

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra optiky

**STUDIE KONSTRUKČNÍCH MOŽNOSTÍ  
JEDNODUCHÝCH TERMOVIZNÍCH SYSTÉMŮ**

**Bakalářská práce**



Vypracoval: Jan Hubáček

Vedoucí práce: RNDr. Vladimír Chlup

Studijní obor: Optika a optoelektronika

Datum odevzdání: 30.7.2010

Olomouc

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením RNDr. Vladimíra Chlupa a použil jen uvedených pramenů a literatury.

V Olomouci 30. července 2010 .....

Děkuji RNDr. Vladimíru Chlupovi za odborné vedení bakalářské práce, poskytování rad a materiálových podkladů.

## Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora:	Jan Hubáček
Název práce:	Studie konstrukčních možností jednoduchých termovizních systémů
Typ práce:	Bakalářská
Pracoviště:	Katedra optiky
Vedoucí práce:	RNDr. Vladimír Chlup
Rok obhajoby práce:	2010

### Abstrakt:

Práce se zaměřuje na porovnání možností konstrukce jednoduchých optických systémů ve VIS, MWIR a LWIR oblastech spektra. Porovnává parametry optických materiálů vhodných pro VIS a IR oblasti. Popisuje vliv optického systému na poměr signálu a šumu. Určuje možnosti jednoduchých systémů - singletů, dubletů a tripletů. Pomocí programu OSLO analyzuje několik termovizních optických systémů uváděných v literatuře.

Klíčová slova	termovize, MWIR, LWIR, optické materiály pro IR, funkce přenosu kontrastu - MTF, studená clona, atermalizace optického systému
Počet stran:	72
Jazyk:	český

## Bibliographical identification

Autor's first name and surname: Jan Hubáček

Title: Optical design for infrared systems

Type of thesis: Bachelor's

Department: Department of Optics

Supervisor: RNDr. Vladimír Chlup

Year of presentation: 2010

## Abstract

The thesis confronts possible designs of simple optical systems in the VIS, MWIR and LWIR spectral regions. Characteristics of optical materials suitable for the VIS and IR region are compared and a description of the effects of optical systems on the signal to noise ratio is provided. The prospects of simple lens systems - singlets, doublets and triplets are detailed. Several optical thermography systems reported in the literature are analyzed by means of the OSLO software.

Keywords: thermovision, MWIR, LWIR, IR optical materials, Modulation Transfer Function - MTF, cool stop, athermalization optical system

Number of pages: 72

Language: czech

# Obsah

ÚVOD.....	7
1. TERMOVIZNÍ SYSTÉMY.....	8
1.1. Spektrum elektromagnetických vln.....	8
1.2. Vyzařování slunce a člověka.....	9
1.3. Propustnost atmosféry.....	12
2. ROZDÍLY OPTICKÝCH SYSTÉMŮ PRO VIS A IČ.....	13
2.1. Základní parametry optické soustavy.....	13
2.1.1. Numerická apertura.....	13
2.2. Kvalitativní parametry.....	13
2.2.1. Funkce přenosu kontrastu.....	13
2.2.2. Rozlišovací schopnost.....	14
2.3. Poznámky k vybraným konstrukčním parametrům.....	15
2.3.1. Propustnost optických skel.....	15
2.3.2. Index lomu.....	17
2.3.3. Abbeovo číslo.....	18
3. OPTICKÉ VADY.....	19
3.1. Otvorová vada.....	19
3.2. Koma.....	20
3.3. Zklenutí pole a astigmatismus.....	20
3.4. Zkreslení.....	21
3.5. Barevná vada.....	22
3.6. Optimalizační metoda.....	24
4. VLIV OPTICKÉHO SYSTÉMU NA POMĚR SIGNÁLU A ŠUMU.....	25
5. OPTIMALIZACE JEDNODUŠŠÍCH PRVKŮ V OBLASTI VIS.....	26
5.1. Výběr optických skel.....	26
5.2. Kvalita zobrazení v kvazimonochromatickém světle.....	29
5.2.1. Jednorádiusová bikonvexní čočka.....	29
5.2.2. Čočka s optimalizovaným tvarem pro otvorovou vadu 3. řádu.....	33
5.3. Kvalita zobrazení v polychromatickém světle.....	38
6. OPTIMALIZACE JEDNODUŠŠÍCH PRVKŮ V OBLASTI LWIR.....	45
6.1. Výběr optických materiálů.....	45
6.2. Kvalita zobrazení v kvazimonochromatickém a polychromatickém záření.....	45
6.3. Kvalita zobrazení v závislosti na světelnosti.....	48
6.3.1. Germánium.....	48
6.3.2. Amtir1.....	51
7. DUBLETY.....	53
7.1. Konstrukce achromatického dubletu ve vis.....	54
7.2. Konstrukce achromatického dubletu v lwir.....	58
7.2.1. Dublet Ge/zns.....	58
7.2.2. Dublet Ge/amtir1.....	61
8. TRIPLET.....	65
ZÁVĚR.....	69
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	70

## ÚVOD

Infračervená termografie, termovize a tepelné video jsou příklady infračervené zobrazovací vědy. Termovizní kamery dokážou detekovat záření v infračerveném spektru a produkovat obrazy, tzv. termogramy. Vzhledem k tomu, že infračervené záření je vyzařováno všemi objekty s teplotou blízkou pokojové teplotě, v závislosti na záření absolutně černého tělesa, termografie umožňuje zobrazit prostředí jak s viditelnou oblastí optického spektra tak bez ní. Množství záření emitovaného objektem se zvyšuje s teplotou, a proto termografie umožňuje pozorovat kolísání teplot.

Infračervené vidění může být definováno jako schopnost biologického nebo umělého systému detekovat infračervené záření. Podmínky termálního vidění a termovize jsou běžně používané v této souvislosti, protože infračervená emise z těla, je přímo spojena s jeho teplotou: žhavější objekty vyzařují více energie v infračerveném spektru, než ty chladnější.

Lidské tělo, stejně jako mnoho pohyblivých nebo statických objektů, je obvykle teplejší než okolní prostředí. Vzhledem k tomu, že žhavější objekty vyzařují více infračervené energie, než ty chladnější, je poměrně snadné je určit infračerveným detektorem, ve dne nebo v noci. Proto termín „noční vidění“ je také používán namísto „infračerveného vidění“, protože jeden z původních účelů při rozvíjení tohoto druhu systémů bylo lokalizovat nepřátelské cíle v noci.

Infračervené vidění používá infračervený detektor pracující na středních nebo dlouhých vlnových délkách (neviditelných pro lidské oko) pro zachycení tepla vyzařovaném objektem.

# 1. TERMOVIZNÍ SYSTÉMY

Termovizní systémy jsou systémy, které detekují záření odpovídající běžným teplotám.

[1] Jsou založeny na zviditelnění tepelného záření, které objekty samy vyzařují. Jedná se dokonale pasivní zobrazovací přístroje, které nepotřebují žádné osvětlení objektů (Sluncem, hvězdami, umělými zdroji).

[2] Používají se k měření v energetice, v oblasti přenosu tepla, v technice prostředí, v medicíně, při dálkovém výzkumu Země a v mnoha dalších oborech. Poskytují názorné obrazové záznamy i videozáznamy, umožňující získat kvalitativní i kvantitativní informace pro hlubší poznání tepelných procesů různých zařízení a objektů.

Termovizními systémy lze zobrazit teplotní pole měřeného objektu, ale pouze na jeho povrchu. Termovize je určena pro měření v rozsahu teplot  $-40$  až  $+2000$  °C s rozlišením až  $0,1$  °C. Teplotní pole je snímáno kamerou vybavenou detektorem záření a pak je zobrazeno černobíle nebo barevně na monitoru.

## 1.1. SPEKTRUM ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN

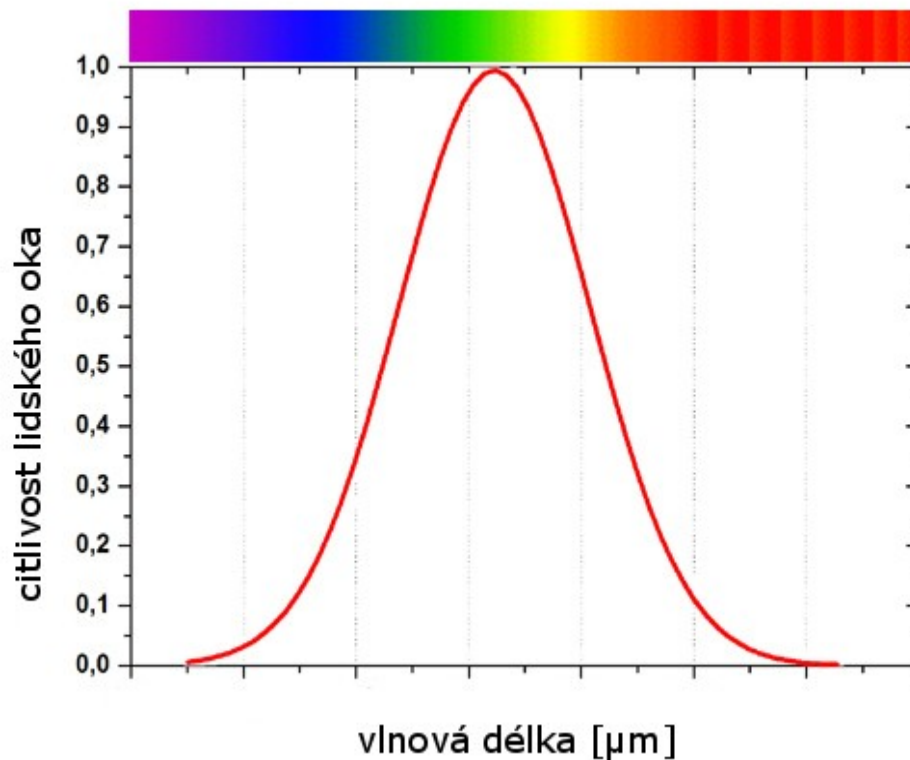
Elektromagnetické spektrum je škála elektromagnetického vlnění. Ukazuje různé druhy elektromagnetického vlnění (záření – kratší vlnové délky):

- radiové vlny ( $10^3 - 10^4$  m)
- infračervené záření ( $10^{-4} - 7,6 \cdot 10^{-7}$  m)
- viditelné světlo ( $7,6 \cdot 10^{-7} - 3,9 \cdot 10^{-7}$  m)
- ultrafialové záření ( $3,9 \cdot 10^{-7} - 10^{-8}$  m)
- rentgenové záření ( $10^{-8} - 10^{-12}$  m)
- gama záření ( $< 10^{-12}$  m)

Viditelná oblast spektra je oblast od 380 nm do 760 nm. Zde užíváme náš nejběžnější detektor, a to lidské oko. Na Obr. 1 můžeme vidět relativní citlivost lidského oka. Její maximum je okolo 550 nm, které odpovídá zelené barvě. Graf je



znázorněn pro fotopické vidění – čípky.

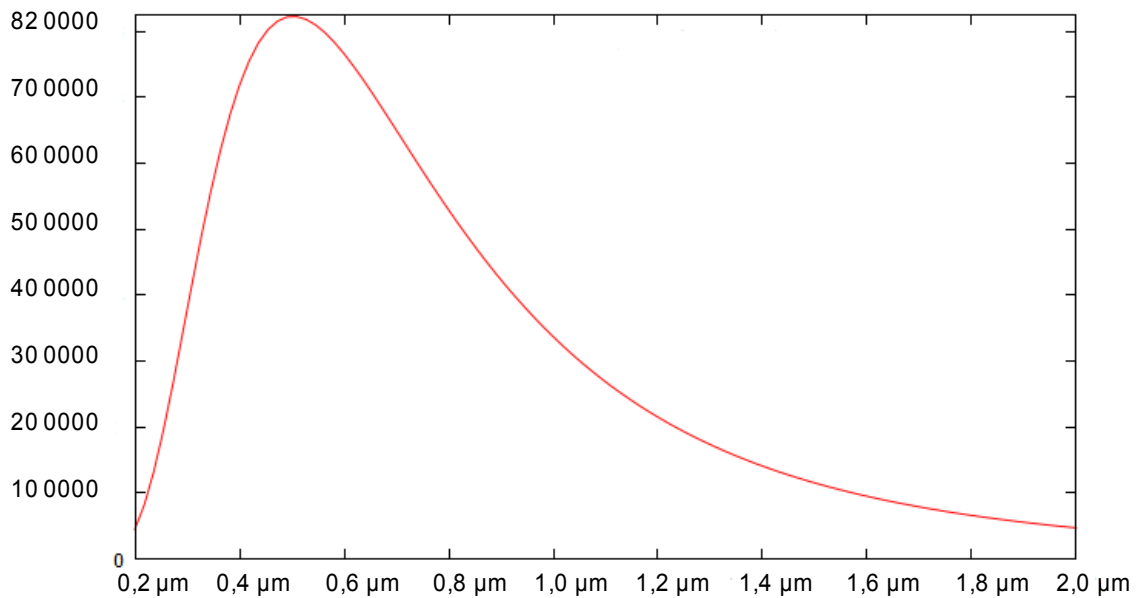


Obr. 1: relativní citlivost lidského oka<sup>[3]</sup>

## 1.2. VYZAŘOVÁNÍ SLUNCE A ČLOVĚKA

Na Obr. 2 a Obr. 4 je grafické znázornění Planckova zákona pro Slunce a člověka. Jak je známo, slunce vyzařuje na všech vlnových délkách, ale právě největší intenzitu má okolo 550 nm, a tam je také naše oko nejcitlivější.

Infračervené záření vyzařují všechna tělesa. I naše tělo září, v porovnání se Sluncem ovšem na větších vlnových délkách (cca 10 μm). Lidské oko není citlivé na tyto vlnové délky, protože samo lidské tělo, tedy i nitro oka, září a oko by bylo oslepeno svým vlastním zářením. Některé druhy hadů mají vedle „obyčejných“ očí i detektory infračerveného záření. Uvádí se, že tyto detektory jsou citlivější než jakékoliv jiné detektory infračerveného záření vyrobené člověkem.



Obr. 2: vyzařování slunce

V závislosti na vlnové délce  $\lambda$ , Planckův zákon je psán (pro jednotkový prostorový úhel) jako:

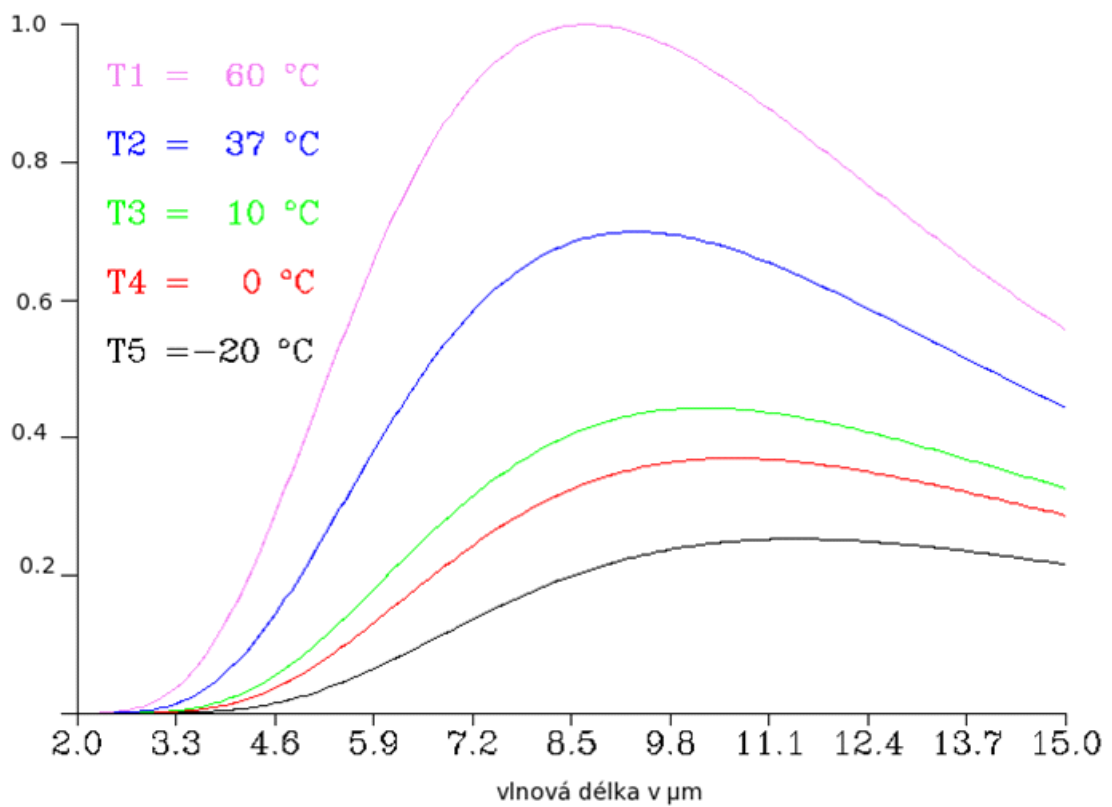
$$W_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[ e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right]} \quad (1.1)$$

kde

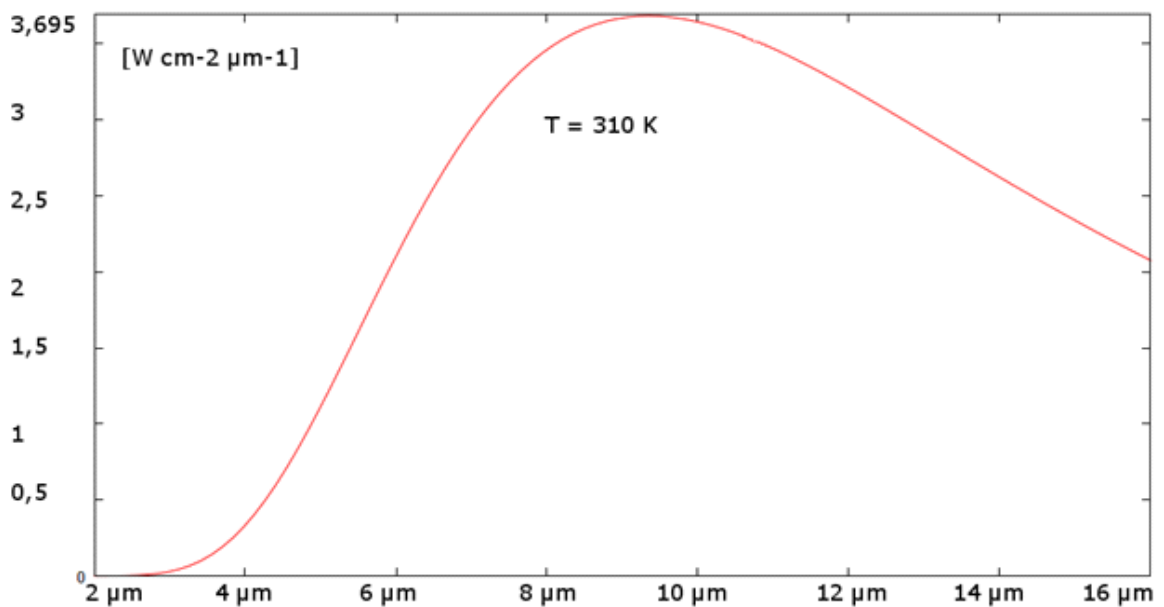
$$C_1 = 2\pi h c^2 \quad C_2 = \frac{h c}{k} \quad (1.2)$$

Planckův zákon popisuje spektrální zář z elektromagnetického záření na všech vlnových délkách emitovaných směrem od černého tělesa.

Na Obr. 3 můžeme vidět grafické vyjádření Planckova zákona pro běžné teploty z našeho okolí.



Obr. 3: Planckův zákon pro běžné teploty<sup>[1]</sup>



Obr. 4: vyzařování člověka

Optické spektrum vlnových délek můžeme rozdělit na tři oblasti.

