

GYMNÁZIUM BRNO, KŘENOVÁ, P.O.,
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ANALÝZA LIMITŮ ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV
FOTOAPARÁTŮ DNEŠNÍCH SMARTPHONES

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST



GYMNÁZIUM BRNO, KŘENOVÁ, P.O.
GRAMMAR SCHOOL KŘENOVÁ

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

ANALÝZA LIMITŮ ZOBRAZOVACÍCH SOU-
STAV DNEŠNÍCH SMARTPHONES
ANALYSIS OF THE LIMITS COMTEMPORARY SMARTPHONE IMA-
GINING SYSTEMS

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST
HIGH SCHOOL SCIENTIFIC PROJECT

OBOR: 2 FYZIKA
JIHOMORAVSKÝ KRAJ

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jakub Dokulil

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Stanislav Průša, Ph. D.

Brno 2018

Část A - základní údaje

Soutěžní práce:		Referenční kód:	18B02JD281199A
Název:	Analýza limitů zobrazovacích soustav dnešních smartphones		
Ročník:	40. ročník	Soutěžní obor:	2. fyzika
Počet autorů práce:	1 - všichni autoři mají stejný podíl		
Navazující soutěžní práce:			
Navazuje tato práce na jinou práci SOČ:	Ne	Rok obhajoby:	0000
Název:		Referenční kód:	
Autor práce:			
Jméno:	Jakub	Bydliště:	Místo: Brno
Příjmení:	Dokulil		Ulice, č.: Záhřebská 17
Datum narození:	28.11.1999		PSČ: 616 00
Telefon:	+420604591405	Web:	
Email:	kubadokulil99@gmail.com	Ročník studia, obor:	5 ročník šestiletého studia
Škola:			
Název:	Gymnázium Brno, Křenová, příspěvková organizace	IČ:	00558991
Kraj:	Jihomoravský		
Telefon:	543 245 861	Adresa šk.:	Místo: Brno
Email:	gymnazium@gymkren.cz		Ulice, č.: Křenová 36
Web:	www.gymkren.cz		PSČ: 60200
Požadavky na výpočetní a audiovizuální techniku při obhajobě:			
Dataprojektor, PC s PDF prohlížečem			
Jazykové znalosti autora (-ů):			
Čeština (mateřský jazyk), Angličtina (zhruba B1), Němčina (zhruba B1+)			
Prohlášení autora/ů			
Autor (autoři) potvrzují svým vlastním podpisem správnost veškerých údajů uvedených v přihlášce.			
Autor (autoři) stvrzují svým podpisem dodržování KODEXU účastníka SOČ, který je zveřejněn na www.soc.cz			
Podpis autora/ů, nebo jejich zákonného zástupce/ů v případě, že nedosáhl/i k datu finálního podání přihlášky 18 let věku:			
Datum:	20.2.2018		podpis

Část B - anotace

Údaje o práci	18B02JD281199A
Klíčová slova:	fotoaparáty, optické vady, geometrická optika, Zemax
Rozsah práce:	82 stránek
Přílohy práce:	žádné
Záměr a cíl práce:	Prozkoumat fotoaparáty dnešních smartphones a navrhnout optimalizaci
Použité metody a techniky:	Simulace v Zemax Optic studio, SEM, micro-CT
Popis výsledků (sumarizace):	Neúspěšně byly simulovány optické soustavy dvou smartphones. Byl navrhnout alternativní objektiv který dokáže dosáhnout lepších výsledků než stávající řešení.
Zhodnocení výsledků, přínos práce:	Bylo úspěšně otestováno rozlišení fotoaparátů dnešních smartphones podle normy ISO 12233. Tyto telefony byly neúspěšně zanalyzovány, kvůli vysoké náročnosti této analýzy. Úspěšně byl navrhnout alternativní objektiv. Já jsem prováděl fototesty, demontoval telefony, zpracovával CT-skeny, simuloval soustavy a navrhoval alternativní objektiv.
Další možnosti řešení, pokračování v práci:	Návrh dalších alternativních objektivů použitelných ve smartphonech.
Reference o autorovi (-ech)	
Účast v jiných soutěžích (název, datum, umístění):	Fyzikální olympiáda krajská kola -- kat. A 2016,2017 umístěn na 13. a 15. místě -- kat. D 2016 umístěn na 6. místě, úspěšný řešitel -- kat C. 2017 umístěn na 9. místě úspěšný řešitel Matematická olympiáda -- kat. C 2016 umístěn na 32. místě úspěšný řešitel Chem. olympiáda -- kat. B. 2016 umístěn na 20. místě
Jiné (přednášky, prezentace, publikace apod.):	Článek o CT-analýze v newsletteru Laboratoře výpočetní tomografie CEITEC VUT.
Elektronická verze práce	
Vlastní text práce (PDF):	V pořádku (soubor o velikosti 35.65 MB nahrán dne 19.2.2018 21:30:23)
Přílohy - nepovinné:	nebyla nahrána příloha
Souhlas se zveřejněním práce	
souhlasím se zveřejněním práce	
Souhlas s využitím poskytnutých osobních údajů pro potřeby realizace soutěže a se zveřejněním jména, příjmení, data narození, umístění, názvu a adresy navštěvované školy ve výsledkových listinách	
souhlasím	

NIDV MŠMT se zavazuje používat osobní údaje o účastnících v souladu se zákonem č. 101/2000 Sb., O ochraně osobních údajů.

ABSTRAKT

Úkolem této práce je zanalyzovat pomocí nejmodernějších metod fotografické systémy používané v dnešních smartphones, následně popsat a vysvětlit vady kterými jsou tyto soustavy zatíženy a navrhnout optimalizaci pro zlepšení zobrazení.

KLÍČOVÁ SLOVA

fotoaparáty, optické vady, geometrická optika, Zemax

ABSTRACT

The aim of this work is to analyze optical systems used in contemporary smartphones using the most modern methods. Then describe and explain defects with which these systems are loaded and suggest and design an optimization of image enhancement.

KEYWORDS

camera, aberrations, geometric optics, Zemax

DOKULIL, Jakub. *Analýza limitů zobrazovacích soustav fotoaparátů dnešních smartphones*. Brno, 2018, 68 s. Středoškolská odborná činnost. Gymnázium Brno, Křenová, p.o., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav fyzikálního inženýrství. Vedoucí práce: doc. Ing. Stanislav Průša, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou Středoškolskou odbornou činnost na téma „Analýza limitů zobrazovacích soustav fotoaparátů dnešních smartphones“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Dále prohlašuji, že tištěná i elektronická verze práce SOČ jsou shodné a nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

Brno 19. února 2018

Handwritten signature in blue ink, reading "J. Dolný".

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Jihomoravskému kraji, který prostřednictvím JCMM finančně zajistil moji práci, Laboratoři výpočetní tomografie CEITECu Brno za naskenování kamerových modulů, Dr. Jakubu Zlámalovi za zapůjčení programu Zemax a seznámení s ním a společnosti Meopta – optika s.r.o. za konzultaci související s normou ISO 12233. Největší dík patří doc. Stanislavu Průšovi, mému vedoucímu, za čas věnovaný mé práci a věcné připomínky, díky kterým vypadá tak jak vypadá. Dále děkuji mé rodině a přítelkyni za podporu a trpělivost.

Brno 19. února 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'J. Dolan' with a stylized flourish at the end.

podpis autora



Tato práce byla vytvořena za finanční podpory Jihomoravského kraje.

Pro sazbu práce v systému $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ byla použita upravená šablona s balíčkem `thesis`, získaná ze stránek Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií.[17]

Pokud není uvedeno jinak, obrázky byly vytvořeny autorem práce.

OBSAH

Úvod	1
1 Teoretická část práce	3
1.1 Pojmy a veličiny	4
1.1.1 Clonové číslo	4
1.1.2 Hloubka ostrosti	5
1.1.3 Čipy	6
1.2 Rozlišení	7
1.2.1 Testování rozlišení	7
1.2.2 Jednotlivé prvky testovacího obrazce	9
1.2.3 Vyhodnocení a zpracování	9
1.3 Vady optických soustav	9
1.3.1 Seidlovy aberační koeficienty	10
1.3.2 Sférická vada	11
1.3.3 Koma	12
1.3.4 Zkreslení	12
1.3.5 Astigmatismus a zklenutí	13
1.3.6 Barevná vada	13
1.4 Zemax	14
2 Analýza telefonu Nokia	17
2.1 Demontáž telefonu	17
2.2 Čip	17
2.3 Zobrazovací soustava	19
2.4 Výsledky a interpretace	21
3 iPhone SE	23
3.1 Fototest	23
3.2 Demontáž a analýza kamerového modulu	26
3.3 Výsledky a interpretace	27
4 Motorola	31
4.1 Fototest	31
4.2 Demontáž a analýza	31
4.3 Výsledky a interpretace	35
5 Porovnání a návrh vylepšení	39
5.1 Srovnání telefonů	39
5.2 Konstrukce objektivu	39

6 Závěr	43
Literatura	45
Seznam symbolů, veličin a zkratk	51
Seznam příloh	53
A Optické vlastnosti plastových materiálů	55
B Nokia	57
B.1 Regresní křivky	57
B.2 Spot diagramy	58
C iPhone	59
C.1 Regresní křivky	59
C.2 Spot diagramy	62
D Motorola	65
D.1 Spot diagramy	67

ÚVOD

Smartphone je dnes hojně využívaným zařízením, které čím dál více uživatelů díky jeho dostupnosti a kompaktnosti využívá k fotografování. Avšak výstupy z takového fotoaparátu těžko mohou dosahovat takového rozlišení, které výrobci uvádí, jelikož soustava, (s nadsázkou řečeno) „kterou bych si mohl vystříhat z PET-lahve“, zobrazuje na čip na němž je políčko asi šestkrát menší jak u profesionální zrcadlovky na kterou se používají propracované a velmi přesně vyrobené objektivy. Proto jsem se rozhodl zanalyzovat dva různé telefony zjistit jak jsou jejich fotoaparáty výkonné a pro uživatele, kteří chtějí mít i nadále kompaktní fotoaparát v telefonu a přitom chtějí co nejlepší obrazovou kvalitu, byl navržen větší objektiv s lepší obrazovou kvalitou.

Před analýzou fotoaparátů dnešních smartphones byla prozkoumána kamera starého telefonu Nokia 6700. Tento telefon byl zanalyzován pro zjištění vhodného postupu pro získání co nejlepších výsledků pro simulaci.

Pro testování vlastností fotoaparátů smartphones byly vybrány dva telefony, Motorola moto C jako zástupce nižší třídy telefonů s 5 Mpix fotoaparátem a iPhone SE zastupující vyšší třídu telefonů s 12 Mpix fotoaparátem.¹ Rozlišení těchto telefonů bylo otestováno podle normy ISO 12233, následně z nich byly demontovány kamerové moduly, které byly naskenovány mikro výpočetním tomografem. Z CT-snímků byly zjištěny údaje o tvaru lámavých ploch. Ty byly následně vloženy do programu pro simulaci optických soustav Zemax Optic Studio (dále jen „Zemax“). Pomocí těchto simulací byly zjištěny chyby a nedostatky zobrazení. V rámci práce jsem se pokusil navrhnout alternativní objektiv, který dokáže zobrazovat lépe.

V teoretické části práce byly informace v úvodu čerpány především ze zdrojů [6] a [7], dále byly použity vysokoškolské učebnice od prof. Havelky a prof. Fuky [2], [3] a [1]. Informace k rozlišení a jeho testování byly čerpány z normy ISO 12233 [15]. K optickým vadám bylo nejvíce informací čerpáno z učebnice Havelky a Fuky, [1], a také z přednášek předmětu základy optiky které se konaly v zimním semestru 2017 na FSI VUT, [5].

Mou motivací pro tuto práci byl zájem o fyziku a nespokojenost s kvalitou fotografií na mém telefonu.

¹Rozlišení je uvedeno tak, jak ho udává výrobce.

1 TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE

Fotoaparát je zobrazovací přístroj, většinou zmenšující předmět a zobrazující ho na světlocitlivé médium. Předmět bývá zobrazován objektivem obsahujícím clonu, který je vždy spojnou soustavou nejčastěji deseti až patnácti čoček. Jako světlocitlivé médium se dnes nejčastěji používají CMOS nebo CCD snímače.

Nejjednodušším fotografickým přístrojem je camera obscura (česky temná komora). Její konstrukce je velmi jednoduchá, skládá se z krabice, dokonale utěsněné tak, aby dovnitř nemohlo dopadnout světlo, krom kruhové clony, umístěné na protilehlé stěně, na níž leží film. Díky malým rozměrům clony, je každý „bod“ na stínítku obrazem, přibližně jednoho „bodu“ na fotografovaném předmětu. Takový „bod“ je reprezentován kroužkem o velikosti obrazu clony. Pokud je tedy clona příliš velká tak se jednotlivé kroužky překrývají a obraz se jeví rozmazaný, u malé clony se začíná projevovat difrakce, obraz je také nejasný. Výhodou je, že tento stroj nepoužívá žádný zobrazovací prvek (čočku, zrcadlo, ...), nemusí tedy ostřit, tudíž není omezena hloubka ostrosti. Ovšem clonou prochází málo světla, proto je zapotřebí používat delší expoziční časy.

První reálné fotoaparáty se skládaly z clony, jednoduché čočky a stínítka na něž byl obraz zobrazován. Významnými milníky ve vývoji fotografických přístrojů byla určitě konstrukce achromatického dubletu CHARLESEM CHEVALIEREM a konstrukce objektivu pomocí dopředu spočítaného návrhu JOZEPHEM PETZVALEM (Petzval byl původem ze Slovenska). Petzvalův objektiv se nadále díky svým vlastnostem dlouhou dobu používal, jelikož má dobře korigovanou otvorovou vadu a komu.

Prvním komerčně vyráběným digitálním fotoaparátem se r. 1988 stal FUJI DS-1P. Z počátku digitální fotoaparáty zdaleka nedostačovali těm na film, rozlišení bylo horší a pořizovací cen vysoká. To se avšak změnilo, dnes se tyto fotoaparáty vyrábí běžně s čipy o rozlišení přesahující 20 Mpix.

Do mobilních telefonů se fotoaparáty začaly přidávat již na začátku 21. století, avšak nedosahovaly vysoké obrazové kvality. Soudobé smartphony často obsahují fotoaparát s čipem, který dokáže rozlišit i více než 10^7 obrazových bodů. Zobrazovací soustava je tvořena 3 až 5 čočkami, mezi kterými jsou umístěny kovové clonky.

Dnes běžně používané fotoaparáty lze rozdělit do dvou skupin zrcadlovky a kompaktní fotoaparáty.

Zrcadlovky: Tyto fotoaparáty jsou přístroji které, zobrazují předmět do hledáčku zrcátkem, jejich výhodou je především možnost výměny objektivů, jež často bývají větší a mají požadované parametry (zvětšení, hloubku ostrosti, světelnost...). Zrcadlovky většinou nabízejí větší čipy, což zlepšuje jejich rozlišovací schopnosti. Některé „zrcadlovky“ (dnes často nazývané jako bezzrcadlovky) používají hledáček elektronický, to znamená že za objektivem je snímací čip, přenášející obraz do displeje, umístěného v hledáčku.

Kompaktní fotoaparáty: Kompakty jsou dnes hojně rozšířené především díky jejich malým rozměrům a jednoduché konstrukci (bez odjímatelných částí). Digitální kompakty disponují ovladatelným optickým zvětšením obvykle $5\times$, ovšem vyrábí se i tzv. superzoomy zvětšující až $25\times$. Fotoaparát často ani nemá hledáček jelikož obraz je zobrazován přímo na displej.

1.1 Pojmy a veličiny používané v souvislosti s fotoaparáty

Důvodem zavedení objektivu je nejen možnost zmenšení předmětu, ale hlavně to, že jím projde větší množství světla a tudíž není zapotřebí používat tak dlouhé expoziční časy. Objektiv je tvořen soustavou čoček, upravující obraz podle potřeb. Typicky je to soustava centrovaná, to znamená středy křivosti leží na jedné optické ose. U některých objektivů (zejména teleobjektivů) je často obrazová hlavní rovina vzdálená od výstupní pupily¹.

Jako nejjednodušší objektiv může sloužit jediná spojná čočka, ovšem toto je dnes nepoužívaná. Také se pro zjednodušení zavádí model, ve kterém se objektiv chová jako jediná spojná čočka. Proto se používá zobrazovací rovnice totožná s tou tenké čočky:

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'}, \quad (1.1)$$

kde s a s' jsou předmětovou a obrazovou vzdáleností od čočky s obrazovou ohniskovou vzdáleností f' .

1.1.1 Clonové číslo

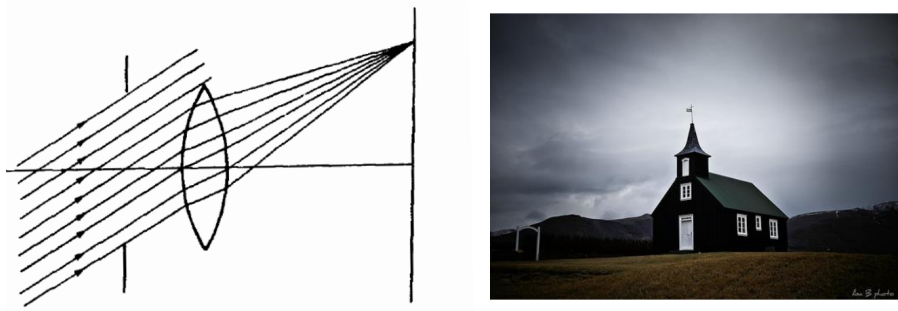
Clonové číslo je podstatnou vlastností každého fotografického objektivu. Clona slouží k úpravě množství zobrazovaného světla tak, že mění velikost vstupní pupily. Charakterizována je právě clonovým číslem C , které je rovno podílu ohniskové vzdálenosti f' a průměru vstupní pupily D :

$$C = \frac{f'}{D}. \quad (1.2)$$

Clonová čísla tvoří geometrickou řadu s kvocientem $\sqrt{2}$. Dnes se používá stupnice která začíná číslem 1.

Špatně zvolenou polohou nebo velikostí clony může docházet k vignetaci, neboli odclánění. U objektů vzdálených od optické osy dochází k odclonění části jejich paprsků, proto se pak předmět zobrazí menším počtem paprsků a není tak jasný. Výsledek lze vidět na Obr. 1.1.

¹Např. má-li teleobjektiv obrazovou ohniskovou vzdálenost $f' = 300$ mm pak je zapotřebí takové konstrukce, která tuto rovinu umístí alespoň 300 mm od čipu, aby bylo možné obraz zaostřit.

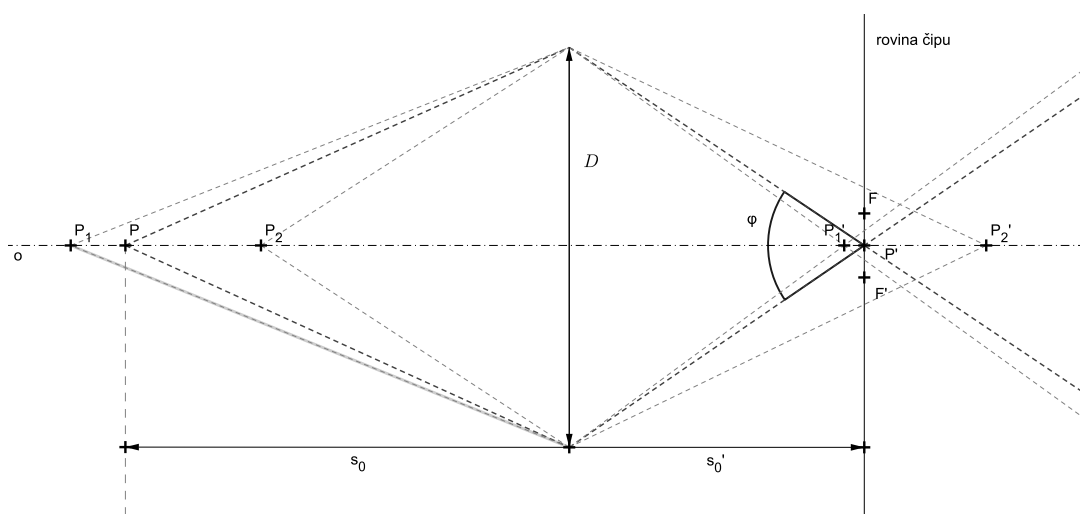


Obr. 1.1: Na levém obrázku je schéma soustavy u níž dochází k vignetaci. Na pravo lze vidět její důsledek, ubýtek jasu u okrajů obrazu. [5]

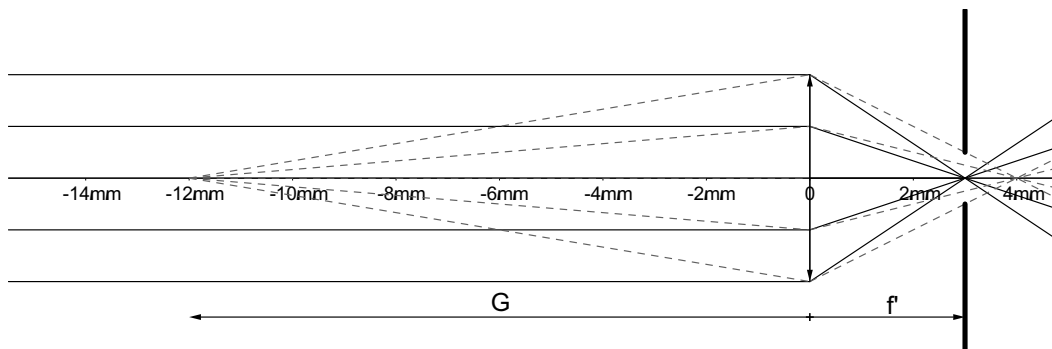
1.1.2 Hloubka ostrosti

Hloubka ostrosti je klíčová pro kvalitu výsledného snímku, určuje rozdíl vzdáleností mezi nejbližšími a nejvzdálenějšími předměty, jež jsou schopny se zobrazit na rovinu detektoru (čipu, filmu) v nerozeznatelné kvalitě. Bod ležící za nebo před rovinou na níž je soustava zaostřena se na detektor zobrazí jako malé kolečko. I pokud je průměr tohoto kolečka menší nebo roven rozměru nejmenší snímací jednotky detektoru (snímače na čipu), pak jej čip nerozezná od bodu na který je soustava zaostřena.

Jinak řečeno, tato veličina říká, jak daleko od paraxiální předmětové roviny se může objekt nacházet, tak aby defokusace (rozostření) tohoto body, nebyla zaznamatelná čipem.



Obr. 1.2: Na obrázku je objektivem reprezentovaným spojnou čočkou zobrazen bod P na bod P' , čip má velikost jedné zobrazovací jednotky $|FF'|$. Tedy bod P_1 se zobrazí v nepoznamenané kvalitě, avšak bod P_2 bude na obrázku rozmazaný.



Obr. 1.3: Na obrázku je zobrazen předmět v nekonečnu a v hyperfokální vzdálenosti G . Oba předměty se zobrazují tak, že ve výsledku není možné rozpoznat neostrosti v obrazu.

Soustava zobrazí rovinu ξ do roviny ξ' ostře, avšak body rovin $\xi_{1,2}$ zobrazí jako kroužky. Je-li jejich průměr menší než určitá hodnota y_0 pak jsou nerozpoznatelné.² Pokud jsou považovány kroužky o průměru $< y_0$ za ostré, pak lze určit vzdálenosti roviny $\xi_{1,2}$ od vstup. pupily které se zobrazí na obrazovou rovinu s tolerovanou neostrostí. Důležitou roli zde hraje tzv. *hyperfokální vzdálenost*, vyjádřená rovnicí 1.3. Platí pro ní, že s tolerovanou nepřesností y_0 se zobrazí předměty z nekonečna do právě hyperfokální vzdálenost (viz obr.1.3). Je-li objektiv zaostřen na hyperfokální vzdálenost pak se s tolerovanou neostrostí y_0 zobrazí předměty od nekonečna do $\frac{G}{2}$. Ze vztahu 1.3 lze vidět, že hloubka pole je rostoucí se průměrem vstupní pupily a ohniskovou délkou.

