikosti	C_{II}	0	1	-	-

⁷Pozn. pro objektiv, který je předmětem této práce, nastává maximální zkreslení pro konfiguraci č.1 viz. obrázek 4.5.

3.3.5. Shrnutí efektivity korekce vad na změně jednotlivých parametrů

Na základě [15] jsme zpracovali tabulku, která udává vztah jednotlivých akcí na korekci vybraných aberací. Slouží pro rychlou orientaci při návrhu a shrnutí možností návrháře pro ovlivnění jednotlivých aberací.

		Aberace									
		Sférická vada	Koma	Astigmatismus	Zklenutí	Zkreslení	Sférická 5. řádu	Barevná v. polohy	Barevná v. velikosti	Sekundární spektrum	Sférochmatismus
Akce	Zakřivení čočky										
	Power splitting										
	Kombinace skel										
	Osové vzdálenosti										
	Poloha pupily										
	Index lomu										
	Abbeho číslo										
	Tmelení povrchů										
	Aplanatický povrch										
	Asférický povrch										
	Zrcadlo										
	Difrakční vrstva										
	Princip symetrie										
	Polní čočka										

Vliv:

	Žádný
	Zanedbatelný
	Malý
	Dobrý

Obrázek 3.9: Vliv akce na korekci vybraných aberací.

3.4. Vliv provozních podmínek

3.4.1. Cementování čoček

Při návrhu objektivů se menší čočky často spojují (*cementují*) pomocí kanadského balzámu, nebo jiného organického polymeru s podobným indexem lomu, jako má sklo. Podle [20] pro cementování existují tři základní důvody: (a) eliminovat odrazy na dvou rozhraních a tím i ztráty, (b) zabránit totálnímu odrazu na rozhraní skla a tenké vrstvy vzduchu a za (c) vytvoření jediného prvku ze dvou (nebo i více čoček), které jsou přesně vycentrovány již při cementování. Tím se usnadní následné centrování čoček při montáži, které bývá obecně složitější.

Cementování ovšem nemusí být vždy použitelné. Například u čoček o průměru přibližně 70 cm a více může díky rozdílným teplotním roztažnostem flintového a korunového skla dojít k deformacím a nebo dokonce k prasknutí, obzvláště u tenkých čoček [20]. U projekční optiky se používají lampy o velkém výkonu a optika musí odolávat vysokým teplotám. Dříve hodně používaný kanadský balzám je proto naprosto nevhodný. Moderní balzámy jsou schopné odolávat teplotám kolem 100°C až 125°C [22]. Teploty čoček mohou ovšem přesahovat 200°C. V tomto případě není použití cementovaných dubletů vhodné a pro snížení ztrát se používá vícevrstvé antireflexní vrstvení (*multilayer antireflex coating*) na všech rozhraních.

3.4.2. Antireflexní vrstvy

Podle [17, 8] se světlo dopadající na rozhraní nejen láme, ale také částečně odráží. Platí:

$$T = 1 - R \quad (3.10)$$

, kde R je odrazivost (reflexivita) a T je propustnost.. Koeficient reflexivity je možné odvodit z Fresnelových vzorců jako:

$$R = \left[\frac{\sin^2(\epsilon - \epsilon')}{\sin^2(\epsilon + \epsilon')} + \frac{\tan^2(\epsilon - \epsilon')}{\tan^2(\epsilon + \epsilon')} \right] \quad (3.11)$$

, kde ϵ je úhel dopadu vztahený k normále a ϵ' je úhel lomu vztahený k normále. Pro malé úhly a po dosazení Snellova zákona dostáváme vztah:

$$R = \left[\frac{N_0 - N_1}{N_0 + N_1} \right]^2 \quad (3.12)$$

, kde světlo přechází z prostředí o indexu lomu N_0 do prostředí o indexu lomu N_1 . Pro vzduch o $N_0 = 1$ a sklo o $N_1 = 1,5$ je:

$$R = \left[\frac{N_0 - N_1}{N_0 + N_1} \right]^2 = \left[\frac{1 - 1,5}{1 + 1,5} \right]^2 = 4\% \quad (3.13)$$

Na jednom rozhraní tedy přichází o 4% světla. V případě skla FS6 ze Schott katalogu je to například až téměř 8% světla. Nejen, že toto světlo je ztracené, ale může také vytvořit nežádoucí duchy (*ghost image*), čímž se zhoršuje kvalita a snižuje kontrast obrazu. To vše je důvod pro použití antireflexních vrstev (AR).

Jednovrstvý antireflexní povrch (*singlelayer AR coating*)

Pro odrazivost vrstvy o optické tloušťce $\frac{\lambda}{4}$ a indexu lomu N_{AR} platí [22, 30]:

$$R = \left[\frac{1 - \frac{N_1^2}{N_{AR}}}{1 + \frac{N_1^2}{N_{AR}}} \right]^2 \quad (3.14)$$

Odrazivost je tedy pro danou vlnovou délku λ ideální (konkrétně rovna nule) v případě, že:

$$N_{AR} = \sqrt{N_1} \quad (3.15)$$

Pro sklo o $N_1 = 1,5$ by byla ideální AR vrstva o $N_{AR} = 1,25$. Je ovšem nutné podotknout, že takový materiál neexistuje a nebo není dostatečně stabilní, aby jej bylo možné nanést na sklo. Oblast s nulovou a nízkou odrazivostí je také úzká.

Vícevrstvý antireflexní povrch (*multilayer AR coating*)

Je nutný pro dosažení nízké odrazivosti pro široké spektrum. Pro dvouvrstvý AR povrch jsou nanášeny dvě vrstvy o optické tloušťce $\frac{\lambda}{4}$ a pro třívrstvý AR povrch jsou tloušťky $\frac{\lambda}{4}, \frac{\lambda}{2}, \frac{\lambda}{4}$. Jedná se například o materiály MgF_2 o $N_{AR1} = 1,38$ pro první vrstvu, ZrO_2 o $N_{AR2} = 2,4$ pro druhou vrstvu a CrF_3 o $N_{AR3} = 1,7$ pro třetí vrstvu. U tohoto AR povrchu dosáhneme snadno odrazivosti pod 0,5% ve viditelném spektru. V praxi má každý dodavatel optiky svou vlastní technologii AR vrstvení čoček, kterou si důsledně chrání.

4. ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU

Tato práce vznikala ve spolupráci se společností Robe Lighting s.r.o., která patří k jednomu z nejvýznamnějších vývojářů a producentů high-end osvětlovacích zařízení pro zábavní průmysl na světě. Právě zde vznikl požadavek na vývoj nových varifokálních objektivů, které se používají ve Spot zařízeních, o kterých jsme hovořili v kapitole 2.1.2. Spot svítidla nacházejí své uplatnění ve filmovém, divadelním, televizním a hudebním průmyslu a při pořádání velkých sportovních a nejrůznějších společenských událostí.

Z hlediska optického návrhu se osvětlovací průmysl výrazně liší od zdánlivě podobných odvětví, jako jsou: vývoj předních světlometů v automobilovém průmyslu, návrhu fotografických objektivů či klasické projekční optiky. Návrh objektivu pro osvětlovací projekční účely je do jisté míry kombinací ve výše zmíněných odvětvích. Jak se ovšem návrh liší, jaké jsou definované požadavky na kvalitu či světelnost, na tyto otázky bohužel v literatuře nenajdeme odpověď. Pro zjištění požadovaných vlastností provedeme analýzu jednoho z objektivů společnosti Robe. Jak se liší a s jakými speciálními podmínkami se při návrhu setkáváme si popíšeme v kapitole 4.1.

Na optické návrháře jsou kladeny stále vyšší požadavky na kvalitu objektivu, díky rostoucím nárokům zákazníka. Právě objektiv je esenciální součástí celého zařízení, který společně se zdrojem světla nejvíce ovlivňuje kvalitu světelného výstupu jakožto primárního hodnotícího kritéria kvality. Srovnáme-li kvalitu objektivů Robe a konkurenčních objektivů, jsou všechny na stejné úrovni. Právě zde vzniká velký potenciál, protože navrhne-li byt jen mírně lepší systém, značně se tím zvýšíme jeho hodnotu a konkurenceschopnost celého zařízení na trhu. Naším cílem tedy je analyzovat a pokusit se vylepšit některý z hlavních vlastností současného návrhu dle dané specifikace. Základní parametry hodnocení kvality objektivu zákazníkem jsou:

- Cena
- Rozsah změny ohniskové vzdálenosti
- Minimální výstupní úhel
- Světelnost
- Kvalita zobrazení
- Zkreslení na maximálním úhlu
- Rozměry - průměr přední optiky, délka celého objektivu, zadní sečná vzdálenost

Na základě konzultace se zadavatelem práce, společností Robe Lighting s.r.o, bude hlavním cílem snížení velikosti minimálního výstupního úhlu a korekce zkreslení u konkrétního objektivu. Ostatní parametry objektivu by se neměly výrazně zhoršit. Nově navržený objektiv se vyrobí a otestuje. V případě dobrých výsledků nahradí v současnosti používaný objektiv, který v této práci budeme nazývat „*referenční objektiv*“.

Při návrhu objektivu neexistuje ideální řešení - vše je jen o hledání správného kompromisu. Výše zmíněné parametry svítidla jsou na sobě závislé a zlepšením jednoho se obvykle zhorší jeden či více ostatních parametrů, proto je důležité nalézt vyváženou kombinaci těchto parametrů. V tabulce 4.1 jsou názorně zpracovány jejich vzájemné vztahy. Tabulka slouží pro jednoduchý a názorný příklad zmiňovaných vztahů, avšak není možné na ni nahlížet bez uvážení, neboť nepodchycuje všechny vzájemné vztahy a zákonitosti.

Uvedme si jako příklad přímou úměru ceny a kvality objektivu. V případě, že snižujeme cenu zmenšením počtu čoček či změnou materiálu za méně kvalitní, vztah z tabulky platí. Pro snížení ceny je ovšem možné zvolit jinou metodu - zmenšení průměru čoček či zmenšení rozsahu změny ohniskové vzdálenosti. Pak vztah nejen že neplatí, ale je zcela obrácený, neboť kvalita obrazu tímto vzroste.

Vzájemný vztah parametrů optické soustavy							
Zhoršení: Vylepšení:	Cena	Rozsah	Úhel	Světelnost	Kvalita	Zkreslení	Rozměry
Cena							
Rozsah							
Úhel							
Světelnost							
Kvalita							
Zkreslení							
Rozměry							

Zhoršení:

- Žádné
- Malé nebo nepřímé
- Značné
- Zásadní

Tabulka 4.1: Vzájemný vztah parametrů optické soustavy

4.1. Speciální podmínky

Kapitola speciální podmínky popisuje provozní podmínky v osvětlovacích zařízeních a některé nestandardní podmínky pro optický návrh objektivu. Pro lepší představu je použito srovnání s návrhem fotografického a projekčního objektivu.

4.1.1. Teplota

Vysoká teplota optiky při provozu zařízení je pro naši aplikaci typická a je nutné s ní počítat při mechanickém uložení čoček v tubusu. Při zahřátí dochází k teplotní dilataci čoček, které musí být uloženy s dostatečnou vůlí. Na základě předešlých zkušeností s osvětlovacími objektivy víme, že vliv pnutí a deformace čoček nemá významný vliv na kvalitu obrazu a proto jej nebudeme uvažovat. Bude nutné jen zajistit, aby nedošlo k mechanickému poškození čoček na základě rozdílné teplotní roztažnosti skla čoček a duralu tubusu. Odhad velikosti vůle byl proveden na základě měření teploty a výpočtu dilatace.

Pro zjištění teploty čočky není možné uchytit čidlo přímo na povrch čočky, jelikož začne absorbovat záření a znehodnotí měření. Pro naše účely nám postačilo jej umístit do vnitřního prostoru tubusu mezi čočku a duralový tubus, kde na čidlo nedopadá žádné záření. Po ustálení jsme naměřili změnu teploty čočky oproti teplotě okolí $\Delta t = 220^\circ\text{C}$.

Vezmeme-li v potaz koeficient délkové teplotní roztažnosti skla $\alpha_S = 8,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, a průměr čočky $D = 52 \text{ mm}$, dostáváme díky zahřátí změnu průměru:

$$\Delta D = D \cdot \alpha_S \cdot \Delta t = 52 \cdot 8,5 \cdot 10^{-6} \cdot 220 \doteq 0,1 \text{ mm} \quad (4.1)$$

Na základě předchozího výpočtu musí být čočka uložena s vůlí minimálně 0,1 mm. Koeficient délkové teplotní roztažnosti duralového tubusu je $\alpha_T = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ a je větší, než u skla. Problém může nastat jen v případě, že uložíme čočku bez vůle a prudce ji zahřejeme s tím, že teplota tubusu nestihne vzrůst na požadovanou hodnotu. Pak může dojít k prasknutí čočky. Rychlejší chladnutí duralového tubusu oproti čočkám nepůsobí problémy, čočky mohou být tubusem sevřeny, ale dle zkušeností nedojde k jejich prasknutí.

Teplota čoček přirozeně závisí i na mnoha dalších faktorech. Nejdůležitější faktory jsou: druh zdroje světla, vzdálenost tubusu od zdroje světla a výstupní úhel zdroje světla. Zmíněné podmínky ovlivňují jakým způsobem a v jaké míře dopadne záření na mechanickou konstrukci tubusu.

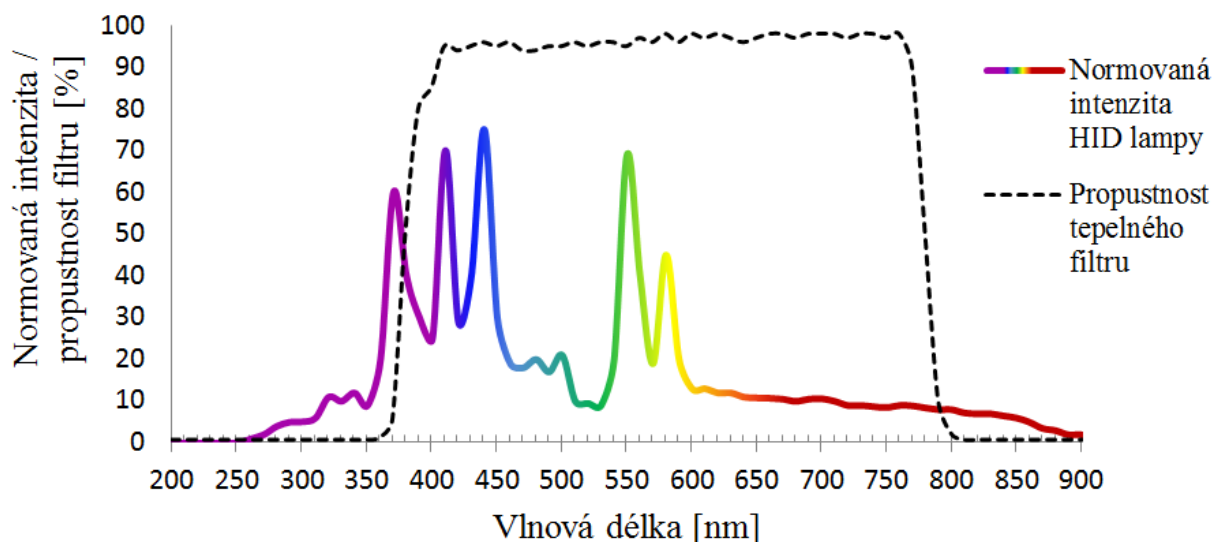
Výše uvedený příklad byl změřen po ustálení v běžných pracovních vzdálenostech pro Phillips 20R - 470W HID lampu s eliptickým reflektorem bez UV filtru a referenčním objektivem. Simuloval nejhorší možné podmínky pro použití osvětlovací optiky optiky, kterou budeme navrhovat. Po dokončení měření došlo omylem k posunutí kompenzačního členu optiky až do ohniska reflektoru (rovina obrazu lampy), čímž došlo k lokálnímu přehřátí a natavení čočky. I přes tento fakt nedošlo k prasknutí čočky, takže byla optika uložena správně.

Díky vysokým teplotám nelze použít tmelení dubletů. Tmelená vrstva by se na základě rozdílné teplotní roztažnosti mohla poškodit viz. kapitola [3.4.1](#).

4.1.2. UV

Při použití metal-halidových či HID lamp vzniká vedle viditelného záření i signifikantní množství neviditelného UV a IR záření. Většina se jej nedostane z prostoru lampy, pro-

tože je zde umístěn takzvaný „tepelný filtr“, který odrazí přes 90% neviditelného záření. Následkem je, že se tolik nezahřívá optika a okolní mechanika. Příklad spektrálního roz-



Obrázek 4.2: Typické spektrální rozložení HID lampy a propustnost tepelného filtru.

ložení intenzity typické HID lampy a spektrální propustnosti tepelného filtru vidíme na obrázku 4.2. Avšak i s použitím tepelného filtru a po odfiltrování další části UV záření samotným sklem optiky může působit zbytkové UV záření problémy při použití plastových čoček, tmelených dubletů a také na černěných hranách čoček, protože některé materiály a barvy nejsou dostatečně UV stabilní. Při každém návrhu s použitím výbojkového zdroje světla je třeba zohlednit přítomnost UV záření.

Použití tepelného filtru je nezbytné i z dalšího hlediska, bez něj by zařízení nesplňovalo hygienické normy a neprošlo by potřebnou certifikací.

4.1.3. Velká světelnost

Projekční objektivy pro Spot zařízení jsou charakteristické svou extrémní světelností. Prostupnost světla je důležitější vlastnost než vysoká kvalita obrazu, která je požadována například u klasické projekční optiky. Clonové číslo se pohybuje v rozmezí od $f/2$ do $f/1,4$. Velké světelnosti se navíc kombinují se čtyř až desetinásobnou změnou ohniskové vzdálenosti. Typický rozsah ohniskových vzdáleností je 39-185 mm.

V této práci se budeme snažit navrhnout objektiv 39-150 mm $f/1,4$. Porovnávat jej budeme s v praxi používaným objektivem 39-128 mm $f/1,4$. Uvedme příklady komerčně dostupných fotografických objektivů od společnosti Olympus:

Olympus ZUIKO ED 40-150 mm $f/2,8$ Pro

Prodejní cena: 38 990 Kč

Olympus ZUIKO DIGITAL ED 150 mm $f/2,0$ (ET-P1520)

Prodejní cena: 68 599 Kč

Vidíme, že námi navrhovaný objektiv má o jeden celý krok lepší světelnost. V případě Olympus ZUIKO ED Zoom objektivu je to až o dva kroky, což odpovídá čtyřikrát větší ploše clony. Přitom světelnost výše zmíněných fotografických teleobjektivů rozhodně není

špatná - jedná se o profesionální řadu objektivů (světelnější objektivy se v současnosti již neprodávají). I přes tento fakt budeme navrhovat objektiv se clonou $f/1,4$ a dokonce za zlomek ceny Olympus objektivů. Pro naši aplikaci musí být výrobní cena pod 10000 Kč za objektiv včetně mechanického uložení v tubusu. V porovnání s parametry a cenou Olympus objektivů se dané podmínky zdají být nesplnitelné. V praxi splnitelné jsou, ale za cenu výrazného snížení obrazové kvality. Navrhnout a snížit výslednou cenu nám, kromě snížení kvality obrazu, pomáhá také fakt, že navrhujeme varifokální objektiv. Varifokální objektivy mají větší volnost při návrhu a jejich mechanické uložení je podstatně jednodušší a levnější.

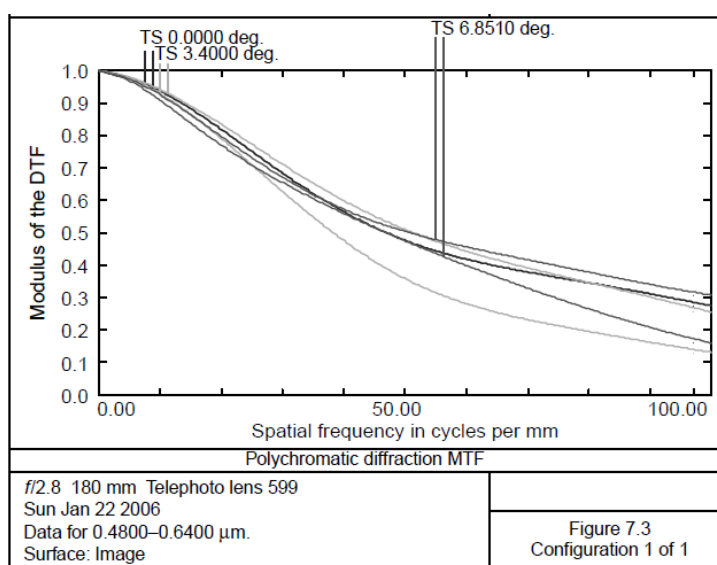
4.1.4. Snížená kvalita

Jak jsme se již zmiňovali, cenou za extrémní světelnosti a nízké ceny objektivů je značné zhoršení kvality obrazu. Prvořadým úkolem je určení zobrazovacích parametrů a velikostí zbytkových vad tak, aby byla kvalita obrazu dostatečná.

Srovnáme návrh osvětlovacích projekčních objektivů s návrhem fotografických objektivů a návrhem projekčních objektivů do dataprojektorů. Příklady jsou popsány v knihách [20, 2], ale především v [22]. V případě fotografických objektivů musíme dosáhnout velikosti spotu pod velikost pixelu na CCD čipu,

řekněme tedy pod hodnotu $15\ \mu\text{m}$. Pro hodnocení kvality obrazu použijeme funkci přenosu kontrastu (*MTF - Modulation Transfer Function*) obr. 4.3, která má velikost kontrastu přibližně 0,5 pro 50 čar na milimetr. O světelnosti jsme mluvili již dříve, může pohybovat až po hodnotu $f/2$ pro objektiv o ohniskové vzdálenosti $f = 150\ \text{mm}$. Cena takového objektivu je však příliš vysoká. Časté je i užití asférických čoček, které cenu opět zvyšují.

U klasických projekčních objektivů je situace podobná. Velikost spotu je dána velikostí pixelu na DMD čipu či na LCD displeji - pohybuje se až do velikosti $25\ \mu\text{m}$. Světelnost objektivu se může pohybovat kolem $f/2,8$ do $f/1,8$. Kvalita obrazu je opět výborná s hodnotou kontrastu kolem 0,5 pro 50 čar na milimetr. Cena je také příznivější, běžně lze kompletní projektory pořídit za 15 000 Kč. Tyto projekční objektivy mají ale malou ohniskovou vzdálenost a tak je možné dosáhnout velkých světelností i s použitím malých průměrů čoček (orientačně kolem jednoho centimetru) - to pro malé úhly není možné. Ke kvalitě obrazu přispívá i téměř fixní ohnisková vzdálenost objektivů. Změna rozsahu ohniskové vzdálenosti bývá jen malá, například $1,2\times^1$. Možnost zaostření je omezena na hodnotu přibližně jen 3-15 m.



Obrázek 4.3: Funkce přenosu kontrastu pro fotografický objektiv. $f/2\ 150\ \text{mm}$ - Teleobjektiv. Upraveno podle [22]

¹U projekčních objektivů lze často najít parametr změny rozsahu ohniskové vzdálenosti ve formě 1:1,2.

Dosáhnout kvality výše zmiňovaných objektivů pro naši aplikaci osvětlovacího projekčního objektivu není možné a v rámci minimalizace ceny by to bylo i zbytečné. Uchyacení jednotlivých tubusů optiky je nepřesné díky toletanci ostatních mechanických prvků, především ohýbaných plechových dílů, které tvoří hlavní kostru konstrukce. Součtem výrobních tolerancí se může poloha tubusu posunout i o několik milimetrů. Použitím žádné optiky není možné dosáhnout hodnoty kontrastu 0.5 pro 50 čar na milimetr právě díky velkým nepřesnostem uložení tubusů v objektivu. Změna mechanické konstrukce není možná kvůli ceně.

U projekčního a fotografického objektivu se kvalita zobrazení odvíjí od velikosti pixelu na CCD nebo DMD čipu. My ovšem tak jednoduše specifikovat požadavky nemůžeme, jelikož jako předmět používáme Gobo - kontrastní stínítko. Kvalita obrazu se určuje pouze subjektivně pohledem na promítnutý obraz, ze kterého jednotlivé parametry optické soustavy není možné měřit. Neexistuje také žádná literatura, která by nám s definicí parametrů pomohla. Pro určení limitních parametrů vyjdeme ze současných návrhů společnosti Robe Lighting, které vznikly na základě empirických zkušeností v průběhu posledních dvaceti let. Použijeme reálný objektiv, u kterého známe kvalitu zobrazení, a na základě jeho modelu v Zemaxu určíme, jaké modelové hodnoty odpovídají skutečné kvalitě zobrazení. Definice těchto parametrů je jedním z cílů této diplomové práce. Problém je více rozebrán v kapitole 4.2.

4.1.5. Velké průměry čoček

Použití čoček o velkém průměru je nezbytné pro dosažení potřebných světelností objektivu. Maximální světelnost je přímo úměrná průměru přední optiky. S rostoucím průměrem čoček ovšem adekvátně rostou i velikosti vad a snižuje se přesnost výroby. V případě nutnosti použít větší průměr čočky musíme počítat s vyšší výrobní cenou.

4.1.6. Absence samostatné vnitřní aperturní clony

Aby nedošlo k nedorozumění, každá optická soustava musí mít nějakou aperturní clonu [19]. Velikost svazku tvořící obraz je omezena buď samostatnou clonou, nebo jen objímkou čoček. V případě optiky se dvěma pohyblivými a jedním nepohyblivým členem je běžné, že se poloha této clony mění s nastavením ohniskové vzdálenosti [16].

U našeho objektivu samostatná vnitřní clona není, aperturu tvoří objímky čoček. Jak bylo popsáno v kapitole 3.3, nastavení polohy clony hraje významnou roli v korekci některých vad a její absencí o tuto možnost bohužel přicházíme.

Se zacloněním souvisí další téma. Díky nedostatečnému průměru optiky kompenzátoru dochází k vinětaci paprsků s rostoucím průměrem předmětu. Zmenšením aperturní clony by bylo možné docílit rovnoměrné intenzity obrazu. Následkem by bylo zmenšení středové intenzity obrazu a snížení světelnosti, což je však nepřijatelné.

4.1.7. Netmelené dublety

O tématu netmelení dubletů zmiňovali v podkapitolách 3.4.1 a 4.1.1. Jako důvod netmelení dubletů jsme zde uvedli různou teplotní roztažnost skel. Místo tmelení se používá vícevrstvý antireflexní povrch. Vlivem odrazů na rozhraních sklo - vzduch a vzduch - sklo

dochází jen k velmi malým ztrátám a snížení kontrastu. Jedná se o dostatečně dobré řešení, které nepůsobí větší problémy. Neexistuje dostatečně pádný důvod ke změně technologie a hledání vhodného materiálu, jež by nepříznivé teplotní podmínky vydržel.