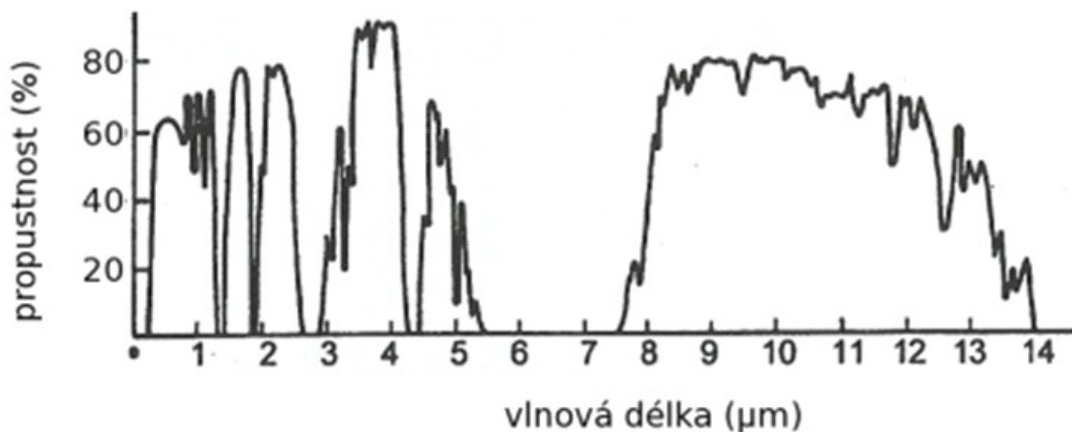
- VIS  $\rightarrow$  0,38 – 0,8  $\mu\text{m}$

- MWIR → 3 – 5  $\mu\text{m}$
- LWIR → 8 – 15  $\mu\text{m}$

Na Obr. č. 4 je maximální intenzita vyzařování člověka je okolo 10  $\mu\text{m}$ , a to je oblast, o kterou se zajímáme.

### 1.3. PROPUSTNOST ATMOSFÉRY

Z Planckova vyzařovacího zákona můžeme vidět, že Sluce nám vyzařuje na všech vlnových délkách. Ale naše atmosféra propouští jen jejich určité oblasti. [4] Propustnost atmosféry není stálá a kolísá podle množství vodních par, kondenzace vlhkosti, plyných příměsí a nečistot. Následující graf znázorňuje spektrální propustnost atmosféry v tloušťce 2 km ve vodorovném směru u hladiny moře v pásmu 0.2 až 15  $\mu\text{m}$ .



Obr. 5: propustnost atmosféry<sup>[5]</sup>

Z grafu je patrné, že atmosféra propustí právě jen oblasti VIS, MWIR a LWIR.

Od 14  $\mu\text{m}$  se atmosféra stává pro elektromagnetické záření znovu nepropustná, a to až do vlnových délek  $10^4 \mu\text{m}$ .

## 2. ROZDÍLY OPTICKÝCH SYTÉMŮ PRO VIS A IČ

### 2.1. ZÁKLADNÍ PARAMETRY OPTICKÉ SOUSTAVY

#### 2.1.1. NUMERICKÁ APERTURA

<sup>[6]</sup>Numerická apertura je vyjádřena jako součin indexu lomu  $n$  prostředí a sinu polovičního otvorového úhlu  $\sigma$  zorného pole soustavy. Značíme ji

$$NA = n' \sin \sigma' \quad (2.1)$$

#### CLONOVÉ ČÍSLO

Udává, kolikrát je průměr  $D$  vstupní pupily obsažen v ohniskové vzdálenosti  $f'$ . Lze zapsat jako poměr ohniskové vzdálenosti a průměru pupily

$$c = \frac{f'}{D} \quad (2.2)$$

Při určité ohniskové vzdálenosti, malé clonové číslo znamená větší světelnost. Naopak, větší clonové číslo způsobuje menší světelnost, zvyšuje však hloubku ostrosti.

Clonové číslo lze také vyjádřit pomocí numerické apertury<sup>[7]</sup>

$$c = \frac{1}{2n \sin \sigma} \quad (2.3)$$

### 2.2. KVALITATIVNÍ PARAMETRY

Slouží k objektivnímu zhodnocení kvality optické soustavy.

#### 2.2.1. FUNKCE PŘENOSU KONTRASTU

<sup>[8]</sup>MTF (Modulation Transfer Function) určuje, s jakým kontrastem budou zobrazeny jednotlivé struktury předmětu, charakterizované prostorovou frekvencí  $R$ , udanou počtem čar na jednotku délky [např. čar/mm].

<sup>[9]</sup>Při měření MTF funkce se posuzuje reprodukce kontrastu předlohy na záznamu v porovnání se samotnou předlohou v závislosti na prostorové frekvenci testovacího obrazce na předloze. Testovací obrazec je složen sledem černých čar

oddělených stejně širokými bílými mezerami. Počet dvojic, čára – mezera, označujeme jako prostorovou frekvenci.

[8] Kontrast předmětu  $K_L$  a kontrast obrazu  $K_E$  jsou definovány vztahy

$$K_L = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}} \quad K_E = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} \quad (2.4)$$

kde  $L_{max}$  a  $L_{min}$  značí maximální a minimální hodnotu jasu předmětu a  $E_{max}$  a  $E_{min}$  značí maximální a minimální hodnotu osvětlení v obrazové rovině. Pro funkci přenosu kontrastu pak platí

$$MTF = \frac{K_E}{K_L} \quad (2.5)$$

V případě fyzikálně dokonalé optické soustavy (tj. soustavy bez aberací) s rovnoměrně propustnou pupilou kruhového tvaru a malou numerickou aperturou dostáváme pro funkci přenosu kontrastu

$$MTF(\omega) = \frac{2}{\pi} (\arccos \omega - \omega \sqrt{1 - \omega^2}); \omega \in \langle 0, 1 \rangle \quad (2.6)$$

kde  $R = \frac{\omega}{\lambda c}$  je prostorová frekvence,  $\lambda$  je vlnová délka záření,  $c$  je clonové číslo optické soustavy a  $\omega$  je normovaná prostorová frekvence.

### 2.2.2. ROZLIŠOVACÍ SCHOPNOST

[8] Rozlišovací schopnost optické soustavy je dána maximální prostorovou frekvencí  $R_{max}$ , kterou daná optická soustava přeneše s nenulovým kontrastem. Opět pro případ fyzikálně dokonalé optické soustavy s rovnoměrně propustnou pupilou kruhového tvaru je mezní prostorová frekvence  $R_{max}$ , kterou je optická soustava schopna přenést, dána vztahem

$$R_{max} = \frac{1}{\lambda c} \quad (2.7)$$

Z předchozího vztahu můžeme určit, kolik čar/mm je schopna fyzikálně dokonalá optická soustava s clonovým číslem  $c$  rozlišit při zobrazení světlem o vlnové délce  $\lambda$ .

## 2.3. POZNÁMKY K VYBRANÝM KONSTRUKČNÍM PARAMETRŮM

### 2.3.1. PROPUSTNOST OPTICKÝCH SKEL

Dopadne-li paprsek na rozhraní dvou různých prostředí, část energie se odrazí, část projde a část se absorbuje. Jsou zavedeny veličiny: odrazivost –  $R$ ; propustnost –  $T$  a absorpce –  $A$ . Ze zákona zachování energie platí

$$R + T + A = 1 \quad (2.8)$$

Propustnost je schopnost skel propouštět záření určité vlnové délky. Každé sklo pohlcuje záření různých vlnových délek různě.

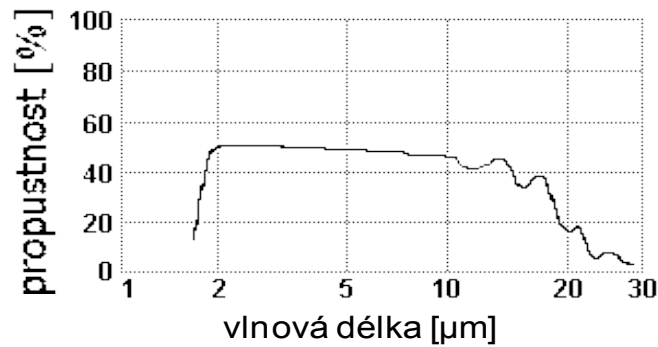
Uvedu zde příklady tří skel. Sklo BaK7 pro VIS oblast, Ge a Amtir pro IČ oblast.

BaK7; index lomu  $n = 1,51$ ; Abbeovo číslo  $v = 64,17$



Obr. 7: spektrální propustnost skla BaK7<sup>[10]</sup>

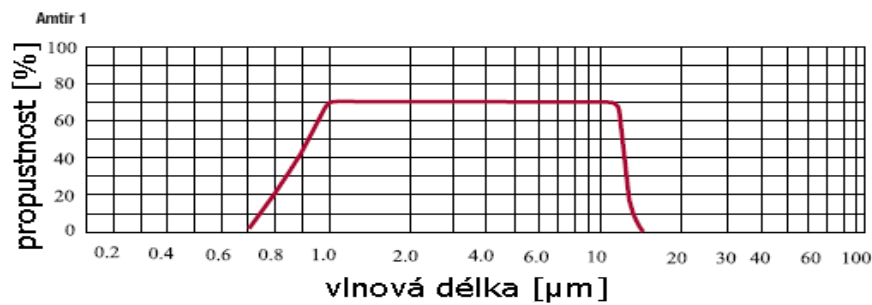
Ge; index lomu  $n = 4$ ; abbeovo číslo  $v = 916,26$



Obr. 8: spektrální propustnost skla Ge<sup>[11]</sup>

Amtir; index lomu  $n = 2,5$ ; Abbeovo číslo  $v = 70,04$

Jde o chalkogenní sklo, uměle vytvořené.



Obr. 9: spektrální propustnost skla Amtir<sup>[12]</sup>

Zde je na ukázkou spočítaná reflexivita těchto materiálů. U skel s vysokým indexem lomu je vysoká reflexivita, kterou můžeme snížit užitím antireflexních vrstev.

$$R = \left| \frac{n' - n}{n' + n} \right|^2 \quad T = \frac{4n'n}{(n' + n)^2} \quad (2.9)$$

$n'$	R
BK7 – 1,51	0,04 (4%)
Ge – 4	0,36 (36%)
Amtir – 2,5	0,18 (18%)

Tab. 1: porovnání reflexivity u vybraných optických skel a materiálů



### 2.3.2. INDEX LOMU

Index lomu je bezrozměrná fyzikální veličina popisující šíření světla a všeobecně elektromagnetického záření v látkách.

Index lomu prostředí  $n$  je poměr rychlosti světla ve vakuu k rychlosti světla v daném prostředí.

#### ZÁVISLOST INDEXU LOMU NA TEPLITĚ

[13] Často je třeba provést optické měření při širokém tepelném rozsahu. Výkon systému je ovlivněn tepelnou roztažností materiálu a změnou indexu lomu čočky. To je obzvláště výrazné v infračervené oblasti, kde většina materiálů trpí vysokým  $dn/dt$ , změnou indexu lomu v závislosti na teplotě. Hodnoty indexu lomu a hlavně teplotní koeficienty se liší – v některých případech velmi – jak v literatuře, tak v listech dodavatelů. Je proto nezbytné, si tyto data kontrolovat.

V následující tabulce si můžeme všimnout některých zástupců skel, na kterých budeme demonstrovat tepelné účinky. Když si např. vybereme Germanium z oblasti LWIR, s  $n = 4$ ,  $\nu = 1000$ , tak se při změně teploty o  $1^\circ\text{C}$  změní index lomu o  $396 \cdot 10^{-6}$ , což je změna na 4. desetinném místě. Kdyby byla změna o  $100^\circ\text{C}$ , už se jedná o 2. desetinné místo. Což nám může negativně ovlivnit výsledek. Naopak u Amtiru,  $n = 2,5$ ,  $\nu = 110$ , je změna již jen  $72 \cdot 10^{-6}$ . A u  $\text{MgF}_2$  z oblasti MWIR,  $n = 1,35$ ,  $\nu = 13,5$ , je to pouze  $2 \cdot 10^{-6}$ .

optický materiál	germanium	Amtir1	fluorid hořečnatý
index lomu $n_{10\mu\text{m}}$	4,003	2,498	1,349
Abbeovo číslo $\nu_{8-12\mu\text{m}}$	1000	110	13,5
změna indexu $/^\circ\text{C } dn/dt$ ( $\times 10^{-6}$ )	396	72	2
koeficient roztažnosti $/^\circ\text{C } \alpha$ ( $\times 10^{-6}$ )	5,7	12	12

Konstrukce se provádí tak, aby byl systém atermalizovaný. To znamená, že změna teploty optických a mechanických částí optického systému se neprojevuje ve změnách kvalitativních parametrů systému.

### 2.3.3. ABBEOVO ČÍSLO

[14]Abbeovo číslo je bezrozměrné číslo, které udává disperzní mohutnost daného průhledného prostředí v oblasti viditelného světla. Čím větší je jeho hodnota, tím má materiál menší disperzi, a naopak. Je dáno výrazem

$$v = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (2.10)$$

kde  $n_d$ ,  $n_F$  a  $n_C$  je index lomu příslušného materiálu na vlnových délkách odpovídajících Fraunhoferovým čarám d, F, a C

[15] $n_d$ ..... index lomu pro žlutou barvu (žlutá čára ze spektra helia  
 $\lambda = 587,6$  nm)

$n_F$ ..... index lomu pro modrou barvu (modrá čára ze spektra vodíku  
 $\lambda = 486,1$  nm)

$n_C$ ..... index lomu pro červenou barvu (červená čára ze spektra vodíku  
 $\lambda = 656,3$  nm)

### 3. OPTICKÉ VADY

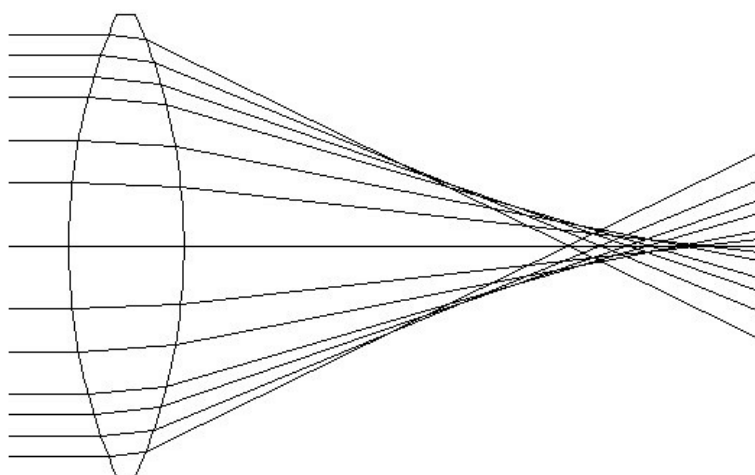
[16]Optickými vadami zobrazovacích soustav jsou nazývány různé druhy odchylek od ideálního zobrazení. Projevují se například tím, že obrazem bodu je ploška, obrazem roviny kolmé k ose je rotační plocha, obrazem přímky, jež leží v předmětové rovině a neprotíná optickou osu, je obecná křivka. A předmět zobrazený světlem o různých vlnových délkách je na různých místech a různě velký.

Vady optických soustav se dělí na vady *monochromatické* a *chromatické* (barevné).

U monochromatických vad jde o zobrazení osového bodu a bodu ležícího mimo optickou osu. V prvním případě jde o *otvorovou vadu*, v případě druhém o *komu*, *zklenutí*, *astigmatismus* a *zkreslení*.

#### 3.1. OTVOROVÁ VADA

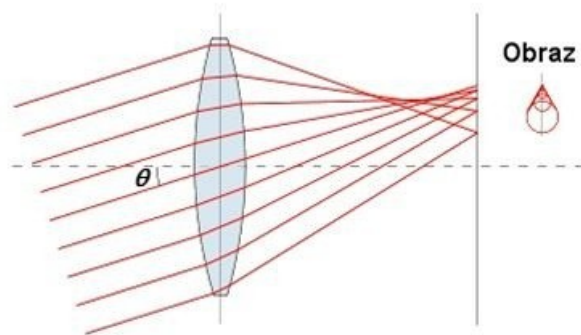
[17][18]Je způsobena kulovým tvarem čoček (popř. zrcadel), kdy paprsky z předmětové části, procházejí optickou soustavou při jejím okraji, se lámou více než paprsky blíže optické ose. Paprsky blíže optické ose mají ohnisko dále, než paprsky procházející okrajem optické soustavy. Obraz bodu nebude bodový, ale bude neostře ohraničená ploška.



Obr. 10: otvorová vada

### 3.2. KOMA

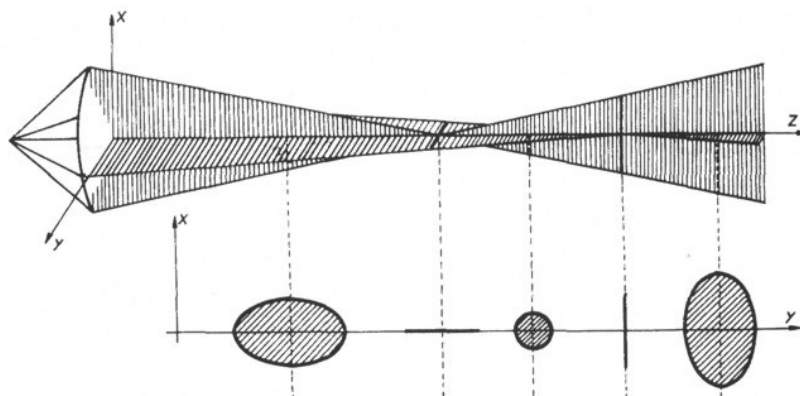
[19] Tato asymetrická vada je tvořena velmi šikmými paprsky procházejícími blízko u okraje čočky, které se lámou značně nepravidelně. Jimi vytvořený obraz předmětu je jinak velký než který vytváří paprsky ze středu objektivu, čímž vzniká složitý útvar podobný kometě s chvostem ubíhajícím ke kraji.



Obr. 11: koma<sup>[20]</sup>

### 3.3. ZKLENUTÍ POLE A ASTIGMATISMUS

[21] Astigmatismus vzniká při zobrazování mimoosového bodu. Paprsky vycházející z bodu podél vodorovné osy čočky se protínají v tzv. sagitálním ohnisku, zatímco paprsky procházející podél svislé osy čočky se protínají v jiném tzv. tangenciálním ohnisku. Svazek paprsků za čočkou má eliptický průřez, jen v místech ohnisek se zužuje do úseček kolmých k ose (viz obr. 12). Jejich vzdálenost se nazývá astigmatický rozdíl.



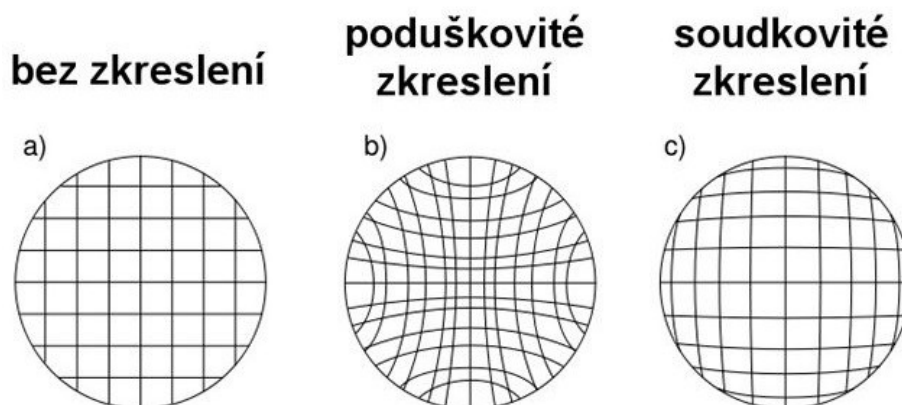
Obr. 12: astigmatismus<sup>[21]</sup>

Kde se projeví astigmatismus, tam je i zklenutí pole. <sup>[19]</sup>Zklenutí pole znamená, že body ležící v rovině kolmé k optické ose, nevytvoří opět ostrý obraz na rovinu kolomou, ale zakřivenou plochu a to vypuklou nebo vydutou.

### 3.4. ZKRESLENÍ

<sup>[21]</sup>Zkreslení, neboli distorze, se projevuje u přímek mimo optickou osu. A to tak, že se nezobrazí jako přímky, ale jako křivky. Příčinou je závislost příčného zvětšení na vzdálenosti od optické osy.

Rozlišujeme zkreslení soudkovité a poduškovité. Viz Obr. 14.