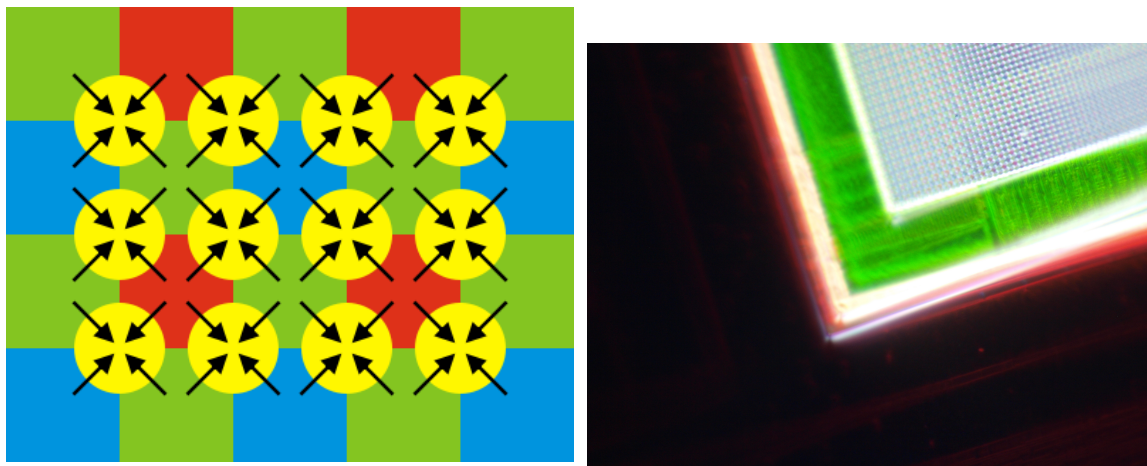
$$G = -\frac{f'^2}{y_0 c} = -\frac{f' D}{y_0} \quad (1.3)$$

1.1.3 Čipy

Pro zaznamenávání obrazu se dnes využívají CMOS nebo CCD čipy. Obě tyto technologie jsou charakteristické tím, že čip je složen z 4 typů zobrazovacích jednotek, každé citlivé na jiný rozsah vlnových délek světla. Jak lze vidět na Obr. 1.4 každý pixel na obrázku je vytvořen složením 4 zobrazovacích jednotek což může ovlivnit i jeho rozlišovací schopnosti, jelikož každé dva sousední pixely sdílí dvě zobrazovací jednotky. Rozlišení čipu v každém rozměru je o jedna menší jak počet zobrazovacích jednotek.

Hlavní rozdílem mezi technologiemi je skladba zobrazovacích jednotky, to se projevuje vyšší citlivostí a zvýšeným šumem u typu CMOS. Tato technologie je také levnější na výrobu a méně energeticky náročná.

²Pro člověka při pozorování ze vzdálenosti 25 cm je $y_0 \approx 0,075\text{mm}$.



(a) Struktura čipů. Žlutá kolečka zde značí jednotlivé pixely a šipky ukazují z kterých pixelů se získávají finální informace. [13] (b) Mikroskopická fotografie CMOS čipu. Na fotografii lze vidět strukturu čipu. Zv. 1000×

Obr. 1.4: Čipy.

1.2 Rozlišovací schopnosti fotoaparátu a jejich testování

Rozlišovací schopnost (nejvyšší přenesená prostorová frekvence v obraze) je na měrných obrazcích uváděna ve stovkách lph, „line widths per picture height“, jednotka uvádí hodnotu prostorové frekvence čar vzhledem k výšce stránky (tj. kolik stejně širokých rovnoměrně rozprostřených pruhů se vejde na výšku stránky), na výšku i šířku obrazu. Celkové rozlišení (počet rozlišitelných pixelů po ploše obrazu) lze vypočítat jako součin hodnot lph v horizontálním a vertikálním směru, vynásobený poměrem stran (většinou 4/3 či 3/2). Celkové rozlišení je totiž součinem vertikálního a horizontálního rozlišení. Vertikální je uváděno rovnou v tabulce, protože počet čar se udává na výšku obrazu. Horizontální rozlišení je součinem poměru stran a vertikálního rozlišení, jelikož hodnoty jsou uváděné vzhledem k výšce obrazce, pak na šířku jich je poměr stran krát tolik. [12]

1.2.1 Testování rozlišení

Pro testování rozlišení fotoaparátů je dnes zaveden test podle normy ISO 12233 [15]. Tabulku podle této normy použitou k testování lze vidět na obrázku 1.5.

Při testování by měly být dodrženy následující podmínky.

Osvětlení: Obrazec by měl být osvětlen co možná nejrovnoměrněji, rozdíl mezi okrajem a středem by neměl být větší jak 10 %. Testovací obrazec by měl být ochráněn před jakýmkoli dalším světlem. Osvětlení by mělo být spektrálně neutrální ve viditelných vlnových délkách.

Nastavení a pozice fotoaparátu: Fotoaparát by měl být umístěn na stativ tak, aby snímáný obraz odpovídal dané části obrazce. Některé fotoaparáty mají možnost nastavení komprese obrázků, to však může zhoršit výsledek měření.

1.2.2 Jednotlivé prvky testovacího obrazce

Jednotlivé prvky jsou označeny na Obr. 1.6. Pro účel práce byly vybrány pouze některé z prvků které jsou vhodné pro měření rozlišení.

Hyperboly J a K: Rozlišovací schopnosti se odečítají hlavně na hyperbolách, které jsou umístěny vertikálně a horizontálně, tak také diagonálně a v jednotlivých rozích. Na prvcích J je 5 černých čar, u K jich je 9.

Škály O a P: Na škálách lze jednak rozpoznat rozlišovací schopnosti a jak jsou tyto schopnosti ovlivněny vlastnostmi čipu a softwarovým zpracováním (škála O). Zkreslení výsledného obrazu lze po vyfotografování obrazce posoudit na těchto škálách, jelikož na testovacím obrazci jsou rovné.

Střed C: Tento centrální prvek je určen k zaostření obrazu.

Vzory N: U těchto vzorů lze pozorovat artefakty po softwarovém zpracování obrázku.

Čára E: Na těchto čarách se projevuje schodování.

1.2.3 Vyhodnocení a zpracování

Pro zjišťování rozlišení je vhodné použít program ImageJ, konkrétně funkci *Histogram*, která zobrazuje hodnoty kontrastu na vybrané úsečce.³ Pokud na histogramu lze rozlišit příslušný počet extrémů, pak čáry byly rozlišeny.

Při zpracovávání výsledků u telefonů v kapitole 3 a kapitole 4, byla data z histogramu vyexportována a následně za použitím programu SciDAVis byl vytvořen graf vložený do práce.

1.3 Vady optických soustav

Aberace neboli chyby zobrazení, jsou způsobeny reálným chováním čoček oproti ideálnímu modelu používaném při výpočtech. Právě při výpočtech se často uvažuje perfektní zobrazení⁴, takto však čočky zobrazují pouze paprsky, které svírají s osou

³volně stažitelný na: <https://imagej.nih.gov/ij/>

⁴ Perfektní zobrazení je stigmatické zobrazení celého prostoru, kde je navíc každá křivka C_1 v obrazovém prostoru geometricky podobná sdužené křivce C_0 v předmětovém prostoru. [5]

velmi malé úhly ($< 2^\circ$), tzv. Gaussův prostor, odpovídající aproximaci funkce sinus a tangens prvním členem jejich TAYLOROVA rozvoje.

$$\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha \approx \alpha \quad (1.4)$$

Toto je v optických přístrojích nereálné, proto je lze pouze potlačit nikoli odstranit. Reálně pak chod paprsků odpovídá aproximaci funkčních hodnot prvními dvěma členy Taylorova rozvoje, pak:

$$\sin \alpha \approx \alpha - \frac{\alpha^3}{3!} \quad \operatorname{tg} \alpha \approx \alpha - \frac{x^3}{3!} \quad (1.5)$$

V jejich důsledku se bod zobrazí jako ploška, rovina kolmá na osu čočky jako rotační plocha, přímka v obrazové rovině jako křivka a předmět se zobrazí několikrát, a to různě veliký a každý obraz různě barevný.[2]

Podle způsobu narušení obrazu, dělíme vady na *monochromatické* a *chromatické*.

Monochromatické vady: Ty jsou vady obrazu, jehož vzor je zobrazován světlem o jediné vlnové délce. Při studiu vad monochromatických lze studovat jak zobrazení osového bodu tak bodu který na ose neleží. Osový bod bývá zatížen *otvorovou vadou*, u těch mimoosových to bývá *koma*, *astigmatismus*, *zklenutí obrazového pole* a *zkreslení*.

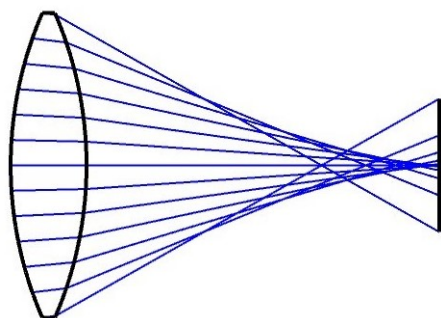
Chromatické vady: Takové vady jsou v našem světě nevyhnutelné, protože to jsou právě takové vady, které vzniknou v důsledku zobrazení světlem o více vlnových délkách, například světlem bílé barvy. V důsledku disperze (různé lomivosti záření o různých vlnových délkách) čočka tvoří tolik obrazů z kolika vlnových délek je světlo složené. Protože pak obraz tvořený danou vlnovou délkou má různou velikost jak ten vytvořený jinou, říkáme že obraz má *barevnou vadu polohy a velikosti*.

V současnosti se při návrhu složitějších optických soustav používají počítačové simulace vypočítávající dráhu paprsků pomocí Snellova zákona.[6] Jedním z programů simulující tyto soustavy je např Zemax. V dnešní době dokonce některé fotoaparáty obsahují software s informacemi o soustavě aby upravil výsledný obraz tak, že vykoriguje vady systému.

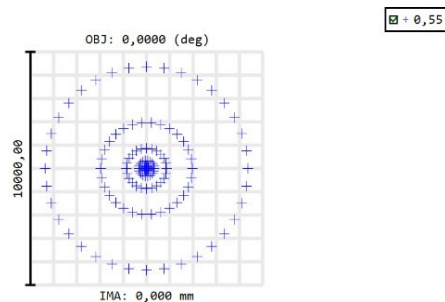
1.3.1 Seidlovy aberační koeficienty

První kdo vůbec studoval vady obrazu byl slovenský optik J. M. PETZVAL, což vyústilo v konstrukci jeho fotografického objektivu. Vady tak jak je známe dnes avšak popsal PHILIPP LUDWIG VON SEIDEL r. 1856 kdy nadefinoval 5 koeficientů pro monochromatické vady, které vložil do rovnice popisující vadu vlnoplochy, tj. jak moc je vlnoplocha odchýlena od té ideální kulové.

$$\Phi = A\rho^2 - \frac{1}{4}B\rho^4 - Cy_0^2\rho^2 \cos^2 \theta - \frac{1}{2}Dy_0^3\rho^2 + Ey_0^3\rho \cos \theta + Fy_0\rho^3 \cos \theta \quad (1.6)$$



(a) Schéma vytrasovaných paprsků.



(b) Obraz.

Obr. 1.7: Čočkou je zobrazen obrazový bod v nekonečnu, ten se zobrazuje jako kružek, jak lze vidět napravo. Je vidět že čím dále je vstupní paprsek od středu pupily tím víc se „zalomí“, tzn. že se tím víc zobrazí před ohnisko.

Odtud vložení vztahu pro výpočet trasy paprsku z vlastností vlnoplochy získáváme rovnice popisující odchylku paprsku od paraxiálního.

$$\Delta x = A\rho \sin \theta + B\rho^3 \sin \theta - 2Fy_0\rho^2 \sin \theta \cos \theta + 2y_0^2 D\rho \sin \theta \quad (1.7)$$

$$\Delta y = A\rho \sin \theta + B\rho^3 \sin \theta - 2Fy_0\rho^2 (1 + 2 \cos^2 \theta) + (2C + D) y_0^2 \rho \cos \theta - Ey_0^3 \quad (1.8)$$

V rovnicích y_0 je výška paprsku v předmětové rovině, ρ a θ jsou polární souřadnice paprsku v rovině vstupní pupily. A, B, C, D, E, F jsou SEIDELOVY aberační koeficienty (defokusaci, sférické vady, astigmatismu, zklenutí, zkreslení a komy).

$$\Delta y = \underbrace{A\rho \sin \theta}_{\text{defokusace}} + \underbrace{B\rho^3 \sin \theta}_{\text{sférická vada}} - \underbrace{2Fy_0\rho^2 (1 + 2 \cos^2 \theta)}_{\text{koma}} + \underbrace{(2C + D) y_0^2 \rho \cos \theta}_{\text{astigmatismus a zklenutí}} - \underbrace{Ey_0^3}_{\text{zkreslení}}$$

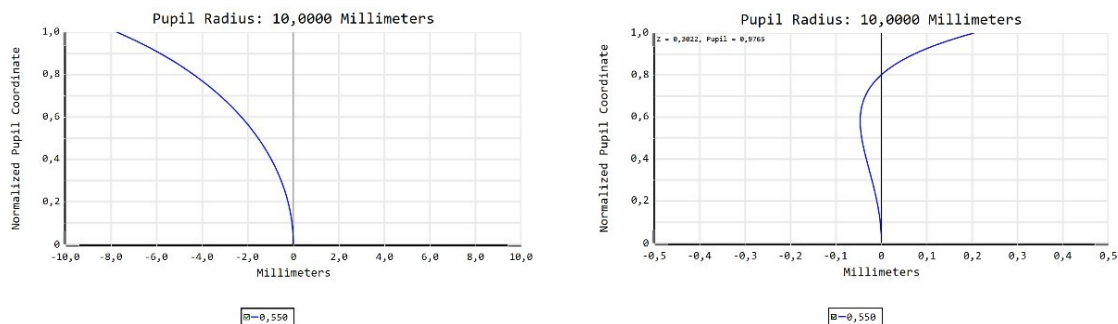
1.3.2 Sférická vada

Sférická (jinak také *otvorová*) vada je důsledkem porušení homocentričnosti svazku paprsků po průchodu soustavou, tedy tím že se všechny paprsky navzájem neprotínají v jednom bodě, tudíž nedávají dokonale ostrý obraz. Viz obr. 1.7.

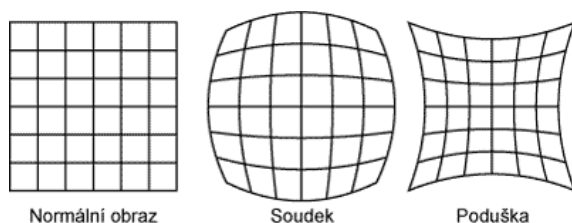
Vada je způsobena tím, že čočka s kulovými povrchy je schopna ostře zobrazovat pouze v paraxiálním prostoru ($< 2^\circ$). Bod se pak zobrazí na soustředné kružnice, jejichž velikost roste s *třetí mocninou vzdálenosti paprsku od středu vstupní pupily*.

Je-li X'_0 paraxiální obraz a X' průnik okrajového paprsku s opt. osou, pak jejich vzdálenost od sebe je *podélnou otvorovou vadou*. Ta bývá vynášena do grafu a to sice tak, že na svislou osu je nanесena výška paprsků ve vstupní pupile a na osu vodorovnou odchylka průniku paprsku s opt. osou od obrazové roviny, viz Obr. 1.8.⁵ Na Obr. 1.8b je vidět průběh vady, pokud je *korigovaná*.

⁵tento graf se v Zemaxu nazývá *logitudinal aberration*



Obr. 1.8: Na obrázcích jsou grafy sférických vad, kde na svislou osu je nanášena vzdálenost od vstupní pupily a na vodorovnou vzdálenost průniku paprsku a optické osy od paraxiálního obrazu.



Obr. 1.9: Na obrázku je viditelný projev obou zkreslení na čtvercovou mřížku.[10]

Tuto vadu lze výrazně potlačit zacloněním apertury (jelikož je závislá na 3. mocnině vzdálenosti od optické osy), Asférickým optickým členem (například tzv. *Schmidtovou korekční deskou*), či vhodným posunutím obrazové roviny z paraxiální na tzv. CLC rovinu (Circle of Least Confusion), ve které je poloměr stopy čtvrtinový oproti paraxiální rovině.

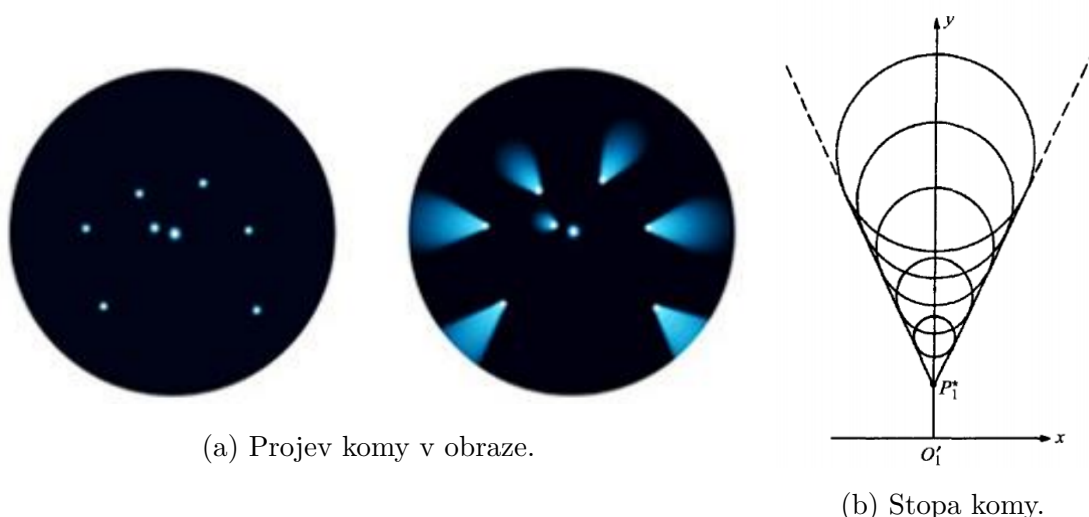
1.3.3 Koma

Koma je mimoosový nesymetrický projev sférické vady, kdy dochází ke změně zvětšení v závislosti na vzdálenosti paprsku od optické osy. Tato vada má pojmenování po tvaru stopy, který připomíná kometu.

1.3.4 Zkreslení

Obraz je zkreslen pokud v obrazové rovině je mimoosový bod zobrazen blíže nebo dále než by měl být jeho paraxiální obraz. V takovémto případě se přímka v předmětové rovině zobrazí jako křivka. Pokud se body zobrazují blíže optické ose než je paraxiální obraz, je zkreslení **soudkovité** pokud dále tak je **poduškovité** (viz 1.9).

Je-li bod Y'_0 paraxiálním obrazem, Y' obrazem reálným a X'_0 průnikem obrazové



(a) Projev komy v obraze.

(b) Stopa komy.

Obr. 1.10: Obrázky ke komě [5].

roviny s osou, pak při označení $y'_0 = |X'_0 Y'_0|$ a $y' = |X'_0 Y'|$ lze zkreslení označit

$$Z = \frac{y' - y'_0}{y'_0}. \quad (1.9)$$

Průběh zkreslení se znázorňuje do grafu, kde bývá právě zkreslení vynášeno na svislou osu a na vodorovné bývá vzdálenost od osy či sklon hlavního paprsku⁶. Zkreslení lze potlačit vhodnou kombinací čoček tak, aby se neprojevovalo rušivě.

1.3.5 Astigmatismus a zklenutí

Zobrazujme úzkým mimoosovým paprskovým svazkem. Astigmatismus způsobuje že paprsky ležící v *tangenciální* (vodorovné) a *sagitální* (svislé) rovině mají různá ohniska (na Obr. 1.11 odpovídají „bodům“ S_L a M_L). Nejčastěji se bod zobrazí v elipsu, jak lze vidět na Obr. 1.12a. Vzdáleností mezi sagitálním a tangenciálním ohniskem je *astigmatický rozdíl*.

Zklenutí obrazového pole se projevuje pokud se mimoosové paprsky neprotínají v obrazové rovině, nýbrž na parabolické ploše, ta je nazývána PETZVALOVOU. Jelikož se zklenutí projevuje zároveň s astigmatismem, tak vznikají celkově 3 plochy tvořené ohnisky (viz Obr. 1.12b).

1.3.6 Barevná vada

Barevná vada je způsobena disperzí světla složeného z více vlnových délek, v jejím důsledku má každý vzor právě tolik obrazů z kolika vlnových délek je světlo zloženo. Jelikož obrazy jsou v jedné rovině různě velké tak se jedná o *barvnou vadu velikosti*, ta je dána rozdílem velikostí obrazů. Na Obr. 1.13 je zobrazena jako $\Delta y'$. *Barevnou*

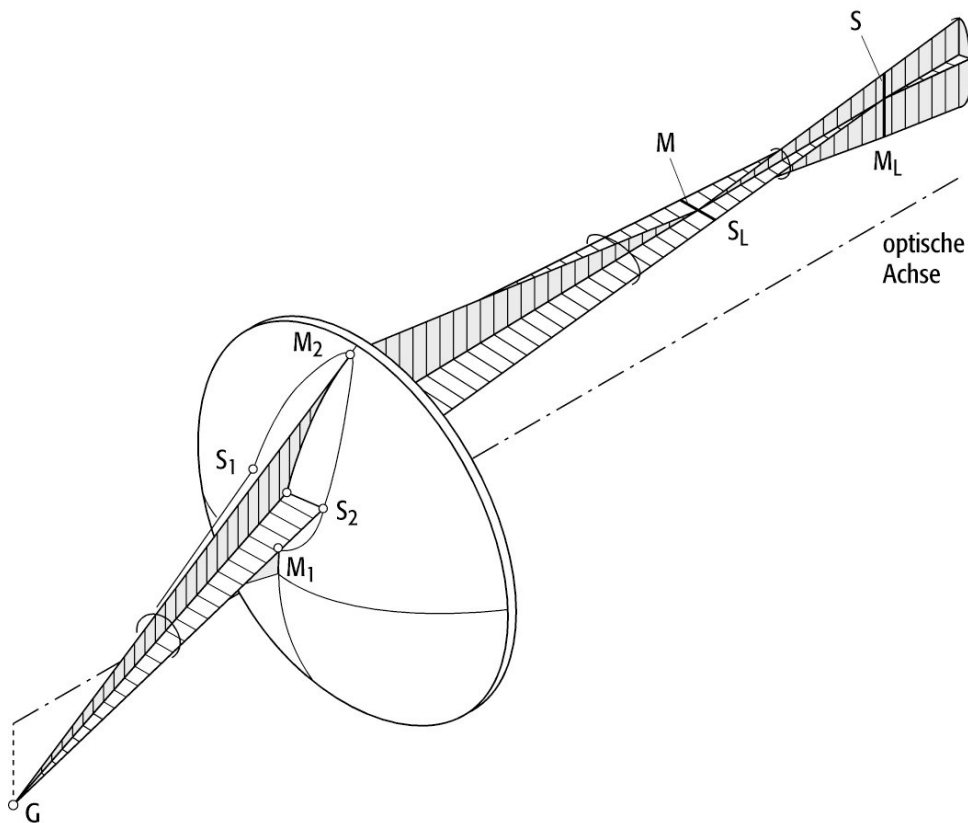
⁶tj. paprsku procházejícího středem optické soustavy

vadou polohy pak je vzdálenost stejně velkých obrazů, které jsou různě barevné. Na Obr. 1.13 odpovídá $\Delta x'$.

