

Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci

katedra optiky



Měření MTF v infračervené oblasti spektra

Vypracoval: Bc. Radek Čikryt

Vedoucí práce: Mgr. Tomáš Zapletal

Konzultant: RNDr. Ing. Jan Podloucký

Studijní obor: magisterské studium Digitální a přístrojová optika

Olomouc 2017

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod odborným vedením Mgr. Tomáše Zapletala a RNDr. Ing. Jana Podlouckého, za použití pramenů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Olomouci dne

Podpis.....

Děkuji panu Mgr. Tomáši Zapletalovi a RNDr. Ing. Janu Podlouckému za poskytnuté rady, dodané materiály ke tvorbě této práce a čas strávený při praktických měření u této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat oddělení Podnikové zkušebny za uvolnění místa k praktickému měření, oddělení Vývoje měřících metod za zapůjčené vybavení a oddělení Vývoje za pomoc při výpočtech teoretických hodnot MTF.

Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora:	Bc. Radek Cikryt
Instituce:	Univerzita Palackého v Olomouci Přírodovědecká fakulta 17. listopadu 1192/12 771 46 Olomouc
Pracoviště:	Katedra optiky
Studijní obor:	Digitální a přístrojová optika
Název práce:	Měření MTF v infračervené oblasti spektra
Vedoucí práce:	Mgr. Tomáš Zapletal
Počet stran:	
Rok obhajoby:	2017
Klíčová slova:	OTF, MTF, PTF, prostorová frekvence, SWIR

Tato práce si klade za cíl popsat funkci přenosu modulace, její význam a metody měření. V praktické části pak navrhnout a sestavit aparaturu k měření MTF v blízké infračervené oblasti a její proměření za pomoci testové čočky.

Bibliographical identification

Author's first name and surname:	Bc. Radek Cikryt
School:	Univerzita Palackého v Olomouci Přírodovědecká fakulta 17. listopadu 1192/12 771 46 Olomouc
Department:	Katedra optiky
Program:	Digitální a přístrojová optika
Title of thesis:	Measurement of the MTF in the infrared spectral range
Thesis consultant:	Mgr. Tomáš Zapletal
Number of pages:	
Thesis defended in:	2017
Keywords:	OTF, MTF, PTF, spatial frequency, SWIR

This thesis aims to describe modulation transfer function, its meaning and methods of measurement. The practical part describes design and construction of MTF measuring equipment in SWIR and results acquired by measurement of the test lens.

Osnova:

Úvod.....	8
1. OTF její výpočet a měření.....	9
1.1. Frekvenční odezva soustav.....	9
1.2. Výhody OTF/MTF.....	12
1.3. Proměnné, na kterých OTF závisí.....	12
1.4. Příklady Fourierových transformací.....	13
1.5. Vytváření obrazu.....	15
2. Přehled měřících technik OTF/MTF pro čočkové soustavy.....	17
2.1. Úvod do měřících technik.....	17
2.1.1. Měření průběhu intenzity v obr. rovině (nekoherentní osvětlení).....	17
2.1.2. Interferometrické metody.....	20
2.1.2.1. Měření pupilové funkce.....	20
2.2. Srovnání MTF měřících technik.....	21
3. Měření OTF/MTF čočkových soustav.....	22
3.1. Návrh OTF/MTF měřícího zařízení.....	22
3.2. Uspořádání optických lavic.....	24
3.2.1. Předmětová rovina v nekonečnu a obrazová v konečnu.....	24
3.2.2. Konečná předmětová i obrazová rovina.....	27
3.2.3. Nekonečná předmětová i obrazová rovina.....	28
3.3. Korekční faktory pro měření MTF.....	29
3.3.1. Konečná šířka štěrbin a apertur.....	29
3.3.2. Charakteristiky spektrální odezvy.....	30
4. Praktické měření.....	31
4.1. Použité vybavení.....	31
4.1.1. Kamera OWL SWIR 640.....	31
4.1.2. Mikroskopový objektiv PE IR Plan APO 20x.....	32
4.1.3. Testová čočka.....	35
4.1.4. Interferenční filtr 1100 nm.....	36
4.1.5. Kříže k měření MTF.....	37
4.2. Měření funkce přenosu kontrastu v blízké infračervené oblasti.....	39
4.2.1. Měřící sestavy.....	39
4.2.1.1. Zakomponování zrcadlového kolimátoru do měřící sestavy...39	

4.2.1.2. Zakomponování čočkového kolimátoru do měřicí sestavy.....	42
4.2.2. Měření MTF testové plankonvexní čočky	42
4.2.2.1. Výsledky měření.....	46
4.2.3. Opakovatelnost měření.....	46
4.2.4. Měření MTF SWIR objektivu.....	47
Závěr.....	52
Seznam použitých zdrojů.....	53
Přílohy.....	54

Úvod

Existuje široké spektrum zařízení a soustav, jejichž hlavním úkolem je vytvářet obraz. Jsou používány pro mnoho rozdílných účelů a nacházejí uplatnění v řadě aplikací kolem nás. Některé z těchto soustav známe velmi dobře, jako například fotoaparát a televizor, jiné zase méně, jako obrazový zesilovač nebo termovizní kamera. Zobrazovací soustavy nacházejí uplatnění ve vědě, medicíně, průmyslu, vojenství, dozoru, kosmickém výzkumu a astronomii, vzdělání, volném čase a případně dalších oblastech.

Jestliže má zařízení nebo soustava splňovat účel, pro který byla navržena, musí být schopna vytvářet obrazy určité minimální kvality. Schopnost definovat tuto kvalitu objektivními kritérii je důležité pro uživatele, konstruktéra i výrobce zobrazovací soustavy.

K úplnému popisu funkce zobrazovací soustavy je potřeba několik různých parametrů. Některé jsou specifické pouze pro daný typ soustavy, zatímco jiné mají všeobecnou platnost. Jednou z nejdůležitějších charakteristik zobrazovacích zařízení je schopnost věrně zobrazovat rozložení relativní intenzity originální scény do výsledného, soustavou vytvořeného, obrazu. Parametr, který se k popisu tohoto aspektu zobrazování používá téměř všeobecně, se nazývá funkce optického přenosu, dále v textu označován jen jako OTF (optical transfer function).

Dále v textu bude rozvedeno co to OTF je, jaké faktory mají vliv na její výpočet, jak se OTF soustavy a zařízení měří.

Velmi stručně řečeno OTF měříme tak, že zjišťujeme jak se kontrast a fáze harmonické mřížky (kde změna intenzity podél kolmice k úsečkám mřížky probíhá harmonicky) reprodukuje zobrazovací soustavou. Část OTF popisující změnu kontrastu se nazývá funkce přenosu modulace, dále v textu označována jen jako MTF (modulation transfer function), zatímco fázová složka se nazývá funkce přenosu fáze, dále označovaná jako PTF (phase transfer function). Jak MTF tak i PTF jsou funkcemi prostorové frekvence harmonické mřížky.

1. OTF její výpočet a měření

1.1. Frekvenční odezva soustav

Frekvenční odezva soustavy je velmi rozšířená v elektronice, řízení a komunikaci, a je již mnoho let základním nástrojem v těchto odvětvích. Základní ideou je, že pokud se na vstup lineární soustavy přivede harmonický signál, na výstupu bude také harmonický signál, a jejich amplitudy budou spojeny rovnicí tvaru

$$S_{out} = F(s)S_{in} \quad (1.1)$$

a vzájemná fáze obou

$$\varphi_{out} = \varphi_{in} + P(s), \quad (1.2)$$

kde s je proměnná reprezentující frekvenci harmonického vstupního signálu. Rovnice (1.1) nám říká, že pro takovou soustavu je poměr výstupní amplitudy ku vstupní vždy, pro určitou hodnotu frekvence, konstantní, avšak pro jinou frekvenci může být jiný. [1, 2]

Objektivy se také chovají jako lineární soustavy a mohou být charakterizovány frekvenční odezvou s tím, že se v tomto případě odezva vztahuje k harmonické mřížce, kterou objektiv reprodukuje jako harmonickou mřížku, jak je znázorněno na obr. 1.1. Mřížka se charakterizuje svou prostorovou frekvencí a ta se obvykle udává v čarách na milimetr (psáno č/mm). Pro tento typ předmětové a obrazové mřížky se intenzita světla mění harmonicky. Intenzita nemůže nabýt záporných hodnot, proto není významným parametrem amplituda sinusovky, ale její kontrast C . Tento je definován jako

$$C = \frac{i_{max} - i_{min}}{i_{max} + i_{min}}, \quad (1.3)$$

kde i_{max} je maximální a i_{min} minimální intenzita (viz obr. 1.1). Ekvivalenty rovnic (1.1) a (2.2) pro zobrazovací soustavu jsou

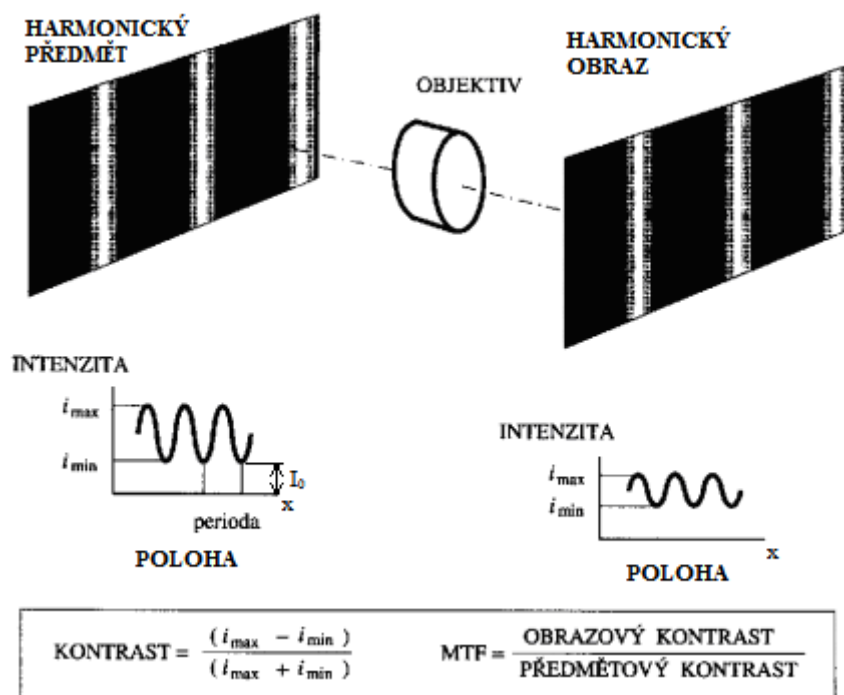
$$C'(s) = MTF(s)C(s) \quad (1.4)$$

a

$$\varphi'(s) = \varphi(s) + PTF(s), \quad (1.5)$$

kde $C(s)$ a $C'(s)$ představují kontrast předmětové a obrazové mřížky pro prostorovou frekvenci s . $MTF(s)$ je funkce přenosu modulace, tj. poměr obrazového kontrastu ke kontrastu

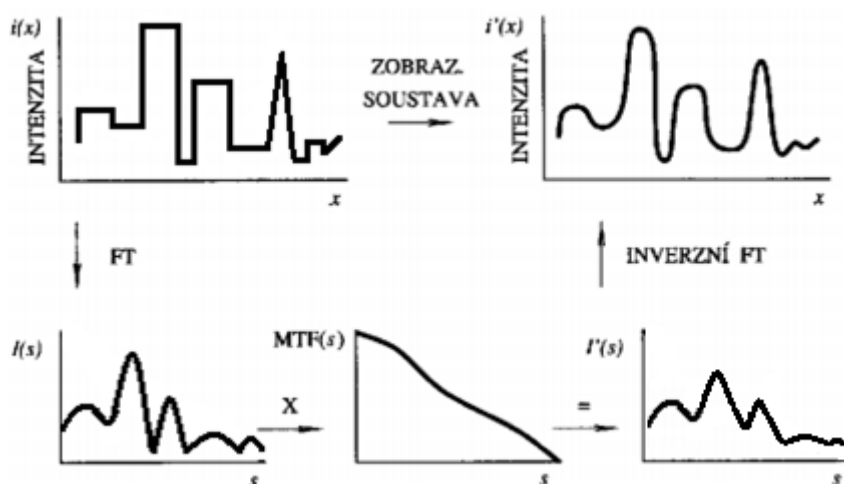
originálního předmětu, $\varphi(s)$ je fáze předmětu, $\varphi'(s)$ obrazu a PTF(s) je funkcí přenosu fáze pro frekvenci s . Aby bylo možné soustavu charakterizovat pomocí MTF, musí být splněna podmínka linearity a (lokální) isoplanasie. [1, 2]



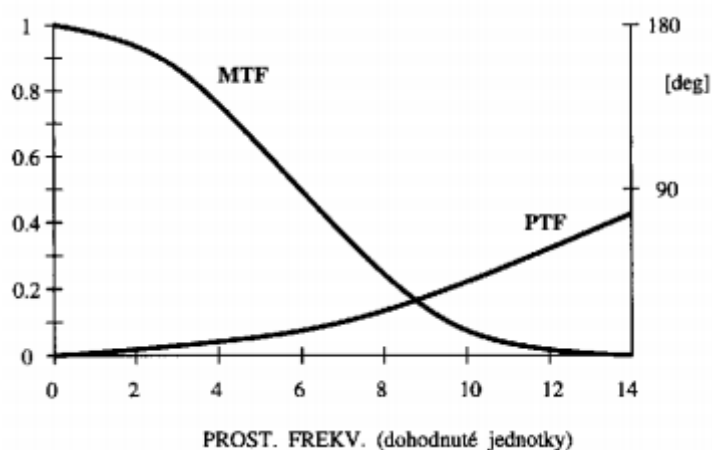
Obrázek 1.1: Znázornění objektivu jako lineární soustavy vytvářející obraz sinusového mřížkového obrazce

Hodnota a význam MTF a PTF je hlavně dán faktem, že všechny jedno- nebo dvoudimenzionální, fyzikálně realizovatelné průběhy parametrů v prostoru nebo čase mohou být vytvořeny součtem harmonických průběhů různých frekvencí, amplitud a fází. Tento vztah je znám jako Fourierův teorém podle francouzského fyzika Jean Fouriere (1768-1830), který jej zformuloval. Jeho důsledky jsou znázorněny na obr. 1.2, kde vidíme průběh intenzity jednorozměrného předmětu. Ten může být rozložen na harmonické složky postupem označovaným jako Fourierova transformace, kterážto stanoví hodnoty relativního kontrastu a fáze pro každou harmonickou složku [termín harmonický se používá obecně a zahrnuje jak sinusovou, tak i kosinovou funkci]. Známe-li MTF a PTF zobrazovací soustavy, užitím (1.4) a (1.5) stanovíme kontrast a fáze všech harmonických složek obsažených v obraze. Procesem zvaným inverzní Fourierova transformace můžeme potom rekonstruovat průběh intenzity v obraze. Principiálně, pokud známe MTF a PTF (tj. OTF) zobrazovací soustavy, pak můžeme přesně stanovit, jak bude obraz daného předmětu vypadat. [1, 2]

Obrázek 1.3 ukazuje typický tvar MTF a PTF křivek, které může mít zobrazovací soustava, a také ukazuje nejobvyklejší způsob jejich grafického znázornění. Důležité je také zmínit, že když se používá OTF pro zhodnocení kvality zobrazovací soustavy, většinou se PTF zobrazovací soustavy obvykle ignoruje. Hlavním důvodem proto je, že významnější fázový posuv se normálně objeví až na vyšších prostorových frekvencích, kde MTF klesá k relativně nízkým úrovním a fázové změny mají malý vliv na obrazovou kvalitu. Avšak jsou situace, kdy je vliv PTF na kvalitu obrazu významný, například u leteckých fotografií, kde může být ovlivněn vzhled velmi malých detailů. [1, 2]



Obrázek 1.2: Použití MTF ke stanovení intenzitního rozdělení v obraze známého předmětu



Obrázek 1.3: Typický průběh MTF a PTF vzhledem k prostorové frekvenci

1.2. Výhody OTF/MTF

Znalost OTF zobrazovací soustavy v principu dovolí výpočet rozložení intenzity v obraze předmětu, který známe. Ovšem je zde mnoho jiných předností:

- OTF většiny zobrazovacích zařízení, může být teoreticky stanovena ze základních konstrukčních dat, takže možné navrhnout zobrazovací soustavu dosahující určitých OTF nebo MTF požadavků a tedy vyhovující výkonnosti pro daný účel.
- OTF u úplné soustavy, můžeme stanovit násobením OTF jednotlivých samostatných prvků vytvářejících sestavu. Tato možnost výpočtu je velmi cenná pro návrháře. Neplatí však pro soustavy u nichž jsou jednotlivé čočky navázány koherentně. Důvod je ten, že jednotlivé čočky mohou mít deformaci vlnoplochy nebo aberace opačné než deformace vytvářené jinou čočkou, takže výsledná aberace je pak menší než individuální aberace.
- OTF/MTF zobrazovací soustavy je objektivní měřicí metoda. Může být měřena v podmínkách jejího použití, což vytváří dobrý základ pro shodné hodnocení výkonnosti různými stranami
- Pro většinu typů zobrazovacích soustav a zařízení jsou komerčně dostupná měřicí zařízení OTF/MTF. [1, 2]

1.3. Proměnné, na kterých OTF závisí

K definování kvality zobrazení potřebujeme zobrazovací soustavu zpravidla popsat více než jednou OTF/MTF křivkou a je třeba přesně definovat podmínky měření. Hlavní parametry, na kterých OTF/MTF zobrazovací soustavy závisí, jsou následující:

- Poloha v zorném poli zobrazovací soustavy - pro většinu zobrazovacích soustav bude obrazová kvalita rozdílná v různých částech pole, obvykle bývá nejlepší ve středu a směrem k okrajům kolísá. Změny jsou ale relativně pomalé a OTF/MTF z několika vybraných bodů zorného pole adekvátně charakterizuje obrazová kvalita soustavy.
- OTF/MTF se všeobecně liší pro různé azimuty testu (tj. orientaci harmonické mřížky). Obvykle je třeba charakterizovat obrazovou kvalitu hodnotami OTF/MTF pro tangenciální a sagitální azimut ve všech vybraných bodech v poli mimo osu.
- Volba zaostřovacího kritéria a tedy obrazové roviny má významný vliv na OTF/MTF. Nejlepší zaostření pro libovolný bod v obrazovém poli by bylo takové, které dává maximální MTF. Avšak MTF nedosahuje maxima pro všechny prostorové frekvence ve stejné poloze obrazové roviny, ani pro všechny azimuty. Dále nejlepší zaostření se

nedosahuje ve stejné rovině pro všechny body pole, což je dáno zklenutím pole, takže musí být také specifikována poloha v poli zvolená pro zaostření. Pro většinu aplikací je to střed obrazového pole.

- MTF zobrazovacích soustav dále závisí na velikosti apertury nebo na nastaveném clonovém čísle.
- Spektrální charakteristiky záření použitého v zobrazovací soustavě nebo zařízení mohou také výrazně ovlivnit MTF. [1, 2]

1.4. Příklady Fourierových transformací

Příklady čtyř Fourierových transformací, které jsou užitečné, když se zabýváme OTF zobrazovacích soustav.