Obr. 14: zkreslení<sup>[23]</sup>

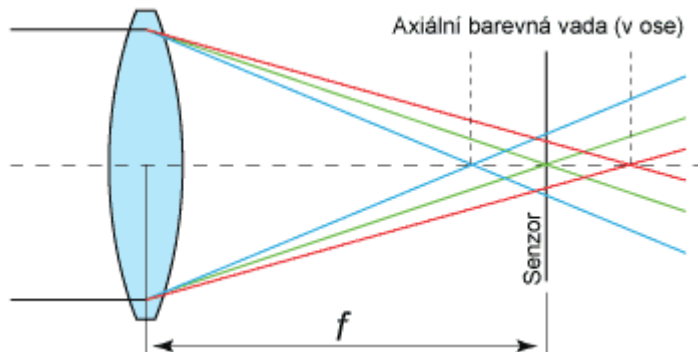
### 3.5. BAREVNÁ VADA

[16]Doposud se jednalo o vady pro světlo, které má pouze jednu vlnovou délku. Nyní půjde o světlo bílé (složené), takže optický systém vytvoří tolik obrazů, kolik jednoduchých světél bude obsahovat. Každé jednoduché světlo vytvoří obraz na jiném místě a o jiné velikosti. Říkáme, že systém má barevnou vadu polohy a velikosti.

#### [24]BAREVNÁ VADA POLOHY

Barevná vada polohy je optická vada, kdy obrazy vytvořené jednotlivými vlnovými délkami světla mají různou polohu. Paprsek složeného světla dopadá na lámavou plochu. Zde dochází k lomu. Světlo s menší vlnovou délkou se láme méně, než světlo s větší vlnovou délkou.

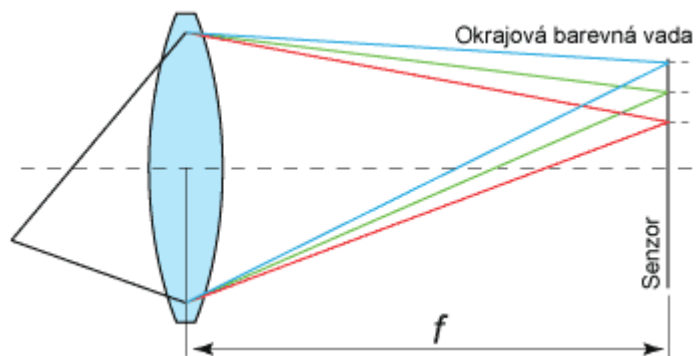
U spojky bude ohnisko pro červenou barvu nejdále a pro modrou nejbliže čočce.



Obr. 15: barevná vada polohy<sup>[25]</sup>

[24] BAREVNÁ VADA VELIKOSTI

Barevná vada velikosti je optická vada, kdy obrazy vytvořené jednotlivými vlnovými délkami světla mají různou velikost. Příčinou barevné vady velikosti je různé příčné nebo úhlové zvětšení pro různé barvy. Předměty mají tedy kromě různé barvy i různou velikost. Vzniká současně s barevnou vadou polohy.



Obr. 16: barevná vada velikosti<sup>[25]</sup>

### 3.6. OPTIMALIZAČNÍ METODA

Otvorová vada 3. řádu je charakterizována koeficientem  $S_1$ . V prostředí systému OSLO se tento koeficient označuje zkratkou SA3. K optimalizaci použijeme metodu tlumených nejmenších čtverců, jejíž princip spočívá v minimalizaci chybové funkce

$$\Phi = \dots w_i (g_i - g_i^*)^2 \quad (3.1)$$

kde  $w_i$  je váhový koeficient  $i$ -té aberace  
 $g_i$  je příslušný operand (aberace), který chceme korigovat  
 $g_i^*$  je požadovaná hodnota cílové aberace (operandu).

Ilustrační příklad:

$g_1 = s_1 = 0,5$  – tuto hodnotu si program OSLO sám spočítá ze zadání soustavy  
 $g_1^* = 0$  – tohoto stavu chceme dosáhnout

$g_2 = f' = 51$  – ohnisková vzdálenost  
 $g_2^* = 50$  – chceme, aby ohnisková vzdálenost byla 50 mm

$$\Phi = 1(S_1 - 0)^2 + 1(f' - 50)^2$$

$$\Phi = 0,25 + 1$$

$$\Phi = 1,25$$

Program OSLO změnil poloměry křivosti – chce dosáhnout nižší hodnoty metodou tlumených čtverců. Tato metoda je numerická. Existují i jiné metody, například analytická.



## 4. VLIV OPTICKÉHO SYSTÉMU NA POMĚR SIGNÁLU A ŠUMU

[26] Každý signál (v mém případě obrazový) je vedle užitečné informace zatížen i šumem. Vzájemný poměr signálu a šumu je označován jako S/N. Čím větší je S/N, tím méně je šum patrný. Výsledné číslo je bezrozměrné.

$$\frac{S}{N} = [W_T \varepsilon_T - W_B \varepsilon_B] \cdot [\tau_A] \left[ \frac{\tau_0 d'}{4c^2} \right] \left[ \frac{D}{\sqrt{\Delta f}} \right] \quad (4.1)$$

[13] kde S ..... signál

N ..... šum

$W_T$  ..... spektrální hustota vyzařování cíle

$\varepsilon_T$  ..... emisivita cíle

$W_B$  ..... spektrální hustota vyzařování pozadí

$\varepsilon_B$  ..... emisivita pozadí

$\tau_A$  ..... propustnost atmosféry

$\tau_0$  ..... propustnost systému

$d'$  ..... velikost vnitřního elementu

C ..... clonové číslo

$D^*$  ..... vlastnost detektoru

$\Delta f$  ..... šířka pásma šumu

Tato rovnici je říká *zjednodušená radiometrická rovnice kvality*. Dále se budu věnovat jen vlivu optické soustavy na výsledný poměr S/N, přesněji clonovému číslu. S nižším clonovým číslem získáme větší světelnost a tedy i lepší signál.

## 5. OPTIMALIZACE JEDNODUŠŠÍCH PRVKŮ

### V OBLASTI VIS

Cílem práce je porovnat náročnost optické konstrukce pro dlouhovlnnou oblast LWIR s náročností optické konstrukce pro viditelnou oblast. Porovnání budeme nejdříve demonstrovat na nejjednodušší optické soustavě, a to na jednoduché čočce se sférickými plochami. Fixními parametry budou světelnost (clonové číslo) a předmětová ohnisková vzdálenost.

Nejprve provedeme sledování ve VIS oblasti u takové jednoduché optické soustavy, která je zhotovena z materiálů, které se pro tuto oblast obvykle používají v praxi. Poté provedeme stejná sledování jednoduché optické soustavy, ale v oblasti LWIR, pro kterou zadáme materiály čoček vhodné pro tuto oblast. Pro jednoduchost a názornost sledujeme u všech uváděných soustav jen korekční stav na optické ose pro nekonečně vzdálený bod.

První sledování budou prováděna v úzké spektrální oblasti ve středu spektra VIS jen monochromaticky, a to pro vlnovou délku 587,6 nm. A stejně tak monochromaticky ve středu oblasti LWIR pro vlnovou délku 10.000 nm.

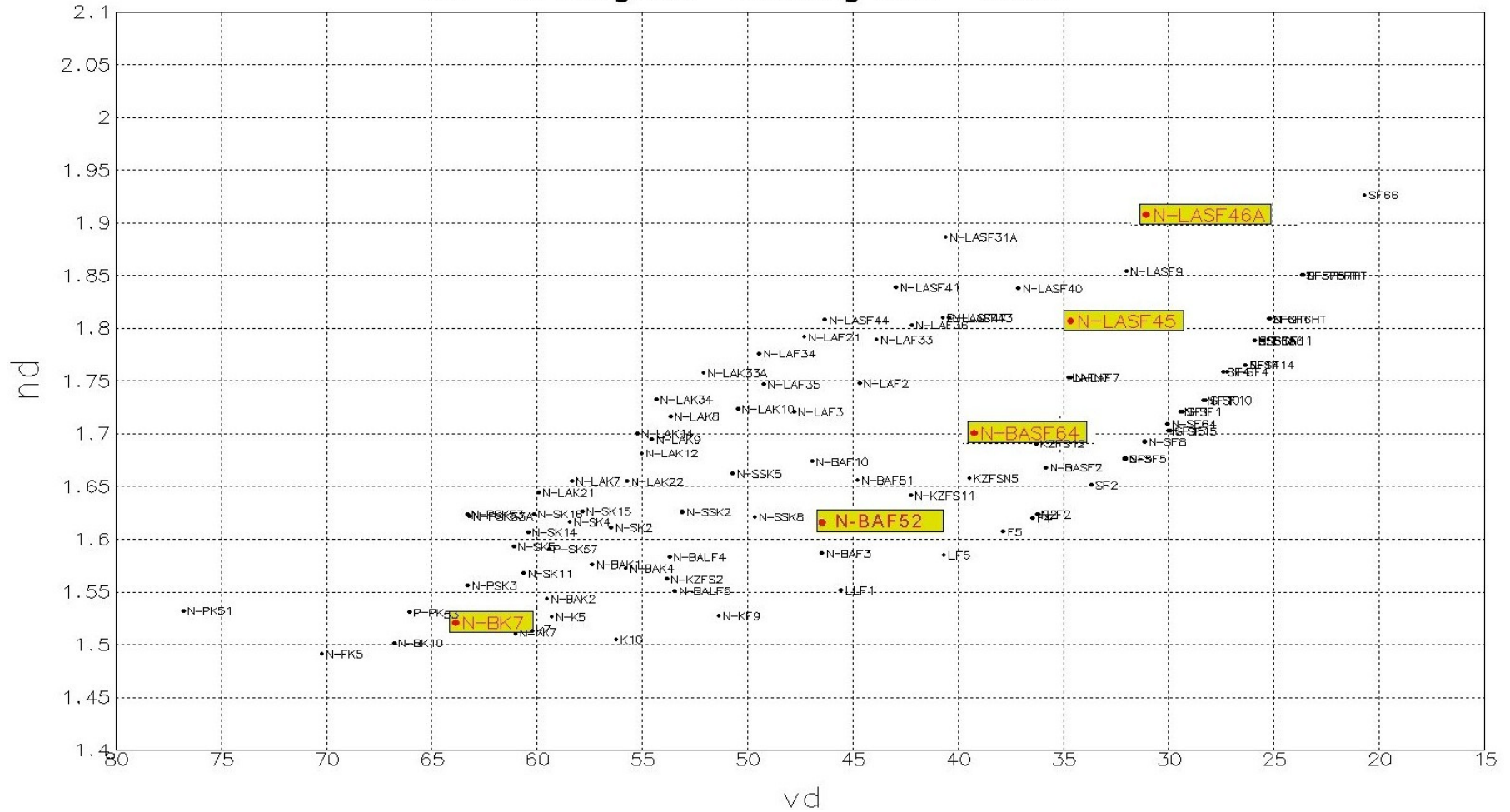
V druhé části sledování provedeme totéž měření, ale pro celé pásmo VIS. Stavů budeme počítat pro 3 vlnové délky: 587,6 nm; 486,1 nm a 656,3 nm. Získané informace porovnáme s výsledky pro celé pásmo LWIR, opět výpočtem stavů pro 3 vlnové délky: 10.000 nm; 8.000 nm 12.000 nm.

#### 5.1. VÝBĚR OPTICKÝCH SKEL

Pro výzkumnou část své práce jsme zvolili 7 skel z katalogu firmy Shott. Ve VIS oblasti je velké množství skel, které jsou k dispozici. Pokrývají širokou oblast optických konstant  $n$ , jak je například patrné z obr. 17: Katalog skel firmy Shott. Z našeho výběru má 5 druhů skel různé indexy lomu a jsou vybrána tak, aby hodnota jejich indexu lomu byla co nejbližší hodnotám  $n = 1,5; 1,6; 1,7; 1,8$  a  $1,9$ . Dalším kritériem výběru bylo Abbeovo číslo. Skla byla volena tak, abychom mohli co nejlépe pozorovat projevy disperze.

Předpokládáme, že s rostoucím indexem lomu dojde ke zlepšení projevů otvorové vady. Dále můžeme předpokládat, že se zvětšující se disperzí (tedy s klesajícím Abbeovým číslem) roste výrazněji barevná vada, která bude ovlivňovat kvalitu zobrazení. Proto budeme zkoumat i tento vliv.

## nd - vd Diagram - katalog skel - Shott



Obr. 17: optická skla z katalogu skel Shott

## 5.2. KVALITA ZOBRAZENÍ V KVAZIMONOCHROMATICKÉM SVĚTLE

Provedeme sledování výkonu jednoduchých optických soustav – čoček, které jsou zhotoveny z různých druhů skel. Použité druhy skel jsou uvedeny v tabulce:

typ skla	index lomu	Abbeovo číslo
BK7	1,5	64,2
BAF52	1,6	46,6
BASF64	1,7	39,4
LASF45	1,8	35,0
LASF46A	1,9	31,3

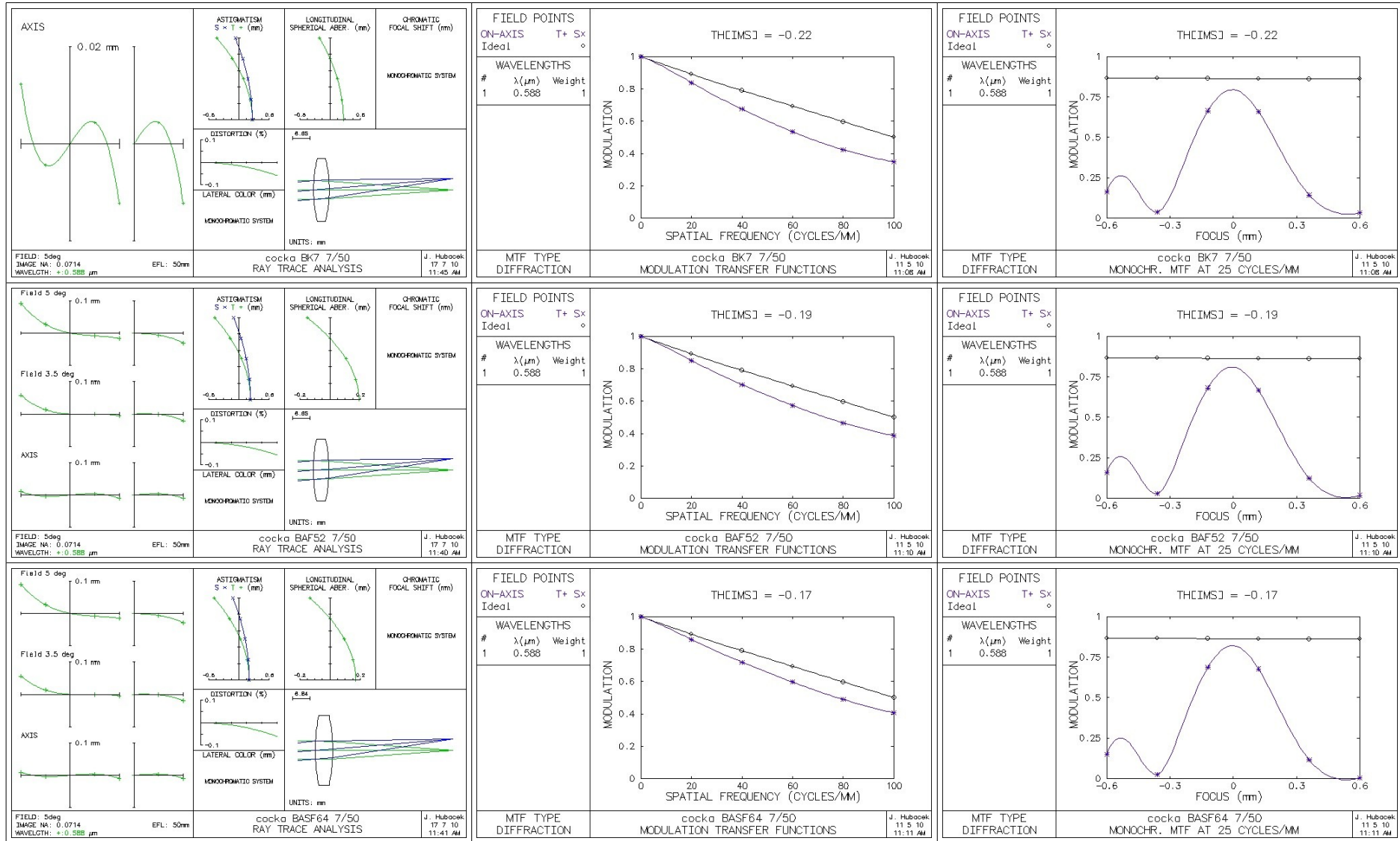
Tab. 3: typy použitých optických skel

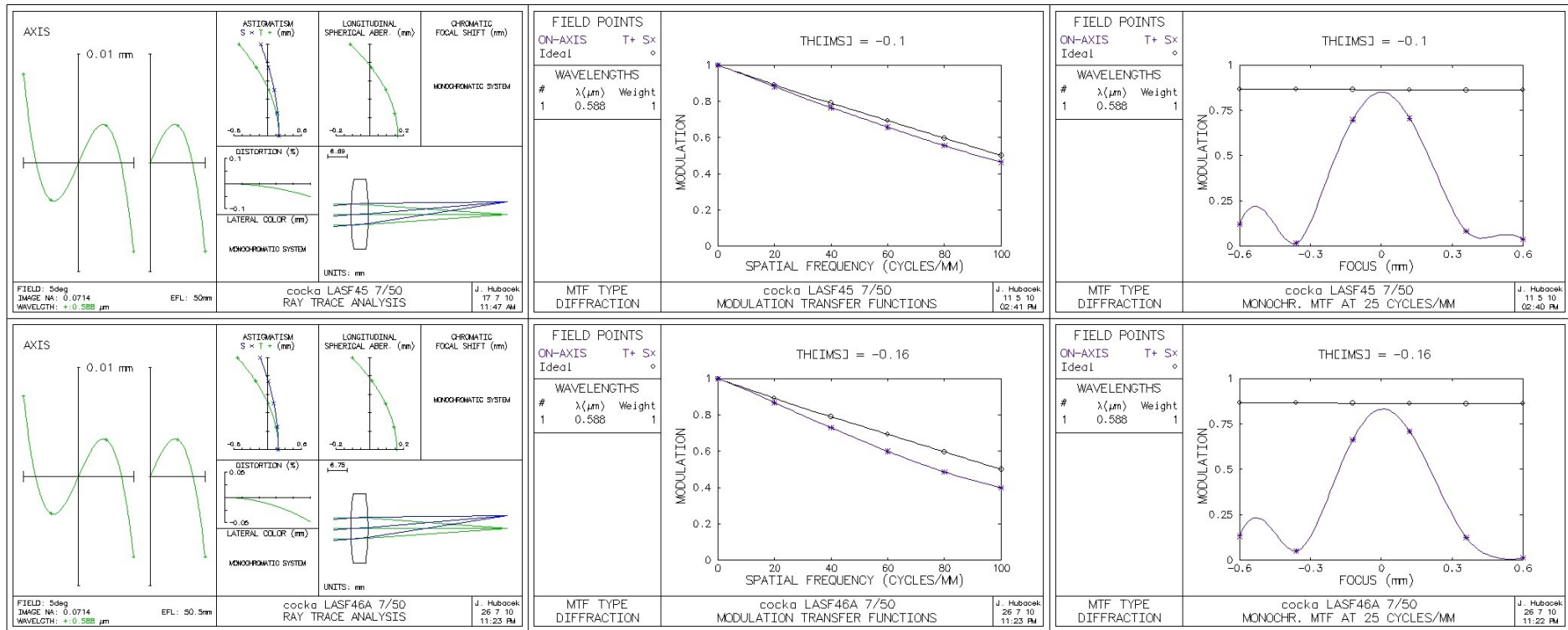
### 5.2.1 JEDNORÁDIUSOVÁ BIKONVEXNÍ ČOČKA