4.2. Analýza referenčního objektivu

Nyní se budeme zabývat rozbořem návrhu objektivu z produkce firmy Robe Lighting s.r.o., v jejíž spolupráci tato práce vznikala. V dalším textu jej budeme nazývat *referenční objektiv*. Jedná se o varifokální objektiv, jehož parametry jsou uvedeny v tabulce 4.4. Jeho optické vlastnosti použijeme jako měřítko kvality nového návrhu. V případě dobrých výsledků bude nový návrh použit jako náhrada referenčního objektivu v reálném zařízení.

Surf:Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard	----->	Infinity	Infinity	Infinity
1	Standard		Infinity	0.000	39.054
2*	Standard	Cocka1	107.950	19.000	BK7 48.000 U
3*	Standard	Cocka2	-211.620	4.500	SF4 48.000 U
4*	Standard		Infinity	7.000 V	48.000 U
5*	Standard	Cocka3	-100.420	3.000	SK16 33.000 U
6*	Standard	Cocka4	43.050	11.500	SF6 33.000 U
7*	Standard		82.190	112.123 V	33.000 U
8*	Standard	Cocka5	93.840	14.000	BK7 26.000 U
9*	Standard	Cocka6	-62.150	5.000	SF1 26.000 U
*	Standard		-102.210	0.200	26.000 U
11*	Standard	Cocka7	59.999	16.000	BK7 26.000 U
12*	Standard	Cocka8	-59.999	3.000	SF1 26.000 U
13*	Standard		Infinity	0.200	26.000 U
14*	Standard	Cocka9	89.949	9.000	BK7 26.000 U
15*	Standard		Infinity	45.977 T	26.000 U
IMA	Standard	Gobo	Infinity	-	12.000 U

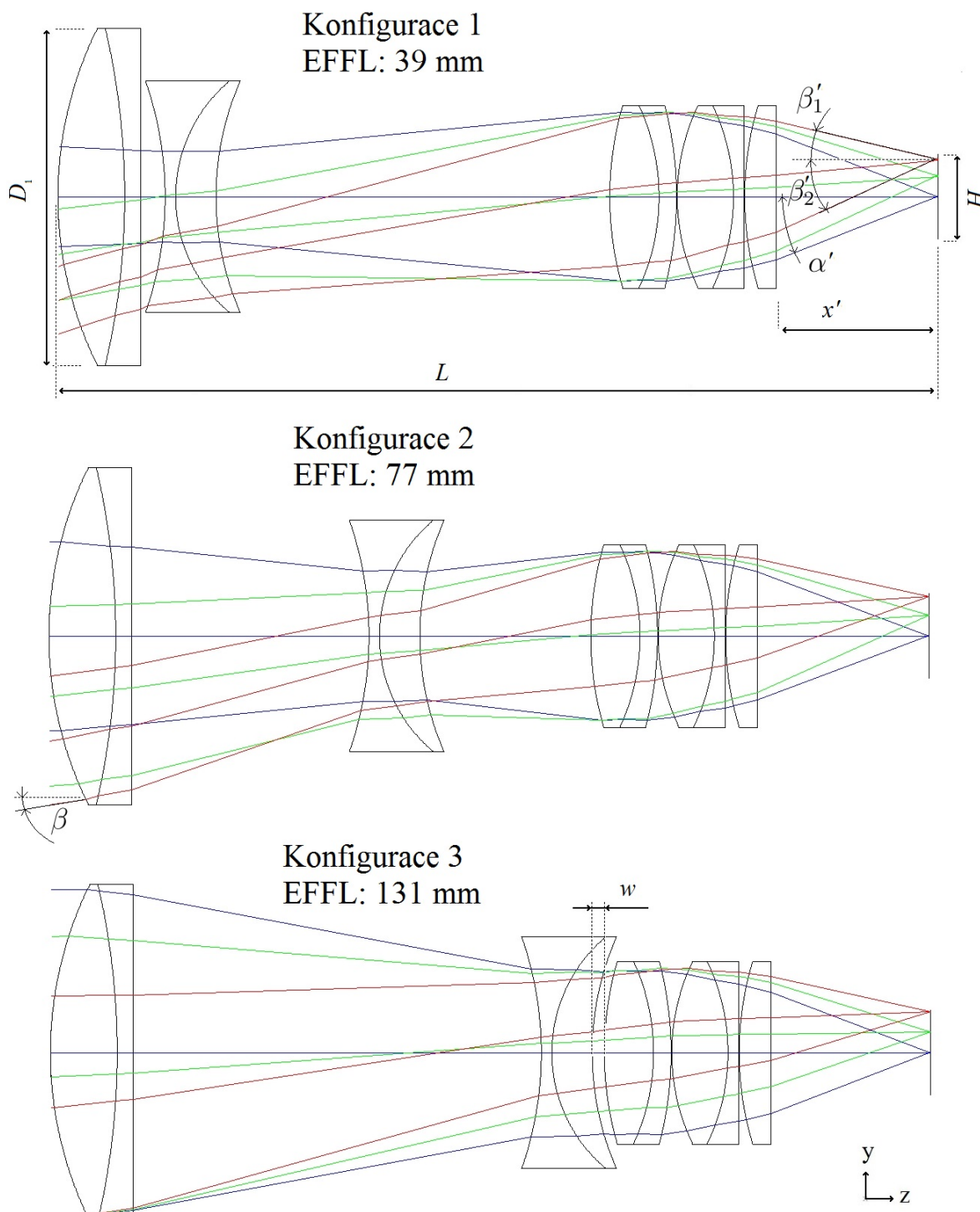
Obrázek 4.4: Parametry čoček referenčního objektivu.

Určení kvality objektivu pro zobrazovací osvětlovací účely je jedním z cílů, jichž jsme se snažili dosáhnout. V rámci logického uspořádání této práce je kapitola zařazena na začátek praktické části. Nelze ovšem tvrdit, že bychom výsledky v této formě měli již na začátku návrhu nového objektivu. Opak je pravdou. Na začátku práce jsme měli jen minimální znalosti programování v Zemaxu, který je pro analýzu nezbytný. Společně se zlepšováním programovacích schopností jsme se učili i správně interpretovat výsledky a přestože jsme měli technické parametry již od začátku, současná podoba počátečních podmínek vychází z posledních znalostí nabytých prací na novém objektivu. Určování počátečních parametrů a návrh nového objektivu šly tedy ruku v ruce.

Analyzujeme varifokální objektiv se dvěma pohyblivými členy, proto měli bychom určit kvalitu obrazu pro dostatečné množství různých nastavení ohniskové vzdálenosti. Jednotlivá nastavení budeme dále nazývat *konfigurace*. Pro jednoduchost se omezíme jen na tři konfigurace - pro maximální, střední a minimální hodnotu ohniskové vzdálenosti. Budeme předpokládat, že změna mezi těmito polohami je plynulá. Je důležité si uvědomit, že to, jakým způsobem navrhujeme počáteční podmínky, ovlivní postup při vytváření nového návrhu, jelikož testování nového návrhu bude probíhat stejným způsobem. Zvýšení

4.2. ANALÝZA REFERENČNÍHO OBJEKTIVU

počtu konfigurací může být na jednu stranu přínosné, značně to ovšem zkomplikuje práci s meritní funkcí (*merit function*) a omezujícími podmínkami pro optimalizaci nového návrhu. Adekvátně by se také zvýšila již tak dlouhá doba optimalizace. Pro nastavení více konfigurací se v Zemaxu používá multikonfigurační editor (*Multi-Configuration Editor*).



Obrázek 4.5: Referenční objektiv ve všech třech konfiguracích pro minimální, střední a maximální hodnotu ohniskové vzdálenosti.

4.2. ANALÝZA REFERENČNÍHO OBJEKTIVU

Dále v této kapitole si popíšeme samotné parametry referenčního objektivu. Budeme je určovat především z grafů, které jsme si popsali v teorii v kapitole 3.2. Konkrétně to jsou Spot diagram, MTF, Ray Fan, Curv/Dist plot. Pro pozdější porovnání si je přehledně sepíšeme do tabulky. Některé vlastnosti se z jedné hodnoty v tabulce špatně porovnávají (například průběh MTF) a proto pro lepší porovnání bude nutné přímé porovnání grafů. Popíšeme si základní parametry objektivu, kvalitu obrazu, světelnost objektivu a velikosti vybraných zbytkových vad. Všechny použité tabulky a grafy jsou ve stejném měřítku pro snadné porovnání hodnot. Všechny simulace v Zemaxu jsou přiložené v příloze.

Trasování v Zemaxu provádíme obráceně, než je tomu v reálném systému - z obrazového do předmětového prostoru. Děláme to po vzoru knih o optickém designu [20, 22, 23, 9, 12, 36] a dalších. Díky tomu musíme od této chvíle změnit názvosloví, rovina Goba je pro nás nyní obrazovou rovinou.

Návrh se vytváří pro předmět v nekonečné vzdálenosti, jelikož běžná pracovní vzdálenost je větší než stonásobek ohniskové vzdálenosti [22].

4.2.1. Základní parametry objektivu

V tabulce 4.7 jsou shrnuty základní mechanické parametry objektivu. Pro názornost jsou vyznačeny v obrázku 4.5.

Průměr frontálního členu D_1 (optický D_{1O}) [mm]	96 (93)
Průměr obrazu H [mm]	24
Obrazová sečna x' [mm]	45-49
Celková délka optické soustavy L [mm]	250,5
Počet čoček (Přední člen + variátor + kompenzátor)	$2 + 2 + 5 = 9$
Vzdálenost mezi variátorem a kompenzáto ² rem w [mm]	1,4
Rozsah ostření bez omezení ohniskové vzdálenosti [m]	$20 - \infty$

Tabulka 4.6: Základní vlastnosti referenčního objektivu. Graficky jsou veličiny znázorněny v obrázku 4.5.

²Při zaostření na nekonečno. Směrodatná je pouze hodnota pro konfiguraci 3, kdy nedostatečně velká mezera může způsobit omezení rozsahu ostření

4.2.2. Světelnost

Již dříve jsme se zmiňovali, že dosažení maximální světelnosti a minimálního výstupního úhlu je jedním z hlavních hodnotících kritérií kvality objektivu. Níže v tabulce jsou uvedeny hodnoty světelnosti pro jednotlivé konfigurace.

Konfigurace	(1)	(2)	(3)
Výstupní úhel	Maximální 34,4°	Střední 17,8°	Minimální 10,8°
Clonové číslo $F/\#$ pro minimální úhel [mm]	1,37	1,42	1,39
α' [°] - Okrajový paprsek ³ $H_y = 0, P_y = 1$	21,4	20,6	21
β_1' [°] - Okrajový paprsek $H_y = 1, P_y = 1$	13,3	12,1	12,4
β_2' [°] - Okrajový paprsek $H_y = 1, P_y = -1$	24,7	19,7	16,9

Tabulka 4.7: Světelnost objektivu pro konfiguraci 1, 2 a 3. Graficky jsou veličiny znázorněny v obrázku 4.5.

Abychom si ověřili, že je objektiv navržen s maximální možnou světelností, provedeme výpočet pomocí Etendue pro rotačně symetrickou plochu podle vzorce 3.3:

$$\alpha' = \arcsin \frac{D_{10} \sin(\beta)}{H}$$

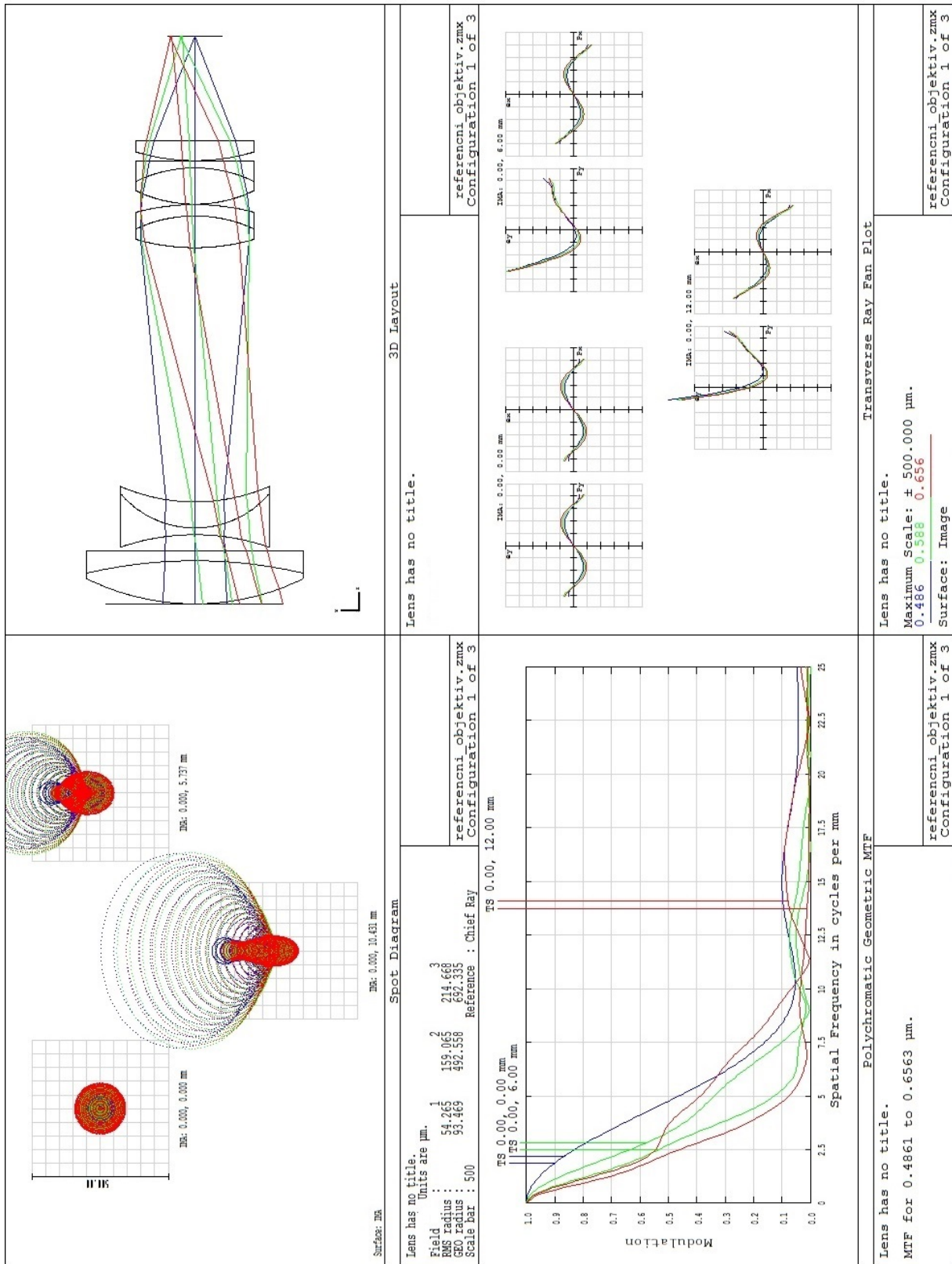
Ze vzorce je zřejmé, že velikost numerické apertury (a tím pádem světelnosti) je limitovaná minimální hodnotou úhlu β . Zvětšením tohoto úhlu lze docílit lepší světelnosti, stejně tak jako zvětšením průměru přední optiky D_{10} . Směrodatný je tedy výpočet pro minimální hodnotu β , to znamená pro konfiguraci 3. Maximální hodnotu úhlu okrajového paprsku α' vypočteme jako:

$$\alpha' = \arcsin \frac{D_{10} \sin(\beta)}{H} = \arcsin \frac{93 \cdot \sin(5,377)}{24} \doteq 21,3^\circ$$

Z tohoto výsledku vidíme, že je hodnota úhlu α' prakticky shodná jak pro výpočet, tak po odečtení z modelu a objektiv navržen s maximální možnou světelností. Odchylku 0,1° nebereme v potaz. Pro doplnění se ještě jednou podívejme na vzorec 3.3. Zvýšení světelnosti nelze provést omezením velikosti předmětu, jelikož výstupní úhel α je přímo úměrný velikosti předmětu. Zmenšení předmětu by vedlo k adekvátnímu zmenšení výstupního úhlu a světelnost by se zachovala.

³O okrajových paprscích jsme pojednávali v kapitole 2.2.2. H_y je normovaná poloha pole a P_y je normovaná poloha pupily. Jedná se o běžně používané vztahy v Zemaxu pro určení paprsku viz. [44]. V našem případě je jako pole určená paraxiální velikost obrazu. Pak $H_y = 0$ a $P_y = 1$ určuje paprsek dopadající na střed obrazu a procházející maximálním poloměrem akerturní clony, která ho omezuje. $H_y = 1$ a $P_y = 0$ určuje paprsek, který dopadá na kraj obrazu a prochází středem aperturní clony pro daný bod obrazu.

4.2. ANALÝZA REFERENČNÍHO OBJEKTIVU



Obrázek 4.8: Parametry referenčního objektivu pro konfiguraci č.1.

Vlastnosti objektivu pro konfiguraci 1:

Nyní parametry objektivu rozdělíme podle jednotlivých konfigurací.

Kvalita obrazu - kontrast

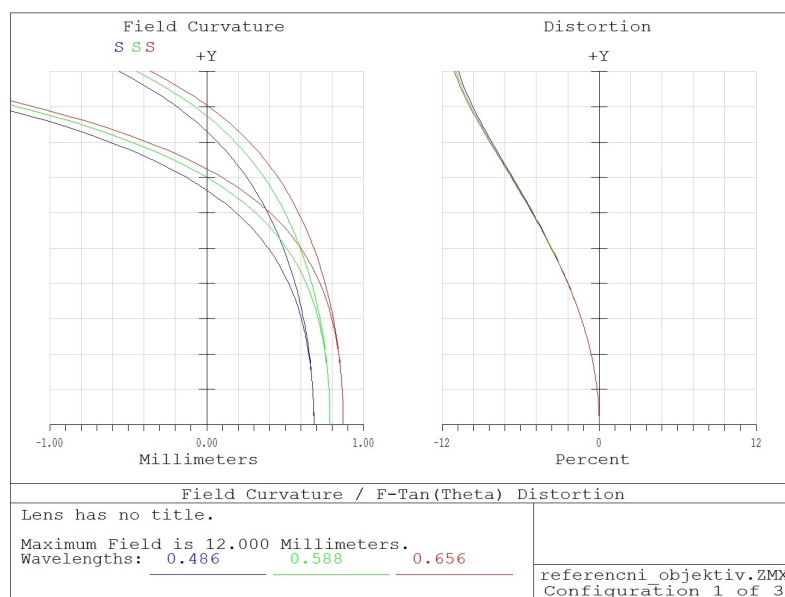
Hodnotíme-li kvalitu obrazu optického systému, prvním grafem, na který se zaměříme, je Spot Diagram (popsaný v kapitole 3.2). Velikost spotu určuje, do jaké míry je obraz „dokonalý“. S klesajícím poloměrem spotu roste kontrast obrazu.

Limitní hodnotu pro poloměr spotu odečteme z konfigurace 1 referenčního objektivu - obr. 4.8. Víme, že při nastavení referenčního objektivu do polohy s maximálním výstupním úhlem nemá obraz dobrou kvalitu. Pro projekční osvětlovací účely je ale stále použitelný. Proto tuto konfiguraci použijeme pro určení limitních hodnot kontrastu, neboť objektiv zde dosahuje nejhorších, ale stále použitelných výsledků. Pro největší pole je velikost RMS spotu $213\text{ }\mu\text{m}$ a velikost GEO spotu $690\text{ }\mu\text{m}$. Pro srovnání, velikost RMS spotu se u podobných projekčních zařízení pro kinematografické účely s fixní ohniskovou vzdáleností pohybuje do $25\text{ }\mu\text{m}$. Nízkou kvalitu obrazu vidíme i na grafu funkce přenosu kontrastu MTF. Optická soustava je použitelná jen z toho důvodu, že v reálném zařízení zobrazujeme kontrastní předmět s detaily většími než 1 mm . Proto je kontrast 0,5 pro 2,5 čar/mm ještě dostatečný.

Kvalita obrazu - velikost zbytkových vad

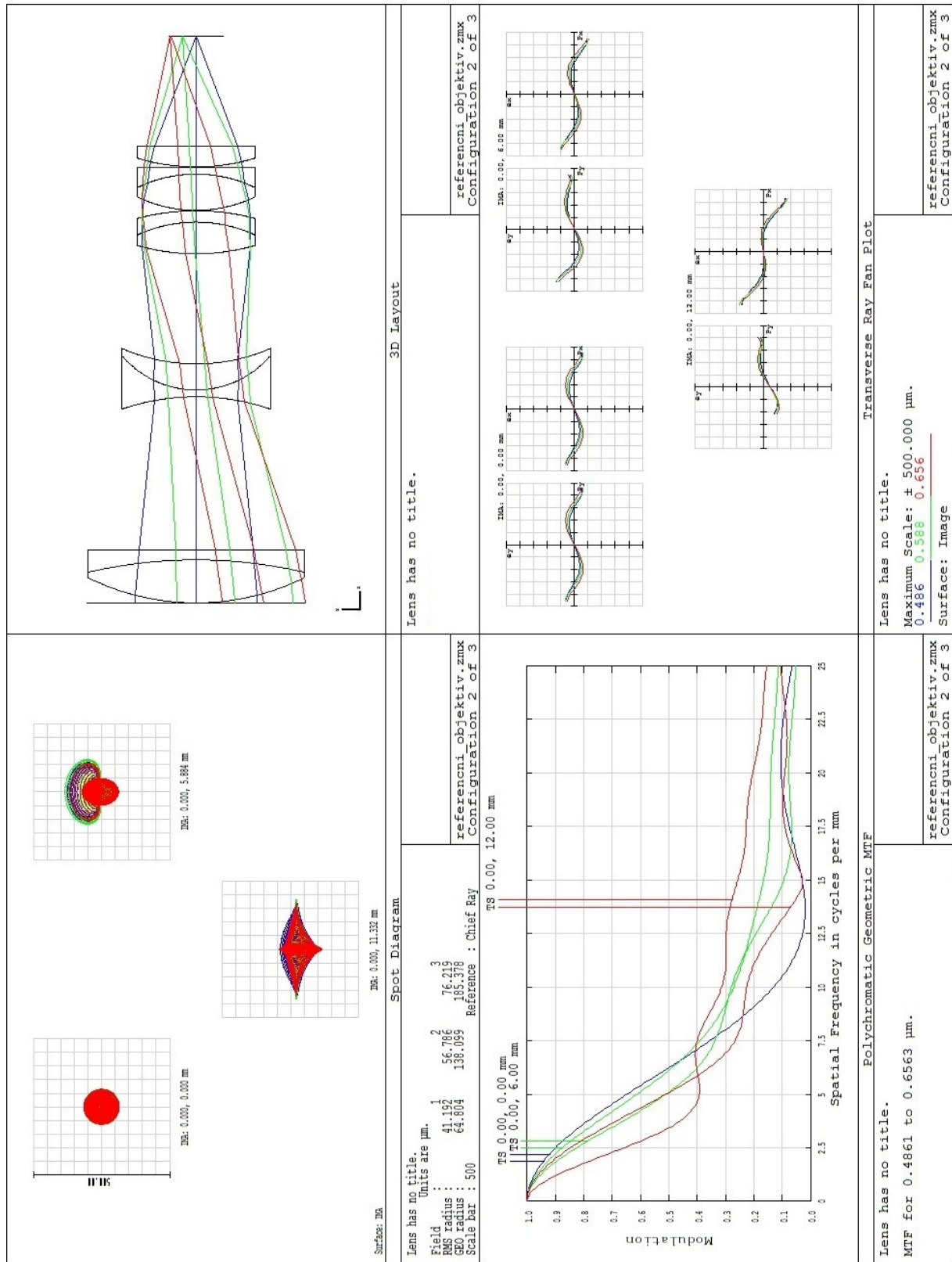
Rozborem vad a jejich příspěvků ke zhoršení obrazu se budeme širěji zabývat až při návrhu nového objektivu. U referenčního objektivu rozvedeme jen vybrané vady, které nejvíce přispívají ke zhoršení obrazu a jejichž velikost budeme považovat za limitní hodnoty pro nový návrh.

Začneme tedy opět spot diagramem, ve kterém je dobře patrná negativní koma. Koma společně s enormním zklenutím pole (viz. obrázek 4.9) má za důsledek špatnou kvalitu obrazu pro střední a maximální hodnotu pole. Největší příspěvek podle Seidelových diagramů má ovšem sférická vada a zkreslení viz. obrázek 4.11. Sférická vada vzniká díky velkým průměrům čoček. Zkreslení pro toto nastavení dosahuje hodnoty 11%. Můžeme jej opět odečíst z obrázku 4.9. Zde je možné vidět i relativně vysokou barevnou vadu polohy. Pro hodnocení přínosu barevných vad byla použita simulace obrazu (*Image Simulation*). Barevná vada polohy ovšem v rámci celkově špatné kvality není na simulaci obrazu příliš vidět.



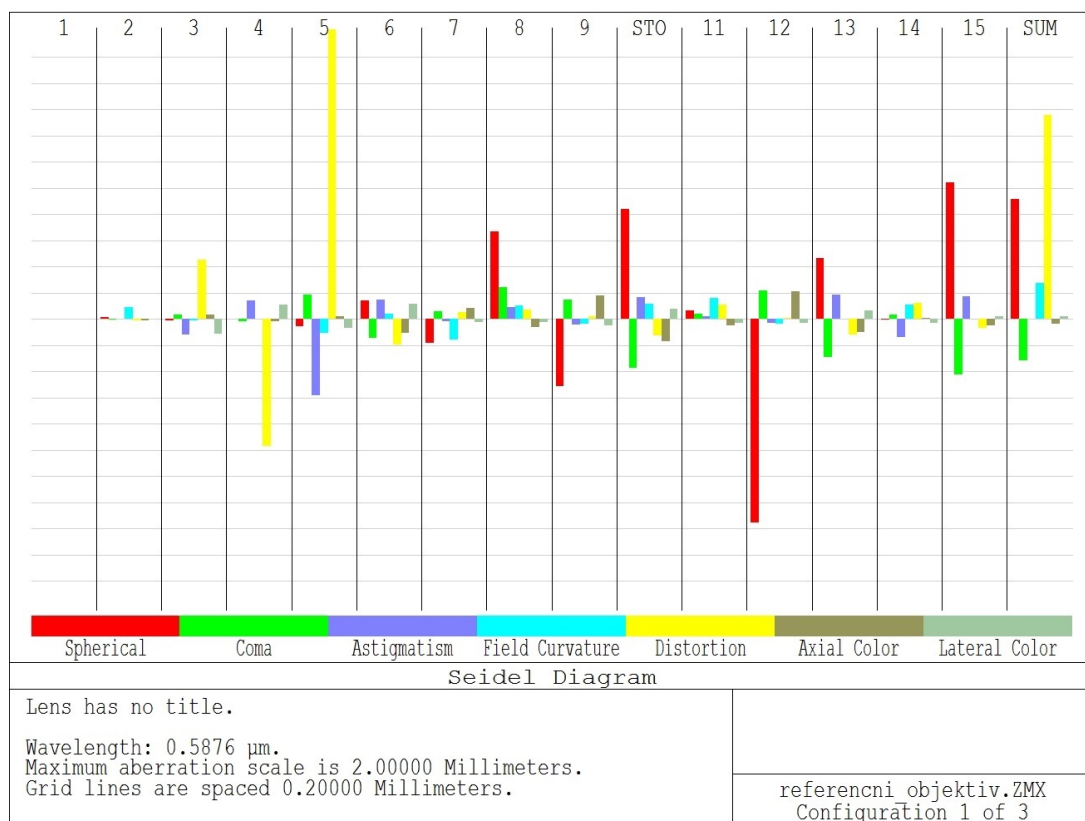
Obrázek 4.9: Referenční objektiv. Konfigurace č. 1. Graf Curvature/Distortion.