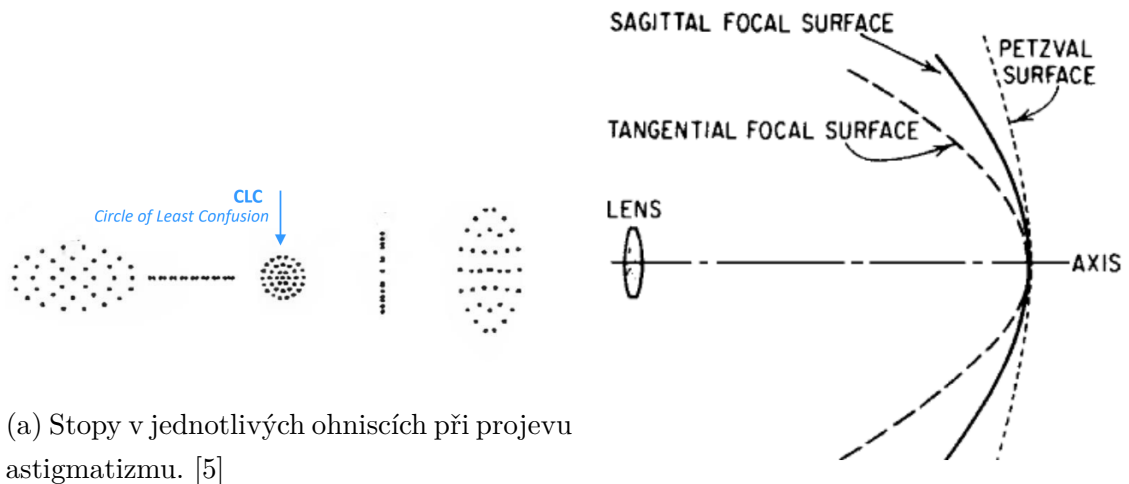
Barevnou vadu lze kompenzovat *achromatickým dubletem*, tj kombinací spojky z korunového a rozptylky z flintového skla. Korunová skla se vyznačují vysokým indexem lomu a nízkým rozptylem a vznikají příměsí oxidu bromitého, zinečnatého nebo baritého. Flintová skla mají opačné vlastnosti těch korunových, tj. mají vysokou disperzi a nízký index lomu, taková skla obsahují oxid olovnatý, podle jehož obsahu se určují lehká a těžká flintová skla. Pro kompenzaci barevných vad se používá právě rozptylka z flintového skla, aby byla vyvážena samotná vada a aby soustava neztratila svou mohutnost. Pokud je soustava dobře navrhnutá, tak stačí jediná rozptylka k redukci aberace. Poprvé byl tento princip použit JOHNEM DOLLONDEM v 18. století.

1.4 Zemax

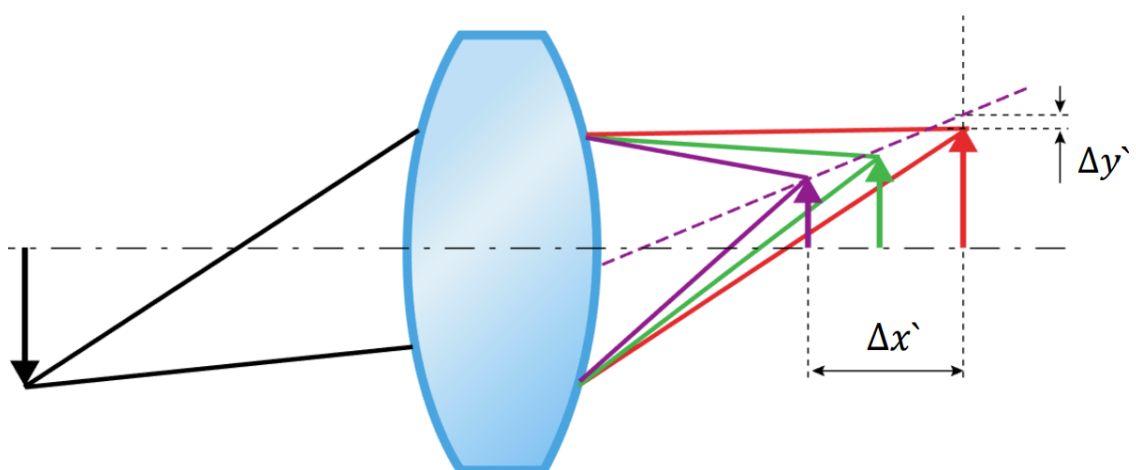
Zemax je program sloužící k simulaci a vývoji optických soustav. Zemax vypočítává trasu každého paprsku pro každou vlnovou délku přímo ze Snellova zákona, výsledkem simulace je přesné chování optické soustavy. Pro simulaci soustav se nejčastěji



Obr. 1.11: Chod astigmatického svazku, se sagitálním ohniskem S_L a tangenciálním ohniskem M_L . [11]



Obr. 1.12: Obrázky k astigmatizmu.

Obr. 1.13: Na obrázku je bílý předmět zobrazen na 3 obrazy každý zobrazen různou vlnovou délkou. $\Delta x'$ je barvnou vadou polohy a $\Delta y'$ barevnou vadou velikosti. [5]

využívají vlnové délky odpovídající Fraunhoferovým spektrálním čarám F, d a C.

$$\lambda_F = 0,486 \mu\text{m}$$

$$\lambda_d = 0,588 \mu\text{m}$$

$$\lambda_C = 0,656 \mu\text{m}$$

Zemax umožňuje výstupy dat v několika podobách, níže jsou popsány ty které jsou využívány v práci.

Layout: Tento výstup zobrazuje jednotlivé čočky kterými jsou protrasovány paprsky. Lze ho vidět například na Obr. 1.7a.

Spot Diagram: Pro zobrazení stopy jednotlivých paprsků se využívá Spot Diagram. Spot diagram je například na Obr. 1.7b.

Ray Fan: Ray Fan zobrazuje odchylku paprsku E_x v závislosti na vzdálenosti průsečíku paprsku ve vstupní pupile od osy P_x v obrazové rovině. Odpovídá tedy funkcím sestaveným podle rovnic 1.7 a 1.8 s argumenty y_0 . Podle tvaru křivky pak lze také rozlišovat jednotlivé vady, jimž je soustava zatížena.

OPD Fan: Zobrazuje závislost vady vlnoplochy v obrazové rovině na výšce dopadu paprsku z předmětového bodu na vstupní pupilu P_x , P_y . Tento graf také odpovídá funkci popsanou rov 1.6 s argumentem y_0 .

Seidel Diagram: Tento graf ukazuje jakými vadami jsou jednotlivé povrchy zatíženy.

Vignetting Diagram: Tento diagram ukazuje závislost poměru neodcloněných paprsků na zorném úhlu.

Optimalizace návrhu: Zemax také umožňuje optimalizovat návrh. Pro optimalizaci je zapotřebí sestavit ohodnocovací funkci, *Merit Function*, do té se zadají požadované parametry soustavy a jejich váhu. Následně program mění hodnoty které jsou nastaveny jako proměnné tak aby dosáhl co nejnižší hodnoty ohodnocovací funkce. Hodnota merit function je pak vypočítána jako:

$$MF^2 = \frac{\sum W_i (V_i - T_i)^2}{\sum W_i} \quad (1.10)$$

kde W_i je váha každého členu, V_i je vypočítaná ideální hodnota a T_i je aktuální hodnota.

2 ANALÝZA SOUSTAVY TELEFONU NOKIA

Jako první byl rozebrán telefon Nokia podle [8] má telefon fotoaparát s rozlišením 2592×1944 pixelů, tj. přibližně 5Mpix. Jednalo se o nefunkční telefon, který byl analyzován za účelem ověření postupu pro další telefony.

Z telefonu pro analýzu bylo zapotřebí nejprve demontovat optickou soustavu a detekční čip, které byly umístěny v „kovové krabičce“ viz obr. 2.2. Ta byla následně rozebrána na optickou soustavu, čip a zbylé díly. Čip byl zkoumán pod světelným a elektronovým mikroskopem pro zjištění rozpoznávacích schopností (velikosti jednoho pixelu). Optická soustava byla rozebrána, byly změřeny profily jednotlivých čoček a následně nasimulována v programu Zemax.

2.1 Demontáž telefonu

Popis demontáže telefonu:

1. Odšroubování plastového rámečku, odebrání černého kovového krytu a následně také destiček.
2. Vyjmutí kamerového modulu (viz. Obr. 2.2)
3. Změření vnějších rozměrů fotoaparátu posuvným měřidlem.
4. „Odloupnutí“ kovové destičky s čipem ze spodní strany krabičky s optickou soustavou pomocí zalamovacího nože (obrázek 2.1e).
5. Vyjmutí zobrazovací soustavy z jejího plechového obalu.

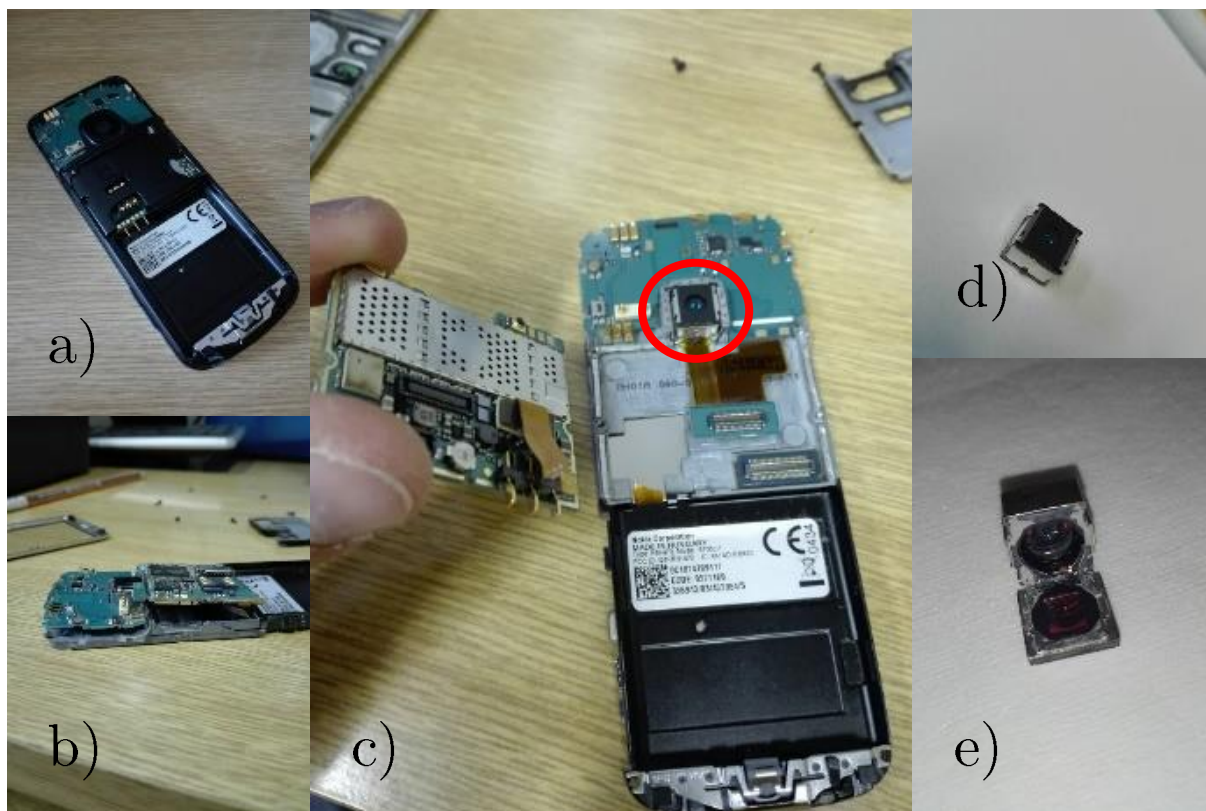
Pozorování: Zobrazovací soustava je umístěna v černém plastovém obalu, omotaném cívkou zřejmě kvůli ostření, protože soustava se mohla pohybovat od a k čipu a to v rozsahu necelého milimetru (měřeno posuvným měřidlem), fotoaparát tedy dokáže ostřit. Vstupní pupila má průměr přibližně 2 mm, výstupní 5 mm. Soustava je od čipu vzdálena přibližně 2 mm.

2.2 Analýza čipu

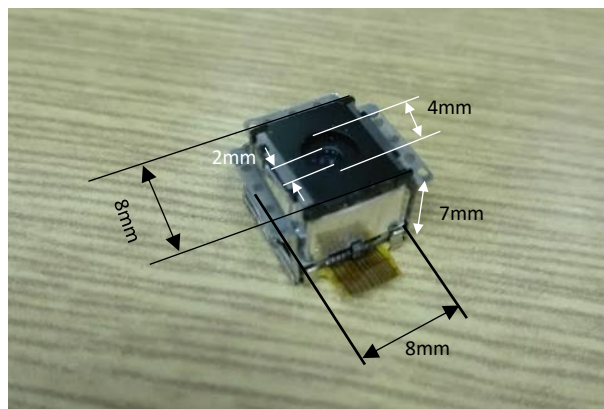
Čip byl nejprve pozorován pod optickým mikroskopem. Z obrázků 2.5, zejména z prvního, lze vidět že povrch je červený, avšak po větším zvětšení nelze vidět tolik výraznou červenou (druhý obrázek obr. 2.5).

Při pokusu zobrazit čip na rastrovacím elektronovém mikroskopu, se na čipu začala vytvářet černá skvrna (viz obrázek 2.6), svrchní vrstva čipu začala degradovat vlivem expozice elektronovým svazkem.

Čipy jsou typickými polovodičovými součástkami, proto vysvětlení výše uvedených dvou pozorování je následující:



Obr. 2.1: Postup při rozebírání telefonu.

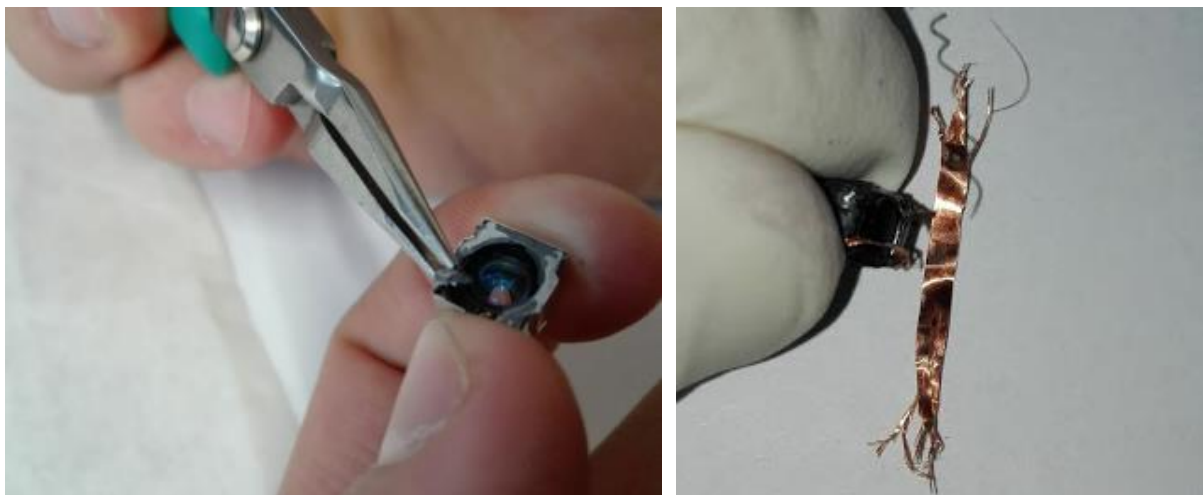


Obr. 2.2: Rozměry fotoaparátu.

Velmi pravděpodobně je čip pokryt skleněnou vrstvou (ta se nabíjelo pod SEM), které odráží červenou barvu (vysvětluje červený obraz pod mikroskopem), zřejmě kvůli zvýšené citlivosti čipu na tyto barvy.

Následně byl proveden pokus o odstranění této skleněné vrstvy, pevně připevněné na čipu, proto se jí nepovedlo odejmout bez jejího poškození a poškození čipu. Poškozený čip lze vidět na obrázku 2.7.

Po odstranění vrstvy byl čip znova pozorován pod optickým mikroskopem a následně také pomocí SEM. Obrázek 2.8 ukazuje část čipu ve dvou zvětšeních. Velikost zobrazovací jednotky byla odměřena na $3,2 \mu\text{m}$



Obr. 2.3: Nalevo je soustava v kovovém obalu v němž se mohla pohybovat. Na druhé straně je z něj vytažená samotná soustava, umístěná v plastovém obalu omotaném měděnou cívkou (na obrázku již odebranou).

2.3 Analýza zobrazovací soustavy

Optická sestava, zobrazující objekty na čip, byla, jak už je výše zmíněno, umístěna v černém válci omotaném měděnou cívkou. Po odstranění cívky (lze vidět na obrázku 2.3) byl postupně zalamovacím nožem odstraněn černý plastový obal čoček. Po jeho rozřezání a odebrání byly odebrány čtyři čočky tvořící soustavu a 2 černé distanční kroužky, které byly mezi 2. a 3. čočkou a mezi čočkou 3. a 4.

Profily jednotlivých čoček byly naměřeny na profilometru Bruker Dektak XT¹. Ty pak byly proloženy regresní křivkou v programu *SciDAVis*² podle rovnice 2.1.

$$f(x) = a_0 + a_2(x - x_0)^2 + a_4(x - x_0)^4 + a_6(x - x_0)^6 + a_8(x - x_0)^8 \quad (2.1)$$

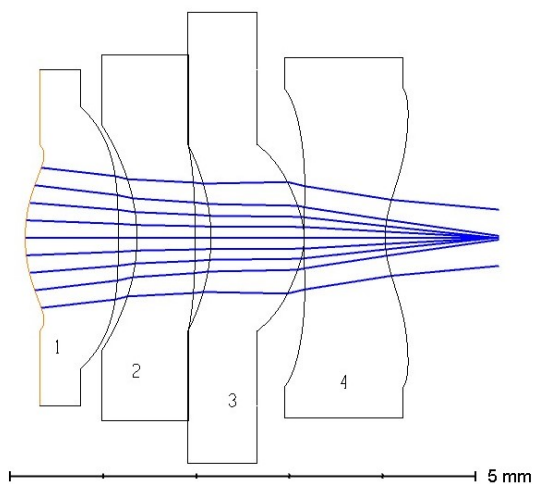
Profily byly označeny čísly podle čočky jejíž jsou a písmeny označující zda-li jsou přední (tj. blíž vstupní pupile) nebo zadní (blíž výstupní pupile). Například profil 4 - p je přední profil 4. čočky.

Naměřené koeficienty a_{2-8} jsou uvedeny v tabulce 2.1, tyto údaje byly zadány do programu Zemax. Tloušťky jednotlivých povrchů byly přibližně (s přesností na 0,1 mm) naměřeny posuvným měřidlem, a byly také zadány do Zemaxu. Jako materiál byl vybrán některý z plastových materiálů z katalogu Zemaxu tj. PMMA, ACRYLIC (oba polymethylmetakryláty s rozdílnými opt. vlastnostmi, viz obrázek), POLYCARB (polykarbonát), POLYSTYR (tvrzený polystyren), závislost indexu lomu na vlnové délce lze vidět na obrázku A.1.

Po vyzkoušení všech tří materiálů (ACRYLIC byl vynechán kvůli značné podobnosti s PMMA), viz obr. B.2, vyšli POLYCARB a POLYSTYR nejlépe.

¹<http://nano.ceitec.cz/mechanical-profilometer-bruker-dektak-xt/>

²Program je zdarma stažitelný na stránkách: <https://sourceforge.net/projects/scidavis/>



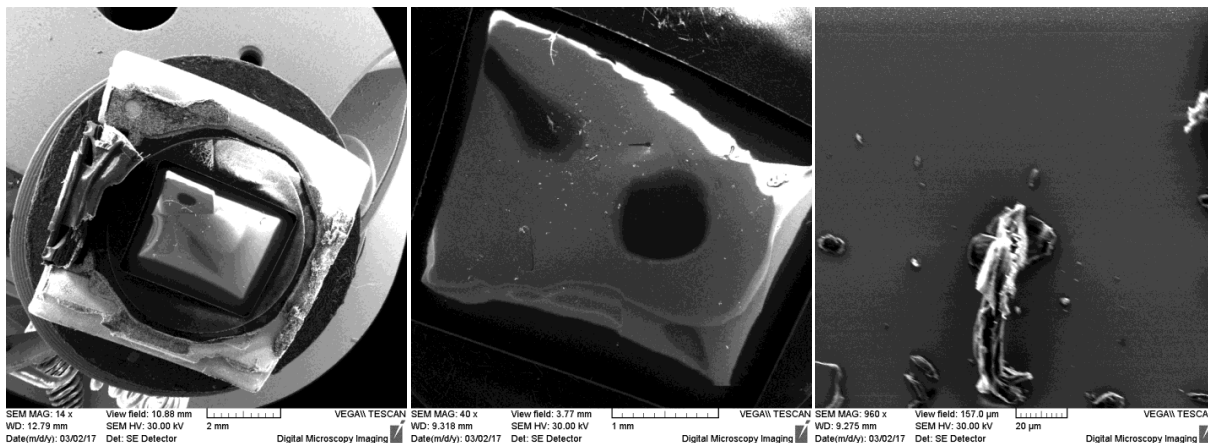
Obr. 2.4: Schéma čoček s průchodem paprsků zobrazujících bod v nekonečnu a očíslováním čoček



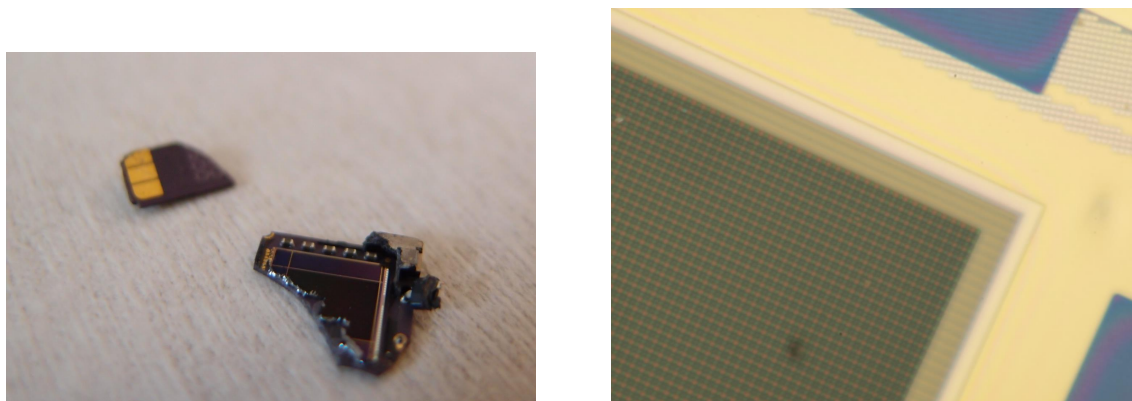
Obr. 2.5: Nalevo lze vidět čip zvětšený 40× a napravo detail již samotného čipu, zvětšeném 400×, na tom lze vidět i lehký náznak jeho struktury.

čočka	povrch	a_2	a_4	a_6	a_8
1. čočka	1-p	-0,306	-0,162	0,422	
	1-z	-0,040	-0,084		
2. čočka	2-p	0,259			
	2-z	-0,043	-0,031		
3. čočka	3-p	0,247			
	3-z	-0,661	0,719	-0,861	0,298
4. čočka	4-p	-0,0556	0,1171	-0,0511	0,0103
	4-z	0,4752	-0,3776	0,1505	-0,0249

Tab. 2.1: Tabulka s hodnotami koeficientů (p - přední povrch, z - zadní povrch).



Obr. 2.6: čip pod rastrovacím elektronovým mikroskopem Tescan Vega II, na třetím obrázku nelze pozorovat žádnou strukturu čipu i při zvětšení $\approx 1\,000\times$

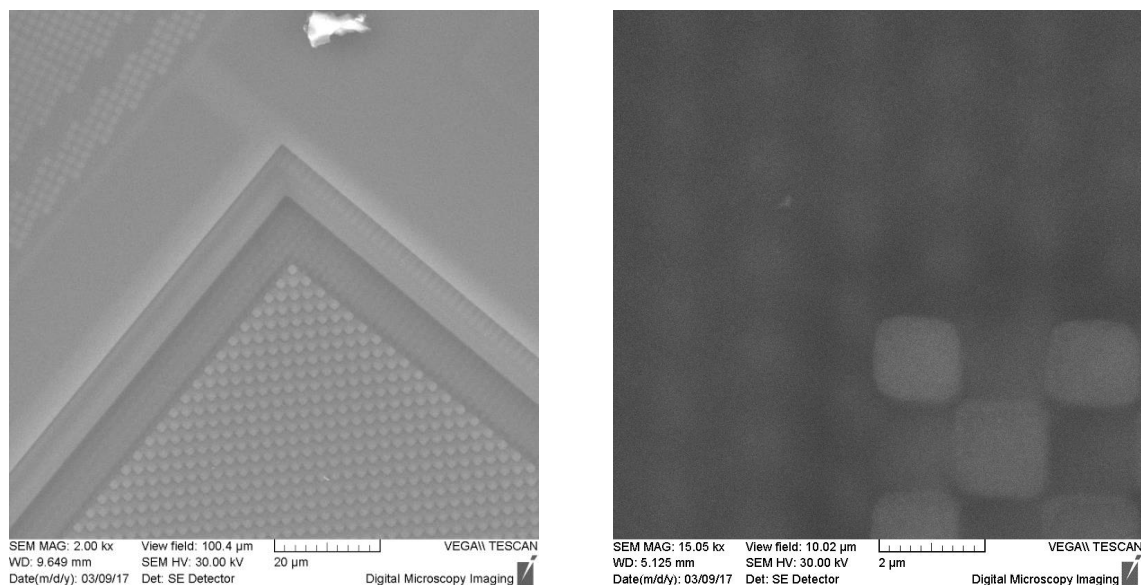


Obr. 2.7: Zlomenný čip od nokie po odebrání „červeného skla“, napravo je snímek čipu pod optickým mikroskopem zvětšený $1000\times$, zde lze narozdíl od obrázku 2.6 pozorovat jeho strukturu.