Nejprve sledujeme kvalitativní možnosti u bikonvexní čočky, kde  $R_2 = -R_1$ . V programu OSLO do tabulkového procesoru pevně nastavíme clonové číslo  $c = 7$ ; ohniskovou vzdálenost  $f' = 50$  mm; tloušťku čočky  $d = 6$  mm; apertura  $D/2 = 12$  mm a podmínku  $R_2 = -R_1$ . Poté postupně zadáváme vybraná skla a program OSLO, ze stanovené podmínky pro poloměry, vypočte vhodné hodnoty poloměrů křivosti vůči zadaným parametrům (viz tab. 4).

typ skla	$c$	$f'$ [mm]	$d$ [mm]	$R_1$ [mm]	$R_2$ [mm]
BK7	7	50	6	50,6	-50,6
BAF52	7	50	6	59,7	-59,7
BASF64	7	50	6	68,9	-68,9
LASF45	7	50	6	78,7	-78,7
LASF46A	7	50	6	89,9	-89,9

Tab. 4: konstrukční parametry nekorigovaných jednočočkových objektivů





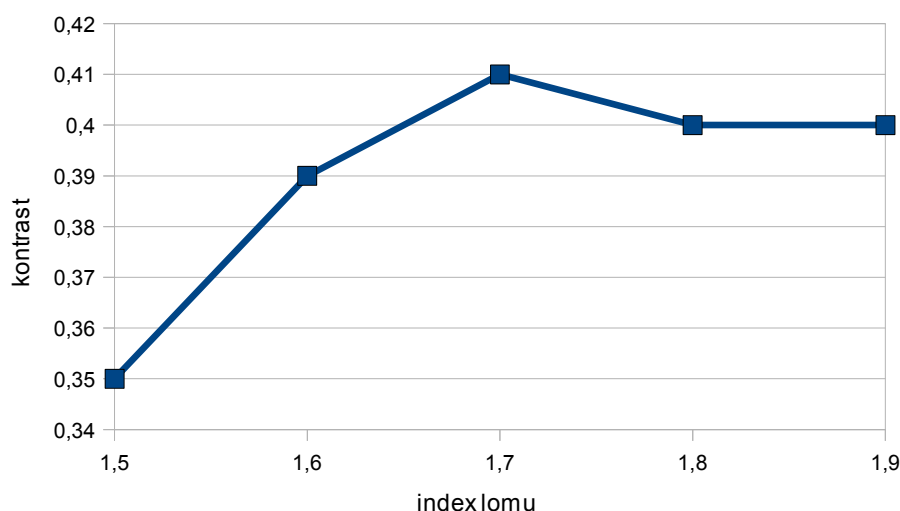
Tab. 5: porovnání aberačního stavu a FPK pěti zvolených optických soustav při  $R_2 = -R_1$

V tabulce 5 odpovídá každý řádek jednomu typu optického skla. V prvním sloupci můžeme vidět geometrický tvar čočky a geometricko-optické aberace. V druhém sloupci funkci přenosu kontrastu v rozsahu prostorových frekvencí 0 až 100 č/mm. Přitom křivka proložená kroužky odpovídá funkci přenosu kontrastu fyzikálně dokonalé soustavy pro sledovanou vlnovou délku. Křivka proložená hvězdičkami odpovídá funkci přenosu kontrastu soustavy sledované reálné konstrukce. Ve třetím sloupci lze sledovat kontrast pro zadanou frekvenci v závislosti na zastavovací rovině, zde konkrétně pro 25 č/mm.

Z programu OSLO vyčteme u každého typu optického skla hodnotu kontrastu pro 100 č/mm.

typ skla	BK7	BAF52	BASF64	LASF45	LASF46A
index lomu	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
kontrast	0,35	0,39	0,41	0,40	0,40

Tab. 6: hodnoty kontrastu pro daná optická skla při 100 č/mm



Graf 1: kontrast v závislosti na indexu lomu u nekorigovaných čoček

Z grafu je patrné, že zvyšující se index lomu v prvních třech případech vede k lepším hodnotám kontrastu. U čoček zhotovených ze skla o  $n = 1,8$  a  $1,9$  ale již ke zvyšování kontrastu nedochází. Je to důsledek toho, že pro tak vysoký index lomu již není tvar čočky  $R_2 = -R_1$  zdaleka optimální. Projevuje se zde otvorová vada, a proto dochází i k poklesu kontrastu.

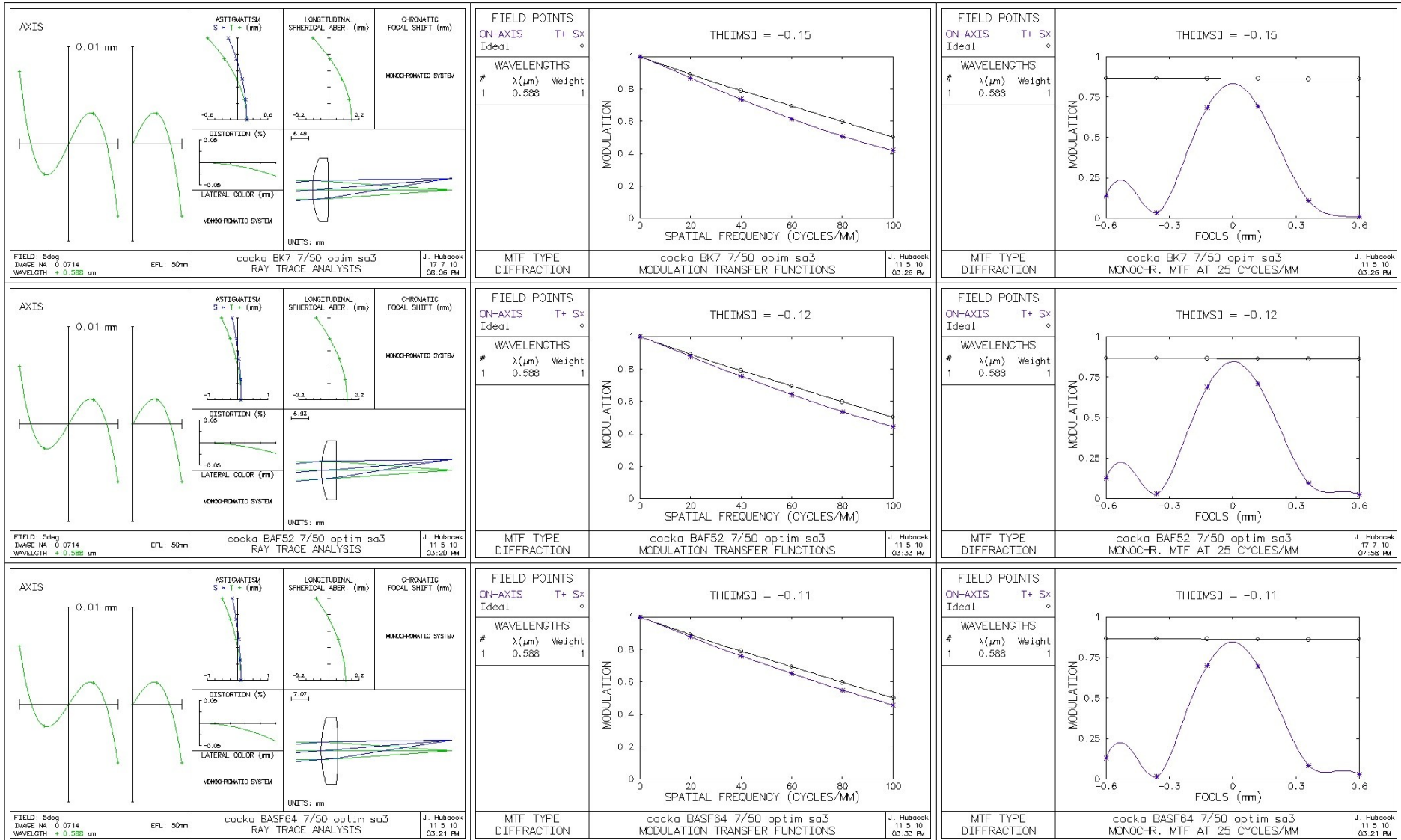


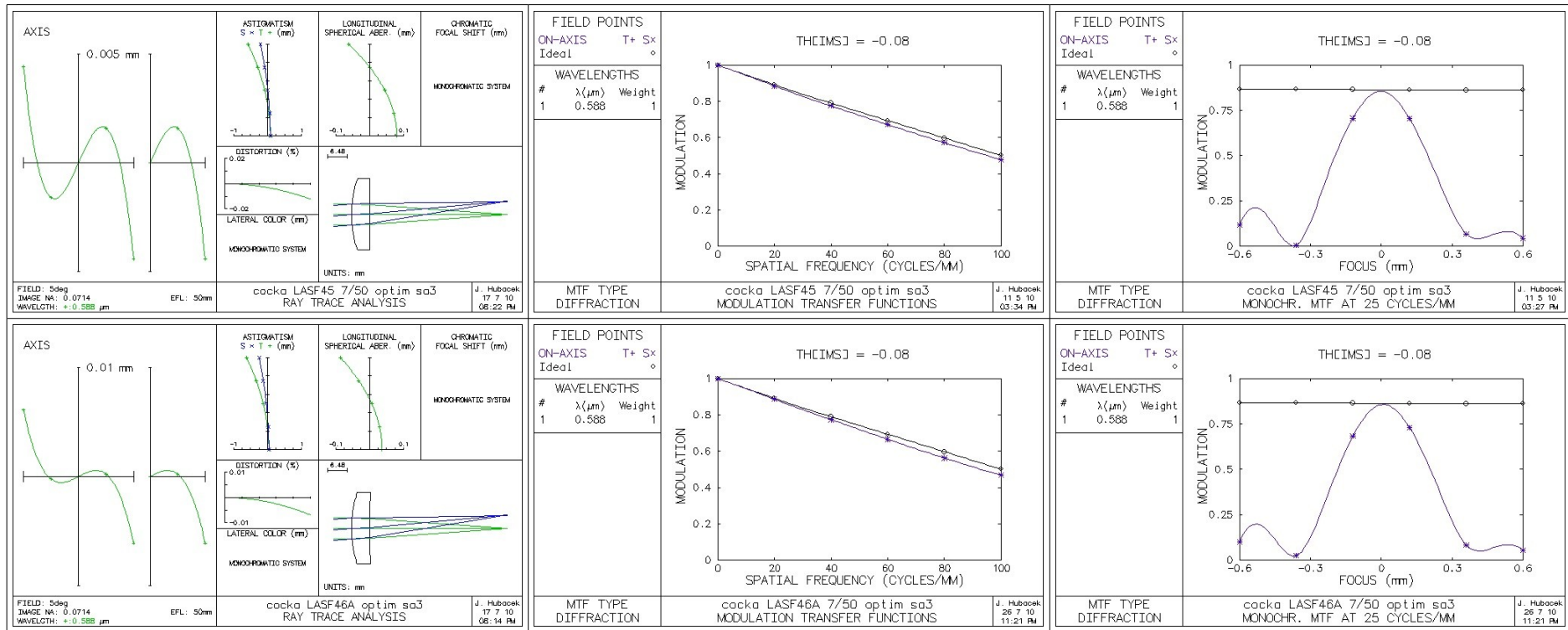
### 5.2.2. ČOČKA S OPTIMALIZOVANÝM TVAREM PRO OTVOROVOU VADU 3. ŘÁDU

V druhém kroku provedeme optimalizaci Seidlova koeficientu 3. řádu metodou tlumených nejmenších čtverců. Jako korekční parametry byly použity oba poloměry. V korekčním procesu jsme požadovali, aby ohnisková vzdálenost byla rovna 50 mm. U obou operandů byl zvolen váhový koeficient =1. Optimalizační cyklus vycházel vždy z hodnot uvedených v předchozí tabulce č. 4. Výsledný stav po optimalizaci je uveden v tabulce č. 7.

typ skla	$R_1$ [mm]	$R_2$ [mm]	kontrast pro 100 č/mm
BK7	30,1	-171,2	0,42
BAF52	32,8	-396,3	0,44
BASF64	35,2	31213,1	0,44
LASF45	37,2	488,7	0,48
LASF46A	39,1	268,7	0,47

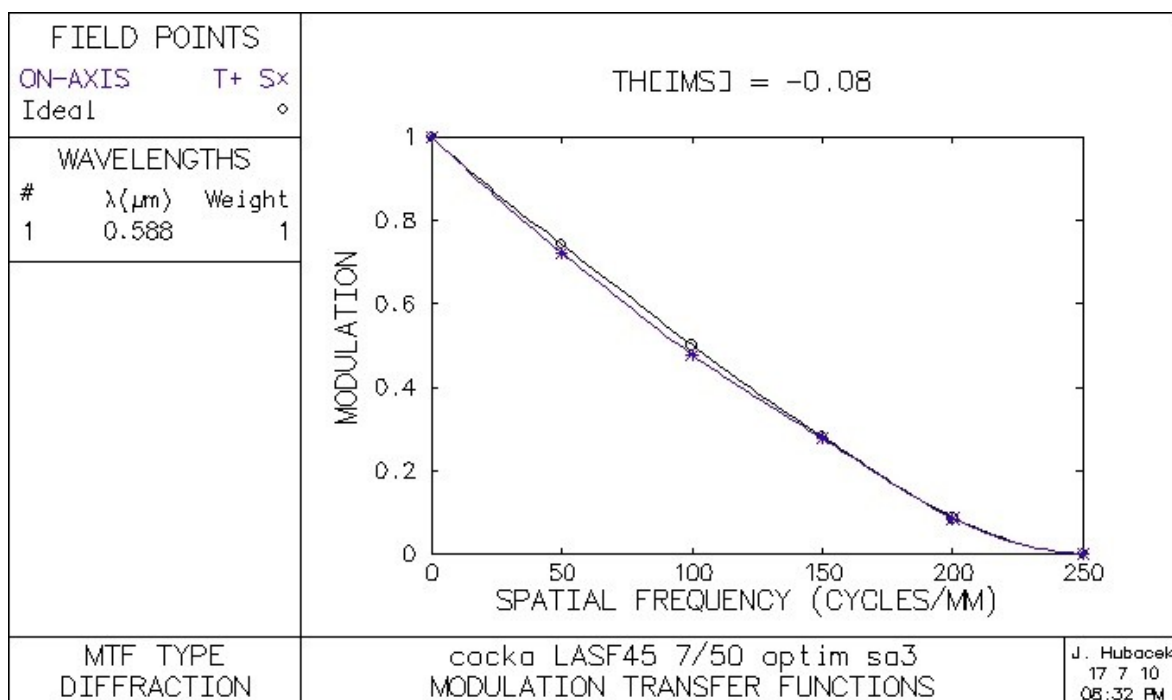
Tab. 7: konstrukční parametry korigovaných jednočočkových objektivů



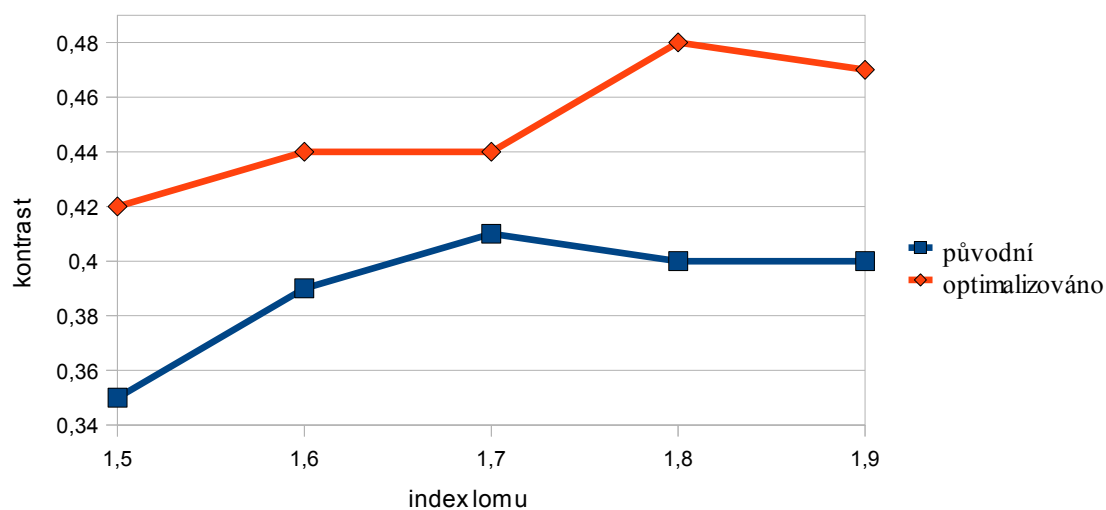


Tab. 8: porovnání aberačního stavu a FPK pěti zvolených korigovaných optických soustav

U optického skla LASF45 jsme dosáhli téměř fyzikálně dokonalého systému (viz obr. 18)



Obr. 18: téměř fyzikálně dokonalý systém u skla LASF45



Graf 2: kontrast pro 100 č/mm v závislosti na indexu lomu u korigovaných a nekorigovaných čoček

Z programu OSLO vyčteme u každého typu optického skla hodnotu kontrastu pro 100 č/mm.

$K_1$  – kontrast nekorigovaných čoček pro 100 č/mm

$K_2$  – kontrast korigovaných čoček pro 100 č/mm

index lomu	$K_1$	$K_2$
1,5	0,35	0,42
1,6	0,39	0,44
1,7	0,41	0,44
1,8	0,40	0,48
1,9	0,40	0,47

Tab. 9: porovnání kontrastů u korigovaných a nekorigovaných čoček

Závěrem můžeme říci, že pro nekorigované čočky s rostoucím indexem lomu dochází k nárůstu poloměru křivosti čoček. Důsledkem toho se nám příznivě ovlivňují optické aberace. V praxi je zvětšující se poloměr křivosti lepší pro výrobu.

U korigovaných čoček se tvar mění na menisek, což je v souladu s teorií 3. řádu. V tabulce č. 7 a grafu č. 2 můžeme pozorovat i nárůst kontrastu oproti nekorigovaným čočkám. Optimalizací se dostáváme blíže fyzikálně dokonalému systému.

### 5.3. KVALITA ZOBRAZENÍ V POLYCHROMATICKÉM SVĚTLE

Chceme-li sledovat výkon optických soustav v polychromatickém režimu, musíme výpočty provádět pro větší počet vlnových délek, které pokrývají, s ohledem na detektor a zdroj záření, celé sledované spektrální pásmo. Pro jednoduchost jsme použili jen tři obvykle používané vlnové délky odpovídající Fraunhoferovým čarám d, F, a C. Jejich vlnové délky jsou:  $\lambda_1 = 587,6$  nm;  $\lambda_2 = 486,1$  nm a  $\lambda_3 = 656,3$  nm.