- Pravoúhlá impulsová funkce z obrazu 1.4(a) typicky reprezentuje průběh intenzity napříč osvětlené šterbiny. Pro šterbinu šířky b je Fourierova transformace:

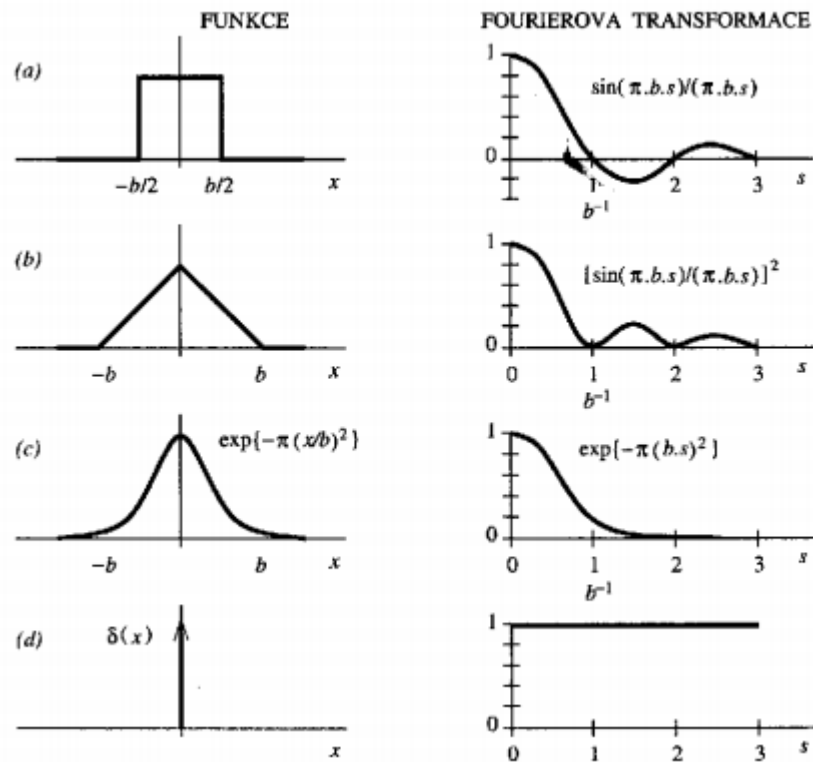
$$\sin(\pi bs) / (\pi bs). \quad (1.6)$$

Šterbina se často používá jako testovací obrazec pro měření OTF/MTF zobrazovací soustavy a (1.6) je potom použita jako korekční faktor při vyhodnocení MTF soustavy. V části prostorového frekvenčního rozsahu je Fourierova transformace záporná. To je pro tyto frekvence bráno jako fázová změna o π .

- Trojúhelníkový profil (obr. 1.4(b)) je průběhem moiré obrazce vytvořeného dvěma přeloženými pravoúhlými mřížkami. Pro trojúhelník se základnou b je Fourierova transformace

$$[\sin(\frac{\pi sb}{2}) / (\frac{\pi sb}{2})]^2. \quad (1.7)$$

Porovnáním s pravoúhlým impulsem vidíme, že hodnoty jsou vždy kladné (tj. nemění se fáze) a amplituda vyšších prostorových frekvencí klesá mnohem rychleji.



Obrázek 1.4: Příklady některých užitečných funkcí a jejich Fourierovy transformace: (a) pravoúhlý impuls, (b) trojúhelníková funkce, (c) Gaussova funkce, (d) Dirakova delta funkce

- Křivka vykreslená na obr. 1.4(c) je známá jako Gaussova a je popsána rovnicí

$$y = \exp \left[-\pi \left(\frac{2x}{b} \right)^2 \right], \quad (1.8)$$

kde $\pm b/2$ jsou body ve kterých hodnota y klesá na 0,043 své velikosti v bodě $x=0$ (tj. šířka základny je téměř b). Fourierova transformace Gaussovy křivky je opět Gaussova křivka. Gaussova křivka nebo kombinace až tří z nich, může být použita jako velmi dobrá aproximace LSF a tím i MTF křivky mnoha zobrazovacích soustav.

- Obr. 1.4(d) ukazuje Fourierovu transformaci Dirakovy delta funkce $\delta(x)$, která má jednotkovou hodnotu pro všechny prostorové frekvence a tím je ideálním testovacím obrazem pro měření OTF/MTF zobrazovací soustavy. [1 ,2]

1.5. Vytváření obrazu

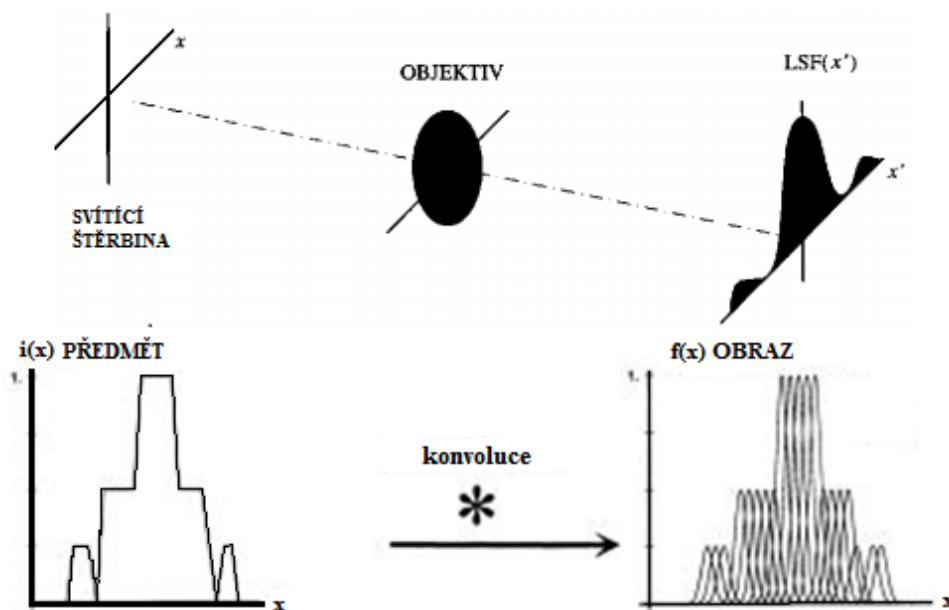
U zobrazovacích soustav, které splňují podmínky linearity (princip superpozice a stacionarity), můžeme uvažovat vytváření obrazu jako součet všech jednotlivých rozložení intenzit produkovaných v obrazové rovině jednotlivými body předmětu.

V jednodimenzionálním případě, když bod v poloze x předmětu vytváří průběh intenzity $f(x' - x)$ v obraze, a jestliže průběh intenzity předmětu je dán $i(x)$, potom intenzita v bodě x' obrazu bude dána (viz obr. 1.5)

$$i'(x') = \int_{-\infty}^{\infty} i(x)f(x' - x)dx . \quad (1.9)$$

Rovnice (1.9) je konvolučním integrálem a může být psána jako

$$i'(x) = i(x) * f(x). \quad (1.10)$$



Obrázek 1.5: Konvoluce rozdělení intenzity předmětu s LSF vytváří rozdělení intenzity v obraze

$$I'(s) = I(s)F(s), \quad (1.11)$$

kde $I'(s)$, $I(s)$ a $F(s)$ jsou Fourierovy transformace $i'(x)$, $i(x)$ a $f(x)$. Takto dostáváme důležitý výsledek, že

$$OTF(s) \equiv F(s), \quad (1.12)$$

tj. OTF zobrazovací soustavy je Fourierovou transformací obrazu bodového předmětu. V jednorozměrném případě, jde o průběh intenzity v obraze nekonečně úzké štěrbině, obvykle nazývané funkce obrazu přímky (LSF), takže platí

$$OTF(s) = FT[LSF(x)] = \int_{-\infty}^{\infty} LSF(x) \exp(-i2\pi xs) dx. \quad (1.13)$$

Rovnice (1.11) je alternativním způsobem vyjádření (1.4) a (1.5). OTF(s) je komplexní funkcí, která zahrnuje jak MTF tak PTF:

$$OTF(s) = MTF(s) \exp[iPTF(s)], \quad (1.14)$$

tedy

$$MTF(s) = |OTF(s)| = [T_c^2(s) + T_s^2(s)]^{0,5}, \quad (1.15)$$

kde T_c je kosinusová transformace a T_s sinusová transformace.

Je třeba poznamenat, že MTF se vždy normalizuje na jednotku pro nulovou prostorovou frekvenci. Normalizace MTF na jednotku pro nulovou prostorovou frekvenci znamená, že neobsahuje informaci o absolutních hodnotách intenzit, ale jen o kontrastech. [1, 2]

Některé důležité vztahy při vytváření obrazu:

Je dobré poznamenat, že pro optickou soustavu je amplitudová funkce obrazu bodu (APSF) Fourierovou transformací pupilové funkce

$$P(u, v) = \alpha(u, v) \exp[-ikW(u, v)], \quad (1.16)$$

(kde u, v jsou souřadnice ve výstupní pupile, $\alpha(u, v)$ je průběh amplitudy v pupile, $W(u, v)$ je aberace vlnoplochy a k je vlnové číslo) a je dána

$$APSF(x, y) = \iint P(u, v) \exp\left[-\frac{2\pi(xu+yv)}{\lambda r}\right] dudv, \quad (1.17)$$

kde r je poloměr referenční koule pro zvolený obrazový bod. Intenzitní rozptylová funkce

$$PSF(x, y) = APSF(x, y)APSF^*(x, y), \quad (1.18)$$

kde hvězdička označuje komplexně sdruženou hodnotu.

Pro úzké přímkové předměty rovnoběžné s osou y je LSF libovolné zobrazovací soustavy spojena s PSF rovnicí

$$LSF(x) = \int_{-\infty}^{\infty} PSF(x, y) dy. \quad (1.19)$$

2. Přehled měřících technik OTF/MTF pro čočkové soustavy

2.1. Úvod do měřících technik

Existují dva rozdílné přístupy k měření OTF. Jeden je založen na použití známého nekoherentně osvětleného předmětu v předmětové rovině zobrazovací soustavy, a dále měření a analýze průběhu intenzity ve výsledném obraze, čímž se stanoví OTF soustavy. Druhý přístup obvykle využívá interferometrických metod.

Variantou pupilové metody, která je z řady důvodů dostatečně odlišná, aby mohla být považována za třetí metodu, je stanovení OTF přímým měřením autokorelace pupilové funkce. [3, 5]

2.1.1. Měření průběhu intenzity v obrazové rovině (nekoherentní osvětlení)

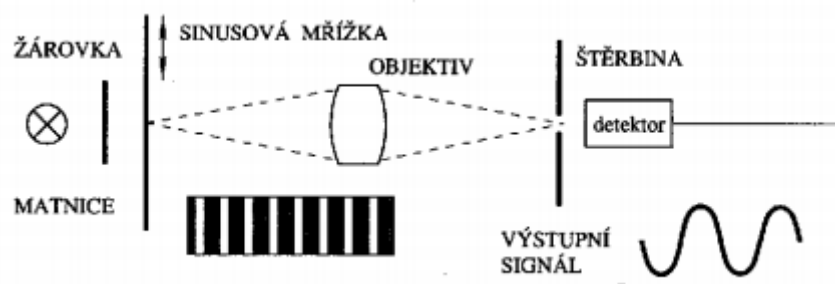
A. Použití rozlehlých periodických mřížek

Koncem 50-tých a v 60-tých letech, dříve než byly dostupné stolní počítače, bylo značnou výhodou jednoduché stanovení $I'(s')$ z naměřené $i'(x')$, zvláště pokud nebylo potřeba číslicového počítače pro Fourierovu transformaci.

Jednou z cest je použití sinusové mřížky jako předmětu tak že, obraz bude také sinusovou mřížkou, ale s menším kontrastem a možná jinou fází. Rovnice takové mřížky je

$$i(x) = i_{av}[1 + C \cos(2\pi xs + \varphi)]. \quad (2.1)$$

Vhodné uspořádání pro toto měření je schématicky znázorněno na obr. 2.1. Předmět je nekoherentně a rovnoměrně osvětlená rovinná mřížka, jejíž propustnost se sinusově mění. [5]



Obrázek 2.1: Měření MTF pomocí rozlehlé periodické sinusové mřížky

V obrazové rovině testované čočky je velmi úzká štěrba, která je rovnoběžná s proužky mřížky, a za ní je detektor, který přijímá všechno prošlé světlo. Je potřebné zajistit pohyb buď mřížky nebo štěrby, aby se mohl změřit průběh intenzity v obraze mřížky.

Je-li kontrast předmětové mřížky jednotkový, potom je MTF přímo rovno kontrastu obrazu této mřížky. Tento kontrast může být stanoven ze záznamu signálu z detektoru, pokud štěrbinu s detektorem příčně skenuje obraz mřížky. Alternativně může být mřížka skenována tak, že se její obraz pohybuje příčně vůči stacionární štěrbině. Jednoduchá mřížka poskytne MTF pouze na jedné prostorové frekvenci. K vykreslení celé MTF křivky bychom museli mít řadu mřížek různých prostorových frekvencí.[3, 5]

B. Použití štěrbinu nebo břítu

Fourierova transformace nekonečně úzké štěrbinu je jednotka pro všechny frekvence (tj. $I(s) = 1$). Použijeme-li takovou štěrbinu jako testovací předmět, vidíme z rovnice pro funkci obrazu přímky LSF(x) její konvolucí s mřížkovou funkcí $i(x)$, kde dostáváme průběh intenzity v obraze přímky

$$i'(x') = \int_{-\infty}^{\infty} LSF(x' - x)i(x)dx, \quad (2.2)$$

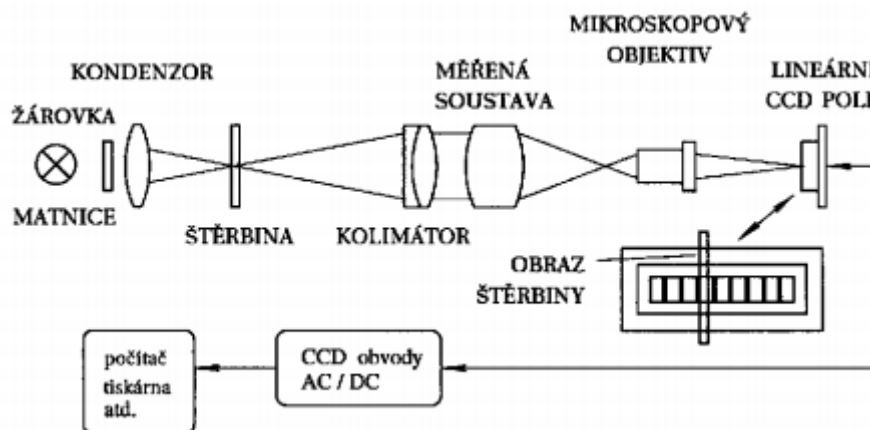
že OTF bude přímo rovna Fourierově transformaci $I'(s)$ obrazu této štěrbinu.

Použití štěrbinu nebo břitů jako předmětových obrazců je v současnosti nejčastější metodou měření OTF/MTF. Obraz předmětu je skenován štěrbinou (nebo otvorem) a detektorem, čímž se dostane LSF (v případě štěrbinového předmětu) nebo funkce obrazu rozhraní (v případě břitového předmětu). OTF se získá provedením Fourierovy transformace LSF nebo v případě funkce obrazu rozhraní (ESF) její konverzí na LSF (derivováním) a následnou Fourierovou transformací. Oblíbenost metody je dána relativní jednoduchostí uspořádání a dostupností malých mikroprocesorů nebo stolních počítačů, které mohou velmi rychle i přesně zpracovat signál a provést Fourierovu transformaci.[3, 5]

Současná LSF a ESF zařízení spadají do dvou hlavních kategorií. Ty, jejichž LSF nebo ESF jsou skenovány mechanicky posuvem štěrbinu nebo břítu, a se skenováním elektronickým, téměř vždy pomocí pole detektorů.

Nasazení počítače pro ovládání zařízení dovolí značnou přizpůsobivost. Například délka skenování, počet sejmutých bodů při skenování a počet cyklů přerušení pro průměrování každého bodu mohou být při měření snadno optimalizovány (ve smyslu přesnost versus čas) pro daný měřený objekt. Počítač také dovolí úplnou volnost, co se týká rozsahu a počtu prostorových frekvencí, na kterých se OTF počítá. [3, 5]

Zařízení pro měření OTF pomocí CCD pole detektorů pro skenování LSF je znázorněno na obr. 2.2.



Obrázek 2.2: MTF zařízení používající štěrbinový předmět a analyzátor s lineárním polem detektorů a se zpracováním signálů počítačem

Předmětem je pevná osvětlená štěrbinová. Obraz štěrbin (tj. SSF) je vytvářen testovaným objektivem, a ten je mikroskopovým objektivem promítnut na lineární CCD pole. Jeho řídicí jednotka umožňuje integrovat signál pro každý prvek (většinou nazývaný jako pixel) a číst jej v sériovém tvaru. To je vlastně SSF, signál se dále digitalizuje a přivádí do počítače spolu se signálem z řídicích obvodů reprezentujících posloupnost pulsů pro čtení CCD. Počítač provádí také nezbytnou Fourierovu transformaci SSF a pro získání OTF, zavádí signálovou korekci pro změny citlivosti a temného signálu mezi pixely a matematickou korekci spektra SSF s ohledem na konečnou šířku jak zobrazované, tak i fotometrovací štěrbin (pixelu). Inicializuje čtení CCD a může řídit čas, po který je signál integrován na CCD před čtením, stejně jako počet a vzdálenost pixelů použitých pro výpočet OTF. [3, 5]

Hlavní výhody použití pole detektorů, oproti mechanickým metodám, pro skenování LSF (nebo ESF) jsou následující:

- Neobsahuje pohyblivé části a snadno může být dosaženo rychlého skenování.
- Pole je fotometricky mnohem účinnější, neboť signál z každého pixelu může být integrován po celou dobu skenovací periody.

Hlavní nevýhody použití pole detektorů:

- Může dojít k omezení použití v řadě různých spektrálních oblastí. Je to proto, že nebývají dostupná pole detektorů pro všechny vlnové délky tak jako jednotlivé detektory. Mechanické skenování dovolí použití jakéhokoli detektoru, včetně velmi účinných jako jsou fotonásobiče.
- Když musí být detektory umístěny v Dewarově nádobě kvůli chlazení, v cestě obrazu se při použití polí vždy vyskytne okénko. To způsobí aberace, ledaže NA světelného svazku prošlého okénkem je dostatečně malá.

- MTF maticového snímače se může lišit pro různé vlnové délky, což může vést k obtížím a chybám při aplikaci korekčního činitele, pokud je měření prováděno v širokém spektrálním rozsahu.

Většina z výše uvedených problémů se vyřeší umístěním snímače do předmětové roviny v nekonečnu (tj. do ohniska kolimátoru) a zdroje do obrazové měřeného objektivu. Jedinou nevýhodou toho je, že měřítko prostorové frekvence v obrazové rovině měřeného objektivu (kde si jej většinou přejeme definovat) již není nezávislé na měřené jednotce. Avšak to může být překonáno zavedením vhodných automatických kalibračních postupů do sestavy. [3, 4, 5]

2.1.2. Interferometrické metody

2.1.2.1. Měření pupilové funkce

Software dodávaný s většinou komerčních interferometrů nyní umožňuje výpočet a vykreslení jedno nebo dvoudimenzionální MTF. Interferometr v principu měří vlnovou aberaci optické soustavy, která předpokládáme, že se rovná pupilové funkci, která se vyjádří vztahem

$$P(u, v) = \alpha(u, v) \exp[ikW(u, v)]. \quad (2.3)$$

Pupilová funkce je nenulová uvnitř apertury soustavy a mimo tuto aperturu je nulová (kde u, v jsou souřadnice ve výstupní pupile, $\alpha(u, v)$ je průběh amplitudy v pupile, $W(u, v)$ je aberace vlnoplochy a k je vlnové číslo). Z té je možno vypočítat MTF, tak že na pupilovou funkci aplikujeme Fourierovu transformaci, získáme amplitudovou funkci obrazu bodu (APSF), z kvadrátu funkce APSF získáme intenzitní rozptylovou funkci, ze které po integraci získáme funkci obrazu přímky (LSF). Pomocí Fourierovy transformace stanovíme OTF z výše zmíněné LSF, která může být vypočtena ze znalosti pupilové funkce. [6]

Vlnová aberace může být vypočtena z jednotlivého interferogramu. Interferogram je většinou vytvářen v obrazové rovině CCD kamery a její signál je formou bloků dat převeden do počítače. Software analyzuje interferogram, automaticky vyhledá pruhy a zobrazí je spolu s originálním interferogramem. Přesnost takového měření je dána tím, jak blízko sobě jsou interferenční pruhy. Ta je však omezena rozlišovací schopností detektoru.

