



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

OPTICKÝ NÁVRH TELECENTRICKÉHO F-THETA OBJEKTIVU

OPTICAL DESIGN OF TELECENTRIC F-THETA OBJECTIVE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Timotej Perháč

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Antoš, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství
Student: **Bc. Timotej Perháč**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Přesná mechanika a optika
Vedoucí práce: **Ing. Martin Antoš, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

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:

Optický návrh telecentrického f–theta objektivu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Neustálé překonávání limitů současných laserových technologií umožňuje rozšiřování jejich použití v oblasti vysokovýkonného laserového mikroobrábění. Pohyb laserového svazku je obvykle řešen kombinací skenovacího systému a f–theta objektivu, který by měl zaručovat co největší skenovací pole a současně konstantní velikost a tvar fokusovaného spotu.

Cíle diplomové práce:

1. Rešerše problematiky návrhu a optické konstrukce f–theta objektivů se zaměřením na telecentrickou stavbu.
2. Návrh telecentrického f–theta objektivu s velikostí pole alespoň 60 mm x 60 mm pro vlnovou délku v oblasti SWIR s šířkou spektra do 1 nm.
3. Optimalizace návrhu telecentrického f–theta objektivu pro co nejmenší velikost spotu objektivu s potlačením zkreslení v celém poli.
4. Toleranční analýza navrženého f–theta objektivu.

Seznam doporučené literatury:

- FISCHER, Robert. Optical System Design. The McGraw-Hill, 2008.
- WARREN, Smith. Modern Optical Engineering. SPIE Press, 2007.
- LAIKIN, Milton. Lens Design. CRC Press, 2007.
- KIDGER, Michael. Fundamental optical design. SPIE Bellingham, 2002.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá optickým návrhem f-theta objektivu pro precizní mikroobrábění laserovým svazkem. Optický návrh se sestává z vytvoření návrhu se splněnými specifikacemi podle společnosti Meopta - optika s.r.o a toleranční analýzy, která popisuje vyrobiteľnosť daného návrhu. Splněnými specifikacemi se rozumí zejména difrakčně limitovaná kvalita zobrazení, potlačení zkreslení v celém poli a telecentricita v obrazovém prostoru systému. F-theta objektiv byl vytvořen optimalizací pomocí programu ZEMAX OpticStudio.

Summary

This thesis deals with optical design of f-theta lens for purposes of precision micromachining using a laser beam. Optical design consists of creating a nominal design according to specifications given by Meopta - optika s.r.o company and a tolerance analysis, which describes manufacturability of given design. Specifications given are most importantly diffraction limited image quality, correction of distortion throughout the field and telecentricity of systém in image space. F-theta lens in this thesis was created using an optical design software called ZEMAX OpticStudio.

Klíčová slova

Optický návrh, Zemax, F-theta objektiv, telecentrický objektiv, laserové mikro-obrábění

Key words

Optical design, Zemax, F-theta lens, telecentric lens, laser micromachining

Bibliografická citace

PERHÁČ, Timotej. *Optický návrh telecentrického f -theta objektivu* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125441>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav fyzikálního inženýrství. Vedoucí práce Martin Antoš.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení Ing. Martina Antoše, Ph.D., konzultanta Ing. Jaroslava Hoppa, Ph.D., a že jsem uvedl všechny použité podklady v seznamu použité literatury.

.....

V Brně 26. června 2020

Poděkování

Děkuji za odborné vedení vedoucímu práce Ing. Martinovi Antošovi, Ph.D. a také konzultantovi Ing. Jaroslavu Hoppovi, Ph.D. za cenné rady.

OBSAH

1 ÚVOD.....	6
2 SOUČASNÉ POZNÁNÍ.....	7
2.1 Laserové skenování.....	7
2.2 Definice f-theta objektivu.....	8
2.3 Současné optické konstrukce f-theta objektivů.....	9
2.4 Optické aberace.....	11
2.4.1 Monochromatické aberace.....	12
2.4.2 Chromatické aberace.....	16
2.4.3 Chyby vlnoplochy (OPD).....	17
2.4.4 Aberační polynomy.....	18
2.4.5 Zernikovy polynomy.....	20
2.5 Difrakční limit a velikost spotů.....	25
3 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	28
4 PROCES OPTICKÉHO NÁVRHU.....	29
4.1 Meritní funkce.....	29
4.2 Optimalizace optického systému.....	30
4.3 Specifické problémy při návrhu.....	32
4.3.1 Telecentricita.....	32
4.3.2 Zpětné odrazy.....	33
4.4 Materiály.....	34
5 OPTICKÝ NÁVRH F-THETA OBJEKTIVU.....	36
5.1 Zadané parametry a požadavky.....	36
5.2 Návrh a optimalizace f-theta objektivu.....	37
5.2.1 Počáteční návrh.....	37
5.2.2 Vytvoření meritní funkce.....	38
5.2.3 Optimalizace návrhu.....	40
5.2.4 Analýza navrženého f-theta objektivu.....	41
5.3 Toleranční analýza.....	47
5.3.1 Definice jednotlivých použitých tolerancí.....	47
5.3.2 Metody toleranční analýzy.....	52
5.3.3 Průběh a výsledky toleranční analýzy.....	53
ZÁVĚR.....	56
LITERATURA.....	57

1 ÚVOD

Technologie laserového svazku nachází uplatnění v mnohých oblastech moderní doby a tvoří velkou část průmyslové výroby, či už jde o metrologii, obrábění materiálů nebo jiné. Důvodem, proč je laserová technologie tak důležitá vychází ze základní charakteristiky laseru – koherence. Vysoká prostorová koherence zabezpečuje nízkou rozbíhavost svazku a je ho tak možné kolimovat napříč velké vzdálenosti. Lasery mají taky často vysokou časovou koherenci, díky čemu je možné vyzařovat světlo s velice úzkou spektrální šířkou a je tedy možné říct, že vyzařované světlo je monochromatické.

Jednou z mnohých oblastí využití laseru je skenování, přičemž samotná téma laserového skenování je hodna knižního vypracování, protože existuje enormní množství druhů skenerů určených pro různé aplikace.

Při skenování rovinné plochy je dnes často využíváno tzv. skenování před objektivem. To znamená, že se objektiv nachází mezi systémem na úhlový odklon laserového svazku a skenovanou plochou. Tímto způsobem se dosahují mnohonásobně vyšší rychlosti změny polohy působíště laseru oproti jiným možnostem využívajícím x-y posuvné stoly nebo robotická ramena [18].

Při vyšších výkonech laseru se takový skenovací systém může využít při velice přesném laserovém mikroobrábění (gravírování, řezání, vrtání a jiné). Stále se zvyšující požadavky na výkon a přesnost při zmíněném obrábění nebo skenování vedly k vývoji f-theta objektivů.

Vývoj takovýchto objektivů vede k stále zvyšující se přesnosti a současně s možností použití vysokovýkonného laseru vznikají poměrně závažné problémy při návrhu optického systému. Kromě korekce aberací na difrakční limit je potřebné uvažovat například s termálními efekty a zpětnými odrazy. Dodatečně jsou taky kladeny požadavky například na velké obrazové pole, telecentricitu, korekci chromatických aberací a jiné.

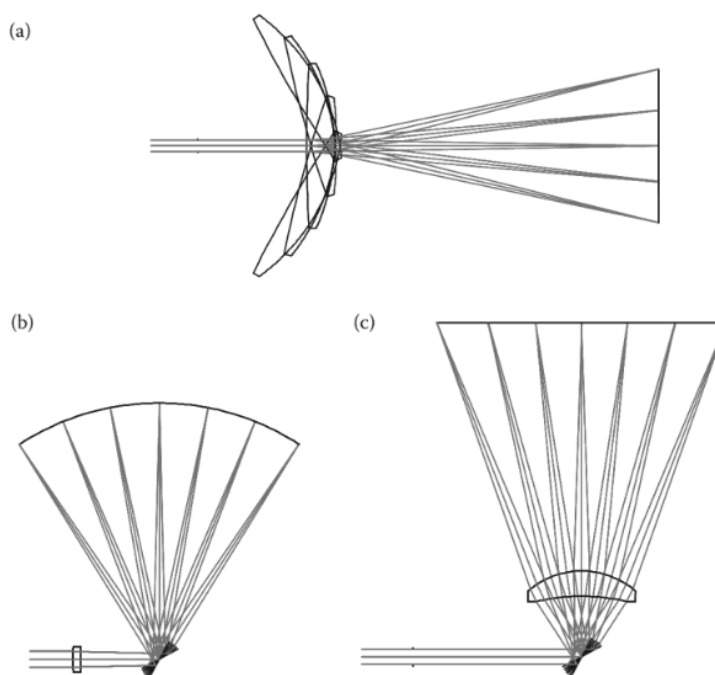
Předložená práce se zabývá optickým návrhem f-theta objektivu podle specifikací určených společností Meopta-optika s.r.o.

2 SOUČASNÉ POZNÁNÍ

2.1 Laserové skenování

Laserové skenování je možné podle [26] popsat jako kontrolovaný odklon světelných svazků ve viditelném i neviditelném spektru. Vychylovaný laserový svazek se využívá při mnoha aplikacích od skenování čárového kódu přes prostorové skenování budov až po systémy pro obrábění materiálů. Existuje mnoho způsobů, kterými lze provést úhlový odklon laserového svazku jako například rotující polygonové zrcadlo, rotující klínové hranoly, nebo elektrooptické a akustooptické deflektory. V případě skenování rovinné plochy jsou často využívány galvanometricky vychylovaná zrcadla.

Plošné skenování se standardně provádí třemi konfiguracemi: skenování objektivem, skenování za objektivem a skenování před objektivem. Všechny tři konfigurace jsou naznačeny na obrázku 1.



Obrázek 1: Základní typy konfigurací při plošném laserovém skenování. a) skenování objektivem, b) skenování za objektivem, c) skenování před objektivem. Převzato z [26].

Z uvedených konfigurací je nejméně využívaná metoda skenování objektivem, které princip spočívá v rotaci fokusačního objektivu vzhledem ke kolimovanému paprsku. Fokusační objektiv může kromě standardního refrakčního systému tvořit i zrcadlo.

Při skenování za objektivem je systém na odklon svazku umístěn mezi skenovanou plochou a objektivem. Skenování za objektivem je výhodné z důvodu absence šikmých

svazků vstupujících do objektivu, proto je možné použít velice jednoduchý optický systém. Nevýhoda této konfigurace je, že ohnisková rovina je zakřivená a je tedy nevhodná při aplikacích vyžadujících vysokou přesnost a rovinné pole. Nejpopulárnější konfigurace skenování je skenování za objektivem, kde je paprsek nejdříve usměrněn do úhlového pole pomocí skenovacího systému a pak zfokusován na standardně rovinnou plochu přes objektiv s korekcí zklenutí pole [26]. Na rozdíl od předcházejících metod je tímto způsobem možné dosáhnout mnohem vyšší přesnosti při polohování působivé laseru a obecně taky nejmenší spoty. Často využívané jsou objektivu typu f-theta.

2.2 Definice f-theta objektivu

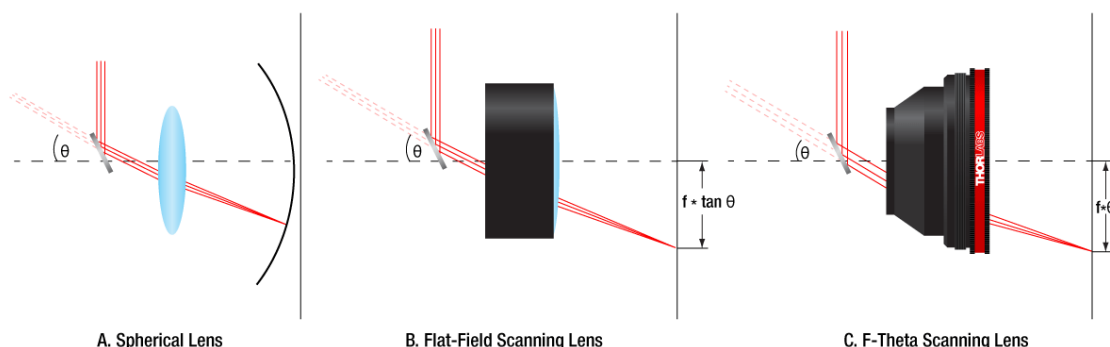
Při změně dopadového úhlu θ svazku laseru na standardní sférickou čočku je plocha, na níž se laser fokusuje, zakřivená (Obrázek 2 a)). Tato optická aberace se nazývá zklenutí pole (field curvature) a je blíže popsána v části 2.4.1. Zklenutí je nežádoucí a má za následek nerovnoměrné rozložení velikosti fokusované spoty v krajních oblastech pracovního pole. Obrázek 2 b) ukazuje objektiv (Flat-field lens), který je korigovaný na zklenutí pole, ale vzdálenost fokusované spoty od optické osy (výška obrazu) je nelineárně závislá na tangentu úhlu θ . Jelikož je jednodušší navrhnout systém odklonu paprsku laseru s lineárním posuvem, nelinearita tohoto objektivu způsobí nerovnoměrné energetické rozložení na obrobku, protože se fokusovaný spot na ploše pohybuje různou rychlostí na kraji a ve středu pole. V dnešní době je tento problém řešitelný softwarově, avšak při mnoha aplikacích je stále výhodnější použít objektiv s lineární závislostí mezi výškou obrazu a úhlem náklonu laseru θ [8]. Do f-theta objektivů je proto na úrovni optického designu vynucena taková hodnota zkreslení, která docílí zmíněnou linearitu, což se dá vyjádřit v podobě tzv. f-theta podmínky, podle které tento typ objektivu nese název f-theta:

$$y' = f \cdot \theta \quad (2.1)$$

kde y' je výška obrazu,

f je ohnisková vzdálenost,

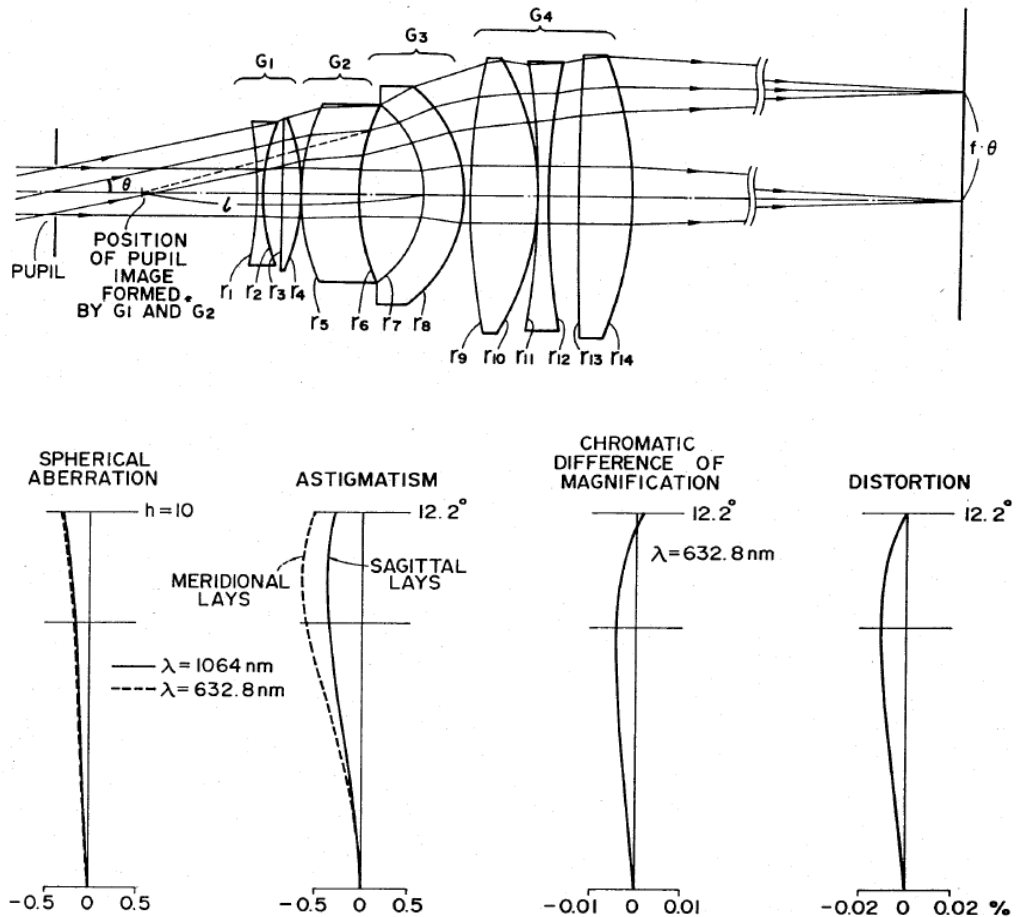
θ je úhel odklonu laserového svazku



Obrázek 2: Znázornění rozdílu mezi standardní čočkou, standardním objektivem s korekcí zklenutí pole a f-theta objektivem. Převzato z [29].

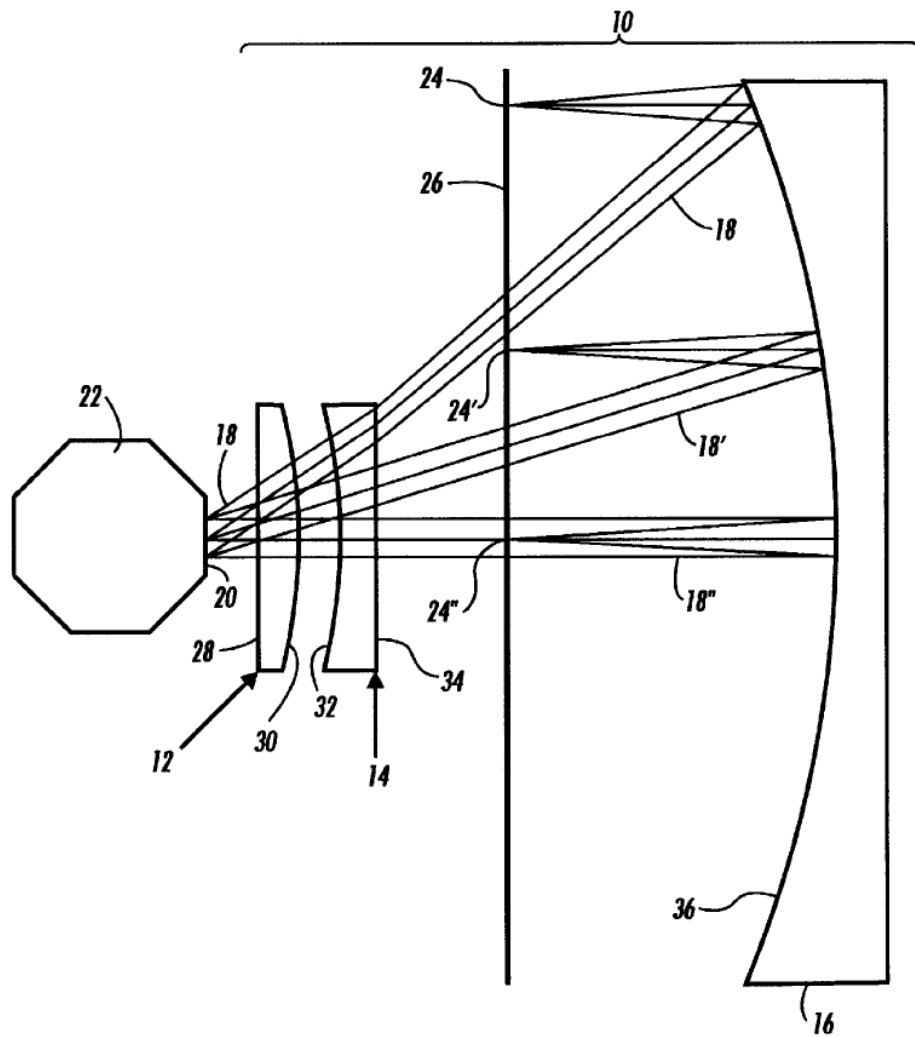
2.3 Současné optické konstrukce f-theta objektivů

Většina f-theta objektivů je složena ze dvou a více uspořádaných čoček se sférickými povrchy. Často jsou využívány taky čočky s asférickými povrchy kvůli jejich speciálním aberačním charakteristikám. Ve specifických případech dochází také k využití optických hranolů, rovinných, sférických i parabolických zrcadel nebo čoček se speciálním tvarem povrchu. Charakteristiky výsledného optického návrhu závisí především na požadavcích systému, do kterého je objektiv implementován. Příklad patentu standardního telecentrického f-theta objektivu je na obrázku 3.



Obrázek 3 Standardní telecentrický f-theta objektiv s ohniskovou vzdáleností 247,7 mm (nahore) a jeho aberační charakteristiky (dole). Převzato z [25].

Na obrázku 4 je zobrazen achromatický f-theta objektiv katadioptrického typu (tj. systém, který obsahuje jak refraktivní, tak reflektivní optické elementy). Achromatizaci přitom zabezpečují čočky 12 a 14 z různých optických materiálů s dostatečně odlišným indexem lomu. Telecentricitu zajišťuje konkávní zrcadlo 16. Protože se chromatická vada vyskytuje jen při refrakčních optických elementech, konkávní zrcadlo nemá na achromatizaci objektivu vliv. Patentovaný f-theta objektiv je určen pro rastrovací skener, ve kterém je kolimovaný laserový svazek rozmítán po skenovací čáře 26 rotačním polygonovým zrcadlem 22. Pro dosažení rovnoměrného expozičního času každého pixelu na čipu skeneru je kvůli konstantní rychlosti otáčení polygonového zrcadla nutné splnění f-theta podmínky.



Obrázek 4: Schematická ilustrace příčného řezu achromatického f-theta objektivu. První, pozitivní optický element, je plano-konvexní čočka z korunového skla BK7. Druhá je plano-konkávní rozptylka z flintového skla LAFN7 a spolu s konkávním reflektivním zrcadlem tvoří telecentrický systém. Převzato z [24].

2. 4 Optické aberace

Při určování velikosti a polohy obrazu vytvořeného optickým systémem lze jako aproximaci použít jednoduché zobrazovací rovnice, které vycházejí z geometrické optiky.

Geometrická optika vznikla na základě faktu, že popsat vlnoplochy elektromagnetického záření je matematicky složité a v mnohých případech nepotřebné. Právě proto byl zaveden koncept světelného paprsku, který reprezentuje fiktivní dráhu bodu na vlnoploše šířící se prostorem. V izotropním prostředí je takový paprsek přímka kolmá na vlnoplochu a při přechodu do média s jinou optickou hustotou se láme podle Snellova zákona lomu.