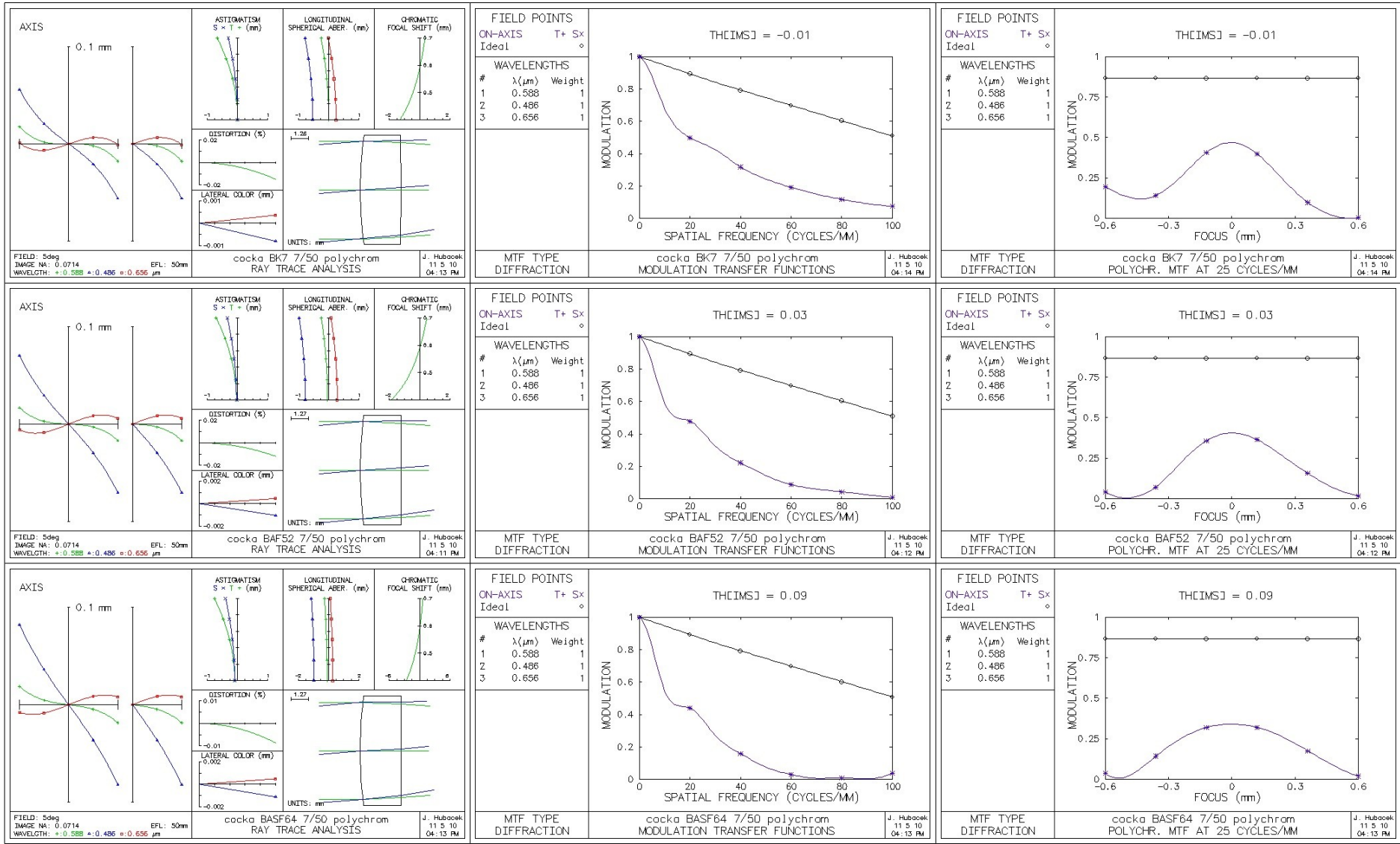
Jelikož vyšetřujeme vliv disperze u jednoduchých optických systémů, tak volíme u všech vlnových délek váhu 1. Kdybychom například měli na mysli konkrétní detektor s určitým spektrálním rozložením citlivosti, museli bychom váhové koeficienty volit pečlivěji s ohledem na tuto citlivost.

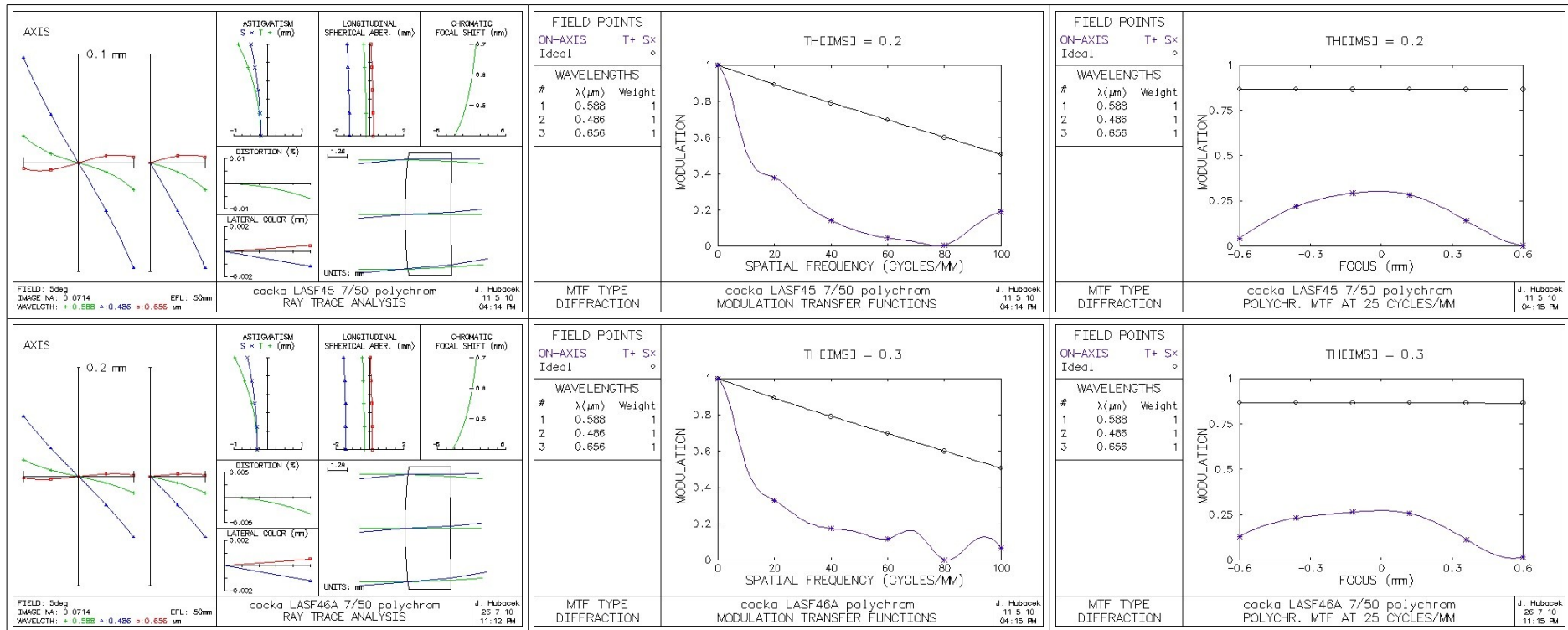
Protože u jednoduché čočky zhotovené z jediného materiálu nemáme v podstatě možnost ovlivnit barevnou vadu, provedeme sledování kvality jen u optimalizovaných optických soustav uvedených v tabulce č. 7.

typ skla	$R_1$ [mm]	$R_2$ [mm]
BK7	29,9	-184,3
BAF52	32,9	-393,1
BASF64	35,0	4831,0
LASF45	37,1	492,1
LASF46A	39,0	272,9

Tab. 10: konstrukční parametry optických jednočočkových objektivů po korekci

Jak můžeme vidět, poloměry křivosti pro optická skla s různým Abbeovým číslem se téměř nezměnily (viz Tab. 10 a 7). Z toho můžeme usuzovat, že takto vyrobené jednoduché čočky je možno použít jak pro kvazimonochromatické, tak pro polychromatické spektrum.



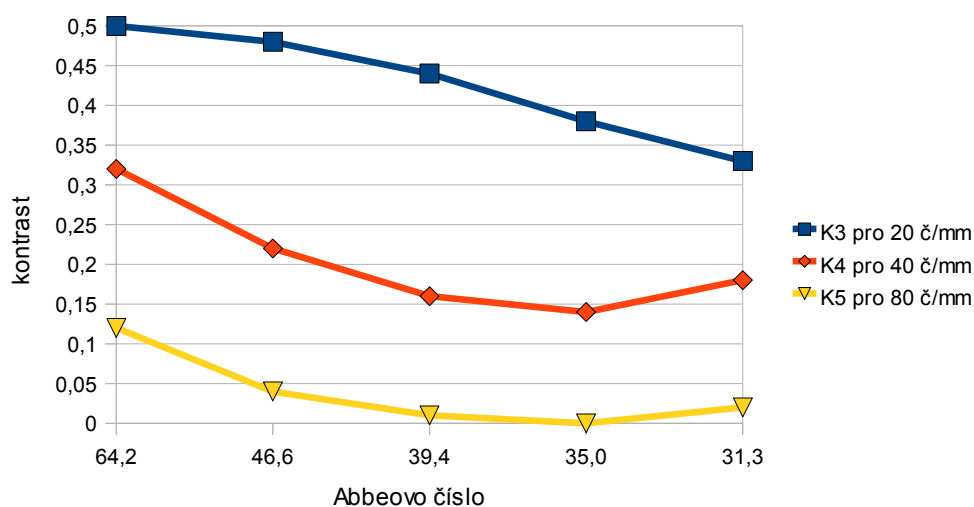


Tab. 11: porovnání aberačního stavu a FPK pěti zvolených korigovaných optických soustav v polychromatickém režimu



Abbeovo číslo	K <sub>3</sub> pro 20 č/mm	K <sub>4</sub> pro 40 č/mm	K <sub>5</sub> pro 80 č/mm
64,2	0,50	0,32	0,12
46,6	0,48	0,22	0,04
39,4	0,44	0,16	0,01
35,0	0,38	0,14	0,00
31,3	0,33	0,18	0,02

Tab. 12: hodnoty kontrastů pro jednotlivá skla v závislosti na zastavovací rovině



Graf 3: kontrast pro polychromatické měření

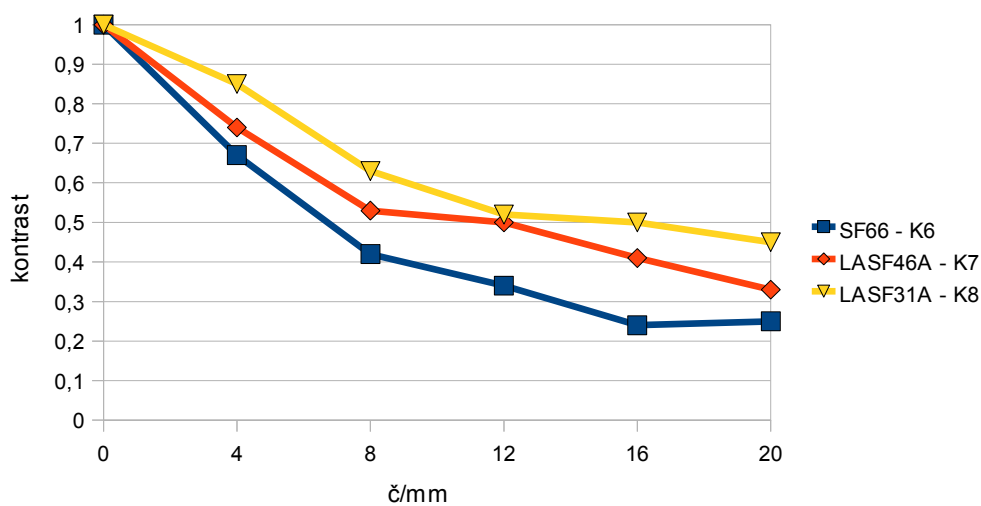
Hodnoty kontrastu jsou nižší než u předchozích měření. Nyní není hlavní příčinou poklesu kontrastu otvorová vada, jak bylo v předchozích měřeních, ale disperze skel – barevná vada.

Projevem disperze je klesající kontrast. S klesajícím Abbeovým číslem se disperze zvětšuje. Disperze se projeví barevnou vadou polohy. Tím klesá rozlišovací schopnost optického systému.

Závěrem tu máme porovnání 3 druhů skel se stejným indexem lomu, ale rozdílným Abbeovým číslem. Jedná se o tyto skla:

typ skla	index lomu	Abbeovo číslo
LASF21A	1,9	40,76
LASF46A	1,9	31,32
SF66	1,9	20,88

Tab. 13: optická skla se stejným indexem lomu



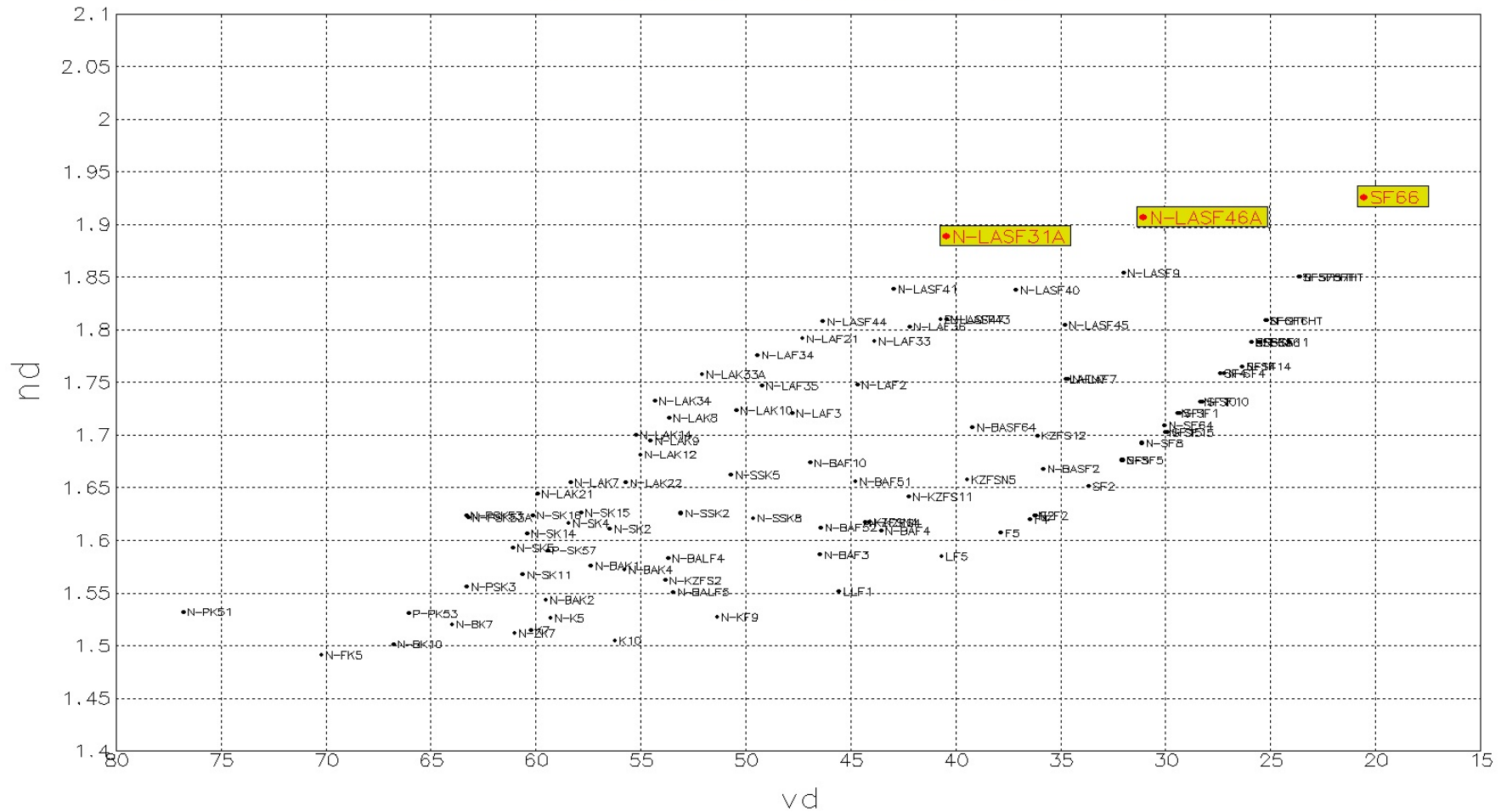
Graf 4: kontrast pro jednočočkové objektivy ze skel se stejným indexem lomu, ale různým Abbeovým číslem od 0 do 20 č/mm

č/mm	SF66 - K <sub>6</sub>	LASF46A - K <sub>7</sub>	LASF31A - K <sub>8</sub>
0	1,00	1,00	1,00
4	0,67	0,74	0,85
8	0,42	0,53	0,63
12	0,34	0,50	0,52
16	0,24	0,41	0,50
20	0,25	0,33	0,45

Tab. 14: hodnoty kontrastu pro objektivy se skly se stejným indexem lomu, ale různým Abbeovým číslem

Potvrdilo se, že s menším Abbeovým číslem (tedy s větší disperzí) se kontrast výrazněji snižuje.

nd - vd Diagram - katalog skel - Shott



Obr. 19: optická skla se stejným indexem lomu z katalogu skel Shott

## Závěr kapitoly 5:

Jednoduché výpočtové experimenty s jednou čočkou ve VIS oblasti potvrdily závěry známé z teorie optické konstrukce. Z uvedených konkrétních příkladů platí pro jednočočkový objektiv o  $f' = 50$  mm,  $c = 7$  ve VIS oblasti pro osový bod a předmět v nekonečnu následující závěry:

1. V případě kvazimonochromatického záření lze s jednorádiusovou bikonvexní čočkou dosáhnout velmi dobrého zobrazení prakticky pro všechny dostupná optická skla. Nejvyššího kontrastu pro 100č/mm se u tohoto typu čočky dosáhlo pro sklo BASF64, kde kontrast má hodnotu 0,41, která je prakticky shodná s fyzikálně dokonalou soustavou.

2. V situaci s kvazimonochromatickým zářením u tvarově optimalizovaných soustav je dosažený výkon velmi blízký fyzikálně dokonalým soustavám. Viz. Obr. 18.

3. U polychromatického záření dochází v porovnání s fyzikálně dokonalou soustavou ke značné destrukci kvality zobrazení. Soustava již není zdaleka difrakčně omezena pro žádné běžné optické sklo.

4. V případě polychromatického záření je velikost destrukce kvality obrazu výrazně závislá na disperzi použitého skla - velikosti Abbeova čísla. Tato závislost výrazně převyšuje příznivý vliv vyššího indexu lomu. Čočka z obvyklého korunového skla typu BK7 vykazuje díky nízké disperzi podstatně lepší kvalitu zobrazení než vysokoindexová skla s vyšší disperzí.

## 6. OPTIMALIZACE JEDNODUŠŠÍCH PRVKŮ V OBLASTI LWIR

V této části se budeme zabývat dlouhovlnnou oblastí LWIR. Opět si v programu OSLO nadefinujeme jednoduchou bikonvexní čočku a monochromatické spektrum o vlnové délce 10  $\mu\text{m}$ , kterou následně optimalizujeme pomocí Seidlova koeficientu 3. řádu. Poté použijeme polychromatické spektrum. K projevům otvorové vady se přidají důsledky barevné vady.

### 6.1. VÝBĚR OPTICKÝCH MATERIÁLŮ

Pro dlouhovlnnou oblast LWIR je počet vhodných optických materiálů podstatně omezenější než v případě optických skel pro oblast VIS. Budeme sledovat vliv jen dvou materiálů, které jsou v současné době v oblasti LWIR hojně užívány. Optické materiály pro LWIR jsou vybrány ze speciálního katalogu Misc programu OSLO, ve kterém jsou uložena data speciálních materiálů od různých výrobců. Jedno je z přírodních materiálů – germanium, druhé je vyrobeno uměle, chalkogenní sklo – Amtir1.

Provedeme sledování výkonu jednoduchých optických soustav – čoček, které jsou zhotoveny z různých druhů materiálů. Použité druhy materiálů jsou uvedeny v tabulce:

typ skla	index lomu	Abbeovo číslo
Germ	4	916,26
Amtir1	2,5	70,04

Tab. 15: typy použitých materiálů

### 6.2. KVALITA ZOBRAZENÍ V KVAZIMONOCHROMATICKÉM A POLYCHROMATICKÉM ZÁŘENÍ

Sledujeme kvalitativní možnosti u bikonvexní čočky z germania, kde  $R_2 = -R_1$ . V programu OSLO do tabulkového procesoru pevně nastavíme clonové číslo  $c = 7$ ; ohniskovou vzdálenost  $f' = 50$  mm; tloušťku čočky  $d = 3$  mm a podmínku  $R_2 = -R_1$ . Program OSLO, ze stanovené podmínky pro poloměry, vypočte vhodné hodnoty poloměrů křivosti vůči zadaným parametrům.