4.2. ANALÝZA REFERENČNÍHO OBJEKTIVU



Obrázek 4.10: Parametry referenčního objektivu pro konfiguraci č.2.

4.2. ANALÝZA REFERENČNÍHO OBJEKTIVU



Obrázek 4.11: Referenční objektiv. Konfigurace č. 1. Seidelův diagram.

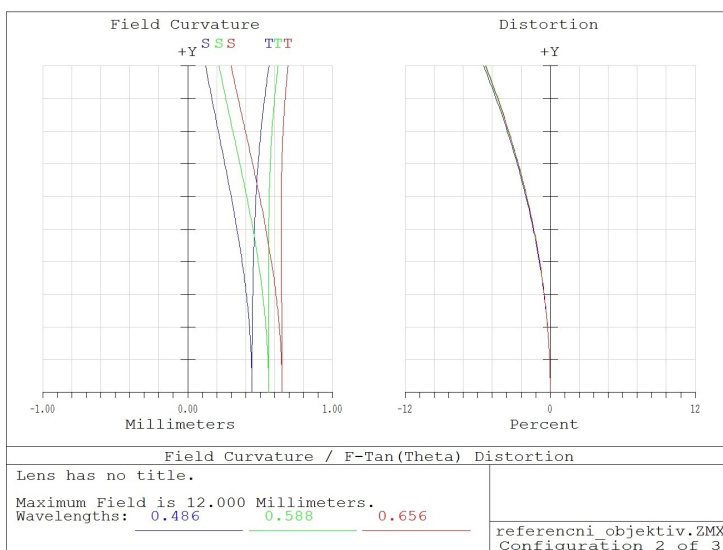
Vlastnosti objektivu pro konfiguraci 2:

Kvalita obrazu - kontrast

Určení kvality u dalších konfigurací probíhá obdobně, jako u předchozí konfigurace. Opět zkontrolujeme velikost spotu a průběh MTF. V obou grafech můžeme jasně vidět zlepšení kvality obrazu oproti konfiguraci 1. Číselné hodnoty zde již neuvádíme, budou pro srovnání přehledně sepsány v tabulce 4.15

Kvalita obrazu - Velikost zbytkových vad

Soustava je pro tuto konfiguraci dobře korigovaná. Vidíme jasné snížení hodnot zbytkových aberrací. Tvar spot diagramu má typický průběh pro vyváženou hodnotu komy, astigmatismu a sférické vady. Přítomnost nemalé barevné vady polohy nepůsobí v simulovaném obrazu rušivě. Zkreslení nabývá hodnoty 5,5% pro maximální pole.



Obrázek 4.12: Referenční objektiv. Konfigurace č. 2. Graf Curvature/Distortion.

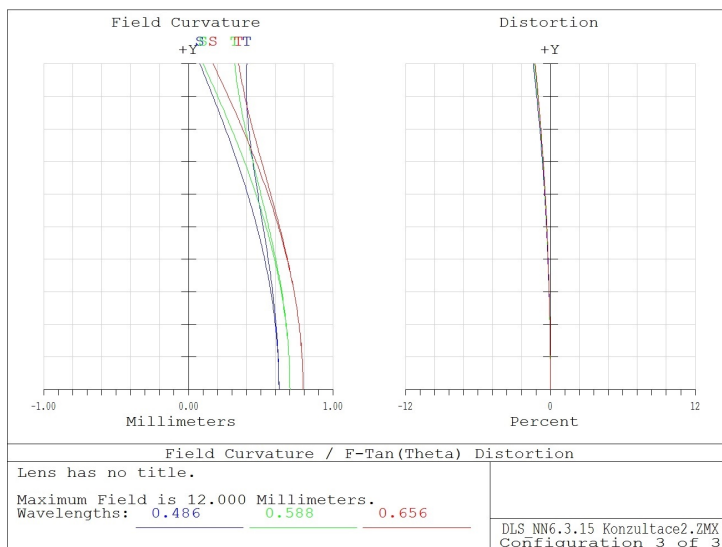
Vlastnosti objektivu pro konfiguraci 3:

Kvalita obrazu - kontrast

Kontrast obrazu je lehce horší, než tomu bylo u předchozí konfigurace. Stále je však na dobré úrovni. Velikost spotu je více než dvakrát menší, než u konfigurace 1.

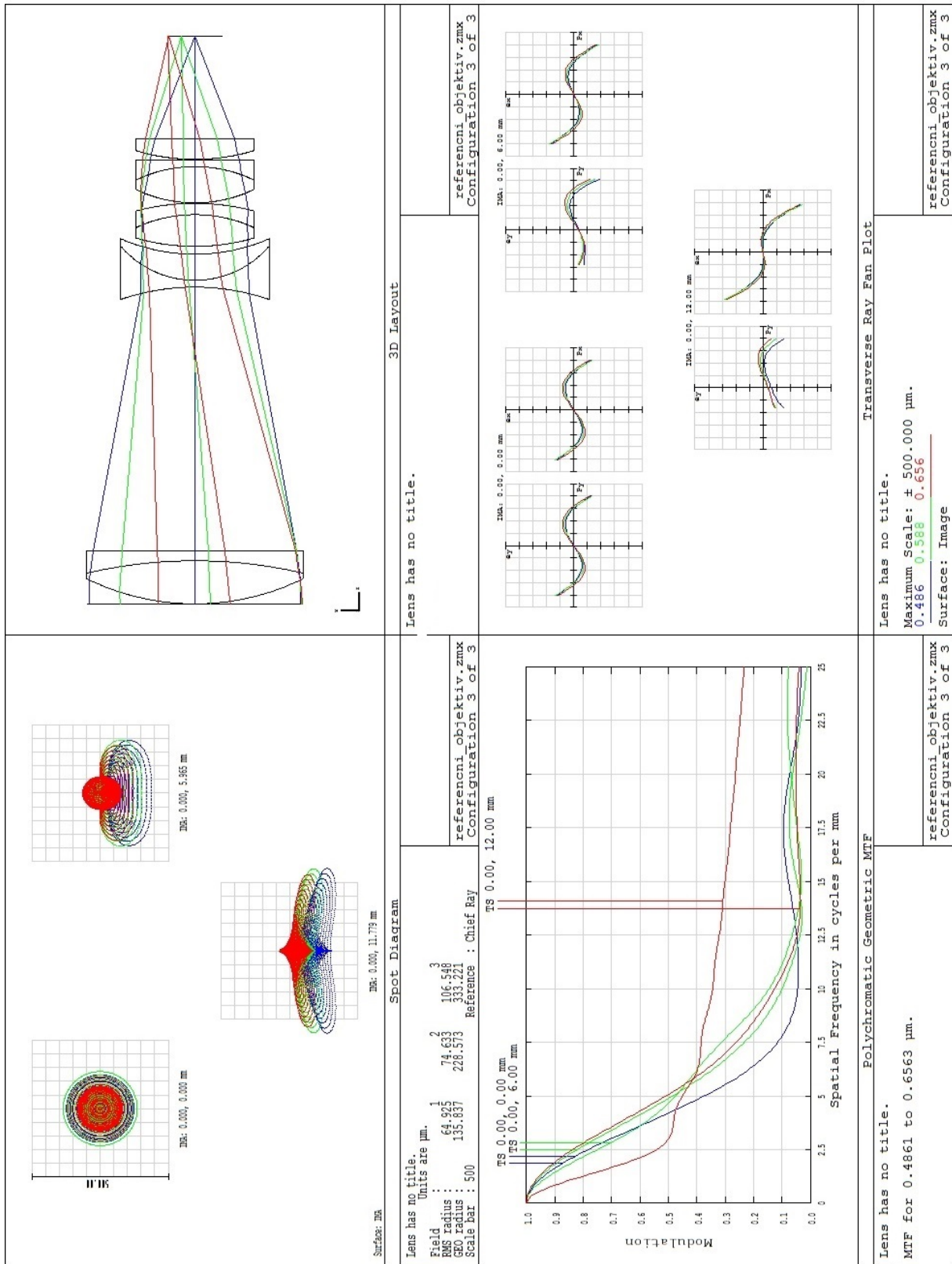
Kvalita obrazu - Velikost zbytkových vad

Zklenutí i astigmatismus jsou dobře korigované. Největší přínos má zde opět záporná koma a sférická vada. Největší přírůstek sférické vady vzniká na předním dubletu díky velkým průměrům čoček. V tomto nastavení se přední dublet využívá v celém průměru. Na rozdíl od předešlých konfigurací zde můžeme vidět i jasnou barevnou vadu. Podle Seidelových koeficientů je sice velikost barevné vady téměř nulová, my ovšem jednoznačně pozorujeme změnu polohy spotu v závislosti na vlnové délce. Jedná se tedy o barevnou vadu polohy. Projevuje se i v ray fanu tím, že y -ový přírůstek ey v y -ové ose je posunut ve směru y v závislosti na vlnové délce. Podíváme-li se na simulovaný obraz, je okraj předmětu lemován červeným nebo modrým okrajem. Tato konfigurace má ovšem nejmenší zvětšení a barevný okraj nevynikne tak, jako by tomu bylo například v konfiguraci 1.



Obrázek 4.13: Referenční objektiv. Konfigurace č. 3. Graf Curvature/Distortion.

4.2. ANALÝZA REFERENČNÍHO OBJEKTIVU



Obrázek 4.14: Parametry referenčního objektivu pro konfiguraci č.3.

Shrnutí parametrů

Konfigurace	(1)	(2)	(3)
Výstupní úhel β	Maximální 34,4°	Střední 17,8°	Minimální 10,8°
Efektivní ohnisková vzdálenost $EFFL$ [mm]	39	77	131
Clonové číslo $F/\#$ pro minimální úhel [mm]	1,37	1,42	1,39
α' [°] - Okrajový paprsek $H_y = 0, P_y = 1$	21,4	20,6	21
β_1' [°] - Okrajový paprsek $H_y = 1, P_y = 1$	13,3	12,1	12,4
β_2' [°] - Okrajový paprsek $H_y = 1, P_y = -1$	24,7	19,7	16,9
Poloměr RMS spotu $Field = 0$ [μm]	54	41	64
Poloměr RMS spotu $Field = \max$ [μm]	213	76	106
Poloměr GEO spotu $Field = 0$ [μm]	93	65	136
Poloměr GEO spotu $Field = \max$ [μm]	692	185	333
Rozlišení pro 50% kontrast [čar/mm]	3	5	4,5
Rozlišení pro 20% kontrast [čar/mm]	5	11	7,5
Zkreslení [%]	11	5,5	1,4

Obrázek 4.15: Shrnutí parametrů referenčního objektivu pro konfiguraci č. 1, č. 2 a č. 3.

5. NÁVRH OBJEKTIVU

„Návrh projekčního objektivu je obojí, umění i věda.“ M. Brennesholtz. [2]

V kapitole 4 jsme důkladně probrali návrh jednoho ze současných objektivů společnosti Robe Lighting. Shrnutí jsme jeho základní parametry a definovali minimální požadovanou kvalitu obrazu. Výsledky z předchozí kapitoly nyní použijeme pro návrh nového objektivu. Referenční objektiv zvolíme jako počáteční podmínky.

Nový objektiv je navrhován jako náhrada za reálné komerční zařízení, které je současně naším referenčním objektivem. Proto bylo nezbytné u nového návrhu zachovat velikost referenčního objektivu (obecně zástavbový prostor). Změna průměrů čoček a osové délky objektivu je sice částečně možná, ale pouze do té míry, aby byly zachovány současné krycí plasty hlavy přístroje. Výměna plastových krytů je totiž velmi nákladná. Limity pro zástavbový prostor nebyly pevně stanoveny, a tak všechny změny bylo nutné individuálně konzultovat s hlavním konstruktérem Robe Lighting. Aby měla výměna objektivu smysl, bylo nutné zlepšit některé z jeho základních parametrů. Dle specifikace požadavků zadavatele jsme se u nového návrhu snažili zmenšit minimální výstupní úhel pro dosažení vyšší svítivosti a zmenšit hodnotu zkreslení na maximálním úhlu při zachování kvality obrazu a světelnosti.

5.1. První návrhy

V průběhu dvou let, kdy vznikala návrh nového objektivu, bylo vytvořeno přes 200 různých návrhů a jejich pozdějších verzí. Před začátkem této práce jsme měli jen malé znalosti a zkušenosti s optickým návrhem. Veškeré vědomosti jsme získávali až v průběhu práce, především řešením problémů, na které jsme naráželi. Díky postupnému získávání znalostí bylo velké množství starších verzí nesprávných, což je se současnými vědomostmi patrné na první pohled. K současnému poznání však bylo třeba se dopracovat postupně a s určitými obtížemi. Čas strávený prací, hledáním problémů v návrhu a samotným návrhem, se v diplomové práci nedá plně docenit. Stejně tak zde nemůžeme popsat každý z návrhů, který jsme v průběhu vytvořili, ani popsat všechny chyby kterých jsme se dopustili. Zkusme tedy alespoň přiblížit, jakým vývojem optický návrh v průběhu řasu procházel.

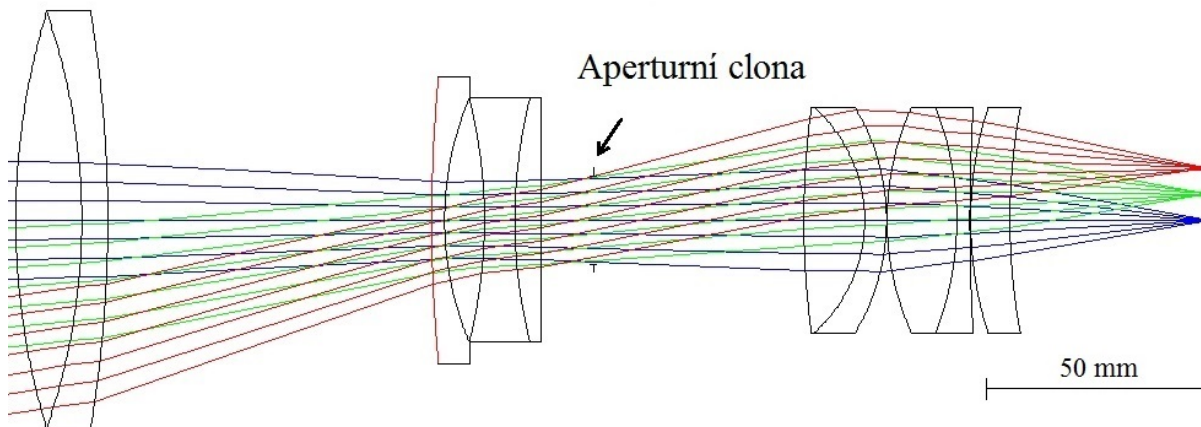
Na začátku jsme se setkali s problémem nastavení druhu, velikosti a polohy apertury v Zemaxu. Podařilo se jej do dostatečné míry vyřešit až správným nastavením vinětace, o které budeme hovořit později. Nesprávným nastavením apertury docílíme zkreslených výsledků oproti reálnému stavu, který panuje v hotovém zařízení. V případě zcela nesprávného nastavení může systém kompletně zkolabovat. K tomu dojde tehdy, pokud se některý z paprsků odkloní tak, že nedopadne na některou z nadefinovaných ploch (nebo dojde k totálnímu odrazu). Problém se zkolabováním návrhu jsme částečně vyřešili vytvořením aperturní clony a později také ručním nastavením její ideální polohy a velikosti. Kompletního řešení bylo dosaženo až pomocí automatického nastavení vinětace pro jednotlivá pole. Automatické nastavení vinětace přestane trasovat paprsky, které nedopadnou na některou z lámavých ploch. Nastavení vinětace se musí provádět po každé větší optimalizaci a zvyšuje časovou náročnost návrhu. V budoucnu lze práci urychlit vytvořením makra,

které nastaví vinětaci pro všechny konfigurace najednou.

Surf:Type		Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard	----->	Infinity	Infinity		Infinity
1	Standard		Infinity	50.000		58.680
2*	Standard	1	165.006	15.138	BK7	48.000 U
3*	Standard	2	-145.427	5.976	SF4	48.000 U
4*	Standard	-----:	-290.582	30.000		48.000 U
5	Standard		Infinity	44.381	V	0.000 U
6*	Standard	3	345.243	2.954	SK16	33.000 U
7*	Standard		71.575	9.150		28.000 U
8*	Standard	4	-115.495	7.000	SK16	28.000 U
9*	Standard		115.145	0.000		28.000 U
10*	Standard	5	115.145	5.979	SF6	28.000 U
11*	Standard	-----:	-5212.131	12.000		28.000 U
STO	Standard		Infinity	48.355	V	10.576
13*	Standard	6	194.250	13.980	BK7	26.000 U
14*	Standard	7	-34.793	5.009	SF1	26.000 U
15*	Standard		-50.112	0.138		26.000 U
16*	Standard	8	62.854	15.998	BK7	26.000 U
17*	Standard	9	-71.809	2.989	SF1	26.000 U
18*	Standard		430.588	0.182		26.000 U
19*	Standard	10	85.645	9.031	BK7	26.000 U
IMA	Standard		Infinity	-		12.000 U

Tabulka 5.1: *Objektiv 1. Parametry optické soustavy.*

Na obrázku 5.2 vidíme první generaci návrhu. V tabulce 5.1 jsou uvedeny jeho parametry. Podíváme-li se na objektiv dnešními očima, ihned vidíme, jakých chyb jsme se dopustili. Objektiv má příliš malou světelnost a aperturní clona v dané pozici nemůže reálně být, jelikož by bránila pohybu variátoru (v reálném zařízení se samostatné aperturní clony nepoužívají). Kvalita obrazu je s takto zacloněným objektivem dobrá, dokonce podstatně lepší, než u referenčního objektivu, který jsme popisovali v předchozí části práce. Hodnota zkreslení se pohybuje od -5% do +1%. Ovšem clonové číslo na minimálním úhlu dosahuje hodnoty $F/2,5$ namísto $F/1,4$ u referenčního objektivu. Odstraněním clony a nastavením vinětace se světelnost sice zlepší, jenže objektiv pro toto nastavení není optimalizovaný a nefunguje - téměř nevzniká obraz. Návrh objektivu v Zemaxu je v příloze pod číslem 21 a lze z něj v případě zájmu odečíst další parametry. Ještě větší chybou v návrhu byla nesprávná práce s optimalizační (meritní) funkcí. Pro dosažení reálných a výrobitelných rozměrů byla pro každé rozhraní maximální a minimální hodnota poloměru křivosti a osové tloušťky. Jedná se o zbytečně složitou metodu, která je extrémně časově náročná a pracná při hledání chyb. Stejného výsledku lze dosáhnout jen správným nastavením tloušťkových limitních hodnot (*Thickness boundary operand*) při definici defaultní meritní funkce. Operandy ovšem stále správně nefungovaly, protože neměly nastavenou dostatečnou váhu a optimalizace tyto podmínky snadno „prorazila“. Vznikaly tak negativní tloušťky čoček a jednotlivá rozhraní se překrývala.

Obrázek 5.2: *Objektiv 1.*

Přesuňme se nyní ze začátků práce do pozdější doby k již zajímavějšímu návrhu, jenž budeme nazývat (*Objektiv 2*). Jeho schéma vidíme na obrázku 5.4 a parametry jsou uvedeny v tabulce 5.3.

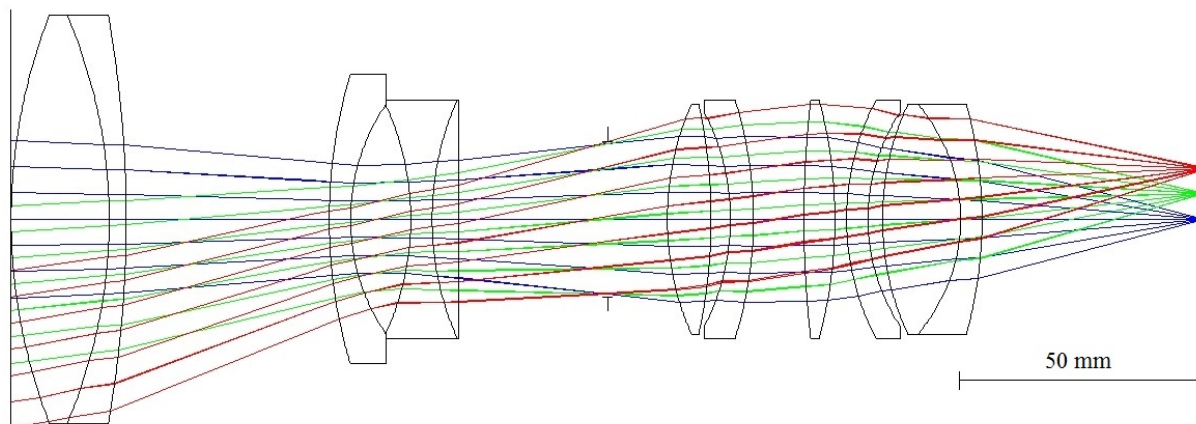
Surf:	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity
1	Standard		Infinity	0.000		38.353
2*	Standard	1	132.191 V	23.000	BK7	48.000 U
3*	Standard	2	-121.484 V	4.000	SF4	48.000 U
4*	Standard		-275.568 V	0.000		48.000 U
5	Standard		-275.568 P	-0.012 V		0.000 U
6*	Standard	3	119.517 V	5.012 V	N-LAK21	34.000 U
7*	Standard		47.794 V	14.119 V		27.000 U
8*	Standard	4	-64.687 V	5.000 V	SK16	27.000 U
9*	Standard		68.947 V	0.000		28.000 U
10*	Standard	5	68.947 P	6.271 V	SF4	28.000 U
11*	Standard		-2687.062 V	90.000		28.000 U
STO	Standard		Infinity	11.682 V		25.981
13*	Standard	6	67.038 V	10.253 V	N-BK7	27.000 U
14*	Standard		-128.387 V	4.552 V		27.000 U
15*	Standard	7	-55.000	5.400 V	SF1	25.000 U
16*	Standard		-93.570 V	11.829 V		28.000 U
17*	Standard	8	239.447 V	7.287 V	N-BK7	28.000 U
18*	Standard		-107.896 V	2.750 V		28.000 U
19*	Standard	9	59.761 V	5.000 V	SF1	28.000 U
20*	Standard		45.159 V	3.435 V		25.000 U
21*	Standard	10	64.132 V	18.332 V	BK7	27.000 U
22*	Standard	11	-41.421	5.005 V	SF10	27.000 U
23*	Standard		-101.206 V	46.985 T		27.000 U
IMA	Standard		Infinity	-		12.000 U

Tabulka 5.3: *Objektiv 2. Parametry optické soustavy.*

Jedná se o jeden z mnoha mezivýsledků, který vznikl globální optimalizací¹ při hledání nového tvaru optiky. Jeho pozdější úpravou jsme dospěli k finálnímu návrhu objektivu.

¹O optimalizačních modulech pojednáváme v kapitole 5.2.

Oproti referenčnímu objektivu byla přidána jedna čočka u variátoru pro dosažení většího rozsahu ohniskových vzdáleností. Bez použití přidané čočky jsme u variátoru dostávali pro dosažení potřebné ohniskové vzdálenosti příliš malé poloměry křivosti a čočky tak byly nevyrobitelné. Zjistili jsme také, že největší přínos pro velikost zkreslení vznikál na posledním rozhraní při výstupu paprsků z variátoru. Podle tabulky 3.9 má zvýšení počtu elementů při zachování ohniskové vzdálenosti značný vliv na korekci zkreslení. Přidání další čočky je pokusem korigovat zkreslení. Správné korekce se podařilo dosáhnout jednak přidáním zmíněné čočky a jednak správnou kombinací poloměrů křivosti.

Obrázek 5.4: *Objektiv 2.*

Další čočka byla přidána u kompenzátoru pro zlepšení kvality obrazu a zároveň zde byly uvolněny mezery mezi čočkami pro zvýšení počtu stupňů volnosti při optimalizaci návrhu. Porovnáním návrhů z obrázků 5.2 a 5.4 vidíme jasný posun k lepší světelnosti objektivu.

Návrh Objektivu 2 má ale stále zásadní nedostatky. Prvním nedostatkem je nedořešení problému s aperturní clonou a nevyužití maximální potenciální světelnosti. Můžeme to snadno ověřit výpočtem pomocí vzorce 3.4:

$$F/\# = \frac{\text{průměr vstupní pupily}}{\text{ohnisková vzdálenost}} = \frac{155}{93} \doteq 1,67 \quad (5.1)$$

Aktuální clonové číslo odečtené v Zemaxu je 2,4. Přitom výpočtem pomocí výše uvedeného vzorce bylo zjištěno, že maximální clonové číslo může dosáhnout 1,67. Je zřejmé, že je zapotřebí nalézt způsob, jak vytvořit funkční návrh bez aperturní clony, která v reálném zařízení nemůže být. Dalším nedostatkem je, že ačkoliv se v návrhu podařilo snížit velikost výstupního úhlu světla, klesla zákonitě světelnost objektivu. Pro dosažení stejné světelnosti je nutné rozšířit průměr přední optiky. Po diskuzi s hlavním konstruktérem bylo zjištěno, že velikost maximálního průměru přední optiky v daném zařízení je $D_1 = 110$ mm. Navíc je třeba lehce zmenšit celkovou délku optické soustavy, která v porovnání s referenčním objektivem vzrostla o 30 mm a objektiv by se již nevešel do zařízení, do kterého je určen. Posledním nedostatkem je počet použitých čoček, který vzrostl o dvě nové čočky. V novém návrhu se počet čoček pokusíme zredukovat.

5.2. Zemax - nastavení meritní funkce

Při analýze a návrhu nového objektivu probíhá většina práce v programu Zemax. Zemax je optický trasovací program, který je určen převážně pro návrh a optimalizaci zobrazovací optiky. Návrhy zobrazovacích objektivů použitých v této práci přikládáme v příloze. Uživatelské prostředí Zemaxu je pouze v angličtině. Proto pro lepší orientaci v návrhu přikládáme seznam použitých operandů při návrhu meritní optimalizační funkce (viz. tabulka 5.5) a multikonfigurace (viz. tabulka 5.6). Vybrané operandy jsou použity i v kapitole 5.3.