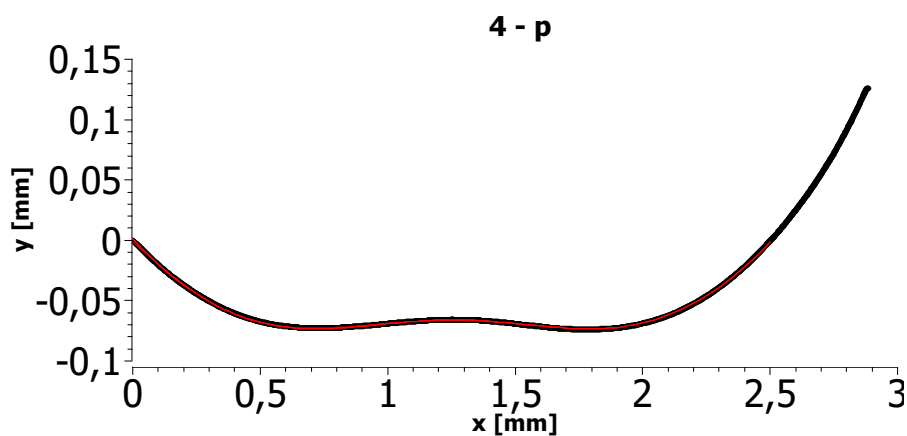
2.4 Výsledky analýzy a jejich interpretace

Jak již je výše napsáno, nejlépe vycházely z materiálů *polykarbonát* (POLYCARB) a *polystyren* (POLYSTYR) a jejich výchyly byly nepatrné při uvážení přesnosti analýzy dokonce zanedbatelné. Už z obr. B.2 lze vidět, že jestliže má jedna zobrazovací jednotka šířku a výšku $3,2\,\mu\text{m}$ pak rozdíly jednotlivých skel jsou zanedbatelné oproti velikosti stopy výrazně přesahující velikost pixelu.

Jelikož soustava nebyla dostatečně přesně zanalyzována, šlo jednak o profily povrchů, které neprocházely středem čoček a druhá jejich vzdálenosti, které byly nepřesně změřeny. Pro příští měření bylo navrženo přesněji změřit tloušťky jednotlivých čoček a jejich vzdálenosti od sebe například za pomoci optické profilometrie nebo počítačové tomografie.



Obr. 2.8: Čip od Nokie zobrazený rastrovacím elektronovým mikroskopem, napravo lze vidět zobrazovací jednotky, na 15 000× zv. snímku



Obr. 2.9: Proložení regresní křivkou profilu 4 - p, černé jsou na obrázku naměřené veličiny a červená je regresní křivka. Jelikož naměřené hodnoty byly naměřeny velmi hustě, tak vypadají že tvoří křivku.

3 ANALÝZA TELEFONU APPLE IPHONE SE

iPhone SE, telefon který „vyrostl a zůstal malý“ (alespoň tak zní slogan výrobce), byl vydán společností Apple v roce 2016. Tento model je vybaven 12 Mpix (4032×3024) CMOS snímacím čipem a $\frac{f}{2,2}$ -zacloněným objektivem, s ohniskovou vzdáleností $f' = 4$ mm. Pro test byl vybrán jako zástupce vyšší-střední třídy smartphonů.

3.1 Fototest

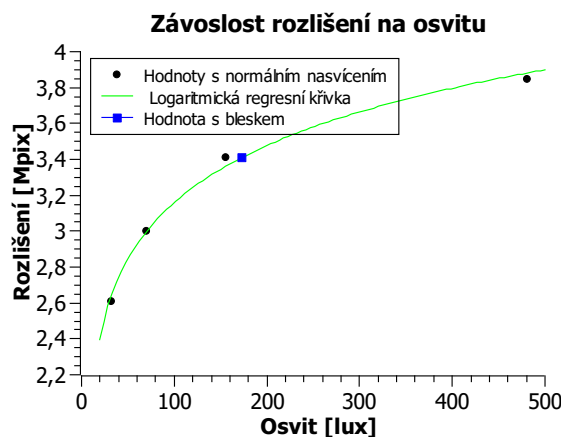
Lze říct, že při fotografických testech, popsanych v oddíle 1.2, telefon obstál velmi dobře. Vertikální i horizontální rozlišení bylo při poměru stran $\frac{4}{3}$, tedy plném rozlišení čipu, naměřeno 1 700 lph, u diagonálních hyperbol bylo rozlišení tak dobré, že ho obrazcem nešlo otestovat. To znamená že telefon dokáže plošně rozlišit 3,8 Mpix.¹

$$(1\,700 \text{ pix}) \cdot \frac{4}{3} (1\,700 \text{ pix}) = 3,85\bar{3} \text{ Mpix}$$

Při zobrazení centrálního ostřicího prvku v poměru 1:1, nelze vidět známky schodování. Na okrajích obrázku nedochází nua rozhraních černé a bílé k projevu barevné vady, ačkoli toto rozmezí není úplně ostré, je zde totiž drobný přechod.

Původní fotografie byla vyfocena při intenzitě osvitů 480 lux, testovací obrazec byl osvětlen pásem LED diod, dále byla fotografie vyfocena při osvitů 155 lux, 70 lux a 32 lux, osvit byl snížen přidáním vrstev průsvitného papíru (přidávalo se po 4 vrstvách). V tomto případě došlo pouze k zhoršení rozlišovací schopnosti, avšak u zbytku atributů (schodování, okraje atp. . .) nelze pozorovat změny. Podrobnosti jsou uvedeny v Tab. 3.1, jednotlivé fotografie jsou na Obr. 3.4.

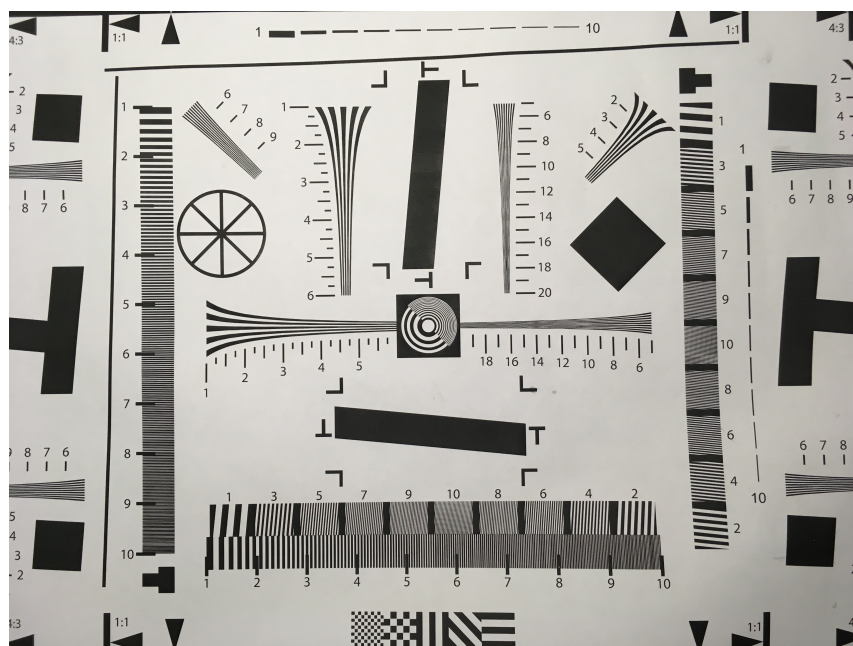
¹Pro představu: U 10 Mpix kompaktního fotoaparátu Olympus byly naměřeny 3 Mpix.

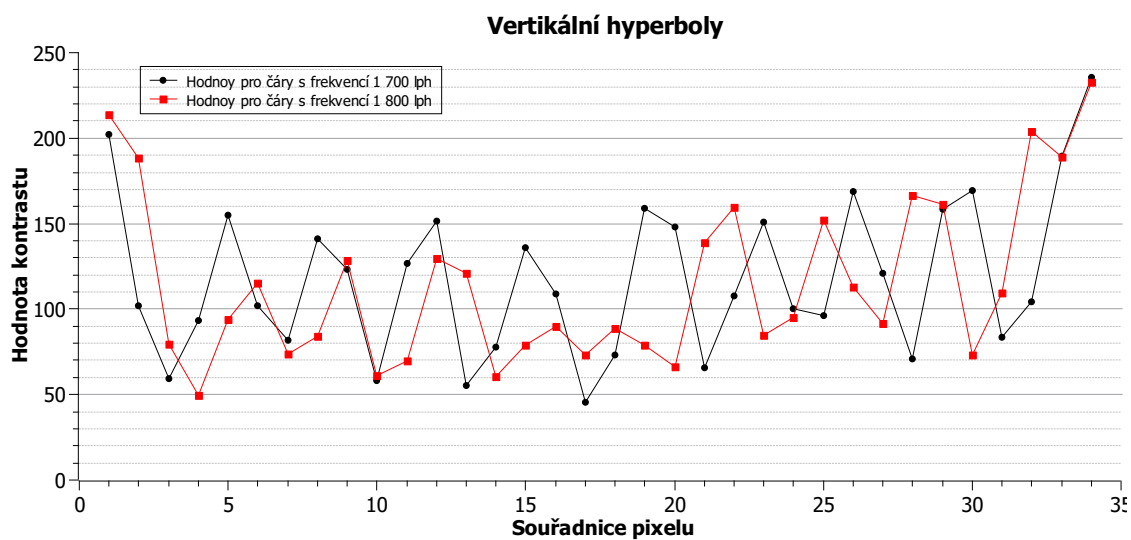


Obr. 3.1: Závislost naměřeného rozlišení na osvitů.

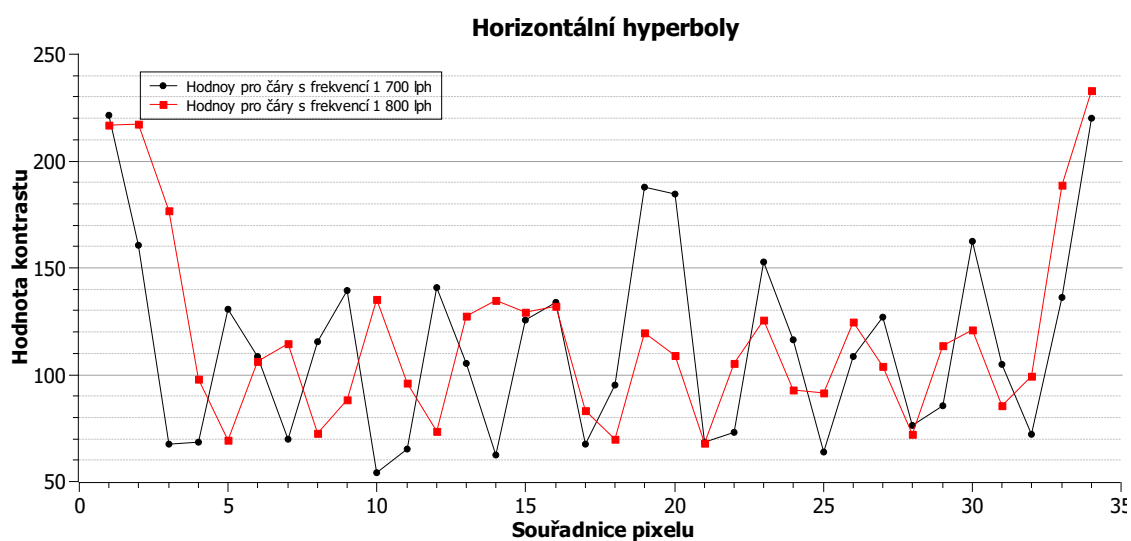
Intenzita osvitu [lux]	vertikální rozlišení [lph]	horizontální rozlišení [lph]	celkové rozlišení [Mpix]	slovní komentář
480	1 700	1 700	3,85	Viz text.
155	1 600	1 600	3,41	Obraz je srovnatelný s předchozím, při větším přiblížení lze pozorovat že kresba již není tak plynulá.
70	1 500	1 500	3,00	Kresba a projevy dalších vad jsou na obrázku nerozeznatelné od původního obrázku. Jedinou odlišností je pozorovatelný šum na černých plochách.
32	1 400	1 400	2,61	Jelikož byl osvit redukován vrstvami papíru, tak výsledné světlo bylo spíše žluté, proto bílé plochy jsou žluté. Jinak na obrázku lze pozorovat pouze zvýšený šum na šerých plochách.

Tab. 3.1: Porovnání kvality zobrazení kamery při různých intenzitách osvitu.

Obr. 3.2: Obrázek vyfocený iPhonem SE při osvitu 480 lux. (Parametry fotografie čas: $\frac{1}{33}$ s, citlivost ISO 32)

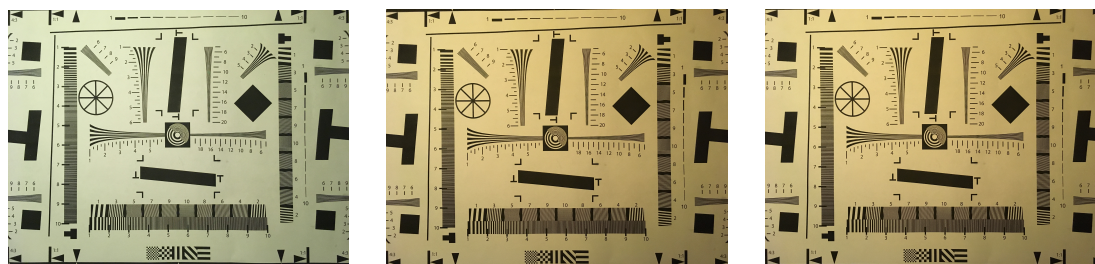


(a) Hodnoty kontrastu na fotce, při jednotlivých frekvencích vertikálních čar.



(b) Hodnoty kontrastu na fotce, při jednotlivých frekvencích horizontálních čar.

Obr. 3.3: Na obrázcích v obou případech lze rozlišit 9 černých čar (minima) a 8 bílých čar (maxima) při hustotě 1700 lp/mm, avšak při 1800 už nelze.

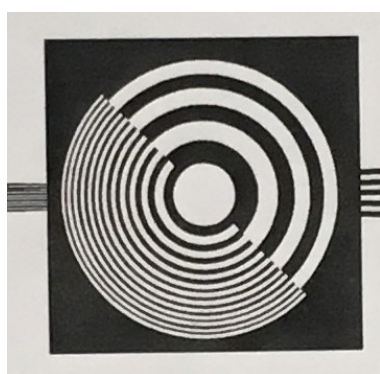


(a) Obrázek vyfocený s osvětlením 155 lux. Parametry fotografie: $\frac{1}{25}$ s, ISO 200

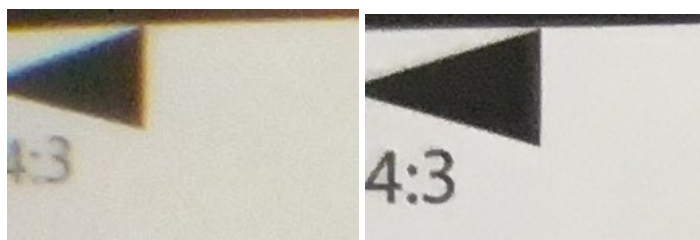
(b) Obrázek vyfocený s osvětlením 70 lux. Parametry fotografie: $\frac{1}{17}$ s, ISO 250

(c) Obrázek vyfocený s osvětlením 32 lux. Parametry fotografie: $\frac{1}{17}$ s, ISO 250

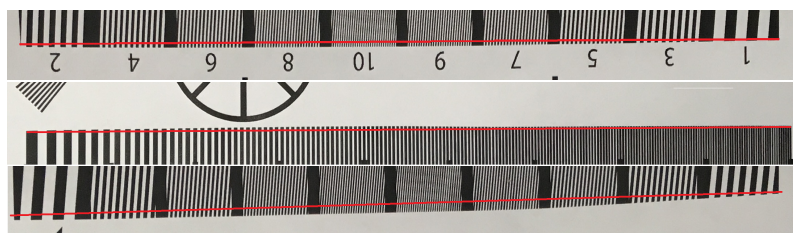
Obr. 3.4: Obrázky vyfocené s různým osvitem.



(a) Detail středu obrázku. Nelze pozorovat známky schodování, špatné kresby či nerozlišení dvou čar.



(b) Na pravém obrázku lze vidět neprojevení se barevné vady u fotoaparátu iPhone v porovnání s projevem u Motoroly. I zde je vidět velmi dobré rozlišení okraje obrazu který bývá nejvíce zatížen vadami.



(c) Rastry na nichž je pozorovatelné poduškovité zkreslení, červená čára je vždy přímka, rastry se od ní vždy odchylují do středu obrazce.



(d) Šachovnice na okraji testovacího obrazce, na

nichž nelze pozorovat projev špatného zobrazení.

Obr. 3.5: Detaily obrázku vyfocného s nejvyšším osvitem.

3.2 Demontáž a analýza kamerového modulu

Po provedení fototestů byl z telefonu demontován kamerový modul, obsahující zobrazovací soustavu a čip. Ten byl následně nasnímán micro CT. Odkud byly získána data o křivosti povrchů a jejich vzdálenosti, pro následnou simulaci v Zemaxu.

povrch	1. čočka		2. čočka		3. čočka		4. čočka		5. čočka	
	p	z	p	z	p	z	p	z	p	z
x_0	-0,010	-0,16	0,37	$-7 \cdot 10^{-05}$	0,002	-0,010	-0,009 5	-0,009 5	0,017	0,021
a_0	-0,29	0,23	0,13	-0,30	0,13	0,53	0,96	1,35	-1,18	0,063
a_2	0,35	0,017	-0,057	0,30	0,027	-0,17	-0,53	-0,48	0,18	0,17
a_4					-0,15	-0,035	0,14	0,11	-0,14	-0,051
a_6									0,034	0,003 68
a_8									-0,002 6	

Tab. 3.2: Hodnoty jednotlivých koeficientů regresní rovnice vypočítaných programem SciDAVis.

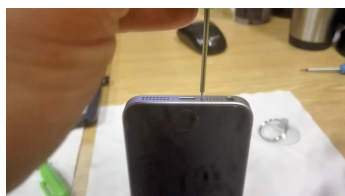
Nejprve byly odšroubovány dva šrouby na spodní straně telefonu a následně byl pomocí přísavky vyňat displej. Dále byly odpojeny konektory uvnitř těla telefonu a byla odšroubována destička pod kterou byl konektorem připevněn což umožnilo vyjmutí modulu z telefonu (viz Obr. 3.6).

Po násnímání modulu micro CT, byly z CT-skenů odečteny souřadnice povrchů. Ze souřadnic těchto bodů následně byly spočítány parametry regresní křivky. Parametry a_2, a_4, a_6 a a_8 byly společně s clonkami, vzdálenostmi jednotlivých povrchů a rozměry systému vloženy do Zemaxu v něm byla nalezena předmětová vzdálenost na kterou byl objektiv v dané poloze zaostřen. Z CT skenu byla nakonec zjištěna velikost čipu z níž byla vypočítána velikost jednoho pixelu. Ta se rovná podílu výšky čipu a počtu pixelů na výšku.

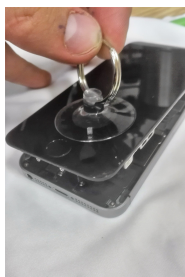
$$\frac{5\,070\ \mu\text{m}}{4033\ \text{zj}} \approx 1,26\ \frac{\mu\text{m}}{\text{zj}} \sim 2,52\ \frac{\mu\text{m}}{\text{pix}}$$

3.3 Výsledky a interpretace

Výsledky simulace v programu Zemax lze vidět na obrázcích 3.9 a 3.10. Pro tuto simulaci byl jako materiál čoček vybrán tvrzený polystyren, v Zemaxu značený jako



(a) Odšroubování šroubů ze spodní stěny telefonu.



(b) Vynětí displeje.



(c) Umístění kamerového modulu v demontovaném telefonu.



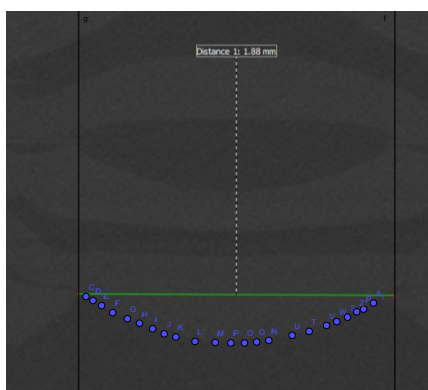
(d) Demontovaný kamerový modul.

Obr. 3.6: Fotografie demontáže telefonu.

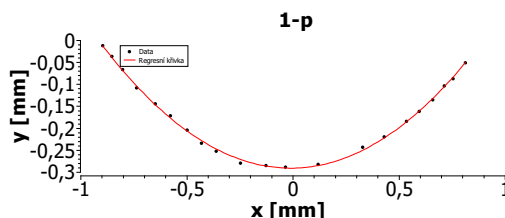
polystyr (vztah indexu lomu na vlnové délce lze vidět na Obr. A.1), spot diagramy ostatních materiálů jsou k dispozici na Obr. D.4. Takto vyšlo že tzv. RMS radius, tedy poloměr místa do kterého se soustředí většina paprsků, je ve středu asi $20\ \mu\text{m}$, na okrajích ještě více především kvůli tomu že vady jsou tím větší čím dále od osy zobrazovaný bod je. Přitom podle fototestů, se znalostí výšky čipu $h = 5,07\ \text{mm}$ a počtu bodů, které rozlišil $\frac{4}{3} \cdot 1\,700\ \text{pix} = 2\,266,6\ \text{pix}$, by zobrazovací jednotka měla mít, měla mít velikost:

$$\frac{5\,070\ \mu\text{m}}{2\,267,6\ \text{zj}} = 2,23\ \frac{\mu\text{m}}{\text{zj}} \sim 4,23\ \frac{\mu\text{m}}{\text{pix}}$$

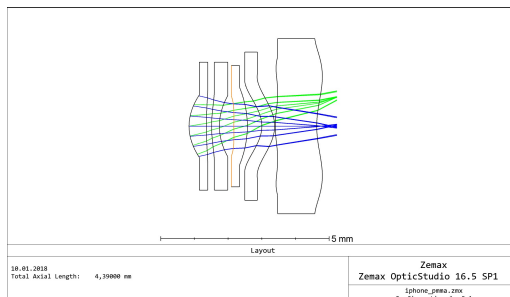
Tuto nepřesnost lze vysvětlit náročností na přesnost určení parametrů optické soustavy, kdy se nepovedlo analýzu provést dostatečně přesně. Přesto lze z Obr. 3.10 vidět, že objektiv je převážně zatížen zkreslením, astigmatizmem a zaklenutím obrazového pole a také sférickou vadou. Zkreslení bylo zjištěno již při fototestech na Obr. 3.5c. Dále se u simulace značně projevovала vinětace, kdy nešlo zobrazit bod do okrajových částí čipu. Více lze vidět na Obr. 3.11.



(a) Získávání bodů pro vytvoření regresních křivek.

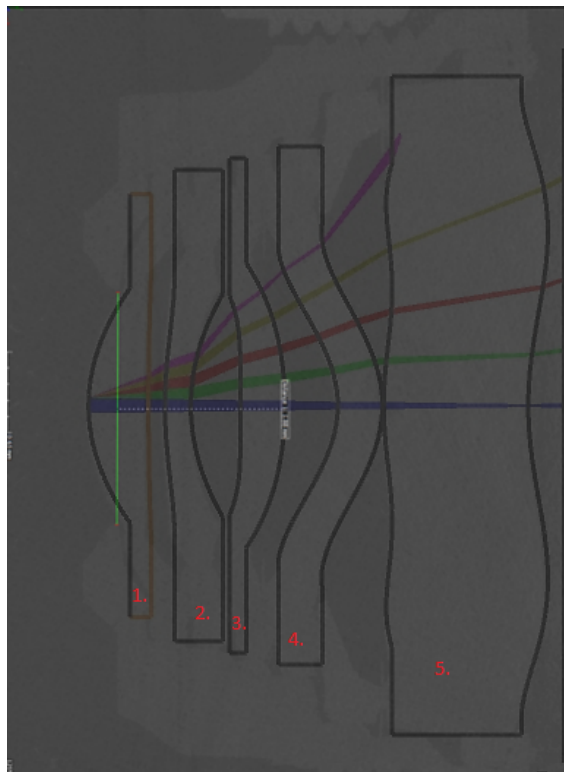


(b) Vytváření regresních křivek v programu SciDAVis.