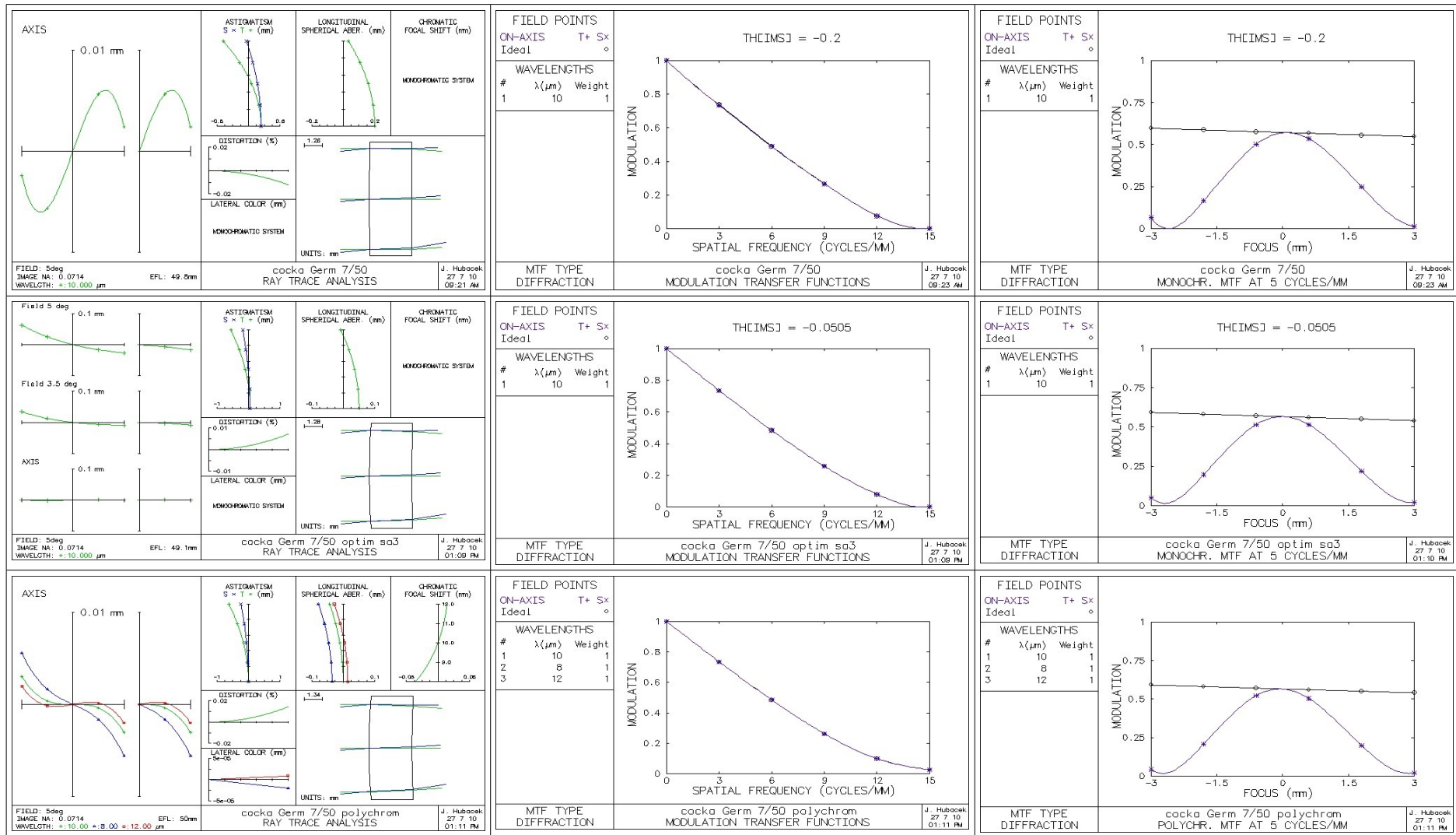
V druhém kroku provedeme optimalizaci Seidlova koeficientu 3. řádu metodou tlumených nejmenších čtverců. Jako korekční parametry byly použity oba poloměry. V korekčním procesu jsme požadovali, aby ohnisková vzdálenost byla rovna 50 mm. U obou operandů byl zvolen váhový koeficient =1.

Chceme-li sledovat výkon optických soustav v polychromatickém režimu, musíme výpočty provádět pro větší počet vlnových délek, které pokrývají, s ohledem na detektor a zdroj záření celé sledované spektrální pásmo. Pro jednoduchost jsme použili tři obvykle používané vlnové délky: 10  $\mu\text{m}$ ; 8  $\mu\text{m}$  a 12  $\mu\text{m}$ .

Vlastnosti pozorované pro optický materiál Germ jsou uvedeny v následující tabulce:

	$c$	$f'$ [mm]	$d$ [mm]	$R_1$ [mm]	$R_2$ [mm]
nekorigované - mono	7	50	3	298,1	-298,1
korigované - mono	7	50	3	76,9	156,0
korigované - polychrom	7	50	3	63,2	105,0

Tab. 16: parametry jednočočkových objektivů z materiálu Germ



Tab. 17: nekorigovaný a korigovaný stav opt. soustavy (monochromaticky) a korigovaný stav opt. soustavy (polychromaticky)

V druhém sloupci pro funkci přenosu kontrastu je v rozsah 0 až 15 č/mm. Ve třetím sloupci pro hodnotu kontrastu v závislosti na zastavovací rovině jde o 5 č/mm.

V porovnání s oblastí VIS u oblasti LWIR dochází ke zhoršení rozlišovací schopnosti optického systému. Viz obr. 18, jednoduchá optická soustava ze skla LASF45, kdy prostorová frekvence dosahuje hodnot až 250 č/mm. Na rozdíl od toho optická soustava z germánia při stejné světelnosti ( $c = 7$ ) dosahuje pouze 15 č/mm. Pokles kvality zobrazení oproti VIS naprosto nesouvisí s aberačním stavem soustavy. Soustava je pro oba druhy materiálu prakticky fyzikálně dokonalá. Pokles kvality zobrazení proti VIS připadá na vrub jedině větším vlnovým délkám, které jsou oproti VIS 20x větší. Proto i limitní rozlišovací schopnost je 20x menší. U této soustavy také nezáleží zda je či není korigovaná a v obou případech je vždy prakticky fyzikálně dokonalá.

Na druhou stranu se jednoduchá optická soustava z germánia velmi blíží fyzikálně dokonalému systému ve všech třech pozorováních. A to díky svému velkému indexu lomu. Vlivem velmi vysokého Abbeova čísla nejsou tak znatelné projevy barevné vady.

### 6.3. KVALITA ZOBRAZENÍ V ZÁVISLOSTI NA SVĚTELNOSTI

Provedeme sledování výkonu jednoduchých optických soustav z hlediska změny světelnosti.

Pevně danými parametry, v programové tabulce programu OSLO, zůstávají ohnisková vzdálenost  $f' = 50$  mm a tloušťka čočky  $d = 3$  mm.

#### 6.3.1. GERMÁNIUM

Okolnost, že ve výše sledovaných případech pro clonové číslo  $c = 7$  jsme dosáhli bezproblémové fyzikální dokonalosti, navozuje otázku, až do jaké hodnoty světelnosti se bude jednoduchá čočka chovat jako fyzikálně dokonalá?

Využijeme optimalizovanou soustavu pro monochromatické světlo z předchozího měření. V programu OSLO budeme postupně měnit clonové číslo,  $c = 3, 2$  a  $1$ . Získané hodnoty a grafy jsou uvedeny v tabulkách 18 a 19.

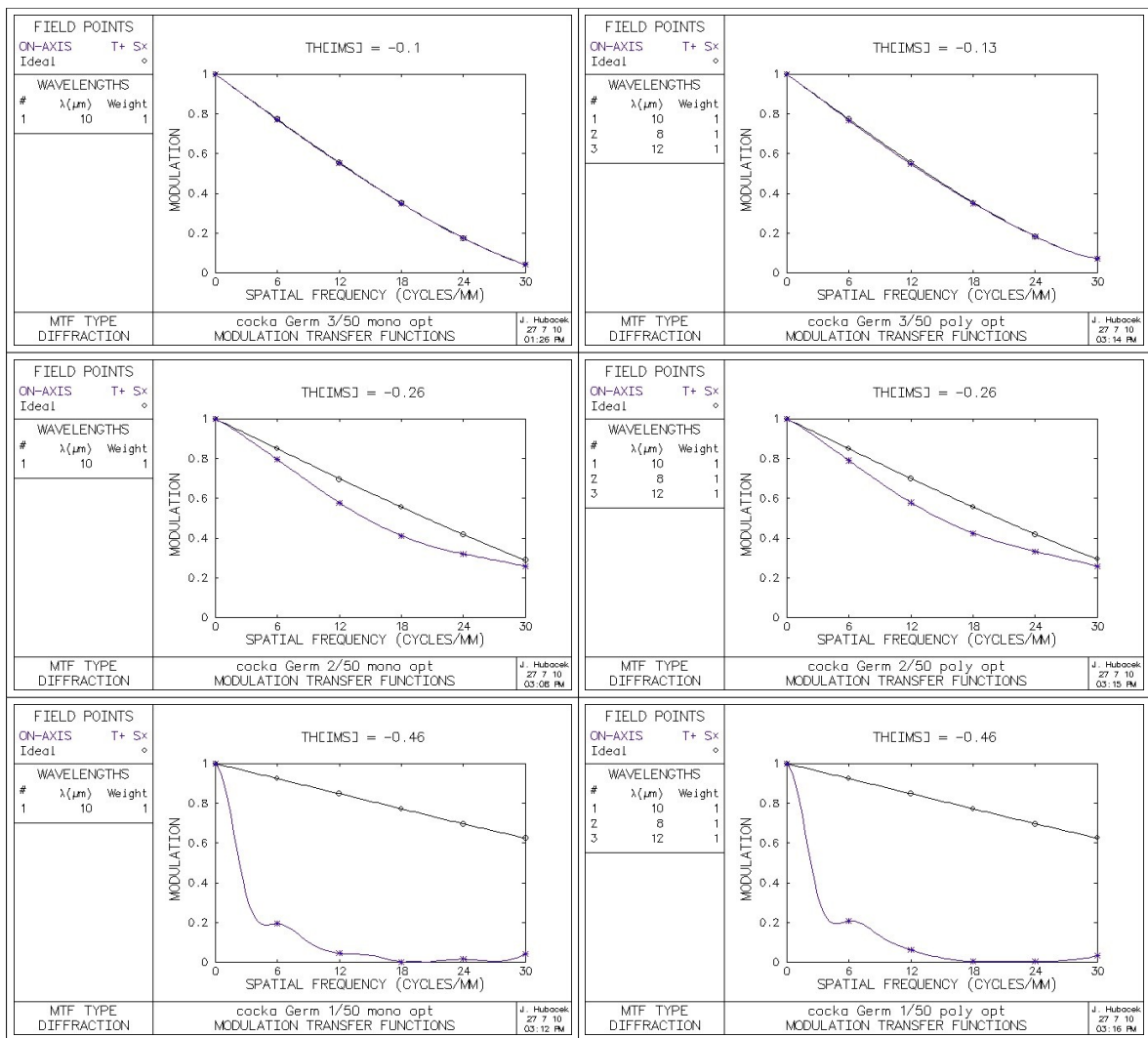


Poté přidáme 2 vlnové délky, 8 a 12  $\mu\text{m}$ . Tím získáme podmínky pro polychromatický režim. Opět provedeme změny clonového čísla a zaznaménáme do tabulek.

Z programu OSLO vyčteme hodnoty kontrastu pro frekvenci 15  $\text{č/mm}$ .

typ skla	clonové číslo	$R_1$ [mm]	$R_2$ [mm]	kontrast
Germ - mono	3	50,7	73,1	0,45
Germ - poly	3	50,9	73,4	0,44
Germ - mono	2	50,7	73,1	0,49
Germ - poly	2	50,5	72,4	0,49
Germ - mono	1	50,7	73,1	0,03
Germ - poly	1	50,5	72,4	0,02

Tab. 18: parametry jednočočkového objektivu z germánia pro různá clonová čísla



Tab. 19: porovnání MFT pro Germanium monochromaticky/polychromaticky pro různá  $C = 3; 2; 1$

I když zde není graficky podloženo, bylo experimentálně zjištěno, že pro clonová čísla  $c > 3$  je optická soustava stále velmi blízká fyzikálně dokonalé soustavě. U clonového čísla  $c = 3$ , jsou již znatelné odchylky od fyzikálně dokonalé soustavy. Proto byly zvoleny hodnoty  $c = 3; 2$  a  $1$ . Spodní hranice  $c = 1$  byla ještě únosná pro zjištění konkrétních hodnot kontrastu.

Srovnáním levého a pravého sloupce v Tab. 19 můžeme říci, že odchylka od fyzikálně dokonalého systému je způsobena hlavně projevem otvorové vady, disperze se díky vysokému Abbeovu číslu projeví minimálně.

### 6.3.2. AMTIR1

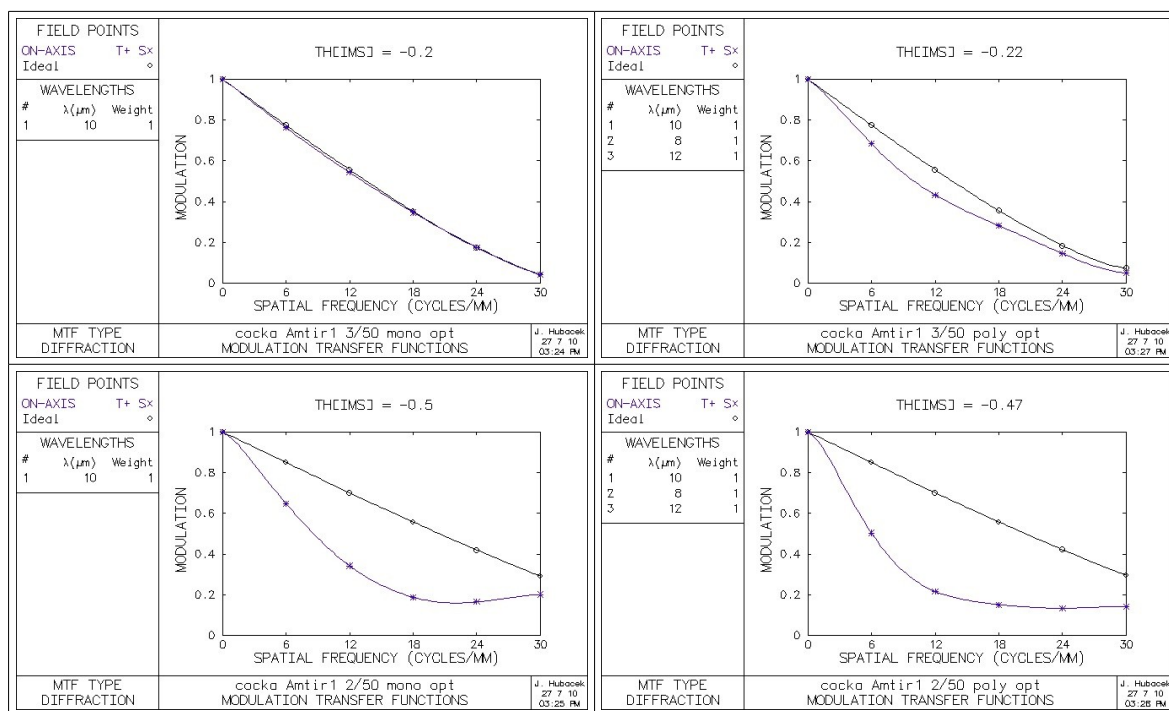
Stejně tak, jako u pozorování s germániem, můžeme využít již nedefinovanou optickou soustavu. Jako výchozí optickou soustavu, použijeme soustavu z tabulky 18, řádek druhý.

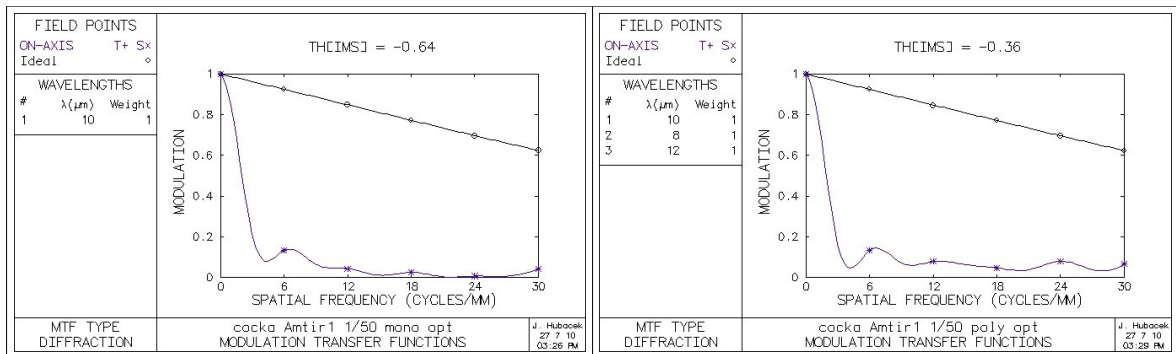
Stačí mám pouze zaměnit Germanické sklo za Amtir1 a provést novou optimalizaci pomocí Seidlova koeficientu 3. řádu. Další postup je identický s předchozí kapitolou. Nejprve budeme měnit clonové číslo a zaznamenávat získané informace do tabulek 20 a 21 pro monochromatické spektrum. Poté totéž provedeme pro polychromatické spektrum.

Uvedené hodnoty kontrastu jsou pro frekvenci 15 č/mm.

typ skla	clonové číslo	$R_1$ [mm]	$R_2$ [mm]	kontrast
Amtir1 - mono	3	45,3	109,9	0,44
Amtir1 - poly	3	45,3	110,0	0,35
Amtir1 - mono	2	45,3	110,0	0,25
Amtir1 - poly	2	45,3	110,0	0,17
Amtir1 - mono	1	45,3	110,0	0,01
Amtir1 - poly	1	45,3	110,0	0,06

Tab. 20: parametry skla Amtir1 pro různá clonová čísla





Tab. 21: porovnání MFT pro Amtir1 monochromaticky/polychromaticky pro různá  $C = 3; 2; 1$

Jednoduchá optická soustava z optického skla Amtir1 se, za podmínky monochromatického spektra a clonového čísla  $c = 3$ , blíží fyzikálně dokonalé soustavě. To se již nedá říci o optické soustavě, kde bylo použito polychromatické spektrum. Kladně se nám zde projevuje vysoká hodnota indexu lomu, ale o poznání nižší Abbeovo číslo oproti germaniu nedokáže zmírnit projevy disperze.

Porovnáním levého a pravého sloupce (viz. Tab. 21) můžeme říci, že jsou zde patrné projevy otvorové vady i disperze.

Závěr kapitoly 6:

1. Jednočlenné optické soustavy s clonovým číslem  $c = 7$ , zhotovené z materiálů Germ nebo Amtir1, jsou omezeny pouze difrakcí.
2. Difrakce má ve srovnání se soustavami ve VIS při stejném clonovém čísle za následek dvacetinásobné zhoršení rozlišovací schopnosti.
3. V LWIR oblasti lze i u jednočlenných objektivů díky, vysokému indexu lomu a Abbeovu číslu, přejít k výrazně vyšším světlostem než u soustav ve VIS oblasti.
4. V případě jednoduchých objektivů z Germania lze dosáhnout dobré kvality prakticky jen s difrakčním omezením i pro soustavy clonovým číslem  $c = 2$ .
5. V případě jednoduchých objektivů z Amtir1 lze dosáhnout dobré kvality prakticky jen s difrakčním omezením i pro soustavy clonovým číslem  $c = 3$ .

## 7. DUBLETY

Ve třetí části našeho sledování výkonů optických systémů přejdeme od jednoduché optické soustavy – singletu, ke složitější optické soustavě – dubletu. Tentokrát budeme vycházet z již ověřených soustav uváděných v literatuře.

V prvním sledování se budeme pohybovat ve viditelné oblasti. Jde o achromatický dublet, který má korigovanou barevnou vadu. Korekce budeme provádět s požadavkem na dodržení ohniskové vzdálenosti, otvorové vady a barevné vady.

V programu OSLO nasimulujeme optický systém podle zadání, následně porovnáme získané parametry s očekávanými výsledky.

Druhé sledování bude v dlouhovlnné oblasti LWIR. Cílem této úlohy je zkoumání difrakčních limitů dvou optických soustav pro různá clonová čísla.