AXCL, LACL	(<i>Axial colour, Lateral colour</i>) Operandy pro určení hodnoty a optimalizaci barevných vad
CONF	(<i>Configuration</i>) Nastaví aktuální konfiguraci. Operandy vždy platí jen pro jednu konfiguraci
CTGT, CTLT, CTVA	(<i>Center thickness greather than, Center thickness less than, Center thickness value</i>) Slouží pro nastavení středové tloušťky čočky nebo vzduchové mezery
CVGT, CVLT, CVVA	(<i>Curvature greather than, Curvature less than, Curvature value</i>) Slouží pro nastavení poloměru křivosti
MXET, MNET, ETVA	(<i>Maximum edge thickness, Minimum edge thickness, Edge thickness value</i>) Slouží pro nastavení okrajové tloušťky čočky nebo vzduchové mezery
DIST	(<i>Distortion</i>) Používáme pro zjištění hodnoty zkreslení a optimalizaci zkreslení
EFFL	(<i>Effective focal lenght</i>) Používáme pro určení hodnoty a optimalizaci efektivní ohniskové vzdálenosti
EFLX	(<i>Effective focal lenght in x plane</i>) Slouží pro určení hodnoty ohniskové vzdálenosti jednotlivých členů optické soustavy
FCGS, FCGT	(<i>Field curvature Sagital, Field curvature Tangencial</i>) Operand pro určení hodnoty a optimalizaci zklenutí pole v tangenciální a sagitální rovině
FTGT	(<i>Full thickness greater than</i>) Analyzuje vzdálenost dvou rovin pro 200 testovacích bodů a nastaví jejich vzdálenost větší, než je zadaná hodnota
GMTS, GMTT, GMTA	(<i>Geometric MTF sagital, Geometric MTF tangencial, Geometric MTF average</i>) Používáme společně s OPGT a slouží pro určení nastavení hodnoty MTF
OPGT, OPLT, OPVA	(<i>Operrand greather than, Operrand less than, Operrand value</i>) Operand větší / menší / rovno než. Slouží pro parametrickou kontrolu
RGLA	(<i>Reasonable glass</i>) Jedna z možností pro optimalizaci skel, dovoluje použití jen reálných skel z katalogu
RSRE	(<i>RMS Spot radius</i>) Slouží pro nastavení hodnoty RMS spotu
SUMM / DIFF	(<i>Sum, Difference</i>) Vráti hodnotu součtu / rozdílu dvou parametrů. Slouží pro parametrickou kontrolu
RAID	(<i>Ray angle of incidence</i>) Dopadový úhel paprsku

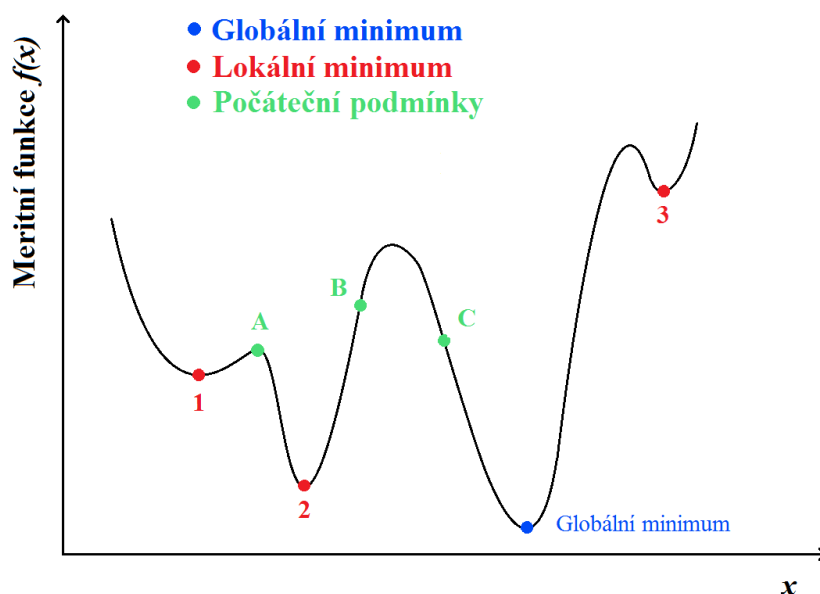
Tabulka 5.5: Nejčastěji používané operandy při návrhu meritní funkce v Zemaxu.

APER	(<i>Aperture</i>) Velikost apertury
CWGT	(<i>Configuration value</i>) Celková váha dané konfigurace
FWCX, FVCY, FVDY	(<i>Field vignetting factor</i>) Nastavení vinětace
STPS	(<i>Stop surface</i>) Nastaví daný povrch jako „stop „ povrch. Použito u starších návrhů bez vinětace
THIC	(<i>Thickness</i>) Osová tloušťka. Použito pro změnu polohy jednotlivých členů v různých konfiguracích
YFIE	(<i>Y-field value</i>) Nastaví hodnotu pole Y

Tabulka 5.6: Nejčastěji používané operandy pro multikonfigurace v Zemaxu.

Optimalizace

Optimalizace je kritickou fází při návrhu nového objektivu. Správným použitím lze s její pomocí dosáhnout výborných výsledků. Je nutné si uvědomit, že optimalizační modul je jen pomůckou optického návrháře pro vylepšení návrhu, nikoliv autonomním nástrojem pro návrh. Hlavní práce při návrhu stále leží v lidských rukou a nelze ji nahradit počítačem. Ideální řešení obvykle neexistuje a celý proces se skládá z hledání kompromisů a dostatečně dobrého návrhu. Upravujeme jej na základě našich znalostí, zkušeností a předchozích chyb pomocí operandů meritní funkce. Správné nastavení meritní funkce ne-



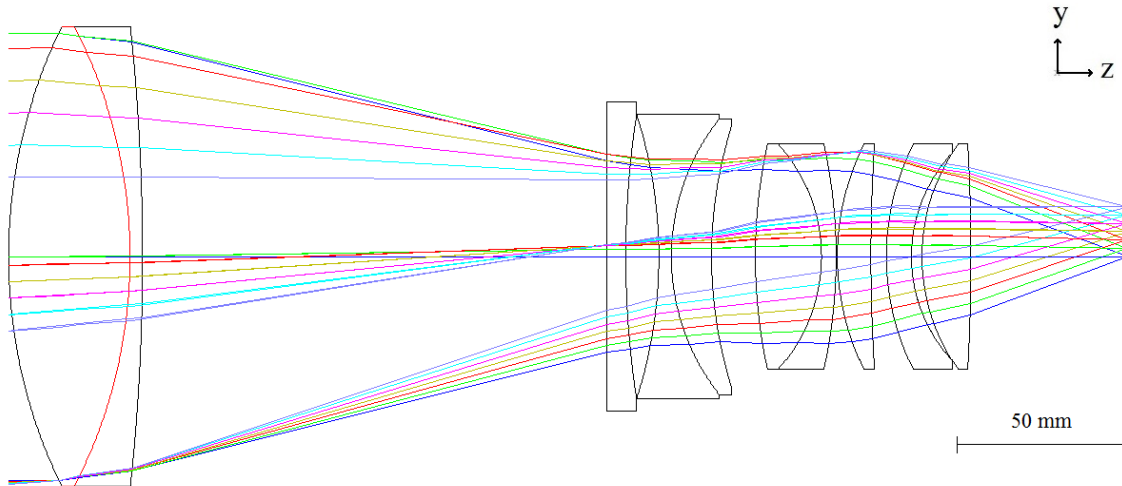
Obrázek 5.7: Graf meritní funkce a hledání globálního minima v závislosti na počátečních podmínkách.

musí vést k požadovanému výsledku, vycházíme-li z nesprávných počátečních podmínek. Vliv počátečních podmínek na výsledný návrh je extrémní. Na grafu 5.7 vidíme průběh meritní funkce $f(x)$ pro jednu proměnnou x . V závislosti na tom, který počáteční bod A, B nebo C zvolíme (počáteční podmínky), získáme po optimalizaci odlišné výsledky. Ideálním stavem je dosáhnout hodnoty globálního minima. Zvolíme-li bod C, dostaneme se do globálního minima. Zvolíme-li ovšem bod A nebo B, dostaneme se do lokálního minima 2. Při volbě A se nedostaneme do minima 1. Zemax zvolí opačný směr, jelikož zde

klesá hodnota meritní funkce rychleji. Pokud bychom se chtěli dostat z lokálního minima 2 do globálního minima, je nutné změnit počáteční podmínky, nebo použít *globální* či *hammer* optimalizaci, která testuje metodou *Monte-Carlo* náhodné nastavení jednotlivých proměnných. Nicméně pro tuto optimalizaci je nutné mít již správně nastavenou meritní funkci. Příklad na obrázku 5.7 je značně zjednodušený, v reálném modelu byla meritní funkce funkcí o 37 proměnných, která sledovala přes čtyři tisíce operandů meritní funkce.

5.3. Finální návrh

Přejdeme nyní k finálnímu návrhu objektivu, který vidíme na obrázku 5.8. V tabulce 5.9 jsou uvedeny jeho parametry. Provedeme analýzu jeho vlastností a porovnáme je s referenčním objektivem. Pro lepší orientaci budeme postupovat stejným způsobem, jako v kapitole 5.3. Hlavní změnou u finálního návrhu oproti starším verzím je práce se světelností objektivu. Průměr přední optiky, světelnost objektivu a úhel okrajových paprsků jsou navrženy předem pomocí rovnic 3.3 a 3.4 a pomocí znalosti vinětace získané analýzou referenčního objektivu. Velikost úhlů α' a β' budeme kontrolovat pomocí operandu *RAID* a *OPGT*. Operandy byly používány již v předešlých návrzích pro kontrolu výstupního úhlu β . Pokoušeli jsme se je použít i pro nastavení světelnosti. Bez předchozího výpočtu jsme však nastavili úhly a světelnost větší, než je reálně možné. Požadovali jsme tak nereálné řešení, které vyústilo v „proražení“ některé z pevně nastavených limitních hodnot a nefunkčnost celého návrhu.



Obrázek 5.8: *Finální objektiv. Konfigurace č.3.*

Referenční objektiv i náš finální návrh trpí značnou vinětací. Nastavení vinětace lze automaticky provést jako: *Fields* -> *SetVigneting* najednou pro všechny hodnoty pole. Vinětaci je nutné nastavit pro každou konfiguraci zvlášť a přenastavit po každé optimalizaci.

Problém při návrhu působilo, že Zemax v některých případech uvažuje i paprsky, které reálně nedopadnou na povrch s omezeným průměrem v *Lens Data Editoru*. Ke zmíněné

5.3. FINÁLNÍ NÁVRH

situaci dochází při použití operandu *RAID* při nastavení světelnosti objektivu. Několikrát se stalo, že Zemax tímto způsobem „korigoval“ optickou soustavu. Při optimalizaci docílil vinětace paprsků, která se zohlednila ve spot diagramu a vedla ke zlepšení kvality obrazu. Neprojevila se však ve změně světelnosti. Změna se projevila až po opětovném nastavení vinětace ve *Fields*. Podobných problémů s návrhem jsme v průběhu času našli nespočet. Poslední zmíněný problém se zatím nepodařilo vyřešit, umíme pouze poznat chvíli, kdy nastal.

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard	----->	Infinity	Infinity		Infinity
1	Standard		Infinity	0.000		0.000 U
2*	Standard	čočka1	124.907	29.000	N-BK7	55.000 U
3*	Standard	čočka2	-120.825	3.000	F7	55.000 U
4*	Standard		-519.713	110.939		55.000 U
5*	Standard	čočka3	Infinity	4.500	N-LAF3	37.000 U
6*	Standard		224.364	7.900		33.900 U
7*	Standard	čočka4	-111.237	3.000	N-SK16	34.000 U
8*	Standard	čočka5	53.198	9.600	SF6	33.000 U
9*	Standard		104.175	10.455		31.000 U
10*	Standard	čočka6	126.319	15.800	N-BK7	27.000 U
11*	Standard	čočka7	-40.144	3.500	SF1	27.000 U
12*	Standard		-124.394	0.300		27.000 U
*	Standard	*čočka8	60.139	8.000	N-SK16	27.000 U
14*	Standard	distance1	413.553	3.700		27.000 U
15*	Standard	čočka9	59.521	6.000	SF1	27.000 U
16*	Standard	distance2	36.576	2.500		25.000 U
17*	Standard	čočka10	46.144	11.700	N-BAK4	27.000 U
18*	Standard		-470.038	37.106	T	27.000 U
IMA	Standard		Infinity	-		12.000 U

Tabulka 5.9: *Finální návrh - Parametry čoček.*

Základní parametry objektivu

V tabulce 5.10 jsou shrnuty základní mechanické parametry objektivu. V závorce jsou kurzívou uvedeny hodnoty referenčního objektivu pro porovnání.

Průměr frontálního členu D_1 (optický D_{1O}) [mm]	110 (96) (107 (93))
Průměr obrazu H [mm]	24 (24)
Obrazová sečna x' [mm]	36-49 (45 - 49)
Celková délka optické soustavy L [mm]	267 (250,5)
Počet čoček (Přední člen + variátor + kompenzátor)	2 + 3 + 5 = 10 (2 + 2 + 5 = 9)
Vzdálenost mezi variátorem a kompenzáto ² w [mm]	8,9 (1,4)
Rozsah ostření bez omezení ohniskové vzdálenosti [m]	3 - ∞ (20 - ∞)

Tabulka 5.10: Základní vlastnosti finálního objektivu.

Výsledné parametry vyhovují požadavkům na velikost objektivu. Bylo nezbytné zvýšit počet čoček variátoru o jednu, aby se zvýšil rozsah změny ohniskové vzdálenosti a korekce zkreslení. Zvýšení počtu čoček napomůže vyrobiteľnosti čoček variátoru.

Světelnost

Rozsah ohniskové vzdálenosti je navržen na 39 mm - 155 mm ($\beta' = 8,9^\circ$) pro dosažení čtyřnásobné změny. Vypočteme nyní ideální clonové číslo objektivu.

$$F/\# = \frac{D_{1O}}{EFFL_{konfigurace1}} = \frac{107}{155} = 1,43$$

To odpovídá úhlu:

$$\alpha' = \arcsin \frac{D_{1O} \sin(\beta)}{H} = \arcsin \frac{107 \cdot \sin(4,45)}{24} \doteq 20,2^\circ$$

Porovnáme-li výsledky výpočtů s hodnotami ze Zemaxu v tabulce 5.11 vidíme, že je objektiv navržen s maximální možnou světelností.

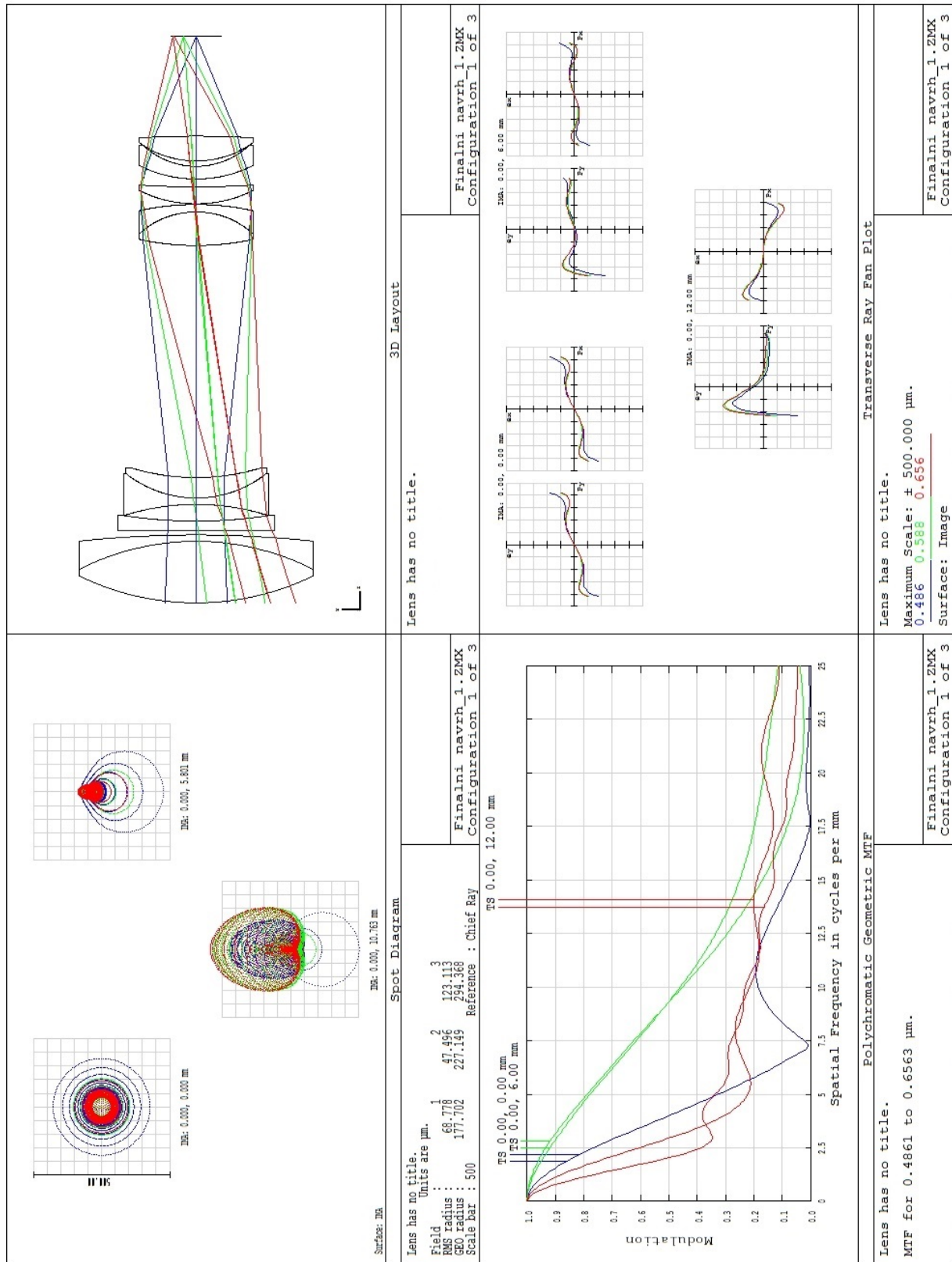
Konfigurace	1	2	3
Výstupní úhel β	Maximální 34,2° (34,4°)	Střední 16,7° (17,8°)	Minimální 8,9° ³ (10,8°)
Světelnost $F/\#$ pro minimální úhel [mm]	1,32 (1,37)	1,34 (1,42)	1,45 ⁴ (1,39)
α' [°] - Okrajový paprsek $H_y = 0, P_y = 1$	22,2 (21,4)	21,9 (20,6)	20,1 (21)
β'_1 [°] - Okrajový paprsek $H_y = 1, P_y = 1$	13,3 (13,3)	12,5 (12,1)	14,8 (12,4)
β'_2 [°] - Okrajový paprsek $H_y = 1, P_y = -1$	29,4 (24,7)	20,3 (19,7)	14,1 (16,9)

Tabulka 5.11: Světelnost finálního objektivu pro konfiguraci č. 1, č. 2 a č. 3.

²Při zaostření na nekonečno. Směrodatná je pouze hodnota pro konfiguraci č. 3, kdy nedostatečně velká mezera může způsobit omezení rozsahu ostření

³Minimální úhel je 7,9° při EFFL 173 mm, která se dá nastavit.

⁴Při nastavení objektivu na maximální ohniskovou vzdálenost referenčního objektivu EFFL = 131 mm je clonové číslo $F/\# = 1,22$.



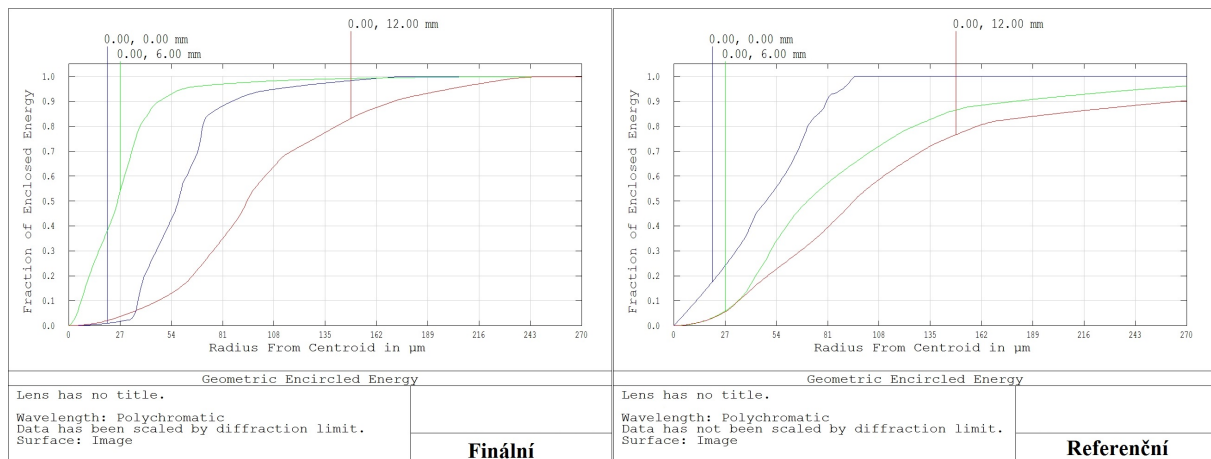
Obrázek 5.12: Parametry finálního objektivu pro konfiguraci č. 1.

Vlastnosti objektivu pro konfiguraci 1:

Opět rozdělíme parametry podle jednotlivých konfigurací. Provedeme zároveň srovnání s referenčním objektivem, jehož parametry již známe.

Kvalita obrazu - kontrast

Objektiv pro tuto konfiguraci dosahuje nejhorší kvality obrazu ze všech tří konfigurací. Je to způsobeno především vlivem přetrvávajícího zklenutí pole a nemožností zaostřit celý předmět. Ve srovnání s referenčním objektivem ovšem dostáváme velice dobré výsledky, především pro malé a střední hodnoty pole. Dle MTF je obraz na velkém úhlu stejně nekvalitní, jako v případě referenčního objektivu. Porovnáme-li však velikosti RMS spotu a nebo ještě lépe grafy *Encircled Energy*⁵, vidíme jasné zlepšení ve prospěch finálního návrhu viz. obrázek 5.13. U něj je 90% energie soustředěno v prvních 170 μm , kdežto u referenčního je to až na poloměru 270 μm .

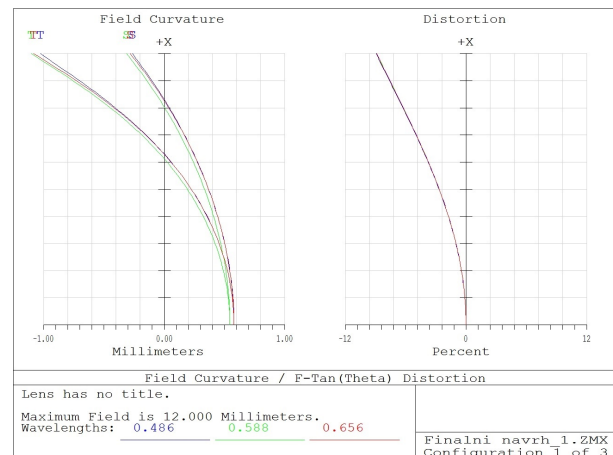


Obrázek 5.13: Porovnání grafů *Encircled Energy* (rozložení energie v závislosti na poloměru spotu) pro finální a referenční objektiv.

Kvalita obrazu - velikost zbytkových vad

Začněme rovnou nejdůležitějším parametrem, kterým je velikost zkreslení. Ta je u finálního návrhu 8,9% ve srovnání s 11% zkreslením u referenčního objektivu (viz. obrázek 5.14). Korekce zkreslení byla jedním z cílů. Zde vidíme, že se nám jej podařilo naplnit.

Dominantní vadu nedokážeme z obrázku 5.12 jednoznačně určit, protože jsou zde viditelné velké příspěvky jak sférické vady 5. řádu, tak komy, astigmatismu i defokusu vzniklého vlivem velkého zklenutí pole. Astigmatismus určujeme z grafu *Field/Curv* jako rozdíl mezi tangenciální a sagitální rovinou. Komu určujeme především ze spot diagramu. Na maximálním úhlu bylo dosaženo



Obrázek 5.14: Finální objektiv. Konfigurace č. 1. Graf *Curvature*/Distortion.

⁵Graf *Encircled Energy* udává závislost množství paprsků (či energie) v závislosti na poloměru spotu.

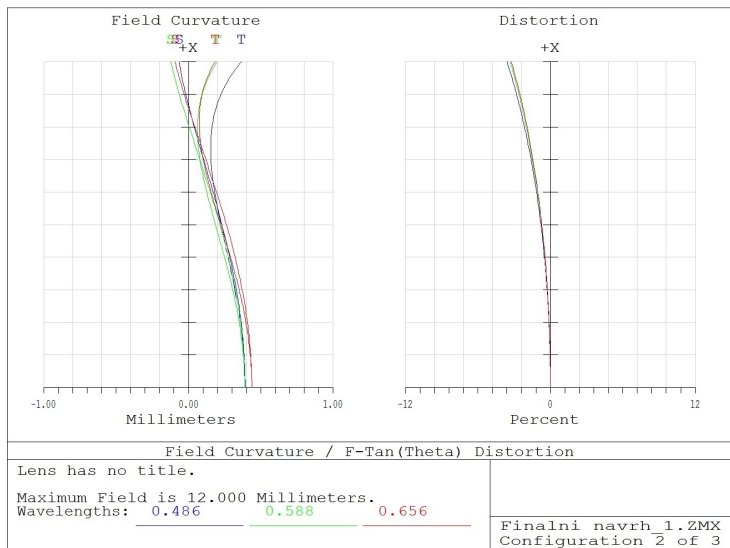
značného defokusu v kombinaci se zápornou komou.

Do meritní funkce byl zahrnut operand pro korekci barevné vady polohy i velikosti pro osový paprsek $AXCL$, $LACL$ ($Field = 0$). Barevná vada je malá pro malou a střední hodnotu pole, lehce se zhoršila pro maximální pole. Barevná vada polohy je korigovaná úplně (určíme z Ray Fanu - shodná směrnice v počátku pro všechny barvy). Simulací a analýzou obrazu nebylo zjištěno žádné zabarvení okrajů obrazu.