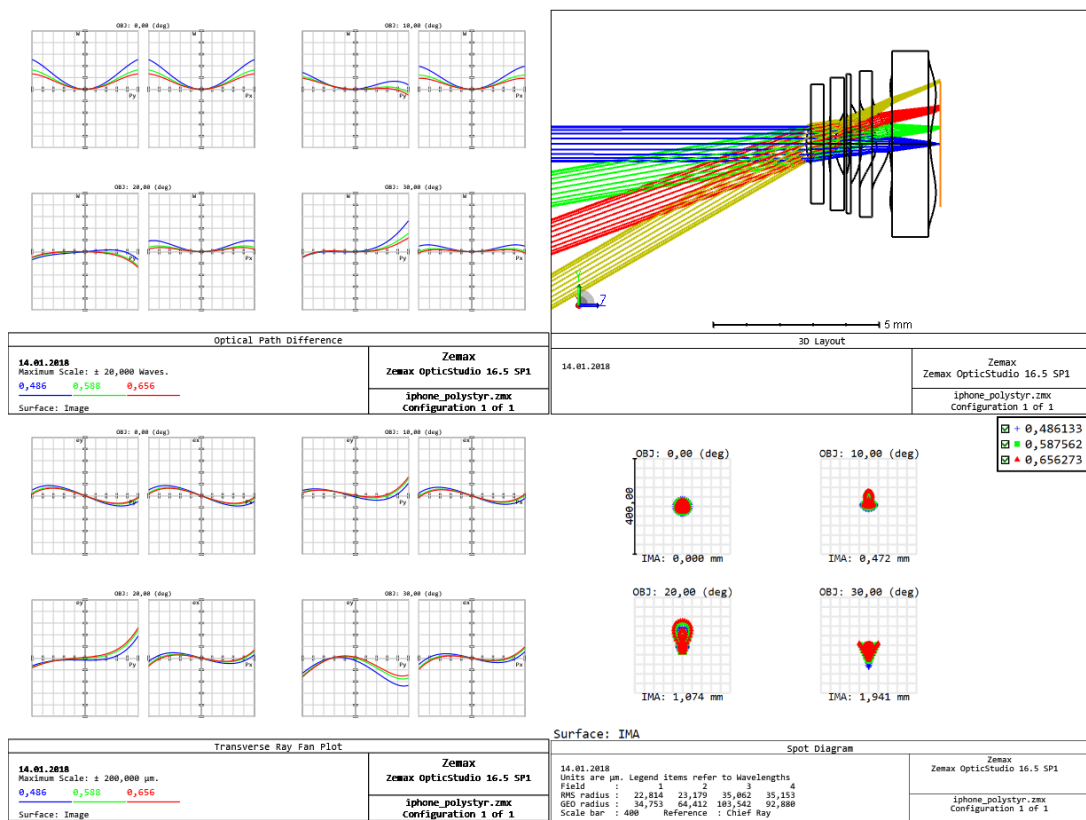


(c) Simulace v zemaxu.

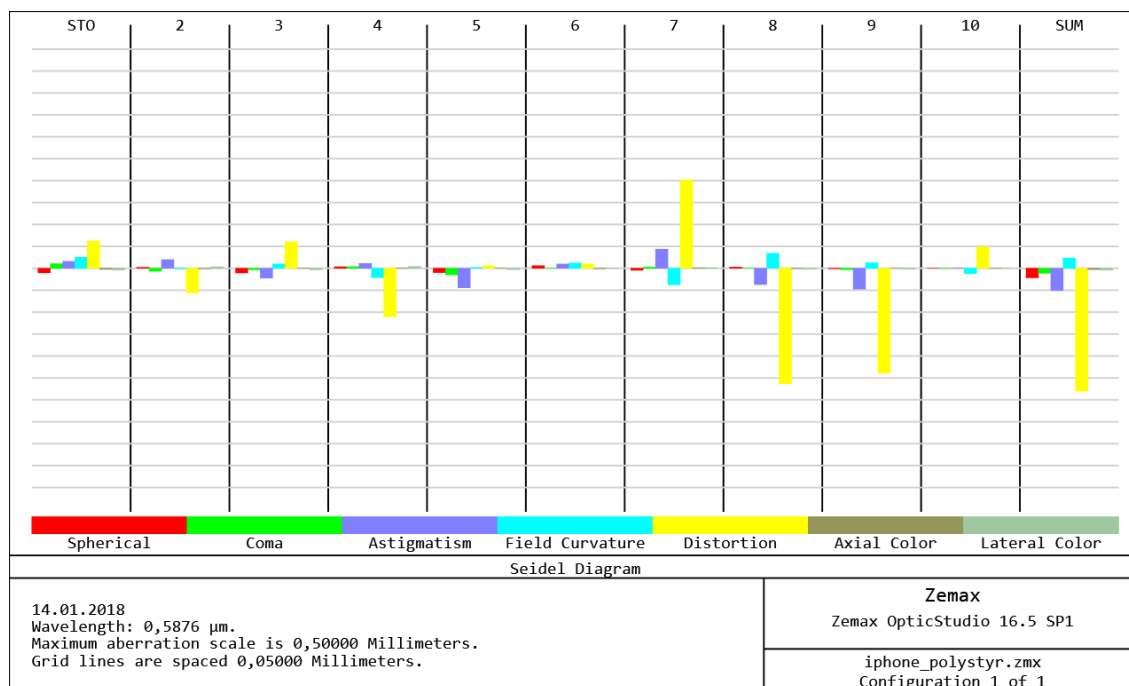
Obr. 3.7: Postup získávání dat z CT skenu.



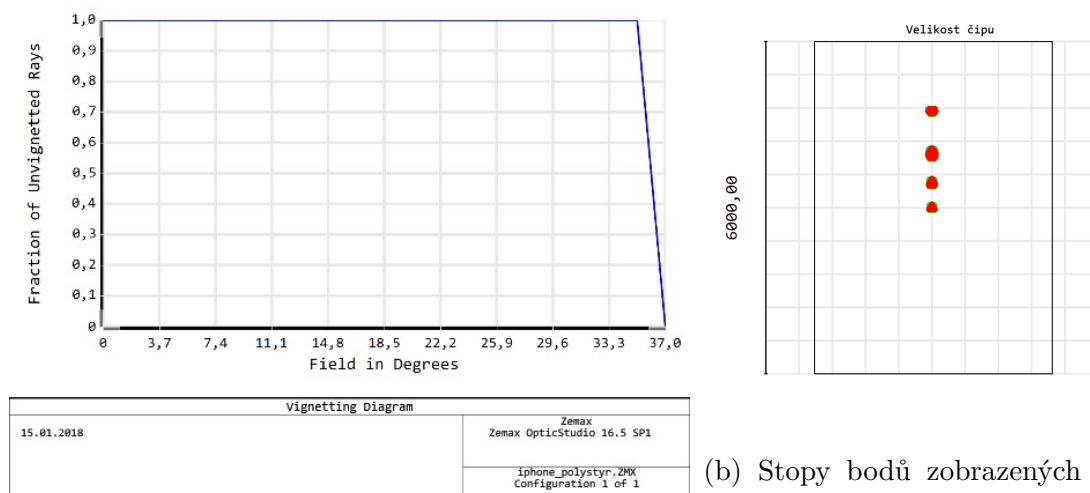
Obr. 3.8: Porovnání výsledků CT-skenu se simulací v Zemaxu



Obr. 3.9: Výsledky simulace



Obr. 3.10: Diagram zobrazující Seidelovy koeficienty pro jednotlivé povrchy a také pro celý systém. Červená je sférická vada, zelená je koma, astigmatismus je fialový, zkreslení tyrkysové, zkreslení žluté, příčná barevná vada hnědá a podélná barevná vada hnědozelená. Z tohoto obrázku lze vidět že systém je hlavně zatížen zkreslením.



(a) Závislost vignetace na pozorovacím úhlu.

(b) Stopy bodů zobrazených pod úhly 0, 10, 20 a 30 stupňů s vyznačenou velikostí čipu.

Obr. 3.11: Projevy vignetace u iPhoneu.

4 ANALÝZA TELEFONU MOTOROLA MOTO C

Motorola Moto C byla vydána roku 2017 s 5 Mpix ($2\,560 \times 1\,920$), $\frac{f}{2,8}$ fotoaparátem s ohniskovou vzdáleností $f' = 4\text{ mm}$. Pro test byl vybrán jako zástupce low-end telefonů.

4.1 Fototest

Stejně jako iPhone SE byl i tento telefon podroben fotografickému testu, popsaném v části 1.2. V porovnání s výsledky iPhonu dopadla Motorola o poznání hůře. Při stejném poměru stran, tedy 4:3. U fotoaparátu bylo naměřeno vertikální a horizontální rozlišení 1 000 lph. Plošně to pak znamená:

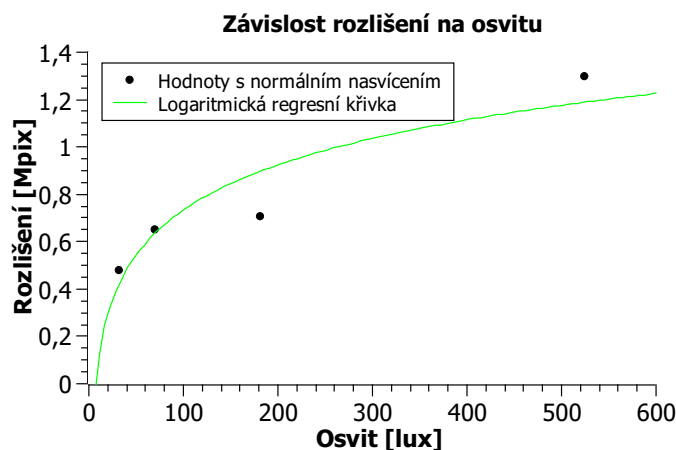
$$(1\,000\text{ pix}) \cdot \frac{4}{3}(1\,000\text{ pix}) = 1,3\text{ Mpix}$$

Při pohledu na centrální zobrazovací prvek (Obr. 4.4a), lze vidět že Motorola nedokáže ani dobře rozlišit jednotlivé půlkruhy z nichž se skládá, o schodování ani nemluvě, dále v rozích lze pozorovat projev barevné vady (viz Obr. 4.4d). U tohoto telefonu již lze otestovat diagonální rozlišovací schopnost která je 800 lph.

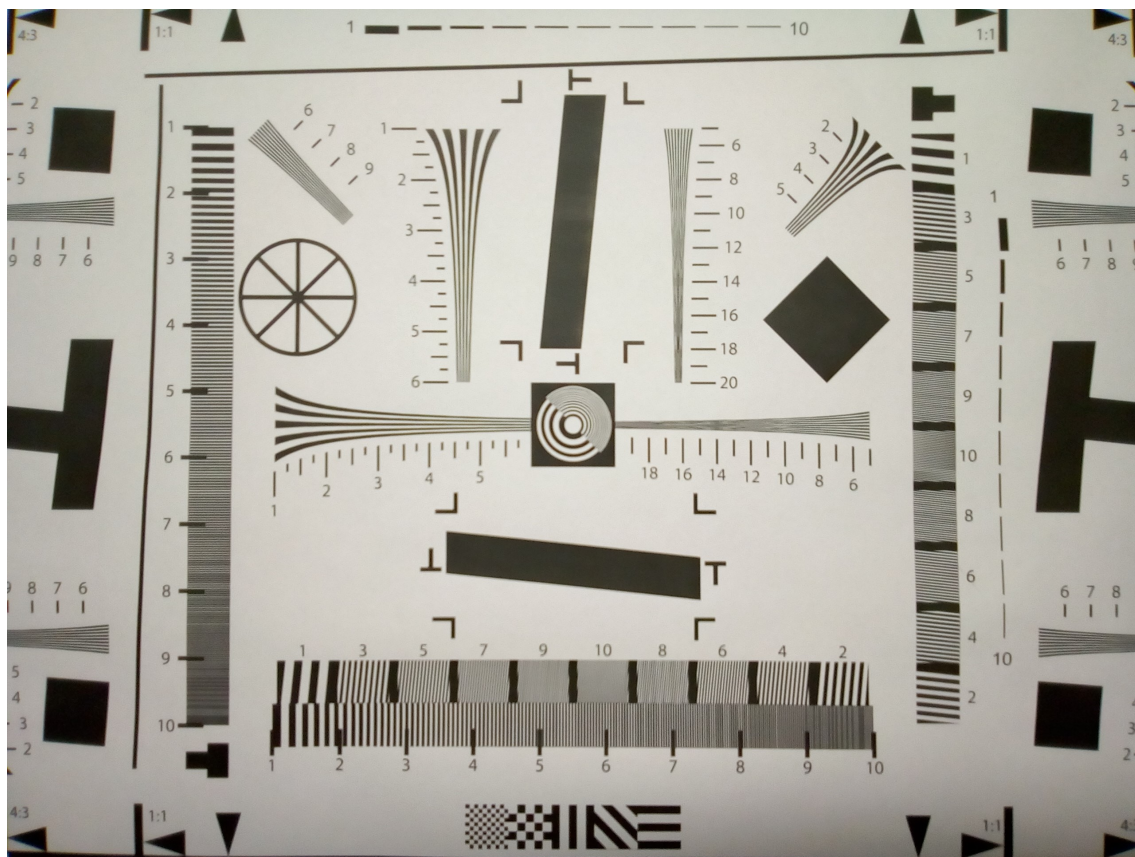
Fotografie byla vyfocena při intenzitě osvitů 524 lux. následně byly také pořízeny fotografie při nižší intenzitě osvětlení testovacího obrázku, a to při 181, 70 a 32 lux. Postup byl identický s testováním iPhonu. Rozdíly jsou popsány v tabulce 4.1

4.2 Demontáž a analýza

Postup byl identický s postupem u telefonu iPhone SE, popsaným v kapitole 3.2, tzn. byla vyňata zobrazovací jednotka, ta byla naskenována na micro-CT, ze snímků byly získány body náležící povrchu, které byly proloženy regresní křivkou podle



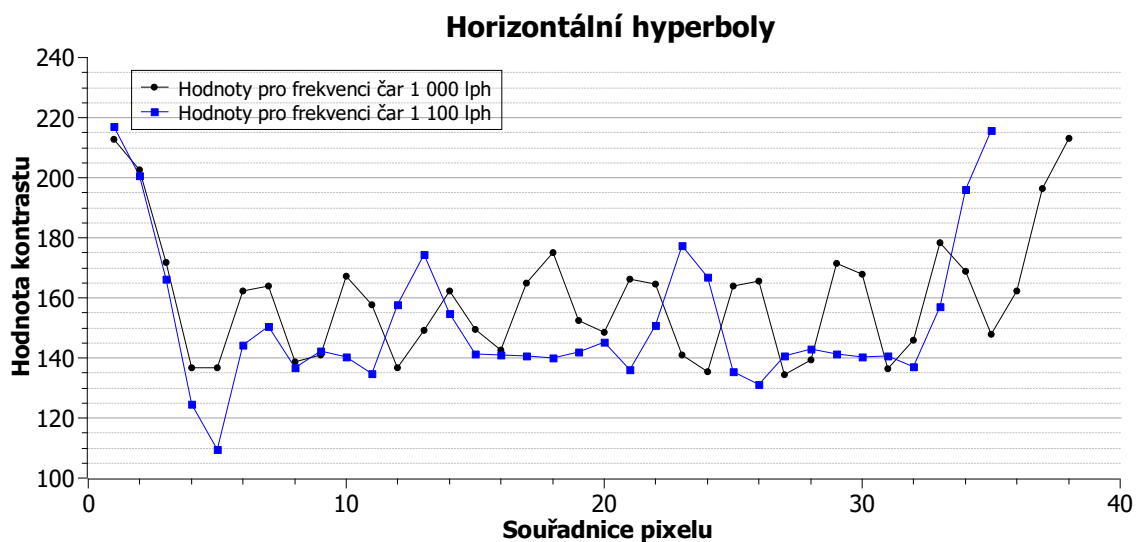
Obr. 4.1: Závislost naměřeného rozlišení na osvitu.



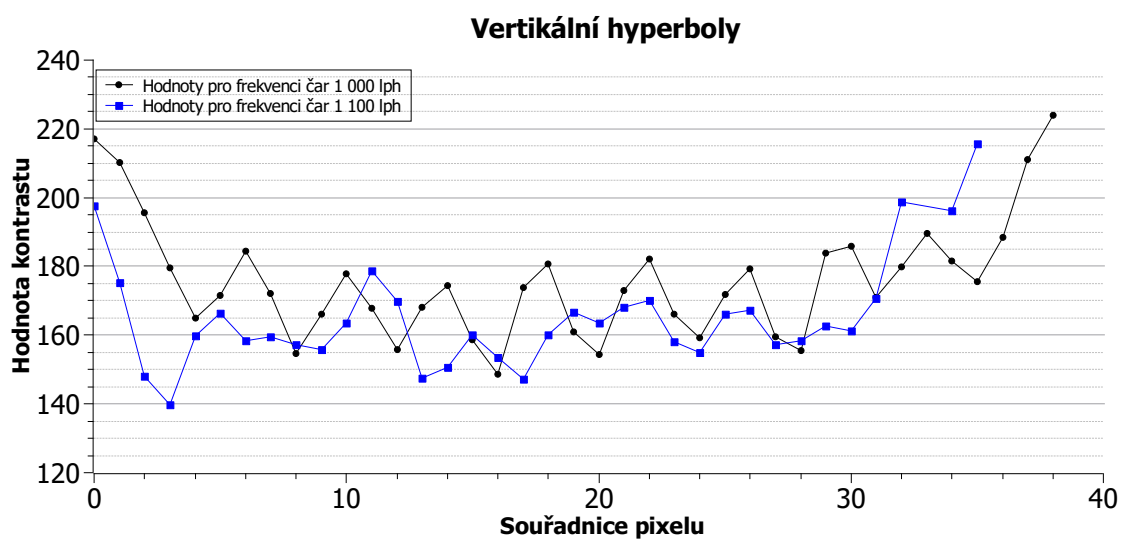
Obr. 4.2: Obrázek vyfocený Motorolou za osvit 524 lux. Parametry fotografie: čas: $\frac{1}{33}$ s, citlivost ISO 130.

Intenzita osvitu [lux]	vertikální rozlišení [lph]	horizontální rozlišení [lph]	celkové rozlišení [Mpix]	slovní komentář
524	1 000	1 000	1,3	Viz text.
181	730	725	0,71	Obrázek je srovnatelný s předchozím.
70	700	700	0,65	Kresba a projevy dalších vad jsou na obrázku lehce zhoršené oproti původnímu obrázku.
32	600	600	0,48	Jelikož byl osvit redukován vrstvami papíru, tak výsledné světlo bylo spíše žluté, proto bílé plochy jsou žluté. Jinak na obrázku lze pozorovat pouze zvýšený šum na černých plochách.

Tab. 4.1: Porovnání vlastností kamery při různých intenzitách osvitů.

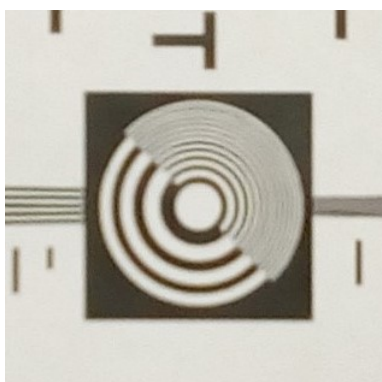


(a) Hodnoty kontrastu na fotce, při jednotlivých frekvencích horizontálních čar.

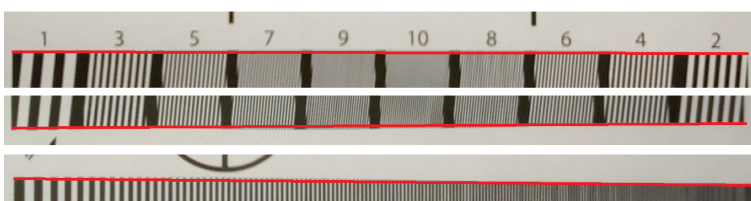


(b) Hodnoty kontrastu na fotce, při jednotlivých frekvencích vertikálních čar.

Obr. 4.3: Na obrázcích v obou případech lze rozlišit 9 černých čar (minima) a 8 bílých čar (maxima) při hustotě 1 000 lph, avšak při 1 100 už nelze.



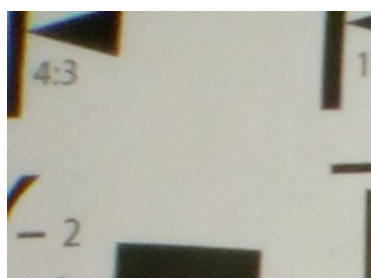
(a) Detail Středu obrázku.



(b) Na obrázcích nelze pozorovat zkreslení.

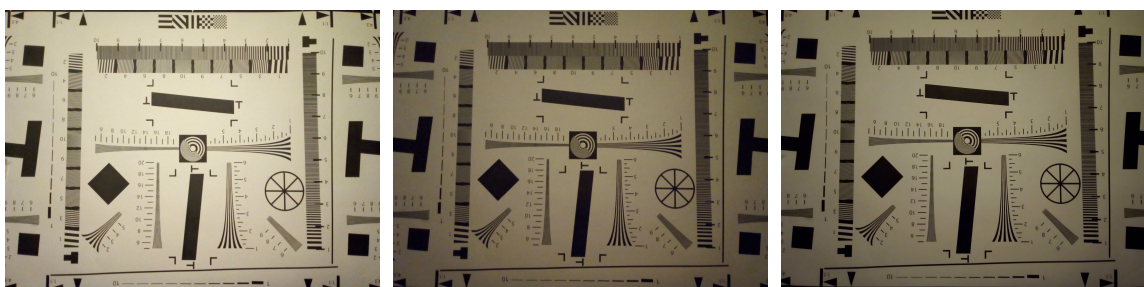


(c) Nelze pozorovat artefakty způsobené zpracováním.



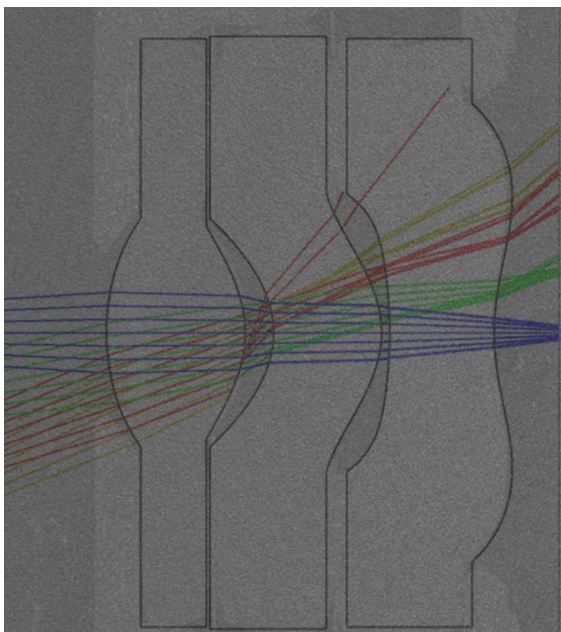
(d) Ukázka projevu barevné vady fotoaparátu, v levém horním rohu je jedna strana klínku dále od středu modrá a blíže ke středu červená.

Obr. 4.4: Další obrázky k fototestům Motoroly.



(a) Obrázek vyfocený při osvětlení sníženém na 181 lux. Parametry fotografie: čas: $\frac{1}{14}$ s, citlivost ISO 401.
 (b) Obrázek vyfocený při osvětlení sníženém na 70 lux. Parametry fotografie: čas: $\frac{1}{20}$ s, citlivost ISO 226.
 (c) Obrázek vyfocený při osvětlení sníženém na 32 lux. Parametry fotografie: čas: $\frac{1}{14}$ s, citlivost ISO 409.

Obr. 4.5: Obrázky vyfoceně za různých podmínek.



Obr. 4.6: Porovnání simulace a CT-skenu.

rov 2.1. Parametry této křivky byly následně vloženy do Zemaxu a soustava byla nasimulována. Z velikosti čipu ($2,95 \text{ mm} \times 2,2 \text{ mm}$) byla zjištěna velikost zobrazovací jednotky.