Přesnější technika měření vlnové aberace pomocí interferometru je ta, která se nazývá technika fázového posuvu. Principem je měření ze tří a více interferogramu s referenční plochou posunutou mezi měřeními o vzdálenost odpovídající fázovému posuvu $\pi/4$ pro každý bod interferogramu. [6]

2.2. Srovnání MTF měřících technik

V této kapitole uvažujeme výhody a nevýhody MTF měřících technik.

Měření pomocí rozlehlých periodických mřížek

Výhody: Může se měřit s monochromatickým nebo multispektrálním zářením, je velmi účinné z hlediska záření, takže vytváří nízkošumový signál. Je významné tam, kde je důležitá přesnost na prostorových frekvencích, pro něž je úroveň MTF nízká.

Nevýhody: Mohou být problémy s nalezením vhodné techniky pro spojitou změnu prostorové frekvence. Přesné sinusové mřížky je těžké vyrobit, ale potíže s jinými typy mřížek mohou být snadno řešeny, zvláště použitím číslicového zpracování a Fourierovou analýzou. Je pomalejší než jiné techniky, pokud se zpracovává celý frekvenční rozsah.

Měření pomocí štěrbiny nebo bříty

Výhody: Může se měřit s monochromatickým nebo multispektrálním zářením. Relativně snadná a nenáročná implementace číslicového zpracování signálu a možnost překrytí velkého rozsahu prostorových frekvencí.

Nevýhody: Méně účinné z hlediska využití záření než rozlehlé mřížky, avšak toto může být potlačeno vhodným průměrováním.

Výpočet z pupilové funkce měřené interferometrem

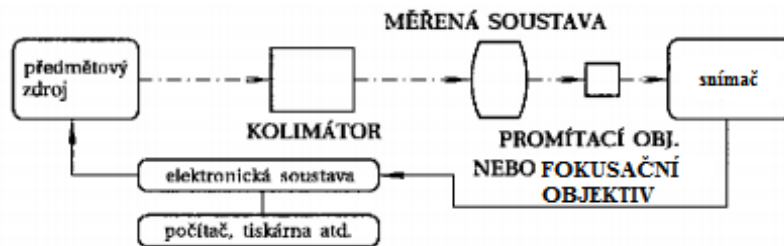
Výhody: Poskytuje užitečné diagnostické informace.

Nevýhody: Normálně umožňuje pouze monochromatické měření na jedné vlnové délce. Významné chyby mohou vzniknout cloněním, které odřeže kousek pupily. Defekty, které způsobí rychlé změny sklonu vlnoplochy, mohou být při měření přehlédnuty a způsobí chybu. Je obtížné aplikovat běžné uspořádání mechanické lavice pro měření na ose a mimo osu v ohniskové rovině.

3. Měření OTF/MTF objektivů soustav

3.1. Návrh OTF/MTF měřicího zařízení

Většina zařízení pro měření OTF zobrazovacích soustav je typu, kde se měří průběh intenzity v obraze známého, nekoherentně osvětleného předmětového obrazce a z něj je stanovena OTF. Je běžné považovat zařízení měřící OTF tímto způsobem za složené z řady základních jednotek, jak je znázorněno v blokovém diagramu na obr. 3.1.



Obrázek 3.1: Základní jednotky vytvářející OTF/MTF zařízení pro měření optické soustavy

Předmětový zdroj nebo předmětová měřicí jednotka:

Je to jednotka nebo část zařízení, které vytváří nekoherentně osvětlený měřicí obrazec použitý pro OTF měření. Obecně zahrnuje zdroj záření, měřicí obrazec (štěrbina, břit, periodické struktury) a některé druhy optických zařízení na jeho osvětlení a směrování záření k měřenému kusu (kondenzorová čočková soustava). Pro dosažení skutečně korektního měření, musí zdroj s předmětovým obrazcem ozářit větší plochu, než je vstupní apertura měřeného kusu. Pro většinu aplikací postačuje, když je větší 1,5x. [7, 8]

Obrazový analyzátor:

Je to jednotka nebo část sestavy, která měří nebo analyzuje rozlišení intenzity v obraze vytvářeném měřenou zobrazovací soustavou. Obecně obsahuje clonu nebo clony, které definují měřicí aperturu a detektor.

Optická lavice:

Mechanické zařízení, na které je umístěno veškeré zařízení potřebné k provedení potřebného měření. Detailní uspořádání optické lavice je dáno druhem testované optické soustavy a podmínkami jeho použití, které se mají napodobit.

Kolimátor:

Pro měření mnoha optických soustav se požaduje předmět umístěný zdánlivě v nekonečnu. Kolimátory rozeznáváme dva základní typy; refrakční (čočkový) a reflexní

(zrcadlový), který jsou umístěné do světelné dráhy mezi předmětový zdroj a měřenou jednotku, kde způsobí, že předmětový měřicí obrazec se jeví jako by byl v nekonečnu. Teoreticky musí být kolimátor dokonale vykorigovanou soustavou (tj. bez aberací), neboť neexistuje přímá možnost korekce naměřené MTF měřené jednotky na chyby způsobené aberací kolimátoru. Existuje několik faktorů týkajících se možných chyb zavedených kolimátorem.[7, 8]

- Má-li měřená jednotka aberace, zbytkové aberace kolimátoru mohou buď zvýšit, nebo snížit naměřené MTF.
- Měřená jednotka často využívá jen část apertury kolimátoru. Zaváděná chyba kolimátorem bude obecně menší, než při využití plné apertury kolimátoru.

Refrakční kolimátory – mají řadu výhod vůči reflexním kolimátorům.

- I dobře korigované kolimátory mohou být vyrobeny pouze z kulových ploch;
- refrakční kolimátory mají obvykle všechny svoje prvky centrovány vzhledem k optické ose;
- je možné vytvořit návrh, který bude velmi výkonný v potřebném úhlu pole.

Nevýhody refrakčních kolimátorů.

- Obecně mohou být tyto kolimátory dobře korigovány pro velmi omezený rozsah vlnových délek;

Reflexní kolimátory – nejběžnější uspořádání reflexního kolimátoru je mimoosový s parabolickým zrcadlem. Hlavní výhody.

- Jednoduchý kolimátor může pokrýt velmi široký rozsah frekvencí. Může sloužit jak ve viditelné, blízké IR, tak i v tepelné IR.
- Velké kusy materiálů vhodných pro výrobu zrcadel jsou snadno dostupné.

Nevýhody reflexních kolimátorů.

- Jelikož mimoosové paraboloidy jsou asymetrické a mají být použity při správném mimoosovém úhlu, může být obtížná jejich správná justáž.

Fokusační objektiv:

Je to v zásadě kolimátor použitý naopak, tj. pro vytvoření obrazu v konečné vzdálenosti od výstupu měřené jednotky (například binokulár), která nevytváří obraz v konečné vzdálenosti.

Promítací objektiv:

Pomocná optická soustava, která přenesení obraz z jednoho místa na druhé. Promítací objektivy mohou zvětšovat obraz, nebo jej mohou převést z fyzicky nepřijatelného místa na přijatelné pro například obrazový analyzátor.

Měřená jednotka:

Je to objektiv nebo jiná soustava, jejíž OTF/MTF chci změřit.

3.2. Uspořádání optických lavic

V mnoha případech jde o nejkritičtější část měřícího zařízení, neboť relativně malé chyby, například, přímosti vedení nebo uchycení jednotek k soustavě lavice mohou vést k výrazným chybám ve výsledcích měření.

Existují tři hlavní typy optické lavice pro měření optických soustav:

- s měřeným objektivem, který má předmětovou rovinu v nekonečnu a obrazovou v konečnu (např. fotografické objektivy);
- s měřeným objektivem, který má předmětovou a obrazovou rovinu v konečnu (např. zvětšovací nebo kopírovací objektivy);
- pro měření afokálních soustav, které mají předmětovou i obrazovou rovinu v nekonečnu (např. dalekohledy a binokuláry).

Mnohá provedení optických lavic jsou navržena univerzálně v tom smyslu, že mohou být nastaveny k provádění libovolného ze tří zmíněných typů měření.[7, 8]

3.2.1. Předmětová rovina v nekonečnu a obrazová v konečnu

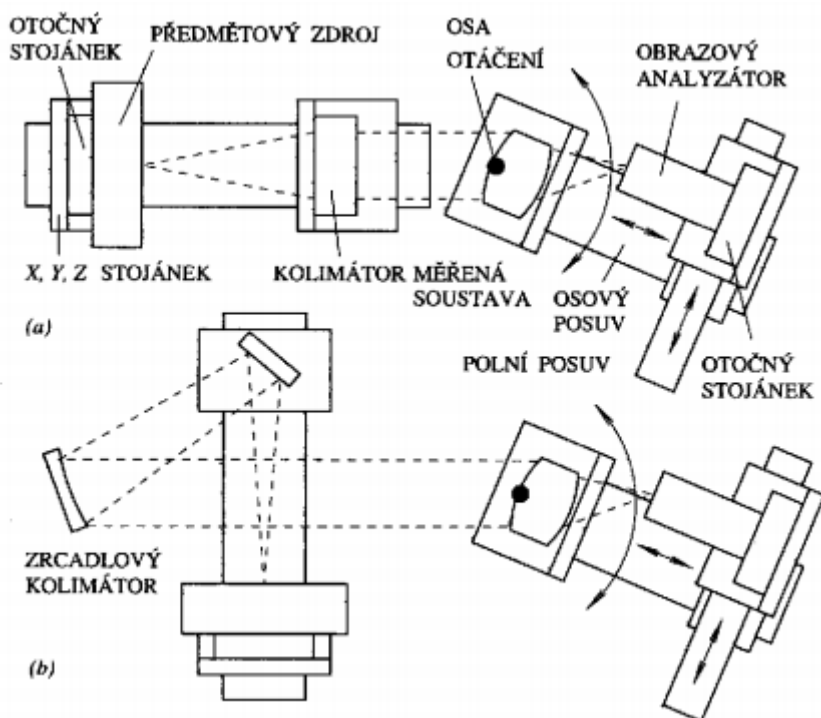
Osová a mimoosová 'kamerová' měřící lavice

Nejobvyklejší měřící lavice pro měření jak na tak mimo osu je většinou označováno jako 'kamerová lavice'. Je to proto, že obsahuje polní vedení, které je přesně kolmé k optické ose měřené jednotky a které, podobně jako filmová dráha v kameře, definuje obrazovou rovinu pro osová a mimoosová měření. Existuje několik různých uspořádání kamerové lavice, zde si popíšeme tu, která je nejpoužívanější.

Na obr. 3.2 (a) a (b) je znázorněna kamerová lavice pro měření pomocí kolimátoru refrakčního a reflexního. Její hlavní vlastností je, že předmětový zdroj a kolimátor zůstávají statické a měřená jednotka s obrazovým analyzátozem se pohybují, aby se dostaly mimo střed pole.

Obr. 3.2a znázorňuje uspořádání s refrakčním kolimátorem. Obsahuje plochou desku, na které je připevněn posuv nesoucí předmětový zdroj a kolimátor spolu s jednotkou, kterou můžeme specificky označit jako 'kamerovou lavici'. Toto se skládá ze základny, která se otáčí kolem svislé osy ve své přední části. Na této základně je obrazová lavice se dvěma držáky.

Jeden z nich nese měřenou jednotku a druhý další vedení kolmé k prvnímu a označované ‘polní’ vedení. Na polním vedení je pak další držák, který nese obrazový analyzátor.



Obrázek 3.2: Uspořádání kamerové lavice pro měření na a mimo osu pomocí kolimátoru : (a) refrakčního, (b) reflexního.

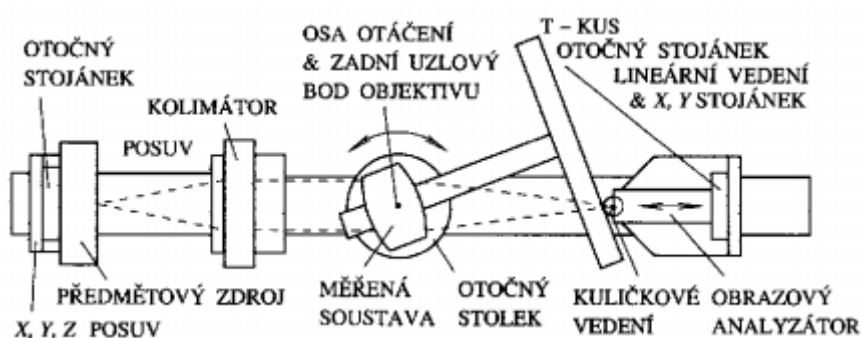
K tomu je dále potřebná řada mikrometrických stojánek a jiných mechanických posuvů. Aby bylo možno nastavit správně sestavu a polohu různých jednotek.[7, 8]

Osový a mimoosový ‘uzlový vozík’ nebo ‘T’ lavice

Tento typ lavice je schematicky znázorněn na obr. 3.3. Soustava se skládá z dlouhého vedení, na kterém jsou připevněny 4 jednotky: předmětový zdroj s montáží, kolimátor, sestava uzlového vozíku s objektivem a obrazový analyzátor s montáží.

Zvláštností uzlové lavice je uzlové upevnění měřící jednotky. Zahrnuje stojánek otočný kolem svislé osy, na kterém je připevněn přímý mikrometrický posuv a držák na přichycení měřené jednotky. K tomuto přímému posuvu je také připojen T-kus posuvný v lineárním vedení. Účelem tohoto stojánku je zabezpečit, aby byla měřená jednotka umístěna tak, že její zadní uzlový bod je přesně nad osou rotace otočného stojánku. Když je tato podmínka splněna, obraz vytvářený měřenou jednotkou se během otáčení měřené jednotky do mimoosové polohy bočně neposouvá. Avšak poloha ohniska obrazu se vzdaluje od uzlového bodu. Aby se to

kompensovalo, obrazový analyzátor je připevněn na lineární posuv, který dovolí pohyb tam a zpět od uzlového bodu. Jeho poloha je řízena prostřednictvím T-kusu s kuličkovým ložiskem.



Obrázek 3.3: Uzlové a T uspořádání lavice

Hlavní výhody lavice s uzlovým vozíkem:

- Jakmile je měřená jednotka na lavici správně najustována a zaostřena, mimoosová měření mohou být prováděna jednoduše natáčením uzlové základny. Není třeba žádného seřizování obrazového analyzátoru.
- Světlo z měřené jednotky dopadá vždy přibližně podél optické osy obrazového analyzátoru. Tento musí mít pouze takovou aperturu, která odpovídá numerické apertuře dané měřené jednotky.
- Skutečnost, že vzdálenost mezi osou rotace uzlové základny a kuličkového ložiska je rovna ohniskové vzdálenosti měřené jednotky, poskytuje vhodnou metodu k jejímu měření.

Navzdory těmto výhodám se lavice s uzlovým vozíkem používá málo. Důvody jsou následující:

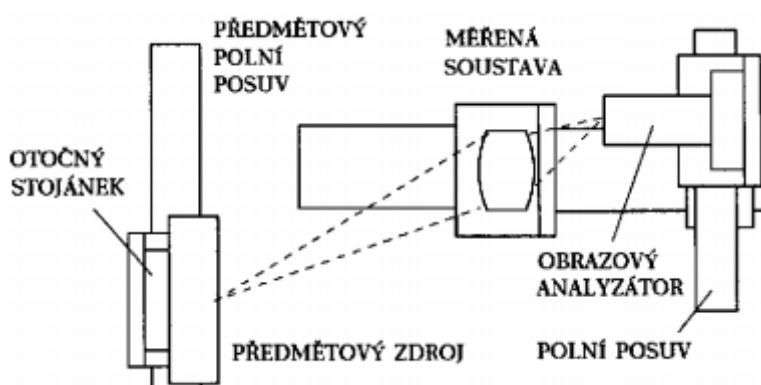
- Ačkoliv konstrukční tolerance nejsou výrazněji nižší než ty, které jsou požadovány pro sestavu kamerové lavice, zdroje možných chyb jsou četnější a komplexnější.
- Maskou obrazového analyzátoru může být v praxi pouze štěrbina nebo otvor, neboť obraz musí být umístěn přesně v ose otáčení ložiska, které je v dotyku s T-kusem. To také vylučuje možnost skenování obrazovým analyzátozem.
- Reálné objektivy mají distorzi. Musí se tedy zajistit justování stranové polohy obrazového analyzátoru v průběhu mimoosového měření, jinak dojde v ohniskové rovině k defokusačním chybám.

Některé nevýhody mohou být odstraněny tak, že optická osa obrazového analyzátoru zůstane kolmá k referenční ploše T. Boční posuv obrazového analyzátoru v tomto případě nezpůsobí rozostření a je také možné použít rozlehlého obrazce jako masky pro obrazový analyzátor, stejně jako skenujícího obrazového analyzátoru. Avšak ztratíme tím jednu z hlavních výhod, která je spojena s tím, že světlo z měřené jednotky dopadá rovnoběžně s optickou osou obrazového analyzátoru.[7, 8]

3.2.2. Předmětová i obrazová rovina v konečnu

Normální uspořádání pro měření s konečnou předmětovou a konečnou obrazovou rovinou je znázorněno na obr. 3.4.

Sestava lavice obsahuje dva polní posuvy a zaostřovací posuv. Jeden polní posuv definuje předmětovou rovinu a nese držák, na kterém je připevněn předmětový zdroj a umožní mu umístění kdekoliv v předmětovém poli. Druhý polní posuv definuje obrazové pole a také nese držák, na kterém je v tomto případě umístěn obrazový analyzátor.



Obrázek 3.4: Uspořádání optické lavice pro konečné předmětové a obrazové ohniskové vzdálenosti

Pro správné nastavení sestavy optické lavice je nutno splnit následující podmínky:

- Nosič předmětového zdroje a nosič obrazového analyzátoru se musí pohybovat vzájemně rovnoběžně.
- Referenční plocha stojánku nesoucího měřenou jednotku musí být nastavena vzhledem k polním posuvům tak, aby optická osa měřené jednotky byla k oběma posuvům kolmá

Důležité pro tento typ uspořádání lavice je, že předmětový zdroj musí poskytnout osvětlovací kužel, který obsáhne nejméně tak velký úhel, jako je maximální úhel pole ve kterém

se měří s dostatečným úhlovým přírůstkem pro pokrytí apertury měřené jednotky a splnění požadavků nekoherentnosti.[7, 8]

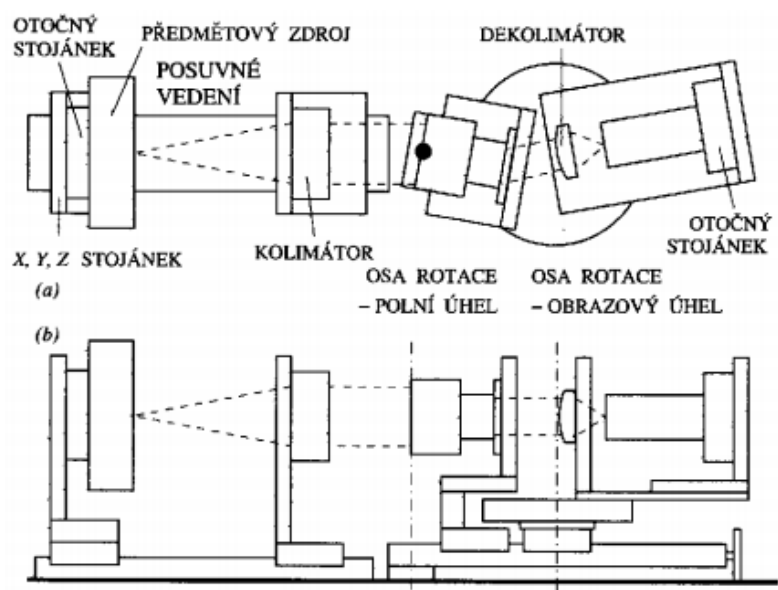
3.2.3. Předmětová i obrazová rovina v nekonečnu

Pro afokální optické soustavy (dalekohledy, binokuláry, periskopy), které mají obě ohniska v nekonečnu, vyžadují nejen kolimátor, který předmět přesune do nekonečna, ale také fokusační objektiv, který přemění obraz v nekonečnu na reálný přístupný obrazovému analyzátoru.