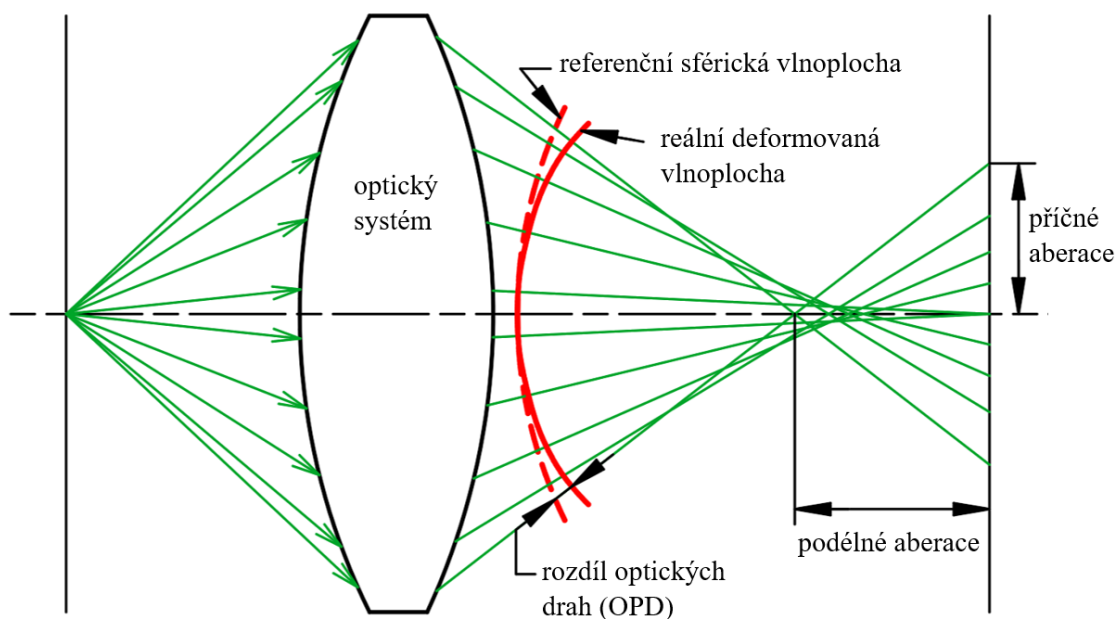
Zmíněné zobrazovací rovnice však platí přesně pouze v paraxiálním prostoru, což u osově symetrických optických systémů znamená nekonečně malá válcová oblast kolem optické osy, ve kterém se úhly paprsků s optickou osou blíží nule a při odvozování zobrazovacích rovnic je tak možné využít aproximaci $\sin \alpha \approx \alpha$. Tenhle přístup se nazývá také Gaussovská optika neboli optika perfektních systémů.

Jelikož reálné optické systémy mají aperturu konečné velikosti, jsou všechny zatíženy vadami, které způsobují nedokonalé zobrazení. Tyto vady se nazývají optické aberace a ve smyslu paprskové optiky se můžou charakterizovat jako odchylka od paraxiálního zobrazení. Optické aberace se tedy dají určit trasováním většího množství paprsků přes optický systém pomocí zákona lomu bez aproximací a následným porovnáním jejich odchylek od paraxiálního obrazu.

Při zmíněném trasování se optické aberace formují v předvídatelných vzorech. Je tedy možné je klasifikovat a popsat jejich chování použitím konečného množství trasovaných paprsků. Trasováním paprsků lze aberace vyhodnotit dvěma přístupy. První přístup je geometrický, při kterém se vyhodnocuje příčná nebo podélná aberace paprsků, přičemž je více využíván koncept příčné aberace. Příčná aberace představuje vzdálenost, o kterou paprsky míjejí referenční ideální obraz bodu v obrazové rovině, a tedy přímo souvisí s tvarem a velikostí výsledného obrazu bodu [2, 3, 7].

Geometrický přístup k aberacím vznikl historicky jako první a dodnes je využíván ve velkém měřítku. Moderní technologie ale umožňuje vyvinout optické systémy s difrakčně limitovanou kvalitou obrazu, při kterých je vhodnější využít přístup popisu aberací jako chyb vlnoplochy. Chyby konvergentní vlnoplochy se měří v jednotkách vln jako rozdíl optických drah (OPD - Optical Path Difference) mezi reálnou, deformovanou vlnoplochou a referenční, dokonalou sférickou vlnoplochou, která je centrována na ideálním obrazovém bodu [3].

Porovnání těchto dvou přístupů je naznačeno na obrázku 5. Je nutno dodat, že se práce zabývá návrhem a popisem osově symetrických optických systémů a určitá tvrzení nemusí platit při systémech, které nejsou osově symetrické.



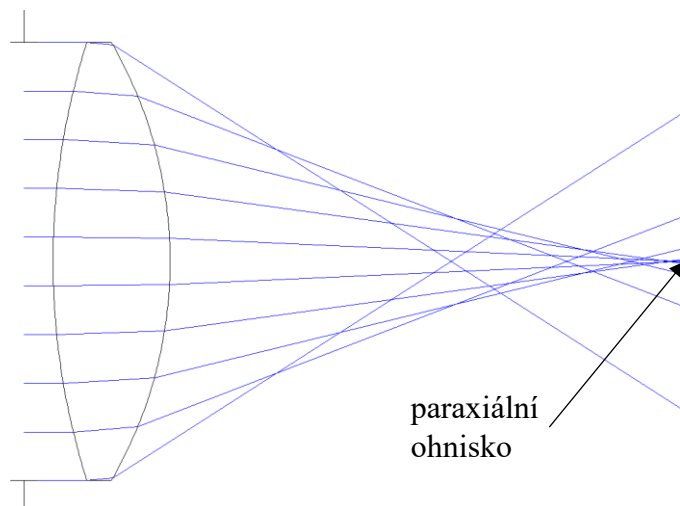
Obrázek 5: Porovnání geometrického a vlnového přístupu k aberacím. Střed křivosti referenční sférické vlnoplochy je v ideálním obrazovém bodu. Paprsky propagují obrazovým prostorem ve směru kolmém na reálnou vlnoplochu.

2.4.1 Monochromatické aberace

Existuje pět základních, monochromatických aberací, které jako první popsal Philipp Ludwig von Seidel. Z tohoto důvodu se nazývají taky Seidelovy aberace neboli aberace třetího řádu. Tyto aberace tvoří sférická aberace (otvorová vada), koma, zkreslení, astigmatismus a zklenutí pole.

Sférická aberace

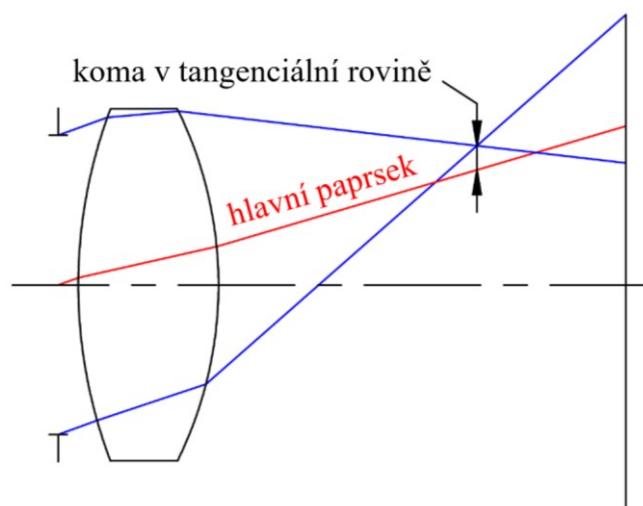
Při osvětlení optické soustavy širokým svazkem paprsků z osového bodu se paprsky, které jsou umístěny dál od optické osy fokusují mimo paraxiální ohnisko. Proto se tato vada popisuje také jako variace ohniskové vzdálenosti s narůstající aperturou. Nežádoucí následek je pak snížená kvalita obrazu, protože se bod zobrazí jako kruh s určitým rozložením intenzity [7].



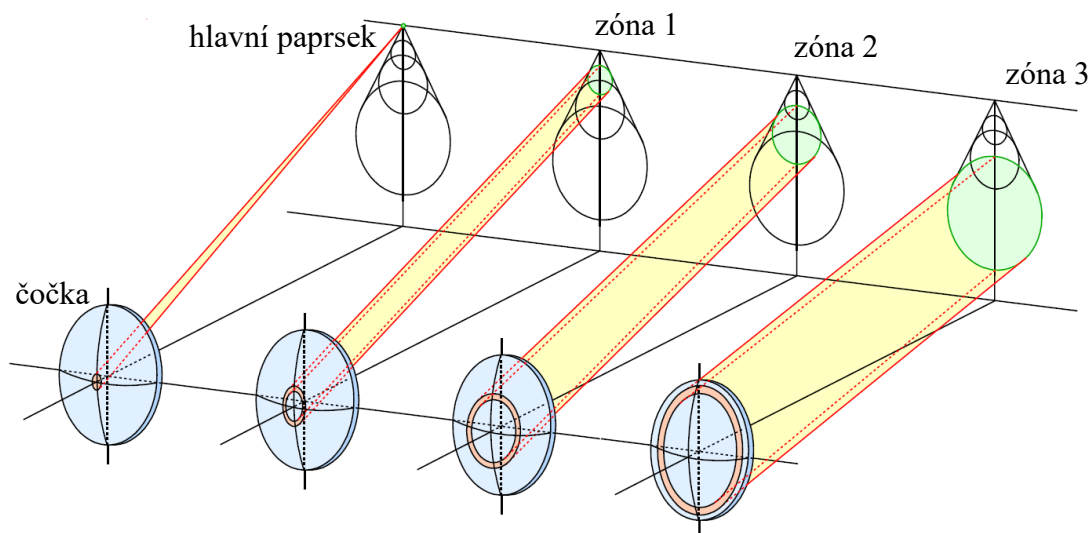
Obrázek 6: Znárodnění sférické aberace. Paprsky procházející vzdálenějšími částmi pupily se fokusují před paraxiální ohnisko.

Koma

Koma vzniká při osvětlení optické soustavy mimoosovým, širokým svazkem paprsků, přičemž vzniklý obraz mimoosového bodu má tvar komety. Komu je možné definovat taky jako variaci zvětšení s narůstající aperturou. Paprsky, které procházejí krajem apertury protnou obrazovou rovinu v jiné výšce jako paprsky, které procházejí středem apertury [7].



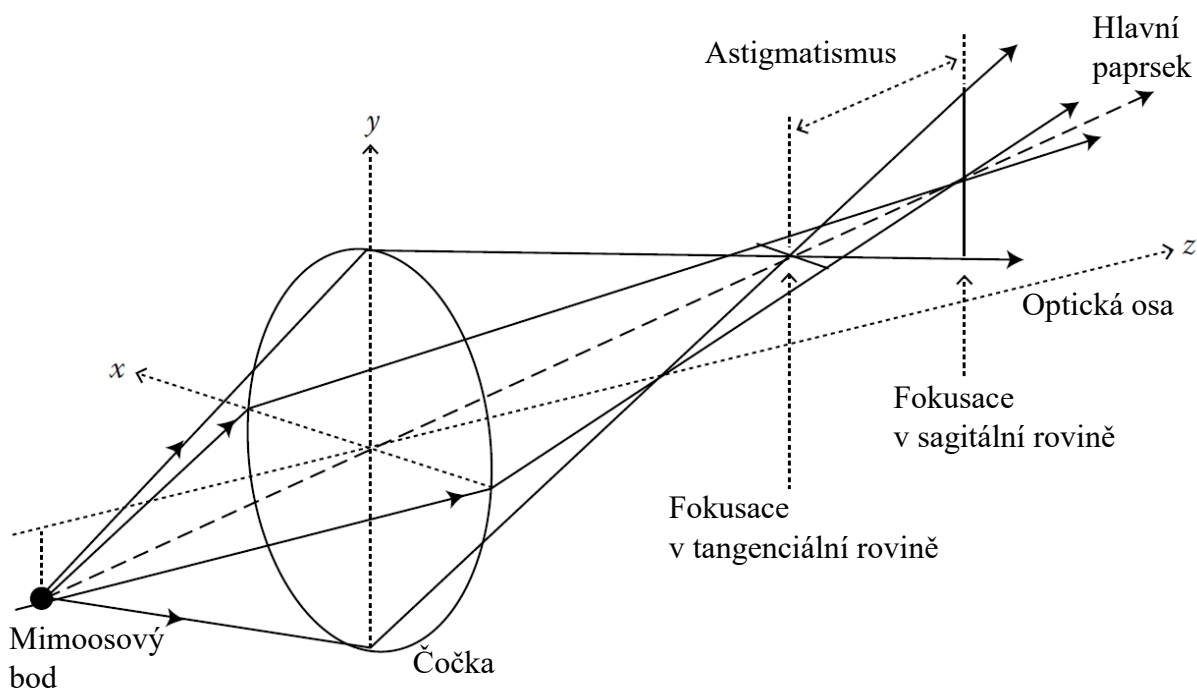
Obrázek 7: Znárodnění komy jako příčné aberace. Paprsky šikmého, širokého svazku v kraji apertury jsou fokusovány na jiném místě jako paprsky ve vnitřní části apertury.



Obrázek 8: Vztah mezi různými zónami pupily a odpovídajícími obrazy mimoosového bodu jako kruhů. Následkem je spot ve tvaru komety. Převzato z [13] a upraveno.

Astigmatismus a zklenutí pole

Při trasování paprsků z mimoosového bodu se v sagitální rovině zfokusují na jiném místě než paprsky trasované z toho samého bodu ležící v tangenciální rovině (viz obrázek 9).

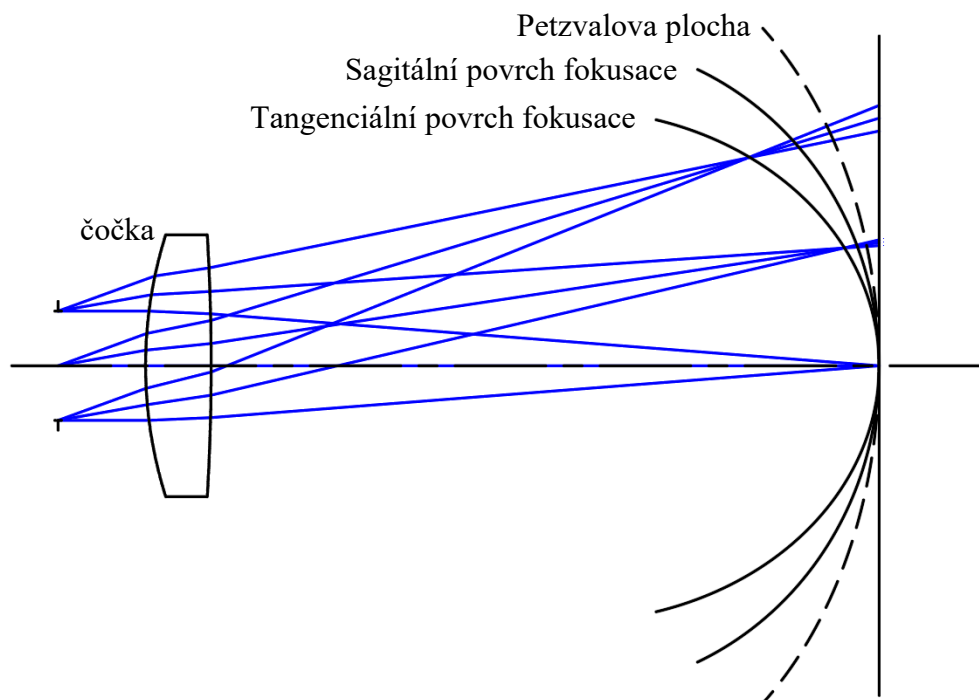


Obrázek 9: Znázornění astigmatismu. Paprsky, které vycházejí z mimoosového bodu se zfokusují v jiném bodě v závislosti na tom, jestli se nacházejí v sagitální nebo tangenciální rovině. Převzato z [4] a upraveno.

Tento jev je způsoben tím že v sagitální a tangenciální rovině je poloměr křivosti hranice lámavé plochy sférické čočky různý. U dokonale osově symetrického optického systému je astigmatismus při zobrazení osového bodu nulový [7].

S astigmatismem úzce souvisí zklenutí pole. Mimoosový bod je zobrazen mimo paraxiální obrazovou rovinu a následkem je obrazová rovina s určitým zakřivením, které má přímou souvislost s mírou zatížení systému astigmatismem. Obrazová rovina má kvůli astigmatismu jiné zakřivení v tangenciální a sagitální rovině. Pokud systém není zatížen astigmatismem má obrazová rovina pořád určité zakřivení na ploše s názvem Petzvalova plocha (viz obrázek 10).

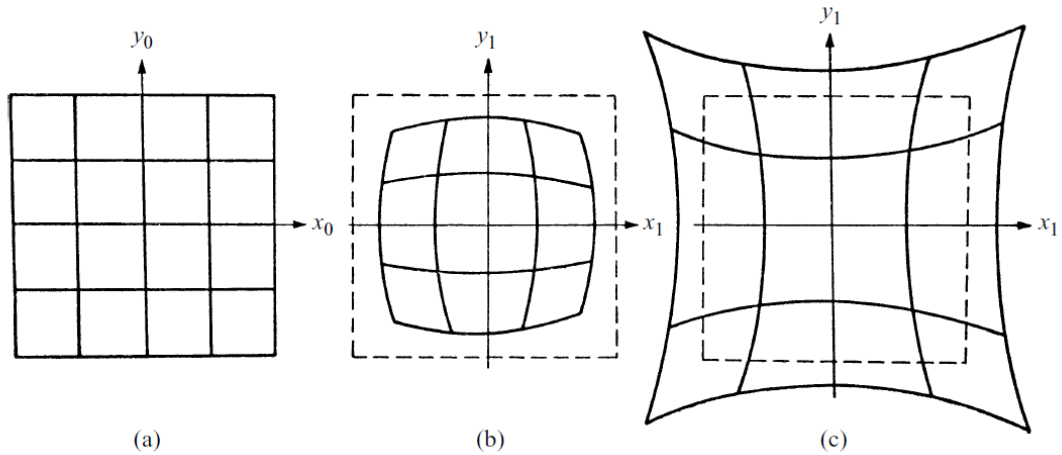
Obecně se dá říct, že zklenutí pole je podélná odchylka ohniska od ideální obrazové roviny. Zklenutí pole je nutno korigovat zejména při aplikacích, kde se zobrazuje na nebo z rovinného povrchu jako mikroskopie nebo plošné skenování [2].



Obrázek 10: Znázornění astigmatismu a zklenutí pole. Fokusace mimoosového svazku nastává na zakřivené ploše. Pro paprsky v sagitální a tangenciální rovině je rovina fokusace zakřivená různě.

Zkreslení

Zkreslení lze definovat jako variaci zvětšení při zobrazování bodů různě vzdálených od optické osy v předmětové rovině. Pokud je například předmětem rovnoměrná mřížka jako na obrázku 11 a) je zobrazena s určitou deformací. Dvě základní deformace obrazu způsobené zkreslením jsou označovány jako soudkové nebo polštářové zkreslení (viz obrázek 11 b), c)). V reálných optických systémech dochází ke zkreslení jako určité kombinace těchto dvou typů zkreslení a mnohdy je obraz deformován mnohem složitějším způsobem [7].



Obrázek 11: a) Předmět, b) obraz se soudkovým zkreslením, c) obraz s polštářovým zkreslením. Převzato z [2].

Hodnota zkreslení $\delta y'_z$ pro výšku obrazu určitého bodu se dá například podle [4] procentuálně vyjádřit jako:

$$\delta y'_z = \frac{y' - y'_0}{y'_0} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

Kde y'_0 je výška obrazu bodu s dokonalým zobrazením a y' je reálná výška obrazu daného bodu.

Hodnota zkreslení, která musí být vynucena při návrhu f-theta objektivu se dá vyjádřit pomocí vztahu (2.2). Pokud pro výšku obrazu objektivu s korekcí zkreslení v celém poli platí $y' = f \cdot \tan \theta$ tak pro hodnotu zkreslení pro f-theta objektiv musí platit:

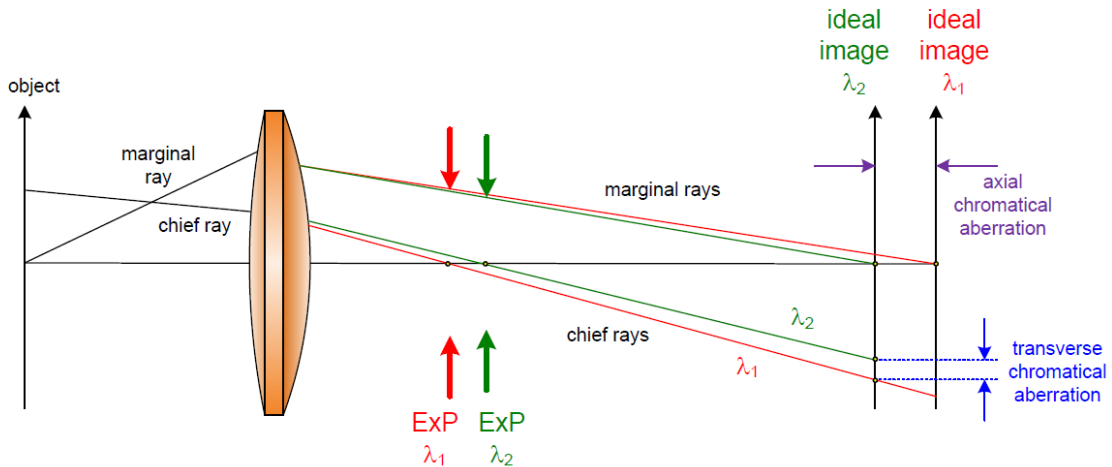
$$\delta y'_z = \frac{y' - y'_0}{y'_0} \cdot 100\% = \left(\frac{f\theta - f \tan \theta}{f \tan \theta} \right) \cdot 100\% = \left(\frac{\theta}{\tan \theta} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (2.3)$$

2.4.2 Chromatické aberace

Monochromatické aberace jsou posuzovány pouze pro jedinou vlnovou délku. V mnohých případech optických návrhů ale není spektrální šířka zanedbatelná a je potřeba počítat s chromatickými aberacemi.

Chromatické aberace jsou následek vlastnosti refrakčních elementů zvané disperze neboli závislosti indexu lomu na vlnové délce propagujícího světla. Obecně platí, že hodnota indexu lomu optického materiálu je vyšší pro světlo s kratší vlnovou délkou a nižší pro světlo s delší vlnovou délkou. Například jednoduchá spojná čočka má kratší ohniskovou vzdálenost pro modré světlo než pro červené světlo. V případě rozdílu mezi ohniskovými vzdálenostmi pro odlišné vlnové délky při zobrazení osového bodu jde o osovou podélnou chromatickou aberaci. Pokud se opisuje změna velikosti obrazu

kvůli disperzi, jde o příčnou chromatickou aberaci [2, 13]. Oba případy jsou naznačeny na obrázku 12.



Obrázek 12: Zobrazení podélné a příčné chromatické aberace. Převzato z [13].