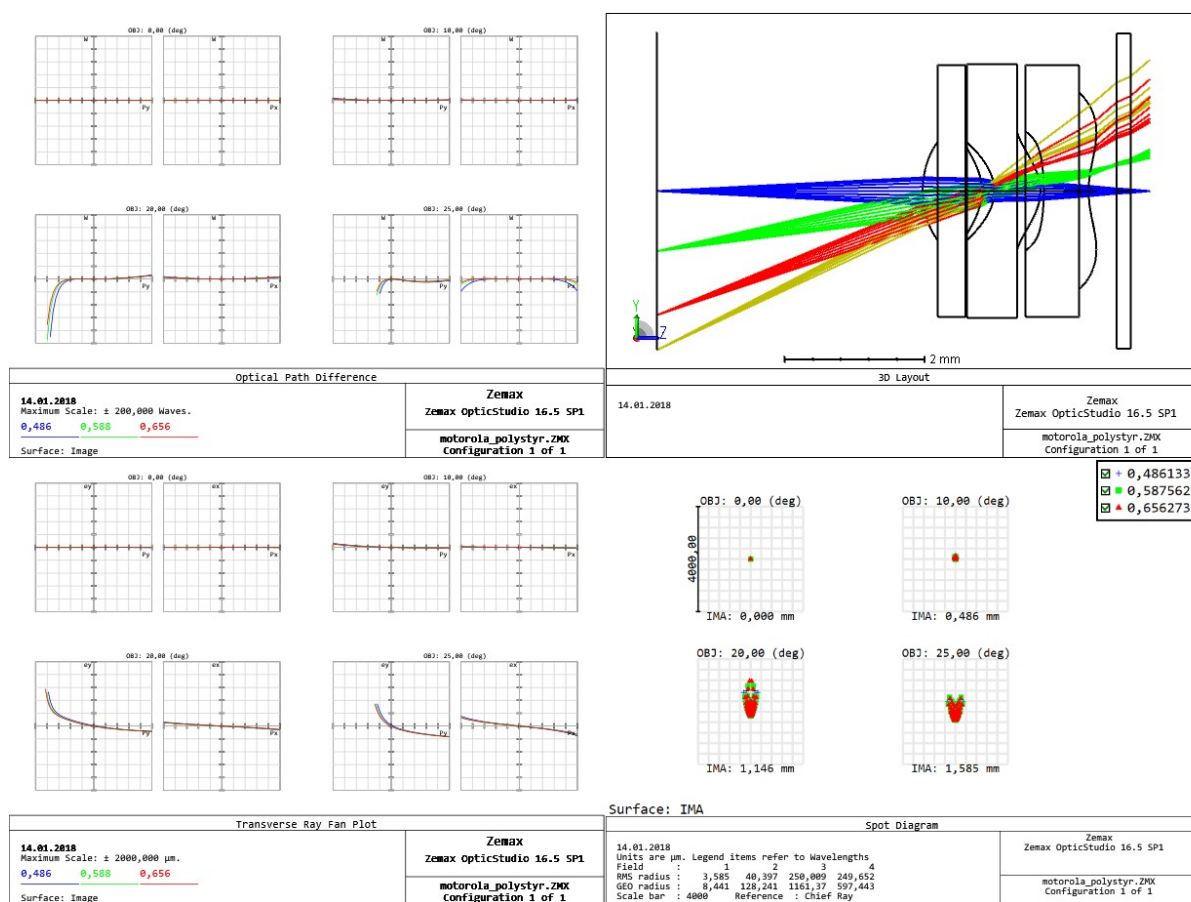
$$\frac{2\,950 \mu\text{m}}{2\,561 \text{zj}} \approx 1,15 \frac{\mu\text{m}}{\text{zj}} \sim 2,3 \frac{\mu\text{m}}{\text{pix}}$$

Jelikož však ve fototestu telefon prokázal schopnost v tomto rozměru rozlišit pouze $1\,333,3 \text{ pix}$ velikost stopy pak podle fototestu odpovídá:

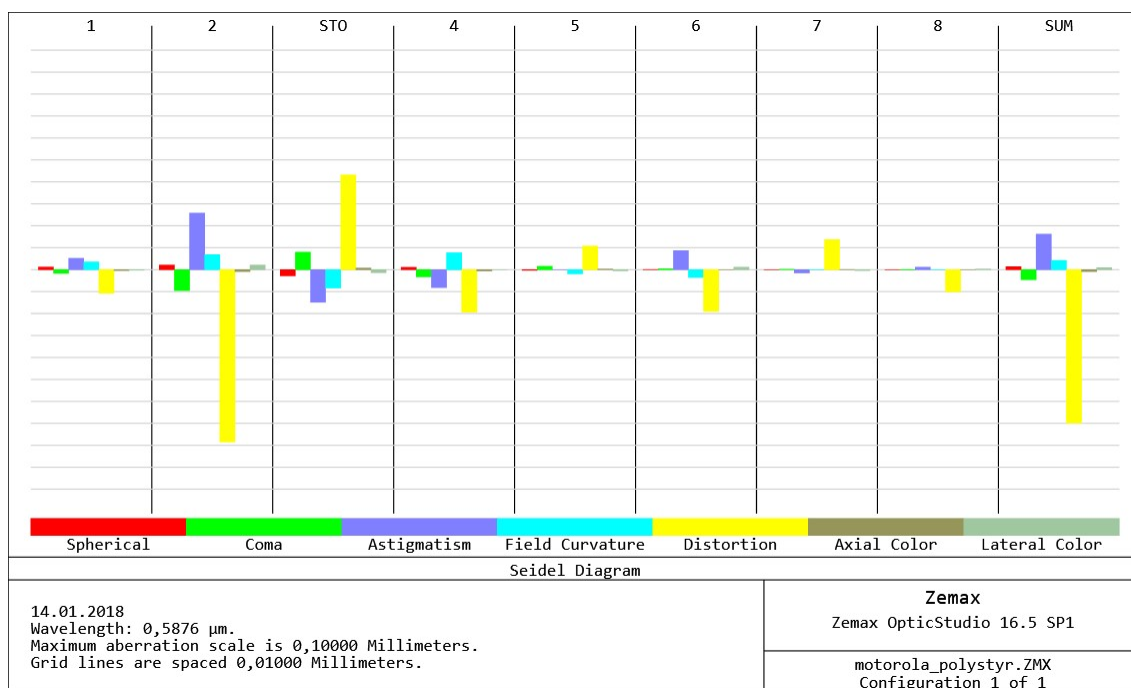
$$\frac{2\,950 \mu\text{m}}{1\,334,3 \text{pix}} \approx 2,21 \frac{\mu\text{m}}{\text{pix}} \sim 4,42 \frac{\mu\text{m}}{\text{pix}} .$$

4.3 Výsledky a interpretace

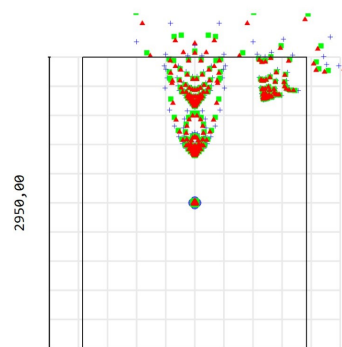
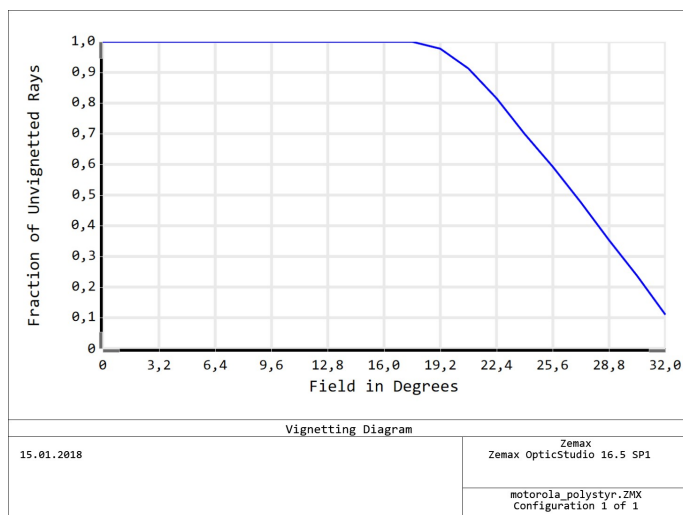
Výsledky jsou viditelné na obrázku 4.7. Nakonec byl pro tuto simulaci vybrán znovu materiál polystyr, který má nejlepší výsledky. Pak zde RMS radius ve středu je $3,5 \mu\text{m}$ (zhruba trojnásobek vypočítané velikosti) a se vzdáleností od středu se dost zvětšuje, což ukazuje že mimoosové vady nejsou dobře kompenzovány. Simulace také ukázala že objektiv je zatížen vignetací, jak lze vidět na obrázku 4.9b.



Obr. 4.7: Výsledky simulace telefonu Motorola moto C.



Obr. 4.8: Diagram zobrazující Seidelovy koeficienty pro jednotlivé povrchy a také pro celý systém. Červená je sférická vada, zelená je koma, astigmatismus je fialový, zklenutí tyrkysové, zkreslení žluté, příčná barevná vada hnědá a podélná barevná vada hnědozelená.



(a) Závislost vignetace na pozorovacím úhlu.

(b) Stopy mimoosových předmětů s vyznačenou velikostí čipu.

Obr. 4.9: Projevy vignetace u Motoroly.

5 POROVNÁNÍ A NÁVRH VYLEPŠENÍ

5.1 Srovnání telefonů

Po podrobení fototestům lze na první pohled reálně rozeznat rozdíl mezi levnějším a dražším telefonem, kdy iPhone má asi třikrát vyšší rozlišení než Motorola, přičemž ani jeden objektiv se nedokáže svým rozlišením přiblížit ani na polovinu rozlišení čipu. Určitou roli zde určitě také hraje struktura čipu, kdy každé dva sousední pixely sdílí polovinu své informace, a také softwarové zpracování signálu z jednotlivých zobrazovacích jednotek. Ve výsledných obrazech má iPhone celou plochu zhruba stejně kvalitně zobrazenou, nelze zde okem rozeznat rozdíly mezi středem a okrajem obrazu. Kdežto u Motoroly lze vidět značné zhoršení kvality směrem k okraji obrazu a dochází k projevu barevné vady.

Co se týče analýzy kamerového modulu a jeho simulace tak zde jednoznačně dopadl lépe iPhone ačkoli obraz osového bodu byl větší tak ty mimoosové jsou zhruba stejně velké, kdežto u Motoroly se velikost stopy zvětšuje se vzdáleností od osy.

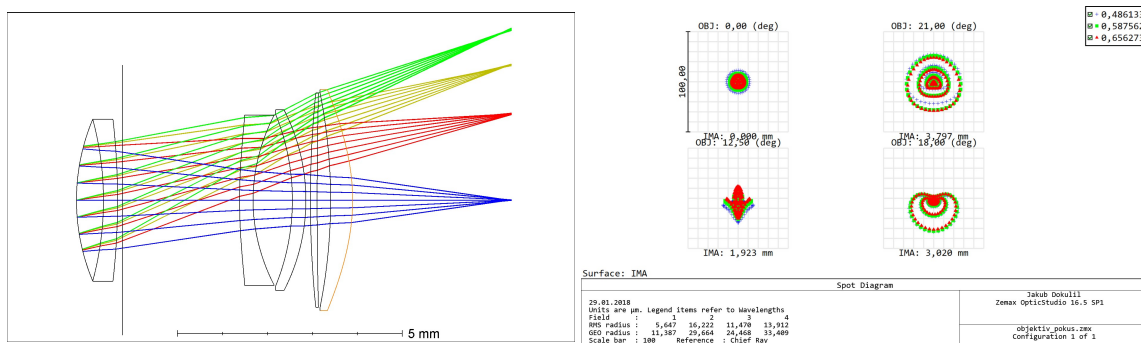
5.2 Konstrukce vylepšeného objektivu.

Pro optimalizaci zobrazení je vhodné navrhnout větší objektiv s použitím skleněných optických členů. Takový objektiv je vhodně navrhnout odnímatelný, aby nevyčníval z konstrukce tenkého smartphone, k tělu jej lze uchytit třeba bajonetem nebo magnety.

Objektiv vychází z konstrukce Petzvalova objektivu, tj. obsahuje achromatický dublet (dublet je složen z optických skel BK a SF1), clonu a dvě spojné čočky, avšak pro minimalizaci vad zobrazení byly použity čtyři místo dvou čoček tvořící zadní část objektivu. Objektiv byl navrhnout s předmětovou ohniskovou vzdáleností $f' = 7,8 \text{ mm}^1$, a clonovým číslem od 3,6 do 22. Soustava měří od vstupní pupily k čipu necelý 1 cm. Objektiv dále obsahuje clonu jejíž velikost lze měnit od clonového čísla 3,6 do 22.

Jeho výhodou oproti zanalyzovaným je především kvalitnější zobrazení mimoosových bodů které mají menší stopu než ty u analyzovaných telefonů, avšak objektiv je velmi zatížen zkreslením.

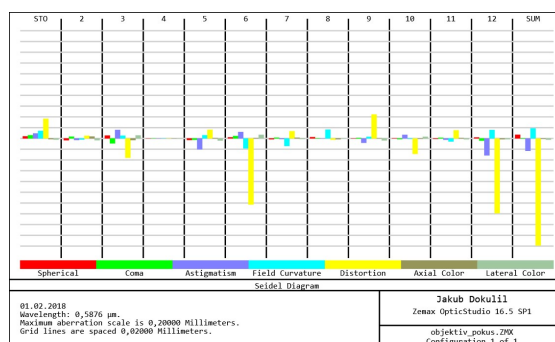
¹To je ekvivalentní zhruba 55 mm při použití fullframe (35 mm) čipu.



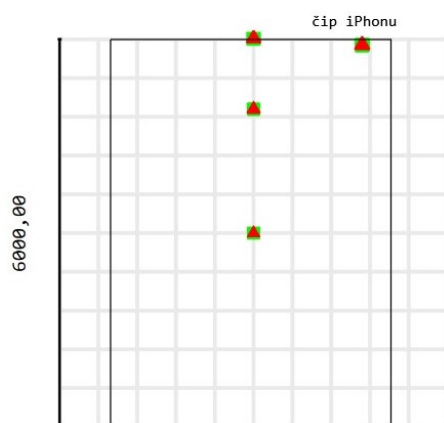
Obr. 5.1: Layout a Spot diagramy navržené soustavy.



(a) Obrázek zobrazený tímto objektivem.



(b) Graf ukazující zatížení jednotlivých povrchu a celého systému vadami.



(c) Stopy v obrazové rovině při zobrazení více mimoosových bodů s vyznačenou přibližnou velikostí čipu iPhone.

Obr. 5.2: Další obrázky k navrhnutému objektivu.

poloměr křivosti	vzdálenost povrchů	materiál	poloměr	a_2	a_4	a_6	a_8
4,64	0,6	BK7	1,800				
-6,884	0,314	SF1	1,800				
-15,817	0,104	-	1,800				
	2,61	clona	od 0,43 mm do 1,54 mm				
-7,578	0,3	POLYSTYR	1,837	0,107	$-2,17 \cdot 10^{-03}$	$-1,00 \cdot 10^{-05}$	
3,254	0,875	-	1,891	- 0,024	$-3,85 \cdot 10^{-03}$		
-5,055	0,3	POLYSTYR	1,909				
-4,378	0,1	-	2,005				
23,881	0,15	POLYSTYR	2,367				
98,23	0,3	-	2,382				
-12,173	0,49	POLYSTYR	2,397				
-30,89	3,537	-	2,455	- 0,094	$4,30 \cdot 10^{-03}$	$-4,12 \cdot 10^{-04}$	$2,47 \cdot 10^{-05}$

Tab. 5.1: V tabulce jsou uvedeny hodnoty z programu Zemax. Hodnotami a_2, a_4, a_6, a_8 se rozumí koeficienty při členech příslušného řádu.

6 ZÁVĚR

V této práci byly zanalyzovány fotoaparáty dvou telefonů. U těchto fotoaparátů bylo nejprve otestováno jejich rozlišení podle normy ISO 12233. Po otestování rozlišení byly z telefonů demontovány fotografické moduly, které byly naskenovány mikro výpočetním tomografem, ze získaných dat byla soustava simulována v programu Zemax Optic studio z něhož byla získána data o zobrazení, následně byl navrhnout nový objektiv, který, ačkoli je větší, zobrazuje kvalitněji.

Nejprve je vhodné si uvědomit jak precizně jsou tyto fotoaparáty vyrobeny. V důsledku snahy snížit výrobní náklady jsou soustavy vyráběny z plastových materiálů. Těmito soustavami jsou zobrazovány předměty za vzniku stopy velikosti dvou až tří mikrometrů. Zatímco u zrcadlovek má jeden pixel na čipu velikost zhruba trojnásobnou velikost a to jsou k nim používány velice propracované objektivy vyrobené z přesně vybroušených čoček.

Fototesty ukázaly že objektiv limituje soustavu v zobrazení. V obou případech výsledný obraz měl zhruba třikrát menší rozlišení než čip a toto rozlišení se zhoršuje s ubývajícím světlem. V tomto případě lze jednoznačně říct že dražší telefon má lepší fotoaparát. iPhone krom lepšího rozlišení také nabízí obraz jehož kresba je kvalitní, není zatížen barevnou vadou, avšak je zkreslen. Levná Motorola oproti tomu nabízí mnohem horší kvalitu zobrazení, dochází zde ke schodování a barevné vadě.

Výsledky simulace soustav lze považovat za nepřesné. Velmi pravděpodobně kamerový modul nebyl naskenován dostatečně přesně. Přeci jen je pochybné aby software dokázal z stopy (ještě k tomu osově) o poloměru $3\ \mu\text{m}$ (tj. asi 6 pix) odfiltrovat informace tak, aby se to projevilo jako stopa která bude maximálně $2\ \mu\text{m}$ veliká, u iPhone to bylo ještě více. Při pohledu na mimoosové body, které jsou mnohonásobně větší než ty osové, už vůbec nelze považovat za softwarově korigovatelné. K nekvalitě jejich zobrazení dochází hlavně kvůli astigmatizmu a zklenutí obrazového pole, krom toho je obraz často ještě zkreslen.

Pro zlepšení kvality obrazu byl navržen objektiv, obsahující také achromatický dublet vyrobený z optických skel BK7 a SF1. Objektiv také má clonu umožňující regulaci paprčků a to od clonového čísla 3,6 do 22. Objektiv dále obsahuje 4 čočky s 2 asférickými povrchy. Tento objektiv je schopen dosáhnout výborného rozlišení, které rozhodně naplno využívá rozlišovací schopnosti čipu iPhone. Jeho nevýhodou avšak je zkreslení obrazu.

Závěrem lze říct že se nepodařilo dostatečně přesně zanalyzovat kamerové moduly dnešních smartphones, avšak se povedlo změřit rozlišení těchto fotoaparátů a také navrhnout objektiv. Do budoucna lze určitě navrhnout více objektivů pro různé žánry fotografie umožňující třeba optický zoom.

Já jsem pro účely této práce nasnímal a zpracoval fototesty obou telefonů, poté z nich demontoval kamerové moduly, zpracoval data z CT a následně simuloval v programu Zemax Optic Studio, ve kterém jsem také navrhl alternativní objektiv.

LITERATURA

- [1] FUKA, Josef a Bedřich HAVELKA. *Optika a atomová fyzika*. [Díl] 1, Optika. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1961. Učebnice pro vysoké školy.
- [2] HAVELKA, Bedřich. *Geometrická optika*. 1. díl. Praha: ČSAV, 1956. Práce ČSAV. Sekce matematicko-fyzikální.
- [3] HAVELKA, Bedřich. *Geometrická optika*. 2. díl. Praha: ČSAV, 1956. Práce ČSAV. Sekce matematicko-fyzikální.
- [4] BASS, Michael. *Handbook of optics*. 2nd ed. /. New York: McGraw-Hill, 2001. ISBN 0-07-047974-7.
- [5] NOVOTNÝ, Jan. FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ VUT. Brno, 2017. Přednášky předmětu Základy optiky.
- [6] MALÝ, Petr. *Optika*. Praha : Karolinum, 2013. 978-80-246-2246-0.
- [7] BAJER, Jiří. *Optika 1*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2015. Učebnice. ISBN 978-80-244-4532-8.
- [8] Mobilmania. Nokia 6700 classic. [Online] [Citace: 21. 6. 2017.] <https://www.mobilmania.cz/nokia-6700-classic>.
- [9] Mobilmania. Sony Xperia U. [Online] [Citace: 3. 9. 2017.] <https://www.mobilmania.cz/sony-xperia-u>
- [10] Slovník fotografických pojmů. Foto Román. [Online] [Citace: 1. 10. 2017] http://fotoroman.cz/glossary/2_sfera.htm.
- [11] Astigmatismus – Lexikon der Physik. Spektrum.de. [Online] [Citace: 22. 10 2017.] <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/astigmatismus/810>.
- [12] Nekupujte „zajíce v pytli“ aneb Test objektivu před koupí. *FotošKoda* [online]. [cit. 2017-11-26]. Dostupné z: <https://www.fotoskoda.cz/920-nekupujte-zajice-v-pytli-aneb-test-objektivu-pred-koupi/>
- [13] Charge-coupled device. *In: Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-02-16]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled_device
- [14] TABULKA ISO 12233 PRO DIGITÁLNÍ FOTOGRAFICKÉ PŘÍSTROJE. FotošKoda [online]. [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: https://www.fotoskoda.cz/images/contentpics/%C4%8D1%C3%A1nky%20na%20front/zku%C5%A1ebn%C3%AD_diagram/DCR3.inCZ.12.pdf

- [15] *ISO 12233: Photography – Electronic still picture imaging – Resolution and spatial frequency responses.*
- [16] *ISO_12233-reschart.ai* [online]. [cit. 2017-11-29]. Dostupné z: http://www.graphics.cornell.edu/~westin/misc/ISO_12233-reschart.pdf
- [17] Šablona pro tvorbu BP/DP – Latex [online]. Brno [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <http://latex.feec.vutbr.cz/sablona/>
- [18] Zemax: *Návod do cvičení* [online]. Brno [cit. 2018-02-02]. Dostupné z: <http://physics.fme.vutbr.cz/files/75/zemax.pdf>
- [19] *Nobelprize.org: Nobel Prize in Physics 2009* [online]. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2009/

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Vignetace	5
1.2	Hloubka ostrosti	5
1.3	Hyperfokální vzdálenost	6
1.4	Čipy.	7
1.5	Fotografický test podle normy ISO 12233 [15]	8
1.6	Označené prvky obrázku pro část 1.2.2[15]	8
1.7	Čočka zatížená otvorovou vadou	11
1.8	Graf podélné otvorové vady.	12
1.9	Zkreslení	12
1.10	Obrázky ke komě [5].	13
1.11	Obrázek k astigmatizmu	14
1.12	Obrázky k astigmatizmu.	15
1.13	Projev barevné vady.	15
2.1	Postup při rozebírání telefonu.	18
2.2	Rozměry fotoaparátu.	18
2.3	zobrazovací soustava a její zabudování v telefonu	19
2.4	Schéma opt. soustavy fotoaparátu telefonu Nokia	20
2.5	výsledky zkoumání čipu z Nokie pod mikroskopem	20
2.6	výsledky zkoumání čipu z Nokie pod elektronovým mikroskopem	21
2.7	samotný čip z fotoaparátu Nokie	21
2.8	„Sloupnutý“ čip Nokie pod SEM	22
2.9	Detail povrchu proloženého regresní křivkou.	22
3.1	Závislost naměřeného rozlišení na osvitu.	23
3.2	Obrázek vyfocený iPhonem SE.	24
3.3	Grafy k rozlišení iPhonu.	25
3.4	Obrázky vyfocené s různým osvitem.	26
3.5	Detaily obrázku vyfocené s nejvyšším osvitem.	26
3.6	Fotografie demontáže telefonu.	27
3.7	Postup získávání dat z CT skenu.	28
3.8	Porovnání výsledků CT-skenu se simulací v Zemaxu	29
3.9	Výsledky simulace	29
3.10	Seidelovy koeficienty pro jednotlivé povrchy iPhonu.	30
3.11	Projevy vignetace u iPhonu.	30
4.1	Závislost naměřeného rozlišení na osvitu.	31
4.2	Obrázek vyfocený Motorolou moto C.	32
4.3	Grafy k rozlišení Motoroly.	33
4.4	Další obrázky k fototestům Motoroly.	34
4.5	Obrázky vyfocené za různých podmínek.	34
4.6	Porovnání simulace a CT-skenu.	35