Zařízení znázorněné na obr. 3.5 je totožné uspořádáním z obr. 3.2 (a) pro měření s nekonečnou předmětovou a konečnou obrazovou ohniskovou vzdáleností. Předmětový zdroj je v ohnisku kolimátoru a oba zůstávají ve stálých polohách na optické ose.

Měřená afokální soustava je připevněna na základně, která se může otáčet přibližně kolem vstupní pupily soustavy. Také na této základně je druhá otočná základna, na které je připevněn fokusační objektiv a obrazový analyzátor, jeho analytická maska je v ohnisku fokusačního objektivu. Osa otáčení druhé základny je umístěna tak, že prochází přibližně výstupní pupilou měřené jednotky.

Při provádění mimoosových měření je nejprve hlavní základna natočena do požadovaného polního úhlu. S druhou základnou se potom otáčí tak dlouho, až je optická osa fokusačního objektivu rovnoběžná se směrem kolimovaného svazku vystupujícího z měřené jednotky.



Obrázek 3.5: Uspořádání lavice pro nekonečnou předmětovou i obrazovou vzdálenost:

(a) půdorys, (b) bokorys

Pro správné nastavení tohoto typu optické lavice musí být splněny následující podmínky.

- Měřicí obrazec předmětového zdroje má být v ohnisku kolimátoru.
- Pokud je hlavní základna nastavena na nulový polní úhel, referenční plocha držáku měřené jednotky by měla být kolmá ke kolimovanému svazku.[9]

3.3. Korekční faktory pro měření MTF

Na některých stupních měření MTF je nezbytné použít pro naměřené hodnoty různých korekčních činitelů, abychom dostali správný výsledek. Tito korekční činitelé jsou spřaženy s parametry měřícího zařízení.[10, 11]

3.3.1. Konečná šířka štěrbin a apertur

Při použití štěrbin nebo kruhových otvorů jako předmětových obrazců a/nebo jako analytických masek, je potřeba naměřenou MTF korigovat. Korigovaná MTF je dána

$$MTF_{kor} = \frac{MTF_m}{MTF_{obj}MTF_{obr}}, \quad (3.1)$$

Kde MTF_m je naměřená (nekorigovaná) MTF, MTF_{obj} je MTF štěrbin nebo otvoru použitého jako předmětový obrazec a MTF_{obr} je MTF štěrbin nebo otvoru použitého jako analytická maska.

MTF štěrbin je dána

$$MTF_{st}(s) = \frac{\sin(\pi sb)}{\pi sb}, \quad (3.2)$$

kde s je prostorová frekvence a b je šířka štěrbin.

MTF kruhového otvoru je dána

$$MTF_{kr}(s) = \frac{2J_1(\pi sd)}{\pi sd}, \quad (3.3)$$

kde $J_1(\pi sd)$ je Besselova funkce prvního řádu a d je průměr apertury.

Důležité je, aby se všechny MTF v (3.1) vztahovaly k jedné sdružené rovině. Obvykle jde o obrazovou rovinu, ale rovněž jí může být předmětová rovina, je-li měření prováděno v konečné vzdálenosti nebo předmětový prostor. K dosažení homogenity hodnot b a d použitých pro výpočet MTF_{obj} a MTF_{obr} se musí obě vztahovat k vybrané sdružené rovině.

Tedy, pokud je štěrbina nebo otvor v předmětovém zdroji a obrazová rovina je rovinou, ke které se MTF hodnoty vyjadřují, potom se musí na danou šířku štěrby nebo průměr apertury aplikovat vhodný činitel zvětšení předtím, než se počítá korekční faktor. [10, 11]

3.3.2. Charakteristiky spektrální odezvy

OTF objektivů bude závislé na celkové charakteristice spektrální odezvy měřícího zařízení. To bude funkcí spektrálního rozdělení záření zdroje, charakteristik spektrální odezvy detektoru, spektrální propustnosti optických prvků měřícího zařízení a také všech spektrálních filtrů umístěných do optické dráhy.

Rovnice shrnující tyto parametry je

$$R_E(\lambda) = N_{zdr}(\lambda)R_{det}(\lambda)T_{opt}(\lambda)T_{filt}(\lambda), \quad (3.4)$$

kde λ je vlnová délka, $R_E(\lambda)$ je celková odezva zařízení, $N_{zdr}(\lambda)$ je záření zdroje, $R_{det}(\lambda)$ je odezva detektoru, $T_{opt}(\lambda)$ je propustnost optiky v zařízení a $T_{filt}(\lambda)$ je propustnost všech filtrů v optické dráze.

Při měření OTF optické soustavy je celková spektrální odezva zařízení obvykle nastavena tak, aby byla co nejpodobnější podmínkám pro aplikaci této soustavy. Pro dosažení toho musí zdroj zářit na všech vlnových délkách ve spektrálním pásmu, o které se jedná, detektor musí všechny tyto vlnové délky přijímat a optika zařízení je musí přenášet.

4. Praktické měření

4.1. Použité vybavení

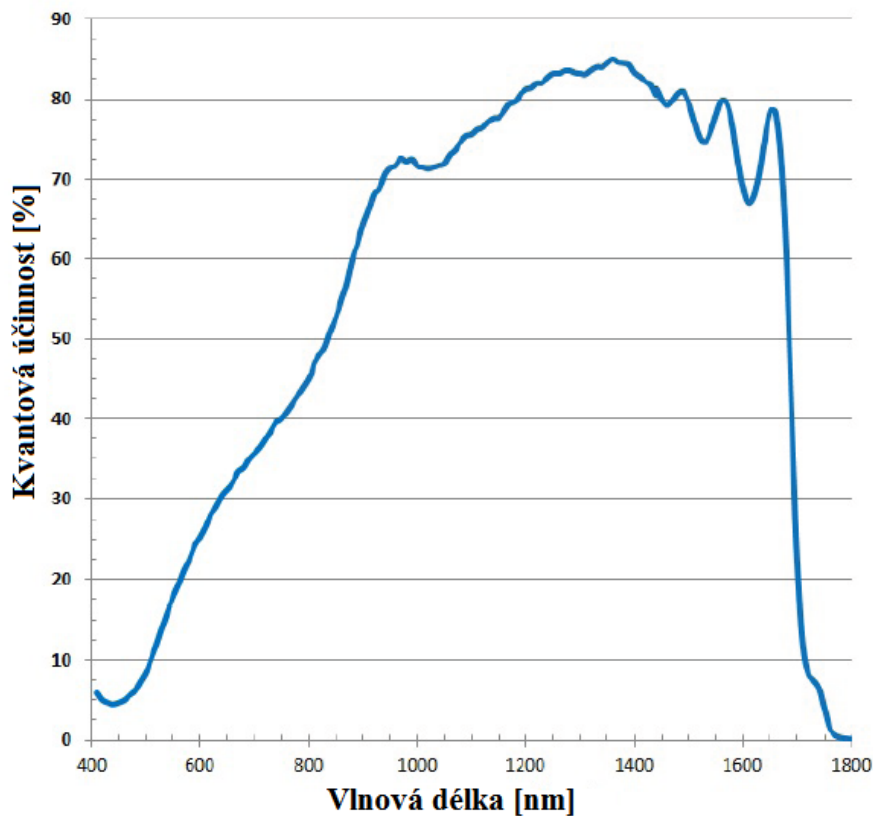
Pro praktická měření jsem využil dvě měřicí sestavy, jejichž komponenty jsou jednotlivě popsány níže. Variabilní prvky těchto měřících sestav budou popsány zvlášť u jednotlivých měřících sestav.

4.1.1. Kamera OWL SWIR 640

Kamera OWL SWIR 640 (obr. 4.1) od společnosti Raptor photonics, mi byla zapůjčena z oddělení Vývoje měřících metod ve společnosti Meopta-optika s.r.o. Tato kamera pracuje ve viditelné i blízké infračervené oblasti. Její spektrální citlivost leží v intervalu od 0,4 μm do 1,7 μm . Velikost pixelu snímače kamery je 15x15 μm , rozlišení 640 x 512 obrazových bodů, snímková frekvence 10-120 Hz s odezvou 25 ns. Kamera je osazena senzorem SCD z InGaAs a pracuje se 14-ti bitovým převodníkem. Kvantová účinnost kamery- viz obr. 4.2.



Obrázek 4.1: Kamera OWL SWIR 640



Obrázek 4.2: Kvantová účinnost kamery OWL SWIR 640

4.1.2. Mikroskopový objektiv PE IR Plan APO 20x

Mikroskopový objektiv PE IR Plan APO 20x (obr. 4.3) od japonské společnosti SEIWA OPTICAL mi byl zapůjčen z oddělení Vývoje měřících metod ve společnosti Meopta-optika s.r.o. Tento mikroskopový objektiv je navržen pro práci v blízké infračervené oblasti, optické členy jsou opatřeny antireflexními vrstvami pro spektrální oblast 800-1600nm. Graf spektrální propustnosti je na obr. 4.4.

Tento mikroskopový objektiv je korigován pro zobrazení bez krycího skla a s obrazovou rovinou v nekonečnu. Jeho ohnisková vzdálenost je 10 mm, pracovní vzdálenost 12 mm, udávané rozlišení 1,3 μm , zvětšení 20x a hloubku ostroty 2,2 μm .



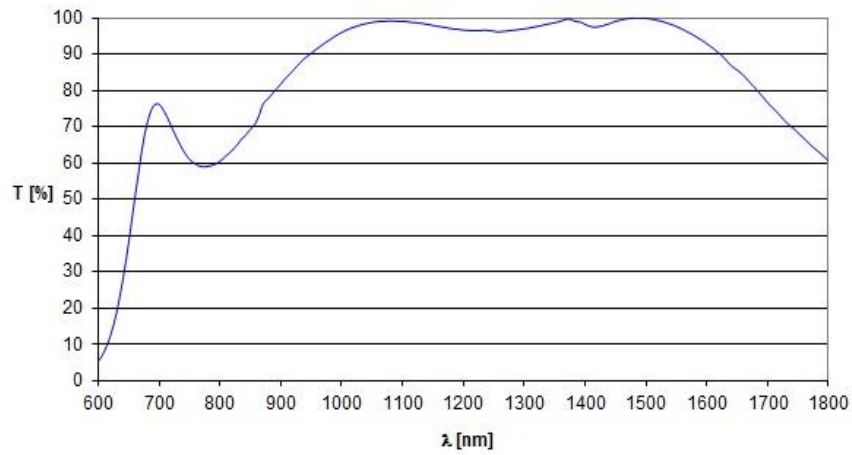
Obrázek 4.3: Mikroskopový objektiv PE IR Plan APO 20x od SEIWA OPTICAL Co.

Funkce přenosu kontrastu je výrazně citlivá na spektrální charakteristiku záření, které projde měřicí sestavou. Proto jsem mikroskopový objektiv nechal proměřit v oddělení Spektrometrické laboratoře ve společnosti Meopta-optika s.r.o. Měření bylo provedeno na spektrometru od společnosti PerkinElmer Lambda 950 v rozmezí vlnových délek 600 – 1800 nm (výsledky viz obr. 4.3).

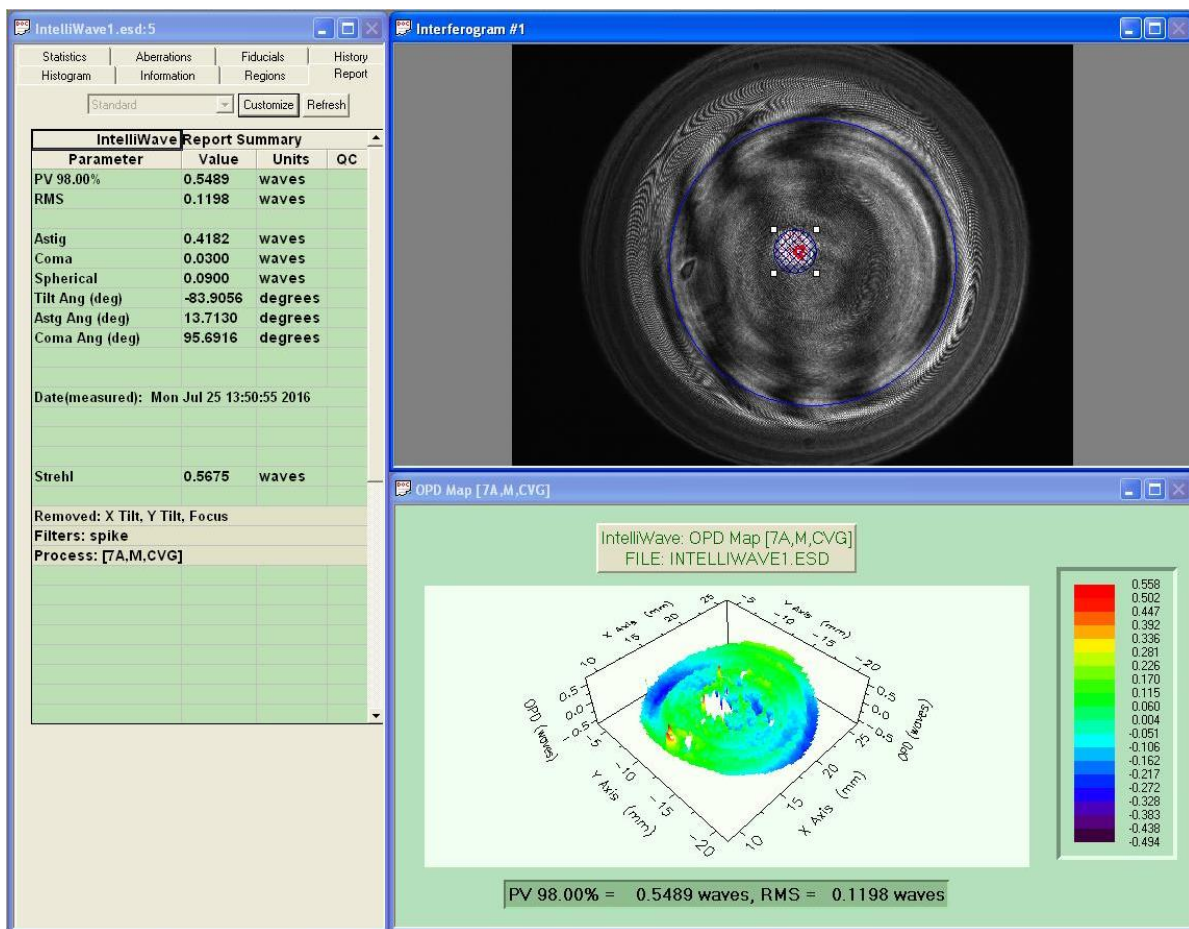
Dalším důležitým parametrem, pomocí kterého jsem se snažil posoudit optickou kvalitu mikroskopového objektivu, bylo měření průchozí vlnoplochy. Špatný výsledek tohoto měření by znamenal také nižší hodnoty funkce přenosu kontrastu mikroskopového objektivu, což by se mohlo projevit poklesem měřených hodnot MTF u optických sestav měřených tímto objektivem.

Měření vlnoplochy bylo provedeno na Fizeau interferometru od společnosti ESDI, pracující s vlnovou délkou 632,8 nm (He-Ne) viz obr. 4.5 a Shack-Hartmannově senzoru od společnosti Meopta-optika s.r.o. se zdrojem záření o vlnové délce 1550 nm – viz obr. 4.6.

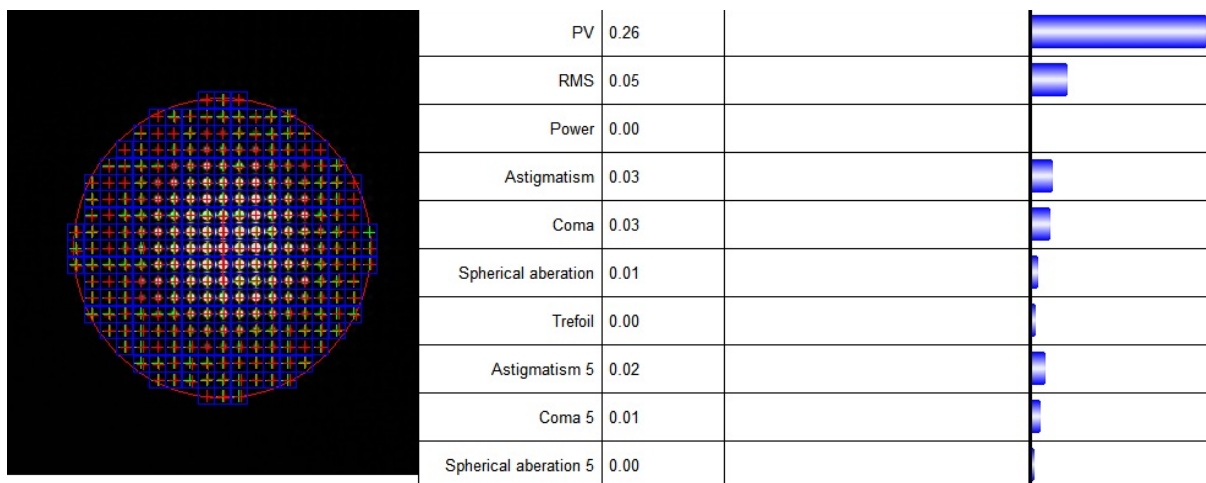
Vlnová délka 632,8nm bohužel leží na kraji spektrální oblasti, pro kterou je mikroskopový objektiv navržen. Následkem toho naměřené parametry vlnoplochy postihují kvalitu mikroskopového objektivu pouze v této části spektra.



Obrázek 4.4: Spektrální propustnost mikroskopového objektivu PE IR Plan APO 20x



Obrázek 4.5: Kvalita vlnoplochy měřená na interferometru ESDI pro $\lambda=632,8$ nm



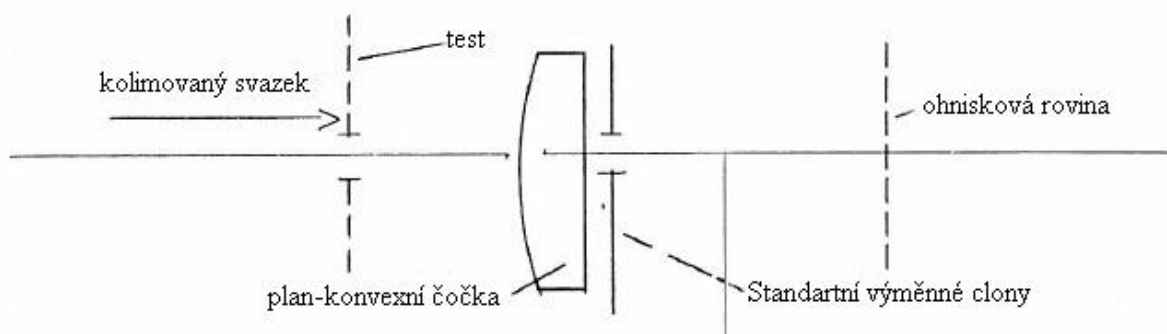
Obrázek 4.6: Kvalita vlnoplochy měřená Shack-Hartmannovým senzorem pro $\lambda=1550$ nm s rastrem mikročoček $0,2 \times 0,2$ μm s poloměrem měřené pupily 1,86 mm

4.1.3. Testová čočka

Testová čočka je jednoduchá plan-konvexní čočka s ohniskem 50mm a sadou měřících apertur. Díky svému jednoduchému tvaru lze tuto čočku relativně jednoduše vyrobit v zadaných tolerancích. Testová čočka potom slouží pro porovnávání teoretických a prakticky naměřených hodnot MTF.