2.4.3 Chyby vlnoplochy (OPD)

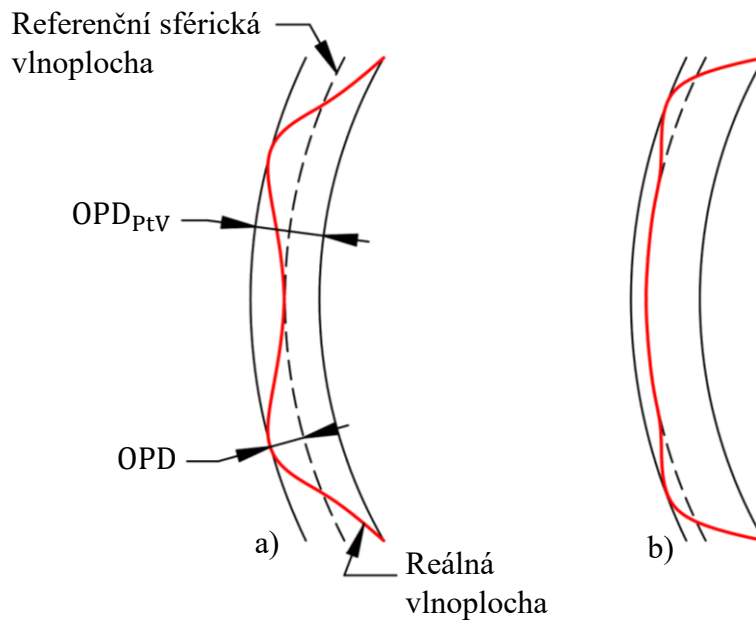
Jak už bylo zmíněno, aberace optického systému se mohou analyzovat prostřednictvím geometrické optiky jako podélné, nebo příčné odchylky reálného paprsku od ideálního bodu zobrazení. Další metoda popisu aberací je založena na konceptu deformace vlnoplochy. Vlnoplocha je imaginární povrch, na kterém mají všechny body stejnou fázi a platí, že k ní je paprsek světla vždy lokálně kolmý. Pro ideální zobrazení bodu na bod musí platit, že konvergentní vlnoplocha je dokonale sférická. Pro skupinu paralelních paprsků platí, že vlnoplocha je dokonale rovinná. Při reálných optických systémech je ale vlnoplocha vždy nějakým způsobem deformována.

Posuzování aberací jako chyb vlnoplochy je v softwarech pro optický návrh jako Zemax díky výpočetní schopnosti počítače podobně jako příčné a podélné aberace založeno na trasování konečného počtu paprsků, na kterých se měří změna optické dráhy (OPD) oproti referenční dokonalé vlnoploše centrované na ideálním bodu zobrazení. OPD se určuje v jednotkách vln testovacího laseru. S dostatečně velkým množstvím trasovaných paprsků lze vymodelovat vlnoplochu zatíženou zmíněnými aberacemi [3, 2]. Hodnota OPD reálné, deformované vlnoplochy není konstantní, ale mění se v závislosti na lokaci na vlnoploše. Existují dva způsoby pro vyhodnocení obecné hodnoty OPD pro danou vlnoplochu. Nejvíce používán je výpočet RMS chyby vlnoplochy OPD_{RMS} definován podle [4] jako:

$$OPD_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n OPD_i^2}{n}} \quad (2.4)$$

Kde n je počet bodů na vlnoploše, přes které je určovaná hodnota OPD.

Další způsob určení hodnoty OPD je Peak-To-Valley. OPD_{PTV} je rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou OPD na dané vlnoploše. Hodnota OPD_{PTV} je zpravidla větší než hodnota OPD_{RMS} a není mezi nimi přímý vztah, jak je ukázáno na obrázku 13.



Obrázek 13: Znázornění různých vlnoploch a) a b). Hodnota OPD_{PtV} je v obou případech stejná ale hodnota OPD_{RMS} je větší pro případ a).

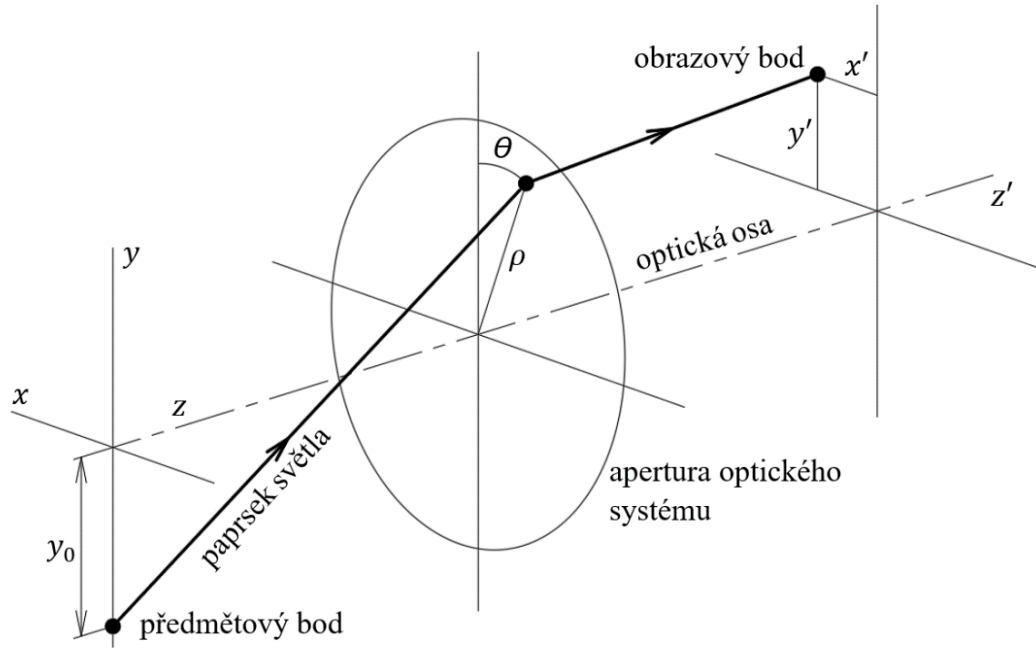
2.4.4 Aberační polynomy

Jak už bylo zmíněno, zobrazovací rovnice v paraxiálním prostoru jsou odvozeny na základě aproximace pro malé úhly paprsků $\sin \alpha \approx \alpha$. Při použití širšího svazku paprsků je tahle aproximace nepřesná ale je možné ji nahradit aproximací využívající Taylorův rozvoj funkce sinus

$$\sin \alpha \approx \alpha - \frac{\alpha^3}{3!} + \frac{\alpha^5}{5!} - \frac{\alpha^7}{7!} + \dots \quad (2.5)$$

S využitím téhle logiky a uvažováním s osově symetrickým systémem je možné odvodit aberační polynomy, které slouží jako matematický nástroj pro popsání a kategorizaci aberací [2,7].

Na obrázku 14 je zobrazen paprsek propagující osově symetrickým optickým systémem s počátkem v bodě na ose y , protínající aperturu systému v bodě s radiálními souřadnicemi (ρ, θ) a obrazovou rovinu v bodě (x', y') .



Obrázek 14: Osově symetrickým optickým systémem se šíří paprsek s počátkem v bodě $(x = 0, y = y_0)$ protínající aperturu systému v bodě s radiálními souřadnicemi (ρ, θ) a obrazovou rovinu v bodě (x', y') .

Podle [7] je pak s určitými změnami v značení možné odvodit následující výrazy určující souřadnice (x', y') bodu přetnutí paprsku na obrázku 14 s obrazovou rovinou v závislosti na proměnných y_0, ρ a θ :

$$\begin{aligned}
 y' = & A_1 \rho \cos \theta + A_2 y_0 \\
 & + B_1 \rho^3 \cos \theta + B_2 \rho^2 y_0 (2 + \cos 2\theta) + (3B_3 + B_4) \rho y_0^2 \cos \theta + B_5 y_0^3 \\
 & + C_1 \rho^5 \cos \theta + (C_2 + C_3 \cos 2\theta) \rho^4 y_0 + (C_4 + C_6 \cos^2 \theta) \rho^3 y_0^2 \cos \theta \\
 & + (C_7 + C_8 \cos 2\theta) \rho^2 y_0^3 + C_{10} \rho y_0^4 \cos \theta + C_{12} \rho^5 + \{\text{členy sedmého řádu}\} \\
 & + \{\text{členy devátého řádu}\} + \dots
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

$$\begin{aligned}
 x' = & A_1 \rho \sin \theta \\
 & + B_1 \rho^3 \sin \theta + B_2 \rho^2 y_0 \sin 2\theta + (B_3 + B_4) \rho y_0^2 \sin \theta \\
 & + C_1 \rho^5 \sin \theta + C_3 \rho^4 y_0 \sin 2\theta + (C_5 + C_6 \cos^2 \theta) \rho^3 y_0^2 \sin \theta \\
 & + C_9 \rho^2 y_0^3 \sin 2\theta + C_{11} \rho y_0^4 \sin \theta + \{\text{členy sedmého řádu}\} \\
 & + \{\text{členy devátého řádu}\} + \dots
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

Význam parametrů ρ, θ, y_0 vychází z obrázku 14 a A_n, B_n, C_n jsou konstanty. Členy s konstantou A souvisí s gaussovskou (paraxiální) optikou prvního řádu přičemž A_1 představuje míru vzdálenosti od paraxiálního ohniska způsobenou defokusací a A_2 je zvětšení. Členy s koeficienty B vyjadřují primární Seidelovy aberace neboli aberace třetího řádu (B_1 -sférická aberace, B_2 -koma, B_3 -astigmatismus, B_4 -zklenutí pole, B_5 -zkreslení). Členy s koeficienty C představují sekundární aberace neboli aberace pátého řádu [7].

Ve skutečnosti popsané aberační polynomy obsahují nekonečné množství členů, přičemž díky osově symetrii systému neobsahují členy se sudými řády. Je ale nepraktické určovat větší množství členů vyšších řádů, protože se jejich hodnoty s narůstajícím řádem

drasticky snižují a obecně tedy platí, že na kvalitu systému mají největší vliv primární aberace. [4].

Jak už bylo zmíněno polynomy (2.6) a (2.7) určují průsečík reálného paprsku s obrazovou rovinou a jsou tedy prostředek pro popis příčných aberací. Pokud chceme vyjádřit aberační polynom ve smyslu chyb vlnoplochy (OPD) od referenční sférické vlny je možné odvodit vztah podle [7]:

$$\begin{aligned} \text{OPD} = & A'_1 \rho^2 + A'_2 \rho y_0 \cos \theta \\ & + B'_1 \rho^4 + B'_2 \rho^3 y_0 \cos \theta + B'_3 \rho^2 y_0^2 \cos^2 \theta + B'_4 \rho^2 y_0^2 + B'_5 \rho y_0^3 \cos \theta \\ & + C'_1 \rho^6 + C'_2 \rho^5 y_0 \cos \theta + C'_4 \rho^4 y_0^2 + C'_5 \rho^4 y_0^2 \cos^2 \theta + C'_7 \rho^3 y_0^3 \cos \theta \\ & + C'_8 \rho^3 y_0^3 \cos^3 \theta + C'_{10} \rho^2 y_0^4 + C'_{11} \rho^2 y_0^4 \cos^2 \theta + C'_{12} \rho y_0^5 \cos \theta + \dots \end{aligned} \quad (2.8)$$

Význam parametrů ρ, θ, y_0 vychází z obrázku 14 a A'_n, B'_n, C'_n mají stejný význam jako konstanty A_n, B_n, C_n uvedené při polynomech (2.6) a (2.7) avšak jejich numerická hodnota je odlišná. Pomocí OPD je tedy možné vyhodnotit tvar vlnoplochy pro danou kombinací aberací.

Detailnější odvození uvedených aberačních polynomů a výpočty Seidelových koeficientů pro primární aberace reprezentované konstantami B_n a B'_n je možné vyhledat například v [2,3,7].

Jedna z možností kontroly aberací v Zemaxu je výpočet Seidelových koeficientů příčných aberací, podélných aberací a chyb vlnoplochy pro jednotlivé povrchy. Koeficienty pro jednotlivé povrchy je možné zobrazit ve sloupcovém diagramu jako jejich celkový součet. Koeficienty příčných a podélných aberací jsou vyjádřeny v jednotkách vzdálenosti a koeficienty vad vlnoplochy jsou vyjádřeny v jednotkách vln v kraji výstupní pupily.

2.4.5 Zernikovy polynomy

Zernikovy polynomy jsou pojmenovány podle holandského fyzika Fritse Zernikeho. Podobně jako aberační polynom (2.8) jsou Zernikovy polynomy matematický nástroj, kterým je možné popsat deformaci vlnoplochy, a tak charakterizovat a kategorizovat aberace vyšších řádů.

Zernikovy polynomy představují nekonečnou řadu polynomů s dvěma proměnnými, přičemž jsou tyto polynomy ortogonální na jednotkovém kruhu. Kvůli jejich definici na jednotkovém kruhu nacházejí enormní uplatnění při analýze a kontrole kvality zobrazení osově symetrických optických systémů jako jsou dalekohledy nebo mikroskopové objektivy. V jednotkové kruhu je praktické použít radiální systém souřadnic, takže zmíněné dvě proměnné často tvoří azimutální úhel φ a radiální vzdálenost $\rho \leq 1$.

Existují liché a sudé Zernikovy polynomy definované například podle [21]:

$$Z_n^m(\rho, \varphi) = R_n^m(\rho) \cdot \begin{cases} \sin(m\varphi) & \text{pro } m < 0 \quad (\text{liché}) \\ \cos(m\varphi) & \text{pro } m > 0 \quad (\text{sudé}) \\ 1 & \text{pro } m = 0 \end{cases} \quad (2.9)$$

kde n je radiální řád a m je tzv. úhlová frekvence (n a m jsou pozitivní celá čísla, přičemž platí $m \leq n$). $R_n^m(\rho)$ je radiální polynom definovaný podle [21] jako:

$$R_n^m(\rho) = \begin{cases} \sum_{l=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^l (n-l)}{l! \left[\frac{1}{2}(n+m)-l\right]! \left[\frac{1}{2}(n-m)-l\right]!} \rho^{n-2l} & \text{pro } (n-m) \text{ sudé} \\ 0 & \text{pro } (n-m) \text{ liché} \end{cases} \quad (2.10)$$

Podmínka ortogonality pro Zernikovy polynomy je podle [21] definovaná jako:

$$\iint Z_n^m(\rho, \varphi) Z_{n'}^{m'}(\rho, \varphi) \rho d\rho d\varphi = \frac{\varepsilon_m \pi}{2n+2} \delta_{n,n'} \delta_{m,m'} \quad (2.11)$$

kde $\varepsilon_m = 2$ pro $m = 0$ a $\varepsilon_m = 1$ pro $m \neq 0$, $\delta_{n,n'}$ a $\delta_{m,m'}$ je tzv. Kroneckerovo delta pro které platí $\delta_{i,j} = 1$ pokud $i = j$ a $\delta_{i,j} = 0$ pokud $i \neq j$ a $(n-m)$ a $(n'-m')$ jsou oboje sudé.

Ortogonalita je důležitá, protože je to nutná podmínka pro možnost vyjádření libovolně deformované vlnoplochy jako součtu Zernikových polynomů, z kterých každý představuje určitý typ deformace. To je výhodné při zjišťování toho, které aberace mají na systém největší vliv. Dobré přirovnání mechaniky Zernikových polynomů je k teorii Fourierových řad, která říká, že jakoukoliv funkci je možné nahradit součtem harmonických ortogonálních funkcí, a to většinou funkcemi sinus a cosinus.

Rozložení funkce deformace vlnoplochy na kruhové ploše do jednotlivých základních Zernikových polynomů, z kterých každý představuje specifický tvar deformace (viz obrázek 15) je pak možné vyjádřit podle [4] jako:

$$W(\rho, \varphi) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=m}^{\infty} [A_n^m Z_n^m(\rho, \varphi) + B_n^m Z_n^{-m}(\rho, \varphi)] \quad (2.12)$$

kde A_n^m a B_n^m je možné určit díky vlastnosti ortogonality zernikových polynomů jako

$$A_n^m = \frac{n+1}{\varepsilon_{m,n} \pi} \iint W(\rho, \varphi) Z_n^m(\rho, \varphi) \rho d\rho d\varphi \quad (2.13)$$

$$B_n^m = \frac{n+1}{\varepsilon_{m,n} \pi} \iint W(\rho, \varphi) Z_n^{-m}(\rho, \varphi) \rho d\rho d\varphi \quad (2.14)$$

kde $\varepsilon_{m,n} = 1/\pi$ pro $m = 0$ a $n \neq 0$, jinak $\varepsilon_{m,n} = 1$.

Je nutno říct, že problematika Zernikových polynomů je rozsáhlejší, než má smysl uvádět v téhle práci. Mnohé zdroje uvádějí různé členy a jejich postupnosti v Zernikových polynomech v závislosti na použití.

V Zemaxu jsou definovány tři druhy zápisů Zernikových polynomů, a to *Zernike fringe polynomials*, *Zernike standard polynomials* (dál označovány jako Zernikeho

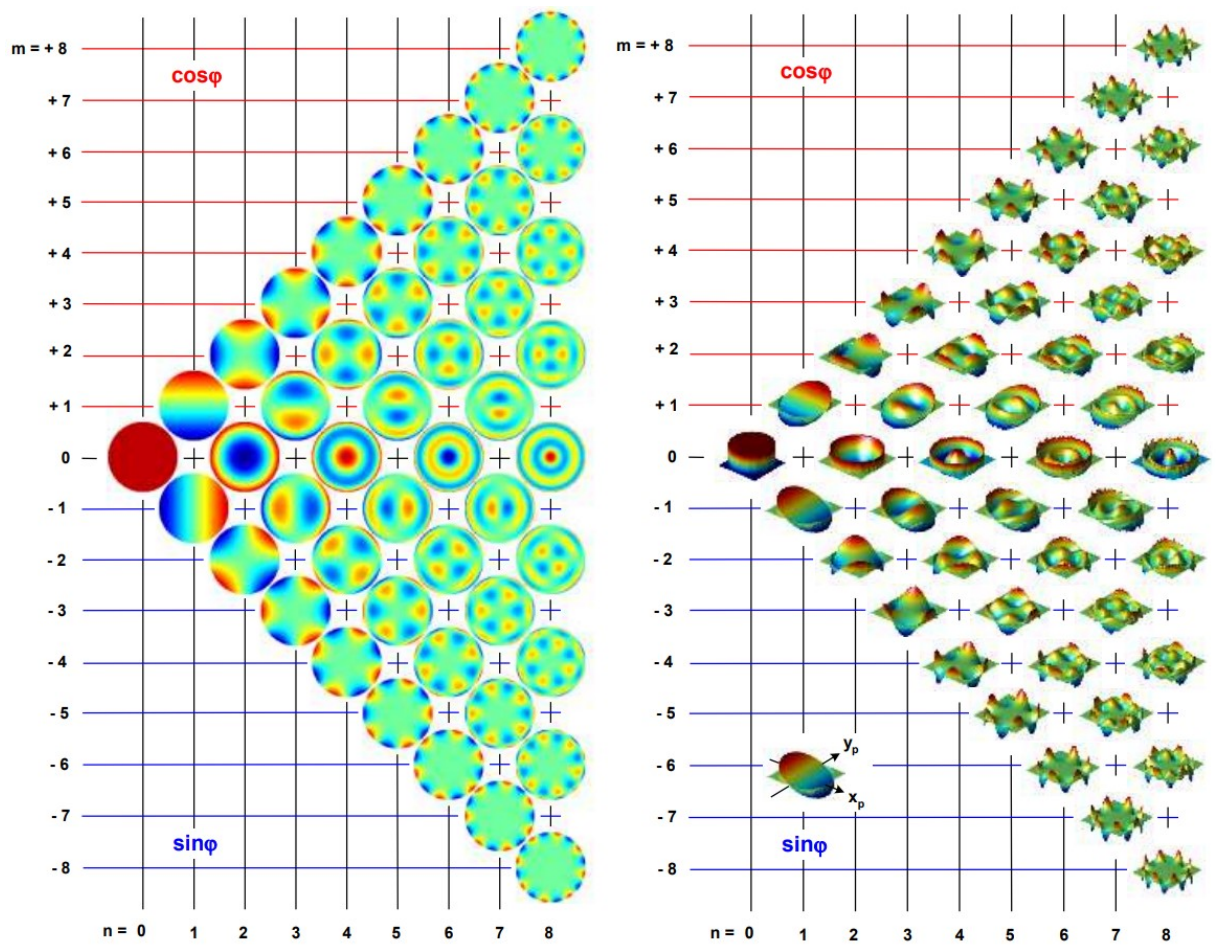
standární polynomy) a *Zernike annular polynomials*. *Zernike annular p.* jsou speciální typ standardních Z. polynomů, které se uplatňují při systémech využívajících prstencovou aperturu (centrální část světelného kužele je odstíněna) [19]. Rozdíl mezi zápisy typů Zernike fringe p. a Zernike standard p. je v indexování, a tedy pořadí polynomů a v tom, že členy Zernikeho standardních polynomů jsou normalizovány podle [13] se změnou vztahu (2.9) na:

$$Z_n^m(\rho, \varphi) = \sqrt{\frac{2(n+1)}{1+\delta_{m0}}} R_n^m(\rho) \cdot \begin{cases} \sin(m\varphi) & \text{pro } m < 0 \text{ (liché)} \\ \cos(m\varphi) & \text{pro } m > 0 \text{ (sudé)} \\ 1 & \text{pro } m = 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

Důvod, proč je zápis Zernike standard využíván víc je ten, že na rozdíl od zápisu Zernike fringe není omezen na pouhých 37 členů. V tabulce 1 je uvedeno schematické indexování jednotlivých standardních Zernikových polynomů a v tabulce 2 je uvedeno prvních 28 členů. Na obrázku 15 jsou zobrazeny tvary jednotlivých polynomů.

	sin									cos							
<i>n/m</i>	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0									1								
1								3		2							
2							5		4		6						
3						9		7		8		10					
4					15		13		11		12		14				
5				21		19		17		16		18		20			
6			27		25		23		22		24		26		28		
7		35		33		31		29		30		32		34		36	
8	45		43		41		39		37		38		40		42		44

Tabulka 1: Indexování standardních Zernikeho polynomů $Z_n^m \rightarrow Z_j$ pro určení jejich pořadí



Obrázek 15: Grafické znázornění jednotlivých Zernikových polynomů. Jakákoliv deformace vlnoplochy na jednotkovém kruhu se dá vyjádřit jako součet Zernikových polynomů s určitým koeficientem. Převzato z [13].

Index polynomu j	$Z_j(\rho, \varphi)$	Název deformace
1	1	Píst
2	$2\rho \cos \varphi$	Náklon X
3	$2\rho \sin \varphi$	Náklon Y
4	$\sqrt{3}2\rho^2 - 1$	Defokusace
5	$\sqrt{6}(\rho^2 \sin 2\varphi)$	Astigmatismus Y
6	$\sqrt{6}(\rho^2 \cos 2\varphi)$	Astigmatismus X
7	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho) \sin \varphi$	Koma Y
8	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho) \cos \varphi$	Koma X
9	$\sqrt{8}\rho^3 \sin 3\varphi$	Trefoil Y
10	$\sqrt{8}\rho^3 \cos 3\varphi$	Trefoil X
11	$\sqrt{5}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	Sférická aberace
12	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2) \cos 2\varphi$	Sek. astigmatismus X
13	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2) \sin 2\varphi$	Sek. astigmatismus Y
14	$\sqrt{10}\rho^4 \cos 4\varphi$	Tetrafoil X
15	$\sqrt{10}\rho^4 \sin 4\varphi$	Tetrafoil Y
16	$\sqrt{12}(10\rho^5 - 12\rho^3 + 3\rho) \cos \varphi$	Sek. koma X
17	$\sqrt{12}(10\rho^5 - 12\rho^3 + 3\rho) \sin \varphi$	Sek. koma Y
18	$\sqrt{12}(5\rho^5 - 4\rho^3) \cos 3\varphi$	Sek. trefoil X
19	$\sqrt{12}(5\rho^5 - 4\rho^3) \sin 3\varphi$	Sek. trefoil Y
20	$\sqrt{12}\rho^5 \cos 5\varphi$	Pentafoil X
21	$\sqrt{12}\rho^5 \sin 5\varphi$	Pentafoil Y
22	$\sqrt{7}(20\rho^6 - 30\rho^4 + 12\rho^2 - 1)$	Sek. sférická aberace
23	$\sqrt{14}(15\rho^6 - 20\rho^4 + 6\rho^2) \sin 2\varphi$	Terc. astigmatismus Y
24	$\sqrt{14}(15\rho^6 - 20\rho^4 + 6\rho^2) \cos 2\varphi$	Terc. astigmatismus X
25	$\sqrt{14}(6\rho^6 - 5\rho^4) \sin 4\varphi$	Sek. tetrafoil Y
26	$\sqrt{14}(6\rho^6 - 5\rho^4) \cos 4\varphi$	Sek. tetrafoil X
27	$\sqrt{14}\rho^6 \sin 6\varphi$	Hexafoil Y
28	$\sqrt{14}\rho^6 \cos 6\varphi$	Hexafoil X

Tabulka 2: Standardní Zernikovy polynomy. Převzato z [19].