Vlastnosti objektivu pro konfiguraci 2:

Kvalita obrazu - kontrast

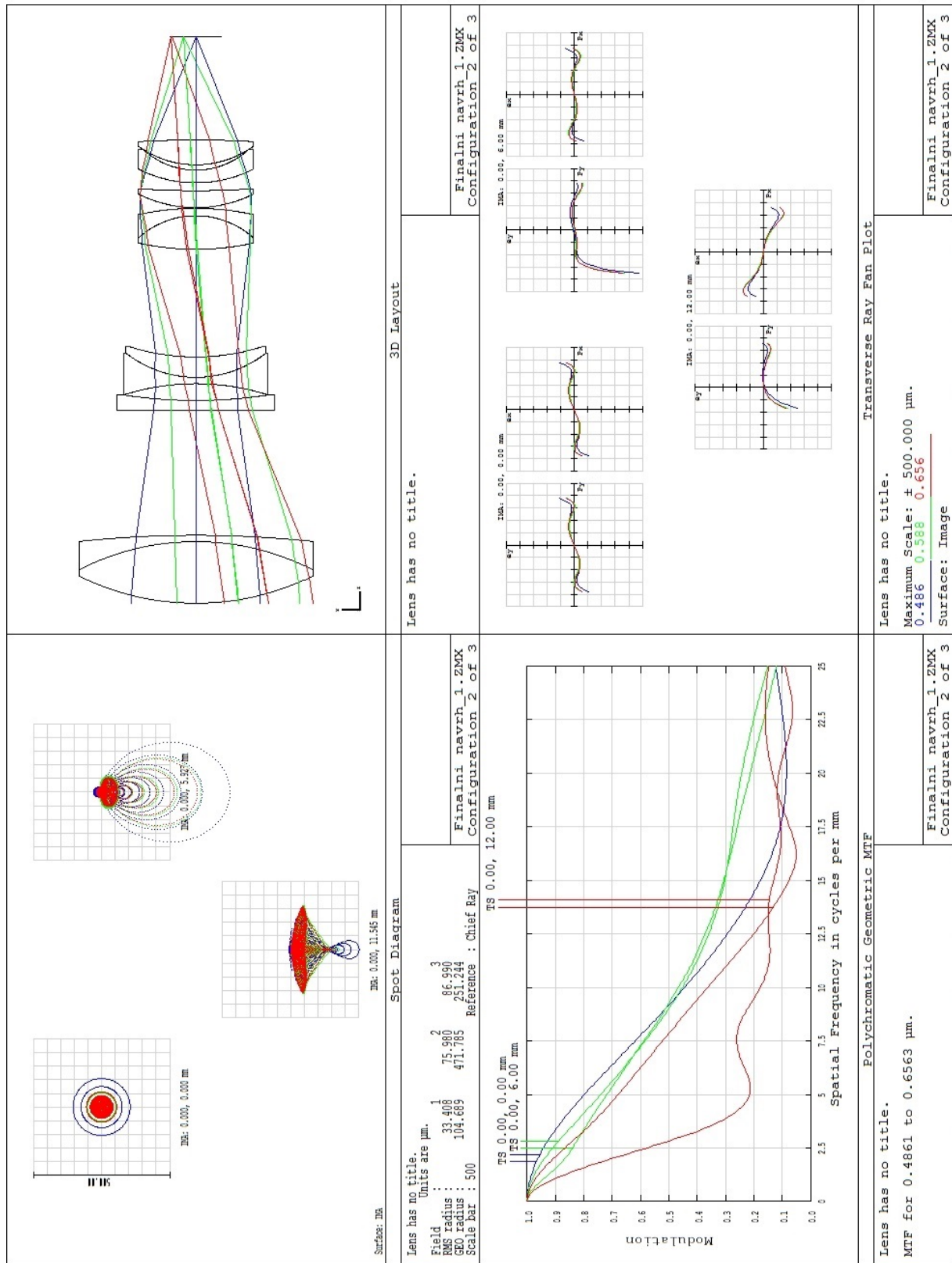
V porovnání s referenčním objektivem se kontrast obrazu obecně lehce zlepšil pro minimální a střední pole (viz. 5.16). Pro maximální pole se zhoršil v sagitální rovině vlivem tvaru spotu. Zhoršení kontrastu pro maximální pole nás provází ve všech konfiguracích a je způsobeno zvětšením světelnosti objektivu a snížením vinětace. Objektivem projdou více vychýlené paprsky, které přináší velké mimoosové vady (především komu). I přesto se kontrast na malém a středním poli zlepšuje. To napovídá, že zacloněním objektivu na hodnotu referenčního objektivu bychom dosáhli celkově lepších výsledků v celé šíři pole. Zajímavý jev můžeme pozorovat pro střední hodnotu pole, kde se výrazně projevila koma, která se pro maximální pole opět ztrácí (zóna, která přispívala nejvíce k velikosti komy je vinětovaná viz. obrázek 3.8). Vysoká hodnota komy vyústila pouze ke zvětšení GEO spot rádiusu. Kontrast nebyl ovlivněn, neboť komu tvoří jen malé množství paprsků.



Obrázek 5.15: *Finální objektiv. Konfigurace č. 2. Graf Curvature/Distortion.*

Kvalita obrazu - Velikost zbytkových vad

Porovnávat velikost zkreslení pro konfiguraci 2 finálního a referenčního objektivu je bezpředmětné, tyto konfigurace se liší seohniskovou vzdáleností. Přesto uvedeme hodnotu zkreslení, která činí pouze 3,5% (viz. 5.17). Objektivně lze říci, že se zkreslení u finálního návrhu zlepšilo v celé délce ohniskové vzdálenosti. Dle Seidelových koeficientů by měla být přítomna barevná vada polohy, kterou ovšem nepozorujeme v simulovaném obrazu, spot diagramu, ray fanu ani v grafu zaklenutí pole. Již jsme zmiňovali, že oproti referenčnímu objektivu vzrosla velikost komy (kladné).



Obrázek 5.16: Parametry finálního objektivu pro konfiguraci č.2.

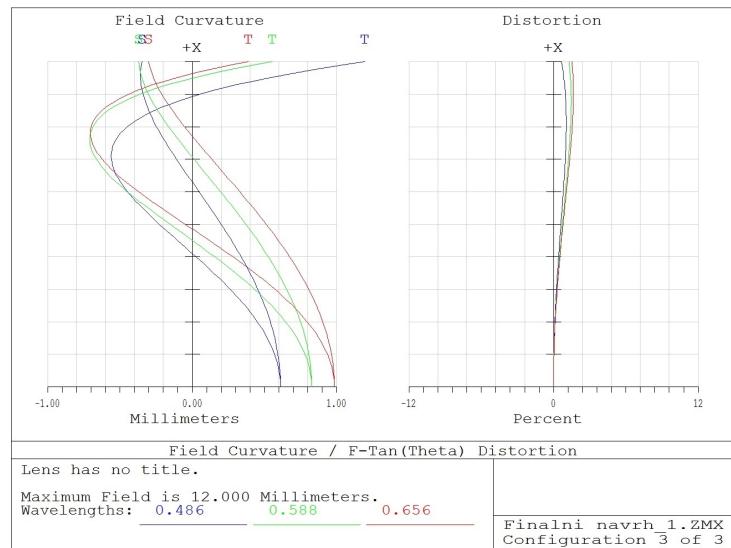
Vlastnosti objektivu pro konfiguraci 3:

Kvalita obrazu - kontrast

Ze Spot diagramu i grafu MTF (viz. 5.19) opět vidíme stejný efekt jako u dvou předešlých konfigurací. Kontrast se zvýšil na malé a střední hodnotě pole a jen lehce se zhoršil pro maximální pole (objektiv je pro tuto konfiguraci mírně začloněný - byli jsme omezeni průměrem frontálního členu).

Kvalita obrazu - Velikost zbytkových vad

Pro korekci barevné vady jsme použili metodu inspirovanou referenčním objektivem. Definovali jsme operandy pro korekci barevné vady velikosti a polohy pouze pro konfiguraci 1 a 2, kde se barevná vada výrazně zlepšila na úkor této konfigurace. Záměr byl splněn, jelikož v této konfiguraci nepůsobí barevná vada takový problém a není tolik viditelná. Rozdílné velikosti tečny v ray fanu značí přítomnost barevné vady polohy. Velikost obrazu závislá na vlnové délce vypovídá o barevné vadě velikosti. Zkreslení je 1,2% (viz. 5.17). Změnilo se z soudkového na poduškovité.



Obrázek 5.17: *Finální objektiv. Konfigurace č. 3. Graf Curvature/Distortion.*

Shrnutí

Abychom předešli ztrátě některých důležitých informací z předcházejícího textu, shrňme nyní nejdůležitější vlastnosti nového objektivu v porovnání s referenčním objektivem. Hlavní porovnání je provedeno v tabulce 5.18. Další mechanické parametry byly uvedeny v 5.10.

U finálního návrhu se podařilo dosáhnout hlavních cílů. Těmi bylo dle specifikace zadavatele jednak zmenšení výstupního úhlu β (zmenšil se z $10,8^\circ$ na $8,9^\circ$ resp. $7,9^\circ$ při zaostření na nekonečno), a zároveň snížení zkreslení (sníženo z 11% na 8,9%). Současně bylo požadováno zachování nebo zlepšení světelnosti a kvality obrazu. Obecně je světelnost i kvalita obrazu u nového návrhu lepší, barevná vada zůstává na stejné hodnotě. Kontrast pro maximální pole se mírně zhoršil vlivem větší světelnosti. Celková velikost objektivu zůstala v požadovaných hranicích. Navíc byl zvýšen rozsah změny ohniskové vzdálenosti z 3,3x na 4x (resp. 4,4x při zaostření na nekonečno). Referenční objektiv neměl dostatečnou mezeru w mezi variátorem a kompenzátořem, což vyústilo v omezenou možnost ostření do konečných vzdáleností. Bez snížení ohniskové vzdálenosti v konfiguraci 3 je možné zaostřit pouze v rozsahu $\infty - 20$ m u referenčního objektivu a v rozsahu $\infty - 3$ m u finálního objektivu. V předešlém textu jsme se zmínili o možnosti snížit výstupní úhel až na hodnotu $7,9^\circ$ (při EFL 173 mm) při ostření na nekonečno. Mezera mezi variátorem a kompenzátořem skýtá tuto možnost, byť při dalším zvyšování ohniskové vzdálenosti roste velikost barevných vad. Podařilo se také snížit počet čoček o jednu oproti *Objektivu 2*, z

5.3. FINÁLNÍ NÁVRH

něžž bylo vycházeno, ačkoliv je to stále o jednu více, než u referenčního objektivu. Cena nového finálního objektivu bude zákonitě o něco vyšší kvůli použití větších průměrů čoček a dražších skel. S tím ovšem bylo od začátku počítáno. Objektiv stále otevírá možnost další optimalizace barevné vady. Celkově se ale jedná o úspěšný návrh, který může aktuálně nahradit referenční objektiv.

Následující tabulka shrnuje parametry finálního objektivu v porovnání s referenčním objektivem.

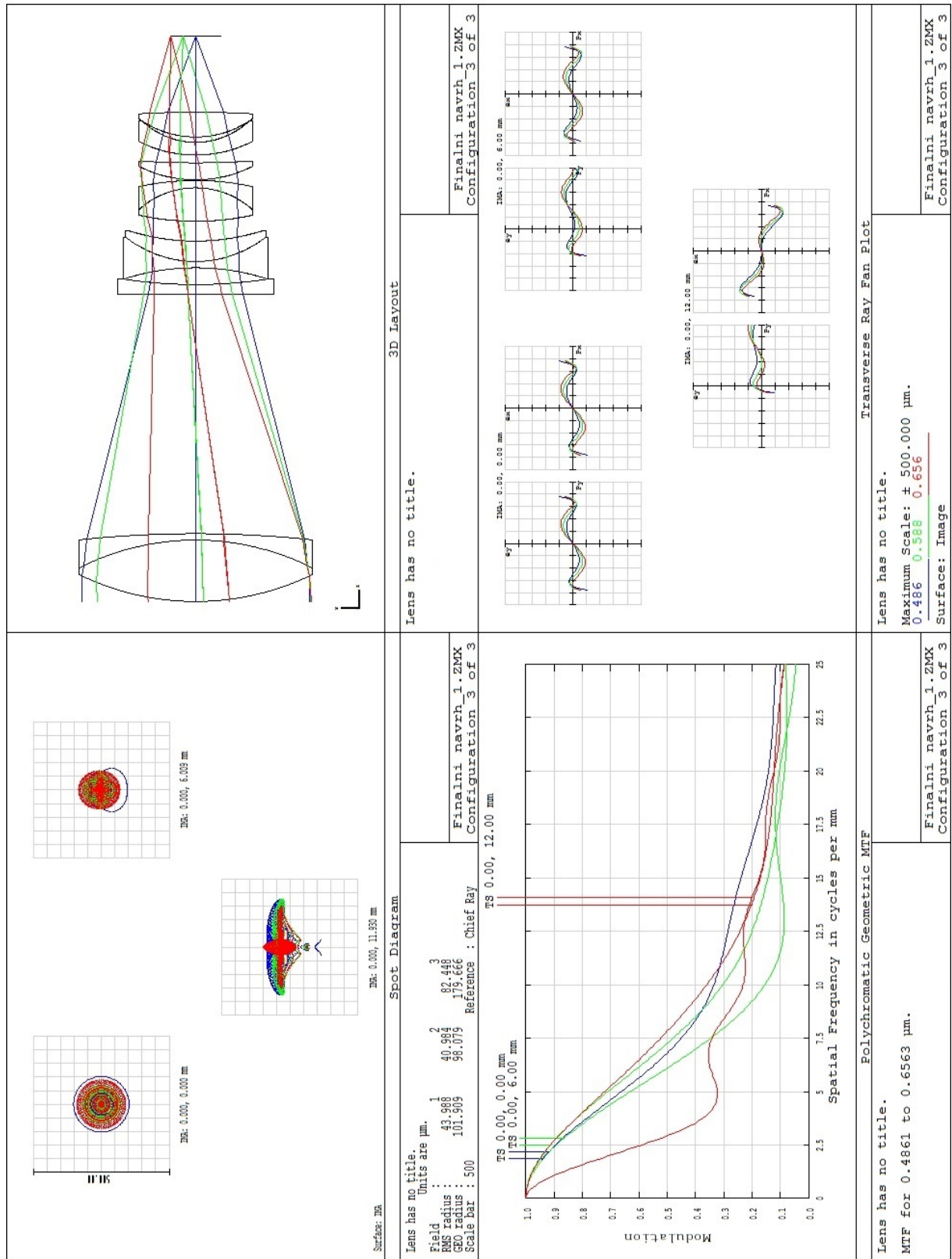
Konfigurace	(1)	(2)	(3)
Výstupní úhel β	Maximální 34,2° (34,4°)	Střední 16,7° (17,8°)	Minimální 8,9° ⁶ (10,8°)
Efektivní ohnisková vzdálenost $EFFL$ [mm]	39 (39)	82 (77)	155 (131)
Clonové číslo $F/\#$ pro minimální úhel β [mm]	1,32 (1,37)	1,34 (1,42)	1,45 ⁷ (1,39)
α' [°] - Okrajový paprsek $H_y = 0, P_y = 1$	22,2 (21,4)	21,9 (20,6)	20,1 (21)
β'_1 [°] - Okrajový paprsek $H_y = 1, P_y = 1$	13,3 (13,3)	12,5 (12,1)	14,8 (12,4)
β'_2 [°] - Okrajový paprsek $H_y = 1, P_y = -1$	29,4 (24,7)	20,3 (19,7)	14,1 (16,9)
Poloměr RMS spotu $Field = 0$ [μm]	67 (54)	32 (41)	44 (64)
Poloměr RMS spotu $Field = \max$ [μm]	125 (213)	86 (76)	82 (106)
Poloměr GEO spotu $Field = 0$ [μm]	175 (93)	101 (65)	99 (136)
Poloměr GEO spotu $Field = \max$ [μm]	299 (692)	253 (185)	180 (333)
Rozlišení pro 50% kontrast [čar/mm]	5 (3)	6,5 (5)	5 (4,5)
Rozlišení pro 20% kontrast [čar/mm]	10 (5,5)	14 (12)	12,5 (8,5)
Zkreslení [%]	8,9 (11)	3,5 (5,5)	1,2 ⁸ (1,4)

Obrázek 5.18: Shrnutí parametrů finálního návrhu objektivu pro konfiguraci č. 1, č. 2 a č. 3 v porovnání s referenčním objektivem (hodnoty v závorce kurzívou).

⁶Minimální úhel je 7,9° při $EFFL$ 173 mm.

⁷Při nastavení objektivu na maximální ohniskovou vzdálenost referenčního objektivu $EFFL = 131$ mm je clonové číslo $F/\# = 1,22$.

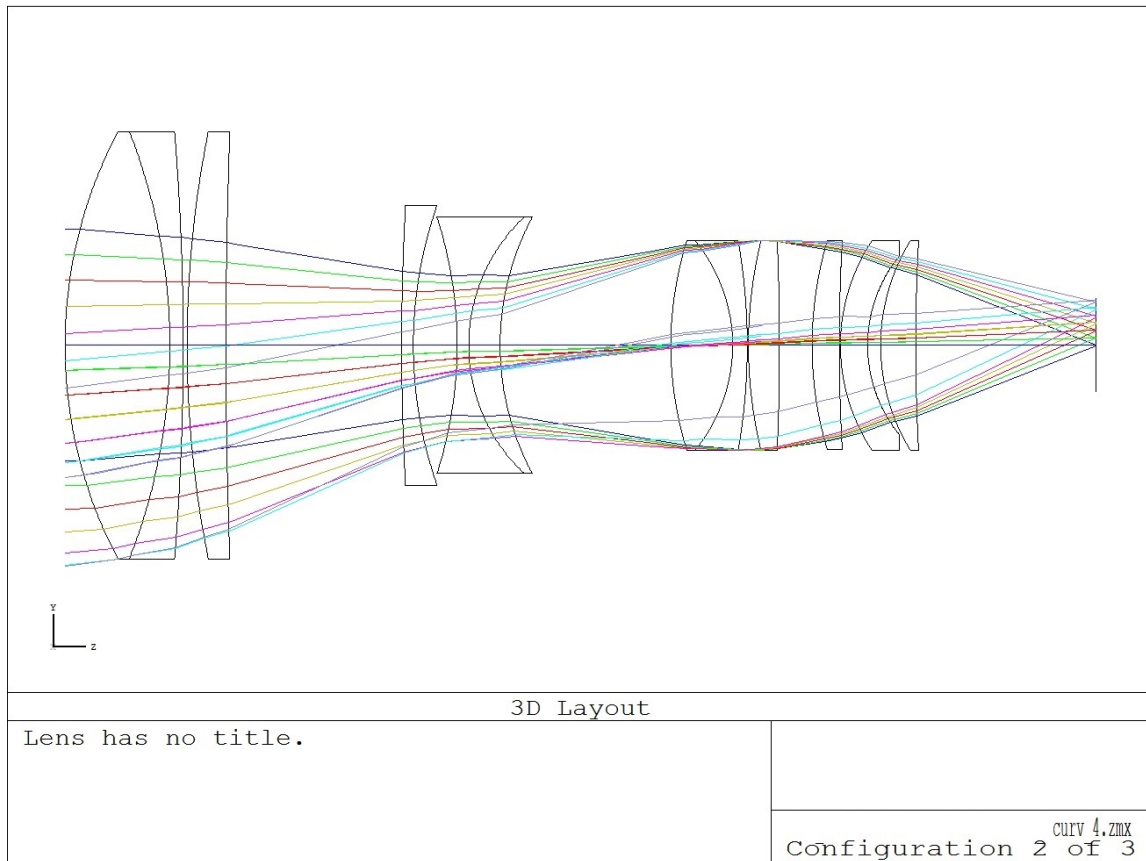
⁸Změna zkreslení ze soudkového na poduškovité.



Obrázek 5.19: Parametry finálního objektivu pro konfiguraci č.3.

5.3.1. Směřování dalšího vývoje

V předchozí části práce byl s úspěchem vytvořen návrh nového objektivu pro reálné zařízení. Při práci jsme pochopili některé možnosti a zákonitosti návrhu osvětlovacích objektivů. Ověřili jsme si důležitý fakt, že je možné vytvořit návrh se zkreslením pod 3% v celém rozsahu změny ohniskové vzdálenosti. Toho bylo dosaženo jen u značně zacloněných objektivů anebo u složitějších návrhů s 11 a více čočkami. V obou případech se zlepšilo zkreslení, neboť byla lépe korigována sférická vada. Při vývoji finálního objektivu jsme byli omezeni mnoha podmínkami pro minimální parametry kvality, zástavbový prostor a cenu. Zkreslení pod 3% tak nebylo možné kvůli limitujícím podmínkám dosáhnout. V dalším vývoji, již bez limitujících podmínek, se zaměříme na vývoj objektivu s ještě menším zkreslením. Přitom použijeme jako počáteční podmínky jeden z výstupů této práce. S návrhem jsme již začali - jedno z možných řešení uvádí obrázek 5.20. Hlavním přínosem je použití další čočky u předního členu, kde vznikala příliš velká sférická vada, která se tak kompenzuje.

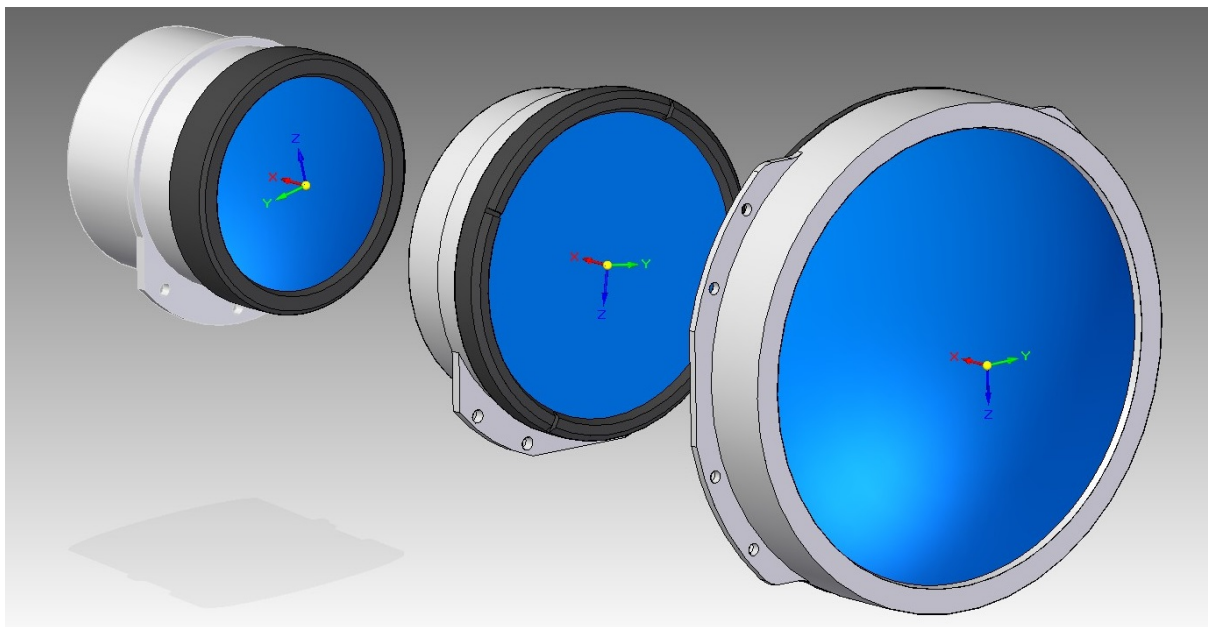


Obrázek 5.20: Nástin budoucího návrhu s redukováným zkreslením pod 3%.

V současnosti také probíhá návrh optické osy, který zahrnuje samostatně vývoj lampy, eliptického fazetovaného reflektoru a projekční optiky. Věřím, že sjednocením návrhu bude dosaženo lepších výsledků než při samostatném návrhu. Pro tento výzkum je v rámci diplomové práce připraven teoretický základ pro odvození hodnoty Etendue pro eliptický reflektor.

6. MECHANICKÉ ULOŽENÍ OBJEKTIVU

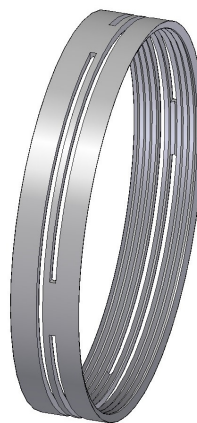
Specifikujeme mechanické uložení finálního objektivu s ohledem na podmínky z části 4.1, kterým je svítidlo vystaveno. Objektiv je určen pro výrobu a použití v komerčním zařízení. Mechanický návrh je vytvořen v souladu s požadavky společnosti Robe Lighting s.r.o. Pro výrobu jednotlivých dílů slouží výrobní výkresy v příloze.



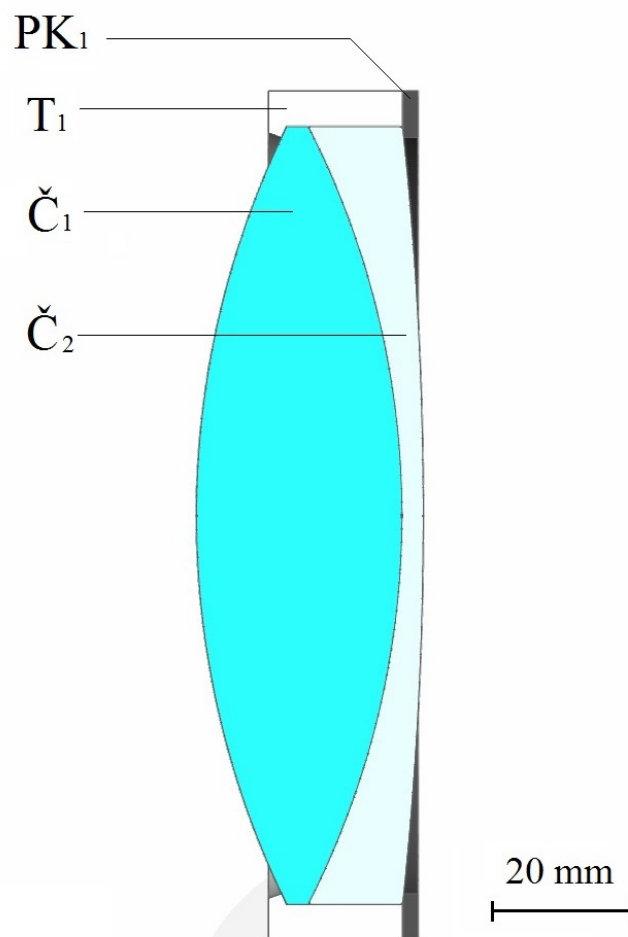
Obrázek 6.1: Celkový náhled na výslednou mechanickou sestavu.