4.7	Výsledky simulace telefonu Motorola moto C.	36
4.8	Seidelovy koeficienty pro jednotlivé povrchy Motoroly.	37
4.9	Projevy vignetace u Motoroly.	37
5.1	Layout a Spot diagramy navržené soustavy.	40
5.2	Další obrázky k navrhnutému objektivu.	40
A.1	Závislost indexu lomu plastových materiálů na vlnové délce.	55
B.1	Profily a jejich regresní křivky	57
B.2	Spot diagramy u Nokie	58
C.5	Spot diagramy u iPhonu	63
D.4	Spot diagramy u iPhonu	68

SEZNAM TABULEK

2.1	Tabulka s hodnotami koeficientů (p - přední povrch, z - zadní povrch).	20
3.1	Porovnání kvality zobrazení kamery při různých intenzitách osvitů. . .	24
3.2	Hodnoty jednotlivých koeficientů regresní rovnice vypočítaných programem SciDAVis.	27
4.1	Porovnání vlastností kamery při různých intenzitách osvitů.	32
5.1	V tabulce jsou uvedeny hodnoty z programu Zemax. Hodnotami a_2 , a_4 , a_6 , a_8 se rozumí koeficienty při členech příslušného řádu.	41

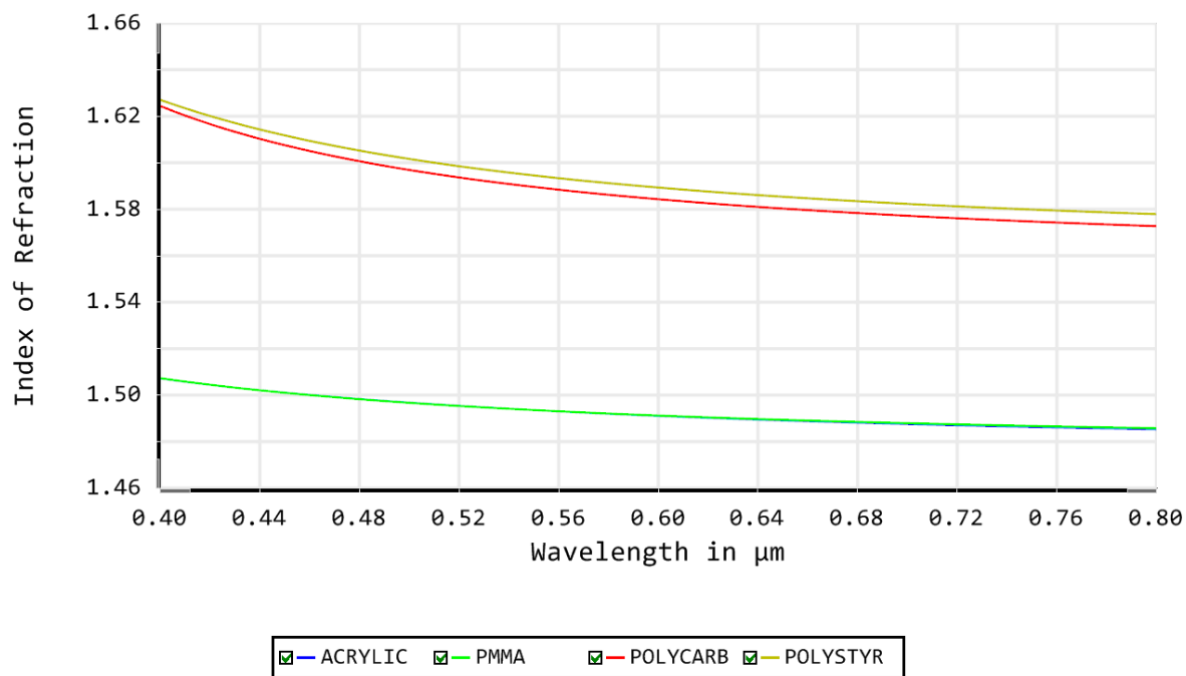
SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

lph	„line widths per picture height“, jednotka uvádí hodnotu prostorové frekvence čar vzhledem k výšce stránky (tj. kolik stejně širokých rovnoměrně rozprostřených pruhů se vejde na výšku stránky)
f'	obrazové ohnisko
pix	Počet pixelů udává kolik bodů je v daném obrazci rozlišeno.
zj	Zobrazovací jednotka na čipu, citlivá na určitý rozsah světelného spektra.
Φ	aberace vlnoplochy
polystyr	Tvrzený polystyrén, zkratka je takto používána v Zemaxu.
polycarb	Polykarbonát, zkratka je takto používána v Zemaxu.
acrylic	Polymethylmetakrylát, zkratka je takto používána v Zemaxu.
pmma	Polymethylmetakrylát, zkratka je takto používána v Zemaxu.
BK7	BK7 je korunové sklo které je často používané v optických přístrojích díky nízkým výrobním nákladům, stálosti a nízké absorpci.
SF1	SF1 je flintové sklo které je často používané v optických přístrojích díky nízkým výrobním nákladům.

SEZNAM PŘÍLOH

A	Optické vlastnosti plastových materiálů	55
B	Nokia	57
	B.1 Regresní křivky	57
	B.2 Spot diagramy	58
C	iPhone	59
	C.1 Regresní křivky	59
	C.2 Spot diagramy	62
D	Motorola	65
	D.1 Spot diagramy	67

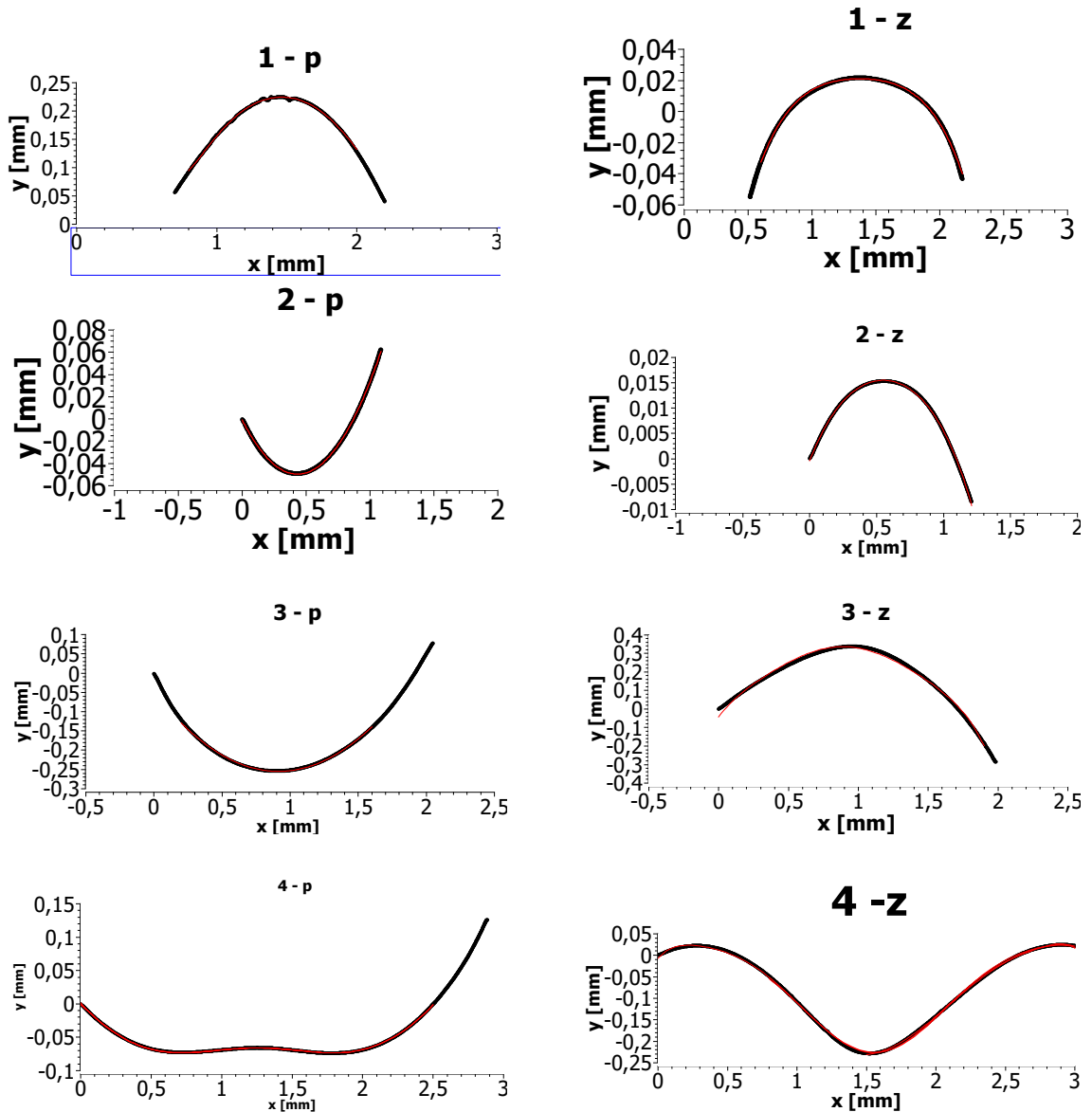
A OPTICKÉ VLASTNOSTI PLASTOVÝCH MATERIÁLŮ



Obr. A.1: Závislost indexu lomu plastových materiálů na vlnové délce, jejich vlastnosti byly převzaty z [4].

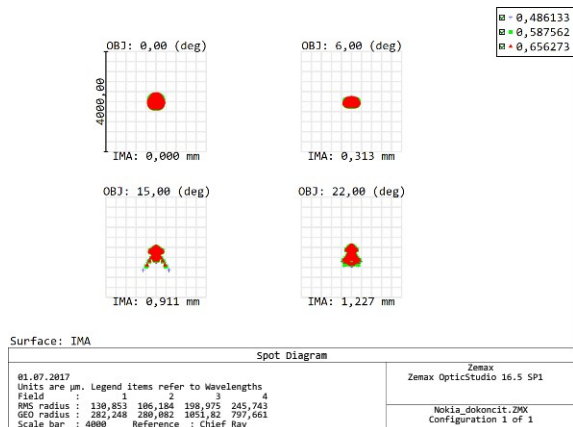
B NOKIA

B.1 Regresní křivky

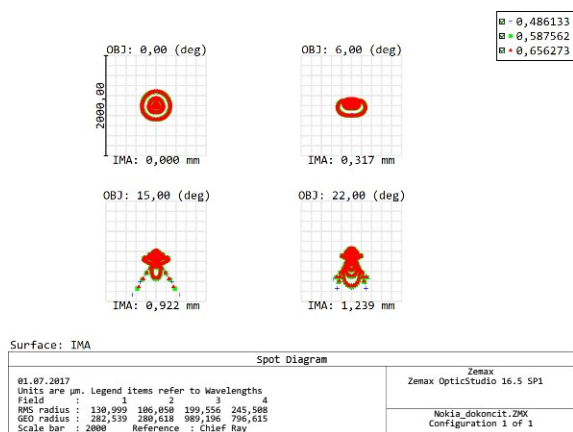


Obr. B.1: Na obrázku jsou jednotlivé profily proložené regresními křivkami podle rovn. 2.1. Profily jsou uspořádány tak, že na každém řádku jsou obra profily jedné čočky, na levo je ten blíž vstupní pupile a napravo ten dál od vstup. pupily.

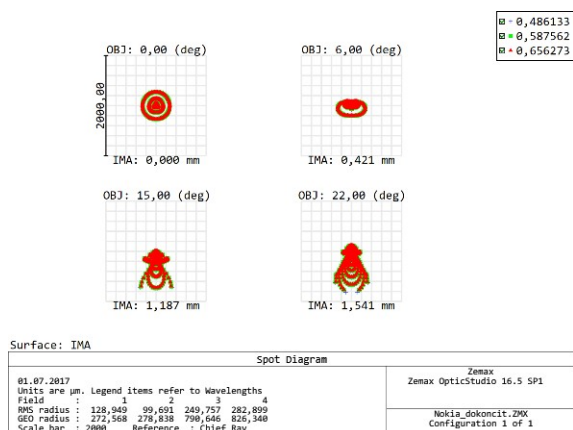
B.2 Spot diagramy



(a) Spot diagramy při použití materiálu polystyr



(b) Spot diagramy při použití materiálu polycarb

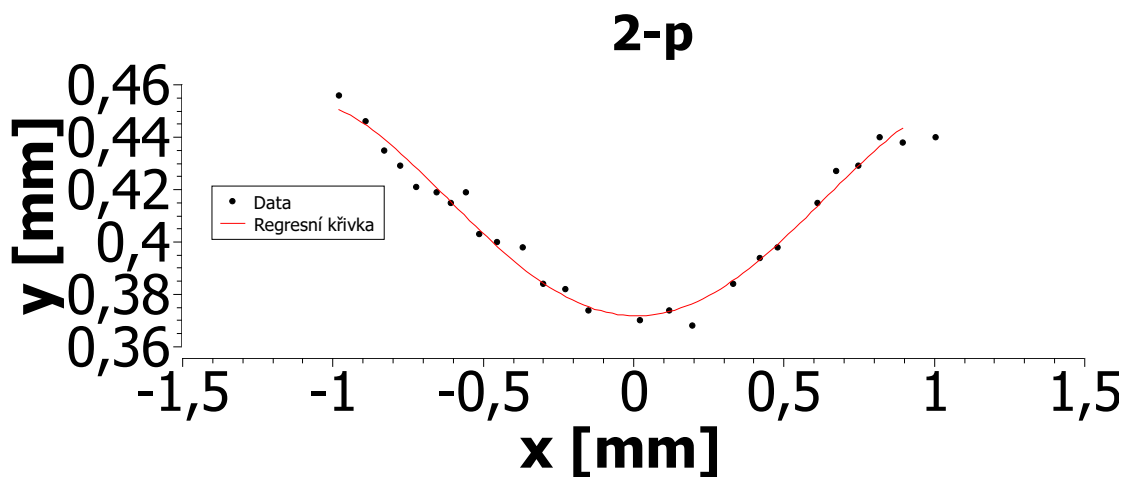
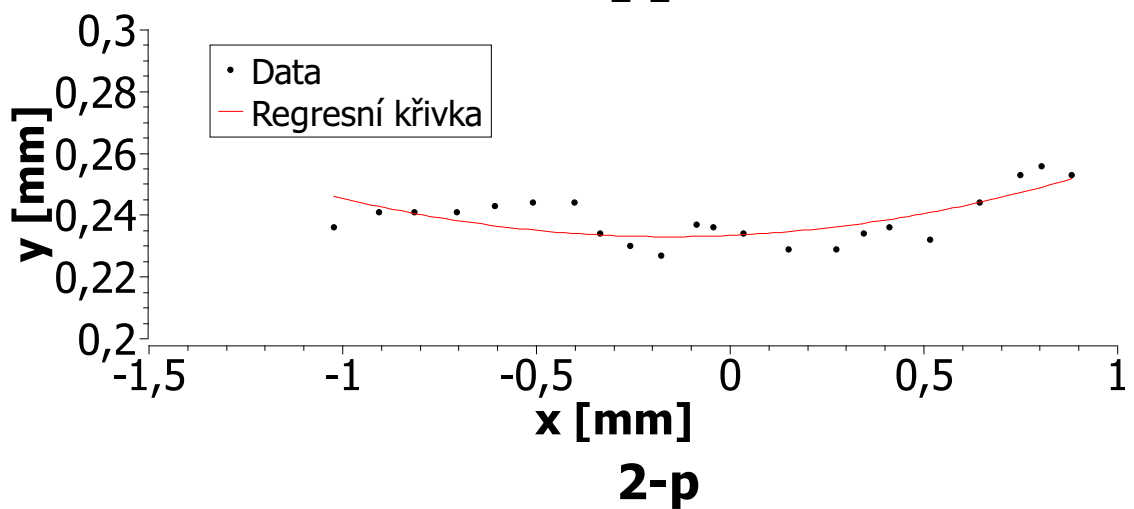
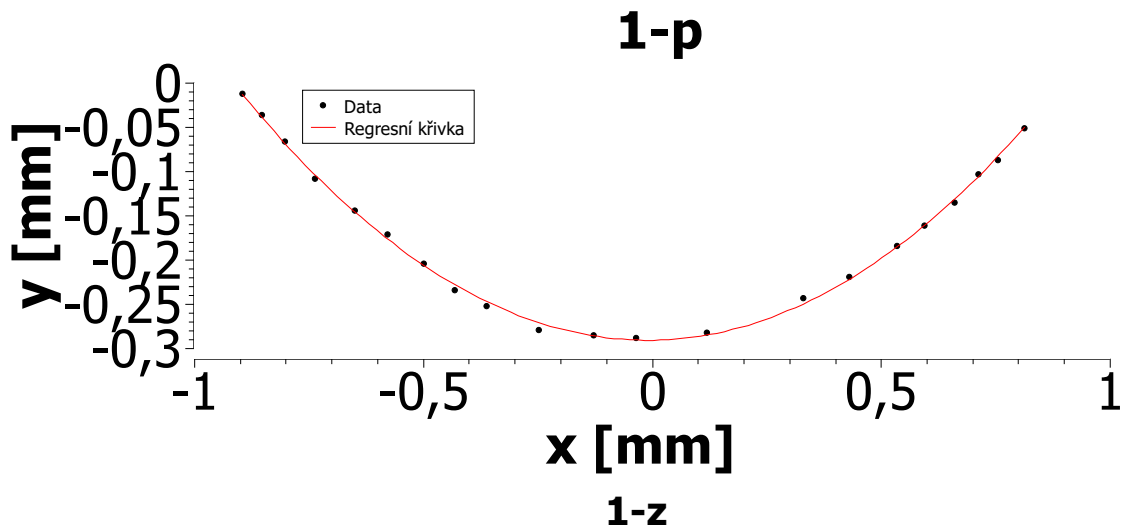


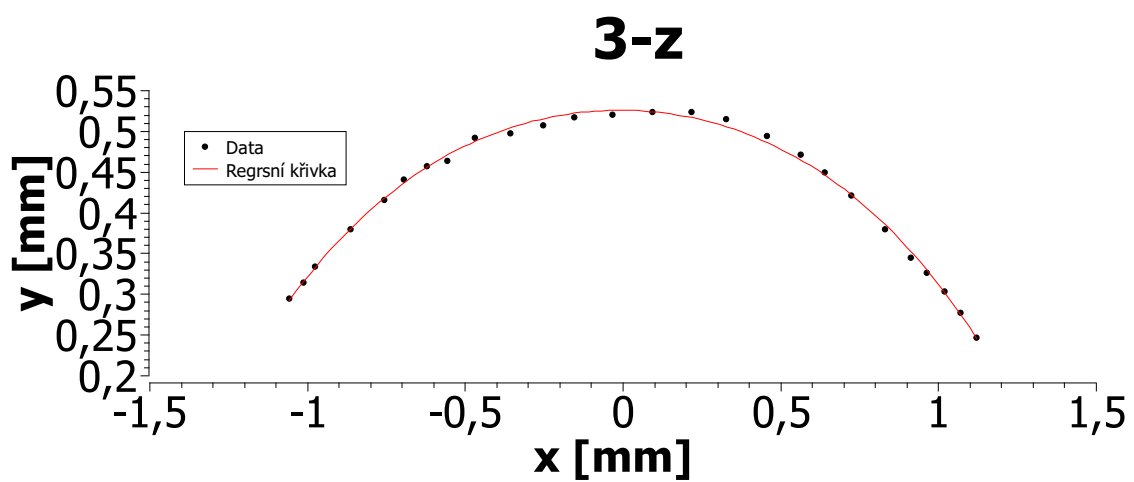
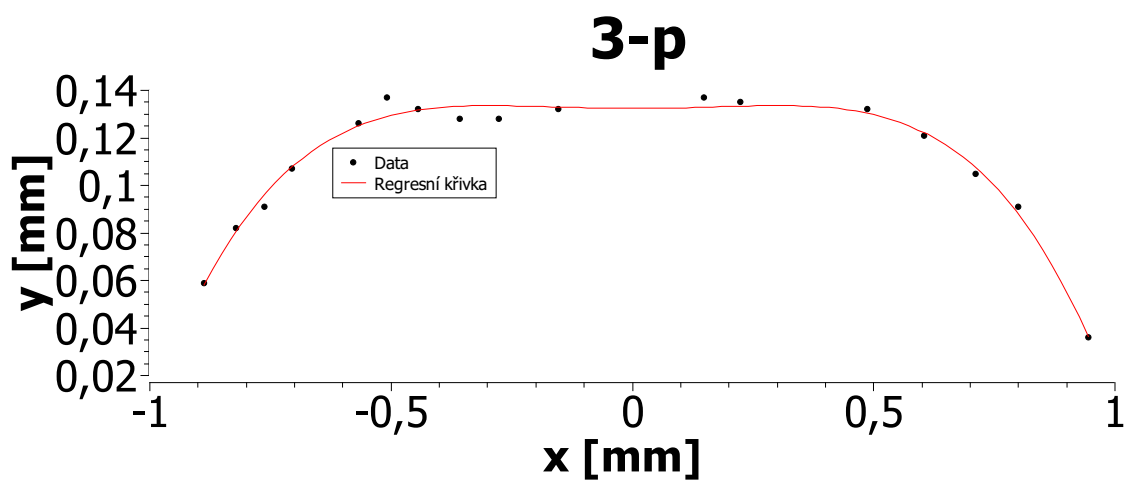
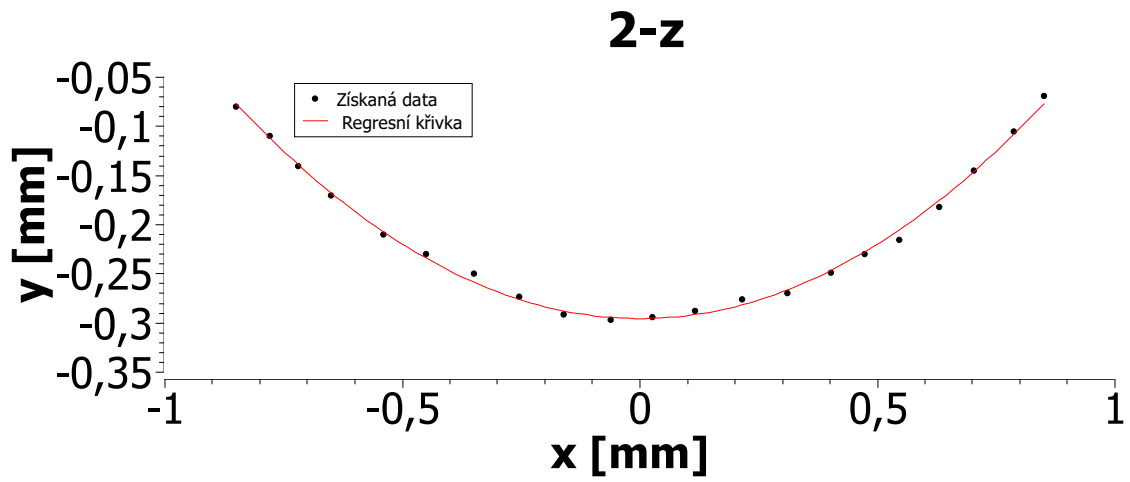
(c) Spot diagramy při použití materiálu PMMA