2.5 Difrakční limit a velikost spotů

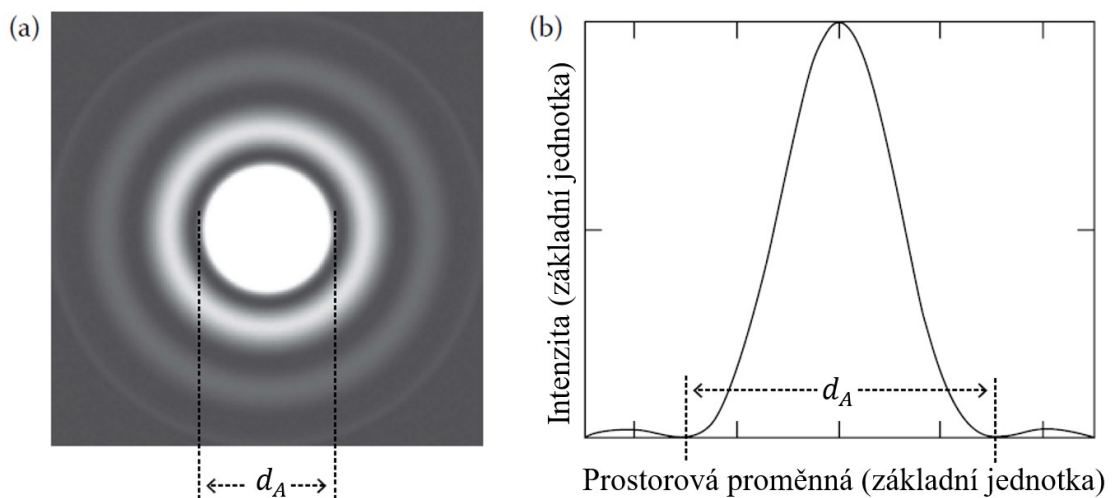
Kvůli vlnovému chování světla je ho nemožné zfokusovat do nekonečně malé plochy. I kdyby byl optický systém zbaven všech aberací, existuje fyzikální limit, který určuje, jak velká fokusovaná stopa může být. Tento limit souvisí s difrakcí světla na hranicích vstupní apertury. Pokud uvažujeme dokonalý, osově symetrický systém s kruhovou aperturou a bez optických aberací, je bod zobrazen jako difrakční obrazec na obrázku 16. Tenhle obrazec pozůstává z jasné centrální kruhové stopy a ze soustředných prstenců s prudce klesající intenzitou. Centrální kruhová stopa se nazývá Airyho disk a jeho velikost (tj. průměr kružnice v prvním minimu intenzity) se dá určit pomocí vztahu:

$$d_A = 2,44 \cdot \lambda \cdot f/\# \quad (2.16)$$

Kde d_A je průměr Airyho disku,
 λ vlnová délka světla,
 $f/\#$ clonové číslo

Clonové číslo $f/\#$

Clonové číslo je definované jako poměr ohniskové vzdálenosti f a průměru vstupní apertury d_A optického systému a tedy $f/\# = f/d_A$. Obecně platí, že systémy s nižší hodnotou clonového čísla mají větší kvalitu zobrazení za předpokladu dostatečné korekce optických aberací [1].



Obrázek 16: Difrakčně limitovaný obraz bodu (a) a jeho intenzitní profil (b). Oblast v mezikruží prvního intenzitního minima se nazývá Airyho disk. Převzato z [4], upraveno.

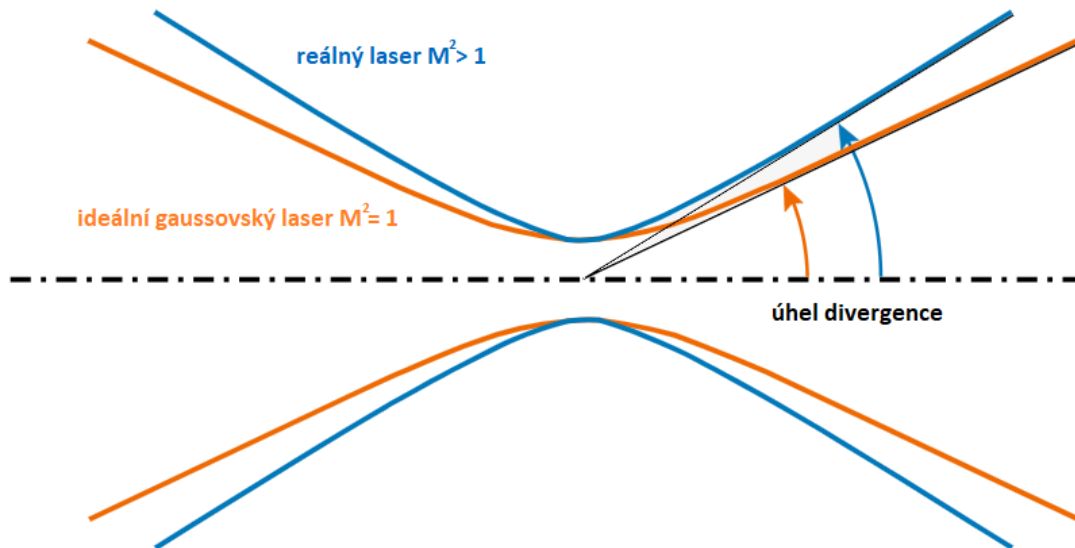
Pro výpočet Airyho disku, a tedy odhad minimální velikosti stopy, používá program Zemax právě vztah 2.16. Tenhle vztah ale předpokládá laser s ideálním Gaussovským svazkem, neuvažuje kvalitu laseru a ořezání daného typu svazku. Podle [20] se minimální dosažitelný průměr stopy při laserových aplikacích může určit následovně:

$$d_f = \frac{APO \cdot M^2 \cdot \lambda \cdot f}{d_L} \quad (2.17)$$

Kde d_f je minimální průměr fokusovaného spotu,
 APO faktor apodizace (APO faktor),
 M^2 difrakční hodnota laseru
 f ohnisková vzdálenost objektivu,
 λ vlnová délka laseru,
 d_L průměr vstupního svazku ($1/e^2$)

Difrakční hodnota M^2

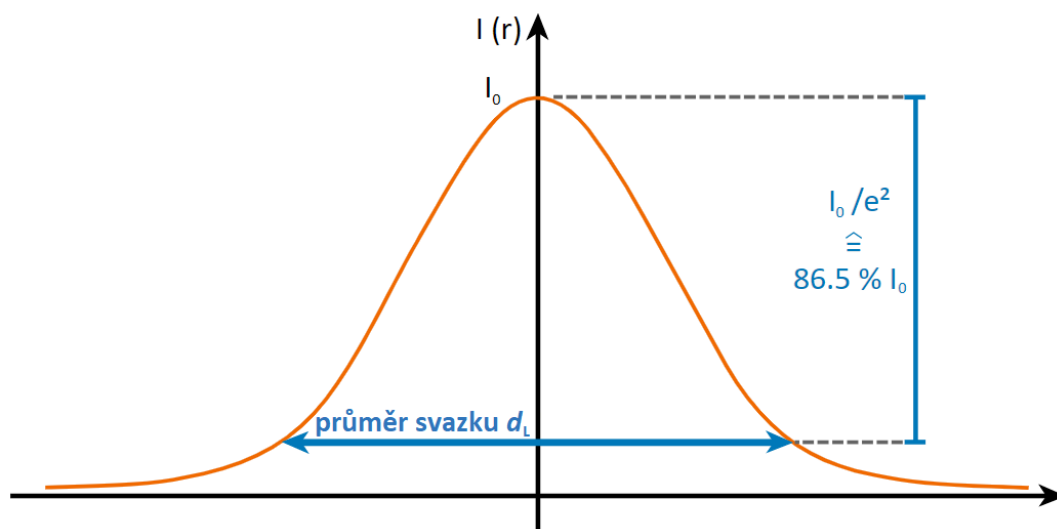
Difrakční hodnota M^2 je definovaná normou ISO 11146 jako poměr divergence úhlu reálného laserového svazku k divergenci úhlu ideálního Gaussovského svazku (viz obrázek 17). V případě ideálního Gaussovského svazku je hodnota $M^2 = 1$ a dosažitelný průměr spotu je tedy nejmenší, zatímco hodnota M^2 reálného laseru je větší než 1.



Obrázek 17: Porovnání difrakční hodnoty M^2 reálného laseru a laseru s ideálním Gaussovským svazkem. Převzato z [20], upraveno.

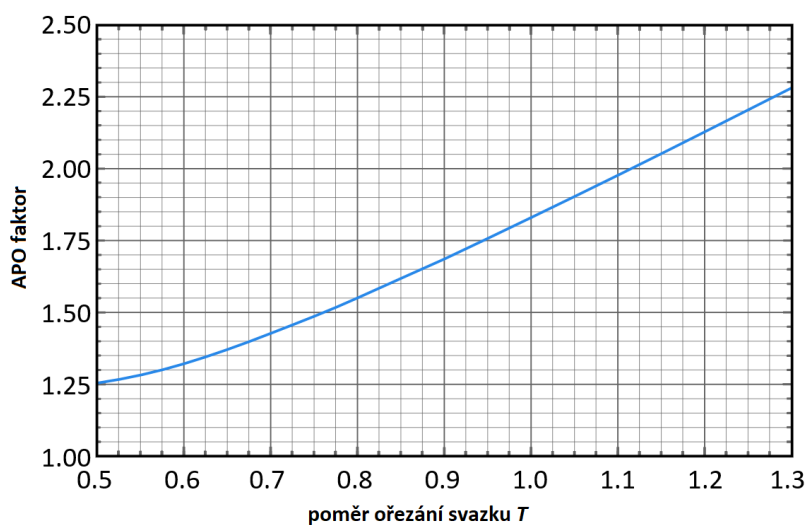
Průměr vstupního svazku d_L a APO faktor

Při použití laseru s intenzitním profilem Gaussovského typu je průměr vstupního svazku d_L nejčastěji odkázán na hodnotu, kdy intenzita klesne na hodnotu $1/e^2$ celkové intenzity, tj. na přibližně 13,5 % celkové intenzity (viz obrázek 18). Je tedy zřetelné, že v $1/e^2$ průměru svazku je obsaženo 86,5 % energie laseru.



Obrázek: 18 Intenzitní profil Gaussovského typu laserového svazku s definicí jeho průměru na hodnotě $1/e^2$. Převzato z [20], upraveno.

Parametr, který má významný vliv na velikost fokusovaného spotu se nazývá faktor apodizace (APO) a je závislý na poměru ořezání T vstupního svazku. Pod pojmem poměr ořezání se rozumí poměr průměru vstupního svazku d_L a průměru vstupní pupily d_{EP} , tj. $T = d_L/d_{EP}$. Závislost APO faktoru na poměru ořezání vstupního svazku je na obrázku 19.



Obrázek 19: Graf závislosti faktoru apodizace APO na poměru ořezání T vstupního svazku. Převzato z [20], upraveno.

3 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Neustále se měnící požadavky na přesnost při obrábění jsou nevyhnutelné pro další technologický pokrok. Při obrábění laserovým svazkem se laser fokusuje pomocí určitého optického systému, přičemž velikost a tvar fokusovaného spotu je ovlivněn optickými aberacemi a vlastním difrakčním limitem.

Kvůli celkové přesnosti při polohování působitě laseru na obrobku je často mezi požadavky na takový systém například velké obrazové pole, aby se redukovali nepřesnosti plynoucí z mechanických chyb při posouvání obrobku a korekce zkreslení. Při použití laseru s velkou spektrální šířkou je taky nutné korigovat chromatické aberace, zejména příčnou barevnou vadu.

Cílem téhle práce je navrhnout f-theta objektiv podle specifikací společnosti Meopta – optika s.r.o a provedení toleranční analýzy v prostředí softwarového programu Zemax Optics Studio.

Základní požadavky na systém jsou difrakčně limitovaná kvalita obrazu, korekce zkreslení v celém poli se zaměřením na telecentrickou stavbu a velikost pole alespoň (60x60) mm. Dané specifikace a požadavky jsou podrobněji uvedeny v části 5.

Při návrhu by se měla využít jak lokální minimalizace meritní funkce, tak přístup globální optimalizace. Toleranční analýza by měla být provedena pomocí dvou přístupů, a to citlivostní analýzy a metody Monte Carlo. Hodnoty tolerancí by měli být vybrány s ohledem na výrobní možnosti společnosti Meopta – optika s.r.o.

4 PROCES OPTICKÉHO NÁVRHU

Z historického hlediska byli jako první vyvinuty zobrazovací systémy jako jednoduchý teleskop a mikroskop, kterých optický návrh plynul z paraxiální zobrazovací rovnice pro čočku publikované Keplerem v 16. století. Obraz vytvořený těmito systémy ale nedosahoval požadovanou kvalitu a mimo jiné byla značně omezená taky velikost obrazového pole. To vedlo ke zvýšenému zájmu o detailnější analýzu vlastností průchodu světelných paprsků optickým systémem. Velký krok ve vývoji zaznamenal Ludwig von Seidel se svou teorií o aberacích třetího řádu, která se stala jedním ze základů pro návrh systémů s vysokou kvalitou zobrazení.

Trasováním konečného počtu paprsků (ray-tracing) a odvozením teorií pro aberace vyšších řádů bylo možné eliminovat aberace, které vznikají při osvětlení pod velkými úhly. Proces optického návrhu pak po dlouhou dobu představoval časově náročné manuální výpočty.

Pravděpodobně zatím největší skok ve vývoji optiky však přinesl programovatelný počítač. Trasování paprsků je nyní možné provést ve zlomcích sekund a s tím je spojena možnost numerické optimalizace. Za předpokladu počátečního návrhu je možné systém zkorigovat do určitého bodu s optimálními vlastnostmi.

Standardně se rozlišuje mezi lokální a globální optimalizací. Lokální optimalizace je rychlá a poměrně spolehlivá, ale neposkytuje zaručeně nejlepší možné řešení pro požadovaný systém. Z tohoto důvodu je často využívána globální optimalizace, která zkoumá průběh meritní funkce ve větším rozsahu [3].

4.1 Meritní funkce

Meritní funkce představuje matematický model souboru faktorů kvality, které jsou důležité u požadovaného optického systému. Tyto faktory jsou řízené operandy s určitou vahou vloženými do meritní funkce, které kladou požadavek na cíl optimalizace (např. operand EFFL udává požadovanou hodnotu efektivní ohniskové vzdálenosti optického systému). Meritní funkce může být založena na geometrické (paprskové) optice, difrakční optice nebo jejich kombinací.

Při přístupu paprskové optiky se trasují svazky konečného počtu paprsků ze souboru zvolených bodů objektu a hledají se jejich průsečíky s obrazovou rovinou, přičemž je příčná aberace každého paprsku použita při vyhodnocení kvality zobrazení navrhovaného optického systému. Analýza systému pomocí trasování paprsků je dostačující, pokud jsou aberace relativně větší než difrakční limit. V případě, že je od navrhovaného optického systému očekávána difrakčně limitovaná korekce aberací, je často potřebné v meritní funkci použít kritéria založená na difrakční optice. V programu Optic Studio (Zemax) je meritní funkce definovaná jako:

$$MF^2 = \frac{\sum W_i (V_i - T_i)^2}{\sum W_i} \quad (4.1)$$

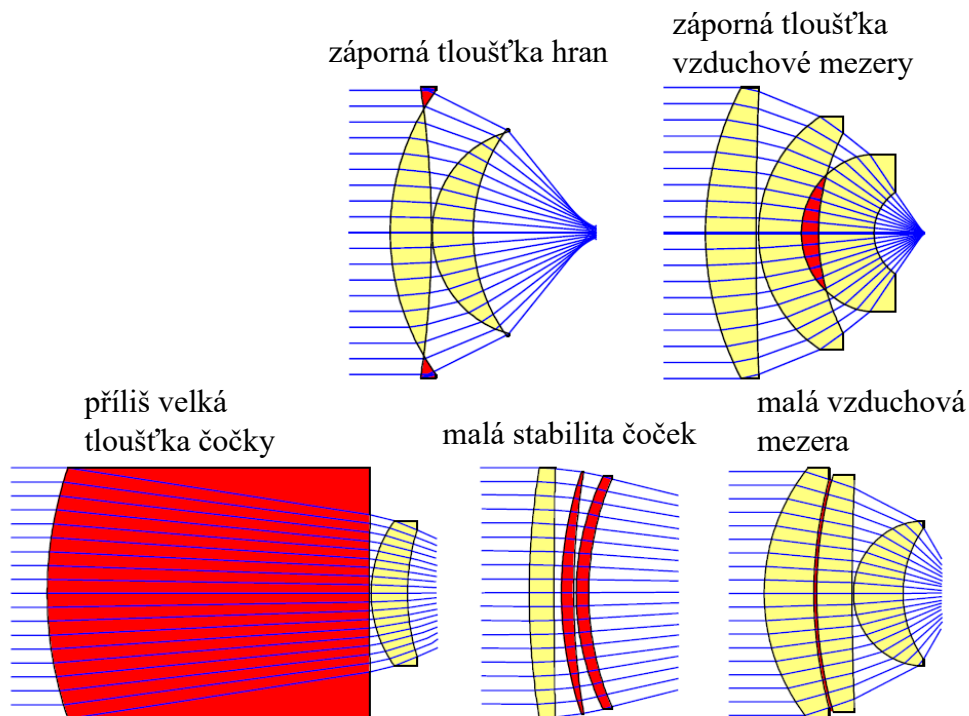
kde W je absolutní hodnota váhy operandu,
 V je současná hodnota dané vlastnosti nebo parametru,
 T je požadovaná hodnota,
a index i představuje číslo operandu.

Ze vztahu (4.1) vyplývají dvě podstatné věci. První je, že hodnota meritní funkce bude kvůli její druhé mocnině vždy kladná. Ta druhá je, že se optimalizací snažíme najít vždy minimum této funkce. Zemax nabízí několik možností přednastavené meritní funkce pro sekvenční návrh. Typ vybrané přednastavené meritní funkce je určen pomocí čtyř základních nastavení, které tvoří: způsob optimalizace, typ zpracovaných dat, referenční bod a integrační metoda [19].

4.2 Optimalizace optického systému

První fáze při navrhování optického systému je vytvoření počátečního návrhu a meritní funkce v souladu se specifikacemi. Při volbě počátečního návrhu existuje mnoho přístupů, přičemž se v praxi nejčastěji využívají již existující patenty, které se následně optimalizují s ohledem na požadované vlastnosti. Sofistikovanější možnost je výpočet systému tenkých čoček a jejich optických mohutností přes rovnice prvního řádu nebo přes podmínky korekce určitých aberací. Další možný přístup je například globální optimalizace vhodně zvoleného počtu planárních desek [4].

Optimalizace při nevhodné volbě omezení v meritní funkci návrhu často vede k tomu, že program vytvoří nerealizovatelné řešení, jako například optické systémy se zápornými centrálními tloušťkami vzduchových mezer (kolize optických prvků), zápornými tloušťkami hran, nebo jiné systémy s nevyrobitelnými tvary (viz obrázek 20). Nalézání takových řešení se dá efektivně omezit definováním meritní funkce s vhodnými operandy – zahrnutí okrajových podmínek.

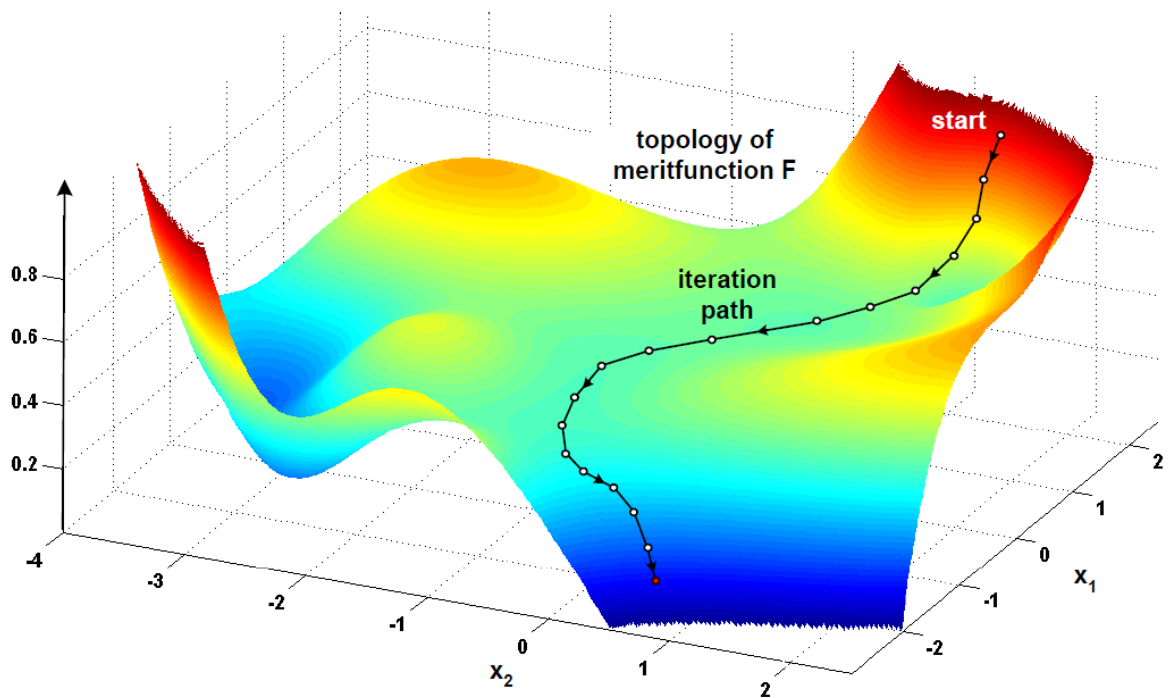


Obrázek 20: Příklady nepoužitelných řešení optimalizace při nedostatečných omezeních tvarů a rozměrů v meritní funkci. Převzato z [13], upraveno.