V Meoptě je k dispozici dokumentace (SIRA report), která obsahuje podklady pro výrobu, pokyny pro měření a souhrn měření testové čočky několika laboratořemi v Anglii, Japonsku, Francii, Americe, Švédsku a Německu. Naměřené hodnoty jsou pak diskutovány a cílem této dokumentace je určit prakticky realizovatelnou nejistotu měření.

Specifikace rozměrů a tolerancí k výrobě testové čočky:



Obrázek 4.7: Uspořádání testové čočky v sestavě

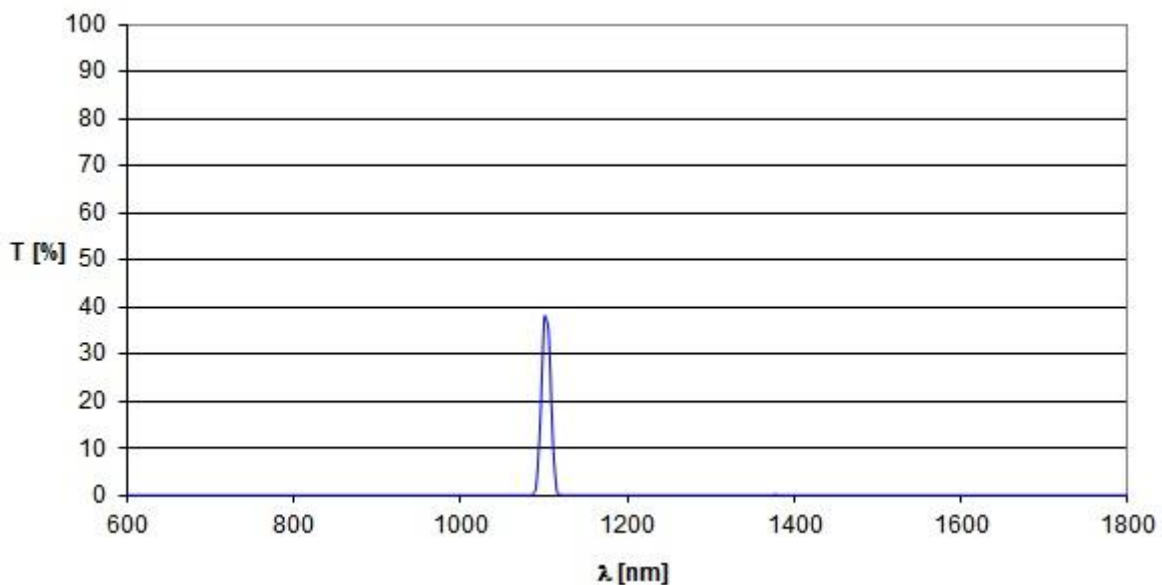
K výrobě testové čočky se používá sklo zinc-crown (508612) ve vysoké kvalitě (interferenční) bez šlír, bublin a s dvojlomem menším než 10 nm/cm o indexu lomu $1,5096 \pm 0,0010$ pro vlnovou délku $\lambda=546,1$ nm s rádiusem $25,48 \pm 0,06$ mm, tloušťkou $10,00 \pm 0,05$ mm a průměrem větším než 28 mm.

Dostal jsem k dispozici testovou čočku k ověření spolehlivosti a přesnosti měřicí aparatury, kterou jsem sestavil. Bohužel z důvodů nezachování výrobní dokumentace nebylo možné nasimulovat teoretické hodnoty MTF, jelikož sklo zinc-crown nebylo v databázi optických skel optického programu (OSLO, ZEMAX). Po prohledání katalogu optických skel bylo podle čísla 508612 dohledáno sklo pod označením N-ZK7. Pro jistotu, jestli byla čočka vyrobena podle specifikace, rozhodl jsem se pro ověření indexu lomu. Ten byl stanoven nepřímou metodou poměrem tloušťky čočky měřené mechanicky a opticky. Opticky byla tloušťka čočky měřena pomocí interferometru a mechanicky pomocí digitálního posuvného měřítka. Z naměřených hodnot $l=9,998$ mm a $d=6,640$ mm jejichž podělením dostaneme index lomu námi proměřené čočky $n=1,506$ s přesností na 3 desetinná čísla. Po přepočtu teoretické hodnoty skla s označením N-ZK7 z vlnové délky 546,1 nm na 632,8 nm dostaneme hodnotu indexu lomu $n=1,5067$. Tato hodnota je v toleranční shodě a tudíž lze předpokládat, že testová čočka byla vyrobena z výše zmíněného skla.

4.1.4. Interferenční filtr 1100 nm

Pro dosažení dostatečného kontrastu u prostorových frekvencí do 100č/mm (prakticky nepoužívanější frekvence) při měření MTF testové čočky je zapotřebí omezit spektrální rozsah měření. To lze prakticky provést např. vhodným interferenčním filtrem. Vybral jsem interferenční filtr s maximem propustnosti 1100 nm a pološířkou 10 nm od firmy Melles Griot, který jsem nechal proměřit ve spektrální laboratoři v Meopta-optika s.r.o.

Graf spektrální propustnosti (obr. 4.8) jsem pak využil při určování váhových koeficientů zdroje pro výpočty v programu Zemax.



Obrázek 4.8: Spektrální propustnost interferenčního filtru 1100 nm měřeného ve spektrální laboratoři Meopta-optika s.r.o.

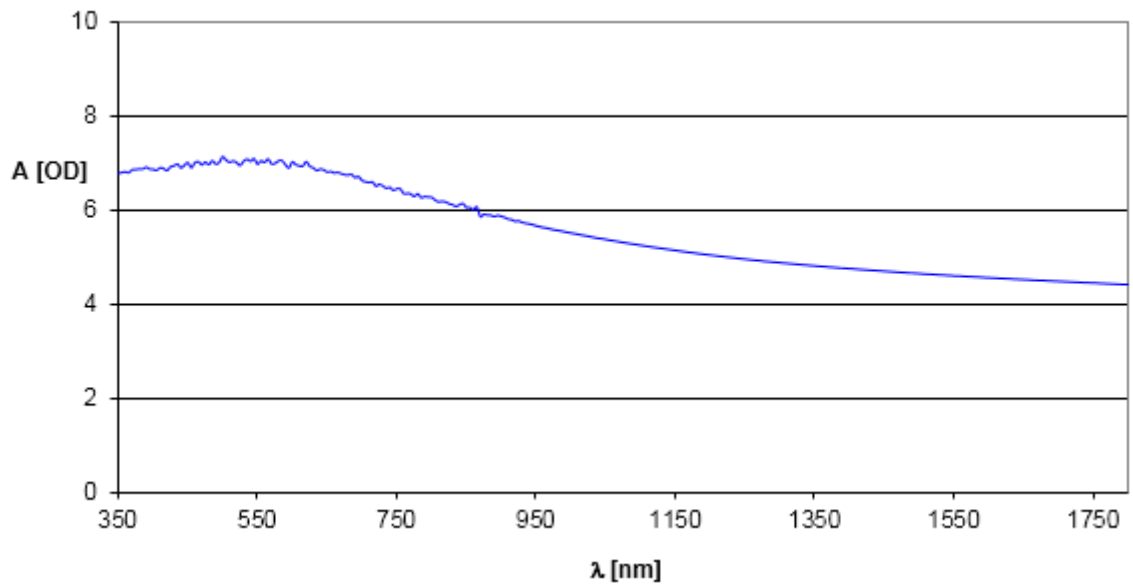
4.1.5 Kříže k měření MTF

Kříže určené k měření MTF (50, 15 a 5 μm) se vyráběly v podniku Meopta-optika s.r.o. metodou vyleptávání do napařené vrstvy Ni-Cr na planparalelní sklo.

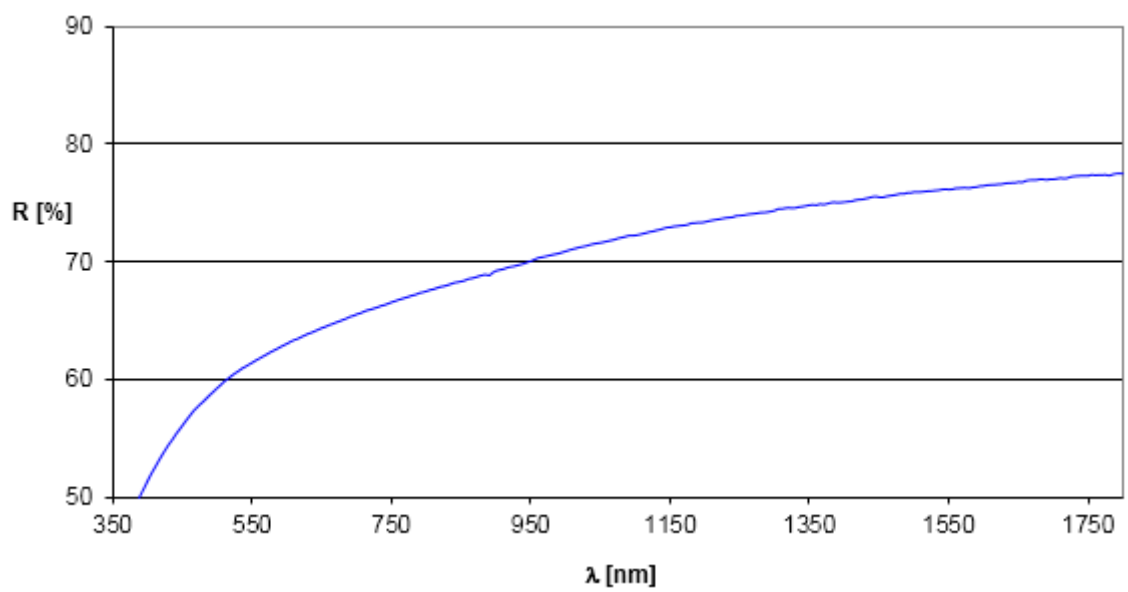
Běžně používaná vrstva samotného chromu má pro měření v IČ pásmu nedostatečnou optickou hustotu. Tento problém lze vyřešit buď napařením silnější vrstvy chromu, nebo použitím vrstvy z Ni-Cr s vyšší optickou hustotou. Při použití silné vrstvy chromu by leptaný kříž mohl mít nepravidelné a „zubaté“ okraje, proto byla při výrobě použita druhá možnost - sklo bylo napařeno vrstvou Ni-Cr. Nепropustné části testového obrazce takto dosahují hodnot optické hustoty 5,3, ale reflexe této vrstvy je cca 72% v mnou požadované vlnové délce.

Odlesky od vrstvy by mohly vnášet do měřicí sestavy nechtěné parazitní světlo, které by mohlo způsobovat pokles měřených hodnot. Tento problém jsem se snažil řešit zalakováním napařené vrstvy černým matným lakem. Lakování se provádí ručně a nelze jej proto provést blíže než cca milimetr od vyleptané hrany. I tak se však velmi výrazně sníží plocha, která by mohla do sestavy vnášet parazitní světlo. Grafy optické hustoty a reflexe použité vrstvy jsou na obr. 4.9 a 4.10.

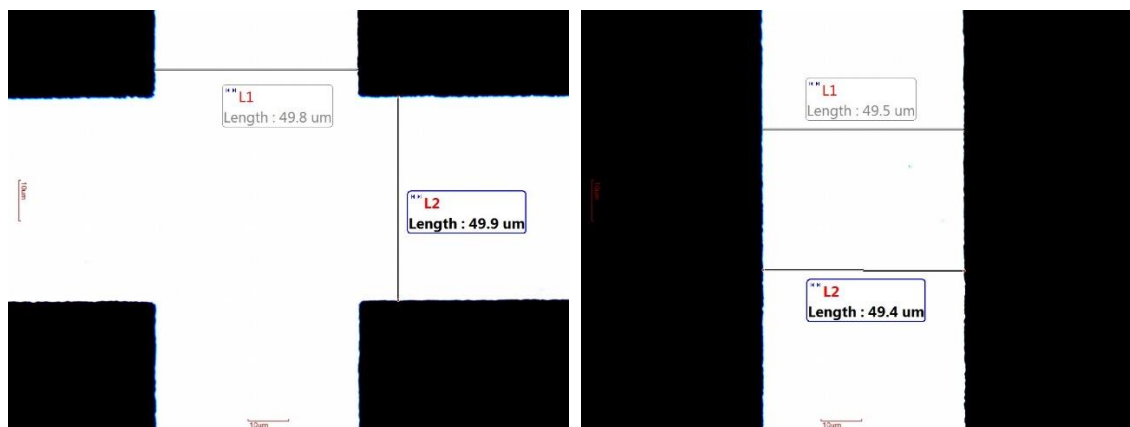
Na obr. 4.11 je vidět kontrolní měření tloušťky vyleptaného kříže.



Obrázek 4.9: Optická hustota napařené vrstvy Ni-Cr



Obrázek 4.10: Reflexe napařené vrstvy Ni-Cr



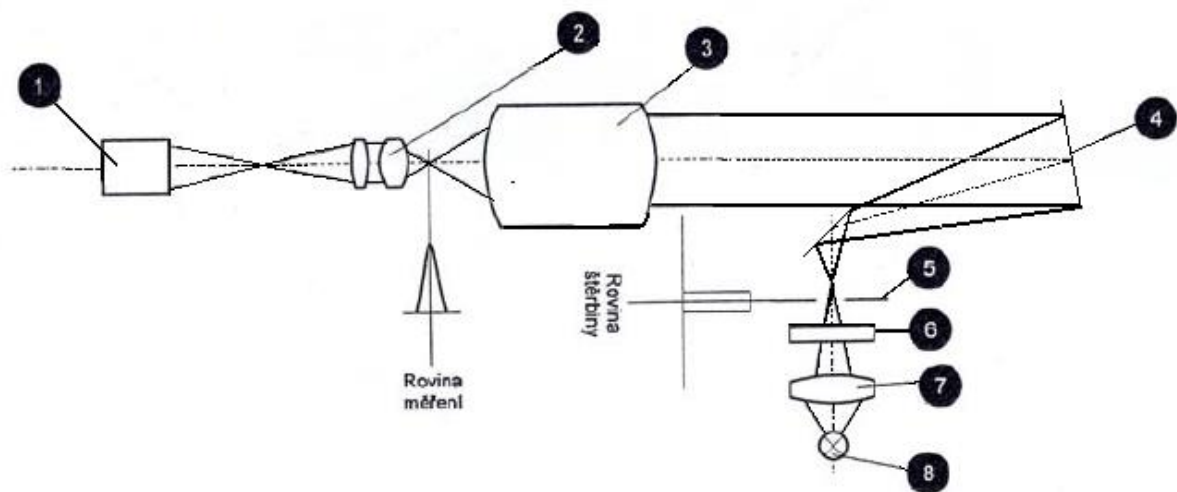
Obrázek 4.11: Velikost kříže 50 μm vyleptaného do vrstvy Ni-Cr

4.2. Měření funkce přenosu kontrastu v blízké infračervené oblasti

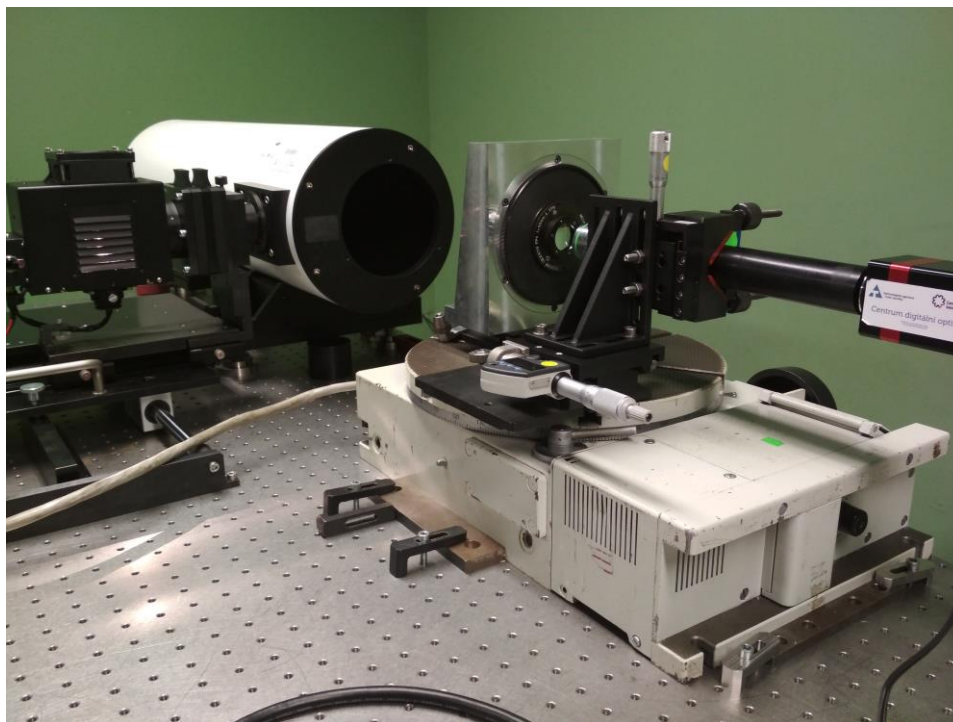
4.2.1. Měřicí sestavy

4.2.1.1. Zakomponování zrcadlového kolimátoru do měřicí sestavy

Jak již bylo popsáno dříve, pro měření funkce přenosu kontrastu v blízké infračervené oblasti jsem si vybral měření testové čočky. Měřicí sestava byla v konfiguraci s předmětovou rovinou umístěnou v nekonečnu a obrazovou rovinou umístěnou v konečné vzdálenosti od testové čočky. Přesné uspořádání měřicí sestavy je znázorněno na obrázku 4.12 a pro názornost je zařazena i fotografie (obr. 4.13).



Obrázek 4.12: Uspořádání měřicí sestavy se zrcadlovým kolimátorem. Význam čísel na obrázku: 1) detektor, 2) mikroskopový objektiv, 3) měřený vzorek, 4) zrcadlový kolimátor, 5) štěrbina, 6) filtr, 7) kondenzor, 8) žárovka



Obrázek 4.13: Uspořádání měřicí sestavy se zrcadlovým kolimátorem

Zrcadlový kolimátor je tvořen primárním parabolickým zrcadlem a sekundárním rovinným zrcadlem (zajišťujícím zalomení optické osy) s napařenou hliníkovou vrstvou.

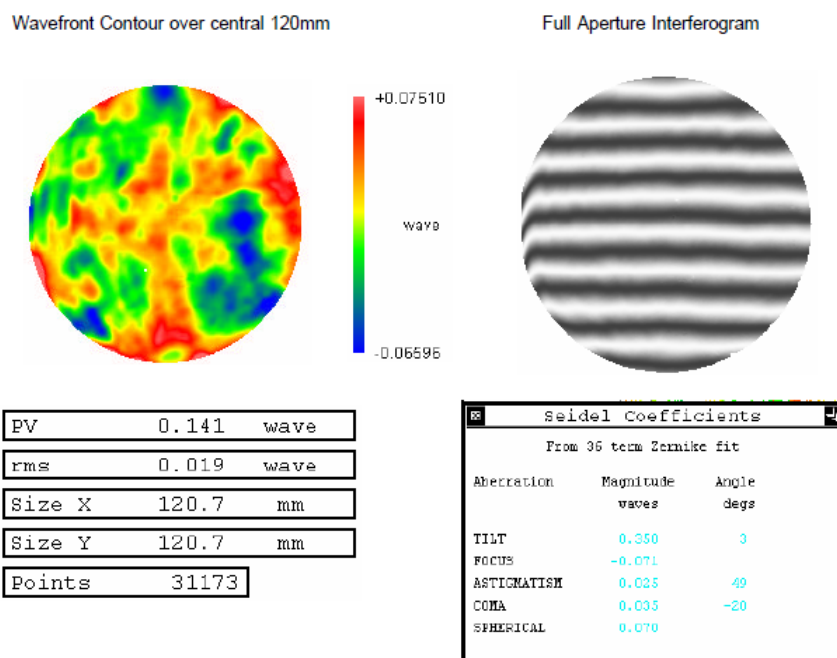
K zrcadlovému kolimátoru je připojen osvětlovač, který prosvětluje test umístěný v ohniskové rovině primárního zrcadla.