## 7.1. KONSTRUKCE ACHROMATICKÉHO DUBLETU VE VIS

Při návrhu konstrukce objektivu dubletu budeme postupovat dle [27]. Předpokládejme, že chceme konstruovat objektiv, který by splňoval požadavky uvedené v Tab. 22. Specifikace pro náš dublet jsou uvedeny v tabulce 22:

parametr	specifikace
vstupní a výstupní pupila [mm]	50,8
ohnisková vzdálenost [mm]	254
c	5
zorné pole [°]	± 2

Tab. 22: parametry dubletu

Chceme-li začít, musíme nejdříve získat pro achromatický dublet slušný výchozí bod pro počítačovou optimalizaci. Abbeovo číslo pro optická skla

$$\nu = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (7.1)$$

kde  $n_F$  je index lomu pro 0,486  $\mu\text{m}$  nebo kratší vlnovou délku a  $n_C$  je index lomu pro 0,6563  $\mu\text{m}$  nebo delší vlnovou délku. Dále jsou zde prvky objektivu  $a$  a  $b$ , pro které platí

$$\Phi = \Phi_a + \Phi_b \quad \Phi_a = \frac{\Phi \nu_a}{\nu_a - \nu_b} \quad \Phi_b = -\frac{\Phi \nu_b}{\nu_a - \nu_b} \quad (7.2)$$

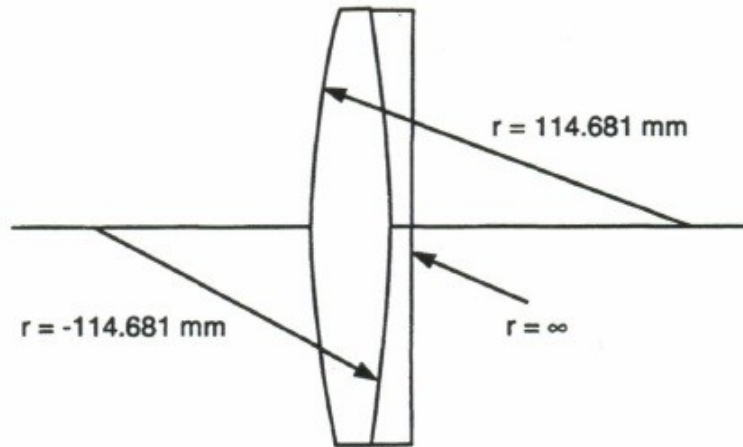
kde  $\Phi$  je optická mohutnost (lámavost).

Budeme předpokládat, že čočka s kladnou lámavostí, je korunové sklo BK7 s indexem lomu  $n_a = 1,517$  a disperzí  $\nu_a = 64,5$ . Jako záporný element uvažujeme flintové sklo SF2 s indexem lomu  $n_b = 1,620$  a disperzí  $\nu_b = 36,3$ . Na základě těchto předpokladů pro skla zjistíme, že  $\Phi_a = 0,009$  (ohnisková vzdálenost = 111 mm) a  $\Phi_b = -0,0051$  (ohnisková vzdálenost = -197,1 mm). Dále předpokládáme, že pozitivní prvek z korunového skla je ekvikonvexní a negativní prvek je plankonkávní. Prvky jsou stmeleny. Pro tenkou čočku známe vztah

$$\phi = \frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (7.3)$$

Pro ekvikonvexní korunové sklo, za podmínky  $R_2 = -R_1$ , odvodíme poloměr křivosti  $R = 114,681$  mm. Pro negativní plankonkávní flintový prvek jsme zjistili, že  $R_1 = -122,806$  mm a  $R_2 = \infty$ . Oba prvky budou stmeleny, jak je ukázáno

na obrázku č. 20. Vzhledem k malému rozdílu mezi hodnotou poloměru rozptylky a spojky, přiřadíme i rozptylce stejnou hodnotu poloměru křivosti jako má spojka. Přiřazením vhodných tloušťek a operací s poloměrem rozptylky došlo ke změně  $f'$ .



Obr. 20: původní návrh achromatického dubletu

Data jsou vložena do tabulkového procesoru, tak jak je to zřejmé z Obr. 21.

The screenshot shows the 'Surface Data' window with the following data:

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.4619e+19	1.2790e+18	AIR	
AST	114.681000	6.350000	25.500000	N-BK7	C
2	-114.681000	3.810000	25.385187	SF2	C
3	0.000000	287.397118	25.388767	AIR	
IMS	0.000000	0.000000	25.833667		

Obr. 21: programovací tabulka dle zadání

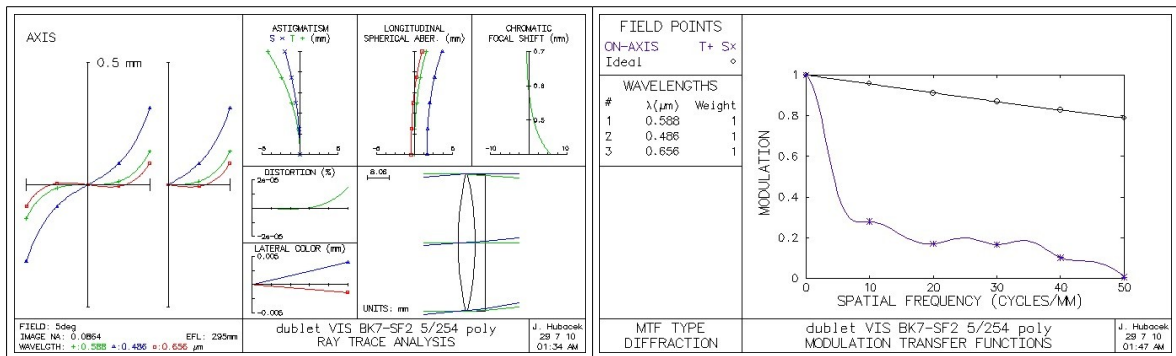
Nyní si ukážeme optimalizaci tohoto optického systému, a na vědomí musíme vzít následující údaje:

- v pravé horní části je označení „EFL“, což znamená efektivní ohnisková vzdálenost. Naším cílem je dosáhnout 254 mm a její současná hodnota

je 295,280160 mm.

- optimalizaci provedeme optimalizací Seidlových koeficientů 3. a 5. řádu metodou tlumených čtverců
- posledním operandem je PAC – paraxiální chromatická aberace. Ta určuje paraxiální podélnou barevnou vadu.

Obrázek 22 ukazuje výchozí stav objektivu a jeho výkon



Obr. 22: původní tvar objektivu a jeho výkon

Následně spustíme optimalizaci zaměřenou na již uvedené EFL, SA3, SA5 a PAC.

Obrázek 23 ukazuje programová data pro optimalizovaný optický systém. Obrázek 24 ukazuje konstrukci a výkon optimalizovaného optického systému. Optimalizovaný objektiv je jednoznačně lepší než původní.

Surface Data

Command:

Gen Setup Wavelength **Field Points** Variables Draw Off Group Notes

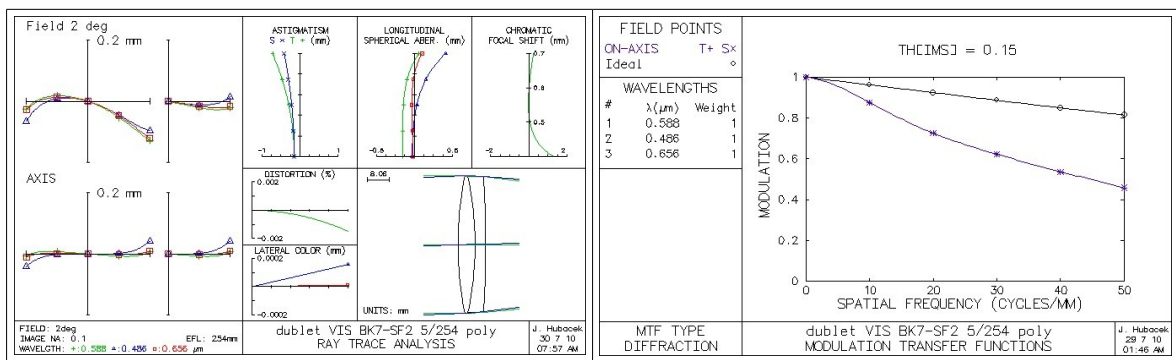
Lens: dublet VIS BK7-SF2 5/254 poly Zoom 1 of 1 Efl 254.000007

Ent beam radius 25.500000 Field angle 2.000000 Primary wavln 0.587562

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.4619e+19	5.1051e+17	AIR	
AST	131.793833	V	6.350000	N-BK7	C
2	-115.006653	V	3.810000	SF2	C
3	-557.513373	V	248.184669	AIR	
IMS	0.000000	0.150000	8.890158	S	

Obr. 23: programovací tabulka po optimalizaci





Obr. 24: optimalizovaný tvar objektivu a jeho výkon

OS	$R_1$ [mm]	$R_2$ [mm]	$R_3$ [mm]	kontrast 15č/mm
původní OS	114.681	-114.681	0	0,21
korigovaný OS	131,794	-115,007	-557,513	0,79

Tab. 23: srovnání parametrů nekorigovaného a korigovaného dubletu

Budeme-li požadovat další zlepšení výkonu, mohli bychom vytvořit mezeru mezi prvky, případně změnit typy skla. Mezera by umožnila vyrovnat 3. a 5. řád sférické aberace, které mohou často udělat velké rozdíly. Změna skla by umožnila lepší korekci chromatické aberace. Další zlepšení by mohlo být dosaženo přidáním třetího prvku. Pokud by se tento nový prvek vyskytoval v blízkosti ohniskové roviny, byl by schopen minimalizovat zklenutí i astigmatismus.

## 7.2. KONSTRUKCE ACHROMATICKÉHO DUBLETU V LWIR

Obdobným způsobem, který byl uveden v kapitole 7.1. můžeme postupovat i při korekci dubletů v oblasti LWIR. Vzhledem k menšímu množství materiálů pro jednotlivé čočky bude úlohu korunového skla plnit germánium, které má  $n_{LWIR} = 916$ . A úlohu flintového skla materiál Amrtir1, který má  $n_{LWIR} = 70$  nebo ZnS s  $n_{LWIR} = 30$ . Dále uvedeme několik příkladů takových konstrukcí z literatury.

<sup>[27]</sup> Pro ilustraci ukážeme, jak mohou optické systémy vypadat a pracovat v infračerveném spektru.

Zpracujeme dva optické systémy dle zadání v literatuře a budeme zkoumat, zda jsou difrakčně omezeny.

Objektivy jsou zhotoveny z germania, Amrtiru1 a sulfidu zinečnatého. Pro každý optický systém ukážeme konstrukční nákres dubletu, příčnou paprskovou aberaci na ose i mimo osu. T

### 7.2.1. DUBLET GE/ZNS

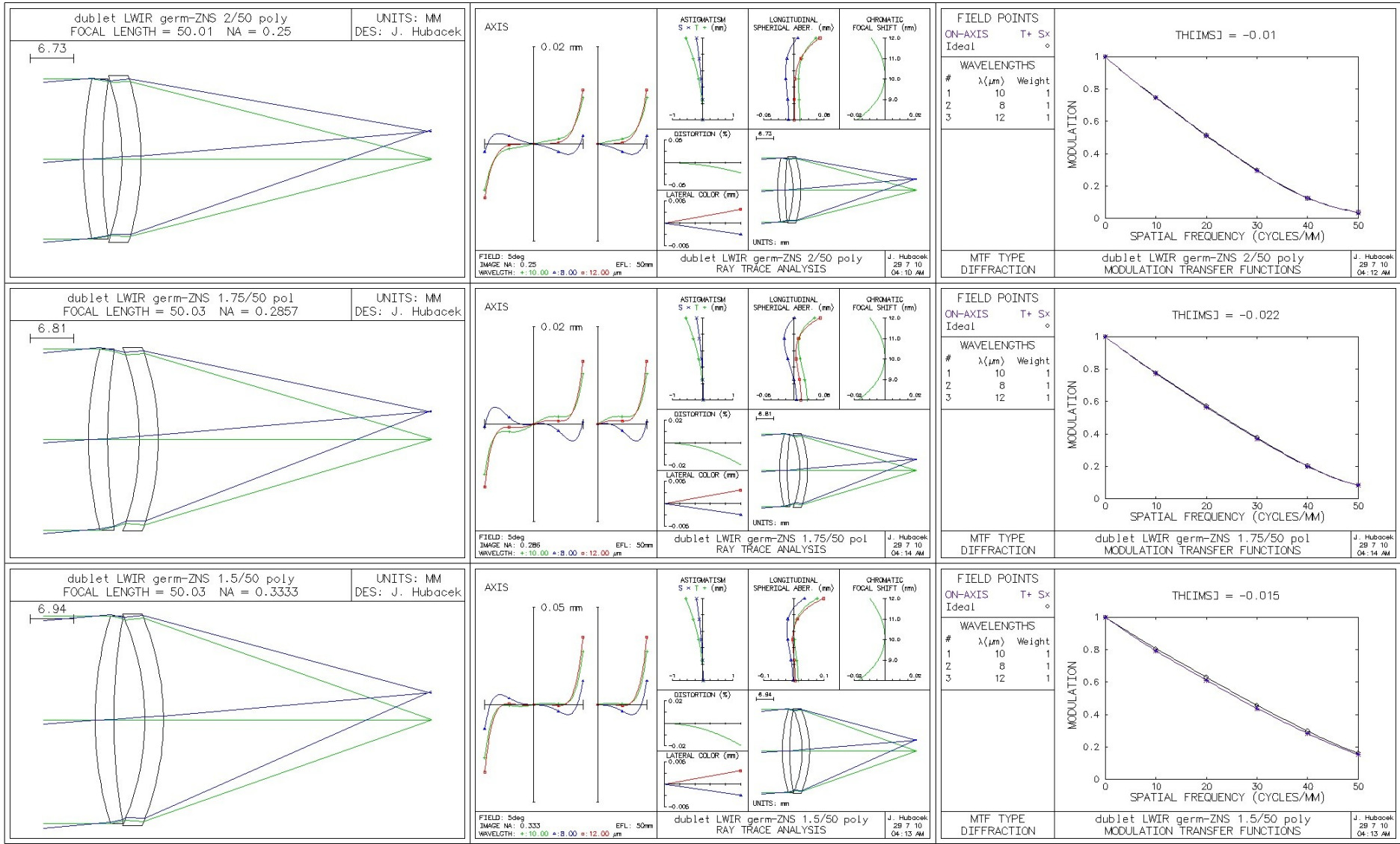
Konstrukční parametry dubletu pro LWIR oblast jsou uvedeny v následující tabulce:

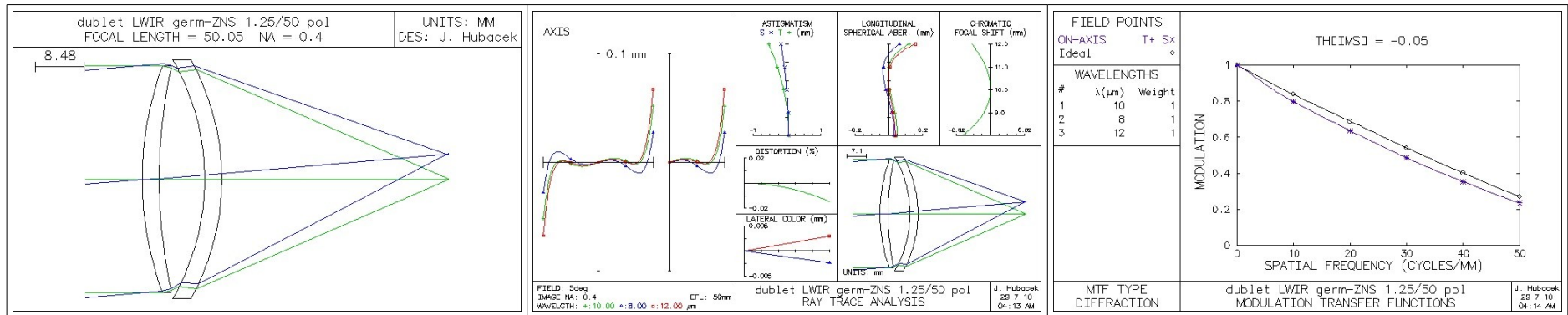
materiál	poloměr křivosti [mm]	tloušťka za plochou [mm]
Germ	57,812	3
vzduch	92,187	3
ZNS	-42,175	3
vzduch	-43,578	45,245

Tab. 24: konstrukční parametry dubletu Ge/ZNS

Dalšími pevně nastavenými parametry v programu OSLO jsou: ohnisková vzdálenost  $f' = 50$  mm a vlnové délky pro polychromatické spektrum  $10 \mu\text{m}$ ;  $8 \mu\text{m}$  a  $12 \mu\text{m}$ .

Difrakční omezenost budeme zkoumat v závislosti na změně clonového čísla.





Tab. 25: změny optického systému Ge/ZnS v závislosti na c

V prvním sloupci můžeme vidět vlastní geometrickou konstrukci dubletu. Ve druhém sloupci geometrický tvar čočky a geometricko-optické aberace. Ve třetím sloupci funkci přenosu kontrastu v rozsahu prostorových frekvencí 0 až 50 č/mm.

clonové číslo	kontrast pro 30 č/mm
2,00	0,30
1,75	0,37
1,50	0,44
1,25	0,48

Tab. 26: hodnoty kontrastu v závislosti na změně  $c$

Soustava je difrakčně omezená a odpovídá fyzikálně dokonalé soustavě prakticky pro všechna námi uvažovaná clonová čísla  $c$ .

### 7.2.2. DUBLET GE/AMTIR1

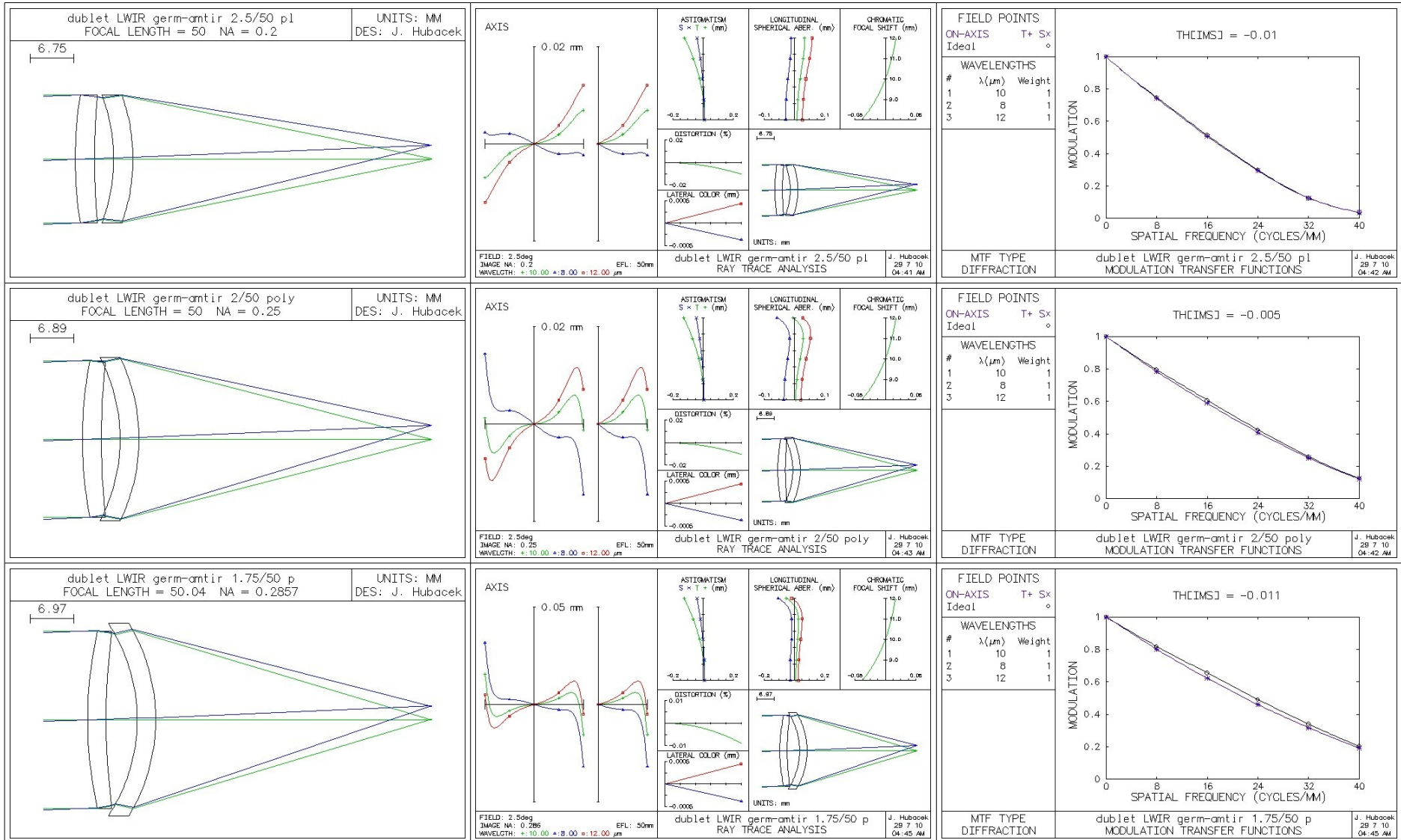
Konstrukční parametry dubletu pro LWIR oblast jsou uvedeny v následující tabulce:

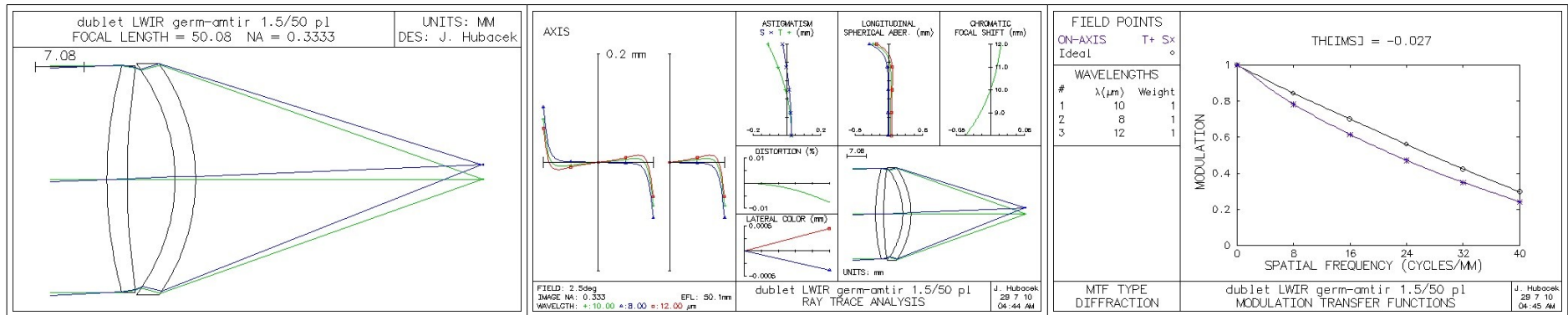
materiál	poloměr křivosti [mm]	tloušťka za plochou [mm]
Germ	64,940	3
vzduch	114,457	3,5
Amtir1	-28,233	3
vzduch	-29,814	45,245

Tab. 27: konstrukční parametry dubletu Ge/Amtir1

Dalšími pevně nastavenými parametry v programu OSLO jsou: ohnisková vzdálenost  $f' = 50$  mm a vlnové délky pro polychromatické spektrum 10  $\mu\text{m}$ ; 8  $\mu\text{m}$  a 12  $\mu\text{m}$ .