Po vytvoření počátečního návrhu a definování meritní funkce je potřebné určit parametry, které budou sloužit jako proměnné při optimalizaci. Tyto parametry standardně tvoří zakřivení lámavých ploch, koeficienty asfericity, vzájemných vzdáleností optických elementů a jejich tloušťky nebo typy skla (tj. indexy lomu jejich materiálů).

Optimalizace v Zemaxu používá lokální a globální typ optimalizace. Lokální optimalizace zahrnuje metodu nejmenších čtverců. Jako stupně volnosti lze použít zakřivení ploch a centrální tloušťky skla a vzduchu. Stupně volnosti materiálů je možno volit pouze jako spojité proměnné, bez reálné vazby na existenci / neexistenci takto „optimalizovaného“ skla. Lokální optimalizace je rychlá a poměrně spolehlivá, ale není schopna optický systém pozměnit natolik, aby bylo nalezeno globální minimum.

Omezení překonává globální optimalizace, která je v programu ZEMAX implementována dvěma algoritmy, metoda Hammer a metoda Global Search. Navíc tyto algoritmy pracují s pevně definovanými katalogovými hodnotami materiálu a umožňují efektivně tyto nespojitosti překonávat v postupném procesu hledání globálního minima [13,19].



Obrázek 21: Topologie meritní funkce s dvěma proměnnými (x_1, x_2) a iterační sestup optimalizací do lokálního minima. Převzato z [13].

Pokud po lokální optimalizaci systém stagnuje v lokálním minimu a jeho vlastnosti nesplňují zadané požadavky, je možné využít globální optimalizaci. Globální optimalizace provádí rozsáhlé hledání lokálních minim v prostoru proměnných – stupňů volnosti.

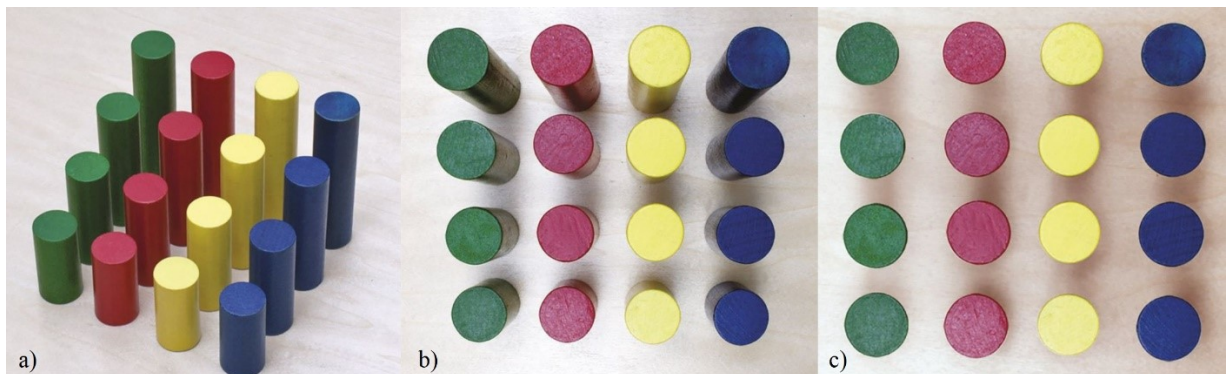
4.3 Specifické problémy při návrhu

4.3.1 Telecentricita

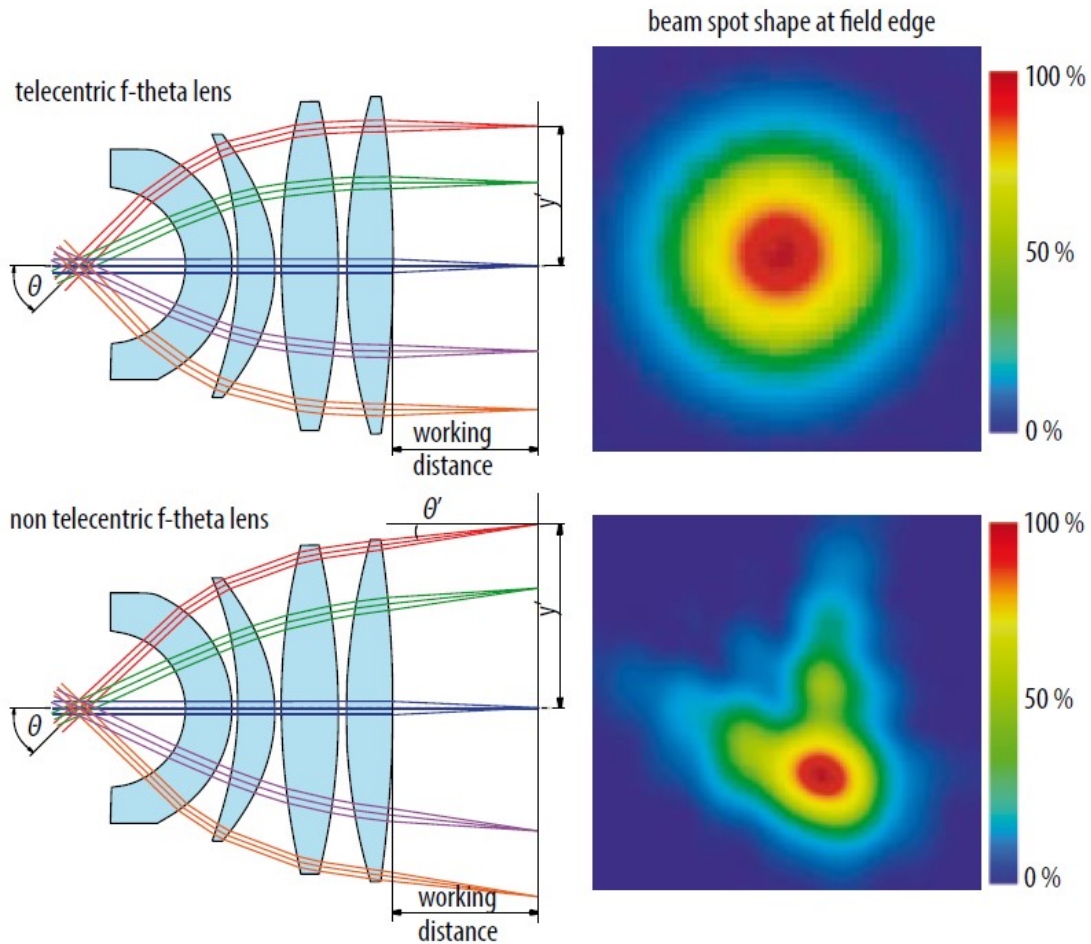
Telecentricita systému je definována tím, že má vstupní pupilu nebo výstupní pupilu umístěnou v nekonečnu. Pokud je v nekonečnu umístěná vstupní pupila, je systém telecentrický v předmětové rovině. Pokud je v nekonečnu výstupní pupila, je systém telecentrický v obrazové rovině. Existují také systémy s dvojitou telecentricitou, které mají v nekonečnu umístěnou jak vstupní, tak výstupní pupilu [5].

Další definice telecentricity je, že hlavní paprsek je v obrazovém nebo předmětovém prostoru paralelní s optickou osou. Pro paraxiální čočku platí, že se telecentrický systém vytvoří umístěním aperturní clony do ohniskové roviny. Telecentrické optické soustavy jsou charakteristické tím, že zobrazují s konstantním zvětšením nezávisle na vzdálenosti předmětu (viz obrázek 22). Je třeba poznamenat, že i když zvětšení zůstává konstantní, s měnící se předmětovou vzdáleností se obraz rozostřuje. Vlastnost konstantního zvětšení telecentrických systémů nachází široké uplatnění v metrologii, protože díky telecentricitě nedochází k chybám optického měření způsobenými mírnou defokusací [2,5].

Při laserovém mikroobrábění má telecentrický f-theta objektiv nespornou výhodu v přesnosti díky uniformnímu tvaru fokusovaného spotu na kraji a ve středu obrazového pole (viz obrázek 23) [16]. Nevýhodou telecentrických systémů je, že velikost obrazového pole musí přibližně odpovídat velikosti poslední čočky v systému. Požadavky velkého obrazového pole a telecentricity tak nevyhnutelně vedou k poněkud robustním optickým systémům.



Obrázek 22: Zobrazení různě vysokých válců se stejným průměrem. a) pohled z boku, b) pohled shora přes standardní objektiv, c) pohled shora přes telecentrický objektiv. Převzato z [23].

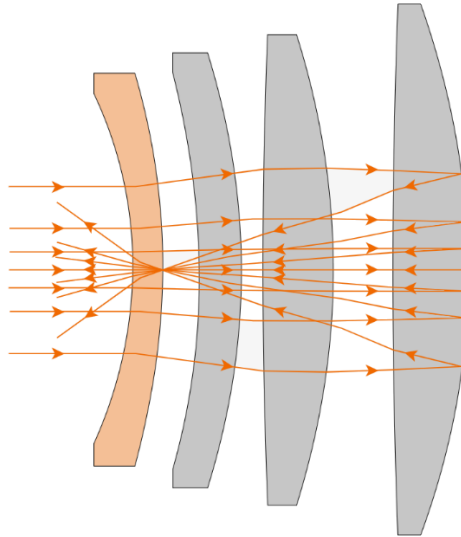


Obrázek 23: Porovnání energetického rozložení spotů v kraji obrazového pole pro netelecentrický a telecentrický f-theta objektiv. Převzato z [16].

4.3.2 Zpětné odrazy

Při průchodu světla do média s jiným indexem lomu je určitá část propuštěna a určitá část odražena. V případě optické soustavy jako objektiv je tento jev nežádoucí, a probíhá na každé lámavé ploše optických elementů. Pro potlačení zpětných odrazů se na povrchy čoček nanášejí antireflexní vrstvy, které redukuje odrazivost jednotlivých lámavých ploch pod 1 %.

V případě systémů určených pro vysokovýkonný laser může redukované odražené světlo představovat potenciální riziko. Pokud se svazek soustředí ve vzduchové mezeře nebo hluboko v materiálu čoček mezi povrchy jednotlivých elementů, potom nezpůsobí žádný problém. Pokud se zpětně odražené svazky soustředí na některém z předešlých povrchů, je možné, že se termálně poškodí antireflexní vrstva. Příklad takového zpětného odrazu je znázorněn na obrázku 24. Z tohoto důvodu je při návrhu objektivu vhodné simulovat zpětný odraz z každé lámavé plochy, a tak vyloučit možnost poškození vrstvy [17,20].



Obrázek 24: Příklad rizikového zpětného odrazu svazku paprsků. Převzato z [20].

4.4 Materiály

Vhodný výběr materiálu je esenciální součástí návrhu optického systému. Existuje mnoho typů skel s různými vlastnostmi, přičemž se při návrhu jako proměnná využívá index lomu. Index lomu je veličina závislá na vlnové délce použitého světla. Tato závislost se jinak nazývá disperze a v praxi se posuzuje většinou pomocí indexu lomu n_d pro spektrální čáru $\lambda = 587,6 \text{ nm}$ a Abbeho čísla. Podle použitého světla se musí hledět na transmisivní charakteristiku (propustnost) daného skla. Většina optických skel má dobrou propustnost ve viditelné oblasti spektra, ale při použití infračerveného, nebo UV světla může nastat nežádoucí situace, kdy dané sklo propouští jenom nízkou procentuálně část použitého světla.

Abbeho číslo

Jak už bylo naznačeno, Abbeho číslo představuje určitou aproximační míru disperze skla a všeobecně platí, že se zvyšující hodnotou klesá disperze. Abbeho číslo je definované jako:

$$V_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (4.2)$$

Kde n je index lomu a indexy d, F, C označují tři specifické spektrální čáry: $\lambda_d = 588 \text{ nm}$, $\lambda_F = 486 \text{ nm}$ a $\lambda_C = 656 \text{ nm}$

Kromě optických vlastností jako disperze, homogenita indexu lomu a transmisivní charakteristiky se u optických materiálů často musí brát do úvahy fyzikální vlastnosti jakými jsou hustota, maximální provozní teplota, nebo teplotní roztažnosti materiálů charakterizovaná koeficientem tepelní roztažnosti CTE.

Navrhovaný f-theta objektiv je podle zadání určen pro vlnovou délku v oblasti SWIR (Short-wave infrared), která je obecně klasifikována v oblasti vlnových délek $0,7 - 2,5 \mu\text{m}$. Z tohoto důvodu je nutné vybírat materiály s vysokou propustností v infračerveném spektru. Podle katalogu Edmund optics jsou nejpoužívanější materiály pro infračervené světlo uvedeny v tabulce 3.

Materiál	Index lomu (n_d)	Abbeho číslo (V_d)	Hustota (g/cm^3)	CTE ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	dn/dT ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	Tvrlost (Knopp)
Calcium Fluoride (CaF_2)	1,434	95,1	3,18	18,85	-10,6	158.3
Fused Silica (FS)	1,458	67,7	2,2	0,55	11,9	500
Germanium (Ge)	4,003	N/A	5,33	6,1	396	780
Magnesium Fluoride (MgF_2)	1,413	106,2	3,18	13,7	1,7	415
N-BK7	1,517	64,2	2,46	7,1	2,4	610
Potassium Bromide (KBr)	1,527	33,6	2,75	43	-40,8	7
Sapphire	1,768	72,2	3,97	5,3	13,1	2200
Silicon (Si)	3,422	N/A	2,33	2,55	160	1150
Sodium Chloride (NaCl)	1,491	42,9	2,17	44	-40,8	18.2
Zinc Selenide (ZnSe)	2,403	N/A	5,27	7,1	61	120
Zinc Sulfide (ZnS)	2,631	N/A	5,27	7,6	38,7	120

Tabulka 3: Standardní materiály používané v infračervené části spektra. Převzato z [28].

Vzhledem ke skutečnosti, že navrhovaný f-theta objektiv je určen pro obrábění laserovým svazkem, je potřebné uvažovat s vysokou provozní teplotou. Je tedy vhodné vybírat materiály s nízkým koeficientem tepelné roztažnosti CTE a nízkou změnou indexu lomu v závislosti na teplotě. Tyto požadavky z tabulky 3 splňují například materiály jako fused silica (tavený křemen), Sapphire (safír) nebo N-BK7. N-BK7 je nízkonákladové sklo, ale naneštěstí jeho transmisivní schopnost začíná klesat při vlnové délce 1800 nm. Safír je termálně odolný, jeho transmisivní schopnost je výborná v širokém rozsahu infračervené oblasti, ale kvůli extrémní tvrdosti je velice těžce obrobitelný a taky cenově nevýhodný.

Kvůli extrémně nízké hodnotě koeficientu termální expanze CTE, výborné transmisivní schopnosti do zhruba 2100 nm, nízké hustotě, a ne příliš vysoké tvrdosti se jako nejvhodnější jeví materiál fused silica. Protože je optický návrh určen pro úzkou spektrální šířku, je možné objektiv navrhnout pro monochromatické světlo, a tedy je možné použít pouze jeden materiál, kterým bude fused silica.

5 OPTICKÝ NÁVRH F-THETA OBJEKTIVU

5.1 Zadané parametry a požadavky

Parametr	Jednotky	Specifikace
Centrální vlnová délka	nm	2000
Trvání pulzu laseru	ps	1-2
Velikost obrazového pole	mm	80x80
Skenovací úhel	°	+/- 20,5
Efektivní ohnisková vzdálenost	mm	Určeno při návrhu
Průměr vstupní pupily	mm	10
Pozice vstupní pupily	mm	Určeno při návrhu
Velikost spotu	μm	<20
Zkreslení (podle polohy spotů)	μm	<1
Uniformita spotů	%	Nejlepší možné
Telecentricita	°	Nejlepší možné
Zklenutí pole	μm	Nejlepší možné
Pracovní vzdálenost	mm	Určeno při návrhu

Tabulka 4: Požadavky navrhovaného f-theta objektivu

První vzniklý problém souvisí se samotnou f-theta podmínkou. Pro dosažení efektivity mikroobrábění při použití galvano-motorických zrcadel je žádoucí, aby se zrcadla otáčely v jejich maximálním úhlovém rozpětí +/-20,5°.

Zadané obrazové pole o velikosti (80x80) mm je čtverec, který musí být vepsaný do kruhově symetrického pole kvůli osové symetričnosti navrhovaného optického systému. Polovina úhlopříčky tohoto čtvercového pole je přibližně 56,57 mm.

Tato hodnota bude při navrhování sloužit jako maximální výška obrazu. S využitím vztahu f-theta podmínky (2.1) je možné jednoduchým výpočtem určit, že ohnisková vzdálenost při výšce obrazu $h = 56,57$ mm a úhlu $\Theta = 20,5^\circ$ musí být ohnisková vzdálenost $f \approx 158,1$ mm.

S využitím vztahu (2.16), který využívá Zemax k určení průměru Airyho disku, je možné přibližně určit dosažitelný průměr spotu.

$$d_A = 2,44 \cdot \lambda \cdot f / \# = 2,44 \cdot \lambda \cdot \frac{f}{d_A} = \left(2,44 \cdot 2 \cdot \frac{158,11 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} \right) \mu\text{m} = 77,16 \mu\text{m}$$

Je tedy možné vidět, že zadaná specifikace velikosti spotu není fyzikálně splnitelná. Z praktického hlediska by další krok souvisel s konzultací se zákazníkem a nalezení kompromisu. Dosažení menšího spotu je realizovatelné několika způsoby, které vyplývají ze vztahu (2.16). První je zmenšení vlnové délky použitého laseru λ , což by nevyhnutně znamenalo podstatnou změnu celého optického návrhu, a hlavně

laserového zdroje. Pravděpodobně méně invazivním řešením by bylo zvětšení průměru vstupního svazku laseru nebo zmenšení obrazového pole, a tedy i ohniskové vzdálenosti f kvůli f -theta podmínce. Podle [27] jsou například v sérii GM-1000 dostupné galvano-motorické skenery pro laserové svazky o šířce 5-30 mm. Navrhovaný systém se bude držet původních specifikací s výjimkou velikosti spotu, kterého maximální průměr bude 80 μm .

5.2 Návrh a optimalizace f-theta objektivu

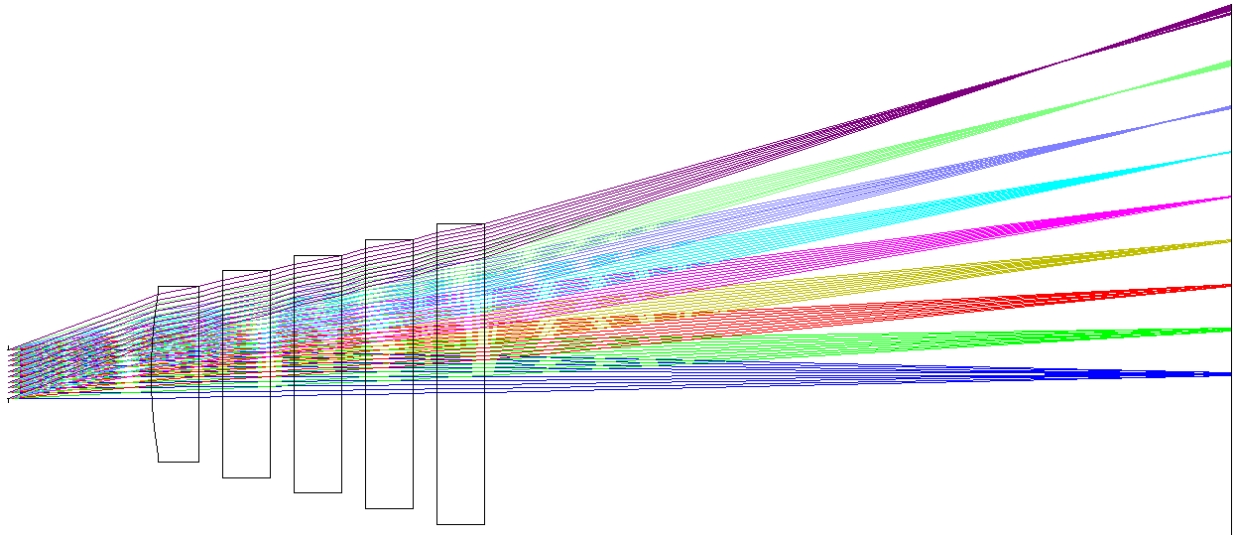
5.2.1 Počáteční návrh

Při optickém návrhu s využitím numerické optimalizace je důležité vytvořit počáteční návrh a meritní funkci, s kterými bude program dál pracovat. Při nevhodné volbě počátečních parametrů a následné optimalizaci není program schopen najít ideální řešení nebo častěji vytvoří řešení, které není fyzicky realizovatelné.

Při navrhování objektivu v sekvenčním módu je jeden z prvních kroků určení typu a velikosti apertury systému. Protože se v tomhle případě mezi předmětovou rovinou a aperturní clonou nevyskytuje žádná čočka, aperturní clona (aperture stop) je shodná se vstupní pupilou a jedná se o místo, kde se bude nacházet systém na odklon laserového svazku. Je potřebné počítat s vhodnou vzdáleností od prvního povrchu kvůli prostoru pro objímku a samotné mechanické struktuře systému odklonu. Zvolená vzdálenost vstupní pupily od prvního povrchu je 30 mm.

Po zvolení apertury je potřebné definovat předmětové nebo obrazové pole. Pole je možné definovat jako paraxiální výšku obrazu, reální výšku obrazu, výšku předmětu nebo jako úhel vzhledem k optické ose (osa Z). Protože se počítá s kolimovaným laserovým svazkem, je předmětová rovina umístěna v nekonečnu, a proto je pole definovatelné pouze výškou obrazu nebo úhlově. Kvůli specifikaci skenovacího úhlu $\pm 20,5^\circ$ je pole definováno úhlově pomocí 9 bodů s hodnotou maximálního pole $20,5^\circ$. Použitá vlnová délka je prozatím nastavena na konkrétní hodnotu 2000 nm. Šířka spektra je zanedbána, budeme realizovat tedy monochromatický návrh.

Po nastavení pole, vlnové délky a pozici a typu apertury je možné v editoru definovat počáteční optické elementy. Pro začátek bylo zvoleno pět planárních desek, z kterých se na prvním povrchu prvního elementu nastavil rádius na hodnotu 100 mm (viz obrázek 25). Tento povrch pomůže s počáteční fokusací a se zahájením trasování paprsků. Zvolený materiál pro všechny optické elementy je fused silica, tavený křemen.



	Surf>Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity
STO	Standard	Infinity	30.000		5.000
2	Standard	100.000 V	15.000	F_SILICA	16.744
3	Standard	Infinity V	10.000		19.335
4	Standard	Infinity V	10.000	F_SILICA	22.133
5	Standard	Infinity V	5.000		24.039
6	Standard	Infinity V	10.000	F_SILICA	25.438
7	Standard	Infinity V	5.000		27.345
8	Standard	Infinity V	10.000	F_SILICA	28.743
9	Standard	Infinity V	5.000		30.650
10	Standard	Infinity V	10.000	F_SILICA	32.049
11	Standard	Infinity V	160.000 V		33.956
IMA	Standard	Infinity	-		81.514

Obrázek 25: Počáteční návrh před optimalizací.