Dilatace

Rozdílná teplotní roztažnost duralového tubusu a skleněných čoček působí základní problém pro uložení čoček. V podkapitole 4.1.1 jsme spočetli, že maximální očekávaná změna při zahřátí je 0,1 mm. Uložení čoček musí být s vůlí. Pro dodržení této vůle je vnitřní průměr tubusu vyráběn s tolerancí $+0$ až 0,1 mm a průměr čoček s tolerancí -0,1 až -0,3 mm. V nejhorším případě dostaneme vůli 0,1 mm. Ze zjevných důvodů bychom měli tuto vůli dodržet i v osové směru. Vnitřní pnutí v čočkách však nezpůsobuje významné zhoršení v zobrazení objektivu a je tedy nutné zabránit pouze mecha-

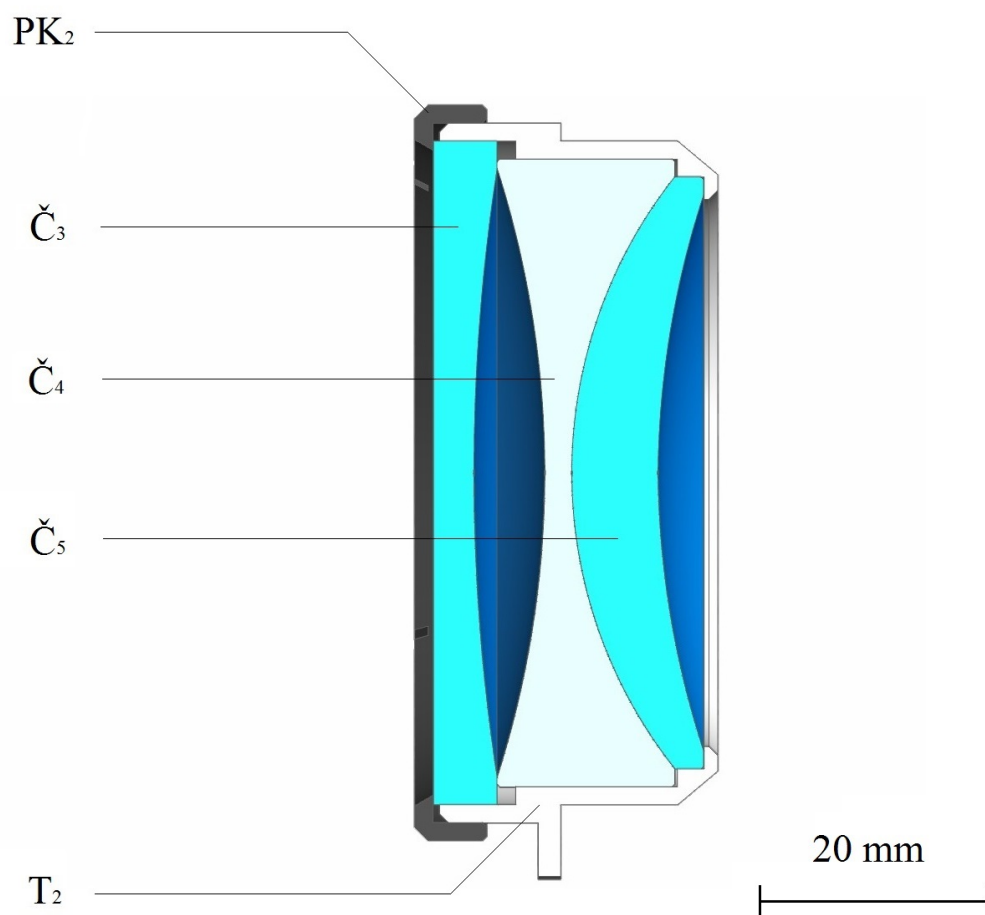


Obrázek 6.3: Alternativní návrh distančního kroužku. Proříznutím lze vytvořit levný kompenzační člen pro redukci vnitřního pnutí v čočkách vzniklého rozdílnou dilatací skla čoček a duralu tubusu.



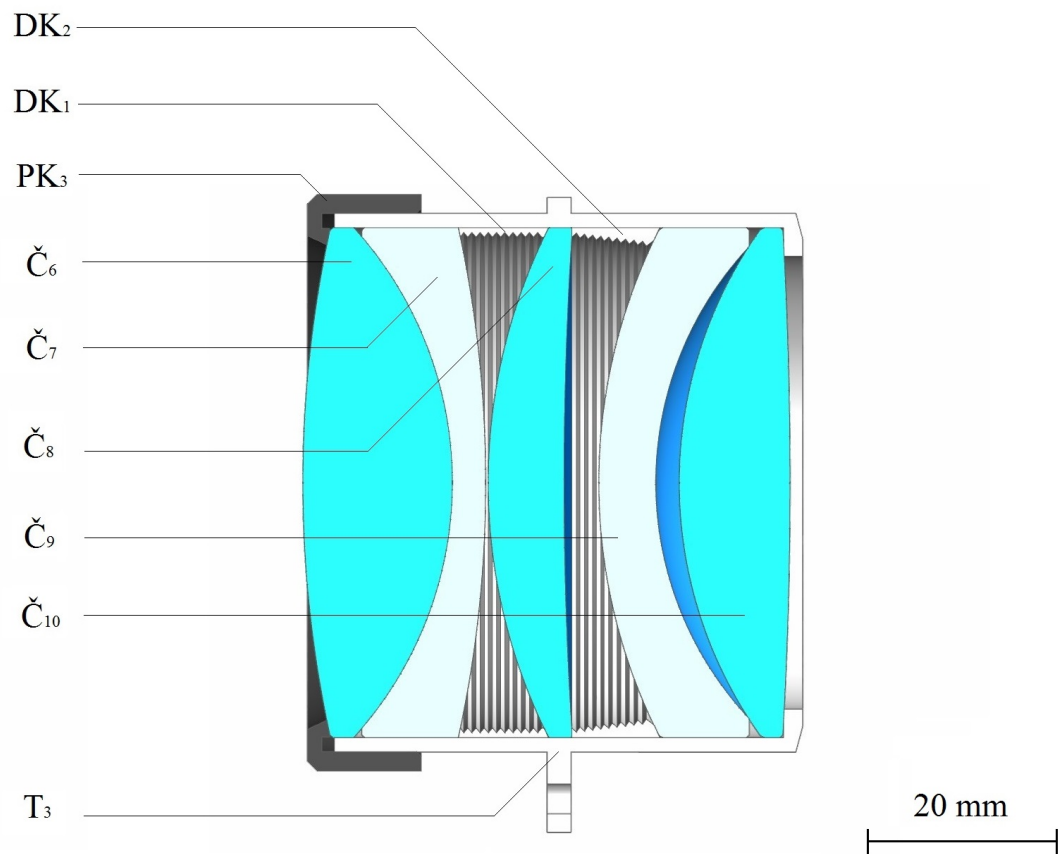
Obrázek 6.2: *Mechanický návrh přední optiky. PK₁... pojistný kroužek přední, T₁... tubus přední, Č₁... čočka 1, Č₂... čočka 2.*

nickému poškození, které může vzniknout při přílišném dotažení pojistného kroužku. Dodavateli optiky předepíšeme utažení pojistných kroužků na hodnotu 1,5 Nm. Tato hodnota by měla zajistit dostatečnou fixaci členů optiky a zabránit mechanickému poškození vlivem vnitřního pnutí.



Obrázek 6.4: *Mechanický návrh variátoru. PK_2 ... pojistný kroužek - variátor, T_2 ... tubus variátor, $\check{C}_3 - \check{C}_5$... čočka 3 - 5.*

Kdyby se i přesto objevily problémy s dilatací, lze použít levnou metodu bez nutnosti významné změny mechanického návrhu. Z distančního kroužku 1 lze vytvořit kompenzační člen částečným proříznutím, které vidíme na obrázku 6.3. Tato metoda není běžně používána a s její implementací váháme, neboť proříznutými otvory by se mohl mezi čočku 7 a 8 dostat prach a nečistoty.



Obrázek 6.5: *Mechanický návrh kompenzátoru. DK₁... distanční kroužek 1, DK₂... distanční kroužek - kompenzátor 2, PK₃... pojistný kroužek kompenzátor, T₃... tubus Č₆-Č₁₀... čočka 6 - 10.*

Na závěr uvádíme kusovník všech vyráběných dílů. Kompletní výkresovou dokumentaci nalezneme v příloze.

NÁZEV SOUČÁSTI	ČÍSLO VÝKRESU	MATERIÁL	MNOŽ.
Čočka 1	FNO C1	N-BK7	1
Čočka 2	FNO C2	F7	1
Čočka 3	FNO C3	N-FAF7	1
Čočka 4	FNO C4	N-SK16	1
Čočka 5	FNO C5	N-SF6	1
Čočka 6	FNO C6	N-SF1	1
Čočka 7	FNO C7	N-SK16	1
Čočka 8	FNO C8	N-SF1	1
Čočka 9	FNO C9	N-BAK4	1
Distanční kroužek 1	FNO D1	Dural ENAW 6063	1
Distanční kroužek 2	FNO D2	Dural ENAW 6063	1
Pojistný kroužek - přední	FNO P1	Konstrukční ocel	1
Pojistný kroužek - variátor	FNO P2	Dural ENAW 6063	1
Pojistný kroužek - kompenzátor	FNO P3	Dural ENAW 6063	1
Přední tubus	FNO T1	Dural ENAW 6082	1
Tubus - variátor	FNO T2	Dural ENAW 6063	1
Tubus - kompenzátor	FNO T3	Dural ENAW 6063	1

Tabulka 6.6: Kusovník. Finální objektiv.

7. ZÁVĚR

Předkládaná diplomová práce popisuje návrh a optimalizaci varifokálního objektivu k projekčním osvětlovacím účelům. Návrh vznikl pro potřeby společnosti Robe Lighting s.r.o., která specifikovala požadavky pro finální produkt. Všechny hlavní požadavky se podařilo dodržet. Jsou rozvedeny v kapitole 5.3. Byl navržen objektiv, který dosáhl nad rámec požadovaných vlastností. Jelikož byl navržen jako náhrada současného objektivu, bylo nezbytně nutné dodržet velikost objektivu. Velikost navrženého objektivu se oproti referenčnímu objektivu zvětšila pouze ve stanovených limitech. Podařilo se snížit minimální velikost výstupního úhlu z $10,8^\circ$ na $7,9^\circ$ a velikost zkreslení z 11% na 8,9%, čímž byly splněny hlavní cíle práce. Nad rámec specifikace byl zvýšen rozsah změny ohniskové vzdálenosti z 3,3x na 4x a zachovala se maximální velikost výstupního úhlu. Pro dosažení maximální světelnosti byl zvětšen průměr frontálního členu z 96 cm na maximální povolenou hodnotu 110 cm. Tím se snížilo clonové číslo objektivu z průměrných 1,40 na 1,35. Pro EFFL 131 kleslo dokonce ze 1,39 na 1,22. Výpočtem Etendue bylo ověřeno, že je objektiv v konfiguraci s maximální ohniskovou vzdáleností navržen s maximální možnou světelností.

Zvýšení světelnosti a snížení vinětace se podepsalo na mírném zhoršení kvality obrazu pro maximální velikost předmětu a na zvýšení ceny. Pro střední a malou velikost předmětu je kvalita naopak lepší ve všech třech konfiguracích. Zacloněním na hodnotu clonového čísla 1,4 by došlo ke zlepšení pro všechny velikosti předmětu.

V rámci jednoho z cílů práce byla v části 4 provedena analýza pracovních podmínek a zobrazovacích vlastností objektivů pro osvětlovací účely. Stanovení limitních hodnot kvality zobrazení bylo dosaženo pomocí softwarové analýzy komerčního objektivu společnosti Robe Lighting s.r.o.

Objektiv byl navrhován v souladu s literaturou pro obraz v nekonečnu. Závěrečná optimalizace počítala s možností ostření do vzdálenosti 3 m - ∞ . V tom spočívá další výhoda nového objektivu - referenční objektiv bylo možné zaostřit pouze v rozsahu 20 m - ∞ . Jako počáteční podmínky pro návrh nového objektivu byly zvoleny parametry referenčního objektivu.

V poslední části práce bylo pro finální návrh objektivu vytvořeno mechanické uložení a výrobní výkresy v souladu se standardními firemními postupy. Byl vytvořen i alternativní návrh kompenzačního členu pro snížení vnitřního pnutí v čočkách vlivem odlišné teplotní roztažnosti skla čočky a duralu tubusu.

Objektiv byl navržen díky snaze vylepšit současnou verzi v komerčně úspěšném zařízení, což by mělo vést ke zvýšení jeho prodejnosti. Dle analýzy nového návrhu se tuto snahu podařilo naplnit. Výsledky práce byly předány společnosti Robe Lighting s.r.o.

Mým vlastním přínosem této práci je samostatný návrh funkční verze komerčního objektivu pro projekční osvětlovací účely včetně předchozí analýzy požadovaných zobrazovacích vlastností pro danou aplikaci. Funkční návrh jsem vytvořil sám na základě rozboru starší verze objektivu, studia množství literatury týkající se optického návrhu a na základě několika konzultací s optickými návrháři v tuzemsku i v zahraničí.

V rámci práce na novém návrhu vznikly desítky verzí a meziverzí, které mohou být v budoucnu použity pro další vývoj a nebo lehce upraveny, aby vyhovovaly aktuální specifikaci. Směr dalšího výzkumu bude zaměřen na společný návrh fazetovaného eliptického reflektoru, předmětu a projekční optiky, a na návrh složitějšího objektivu se zkreslením pod 3%.

LITERATURA

- [1] BORN, M. and WOLF, E.: *Principles of optics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. ISBN 0-521-64222-1.
- [2] BRENNESHOLTZ, M. and STUPP, E.: *Projection Displays*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2008. ISBN 978-0-470-51803-8.
- [3] CAVENATI, A.: *Stage Projector*. WIPO Patent, 2007. WO 2007/122459 A2
- [4] CAVENATI, A.: *Stage Lighting Fixture and Method of Operating Stage Lighting Fixture*. US Patent, 2013. US8408755 B2
- [5] CAVENATI, A. and QUADRI, P.: *Stage Lighting Fixture*. US Patent, 2015. US 8,926,122 B2.
- [6] CHAVES, J.: *Introduction to Nonimaging Optics*. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2008. ISBN 978-1-4200-5429-3.
- [7] DING, Y. *et al.*: *Freeform LED lens for uniform illumination*. Hang Zhou: Optics express, 2008. vol. 16, pp. 12958-12966.
- [8] DOBROWOLSKI, J.: Part 11 - Optical Properties of Films and Coatings. Ottawa, National Research Council of Canada. EDS. BASS, M. *et al.*: *Handbook of Optics, Volume I - Fundamentals*. New York: McGraw-Hill, Inc., 1995. ISBN 0-07-047740-7.
- [9] FISCHER, R., TADIC, B. and YODER, P.: *Optical System Design*. New York: SPIE Press, 2008. ISBN 0-07-159358-6.
- [10] FUKA, J. and HAVELKA, M.: *Optika I*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1961.
- [11] GOODMAN, D.: Part 1 - General Principles of Geometric Optics. Cambridge. EDS. BASS, M. *et al.*: *Handbook of Optics, Volume I - Fundamentals*. New York: McGraw-Hill, Inc., 1995. ISBN 0-07-047740-7.
- [12] GROSS, H. *et al.*: *Handbook of Optical Systems: Vol. 3. Aberration Theory and Correction of Optical Systems*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007. ISBN 978-3-527-40379-0.
- [13] GREIVENKAMP, J.: *Field Guide to Geometrical Optics*. Bellingham: SPIE, 2004. ISBN 0-8194-5294-7.
- [14] GROSS, H.: *Geometrical Aberrations*. Jena: Institute of Applied Physics, 2013. URL: <http://ist.academia.edu/WaqasMahmood> [online]
- [15] GROSS, H.: *Correction principles I*. Jena: Institute of Applied Physics, 2013. URL: <http://ist.academia.edu/WaqasMahmood> [online]
- [16] GROSS, H.: *Zoom and Confocal Systems*. Jena: Institute of Applied Physics, 2013. URL: <http://ist.academia.edu/WaqasMahmood> [online]

- [17] HAVELKA, M.: *Geometrická optika I*. Praha: Nakladatelství ČSAV, 1955.
- [18] JARNÍK, V.: *Diferenciální počet I*. Praha: ACADEMIA, 1974.
- [19] KIDGER, M.: *Fundamental Optical Design*. Bellingham: SPIE, 2002. ISBN 0-8194-3915-0
- [20] KINGSLAKE, R. and JOHNSON R. B.: *Lens Design Fundamentals, Second Edition*. Washington: SPIE, 2010. SPIE ISBN 9780819479396.
- [21] KUČERA, B.: *Nástin geometrické optiky a základů fotometrie*. Praha: Nakladatelství českých matematiků a fyziků, 1915.
- [22] LAIKIN, M.: *Lens Design, Fourth Edition*. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2007. ISBN 978-0-8493-8278-9.
- [23] MAHAJAN, V.: *Optical Imaging and Aberrations, Part I*. Washington: SPIE, 1998. ISBN 0-8194-2515-1.
- [24] MICHAELIS, D., SCHREIBER, P. and BRÄUER, A.: *Cartesian oval representation of freeform optics in illumination systems*. Optical Letters, 2011. vol.36, pp. 918-920
- [25] MIKŠ, A., NOVÁK, J. and NOVÁK, P.: *Method of zoom lens design*. Praha: Applied Optics. 2008. vol. 47, no.32, pp. 4545.
- [26] NAKAJIMA, M.: *Varifocal Lens*. US Patent, 1997. US 5,696,633.
- [27] O'SHEA, D. and HARRIGAN, M.: Abberation Curves in Lens Design. EDS. BASS, M. et al.: *Handbook of Optics, Volume I - Fundamentals*. New York: McGraw-Hill, Inc., 1995. ISBN 0-07-047740-7.
- [28] PALATKA, M.: *Historie způsobu návrhu optických soustav. Současná role optického konstruktéra. Hodnocení kvality optických soustav*. Olomouc: Universita Palackého v Olomouci. 2012. ISBN 978-80-244-3074-4
- [29] PAN, J. *et al.*: High efficiency pocket-size projector with a compact projection lens and a light emitting diode-based light source system. Jhongli: Applied Optics, 2008. vol. 47, no. 16, pp. 3406-3414.
- [30] RANCOURT, J.: *Optical Thin Films, User Handbook*. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1996. ISBN 0-8194-2285-1.
- [31] SCHRÖDER, G.: *Technická optika*. Praha: SNTL, 1981. 508/21,857
- [32] SHU-CHENG, H.: *Stage Light*. US Patent, 2014. US 20140119019 A1.
- [33] SINCLAIR, D.: Optical Design Software. EDS. BASS, M. et al.: *Handbook of Optics, Volume I - Fundamentals*. New York: McGraw-Hill, Inc., 1995. ISBN 0-07-047740-7.
- [34] SINGER, W. *et al.*: *Physical Image Formation*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005. ISBN 3-527-40378-7.

- [35] SMITH, W.: Techniques of First-Order design. EDS. BASS, M. et al.: *Handbook of Optics, Volume I - Fundamentals*. New York: McGraw-Hill, Inc., 1995. ISBN 0-07-047740-7.
- [36] SMITH, W.: *Modern Optical Engineering*. Carisbad: McGraw-Hill, 2000. ISBN 0-07-136360-2.
- [37] VRBOVÁ, M. et al.: *Lasery a moderní optika*. Praha: Prometheus, 1994. ISBN 80-85849-56-9.
- [38] WANG, K. and LI, J.: *Secondary Optical Design of LED Stage Lamps*. Advanced Materials Research, 2013. vol. 756-759, pp. 4545.
- [39] WINSTON, R., MINANO, J. and BENÍTEZ P.: *Nonimaging Optics*. San Diego: Elsevier Academic Press, 2005. ISBN 0-12-759751-4.
- [40] YODER, P.: *Mounting Optics in Optical Instrument*. SPIE: Bellingham, 2008. 978-0-8194-7129-1
- [41] ZHONG, Y.: *Lighting fixture zoom device, and lighting fixture comprising said zoom device*. US Patent application Publication, 2012. US 8147096 B2.
- [42] www.robe.cz[online]
- [43] <http://www.genuineholographics.com/ledesign.html>[online]
- [44] *Zemax User's Manual*. 2011. www.zemax.com [online].

A. ODVOZENÍ NEMĚNNOSTI ETENDUE V OBECNÉM TVARU

Pro odvození vyjdeme ze základních optických principů. Mějme bod $\mathbf{P} = (x, y, z)$ ve vstupní rovině. Funkce $S(\mathbf{P}) = S(x, y, z)$ udává velikost optické dráhy mezi referenční vlnoplohou a daným bodem a je dáno $\mathbf{p} = \nabla S$, kde $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$. Obdobně pro $\mathbf{P}^* = (x^*, y^*, z^*)$ je $\mathbf{p}^* = \nabla^* S$, kde $\nabla^* = (\partial/\partial x^*, \partial/\partial y^*, \partial/\partial z^*)$. Na základě definice funkce $S(\mathbf{P})$ můžeme definovat bodovou charakteristickou funkci $V(\mathbf{P}, \mathbf{P}^*) = V(x, y, z, x^*, y^*, z^*)$ která udává optickou vzdálenost mezi body $\mathbf{P}$ a $\mathbf{P}^*$. Je dána jako

$$V(x, y, z, x^*, y^*, z^*) = \int_{\mathbf{P}}^{\mathbf{P}^*} n ds = S(\mathbf{P}^*) - S(\mathbf{P}) = S(x^*, y^*, z^*) - S(x, y, z) \quad (\text{A.1})$$

Dále víme, že $\nabla V = -\nabla S$ a $\nabla^* V = \nabla^* S$ například [6, 1]. Také $\mathbf{p} = \nabla S$ a $\mathbf{p}^* = \nabla^* S$. V tom případě

$$\begin{aligned} \mathbf{p} &= -\nabla V \\ \mathbf{p}^* &= \nabla^* V \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

Body $\mathbf{P}$ a $\mathbf{P}^*$ se nacházejí ve vstupní a výstupní rovině optického systému. Budeme dále uvažovat jen dvě souřadnice x a y těchto rovin. Rozvedením parciálních derivací dostaneme

$$\begin{aligned} dp &= -V_{xx}dx - V_{xy}dy - V_{xx^*}dx^* - V_{xy^*}dy^* \\ dq &= -V_{yx}dx - V_{yy}dy - V_{yx^*}dx^* - V_{yy^*}dy^* \\ dp^* &= -V_{x^*x}dx + V_{x^*y}dy + V_{x^*x^*}dx^* + V_{x^*y^*}dy^* \\ dq^* &= -V_{y^*x}dx + V_{y^*y}dy + V_{y^*x^*}dx^* + V_{y^*y^*}dy^* \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

Po drobné úpravě vypadá přepis maticového zápisu

$$\begin{pmatrix} V_{xx^*} & V_{xy^*} & 0 & 0 \\ V_{yx^*} & V_{yy^*} & 0 & 0 \\ V_{x^*x} & V_{x^*y} & -1 & 0 \\ V_{y^*x} & V_{y^*y} & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_{x^*} \\ d_{y^*} \\ d_{p^*} \\ d_{q^*} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -V_{xx} & -V_{xy} & -1 & 0 \\ -V_{yx} & -V_{yy} & 0 & -1 \\ -V_{x^*x} & V_{x^*y} & 0 & 0 \\ -V_{y^*x} & V_{y^*y} & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ d_p \\ d_q \end{pmatrix} \quad (\text{A.4})$$

Označíme-li si matice jako $\mathbf{B}$ a $\mathbf{A}$ a sloupcové matice jako $\mathbf{M}$ a $\mathbf{M}^*$, můžeme zjednodušit zápis matic na

$$\mathbf{B}\mathbf{M}^* = \mathbf{A}\mathbf{M} \quad (\text{A.5})$$

Determinanty matic jsou rovny

$$\det \mathbf{B} = V_{xx^*}V_{yy^*} - V_{xy^*}V_{yx^*} \quad (\text{A.6})$$

$$\det \mathbf{A} = V_{x^*x}V_{y^*y} - V_{y^*x}V_{x^*y} \quad (\text{A.7})$$

Za předpokladu, že jsou parciální derivace spojité, nezáleží na pořadí derivování [18] a platí $V_{xx^*} = V_{x^*x}$, $V_{yx^*} = V_{y^*x}$... Můžeme tedy psát

$$\det \mathbf{A} = \det \mathbf{B} \quad (\text{A.8})$$

Vynásobíme rovnici A.5 zleva $\mathbf{B}^{-1}$ a dosadíme dostaneme

$$\mathbf{M}^* = (\mathbf{B}^{-1} \mathbf{A}) \mathbf{M} \quad (\text{A.9})$$

Nyní využijeme jednoduchý algebraický vztah

$$\det \mathbf{B}^{-1} = \frac{1}{\det \mathbf{A}} \quad (\text{A.10})$$

a použijeme jej pro přepsání rovnice A.9 do tvaru

$$\det(\mathbf{B}^{-1} \mathbf{A}) = \det \mathbf{B}^{-1} \det \mathbf{A} = 1 \quad (\text{A.11})$$

Zapišme nyní rovnici A.9 ještě v jiném tvaru jako

$$\begin{pmatrix} d_{x^*} \\ d_{y^*} \\ d_{p^*} \\ d_{q^*} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \partial x^*/\partial x & \partial x^*/\partial y & \partial x^*/\partial p & \partial x^*/\partial q \\ \partial y^*/\partial x & \partial y^*/\partial y & \partial y^*/\partial p & \partial y^*/\partial q \\ \partial p^*/\partial x & \partial p^*/\partial y & \partial p^*/\partial p & \partial p^*/\partial q \\ \partial q^*/\partial x & \partial q^*/\partial y & \partial q^*/\partial p & \partial q^*/\partial q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ d_p \\ d_q \end{pmatrix} \quad (\text{A.12})$$

$$\mathbf{M}^* = \mathbf{C} \mathbf{M}$$

Jakobián matice $\mathbf{C}$ je tedy $\mathbf{C} = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{A}$. Rovnice A.12 se dá přepsat jako

$$dx^* dy^* dp^* dq^* = \frac{\partial(x^*, y^*, p^*, q^*)}{\partial(x, y, p, q)} dx dy dp dq \quad (\text{A.13})$$

takže platí

$$\frac{\partial(x^*, y^*, p^*, q^*)}{\partial(x, y, p, q)} = \det \mathbf{C} \quad (\text{A.14})$$

a jelikož víme, že podle rovnice A.11 je $\det \mathbf{C} = 1$, dostáváme

$$dx^* dy^* dp^* dq^* = dx dy dp dq \quad (\text{A.15})$$

Poté malý element plochy dU , který nabývá hodnoty $dU = dx dy dp dq$ se nazývá Etendue a rovnice A.15 definuje neměnnost Etendue v optické soustavě. Proměnné x a y reprezentují polohu a proměnné p a q reprezentují směr. Prochází-li tedy elementární ploškou určité množství světelných paprsků o hodnotě $dU = dx dy dp dq$, bude po průchodu optickou soustavou nabývat stejné hodnoty $d^*U = dx^* dy^* dp^* dq^*$. Elementární ploška ale může mít samozřejmě jiný tvar a sklon paprsků může být také jiný.

B. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Výrobní výkres: Čočka 1

Příloha 2: Výrobní výkres: Čočka 2

Příloha 3: Výrobní výkres: Čočka 3

Příloha 4: Výrobní výkres: Čočka 4

Příloha 5: Výrobní výkres: Čočka 5

Příloha 6: Výrobní výkres: Čočka 6

Příloha 7: Výrobní výkres: Čočka 7

Příloha 8: Výrobní výkres: Čočka 8

Příloha 9: Výrobní výkres: Čočka 9

Příloha 10: Výrobní výkres: Čočka 10

Příloha 11: Výrobní výkres: Distanční kroužek 1

Příloha 12: Výrobní výkres: Distanční kroužek 2

Příloha 13: Výrobní výkres: Přední tubus

Příloha 14: Výrobní výkres: Tubus variátor

Příloha 15: Výrobní výkres: Tubus kompenzátor

Příloha 16: Výrobní výkres: Pojistný kroužek - variátor

Příloha 17: Výrobní výkres: Pojistný kroužek - kompenzátor

Příloha 18: Výrobní výkres: Pojistný kroužek - přední

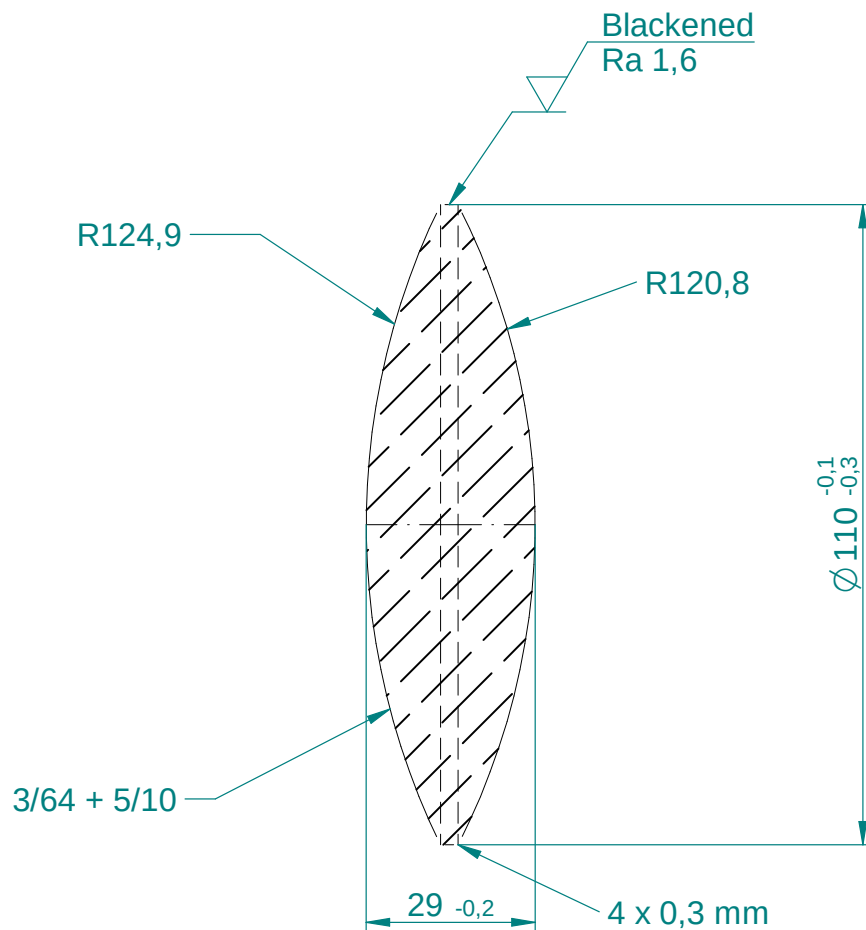
Příloha 19: Návrh v Zemaxu: Referenční objektiv

Příloha 20: Návrh v Zemaxu: Finální objektiv

Příloha 21: Návrh v Zemaxu: Objektiv 1

Příloha 22: Návrh v Zemaxu: Objektiv 2

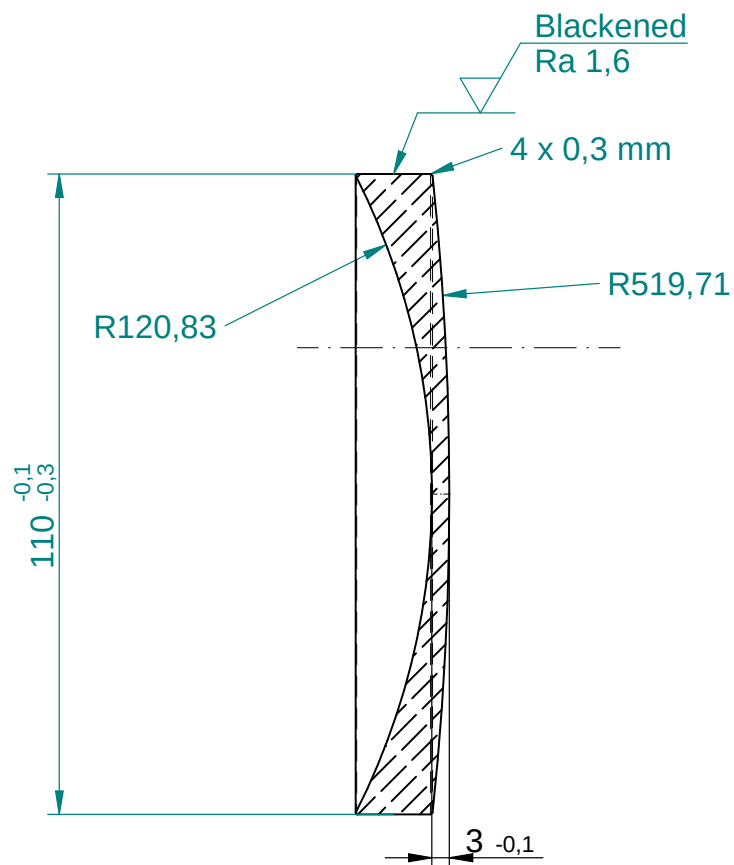
ČOČKA 1



Optical surface: $Ra 0,025$
 $3 / 64 + 5 / 10$

Název zařízení: Finální návrh objektivu						Vypracoval: Jan Vilém		VUT v Brně, ÚFI	
Změna číslo	01	*	Datum	*	Změna číslo	06	*	Podpis	Pozn.: *
	02	*		*		07	*		
	03	*		*		08	*		
	04	*		*		09	*		
	05	*		*		10	*		
Polotovár: RoHS - compliant glass						Datum: 31.03.2015		List / Listů: 1 / 1	
Materiál: Glass N-BK7			Povrch. úpr.: Multilayer AR coating			Formát	Číslo výkresu		
Název dílu: Cocka 1						A4	FNO C1		

ČOČKA 2

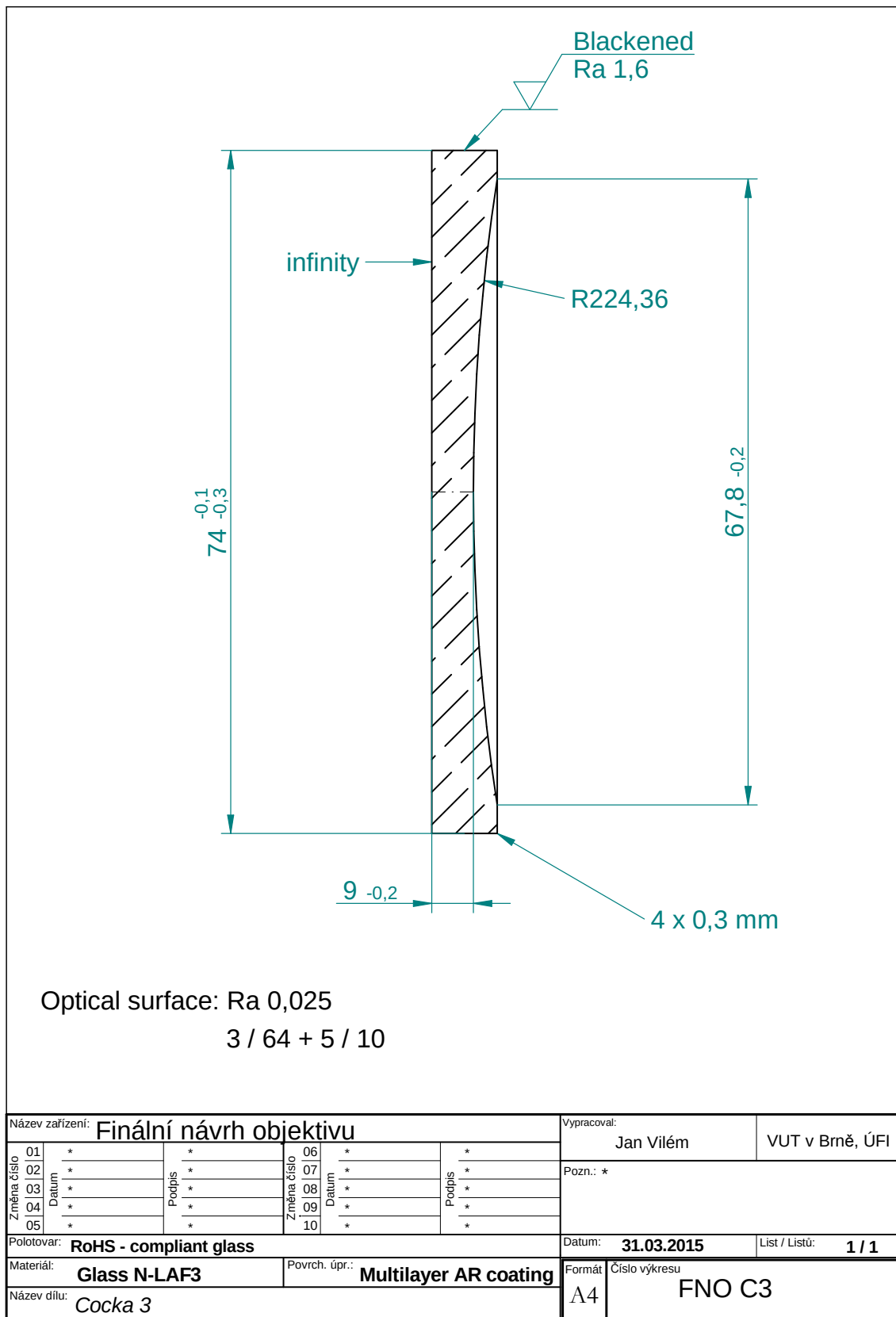


Optical surface: Ra 0,025

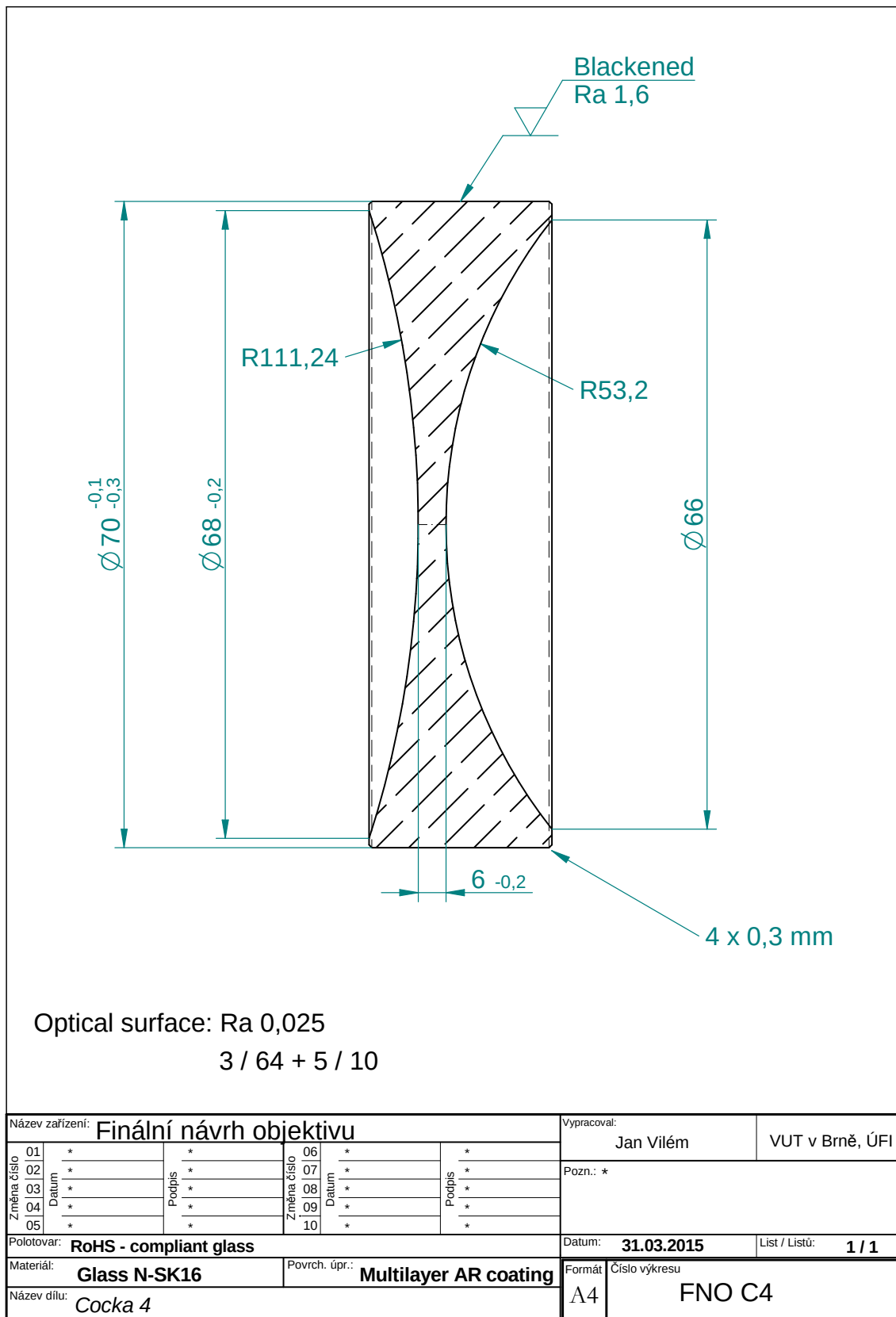
3 / 64 + 5 / 10

Název zařízení: Finální návrh objektivu						Vypracoval: Jan Vilém		VUT v Brně, ÚFI	
Změna číslo	01	*	*	06	*	Pozn.: *			
	02	*	*	07	*				
	03	*	*	08	*				
	04	*	*	09	*				
	05	*	*	10	*				
Datum		Podpis		Datum		Podpis			
Polotovary: RoHS - compliant glass						Datum: 31.03.2015		List / Listů: 1 / 1	
Materiál: Glass F7			Povrch. úpr.: Multilayer AR coating			Formát: A4		Číslo výkresu: FNO C2	
Název dílu: Cocka 2									

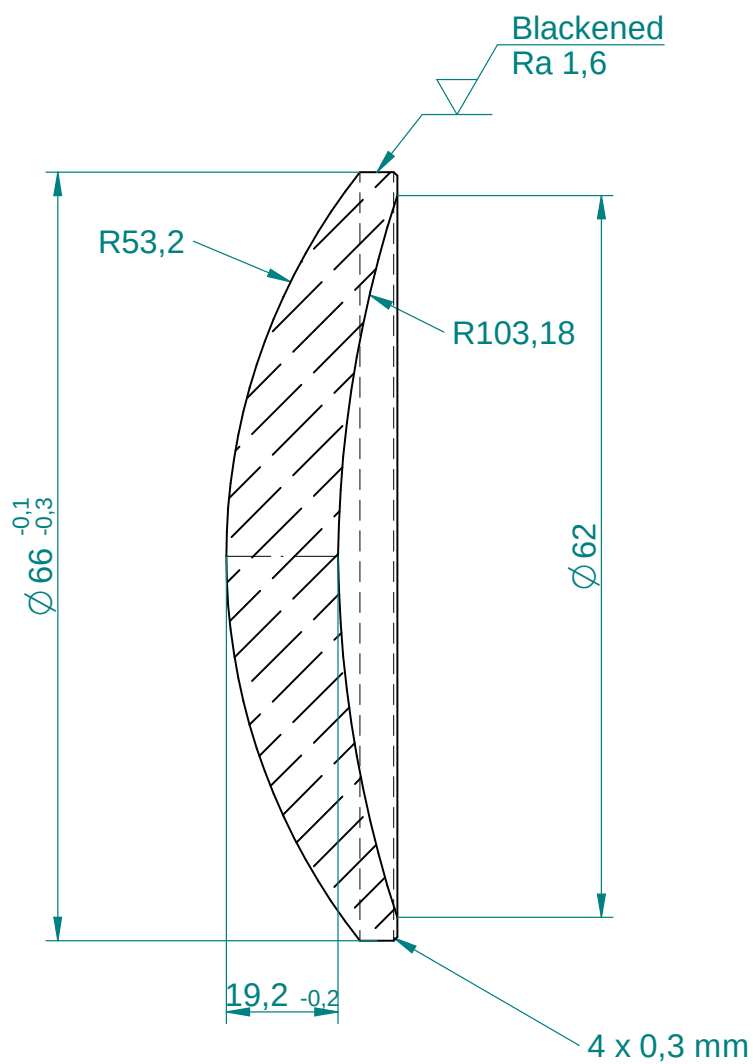
ČOČKA 3



ČOČKA 4



ČOČKA 5

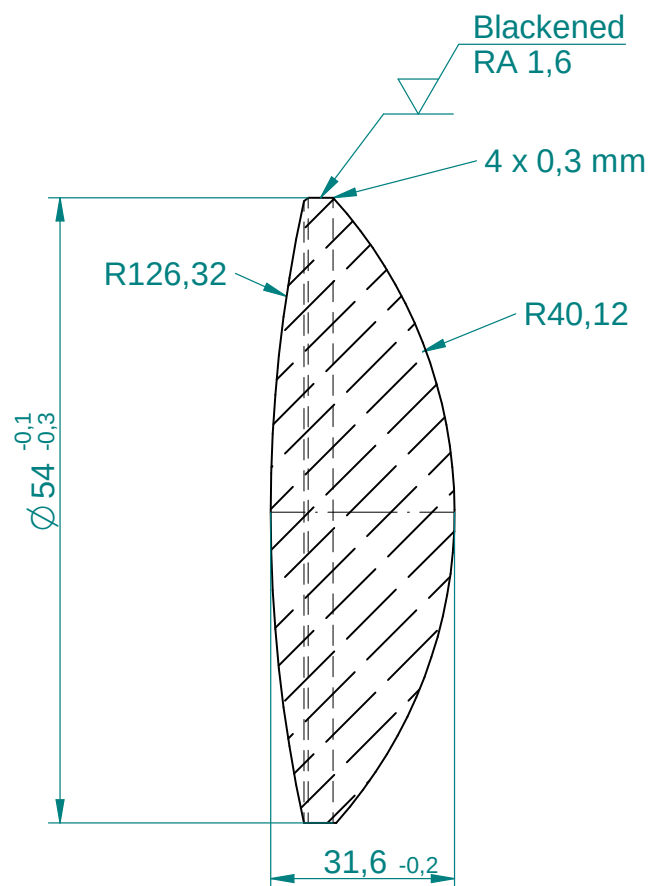


Optical surface: Ra 0,025

$$3 / 64 + 5 / 10$$

Název zařízení: Finální návrh objektivu					Vypracoval: Jan Vilém		VUT v Brně, ÚFI	
Změna číslo	01	*	*	06	*	Pozn.: *		
	02	*	*	07	*			
	03	*	*	08	*			
	04	*	*	09	*			
	05	*	*	10	*			
Polotovary: RoHS - compliant glass					Datum: 31.03.2015		List / Listů: 1 / 1	
Materiál: Glass N-SF6			Povrch. úpr.: Multilayer AR coating			Formát Číslo výkresu		
Název dílu: Cocka 5					A4		FNO C5	

ČOČKA 6

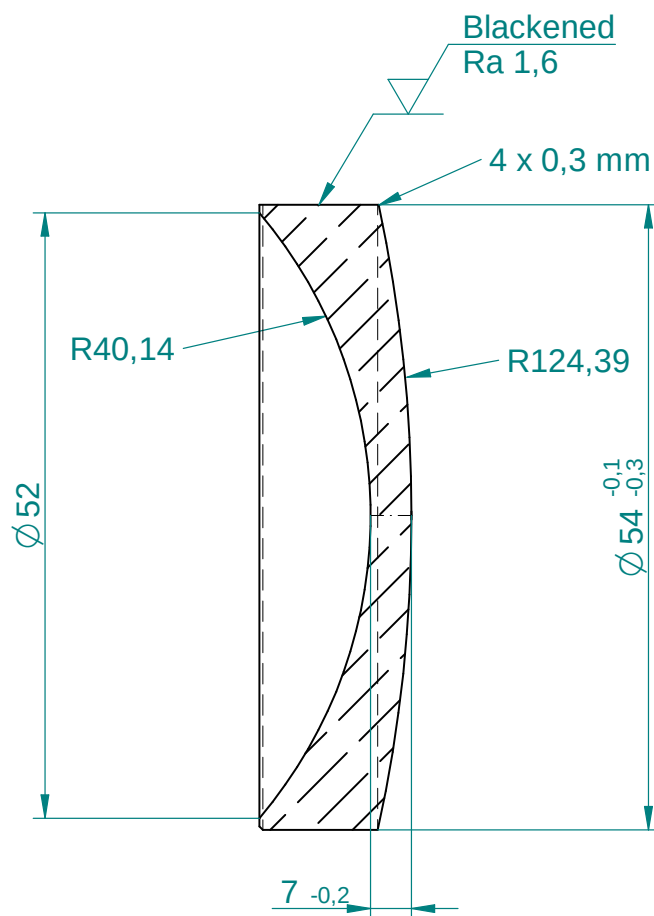


Optical surface: Ra 0,025

3 / 64 + 5 / 10

Název zařízení: Finální návrh objektivu										Vypracoval: Jan Vilém		VUT v Brně, ÚFI	
Změna číslo	01	*	Datum	*	Změna číslo	06	*	Podpis	*	Pozn.: *			
	02	*		*		07	*		*				
	03	*		*		08	*		*				
	04	*		*		09	*		*				
	05	*		*		10	*		*				
Polotovary: RoHS - compliant glass										Datum: 31.03.2015		List / Listů: 1 / 1	
Materiál: Glass N-BK7				Povrch. úpr.: Multilayer AR coating				Formát: A4		Číslo výkresu: FNO C6			
Název dílu: Čočka 6													

ČOČKA 7

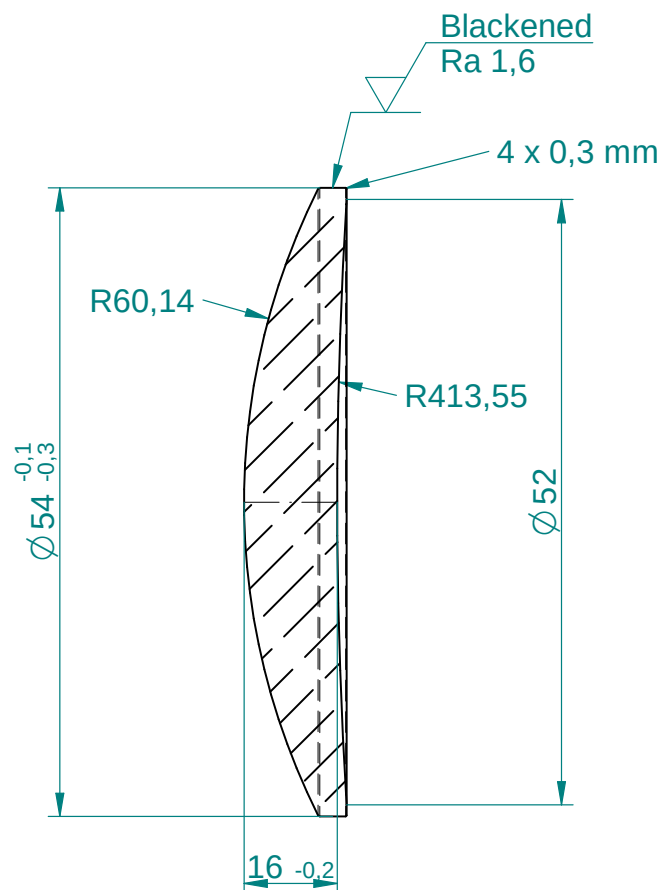


Optical surface: Ra 0,025

3 / 64 + 5 / 10

Název zařízení: Finální návrh objektivu										Vypracoval:		Jan Vilém		VUT v Brně, ÚFI	
Změna číslo	01	*	Datum	*	Podpis	06	*	Datum	*	Podpis	Pozn.: *				
	02	*		07		*	*								
	03	*		08		*	*								
	04	*		09		*	*								
	05	*		10		*	*								
Polotovary: RoHS - compliant glass										Datum: 31.03.2015		List / Listů: 1 / 1			
Materiál: Glass N-SF1					Povrch. úpr.: Multilayer AR coating					Formát: A4		Číslo výkresu: FNO C7			
Název dílu: Cocka 7															

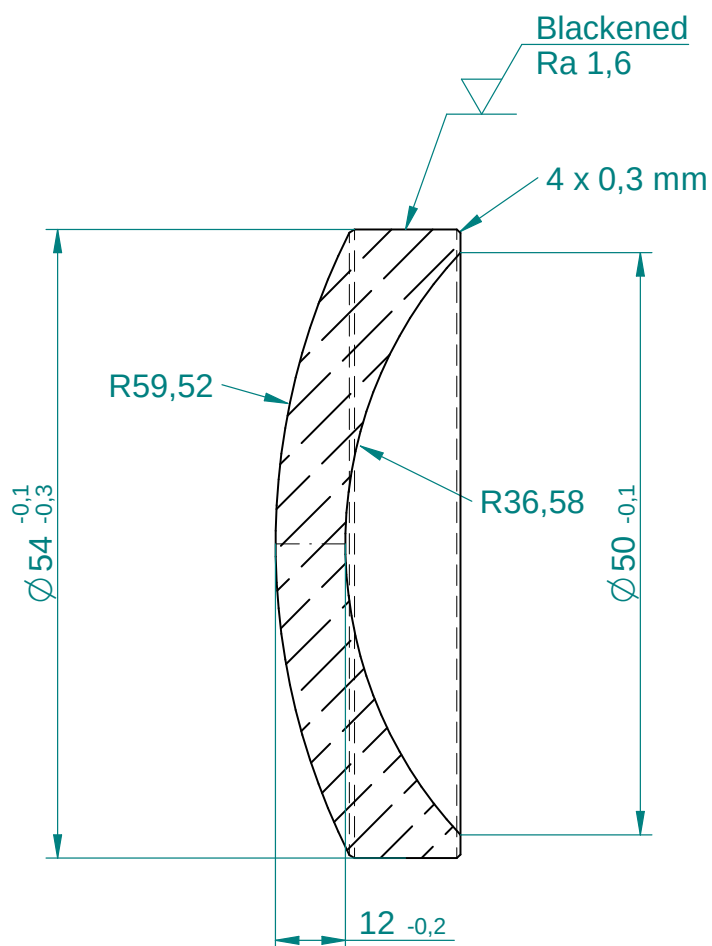
ČOČKA 8



Optical surface: Ra 0,025
3 / 64 + 5 / 10

Název zařízení: Finální návrh objektivu						Vypracoval: Jan Vilém		VUT v Brně, ÚFI			
Změna číslo	01	*	Datum	*	Změna číslo	06	*	Podpis	Pozn.: *		
	02	*		*		07	*				
	03	*		*		08	*				
	04	*		*		09	*				
	05	*		*		10	*				
Polotovary: RoHS - compliant glass						Datum: 31.03.2015		List / Listů: 1 / 1			
Materiál: Glass N-SK16				Povrch. úpr.: Multilayer AR coating				Formát		Číslo výkresu	
Název dílu: Cocka 8						A4		FNO C8			