Difrakční omezenost budeme zkoumat v závislosti na změně clonového čísla.





Tab. 28: změny optického systému Ge/Antir1 v závislosti na c

V prvním sloupci můžeme vidět vlastní geometrickou konstrukci dubletu. Ve druhém sloupci geometrický tvar čočky a geometricko-optické aberace. Ve třetím sloupci funkci přenosu kontrastu v rozsahu prostorových frekvencí 0 až 40 č/mm.

clonové číslo	kontrast pro 30 č/mm
2,50	0,16
2,00	0,29
1,75	0,35
1,50	0,38

Tab. 29: hodnoty kontrastu v závislosti na změně  $c$

Optický systém je difrakčně omezen do clonového čísla  $c = 1,5$ . Pro nižší clonová čísla se již projevuje vliv optických aberací a systém již není difrakčně omezen. Omezují ho aberace.

Závěr kapitoly 7:

1. Pro optický systém, dublet Ge/ZnS, jsme dosáhli difrakčního omezení do  $c = 1,25$ .
2. Pro optický systém, dublet Ge/Amtir1, jsme dosáhli difrakčního omezení do  $c = 1,5$ .



## 8. TRIPLET

Poslední praktické měření, sledování výkonů optických systémů, je ze spektrální oblasti MWIR. Použijeme tři obvyklé vlnové délky: 4  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  a 5  $\mu\text{m}$ . Jako příklad uvedeme konstrukci tripletu termovizního optického systému, která je převzata z práce [27]. Na této optické soustavě budeme demonstrovat vliv změny teploty optického systému na kvalitu optického výkonu. Současné optické programy používané při analýze a konstrukci termovizních systémů počítají i s teplotními koeficienty změny indexu lomu. Jestliže tedy do programu zadáme příslušnou teplotu optického systému, dostaneme vyhodnocení systému právě pro tuto teplotu.

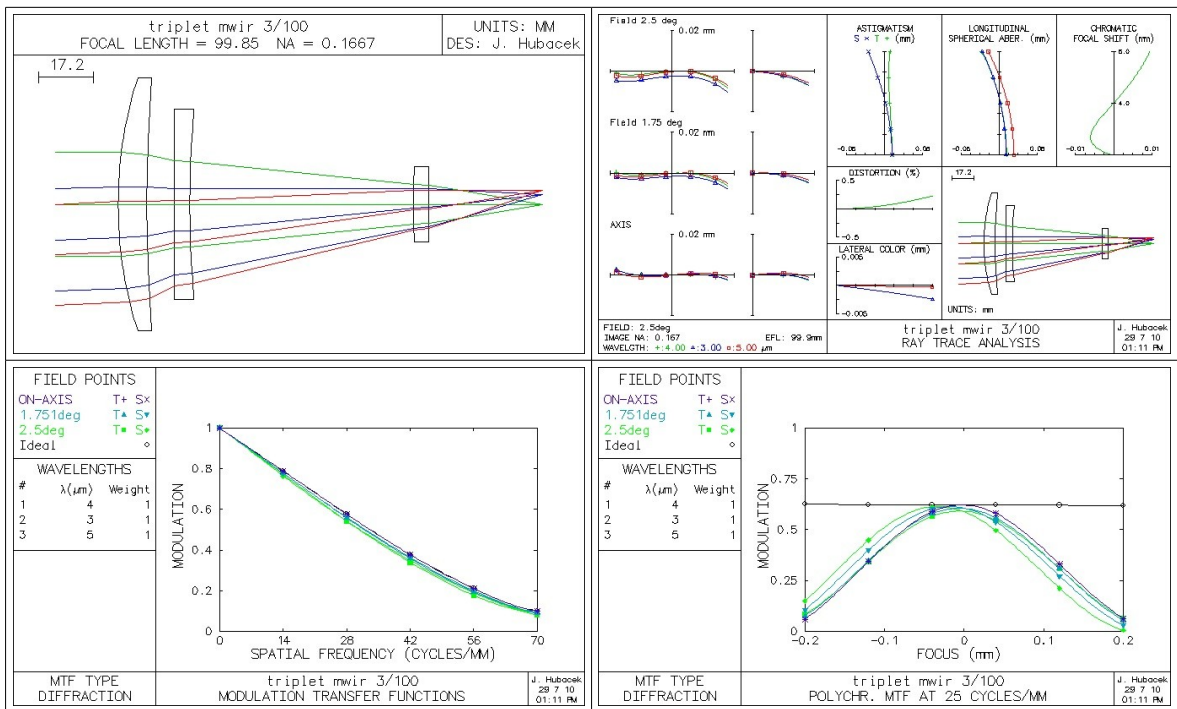
Teplotní rozsah je  $-40^{\circ}\text{C}$  až  $+40^{\circ}\text{C}$ . Obr. 24 ukazuje programová data objektivu triplet, za teploty  $20^{\circ}\text{C}$ . Tuto teplotu budeme brát jako výchozí.

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	4.3661e+18	AIR	
1	132.661000	9.000000	40.000000	SILCN	C
2	480.403000	8.671000	40.000000	AIR	
3	0.000000	5.000000	30.000000	GERM	C
4	340.888000	70.846000	30.000000	AIR	
5	242.000000	5.000000	12.000000	SILCN	C
6	0.000000	10.000000	12.000000	AIR	
AST	0.000000	26.085000	4.349139	AIR	AK
IMS	0.000000	0.000000	4.359626	AIR	S

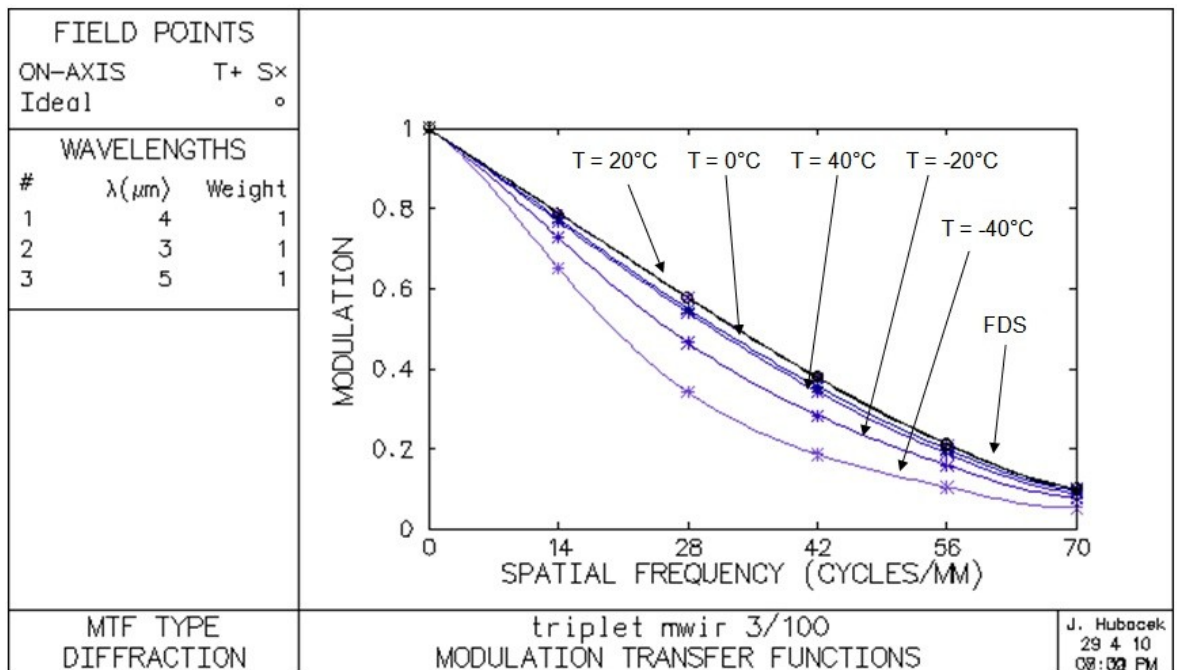
Obr. 25: výchozí stav tripletu

teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]	kontrast pro 40 č/mm
40	0,37
20	0,40
0	0,38
-20	0,30
-40	0,20

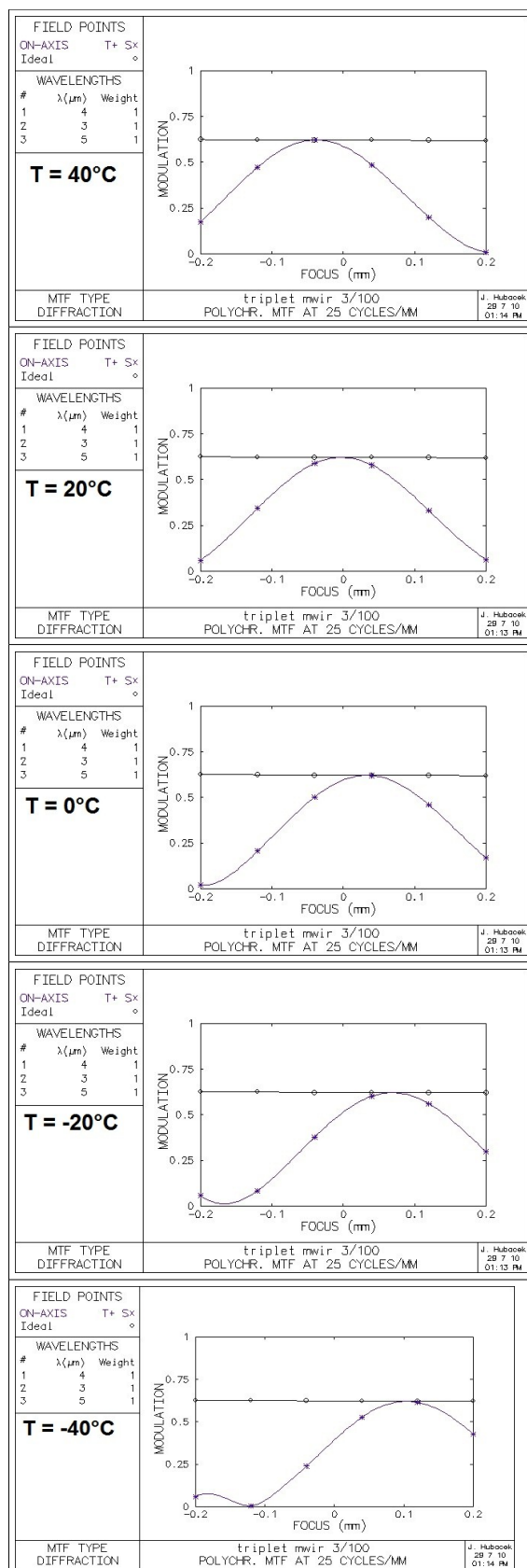
Tab. 30: porovnání hodnot kontrastů v závislosti na teplotě



Tab. 31: geometrická konstrukce tripletu; geometriko-optické aberace; funkce přenosu kontrastu v rozsahu prostorových frekvencí 0 až 70 č/mm; kontrast pro zadanou frekvenci v závislosti na zastavovací rovině, zde konkrétně pro 25 č/mm



Obr. 26: porovnání funkce přenosu kontrastu pro různé teplotní stavy optického systému



Tab. 32: kontrast pro zadanou frekvenci (25 č/mm), v závislosti na zastavovací rovině, pro různé teploty

Závěr kapitoly 8:

Z grafu funkce přenosu kontrastu je patrné, že pro střední prostorovou frekvenci, kolem 30 č/mm, se kontrast v závislosti na teplotě mění v rozsahu až 0,2. Tento efekt není u běžných VIS systémů běžný. Je ale typický pro termovizní MWIR a LWIR systémy. Z tohoto důvodu je při konstrukci nutno brát na tento efekt ohled. A to buď atermalizací optické soustavy nebo využitím mechanické kompenzace s použitím různě roztažných materiálů. Ale tato mechanická kompenzace je většinou slabá. A u výkonných termovizních systémů je nutno provést speciální optickou atermalizaci.

## ZÁVĚR

V oblasti VIS se potvrdily jednoduché výpočtové experimenty známé z optické konstrukce. V situaci s kvazimonochromatickým zářením u tvarově optimalizovaných soustav je dosažený výkon velmi blízký fyzikálně dokonalým soustavám. U polychromatického záření dochází v porovnání s fyzikálně dokonalou soustavou ke značné destrukci kvality zobrazení. Soustava již není zdaleka difrakčně omezena pro žádné běžné optické sklo. Velikost destrukce kvality obrazu je výrazně závislá na disperzi použitého skla - velikosti Abbeova čísla. Tato závislost výrazně převyšuje příznivý vliv vyššího indexu lomu.

V oblasti LWIR jsou jednočlenné optické soustavy s clonovým číslem  $c = 7$ , zhotovené z materiálů Germ nebo Amtir1, omezeny pouze difrakcí. I u jednočlenných objektivů díky vysokému indexu lomu a Abbeovu číslu lze přejít k výrazně vyšším světlostem než u soustav ve VIS oblasti. V případě jednoduchých objektivů z Germania lze dosáhnout dobré kvality prakticky jen s difrakčním omezením.

V případě dubletů jsme dosáhli difrakčního omezení do  $c = 1,25$  (u Ge/ZnS)  $c = 1,5$  (u Ge/Amtir1).

U tripletu se nám podařilo ukázat, že se hodnota kontrastu mění v závislosti na teplotě. Tento efekt není u běžných VIS systémů běžný. Je ale typický pro termovizní MWIR a LWIR systémy.

# SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] Planckův zákon

<http://www.infrared.cz/Technologie/Termovize/>

[2] Teorie termovizních měření

<http://www.ilasseurope2010.org/~pavelek/optika/0700-z01.pdf>

[3] Relativní citlivost lidského oka

[http://space.fjfi.cvut.cz/web/koranda/tutorials/human\\_eye\\_colour\\_perception/human\\_eye\\_spectral\\_sensitivity.jpg](http://space.fjfi.cvut.cz/web/koranda/tutorials/human_eye_colour_perception/human_eye_spectral_sensitivity.jpg)

[4] Teorie termovizních měření

<http://www.ilasseurope2010.org/~pavelek/optika/0700-z01.pdf>

[5] Propustnost atmosféry

<http://www.infrared.cz/Technologie/Zaklad/>

[6] Fuka J., Havelka B. - Optika (fyzikální kompendium). Státní pedagogické nakladatelství 1961

[7] Mikš, A.: Vliv clonového čísla na optické zobrazení. JMO 2007/9 str. 262.

[8] Mikš A.: Aplikovaná optika 10, Vydavatelství ČVUT, Praha 2000.

[9] prostorová frekvence

<http://www.fotoaparát.cz/article/2161/print>

[10] spektrální propustnost skla Bk7

[http://www.laseroptik.de/c\\_subs/9\\_2\\_1\\_bk7.jpg](http://www.laseroptik.de/c_subs/9_2_1_bk7.jpg)

[11] spektrální propustnost skla z germania

<http://www.alkor.net/images/Ge.gif>

[12] spektrální propustnost skla z Amtir1

<http://www.janostech.com/templates/imgs/custom/amtir.gif>

[13] Max J. Riedl - Optical Desing Fundamentals for Infrared Systems. SPIE PRESS 2001.

[14] Abbeovo číslo

[http://cs.wikipedia.org/wiki/Abbeovo\\_%C4%8D%C3%ADslo](http://cs.wikipedia.org/wiki/Abbeovo_%C4%8D%C3%ADslo)

[15] Abbeovo číslo

[http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=107&id\\_casti=48](http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=107&id_casti=48)

[16] Fuka J., Havelka B. - Optika (fyzikální kompendium). Státní pedagogické nakladatelství 1961

[17] Optické aberace

<http://astrotechnika.wz.cz/Optika/OSLO/analyza.htm>

[18] Optické aberace

<http://posec.astro.cz/view.php?cisloclanku=2006020804>

[19] Koma

<http://clanky.katalogfotoaparatu.cz/technologie-digitalni-fotografie/opticke-vady-druha-cast/>

[20] koma

[http://i.idnes.cz/07/103/nesd/JLB1ea05c\\_koma.jpg](http://i.idnes.cz/07/103/nesd/JLB1ea05c_koma.jpg)

[21] astigmatismus a zklenutí pole; zkreslení

[http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=107&id\\_casti=50](http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=107&id_casti=50)

[23] zkreslení

[http://technet.idnes.cz/zakladni-kamen-kazdeho-fotaku-jak-vznika-obraz-v-objektivu-pan-/tec\\_foto.asp?c=A071025\\_103506\\_tec\\_foto\\_jlb](http://technet.idnes.cz/zakladni-kamen-kazdeho-fotaku-jak-vznika-obraz-v-objektivu-pan-/tec_foto.asp?c=A071025_103506_tec_foto_jlb)

[24] barevná vada polohy a velikosti

<http://4oci.cz/history/1-2008/pdf/72.pdf>

[25] barevná vada polohy a velikosti

[http://www.fotoroman.cz/glossary2/2\\_barevna\\_vada.ht](http://www.fotoroman.cz/glossary2/2_barevna_vada.ht)

[26] Poměr signálu a šumu

[http://www.fotoroman.cz/techniques2/camera\\_basic.htm#Pom%C4%9Br%20sign%C3%A1l%20%C5%A1um](http://www.fotoroman.cz/techniques2/camera_basic.htm#Pom%C4%9Br%20sign%C3%A1l%20%C5%A1um)

[27] Robert E. Fisher, Biljana Tadic-Galeb - Optical System Desing. SPIE PRESS – McGraw-Hill 2000