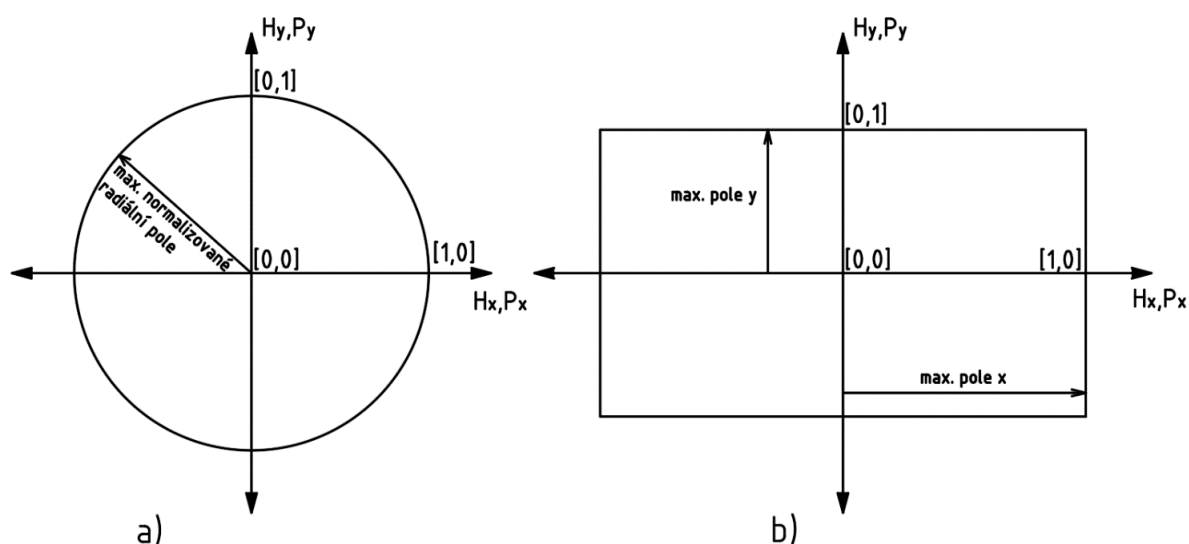
5.2.2 Vytvoření meritní funkce

Vlastnosti navrhovaného optického systému, které je potřebné dosáhnout optimalizací se určují v meritní funkci. Přednastavená meritní funkce je zvolena na výpočet RMS velikosti spotu s referencí k hlavnímu paprsku.

To vytvoří základní meritní funkci pomocí operandů TRAR v celém rozsahu definovaného pole. Operand TRAR určuje příčnou aberaci jednotlivých paprsků. Po dosažení difrakčního limitu je vhodné přednastavenou meritní funkci zvolit na výpočet chyby vlnoplochy místo velikosti spotu.

Přehled základních použitých operandů:

RANG – určuje úhel paprsku vzhledem k optické ose Z na zvoleném povrchu. Paprsek, ke kterému se operand vztahuje, je popsán normalizovanými souřadnicemi P_x, P_y v pupile a H_x, H_y v obrazovém poli. Normalizované souřadnice mohou být definovány v radiálním poli na jednotkové kružnici nebo v obdélníkovém poli na jednotkovém obdélníku (viz obrázek 26). Souřadnice se zadávají v intervalu $\langle -1; 1 \rangle$. Normalizované souřadnice se využívají, protože je často výhodné určit polohu v poli způsobem, který neovlivní reálné rozměry nebo definici pole.



Obrázek 26: Normalizované souřadnice v a) radiálním poli, b) obdélníkovém poli.

Pokud je například operandu RANG zadána velikost 0 rad a paprsek je popsán souřadnicemi ($P_x = 0, P_y = 0$, tedy hlavní paprsek, protože přechází středem aperturní clony) a ($H_x = 0, H_y = 1$) dosáhne se tak telecentricita systému v kraji obrazového pole. Aby byla telecentricita zaručená v celém obrazovém poli je vhodné kontrolovat určitý počet hlavních paprsků se souřadnicemi v obrazovém poli v intervalu ($H_x = 0, H_y = 0$ až 1).

DISC – operand určující zkreslení s ohledem na f-theta podmínku. Pokud je tedy jako cíl nastavena hodnota 0, optimalizace vnáší do systému zkreslení, které zabezpečuje f-theta podmínku. Tento operand bude zásadní pro vytvoření vhodné meritní funkce optimalizace f-theta objektivu.

EFFL – určuje efektivní ohniskovou vzdálenost. Tento operand bude použit pro kontrolu ohniskové vzdálenosti při optimalizaci.

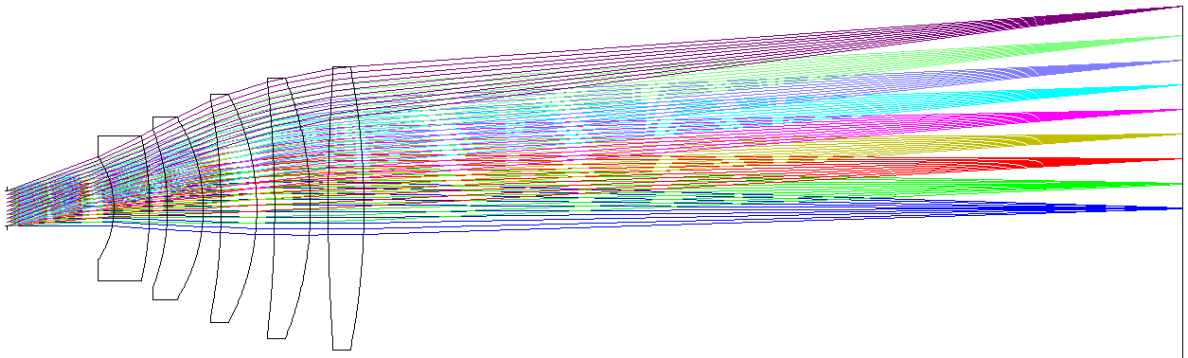
Okrajové podmínky:

MNCA, MNEA, MXCA – operandy, které vymezují minimální a maximální prostor vzduchu mezi jednotlivými optickými elementy. Těmito operandy je možné zabezpečit, že nedojde ke kolizi čoček nebo nepřiměřeně velkým vzájemným vzdálenostem.

MNCG, MNEG, MXCG – podobná funkce jak předešlé operandy, které ale platí pro sklo. Zabezpečují, že se optimalizací nevytvoří optické elementy se zápornými rozměry hran nebo tloušťkami a nepřiměřeně velkými tloušťkami.

5.2.3 Optimalizace návrhu

Po vytvoření počátečního návrhu (viz obrázek 25) a meritní funkce je možné provést první optimalizaci. Jako proměnné jsou prozatím ponechány jenom rádiusy křivosti jednotlivých ploch a vzdálenost obrazové roviny. Nastavením vzduchových mezer a tloušťek optických elementů jako proměnné by mohlo zapříčinit vznik nerealizovatelných tvarů i přes okrajové podmínky v meritní funkci. Výsledek první lokální optimalizace je zobrazen na obrázku 27. Je vidět značné zlepšení ve fokusaci v kraji obrazového pole, ale na první pohled je zřejmé, že systém není telecentrický.



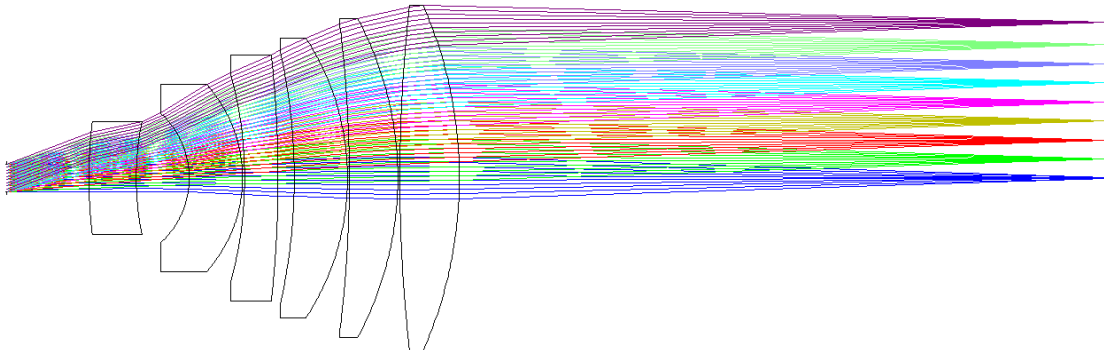
Surf	Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity
STO	Standard	Infinity	30.000		5.000
2	Standard	-25.817 V	10.000 V	F_SILICA	14.540
3	Standard	-89.351 V	5.000 V		20.154
4	Standard	-61.933 V	10.000 V	F_SILICA	22.032
5	Standard	-48.160 V	5.000 V		25.499
6	Standard	-161.382 V	10.000 V	F_SILICA	29.950
7	Standard	-68.889 V	5.000 V		31.837
8	Standard	-311.031 V	10.000 V	F_SILICA	35.265
9	Standard	-98.473 V	5.000 V		36.526
10	Standard	545.397 V	10.000 V	F_SILICA	39.104
11	Standard	-208.033 V	229.154 V		39.627
IMA	Standard	Infinity	-		56.555

Obrázek 27: Výsledná struktura první optimalizace.

Po několika dalších cyklech iteračních úprav návrhu a optimalizací se podařilo dostat na difrakční limit objektivu, ale stále není dosáhnuta telecentricita, požadovaná uniformita spotů a ani požadované zkreslení. Byl proto přidán další optický element a spuštěna optimalizace.

Při postupném přibližování k difrakčnímu minimu je vhodné přenastavit implicitní meritní funkci z optimalizačních dat RMS velikosti spotu na data vlnoplochy. Po dalších úpravách meritní funkce a parametrů návrhu byl spuštěn další cyklus optimalizací a byl dosáhnut zatím nejlepší výsledek zobrazen na obrázku 28. Navržený

objektiv je kompaktní, difrakčně limitovaný se zkreslením potlačeným v celém poli vzhledem na f-theta podmínku, a je tedy vhodný pro další analýzu.



Surf	Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity
STO	Standard	Infinity	30.000		5.000
2	Standard	171.202	17.172	F_SILICA	16.515
3	Standard	102.874	19.245		20.514
4	Standard	-31.680	19.348	F_SILICA	23.499
5	Standard	-50.364	0.730		33.764
6	Standard	-144.680	12.126	F_SILICA	38.096
7	Standard	-414.678	5.893		44.450
8	Standard	-208.483	19.329	F_SILICA	46.302
9	Standard	-92.620	0.650		50.758
10	Standard	-447.254	17.617	F_SILICA	55.712
11	Standard	-121.727	0.726		57.753
12	Standard	553.204	21.608	F_SILICA	61.898
13	Standard	-155.225	234.752		62.475
IMA	Standard	Infinity	-		56.555

Obrázek 28: Průřez finálního monochromatického návrhu f-theta objektivu.

5.2.4 Analýza navrženého f-theta objektivu

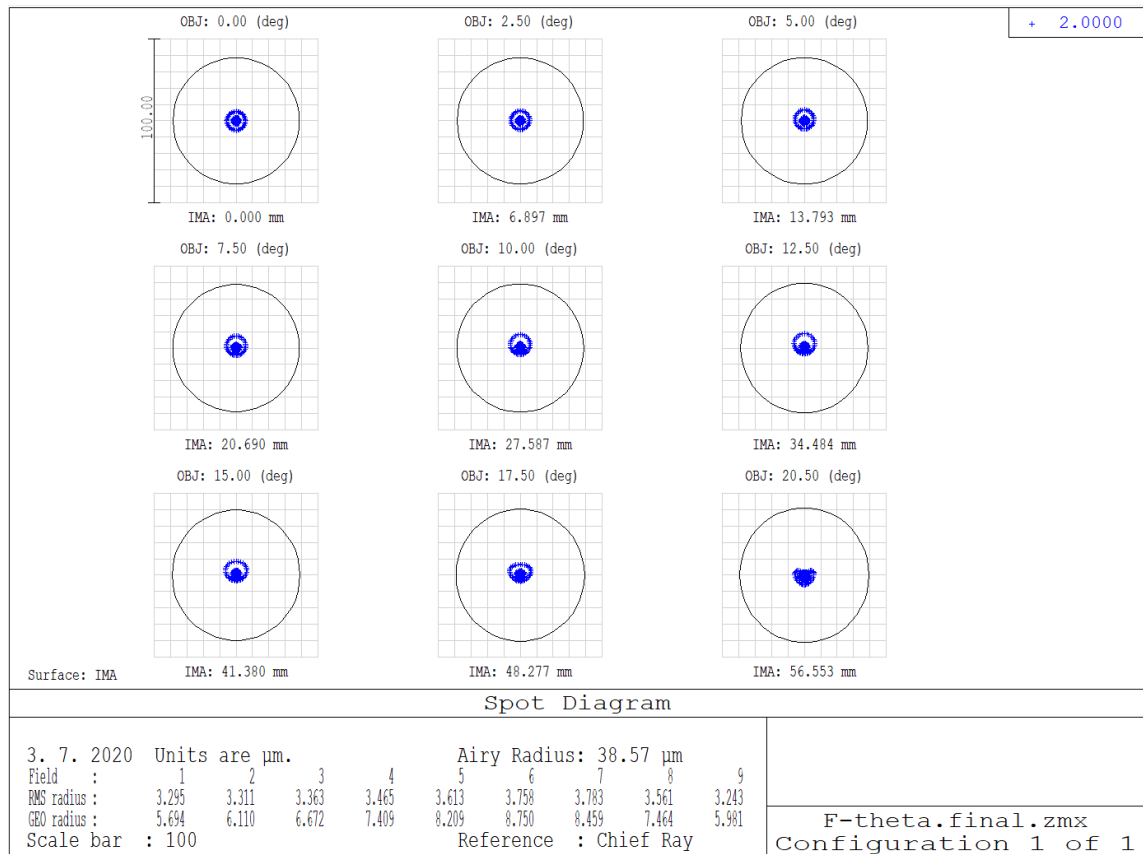
Na navržený systém jsou kladeny tři nejhlavnější požadavky: difrakčně limitovaná velikost spotů, korekce f-theta zkreslení v celém poli a telecentricita. Po analýze uvedených specifikací je vhodné zkontrolovat systém pro případné zpětné odrazy, které by se mohli zfokusovat na některém z povrchů.

Jednotlivé aberace se mohou během návrhu kontrolovat několika způsoby, a to zejména pomocí grafů Ray Fan, které zobrazují příčné aberace jako funkce pozice pupily, grafů OPD Fan zobrazujících vadu vlnoplochy v závislosti na pozici v pupile, nebo je například možné sledovat diagram Seidelových koeficientů. Je nutno dodat, že Zemax nabízí mnohem širší škálu možností kontroly aberací a jiných charakteristik, než je nutné uvádět v téhle práci.

Velikost spotů

Při navrhování zobrazovacího optického systému je praktické kontrolovat velikost fokusovaných spotů pomocí diagramu na obrázku 29. Diagram ukazuje soubory bodů jako průsečíků trasovaných paprsků s obrazovou rovinou pro jednotlivé polní body.

Kvůli aberacím mají body různou vzdálenost od referenčního bodu, přičemž v tomto případě je jako referenční bod nastaven průsečík hlavního paprsku s obrazovou rovinou.



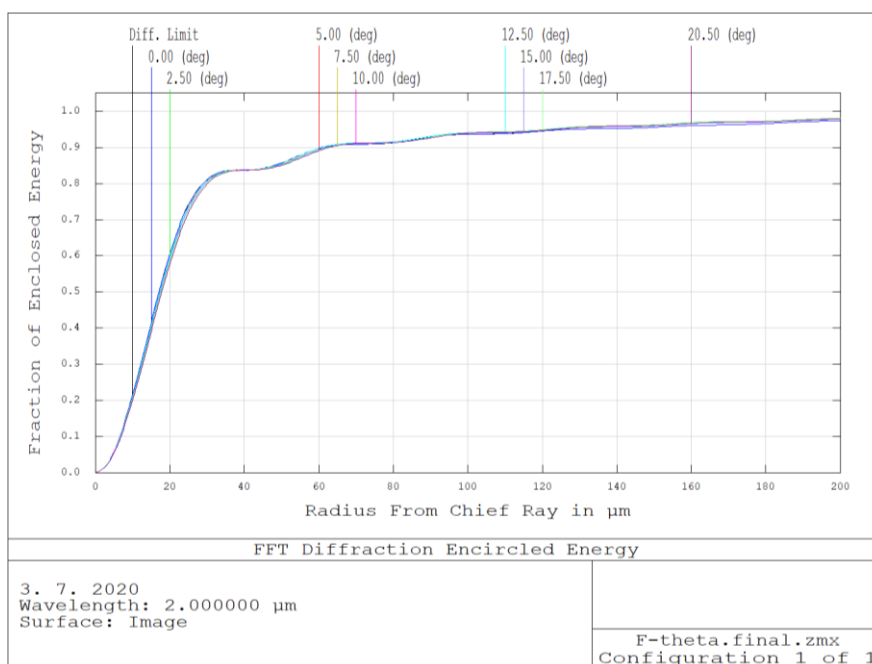
Obrázek 29: Diagram spotů v obrazové rovině navrženého f-theta objektivu.

Nejpoužívanější způsoby pro vyhodnocení velikosti spotů jsou GEO rádius, RMS rádius a PSF (Point Spread Function). GEO a RMS rádius jsou metody geometrické optiky, přičemž GEO rádius se určuje jako vzdálenost nejodlehlejšího bodu od referenčního bodu a RMS rádius je vyhodnocován jako kvadratický průměr vzdáleností bodů přetnutí obrazové roviny od referenčního bodu všech trasovaných paprsků.

Vyhodnocování velikosti spotu pomocí paprskové metody je praktické zejména v počáteční fázi návrhu, ale ztrácí svou užitečnost, pokud je systém difrakčně limitován, protože nepočítají s difrakcí světla na aperturní cloně.

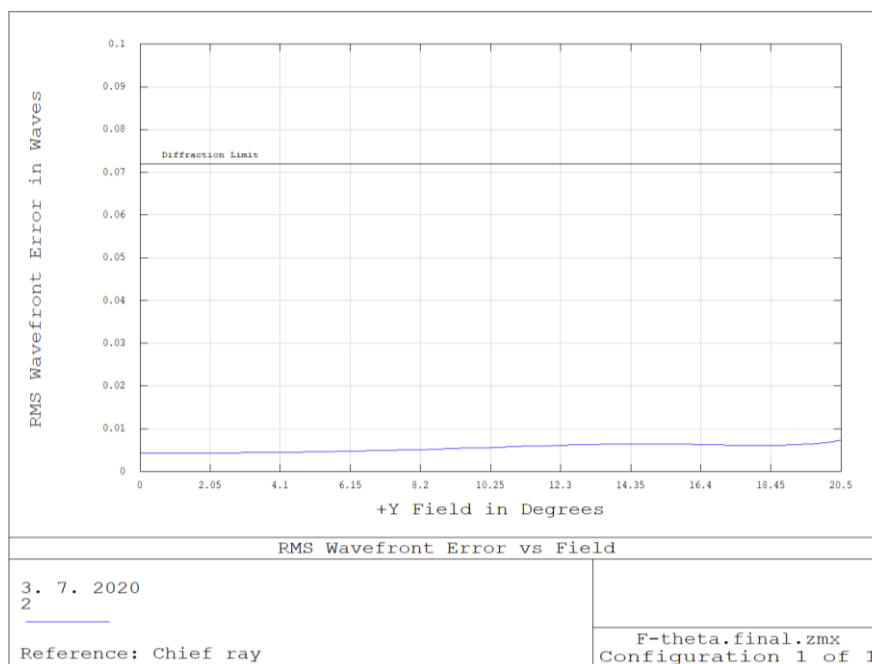
Vyhodnocení velikosti spotu pomocí metody PSF neboli Point Spread Function je založeno na vlnové optice, a tedy počítá s difrakcí světla. Jelikož je z obrázku 29 patrné, že se trasované paprsky fokusují hluboko pod difrakční limit je možné předpokládat, že reálné spoty budou uniformní a jejich velikost bude přibližně odpovídat průměru Airyho disku. Tomu odpovídá graf na obrázku 30, který ukazuje procentuální množství energie v závislosti na vzdálenosti od referenčního bodu, který představuje střed daného spotu.

Při poloměru 40 μm od referenčního bodu (v tomhle případě bod přetnutí obrazové roviny hlavním paprskem) je v kruhu obsaženo přibližně 83% energie co odpovídá energii obsažené v Airyho disku.



Obrázek 30: Graf závislosti množství obklopené energie na vzdálenosti od referenčního bodu, představujícího střed spotu

Vzhledem ke skutečnosti, že jde o difrakčně limitovaný systém, je vhodné kontrolovat RMS chybu vlnoplochy přes celé pole, která přímo souvisí s velikostí spotů. Podle očekávání však křivka RMS chyby vlnoplochy v poli ani zdaleka nepřesahuje difrakční limit (viz obrázek 31). Z uvedených typů analýz je možné usoudit, že jsou spoty téměř dokonalé.



Obrázek 31: RMS chyba vlnoplochy přes celé pole

Telecentricita

Standardně se chyba telecentricity vyhodnocuje jako úhel určitého počtu hlavních paprsků s optickou osou v předmětovém nebo jako v tomto případě obrazovém prostoru. Ekvivalentně je možné kontrolovat odchylku od pravého úhlu hlavních paprsků s obrazovou rovinou.

Při návrhu této práce je telecentricita vyhodnocována pro 11 hlavních paprsků. Všechny hlavní paprsky mají počátek ve vstupní pupile s normalizovanými souřadnicemi $(P_x, P_y) = (0,0)$ a jejich body přetnutí obrazového pole jsou rovnoměrně rozloženy na ose y podle normalizovaných souřadnic $(H_x, H_y) = (0,0)$ až $(0,1)$.