Jako zdroj nekoherentního záření je v osvětlovači použita halogenová žárovka s napětím 12 V a příkonem 100 W. Část paprsků je v osvětlovači odražena zpět do systému pomocí zrcadla s hliníkovou vrstvou. Paprsky procházejí kondenzorovou čočkou, která soustřeďuje procházející paprsky do roviny předmětu – testového obrazce. V rovině předmětu je umístěna štěrbinová (kříž) o šířce d . Mezi kondenzorovou čočkou a štěrbinou je ještě umístěna zásuvka pro vložení optického filtru (v našem případě je použit interferenční filtr o $\lambda = 1100$ nm). Prosvětlený testový obrazec je umístěn v ohnisku zrcadlového kolimátoru, který takto promítá předmětový testový obrazec do nekonečna.

Použitý zrcadlový kolimátor má ohniskovou vzdálenost 750,1 mm. Průměr výstupního svazku je 120 mm. Kolimátor je pořízen od společnosti Optical surfaces Ltd.

Na daném kolimátoru byla opět změřena kvalita vlnoplochy pro $\lambda=632,8$ nm (obr. 4.14). Špatný výsledek tohoto měření by znamenal nižší hodnoty funkce přenosu kontrastu.

Hlavní výhodou použití zrcadlového kolimátoru je fakt, že barevná vada takového kolimátoru je principiálně nulová. Kolimovaný svazek vycházející z výstupní apertury kolimátoru vstupuje do testové čočky, která svazek fokusuje do roviny měření. Díky poměru ohniskových vzdáleností kolimátoru a testové čočky je obraz v měřicí rovině 15x zmenšený a tudíž příliš malý. Proto je zvětšován mikroskopovým objektivem (PE IR Plan APO 20x) na senzor CCD kamery OWL SWIR 640. Nasnímaná obrazová data jsou zpracována a je z nich vypočítán průběh kontrastu v závislosti na prostorové frekvenci – MTF.



Obrázek 4.14: Kvalita vlnoplochy zrcadlového kolimátoru $f=750,1$ mm

4.2.1.2. Zakomponování čočkového kolimátoru do měřicí sestavy

Další měřicí sestava je s výjimkou kolimátoru shodná s předchozí. Namísto zrcadlového kolimátoru je zde použit kolimátor čočkový, který jako objektiv používá achromatický dublet pro minimalizaci barevné vady. Použitý čočkový kolimátor je korigován pro viditelnou oblast ne pro blízkou infračervenou oblast.

4.2.2. Měření MTF testové plankonvexní čočky

Ověření měřicího zařízení jsem prováděl pomocí testové čočky (s ohniskovou vzdáleností $f = 50$ mm). Pro vizuální část spektra se využívá měření pro různé velikosti clonových čísel (4; 5,6; 8 a 11) na ose nebo v poli pro předmětové úhly 3° a 6° . Základní měření testové čočky je prováděno na optické ose s clonovým číslem 8. Sledují se prostorové frekvence v rozsahu 0 – 100 č/mm. Pro SWIR oblast jsem se pokusil měření provést ve stejném nastavení a rozsahu.

K měření MTF mi byl poskytnut program vyvinutý ve společnosti Meopta-optika s.r.o. MeoMTF (obr. 4.15), který je uzpůsoben k měření CCD kamerou. Do programu se dají zadat tyto parametry měření:

- Typ měření (z konečna do konečna, z nekonečna do konečna nebo z nekonečna do nekonečna)

- Směr měření tangenciální, sagitální, popřípadě oba směry (v programu značeno jako měření v ose X a Y)
- Měřený objektiv (zvětšení, ohnisko, clonové číslo)
- Měřicí zařízení (zvětšení mikroskopového objektivu, ohniskovou vzdálenost kolimátoru [mm] a šířku štěrbinu [mm])
- Parametry měření (vlnová délka, rozsah frekvencí, sledovanou frekvenci a hodnotu kroku zastavovací roviny, případně obrazové výšky a azimuty, pro které je měření prováděno)

The screenshot shows the 'Parametry měření' (Measurement Parameters) window of the MeoMTF software. The window is divided into several sections:

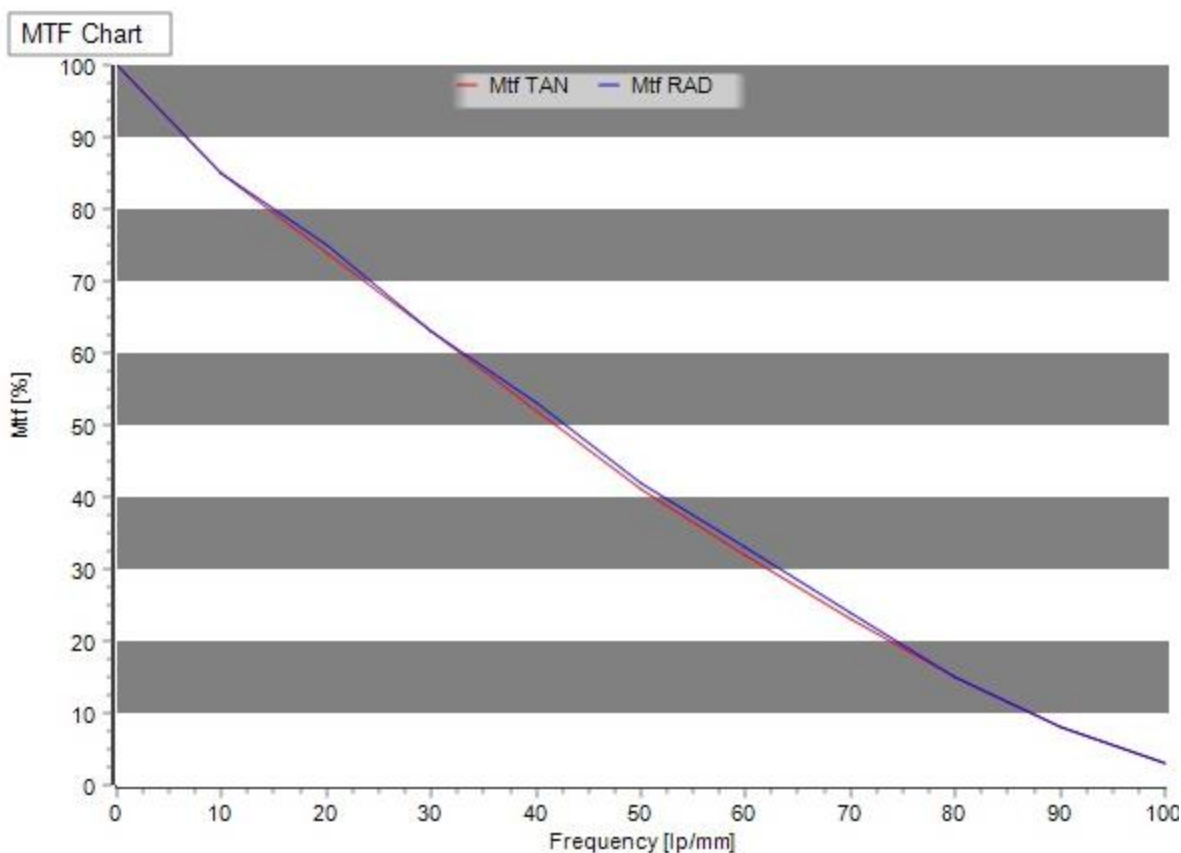
- Top Section:** Fields for 'SN:' and 'Měří:' (Measures).
- Typ měření (Measurement Type):** Radio buttons for 'z konečna do konečna', 'z nekonečna do konečna' (selected), and 'z nekonečna do nekonečna'.
- Směr měření (Measurement Direction):** Radio buttons for 'v ose X i Y' (selected), 'jen v ose X', and 'jen v ose Y'.
- Měřený objektiv (Measured Objective):** Fields for 'Zvětšení:' (Magnification), 'Ohnisko: 50' (Focal length), 'Clona: 8' (Aperture), and 'Zorné pole: X | Y' (Field of view).
- Měřicí zařízení (Measuring Device):** Fields for 'Zvětšení MO: 10.09' (Magnification of microscope objective), 'Ohnisko kolimátoru: 557' (Focal length of collimator), 'Ohnisko pomocného objektivu' (Focal length of auxiliary objective), and 'Šířka štěrbinu [mm]: 0.05' (Slit width).
- Pokročilé nastavení (Advanced Settings):** 'Počet průměrovaných řádků/sloupců:' (Number of averaged rows/columns) set to 10, and a 'Nastavení kamery' (Camera Settings) button.
- Right Panel:** 'Vlnová délka [nm]' (Wavelength) set to 'bez filtru' (no filter). 'Obrazová výška [mm]' (Image height) and 'Azimut [°]' (Azimuth) are both set to 0. Below this is a 'Zastavovací rovina' (Focusing plane) section with 'Počáteční hodnota:' (Initial value) at 0 and 'Hodnota kroku:' (Step value) at 0.05. A 'Frekvence [č/mm]' (Frequency) list is shown with values from 0 to 90, and 'Sledovaná frekvence:' (Monitored frequency) is set to 50.

Obrázek 4.15: Zadání parametrů k měření MTF do programu MeoMTF

Zde bych podrobněji popsal justáže měřicí sestavy. Ke správnému ukolmení všech komponent vůči optické ose kolimátoru jsem použil přírubový autokolimační dalekohled 8x20 s ohniskovou vzdáleností $f = 120$ mm se zvětšením 8x. Autokolimační dalekohled jsem nejprve ustavil přibližně do středu výstupní pupily zrcadlového kolimátoru (výškově a stranově). Do testové zásuvky zrcadlového kolimátoru jsem vložil test s křížem. Tento test jsem prosvětřil a jeho obraz pomocí náklonů ztotožnil s křížem okuláru autokolimačního dalekohledu. Mezi zrcadlový kolimátor a autokolimační dalekohled jsem vložil měřenou testovou čočku na otočném a naklápěcím stolku. Testovou čočku jsem ukolmil autokolimačně podle její planplochy. Ukolmení měřicího zařízení (CCD kamera s měřícím mikroskopovým objektivem) jsem provedl opět pomocí autokolimačního dalekohledu a planparalelního skla přiloženého na dosedovou plochu C-mount závitu kamery. Déle je zapotřebí zajistit kolmost příčného posuvu mikroskopu s kamerou vůči optické ose kolimátoru. Toto ukolmení jsem si ověřil měřením vzdálenosti mezi mikroskopovým objektivem a referenční plochou držáku testové čočky

pomocí tisícinnového indikátoru upevněného k tubusu měřícího zařízení. Na rozsahu příčného posuvu 25 mm se odchylka vzdálenosti pohybovala do 0,01 mm.

Po ukolmení všech komponent, nasazení clony s průměrem 6,23 mm ($c=8$) a nalezení obrazu na CCD kameře můžeme začít měřit. V měřícím okně programu je možné sledovat grafický průběh MTF v tangenciálním i sagitálním směru v reálném čase (při použití testového obrazce – kříže) – viz obr. 4.16. Při měření testové čočky na optické ose a ve středu otáčení, by se měly křivky MTF v tangenciálním a sagitálním směru v ideálním případě shodovat. Malé odchylky se projeví díky nejistotě v nastavení optické osy, nejistotě měření, popřípadě v nesymetrii vyrobené čočky.



Obrázek 4.16: Křivky MTF pro tangenciální a sagitální směr měření

Kamera OWL SWIR 640 vyžaduje speciální nastavení ještě před prováděním samotného měření. Nejprve si nastavíme bitový výstup kamery, v tomto případě je bitová hloubka kamery 14. Dále pomocí programu MeoMTF provedeme odečet pozadí. To provádíme tak, že se snažíme omezit příspěvek osvětlení od okolních světelných zdrojů (zářivky, žárovky, okna).

Procedura odečtu pozadí:

- Zaostříme do předpokládané roviny měření
- Expoziční čas, popř. zisk kamery nastavíme tak, aby nedošlo k saturaci pixelů senzoru
- Zablokujeme světelný svazek vycházející z osvětlovače
- Tlačítkem sejmutí pozadí se uloží a zprůměruje zadaný počet snímků
- Odblokujeme světelný svazek osvětlovače
- V měřicím programu zapneme odečet pozadí a automatickou korekci expozičního času

Obraz kříže si mírně rozostříme a osovým posuvem s krokem 0,05 mm hledáme rovinu s nejlepším zaostřením. V průběhu měření ukládáme do počítače po jednotlivých krocích aktuální průběhy křivek MTF. Měření provádíme tak, abychom vždy proostřili skrze obrazovou rovinu. Nahlédneme do naměřených hodnot a vybereme tu křivku, která má nejvyšší hodnotu kontrastu pro námi zvolenou prostorovou frekvenci (v mém případě to byla hodnota 50 č/mm, pro kterou jsem zaostřoval i teoretické hodnoty). Tyto hodnoty následně porovnáme s teoretickými hodnotami pro testovou čočku, které jsme si nasimulovali ve výpočetním programu OSLO, ZEMAX nebo CODE V. V mém případě byly teoretické hodnoty vypočítány nejdříve v programech OSLO verze Edu a ZEMAX. Mezi těmito programy byly rozpory v teoretických hodnotách o 2-4 % pro jednotlivé frekvence, proto byl k výpočtu přibrán i program CODE V, jehož výsledky byly totožné s programem ZEMAX. Program OSLO verze Edu byl z těchto důvodů odebrán a další výpočty byly realizovány pouze v programu ZEMAX.

4.2.2.1. Výsledky měření

Výsledky měření jsou shrnuty v příloze.

4.2.3 Opakovatelnost měření

Opakovatelnost měření byla prováděna na sestavě se zrcadlovým kolimátorem.

V průběhu testování opakovatelnosti měření byla věnována pozornost především

- opakovatelnosti měření bez provedení nové justáže
- opakovatelnosti měření po provedení nové justáže

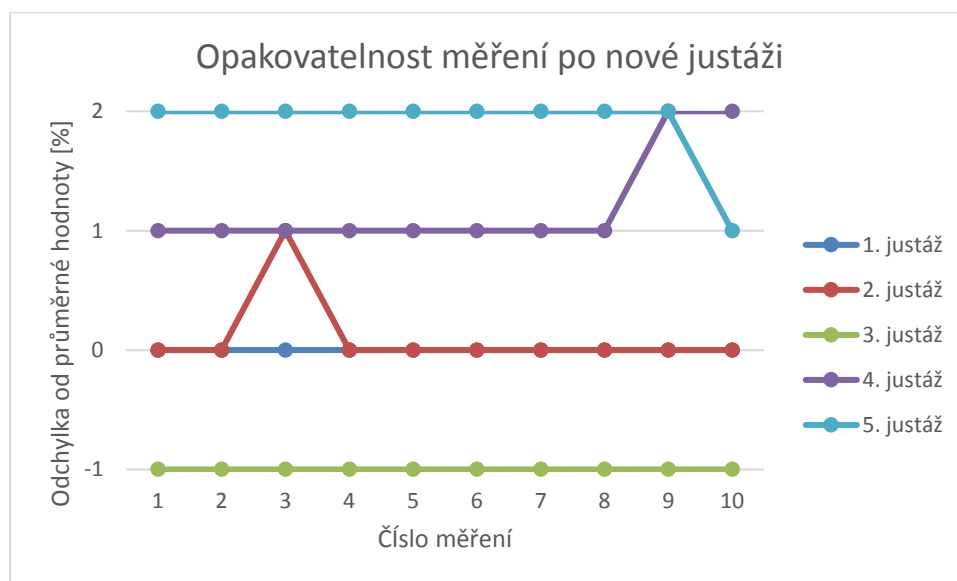
V první fázi testování jsem se zaměřil na opakovatelnost měření MTF bez provedení nové justáže. Opakovatelnost měření MTF souvisí s nejistotou měření polohy mikroposuvu a šumem kamery. Lepší opakovatelnost měření polohy mikroposuvu lze dosáhnout vyloučením jeho mrtvého chodu (do roviny s nejvyšším kontrastem najíždíme vždy z jednoho směru). Měření jsem prováděl pro testovou čočku s clonovým číslem $c=4$ pro optickou osu.

Měření bylo provedeno 10x s odečteným pozadím při nastavení polohy mikroposuvu směrem k testové čočce do stejné osové polohy. Odečtené hodnoty MTF jsou uvedeny v tabulce.

naměřená hodnota [%] pro prostorovou frekvenci									
10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
49	35	32	27	23	20	18	15	13	10
49	35	32	27	23	20	18	15	12	10
49	35	32	27	23	20	18	15	13	10
49	35	32	27	23	20	18	15	13	10
49	35	32	27	23	20	18	15	13	10
50	35	32	27	23	20	18	15	13	10
49	35	32	27	23	20	18	15	13	10
49	35	32	27	23	20	19	15	13	10
49	35	32	27	23	20	18	15	13	10
49	35	32	27	23	20	18	15	13	10

Z naměřených hodnot je patrné, že opakovatelnost měření pro jedno ukolmení měřící sestavy je velmi dobrá a to se změnou o 1% kontrastu, která je nejspíše způsobena šumem kamery.

V další fázi testování byla ověřována opakovatelnost měření po demontáži jednotlivých komponent a jejich opětovném sestavení. Tento proces jsem opakoval 5 krát. Po opětovném provedení justáže byla testová čočka proměřena vždy 10 krát. Pro přehlednější vykreslení testování jsou vyjádřené výsledky pouze pro prostorovou frekvenci 50 č/mm.



Obrázek 4.33: Graf opakovatelnosti měření po nové justáži zařízení, vyhodnocován pro 50 č/mm

Podle naměřených dat na obrázku 4.32, všechna měření leží v intervalu ± 2 % od průměrné hodnoty kontrastu pro 50 č/mm, který je 23%. Průměr byl spočítán ze všech naměřených hodnot pro prostorovou frekvenci 50 č/mm.