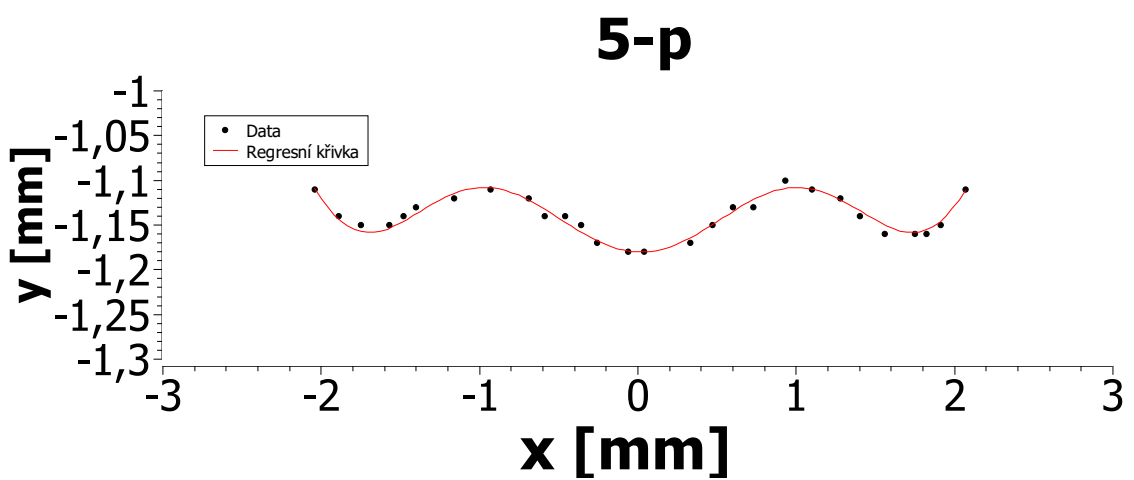
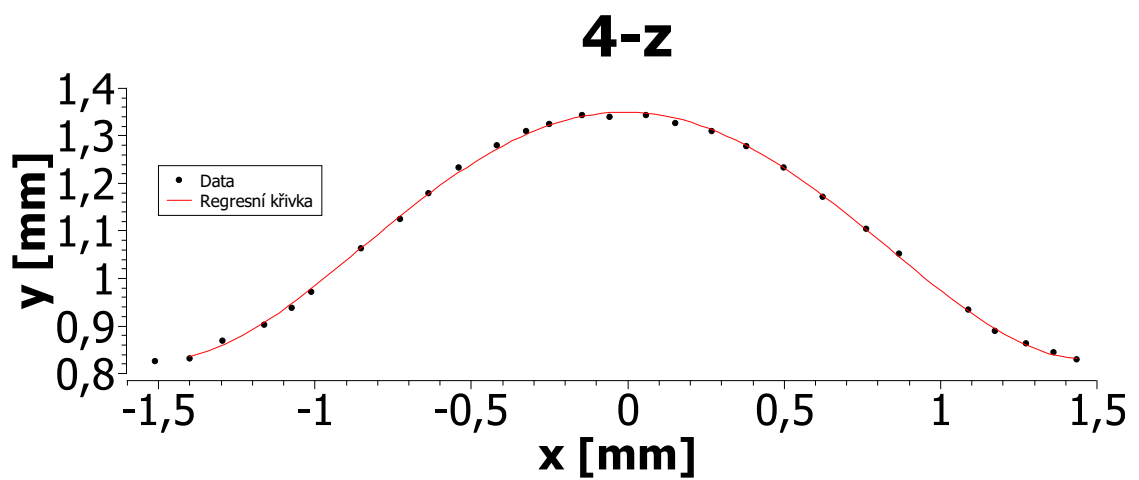
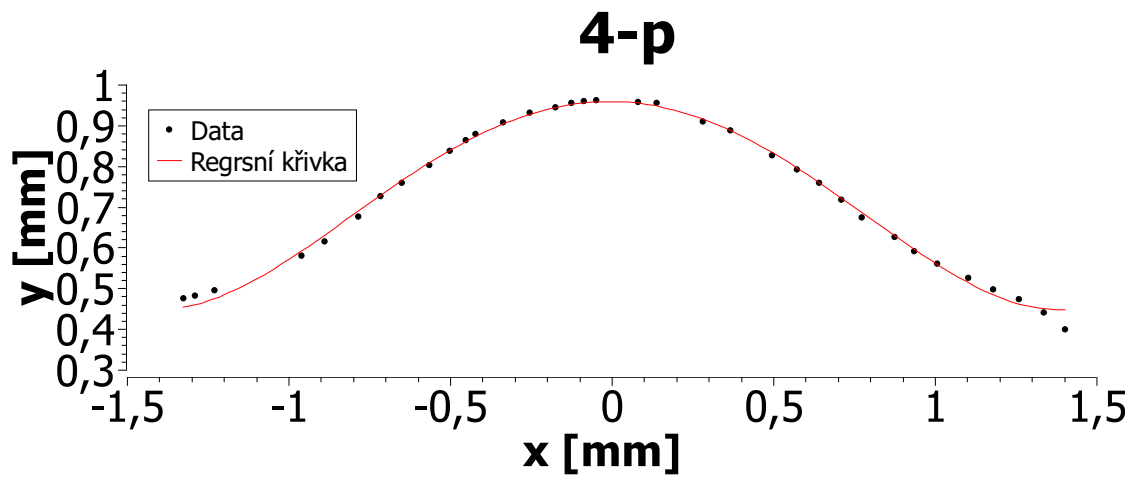
Obr. B.2: Na obrázku jsou *spot-diagramy* soustavy pro materiály PMMA, POLY-CARB a POLYSTYR (materiál ACRYLIC byl vynechán, jelikož je velmi podobný jako PMMA, který neměl dobré výsledky). Z obrázku lze vidět, že nejlepší výsledky má POLYCARB a POLYSTYR. Již je viditelné zatížení soustavy komou.

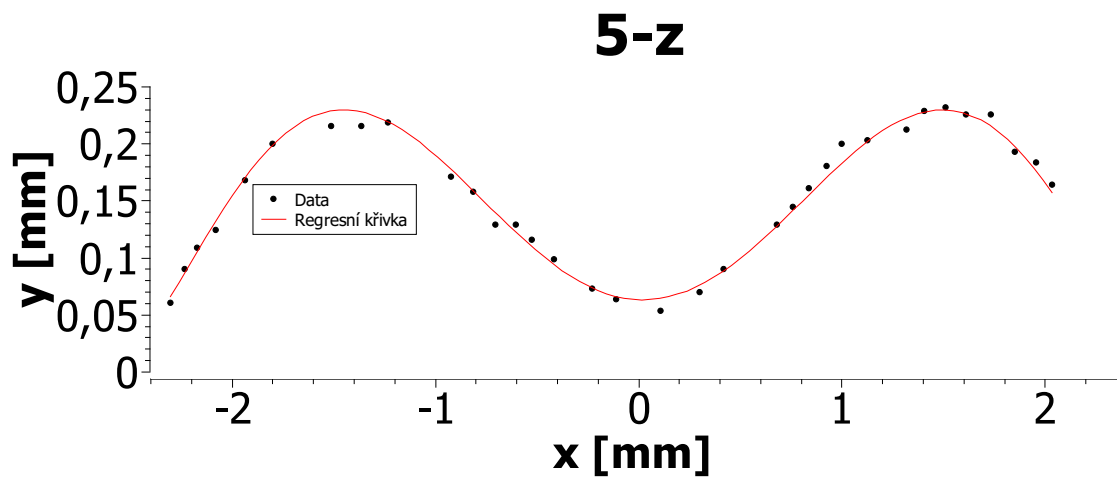
C IPHONE

C.1 Regresní křivky

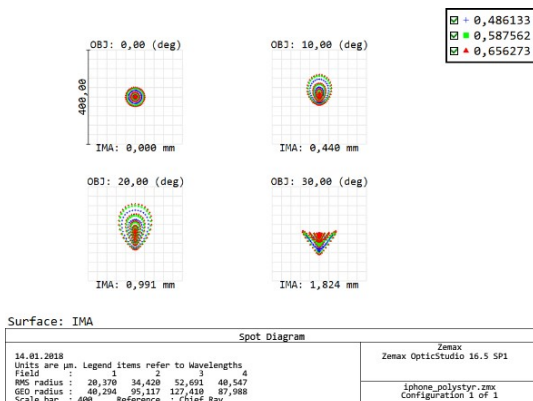




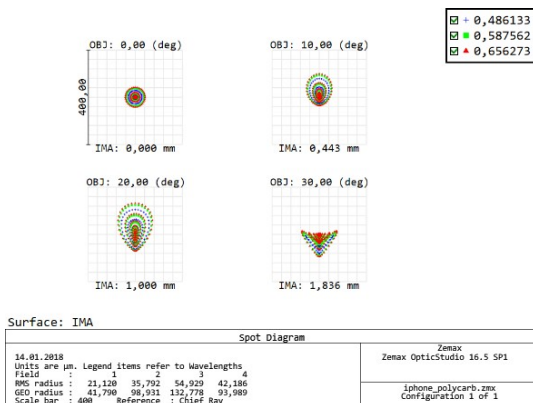




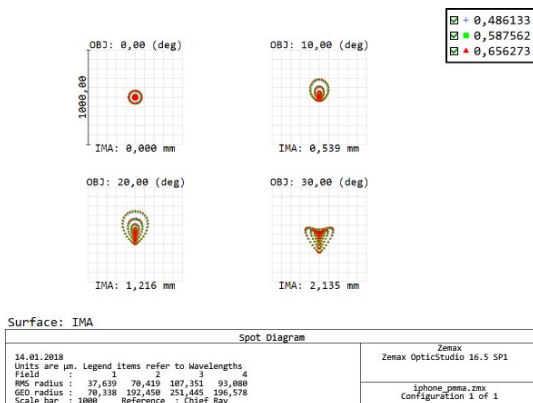
C.2 Spot diagramy



(a) Spot.diagramy při použití materiálu polystyr.



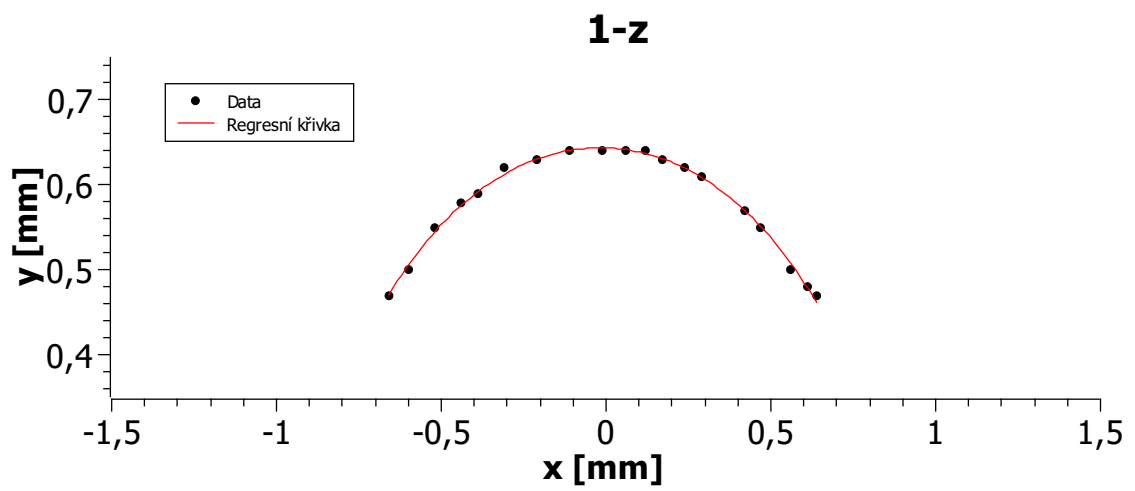
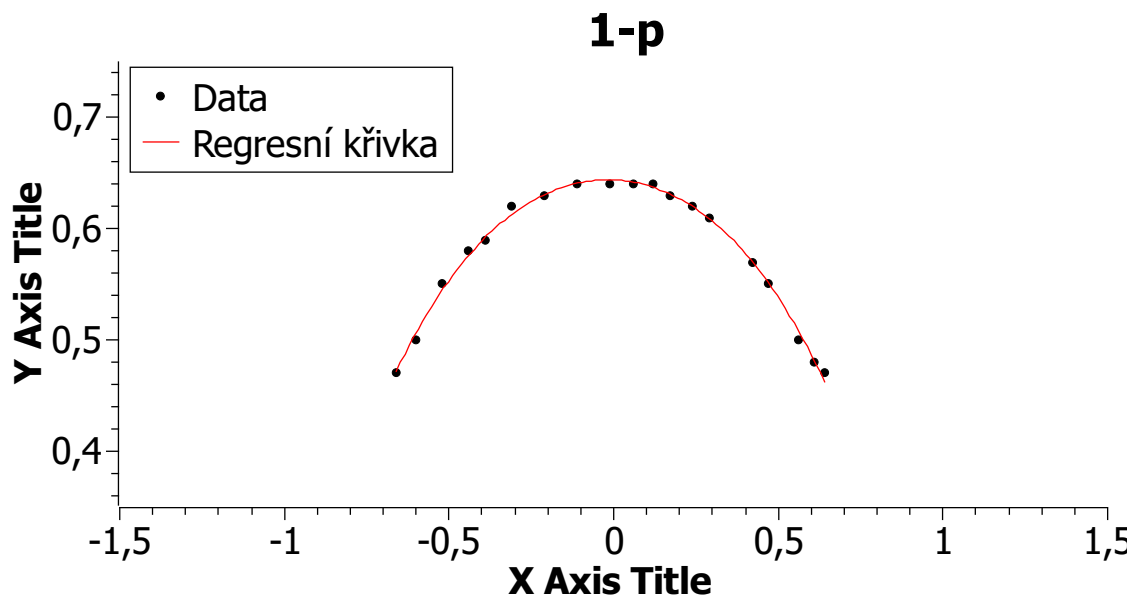
(b) Spot.diagramy při použití materiálu polycarb

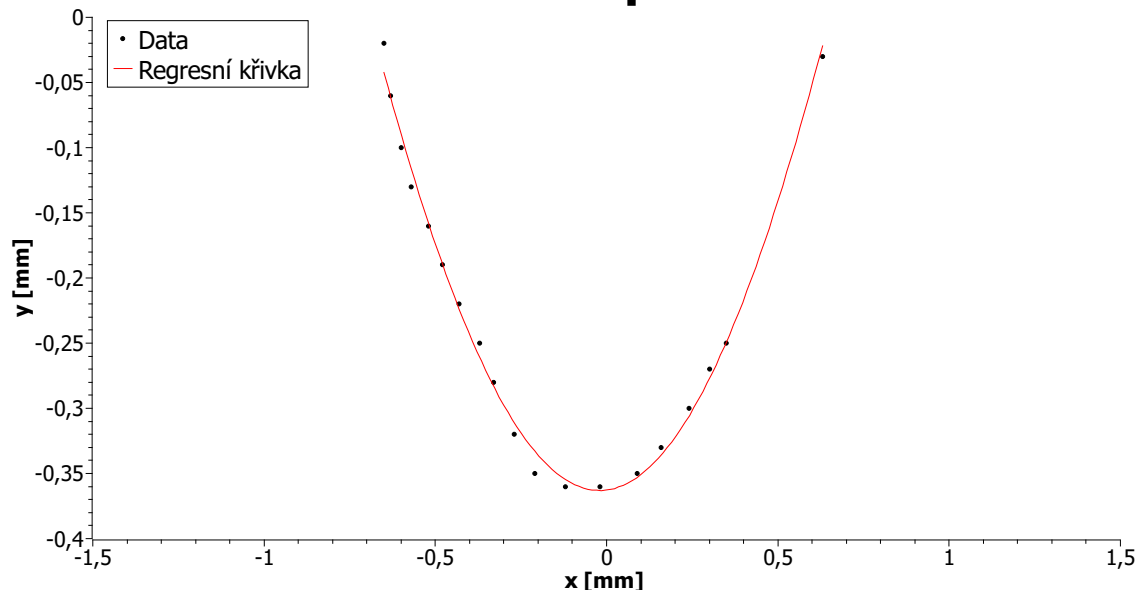
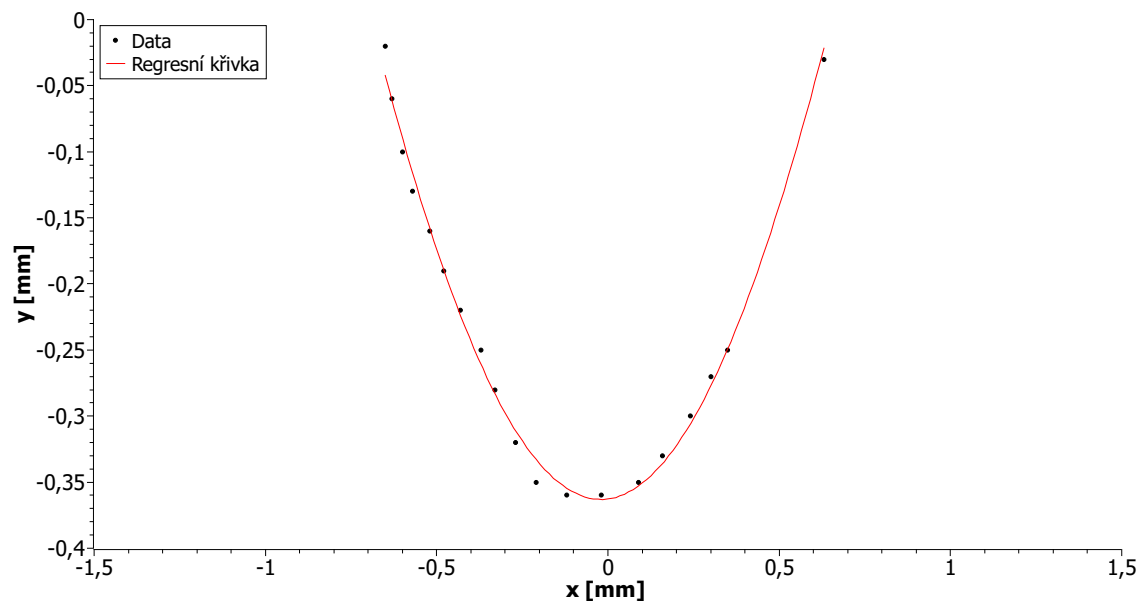


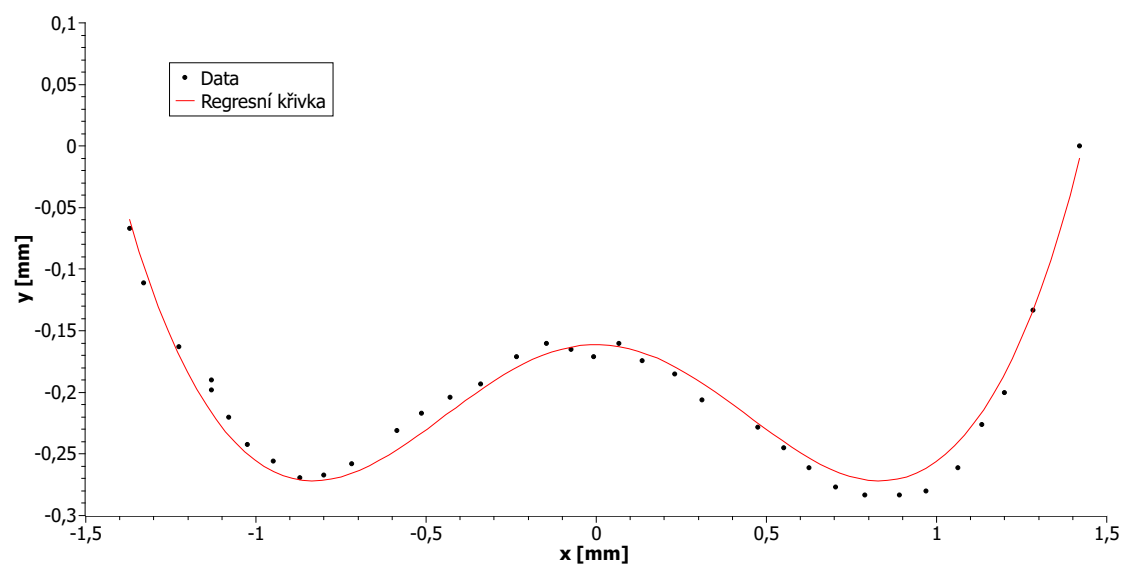
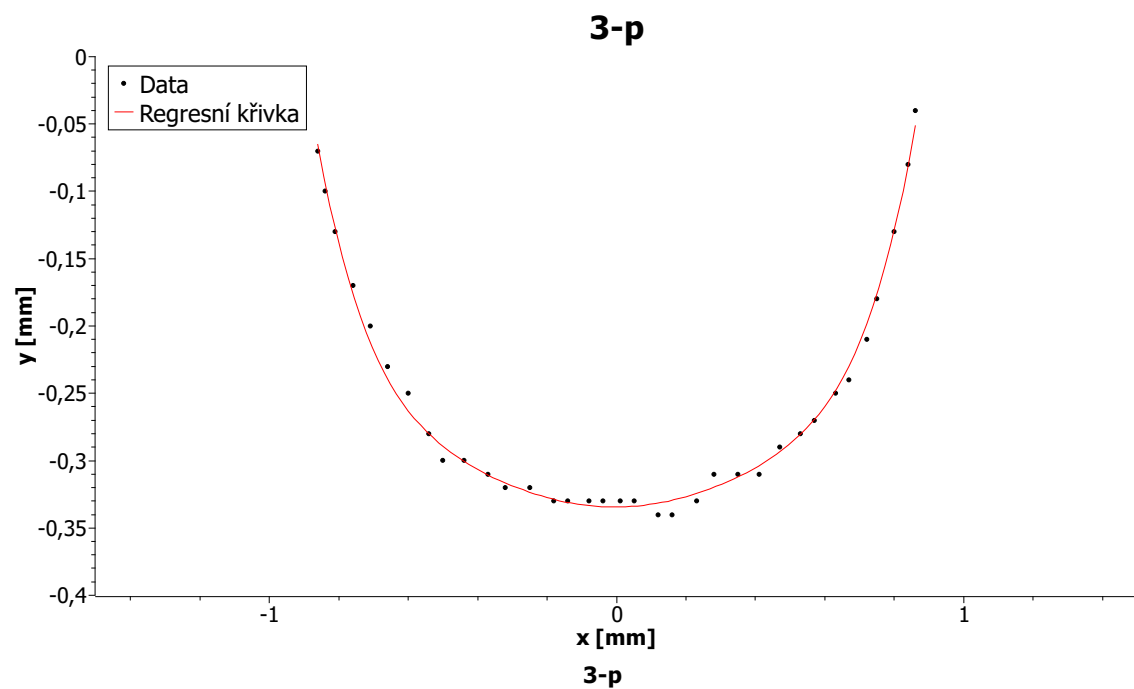
(c) Spot.diagramy při použití materiálu PMMA

Obr. C.5: Na obrázku jsou *spot-diagramy* soustavy pro materiály PMMA, POLY-CARB a POLYSTYR (materiál ACRYLIC byl vynechán, jelikož je velmi podobný jako PMMA, který neměl dobré výsledky). Z obrázku lze vidět, že nejlepší výsledky polystyr. Proto byl vybrán pro další kroky.

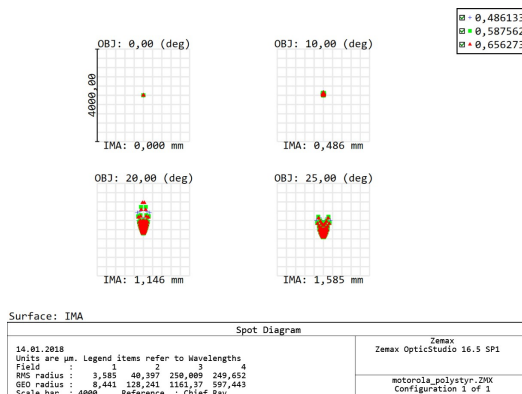
D MOTOROLA



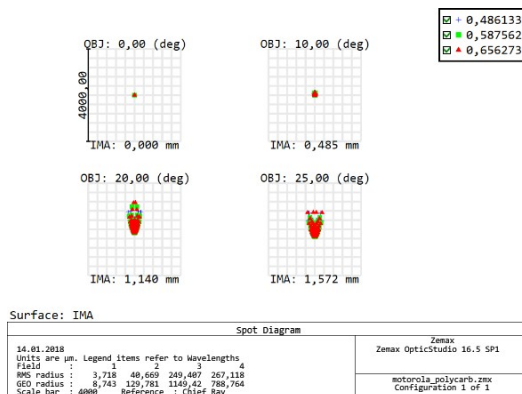
2-p**2-z**



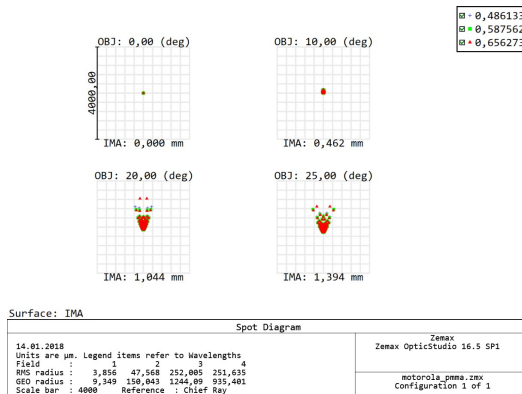
D.1 Spot diagramy



(a) Spot.diagramy při použití materiálu polystyr.



(b) Spot.diagramy při použití materiálu polycarb



(c) Spot.diagramy při použití materiálu PMMA

Obr. D.4: Na obrázku jsou *spot-diagramy* soustavy pro materiály PMMA, POLY-CARB a POLYSTYR (materiál ACRYLIC byl vynechán, jelikož je velmi podobný jako PMMA, který neměl dobré výsledky). Z obrázku lze vidět, že nejlepší výsledky polystyr. Proto byl vybrán pro další kroky.