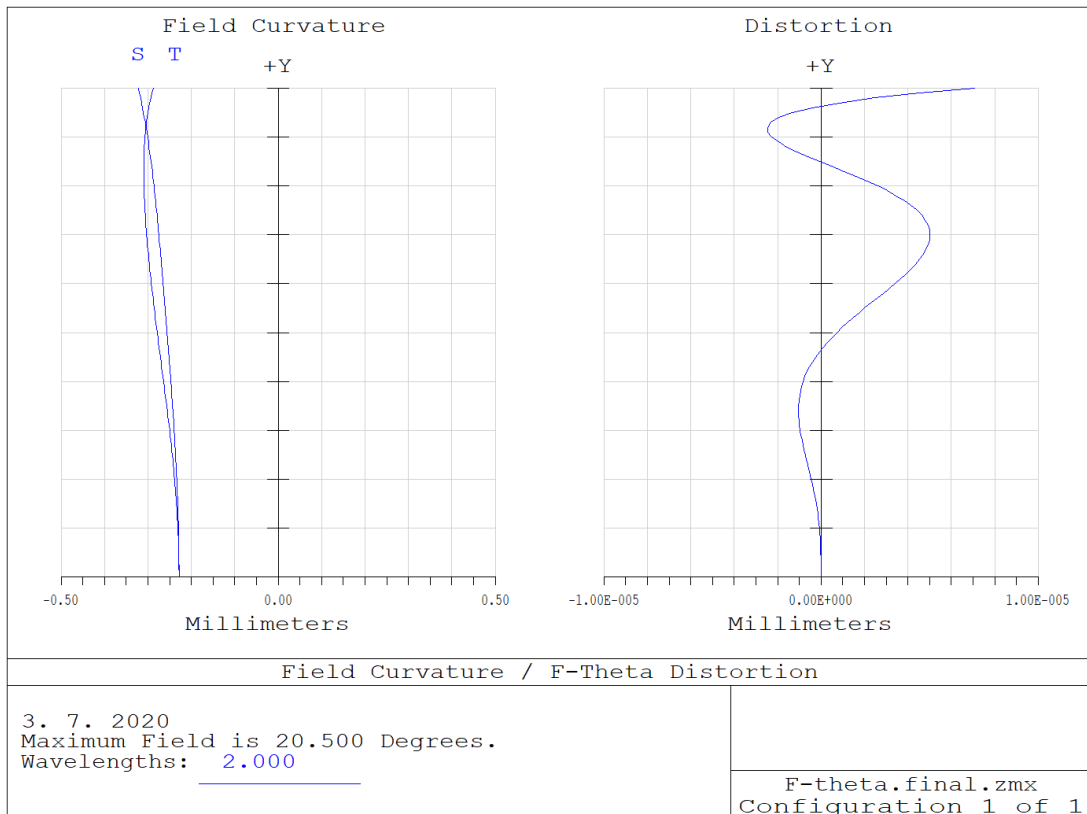
Hl.paprsek	H_y	Chyba telecentricity (rad)	Chyba telecentricity ($^\circ$)
1	0	0	0
2	0,1	$9,053 \cdot 10^{-4}$	0,052
3	0,2	$1,792 \cdot 10^{-3}$	0,103
4	0,3	$2,643 \cdot 10^{-3}$	0,151
5	0,4	$3,438 \cdot 10^{-3}$	0,197
6	0,5	$4,157 \cdot 10^{-3}$	0,238
7	0,6	$4,779 \cdot 10^{-3}$	0,274
8	0,7	$5,279 \cdot 10^{-3}$	0,303
9	0,8	$5,632 \cdot 10^{-3}$	0,323
10	0,9	$5,804 \cdot 10^{-3}$	0,333
11	1	$5,760 \cdot 10^{-3}$	0,330

Tabulka 5: Chyba telecentricity navrženého objektivu pro 11 hlavních paprsků.

Z tabulky 5 je zřejmé, že chyba telecentricity nepřesahuje $0,5^\circ$ v celém obrazovém poli, takže se dá předpokládat, že je zabezpečena s dostatečnou přesností.

Zkreslení a zklenutí pole

Na obrázku 32 jsou zobrazeny grafy závislosti zklenutí pole a zkreslení na poloze v obrazovém poli. Zklenutí pole v tomto případě není podstatné, protože už bylo potvrzeno, že velikosti spotů jsou pod difrakčním limitem při vyhodnocení na rovinné obrazové rovině. Jeden z nejdůležitějších požadavků na systém je ale korekce zkreslení, které má zásadní vliv na přesnost polohování působíště laseru na obrobku. Podle specifikací by zkreslení nemělo přesahovat $1\ \mu\text{m}$, přičemž je z obrázku 32 zřetelné, že zkreslení je zkorigováno pod $0,01\ \mu\text{m}$, a specifikace je tedy splněna.



Obrázek 32: Zklenutí pole a zkreslení.

Zpětné odrazy

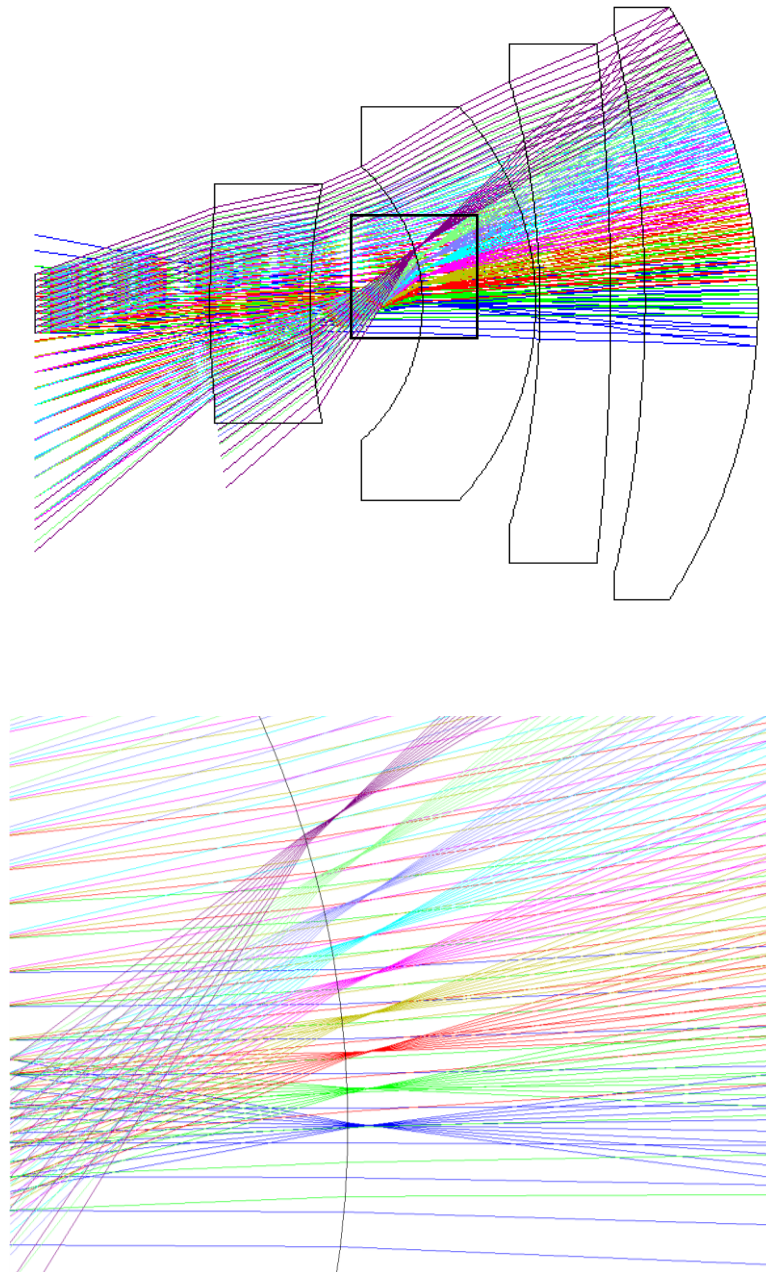
Pro analýzu zpětných odrazů má Zemax v nabídce funkci s názvem Ghost Focus Generator, který vygeneruje zpětné odrazy nastavením jednotlivých povrchů jako zrcadel. Tento typ analýzy je vhodný pouze pro rotačně symetrický optický systém se standardními povrchy, a proto je možné ho využít při návrhu téhle práce. Analýzy zpětných odrazů složitějších systémů je možné provést v nesekvenčním módu Zemaxu.

Výstupem analýzy Ghost Focus Generator je textový soubor, který ukazuje data z každého systému se zpětnými odrazy pro každý povrch. Tyhle data tvoří paraxiální výšku marginálního paprsku, $F/\#$ paraxiálního paprsku a RMS velikosti spotů na ose, přičemž nejkritičtější odrazy v systému jsou vyznačeny [19].

Před zpuštěním výpočtu je možné nastavit, jestli má být provedena analýza pro jeden odraz nebo pro dva odrazy. Analýza dvou odrazů protrasuje paprsky při všech

možných kombinací dvou povrchů, takže počet provedených trasování naroste exponenciálně. Nicméně jestli uvažujeme, že při jediném odrazu se odrazí přibližně 1 % energie, při kterém je možné porušení antireflexní vrstvy tak je nepravděpodobné, že při dvojitým odrazu, kdy se zpátky odrazí 1% z 1% (tj. 0,01%) původní světelné energie dojde k termálnímu poškození vrstvy i při difrakčně limitované fokusaci na některém povrchu.

Z tohoto důvodu byla simulace provedena pouze pro jeden odraz. Zemax vyhodnotil, že nejrizikovější zpětný odraz je z povrchu 9 na povrch 6. Tato simulace je zobrazená na obrázku 33, z kterého je zřejmé, že fokusace probíhá uvnitř materiálu a zpětné odrazy by neměly představovat zásadní problém.



Obrázek 33: Nejkritičtější simulace zpětného odrazu z povrchu 9

5.3 Toleranční analýza

Kvůli chybám při výrobě jednotlivých optických elementů je třeba určit tolerance, ve kterých se dané rozměry a vlastnosti použitých materiálů mohou pohybovat, aby systém splňoval požadované vlastnosti. Kromě odchylek při výrobě dochází taky k chybám při montáži, přičemž vždy dochází k chybě centrování, pozice a náklonu. Každý optický element v systému přispívá svými nedokonalostmi k zhoršení kvality zobrazení, ale některé elementy jsou mnohem náchylnější na chyby než jiné (při rozměrově stejné chybě mnohem více přispívají k zhoršení výsledné kvality systému).

Obecně platí, že jsou na chyby náchylnější prvky s větším zakřivením ploch (tj. kratšími poloměry křivosti) nebo prvky, přes které jsou trasovány paprsky pod velkými úhly. Systém obsahující větší množství takových elementů tak může mít při simulacích výborné vlastnosti, ale je velice obtížný na výrobu. Ve výrobním procesu je vhodná volba tolerancí velice důležitá z hlediska ceny. Posunutím třídy přesnosti příliš přísnými tolerancemi většinou znamená nárůst ceny za výrobu o 50 % [4].

Tolerance rozměrů jednotlivých optických elementů je vyhodnocován například prostřednictvím jednotek vzdálenosti, úhlů nebo přes počty Newtonových kroužků. Definice tolerancí pomocí počtu Newtonových kroužků popsanych v dalších částech téhle práce uvažují s měřicí metodou Newtonových kroužků s dvojím přechodem (double pass Newton's rings test) [19]. Detailnější informace o téhle metodě jsou v [6].

5.3.1 Definice jednotlivých použitých tolerancí

Tolerance rádiusu křivosti lámavých ploch

Tolerance zakřivení sférických lámavých ploch může být vyhodnocena přes rádius v jednotkách vzdálenosti nebo přes počet Newtonových kroužků („fringes“). Ve výrobním procesu je při leštění rádius sférické plochy často kontrolován interferometrem pomocí velice přesné referenční desky se sférickým povrchem s podobným rádiusem jako měřená plocha.

Přesnost poloměru křivosti takové desky se pohybuje v malých zlomcích vlnové délky laseru použitého při měření. Je taky možné použít referenční plan-desku ale aby se při měření počítalo s rozumným počtem Newtonových kroužků je nutné použít referenční desku s poloměrem podobným jako měřená plocha. Po umístění obráběného prvku na referenční desku je možné pomocí osvětlení se známou vlnovou délkou určit vzájemný rozdíl poloměrů křivosti přes počet vzniklých interferenčních kroužků (Newtonovy kroužky). Vztah mezi rádiusy ploch a počty Newtonových kroužků je dostatečně přesně aproximován podle [2]:

$$\Delta R \approx N\lambda \left(\frac{2R}{d}\right)^2 \quad (5.2)$$

kde ΔR je rozdíl rádiusů obráběného optického prvku a referenční desky,

N je počet Newtonových interferenčních kroužků,

λ je vlnová délka použitého testovacího laseru,

R je rádius zakřivení referenční desky,

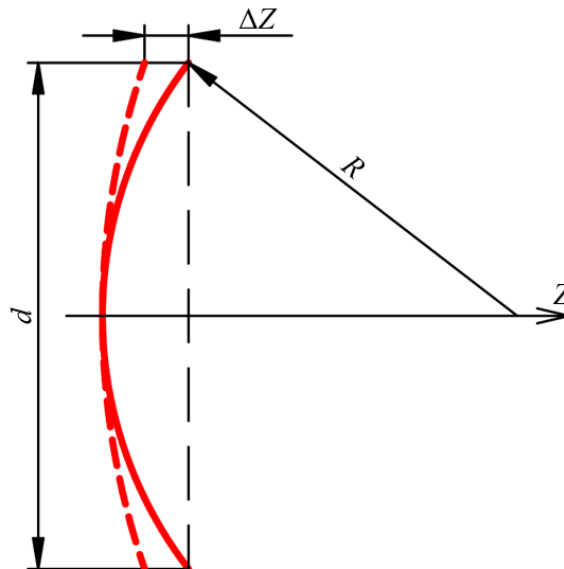
d je průměr, přes který je měření provedeno.

Popsané měření je ale vhodné převážně pro optické elementy s menším průměrem, protože plocha, přes kterou je měření možné provést, je často omezena. Nicméně vztah (5.2) mezi rádiusy a počty Newtonových kroužků je totožný při specifikování tolerancí rádiusu sférických povrchů. Rozdíl je v tom, že člen ΔR má při toleranční analýze význam rozsahu tolerančního pole pro rádius tolerovaného povrchu, R je nominální rádius tolerovaného povrchu a d je průměr tolerovaného povrchu optického elementu. Zbylé členy mají při toleranční analýze totožný význam, jaký je uveden pod vztahem (5.2).

Vztah (5.2) se dá přepsat na tvar:

$$\frac{1}{2} \lambda N \approx \frac{d^2 \Delta R}{8 R^2} \approx \Delta Z \quad (5.3)$$

kde ΔZ je rozdíl („sag“ neboli pokles) nominálního povrchu a povrchu s posunutým poloměrem křivosti. Význam členu je ΔZ je zřetelný z obrázku 34. Ze vztahu (5.3) je pak patrné, že jeden Newtonův kroužek znamená rozdíl ΔZ o jednu polovinu vlnové délky testovacího laseru.



Obrázek 34: Pokles ΔZ dvou sférických povrchů s určitým rozdílem křivosti.

I když je tolerance zakřivení často specifikována pomocí rádiusu v jednotkách vzdálenosti je mnohem častěji výhodnější toleranci specifikovat pomocí počtu Newtonových kroužků a je tomu tak i při návrhu téhle práce. Důvodem je fakt, že při větších poloměrech křivosti může vzniknout tolerance rádiusu v jednotkách vzdálenosti menší než jeden kroužek. V takovém případě by byla tolerance neměřitelná. Při rovinných plochách není možné specifikovat toleranci zakřivení v jednotkách vzdálenosti a musí být definována v jednotkách Newtonových kroužků [4].

Iregularita povrchu

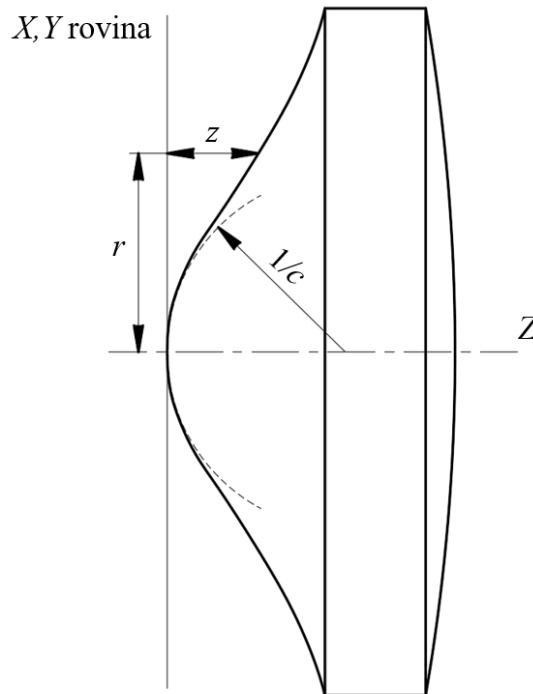
Při interferenčním měření sférického povrchu popsaným v předešlé části se v realitě stává, že Newtonovy kroužky nemají dokonalý kruhový tvar, ale jsou nějakým způsobem deformovány. Je to způsobeno faktem, že je nemožné vyrobit dokonalý sférický povrch. Tolerance rádiusu sférického povrchu nepočítá s tím, jak uniformní daný rádius je. Je

tedy důležité při návrhu uvažovat s potenciální iregularitou povrchů. Oproti jiným tolerancím je simulování iregularity sférického povrchu poněkud složitější, protože iregularita je podle definice náhodná, a ne deterministická jako je rozdíl rádiusů [19].

Zemax je schopen vymodelovat iregulární povrch několika způsoby, z kterých jsou všechny založeny na obecné rovnici pro asférický povrch, která je definována podle [3] jako:

$$z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{n=2}^{n_0} \alpha_{2n}r^{2n} \quad (5.4)$$

kde c je zakřivení asférického povrchu v paraxiálním prostoru, pro souřadnici r platí $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, z je poloha daného bodu povrchu ve směru osy Z (viz obrázek 35), k je kónická konstanta a α jsou asférické koeficienty povrchu.



Obrázek 35: Znázornění asférického povrchu.

První, pravděpodobně nejpoužívanější způsob tolerování iregularity, je založen na definici iregulárního povrchu jako sférického, rovinného nebo kónického povrchu s přidanými asférickými odchylkami ve smyslu aberací (sférická aberace, astigmatismus, koma) a chyby centrování a náklonu. Pro takhle definovaný iregulární povrch platí vztah podle [19]:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + Z_s\rho^4 + Z_a\rho'^2_y + Z_c\rho^2\rho'_y \quad (5.5)$$

kde Z_s, Z_a, Z_c jsou koeficienty představující množství sférické aberace, komy a astigmatismu v jednotkách vzdálenosti při maximální hodnotě apertury.

A pro ρ, ρ'_y platí:

$$\rho_x = \frac{x}{r_{max}}; \rho_y = \frac{y}{r_{max}}; \rho = \sqrt{\rho_x^2 + \rho_y^2}, \rho'_y = \rho_y \cos \theta - \rho_x \sin \theta$$

kde r_{max} vyjadřuje poloměr maximální apertury a θ je úhel čáry podle, které jsou orientovány astigmatismus a koma. ρ_x a ρ_y jsou normalizované souřadnice a ρ'_y je normalizovaná souřadnice pro souřadnicový systém nakloněný o úhel θ . Souřadnice x a y jsou vyjádřeny pro posunutý a nakloněný systém souřadnic o zadané hodnoty.

Podle zmíněné definice iregulárního povrchu je možné popsat první způsob tolerance iregularity pomocí operandu TIRR. Tenhle přístup je založen na předpokladu, že iregularitu tvoří z poloviny sférická aberace a z poloviny astigmatismus.

Pokud bychom uvažovali jenom s astigmatismem, model tolerance by byl poněkud přísný, protože astigmatismus se na rozdíl od sférické aberace nedá kompenzovat defokusací. Iregularita povrchu je podobně jako rádius vyhodnocena pomocí počtu Newtonových interferenčních kroužků podle vztahu [19]:

$$\Delta z = \frac{\lambda_t W}{4} (\rho^4 + \rho'^2_y) \quad (5.6)$$

kde Δz je rozdíl vzdálenosti mezi nominálním a reálním povrchem ve směru optické osy z
 λ_t vlnová délka testovacího laseru
 W je počet Newtonových kroužků
a kde ρ, ρ'_y jsou vysvětleny v předešlém vztahu.

Deformace vlnoplochy, způsobena iregularitou povrchu Δz a rozdílem indexů lomu prostředí mezi kterými se iregulární povrch nachází ($n_2 - n_1$) je pak vyjádřena ve směru osy Z jako rozdíl optických drah mezi reálnou a deformovanou vlnoplochou:

$$OPD = \Delta z(n_2 - n_1) \quad (5.7)$$

Další způsoby modelování iregulárního povrchu pro toleranční analýzu mají název Zernike Fringe Sag pomocí operandu TEXI a Zernike Standard Sag pomocí operandu TEZI. Oba jsou založeny na následujícím vztahu popisujícím asférický povrch podle [19]:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^N \alpha_i r^{2i} + \sum_{i=1}^N A_i Z_i(\rho, \varphi) \quad (5.8)$$

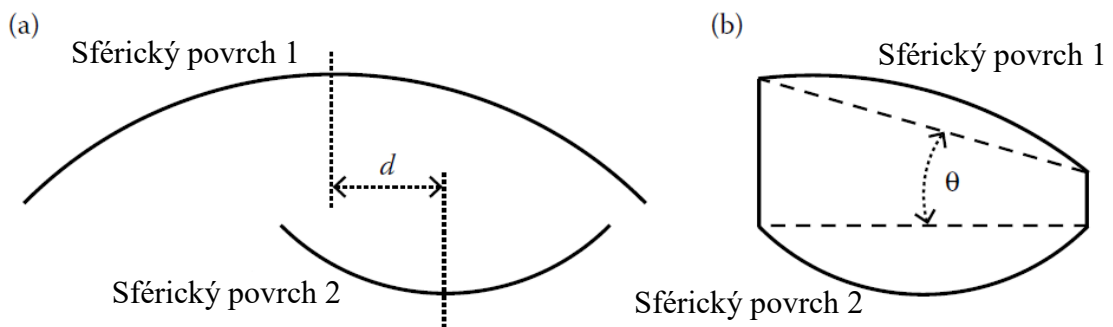
kde N je počet Zernikových koeficientů, A_i je koeficient i -tého Zernikového polynomu. Zernikovy polynomy byly podrobněji probrány v části 2.3.5.

Obecně výhodnější je použít operand TEZI, protože standardní Zernikovy polynomy mají v Zemaxu definovány mnohonásobně více členů, a protože operand TEXI pouze hrubě aproximuje minimální a maximální toleranci jako velikost „zero-to-peak“ chyby povrchu. TEZI definuje maximální tolerance jako přesnou hodnotu RMS chyby povrchu [19].

Chyby centrování a náklonu (klínu)

U optických prvků se sférickými povrchy jsou chyba centrování a náklonu lámavých ploch identické, jak je ukázáno na obrázku 36. Dva povrchy jsou proti sobě decentrovány o hodnotu d (viz obrázek 36 a)), přičemž po ořezání krajů je možné vidět, že mezi dvěma povrchy je nyní určitý úhel Θ náklonu neboli klín (viz obrázek 36 b)) [4].

Protože systém, kterým se zabývá tahle práce, obsahuje pouze sférické povrchy, je potřebné v toleranční analýze povrchů zahrnout pouze jednu z těchto chyb. Je však nutné poznamenat, že toto tvrzení platí jenom mezi dvěma plochami stejného prvku a jde tedy o chybu obrábění. Při tolerování jednotlivých čoček jako celků při montáži je potřebné uvažovat jak s chybou centrování, tak s chybou náklonu.

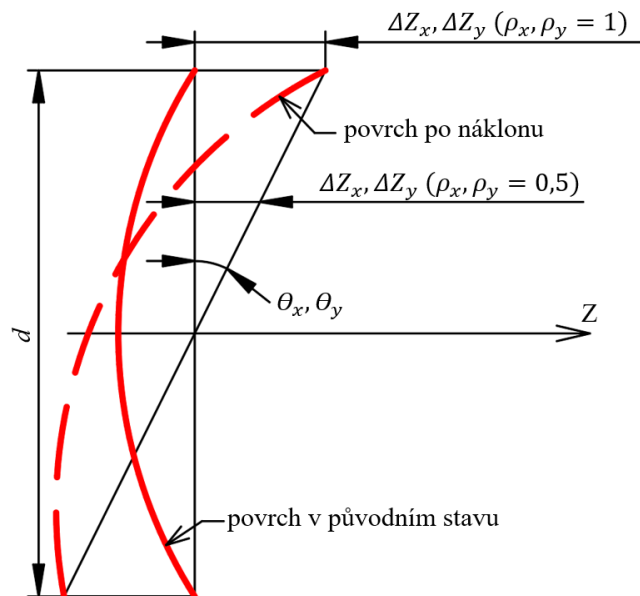


Obrázek 36: Chyba centrování a chyba náklonu mezi dvěma sférickými povrchy jsou identické. Převzato z [4], upraveno.