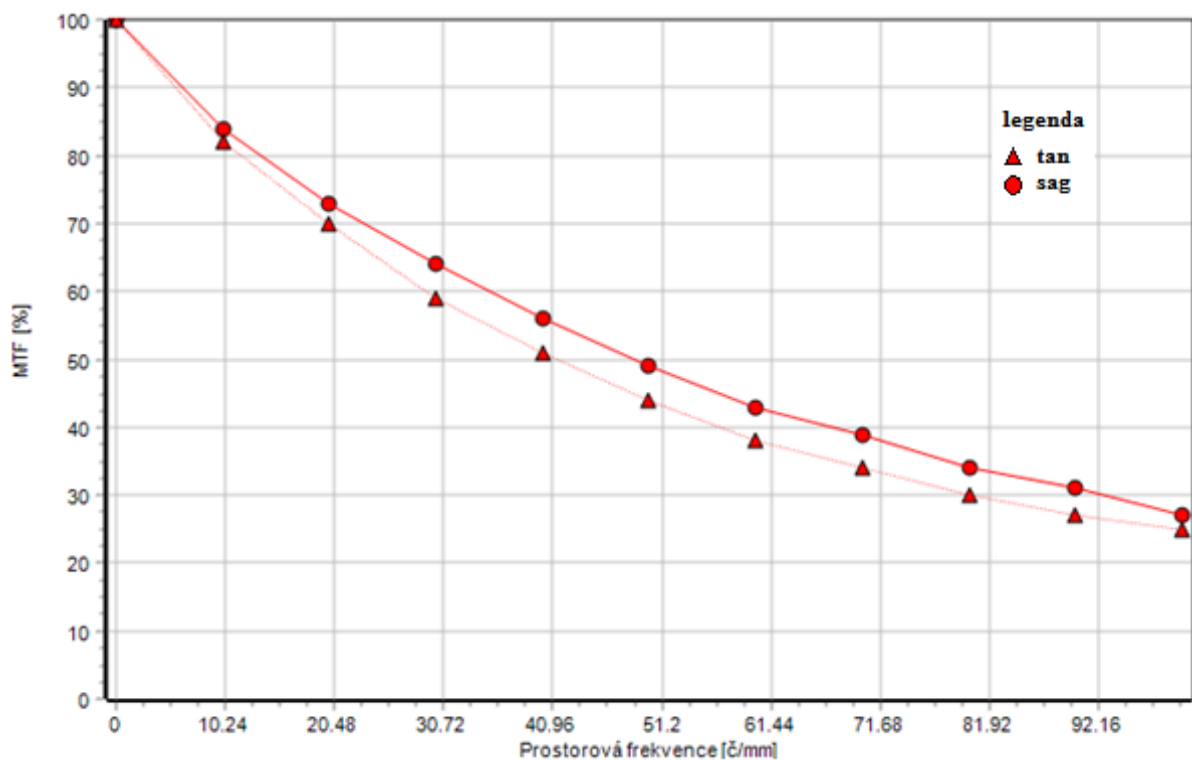
4.2.4. Měření MTF SWIR objektivu

Stejná měřící sestava byla použita také pro kontrolní měření objektivu SWIR s ohniskovou vzdáleností $f=250$ mm, clonovým číslem $c=4$, který byl navržen panem RNDr. Vlastislavem Svobodou pro blízkou infračervenou oblast spektra.

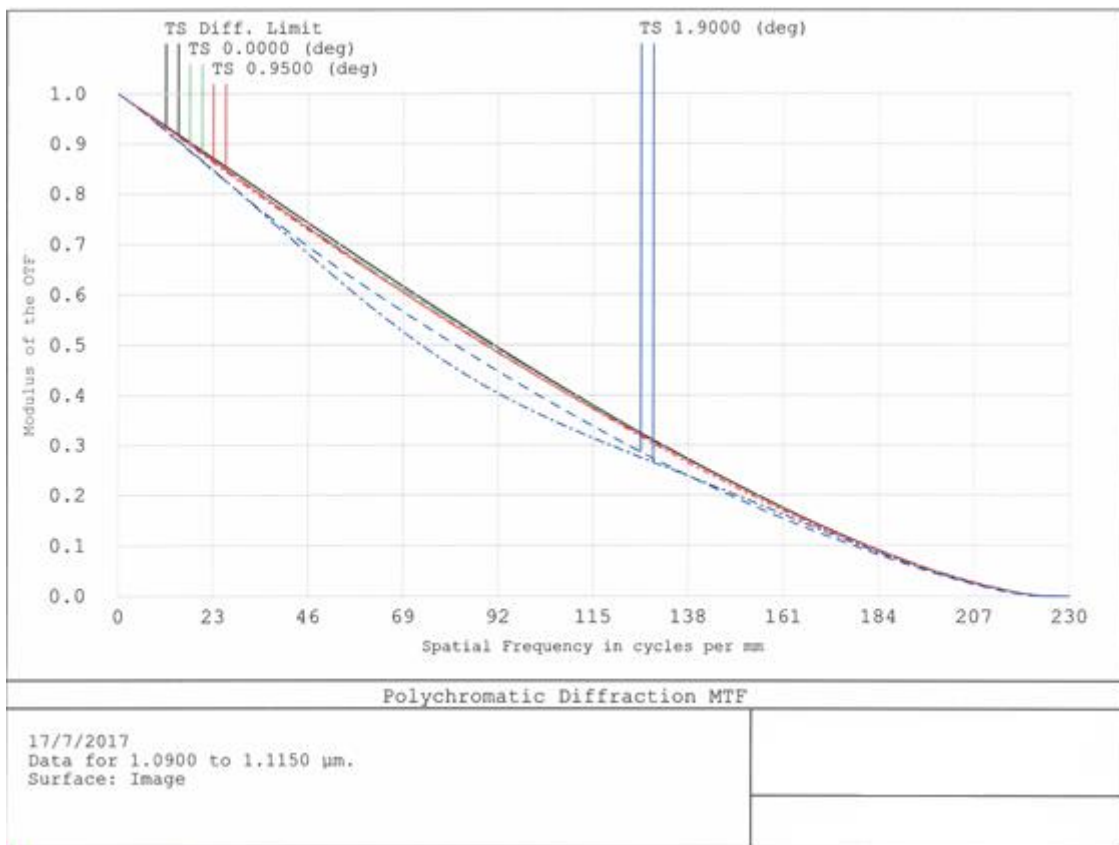
Dále uvádím naměřené hodnoty a teoretické hodnoty spočítané v programu ZEMAX.

Měřeno a počítáno pro optickou osu, $\lambda = 1100$ nm s pološířkou 10 nm.

prostorová frekvence [č/mm]	naměřené hodnoty kontrastu [%]		teoretické hodnoty kontrastu [%]	rozdíl [%]	
	tan	sag		tan	sag
10	82	84	94	12	10
20	70	73	88	18	15
30	59	64	83	24	19
40	51	56	77	26	21
50	44	49	71	27	22
60	38	43	66	28	23
70	34	39	60	26	21
80	30	34	55	25	21
90	27	31	50	23	19
100	25	27	45	20	18



Obrázek 4.34: Naměřené hodnoty objektivu SWIR



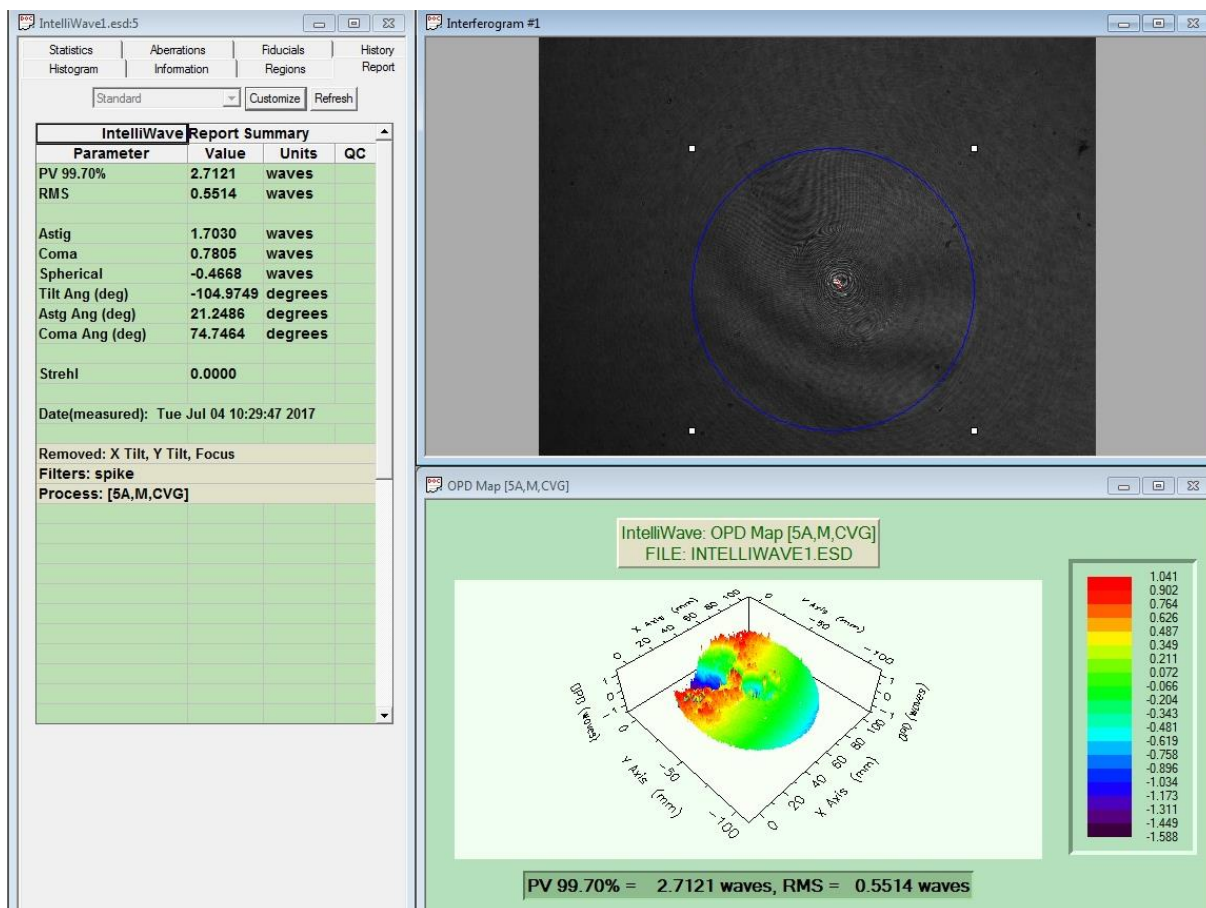
Obrázek 4.35: Graf teoretických hodnot, počítáno v programu ZEMAX

Naměřené hodnoty se vůči teoretickým podstatně liší. Tato skutečnost může být zapříčiněna špatnou stavbou optického systému, vysokou hodnotou parazitního světla, špatnou kvalitou vlnoplochy, atd.

Důležitým parametrem, pomocí kterého jsem se snažil posoudit optickou kvalitu tohoto objektivu, bylo měření průchozí vlnoplochy. Špatný výsledek tohoto měření by znamenal také nižší hodnoty funkce přenosu kontrastu daného objektivu.

Měření vlnoplochy bylo provedeno na Fizeau interferometru od společnosti ESDI, pracující s vlnovou délkou 632,8 nm (He-Ne) viz obr. 4.36.

Vlnová délka 632,8 nm bohužel leží na kraji spektrální oblasti, pro kterou byl objektiv navržen. Následkem toho naměřené parametry vlnoplochy postihují kvalitu objektivu pouze v této části spektra. Následujícím krokem bylo proměřit vlnoplochu pomocí Shack-Hartmannova senzoru pro blízkou infračervenou oblast. Tato měření se ale zatím nepodařilo realizovat.

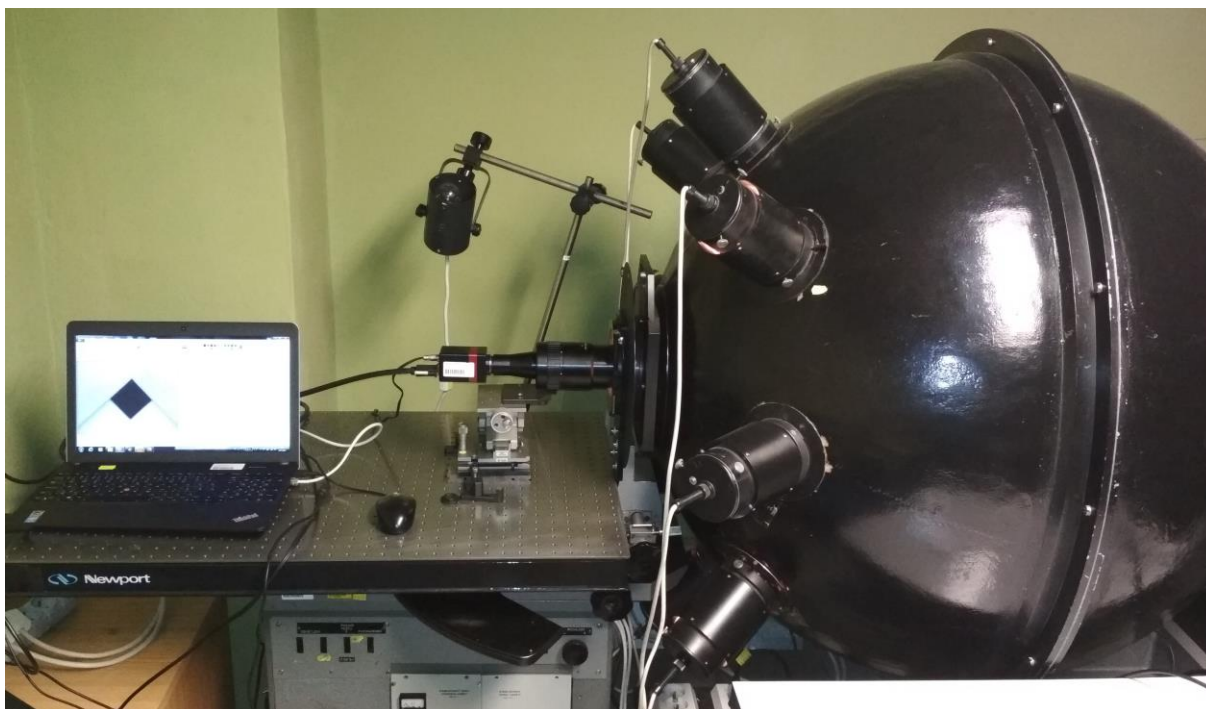


Obrázek 4.36: Naměřené hodnoty vlnolochy pomocí Interferometru ESDI ($\lambda=632,8 \text{ nm}$)

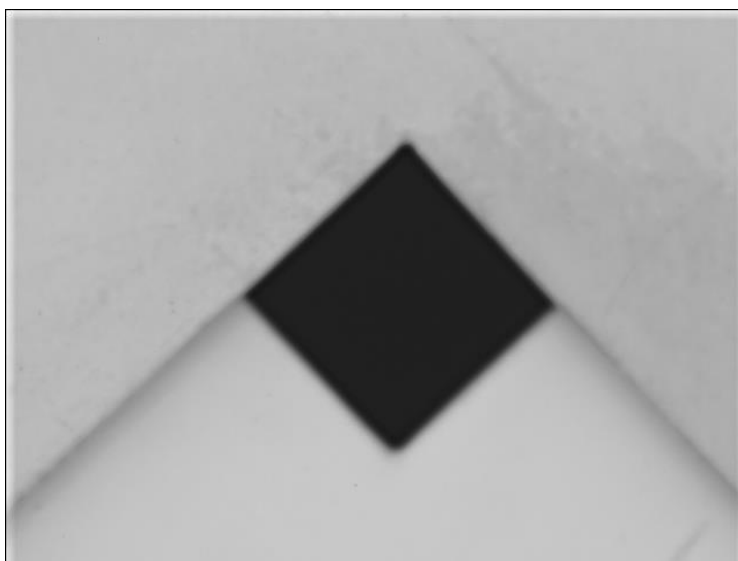
Z naměřených hodnot vlnolochy je patrné, že kvalita měřeného objektivu pro vlnovou délku $\lambda=632,8 \text{ nm}$ není optimální. Hodně se tu projevuje hlavně astigmatismus $1,70 \lambda$ a koma $0,78 \lambda$. Díky takto vysokým hodnotám astigmatismu a komy vychází hodnota Strehlova čísla $0,00$.

Měření parazitního světla bylo realizováno ve fotometrické laboratoři Podnikové zkušebny s použitím kamery OWL SWIR 640. Měřený objektiv byl umístěn do výstupu integrační koule - viz obr. 4.37. Na protilehlé čisti výstupu integrační koule je světelná past (viz obr. 4.38) o průměru nastaveném přibližně na $1/10$ zorného pole objektivu. Kamerou umístěnou do obrazové roviny měřeného objektivu sledujeme obraz světelné pasti. Ten by měl být dokonale černý v případě nulového parazitního světla.

Testovaný objektiv vykazoval hodnotu parazitního světla 15% . Spektrální režim, ve kterém bylo měření provedeno je limitováno samostatným objektivem a spektrální charakteristikou kamery.



Obrázek 4.37: Měřící sestava pro parazitní světlo



Obrázek 4.38: Měřené černé těleso pro parazitní světlo SWIR objektivu

Závěr:

V této diplomové práci byla v první kapitole popsána optická přenosové funkce. Co to optická přenosová funkce je, jak se vypočítá, z jakých složek se skládá a jak se měří.

V druhé kapitole byly popsány měřící techniky optické přenosové funkce. Především rozdělení měřících technik z pohledu koherentního a nekoherentního osvětlení.

Ve třetí kapitole bylo popsáno samotné měření optické funkce přenosu čočkových soustav. Začátek kapitoly byl věnován samotnému návrhu měřících sestav pro OTF/MTF. Jednotlivé měřící sestavy byly rozděleny do skupin podle umístění obrazové a předmětové roviny.

Ve čtvrté kapitole byla popsáno praktické měření, navržena a vytvořena sestava pro měření MTF v pásmu SWIR na základě analýzy obrazu štěrbin (viz obr. 4.12 a 4.13). Tato měřící sestava je schopna měřit v oblasti vlnových délek v rozmezí spektrální citlivosti SWIR kamery a měřícího mikroskopového objektivu ($\lambda = 800-1800$ nm), v rozsahu prostorových frekvencí od 0 do 100 č/mm. Tato měřící sestava je vhodná k měření kvality objektivů s rozsahem ohniskových vzdáleností od 20 do 250 mm na ose i mimo ni, v rozsahu předmětového úhlu $\pm 6^\circ$.

Funkce sestavy byla ověřena měřením testové čočky pro clonová čísla $c=4; 5,6$ a 8 na ose a předmětové úhly $\pm 3^\circ$ a $\pm 6^\circ$ s odchylkami do 5% od hodnot vypočtených z konstrukčních dat. Použití měřící sestavy bylo demonstrováno měřením objektivu SWIR 4/250.

Díky výsledkům této diplomové práce je v laboratoři MTF Podnikové zkušebny rozšířena možnost měření kvality obrazu o blízkou infračervenou oblast spektra.