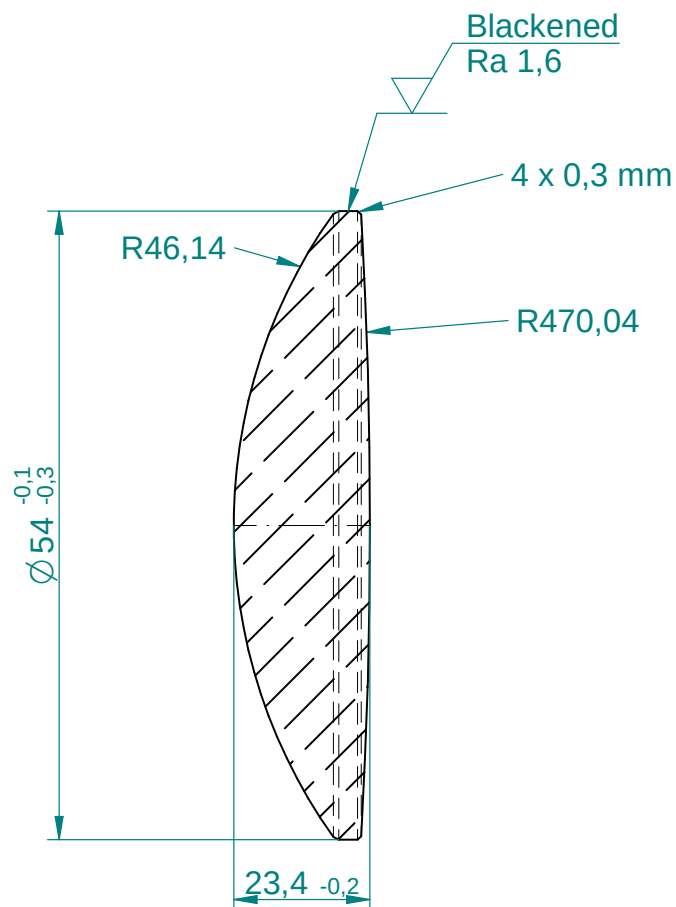
ČOČKA 9



Optical surface: Ra 0,025
3 / 64 + 5 / 10

Název zařízení: Finální návrh objektivu				Vypracoval: Jan Vilém		VUT v Brně, ÚFI
Změna číslo	01	*	*	06	*	Pozn.: *
	02	*	*	07	*	
	03	*	*	08	*	
	04	*	*	09	*	
	05	*	*	10	*	
Datum				Datum: 31.03.2015		List / Listů: 1 / 1
Podpis						
Polotovár: RoHS - compliant glass						
Materiál: Glass N-SF1		Povrch. úpr.: Multilayer AR coating		Formát	Číslo výkresu	
Název dílu: Čočka 9				A4	FNO C9	

ČOČKA 10



Optical surface: Ra 0,025

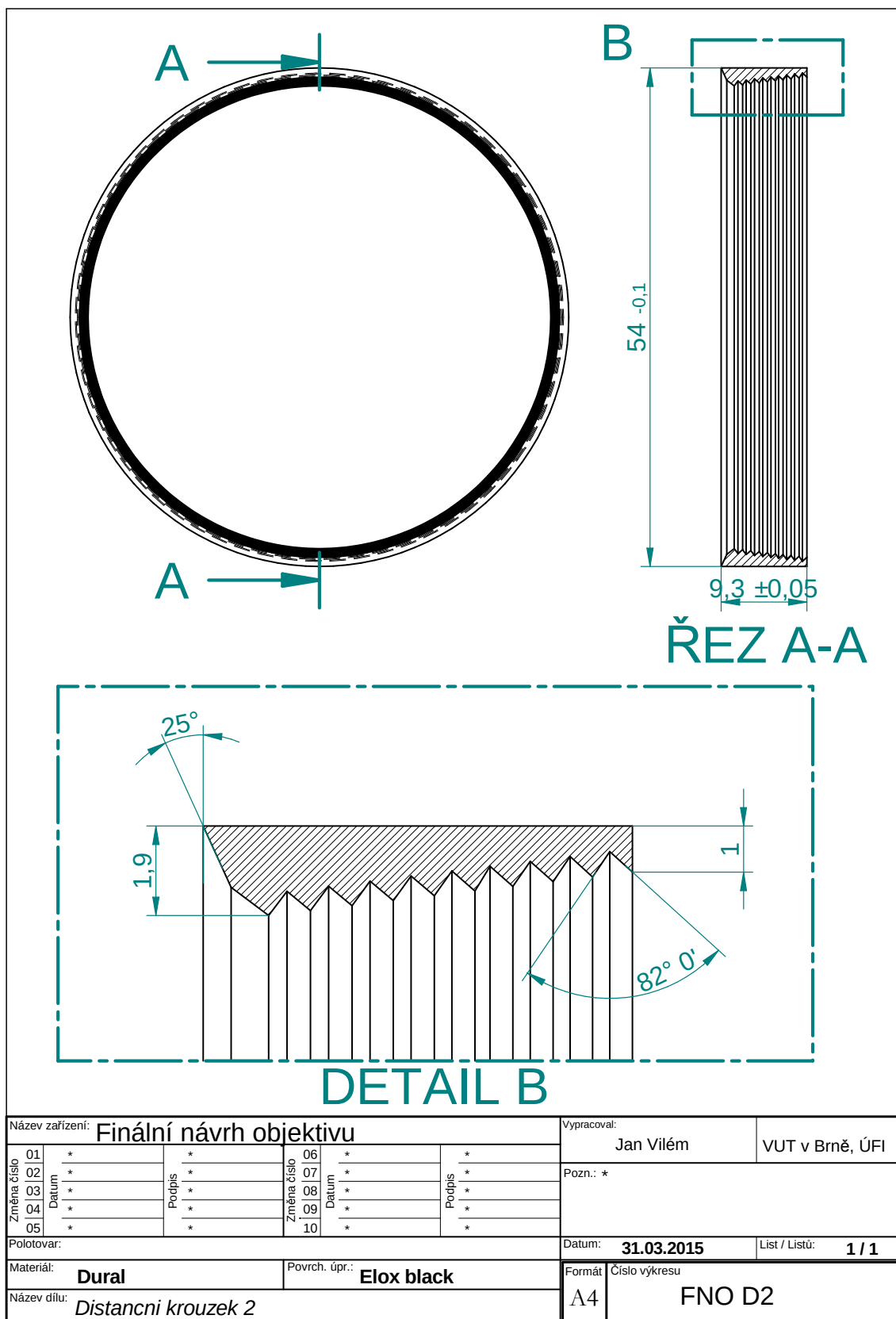
3 / 64 + 5 / 10

Název zařízení: Finální návrh objektivu						Vypracoval: Jan Vilém		VUT v Brně, ÚFI	
Změna číslo	01	*	Datum	*	Změna číslo	06	*	Datum	*
	02	*		*		07	*		*
	03	*		*		08	*		*
	04	*		*		09	*		*
	05	*		*		10	*		*
Polotovary: RoHS - compliant glass						Datum: 31.03.2015		List / Listů: 1 / 1	
Materiál: Glass N-BAK4			Povrch. úpr.: Multilayer AR coating			Formát: A4		Číslo výkresu: FNO C10	
Název dílu: Cocka 10									

87



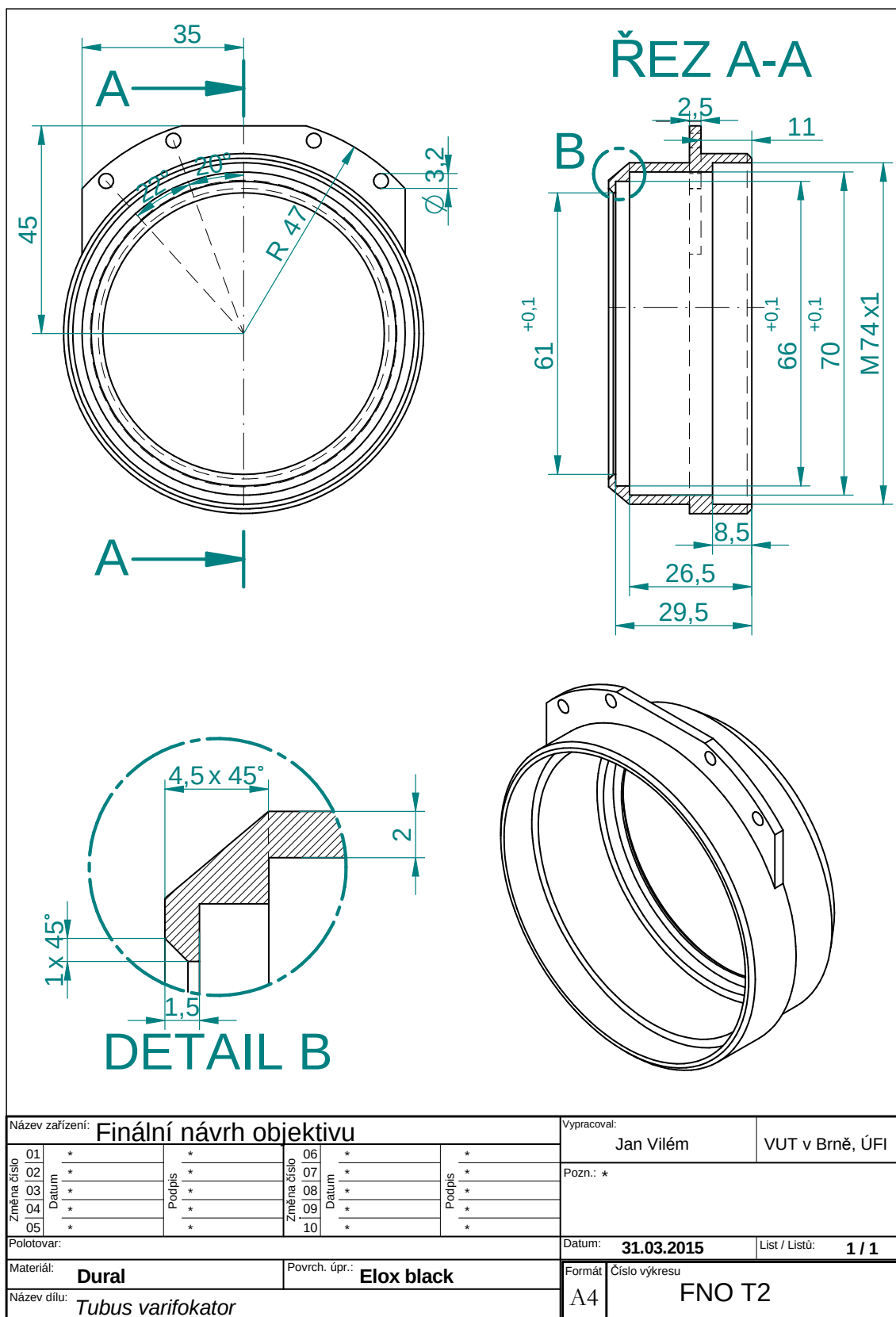
DISTANČNÍ KROUŽEK 2



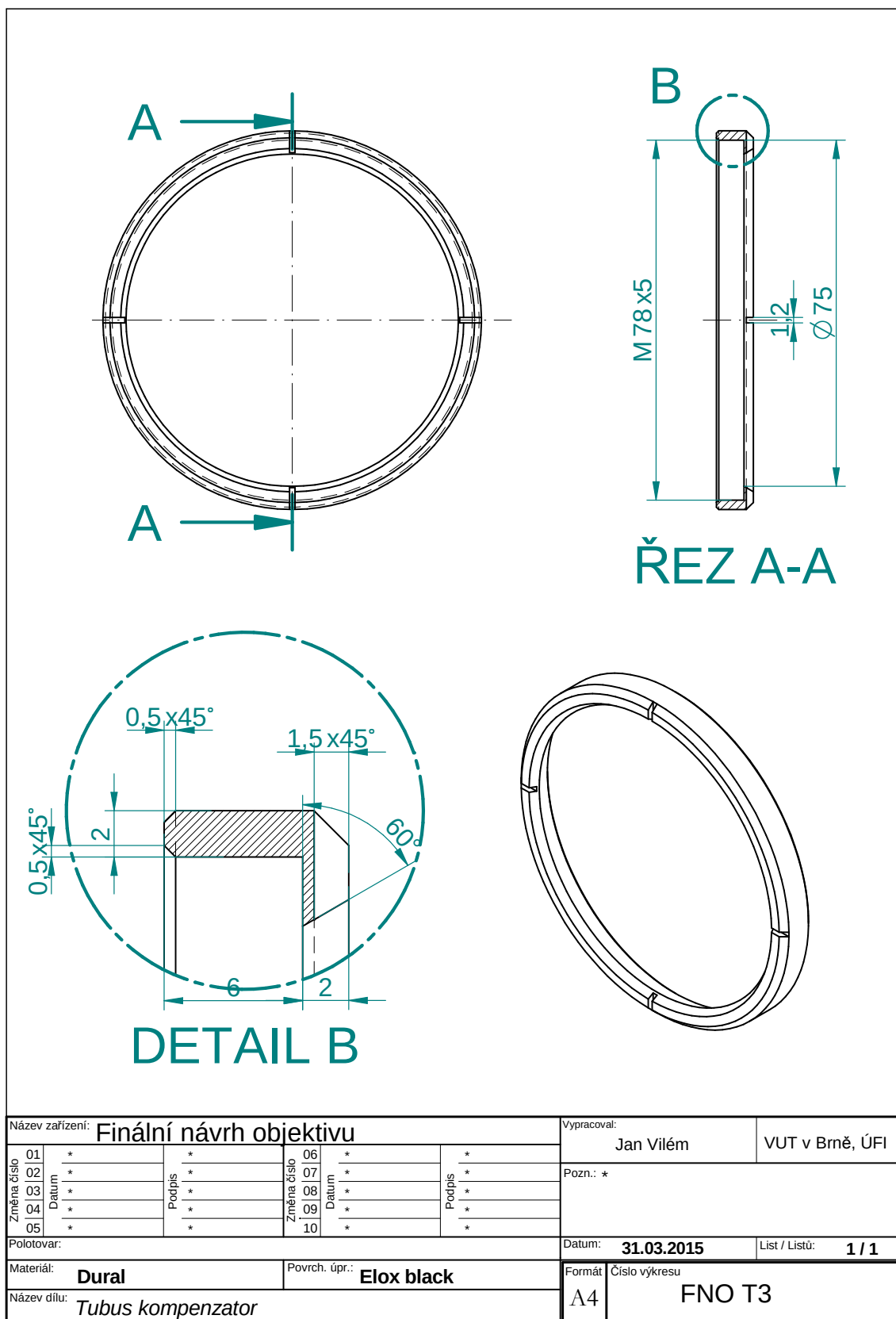
89



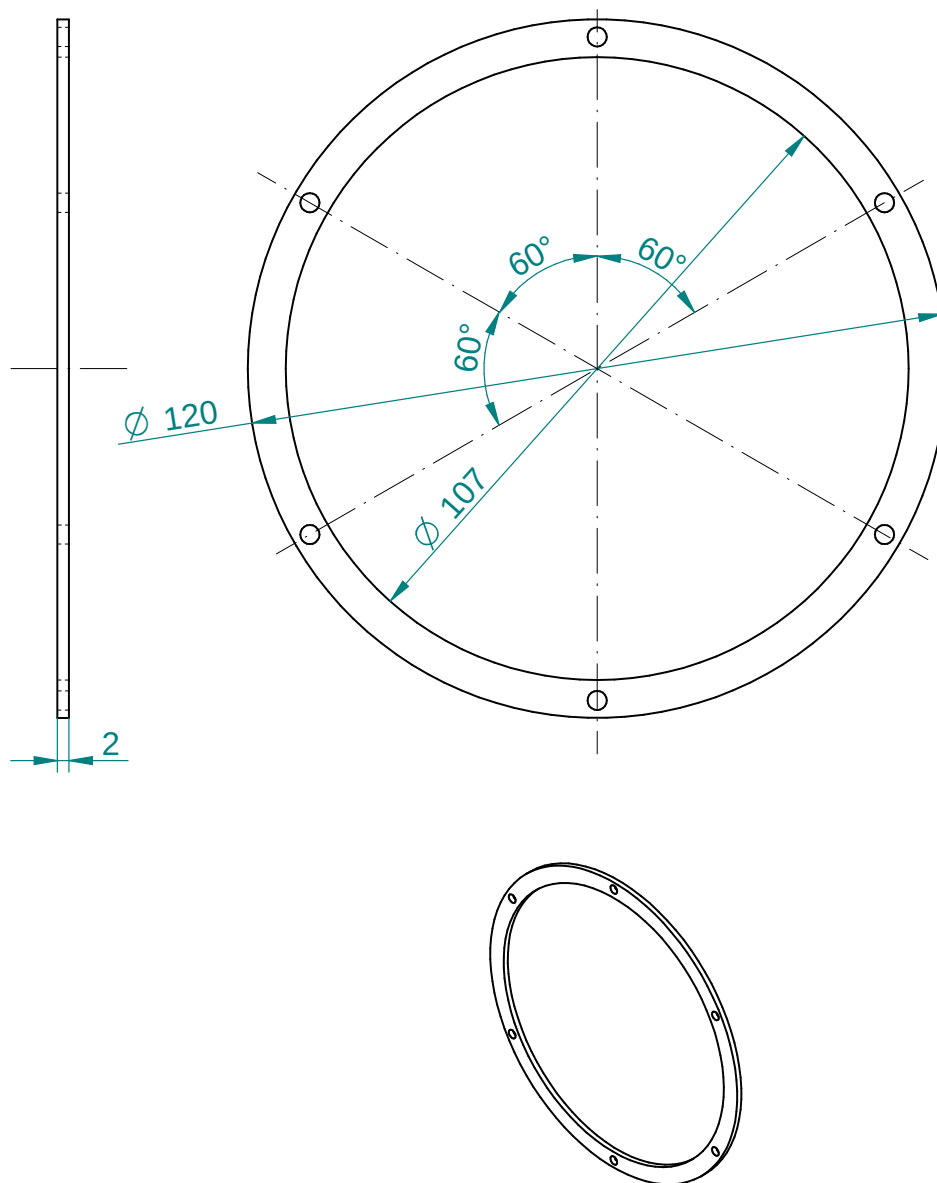
TUBUS VARIÁTOR



TUBUS KOMPENZÁTOR

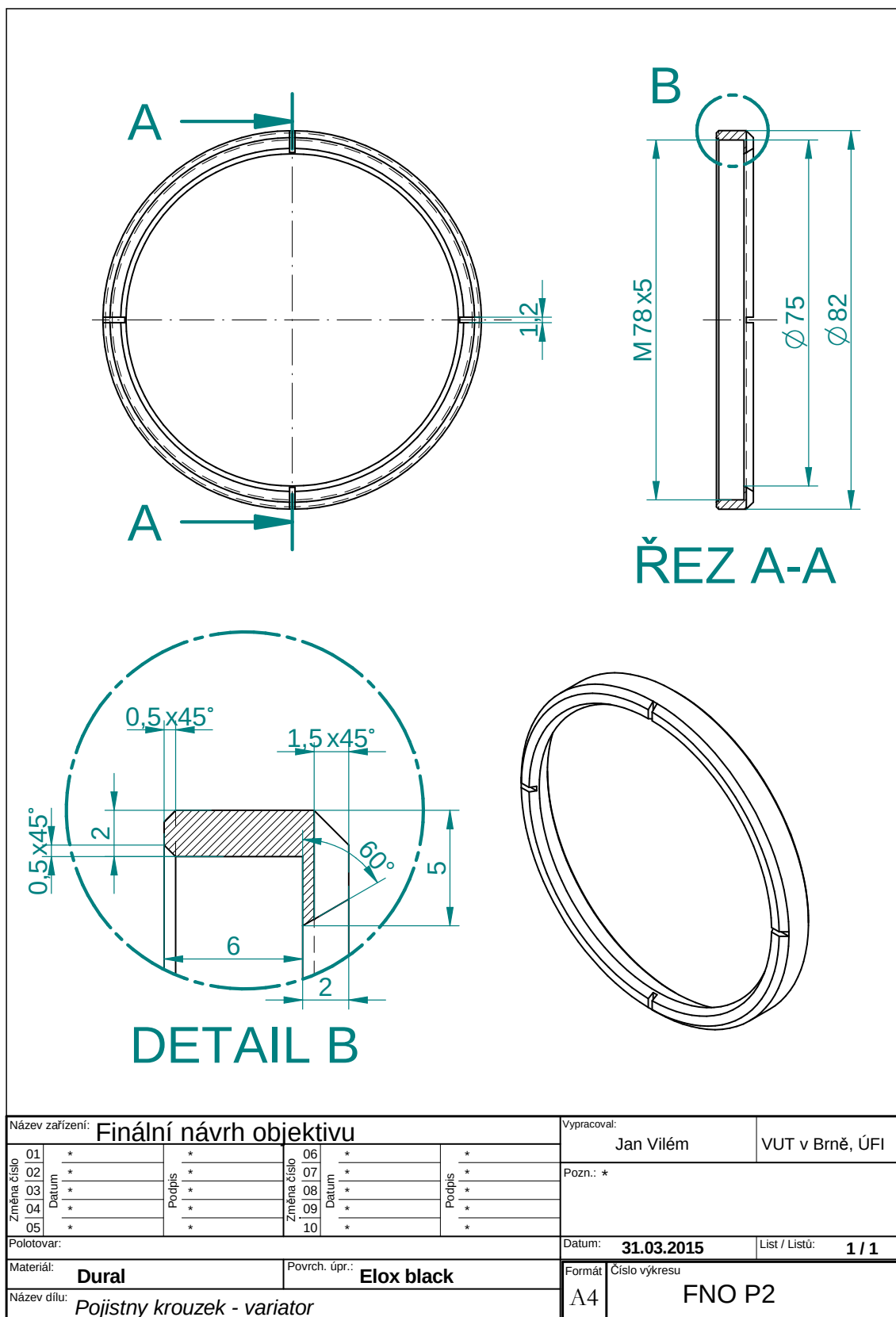


POJISTNÝ KROUŽEK - PŘEDNÍ

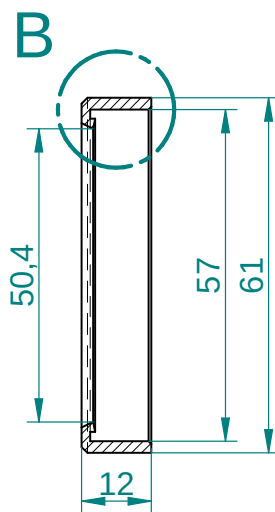
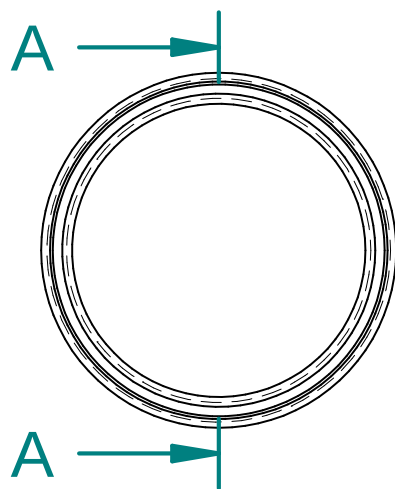


Název zařízení: Finální návrh objektivu						Vypracoval: Jan Vilém		VUT v Brně, ÚFI	
Změna číslo	01	*	Podpis	*	Změna číslo	06	*	Podpis	*
	02	*		07		*	07		*
	03	*		08		*	08		*
	04	*		09		*	09		*
	05	*		10		*	10		*
Datum						Pozn.: *			
Polotovár:						Datum: 31.03.2015		List / Listů: 1 / 1	
Materiál: Fe 2 mm			Povrch. úpr.: Elox Black			Formát Číslo výkresu			
Název dílu: Pojistný kroužek - přední						A4		FNO P1	

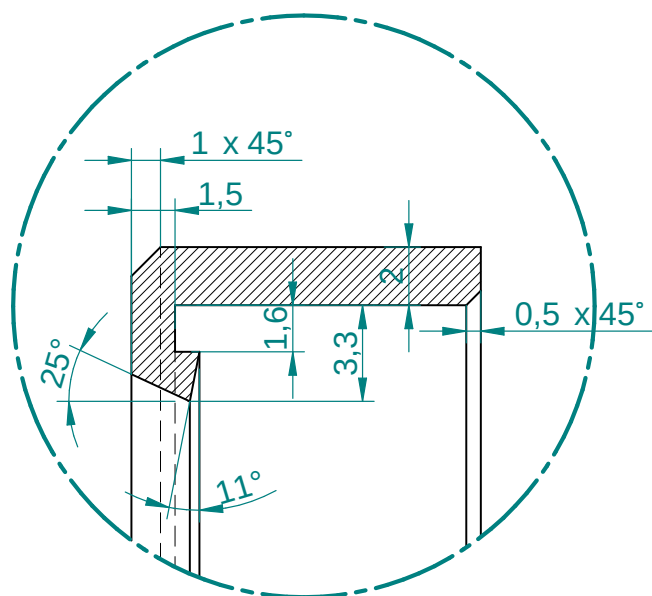
POJISTNÝ KROUŽEK - VARIÁTOR



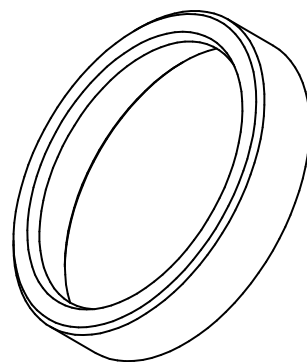
POJISTNÝ KROUŽEK - KOMPENZÁTOR



ŘEZ A-A



DETAIL B



Název zařízení: Finální návrh objektivu						Vypracoval:	
						Jan Vilém	
						VUT v Brně, ÚFI	
Změna číslo	01	*	Podpis	*	Změna číslo	06	*
	02	*		07		*	
	03	*		08		*	
	04	*		09		*	
	05	*		10		*	
Pozn.: *							
Polotovár:						Datum: 31.03.2015	
Materiál: Dural						List / Listů: 1 / 1	
Povrch. úpr.: Elox black						Formát Číslo výkresu	
Název dílu: Pojistny krouzek - kompenzator						A4 FNO P3	