Náklon individuálního sférického povrchu kolem osy x a y se standardně v Zemaxu definuje přímo pomocí stupňů nebo v případě toleranční analýzy téhle práce v jednotkách vzdálenosti pomocí operandů TIRX a TIRY při kterých platí [19]:

$$\Delta Z_x = \frac{TIRX}{2} \rho_x; \Delta Z_y = \frac{TIRY}{2} \rho_y \quad (5.9)$$

kde TIRX, TIRY jsou hodnoty tolerancí v jednotkách vzdálenosti, přičemž zadaná maximální a minimální hodnota jsou definovány na hranici apertury povrchu, ρ_x, ρ_y jsou normalizované souřadnice ($\rho_x, \rho_y = 1$ na hranici apertury povrchu), $\Delta Z_x, \Delta Z_y$ jsou hodnoty rozdílu vzdálenosti, kterých význam je naznačen na obrázku 37.



Obrázek 37: Definice tolerance náklonu individuálního povrchu operandy TIRX a TIRY. Jde o toleranci obrábění. Poloměr křivosti plochy se po náklonu nemění.

Tolerance náklonu přes vzdálenost je výhodnější, protože na rozdíl od náklonu povrchu ve stupních je měřitelná přímo. Pokud je ale potřebné znát náклон povrchu jako úhel s optickou osou je možné úhel vyjádřit pomocí vztahů vyplívajících z obrázku 37:

$$\theta_x = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta Z_x}{d/2} \right); \theta_y = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta Z_y}{d/2} \right) \quad (5.10)$$

Tolerance chyb centrování a náklonu jednotlivých optických elementů nebo skupiny elementů jako celků jsou při osově symetrickém systému implicitně definovány pomocí operandů TETX, TETY v jednotkách stupňů pro náклон a TEDX, TEDY v jednotkách vzdálenosti pro chybu centrování. Rotace elementu při toleranci náklonu je standardně definována kolem vrcholu křivosti prvního zadaného povrchu. Podle potřeby návrhu je možné pivotovat element nebo skupinu elementů kolem jiného bodu, přičemž při návrhu téhle práce je bod rotace ponechán na výchozím nastavení. Operandů TEDX a TEDY posunou daný element jako celek ve směru osy x a y.

5.3.2 Metody toleranční analýzy

Zemax může toleranční analýzu vyhodnotit třemi způsoby. První způsob se nazývá Sensitivity Tolerance Analysis, který ve zkratce zkoumá, jak moc jednotlivé tolerance ovlivňují systém. Další způsob je Inverse Tolerance Analysis, který pracuje podobně jako předešlý způsob, ale v opačném směru. V tomto případě Zemax sám vyhodnotí potřebné tolerance vzhledem na váhu vlivu změn rozměrů na optický systém. Poslední způsob má název Monte Carlo. Toleranční analýza Monte Carlo vytváří konečný počet simulací analyzovaného optického systému, přičemž náhodně volí rozměry a vlastnosti materiálů v rámci zvolených tolerancí. Jde o statistickou analýzu, což znamená, že čím více simulací je provedeno, tím je větší pravděpodobnost přesnějšího výsledku toleranční analýzy. Výstup může představovat nejlepší a nejhorší výsledek ze všech simulací. Důležité pro použití metody Monte Carlo je znalost statistické distribuce tolerovaných parametrů. V praxi je možno například sledováním velkého počtu reálně

vyrobených a změřených čoček určit statistiku vyráběných poloměrů křivostí či jejich středové tloušťky. Zemax nabízí tři možnosti předpokladů statistických distribucí: Gaussovskou, uniformní a parabolickou. Velké množství tolerančních chyb se řídí normální (Gaussovskou) distribucí, ve které je standardně větší pravděpodobnost, že se chyba vyskytne blíž nominální hodnotě. Při uniformní distribuci je pravděpodobnost výskytu chyby konstantní v celém tolerančním poli a při parabolické distribuce je větší pravděpodobnost výskytu chyby v krajních mezích tolerančního pole. Otázka stanovení konkrétních parametrů distribučních funkcí je nad rámec této práce. Obecně lze konstatovat, že Gaussovská distribuce je příliš optimistická, a parabolická distribuce je příliš pesimistická. Při návrhu, kdy neznáme distribuci tolerančních chyb, je tedy akceptovatelné předpokládat uniformní distribuci. Pro účely této práce je tedy předpokládáno uniformní rozdělení tolerančních chyb.

5.3.3 Průběh a výsledky toleranční analýzy

Obecně zaužívaný postup při toleranční analýze je začít s poměrně volnými tolerancemi, zhodnotit výsledek analýzy a pokud systém nespĺňuje požadované kritérium, je potřebné zpřísnit tolerance, které mají největší vliv na systém, tj. nejcitlivější tolerance. Pro rozpoznání nejcitlivějších tolerancí složí počáteční citlivostní analýza. Postup zjištění citlivých tolerancí a jejich zpřísnění se pak opakuje, až dokud systém nespĺňuje dané kritérium.

V tabulce 5 jsou uvedeny počáteční tolerance, které se budou následně upravovat. S tolerancemi materiálu se nepočítá, protože variace indexu lomu ve fused silice se nevyskytuje, odpovídá své nominální hodnotě.

Výrobní tolerance	Operand	Hodnota
Rádus	TFRN	± 5 fringes
Centrální tloušťka (sklo)	TTHI	$\pm 0,05$ mm
Náklon (klín)	TIRX, TIRY	$\pm 0,03$ mm
Iregularita (S+A)	TIRR	± 1 fringe
Montážní tolerance	Operand	Hodnota
Centrální tloušťka (vzduch)	TTHI	$\pm 0,03$ mm
Chyba centrování	TEDX, TEDI	$\pm 0,05$ mm
Náklon elementu	TETX, TETY	$\pm 0,2^\circ$

Tabulka 5: Počáteční tolerance

Volba kompenzátoru

Hlavní efekt, který mají chyby výroby na optický systém, je defokusace tj. určité posunutí obrazové roviny. Posunutí musí být kompenzováno například změnou vzájemné vzdálenosti dvou optických elementů.

Ve většině případů je ale z praktického hlediska jako kompenzátor zvolena právě poloha obrazové roviny. V našem případě je nastavena kompenzace posunutím obrazové roviny v intervalu ± 2 mm.

Volba kritéria

Protože jde o difrakčně limitovaný systém, je nejvhodnější jako kritérium pro hodnocení zhoršení kvality systému použít RMS chybu vlnoplochy.

Průběh toleranční analýzy

Po první toleranční analýze s tolerancemi uvedenými v Tab. 5 jsou zjištěny nejcitlivější tolerance z citlivostní analýzy. Průměrná hodnota RMS chyby vlnoplochy 100 Monte Carlo simulací však nepřesáhla hodnotu $0,05 \lambda_t$ ($\lambda_t = 543 \text{ nm}$), a tedy systém zůstává difrakčně limitován i s volnějším tolerancemi.

Podle analýzy Monte Carlo se však ze zadanými tolerancemi ani zdaleka nedosahuje požadované zkreslení. Hodnota zkreslení pod $1 \mu\text{m}$ podle specifikací by byla dosažitelná jedinečně přes extrémně přísné tolerance. Vzhledem na fakt, že se v specifikacích změnil průměr spotu z $20 \mu\text{m}$ na $80 \mu\text{m}$ je vhodnější zmírnit požadavek zkreslení. Vhodnou hranici zkreslení je možné určit například jako relativní chybu polohy $80 \mu\text{m}$ spotu 10% , tj. maximální hodnota zkreslení by neměla přesáhnout $8 \mu\text{m}$. Další zpřísnování tolerancí se bude týkat právě zkreslení. Protože v programu Zemax není možnost vyhodnocovat zkreslení jako jednoduchého tolerančního kritéria, je potřebné určit způsob, kterým by ho bylo možné kontrolovat. Jedna možnost je jako toleranční kritérium určit meritní funkci, která by se následně určitým způsobem nastavila právě na hodnotu zkreslení konkrétní optické soustavy.

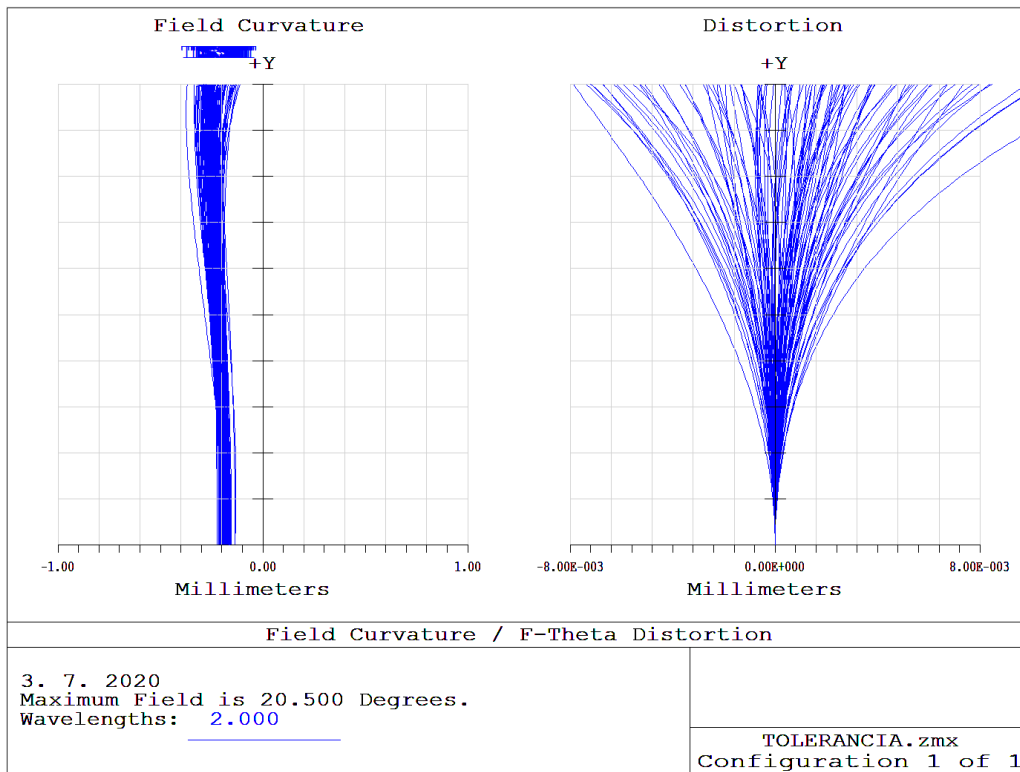
Další efektivní způsob vyhodnocení spočívá ve sledování grafu, na kterém se vykreslí všechny Monte Carlo simulace. Pokud většina křivek (typicky nad 90%) a jejich odpovídajících hodnot zkreslení nepřesáhne hodnotu alespoň $8 \mu\text{m}$ v celém poli, dá se usoudit, že se zadanými tolerancemi systém splňuje požadovanou specifikaci.

Na obrázku 38 je zobrazen graf zklenutí pole a zkreslení pro 100 Monte Carlo simulací. Je zřejmé, že zklenutí pole se závažně nemění, a jenom 6 vygenerovaných optických systémů Monte Carlo simulací přesahuje hodnotu $8 \mu\text{m}$ zkreslení.

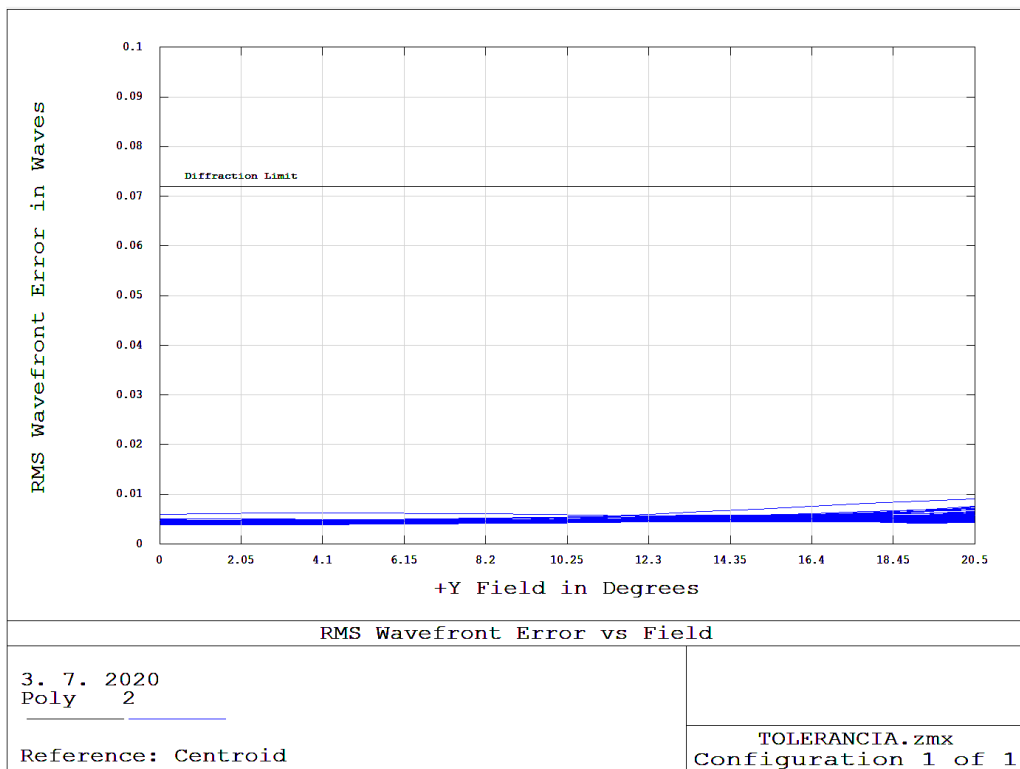
Obrázek 39 ukazuje, že chyba vlnoplochy zůstává hluboce pod difrakčním limitem. Je tedy možné předpokládat, že velikostí spotů zůstanou pod hodnotou $80 \mu\text{m}$. V tabulce 6 jsou uvedeny použité nejprísnejší hodnoty tolerancí po úpravě.

Výrobní tolerance	Operand	Hodnota
Rádus	TFRN	± 3 fringes
Centrální tloušťka (sklo)	TTHI	$\pm 0,03 \text{ mm}$
Náklon (klín)	TIRX, TIRY	$\pm 0,01 \text{ mm}$
Iregularita (S+A)	TIRR	$\pm 0,5$ fringe
Montážní tolerance	Operand	Hodnota
Centrální tloušťka (vzduch)	TTHI	$\pm 0,01 \text{ mm}$
Chyba centrování	TEDX, TEDI	$\pm 0,01 \text{ mm}$
Náklon elementu	TETX, TETI	$\pm 0,01^\circ$

Tabulka 6: Upravené nejprísnejší tolerance



Obrázek 38: Zklenutí pole a zkreslení pro 100 simulací Monte Carlo při tolerancích podle Tab. 6.



Obrázek 39: RMS chyba vlnplochy pro 100 simulací Monte Carlo při tolerancích podle Tab. 6.

ZÁVĚR

Diplomová práce popisuje vytvoření optického návrhu telecentrického f-theta objektivu pro precizní mikro-obrábění. V případě požadavků na navrhovaný f-theta objektiv téhle práce bylo zjištěno, že při zadané velikosti pole, maximálního náklonu svazku, vlnové délce světla a průměru vstupní pupily není možné kvůli splnění f-theta podmínky fyzikálně potlačit difrakční limit velikosti spotů pod 20 μm . Požadovaná velikost spotů byla proto posunuta na hodnotu difrakčního limitu 80 μm .

Návrh byl optimalizován pro monochromatické světlo s centrální vlnovou délkou 2000 nm se spektrální šířkou do hodnoty 1 nm. Vzhledem k reálně používaným laserovým zdrojům s laserovými impulzy > 10 ps je možno spektrální šířku laseru zanedbat, a uvažovat tedy monochromatický návrh. Díky tomuto monochromatickému světlu bylo možné použít pouze jediný materiál a tímto byl zvolen tavený křemen, Fused Silica. Vlastnosti tohoto materiálu jako vysoká transmisivní schopnost světla od UV až po vzdálené infračervené světlo a jedna z nejlepších termálních odolností jsou důvodem, proč byl vybrán jako základní materiál pro tento návrh.

Po globální optimalizaci počátečního návrhu a sérii úprav a lokálních i globálních optimalizací se podařilo potlačit RMS chybu vlnoplochy hluboko pod difrakční limit a zkreslení pod 0,01 μm .

Další krok spočíval v provedení toleranční analýzy, při které bylo zjištěno, že RMS chyba vlnoplochy, a tedy ani velikosti spotů prakticky nepřesáhnou difrakční limit ani při volnějším tolerancích. Problém nastal při zkreslení. Ve mnohých případech optických systémů určité zkreslení nepředstavuje problém, ale při objektivu pro mikro-obrábění, kde záleží na vysoké přesnosti pozicování působiště laseru představuje problém i menší hodnota zkreslení. Tolerance museli být tedy poměrně zásadně zpřísněny a zkreslení bylo u dominantní většiny simulací Monte Carlo potlačeno pod absolutní hodnotu 10 μm odchylky od zkreslení vyžadovaného pro f-theta podmínku. Tolerance však nepřekročily výrobní možnosti společnosti Meopta – optika, s.r.o.

Předkládaná diplomová práce jistě otevírá spoustu nových otázek, jako např. achromatická korekce optického návrhu při specifikaci nenulové šířky spektra laserového zdroje nebo uvažování dalších kompenzátorů, např. přepočítání vzduchových mezer či použití decentrování čoček, pro další optimalizaci kritického parametru zkreslení, který zásadně limituje hodnoty použitých tolerancí.

Mezi další cesty pro optimalizaci, a hlavně snížení výrobních tolerancí by mohlo patřit zvětšení počtu optických elementů nebo nalezení jiného globálního minima meritní funkce, při kterém by systém nebyl tak citlivý na změnu definovaných specifikací.

LITERATURA

- [1] BAHAA E. A. Saleh, TEICH, M. C.: *Fundamentals of Photonics*. New York: John Wiley & Sons, 1991. 947 p. ISBN 978-0-471-83965 -1.
- [2] BORN, M. and WOLF, E.: *Principles of optics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 952 p. ISBN 978-1-108-47743-7.
- [3] BRAAT, J. and TÖRÖK, P.: *Imaging Optics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. 973 p. ISBN 978-1-108-42808-8.
- [4] HAIYIN, S.: *Lens Design A PARTICAL GUIDE*. New York: CRC Press, 2017. 349 p. ISBN 978-1-4978-5051-6.
- [5] LAIKIN, M.: *Lens Design*. New York: CRC Press, 2007. 478 p. ISBN 0-8493-8278-5.
- [6] MALACARA, D.: *Optical Shop Testing*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007. 862 p. ISBN 978-0-471-48404-2.
- [7] SMITH W. J., : *Modern Optical Engineering*. New York: McGraw-Hill, 2000. 617p. ISBN 0-07-136360-2.
- [8] LAIKIN, M.: *Lens Design*. New York: CRC Press, 2007. 478 p. ISBN 0-8493-8278-5.
- [9] ARAKI, T., *et al.*: Development of F-Theta Lens for UV Lasers, Sei technical review, Number 69, October 2009. Dostupný na: <https://pdfs.semanticscholar.org/48e5/96790ba4d7725b84b4e33224ab2c66cf03f3.pdf>
- [10] ARAKI, T.: Development of F-Theta Lens for Printed Wiring Board Processing, Number 72, April 2011. Dostupný na: <https://global-sei.com/technology/tr/bn72/pdf/72-05.pdf>
- [11] Baldsiefen, T. *et al.* (2015). F-Theta at Jenoptik – a holistic approach, Laser in Manufacturing Conference, 2015. Dostupný na: https://www.wlt.de/lim/Proceedings2015/Stick/PDF/Contribution226_final.pdf
- [12] CHEN, G.: *Design of Large Working Area F-Theta Lens*. Dostupný na: <http://www.optics.arizona.edu/sites/optics.arizona.edu/files/msreport-gong-chen.pdf>
- [13] GROSS, H.: Optical system design, University of Jena, Dostupný na: <https://www.iap.uni-jena.de/Optical+System+Design.html>
- [14] HAOSHENG Hu: *Tutorial of Telecentric Lens*, College of Optical Sciences University of Arizona, December 6, 2016. Dostupný na: https://wp.optics.arizona.edu/optomech/wp-content/uploads/sites/53/2016/10/Tutorial_Hu_Haosheng.pdf

- [15] HARTMANN, P., *et al.*: Optical glass and glass ceramic historical aspects and recent developments: a Schott view. *Applied Optics*, January 2010, vol. 49, no. 16, p. 157-176. OCIS codes:110.0110, 120.0120.
- [16] OZGA, C.,:Unseen Possibilities of F-Theta Lenses. *Optik&Photonik*, 0/218, Dostupné na: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/opph.201800015>
- [17] TOESKO, G. DENHERT Ch.,: Femtosecond laser optics combat pulse dispersion, color errors, and reflections, 2016. Dostupný na: https://www.silloptics.de/fileadmin/user_upload/pdf/Downloads/LFW_Artikel_2016_Femtosecond_laser_optics.pdf
- [18] Yurevich, V. *et al.* . Optical design and performance of F-Theta lenses for high-power and high-precision applications. (2015). 10.1117/12.2190777.
- [19] Zemax User's Manual. 2011. www.zemax.com [online].
- [20] Z. SILL Optics. Dostupný na <https://www.silloptics.de/en/products/sill-technicon/laser-optics/f-theta-lenses>
- [21] Wolfram Web. Dostupný na <https://mathworld.wolfram.com/ZernikePolynomial.html>
- [22] LAKSHMINARAYANAN, V.; FLECK, Andre (2011). "Zernike polynomials: a guide". *J. Mod. Opt.* **58** (7). pp. 545–561. Dostupný na <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2011JMOp...58..545L/abstract>
- [23] KLEIN, C. *et al.*: Using Telecentric Optical Systems to Optimize Forensic Image Accuracy and Reproducibility, 2015,dostupné na: <https://www.leica-microsystems.com/science-lab/using-telecentric-optical-systems-to-optimize-forensic-image-accuracy-and-reproducibility/>
- [24] ANG, A.: Achromatic telecentric f-Theta scsn lens optical system with improved linearity. US Patent, Nov. 17. 1998. US005838481A.
- [25] SHIBUYA, M.:Lens Nikon. US Patent, Feb. 17. 1981. US4396254_f-θ
- [26] MARSHALL,G. F., STUTZ G. F.: *Handbook of Optical and Laser Scanning*. New York: CRC Press, 2012. 764 p. ISBN 978-1-4398-0879-5.
- [27] <https://www.canon-europe.com/business/industrial-products/optoelectronics/digital-galvano-scanners/>
- [28] <https://www.edmundoptics.com>
- [29] <https://www.thorlabs.com> , F-Theta Scan Lenses