Seznam použitých zdrojů:

- [1] Goodman J. W.: Introduction to Fourier Optics, New York: McGraw-Hill, 1996
- [2] Hecht E. a Zajac A.: Optics, MA: Addison-Wesley, 1974
- [3] Baker L. R. a Whyte J. N.: New instrument for assessing lens quality by pupil scanning, Japan. J. Appl. Phys. 4, 1965
- [4] Williams T. L.: A pupil-scan aberration analyser, Opt. Acta 19, 1972
- [5] Kapany N. S. a Shatzel J. L., A modulation transfer function analyser and its applications, SPIE, 1968
- [6] Kelsall D., Rapid interferometric technique for MTF measurements in the visible or infrared region, Appl. Opt. 12, 1973
- [7] International Standard ISO 9335.1995, Optics and optical instruments; Optical transfer function; Definitions and mathematical relationships
- [8] International Standard ISO 9335.1955, Optics and optical instruments; Optical transfer function; Principles and procedures of measurement
- [9] Barton N. P.: MTF testing and specification for afocal systems, SPIE, 1974
- [10] Williams T. L.: Optická přenosová funkce zobrazovacích soustav, IOP, 1999
- [11] Boreman Glenn D.: Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical System, SPIE, 2001

Přílohy

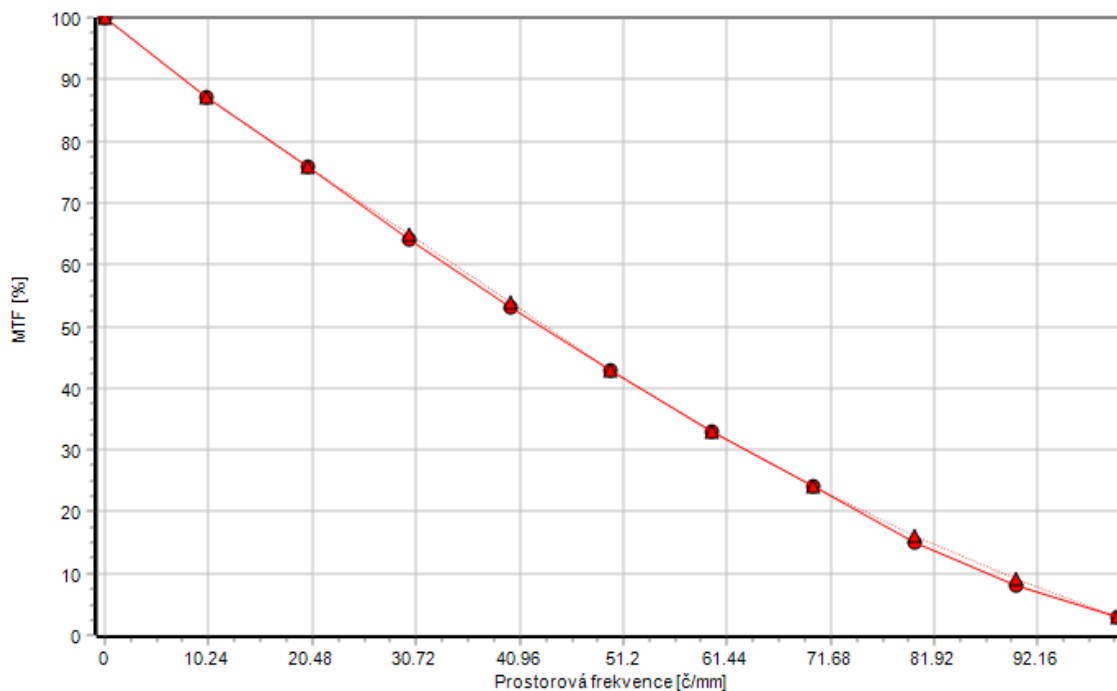
Přehled měření testové čočky.

A. Zrcadlový kolimátor

Měření na ose:

Měřeno na ose pro $c = 8$, $\lambda = 1100$ nm s pološířkou 10 nm. Teoretické hodnoty spočítány v programu ZEMAX a CODE V (porovnávané měření).

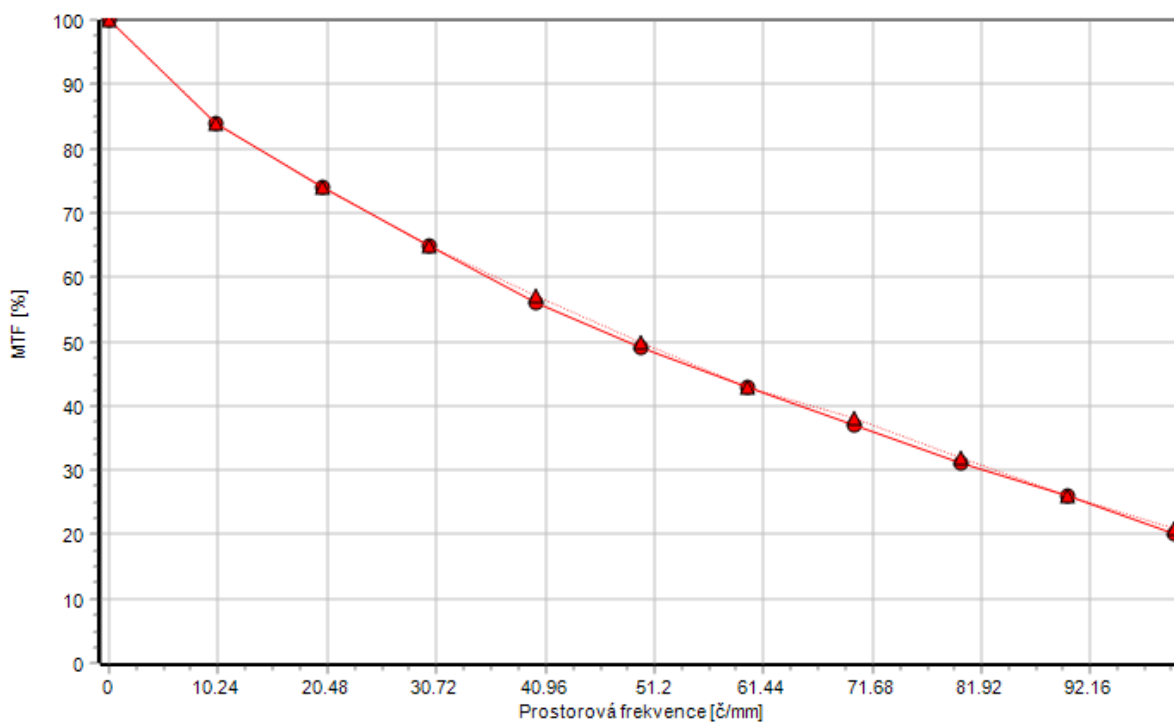
prostorová frekvence [č/mm]	naměřené hodnoty kontrastu [%]	teoretické hodnoty kontrastu [%]	rozdíl [%]
10	87	88	-1
20	76	77	-1
30	65	66	-1
40	54	55	-1
50	43	45	-2
60	33	35	-2
70	24	26	-2
80	16	17	-1
90	9	10	-1
100	3	4	-1



Obrázek 4.17: Naměřené hodnoty testové čočky s clonou $c=8$

Měřeno na ose pro $c = 5,6$, $\lambda = 1100$ nm s pološířkou 10 nm. Teoretické hodnoty spočítány v programu ZEMAX.

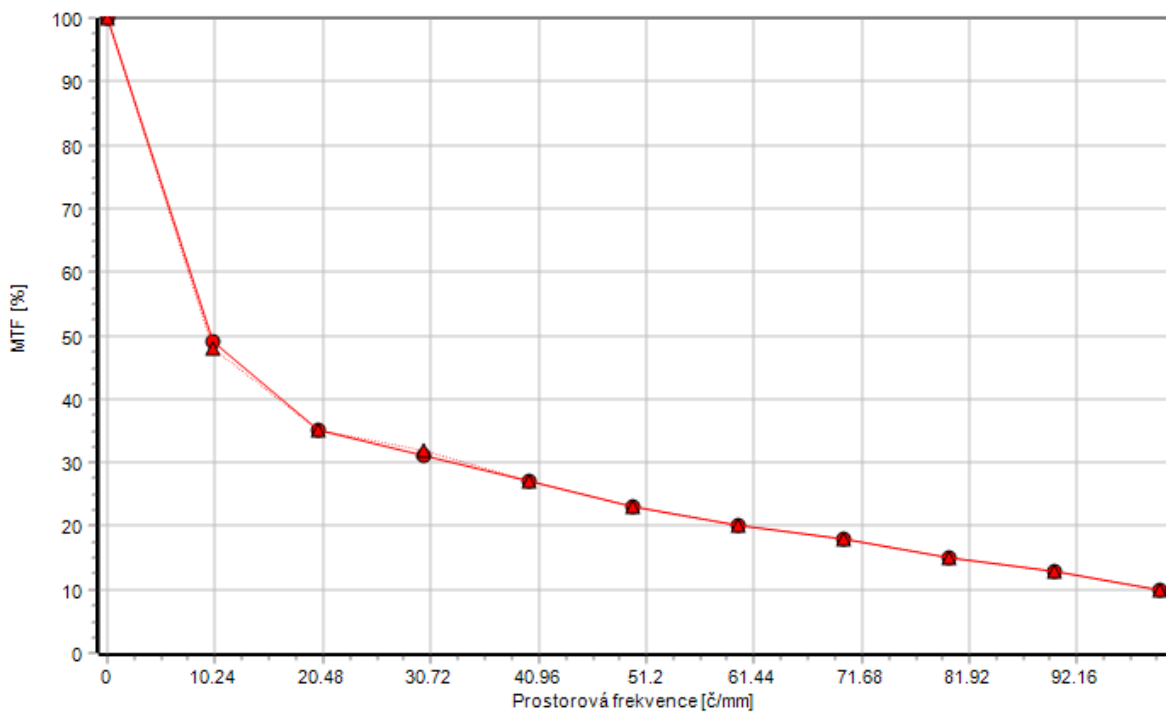
prostorová frekvence [č/mm]	naměřené hodnoty kontrastu [%]	teoretické hodnoty kontrastu [%]	rozdíl [%]
10	84	87	-3
20	74	75	-1
30	65	65	0
40	57	57	0
50	50	50	0
60	43	44	-1
70	38	39	-1
80	32	34	-2
90	26	29	-3
100	21	23	-2



Obrázek 4.18: Naměřené hodnoty testové čočky s clonou $c=5,6$

Měřeno na ose pro $c = 4$, $\lambda = 1100$ nm s pološířkou 10 nm. Teoretické hodnoty spočítány v programu ZEMAX.

prostorová frekvence [č/mm]	naměřené hodnoty kontrastu [%]	teoretické hodnoty kontrastu [%]	rozdíl [%]
10	49	48	+1
20	35	38	-3
30	32	32	0
40	27	25	+2
50	23	21	+2
60	20	18	+2
70	18	16	+2
80	15	15	0
90	13	15	-2
100	10	13	-3



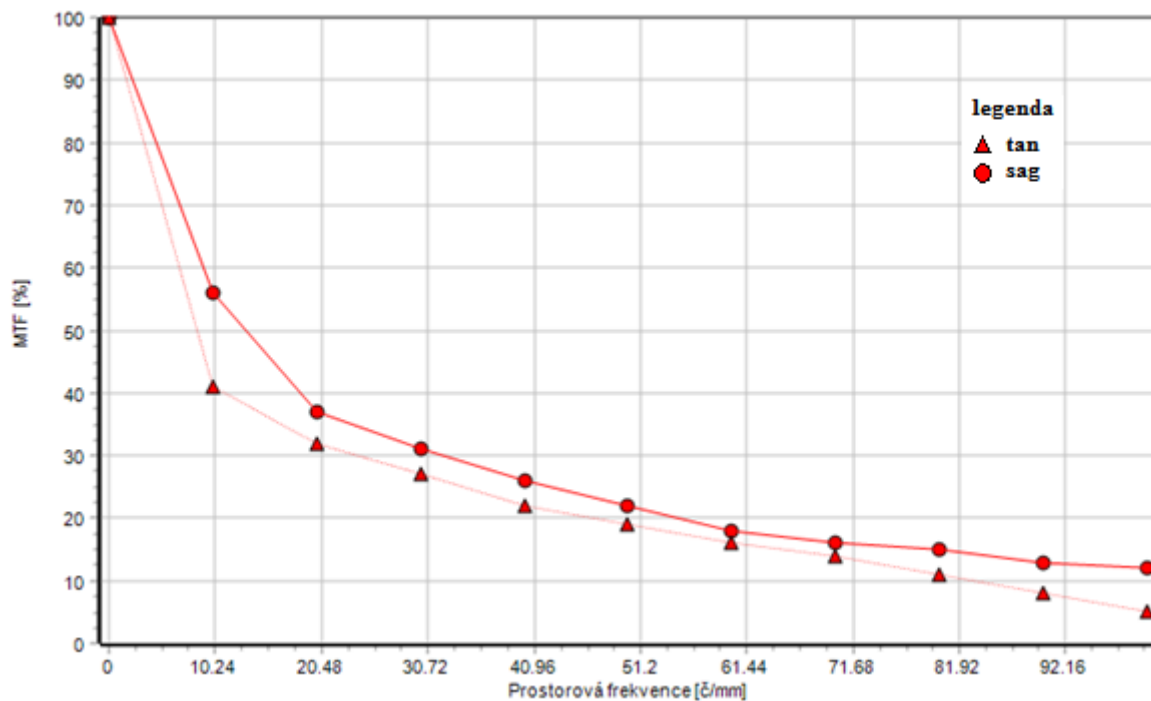
Obrázek 4.19: Naměřené hodnoty testové čočky s clonou $c=4$

Mimoosové měření:

Pro mimoosové měření se zavádí pojem roviny tzv. datum focal plane. Datum focal plane je definována jako rovina blíže k čočce, kdy hodnota kontrastu pro clonu $c=8$ (ale také 11, 5,6 a 4) a frekvenci 50 č/mm (nebo jinou) klesne na 50% kontrastu. Tato definice roviny datum focal plane zajišťuje maximální přesnost a opakovatelnost měření.

Měřeno mimo osu pro předměťový úhel -3° s $c = 4$, $\lambda = 1100$ nm s pološířkou 10nm.
Teoretické hodnoty spočítány v programu ZEMAX. Rovina datum focal plane posun o 152 μm .

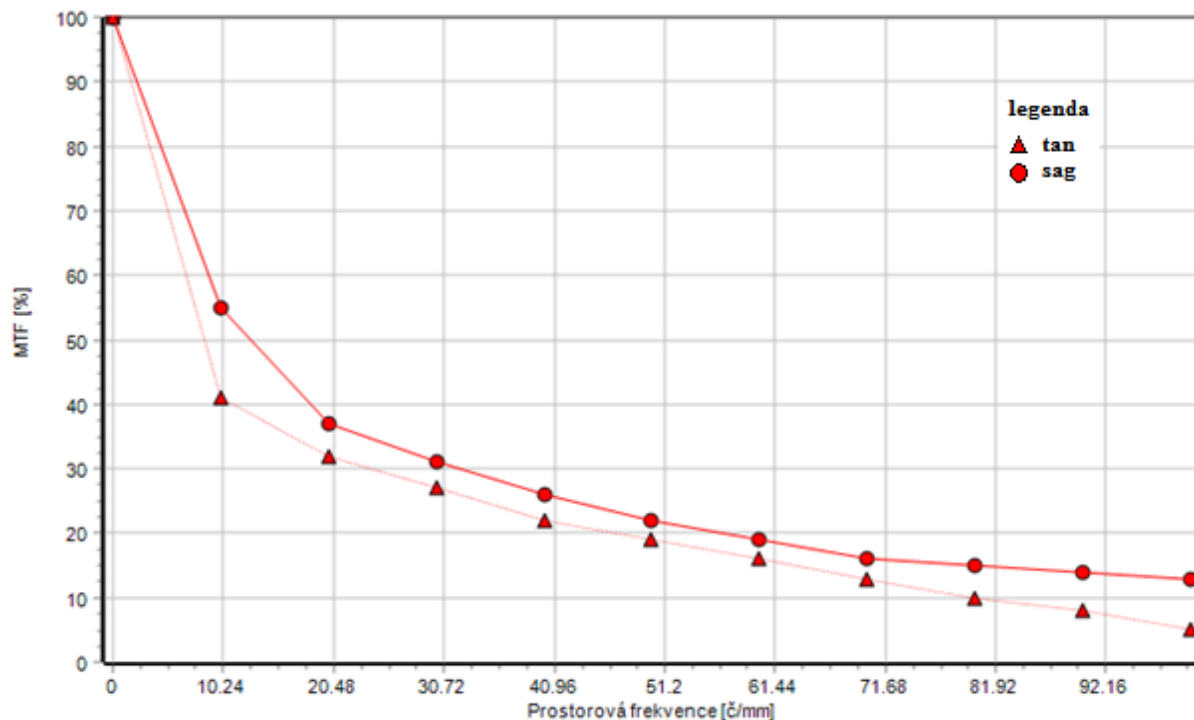
prostorová frekvence [č/mm]	naměřené hodnoty kontrastu [%]		teoretické hodnoty kontrastu [%]		rozdíl [%]	
	tan	sag	tan	sag	tan	sag
10	41	56	41	53	0	3
20	32	37	35	39	-3	-2
30	27	31	27	32	0	-1
40	22	26	23	25	-1	1
50	19	22	21	19	-2	3
60	16	18	18	16	-2	2
70	14	16	16	14	-2	2
80	11	15	14	14	-3	1
90	8	13	11	14	-3	-1
100	5	12	8	14	-3	-2



Obrázek 4.20: Naměřené hodnoty testové čočky s clonou $c=4$ pro předměťový úhel -3°

Měřeno mimo osu pro předměťový úhel $+3^\circ$ s $c = 4$, $\lambda = 1100$ nm s pološířkou 10nm. Teoretické hodnoty spočítány v programu ZEMAX. Rovina datum focal plane posun o 152 μm .

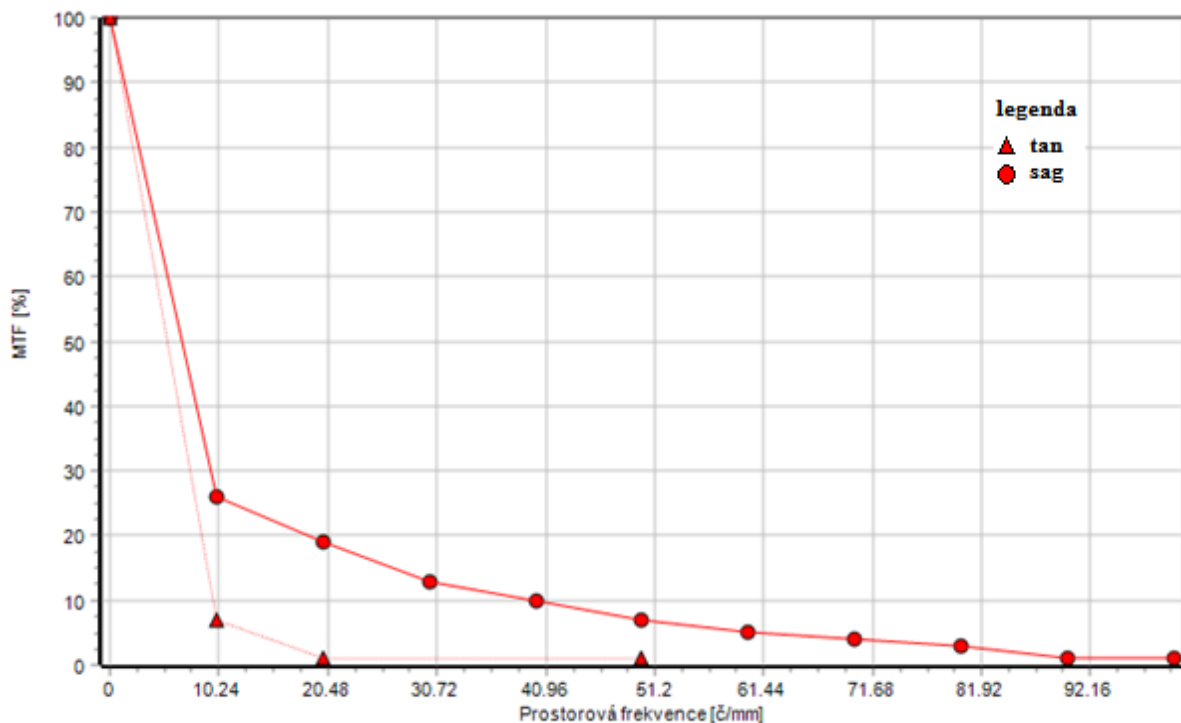
prostorová frekvence [č/mm]	naměřené hodnoty kontrastu [%]		teoretické hodnoty kontrastu [%]		rozdíl [%]	
	tan	sag	tan	sag	tan	sag
10	41	55	41	53	0	2
20	32	37	35	39	-3	-2
30	27	31	27	32	0	-1
40	22	26	23	25	-1	1
50	19	22	21	19	-2	3
60	16	19	18	16	-2	3
70	13	16	16	14	-3	2
80	10	15	14	14	-4	1
90	8	14	11	14	-3	0
100	5	13	8	14	-3	-1



Obrázek 4.21: Naměřené hodnoty testové čočky s clonou $c=4$ pro předměťový úhel $+3^\circ$

Měřeno mimo osu pro předměťový úhel -6° s $c = 4$, $\lambda = 1100$ nm s pološířkou 10nm. Teoretické hodnoty spočítány v programu ZEMAX. Rovina datum focal plane posun o 152 μm .

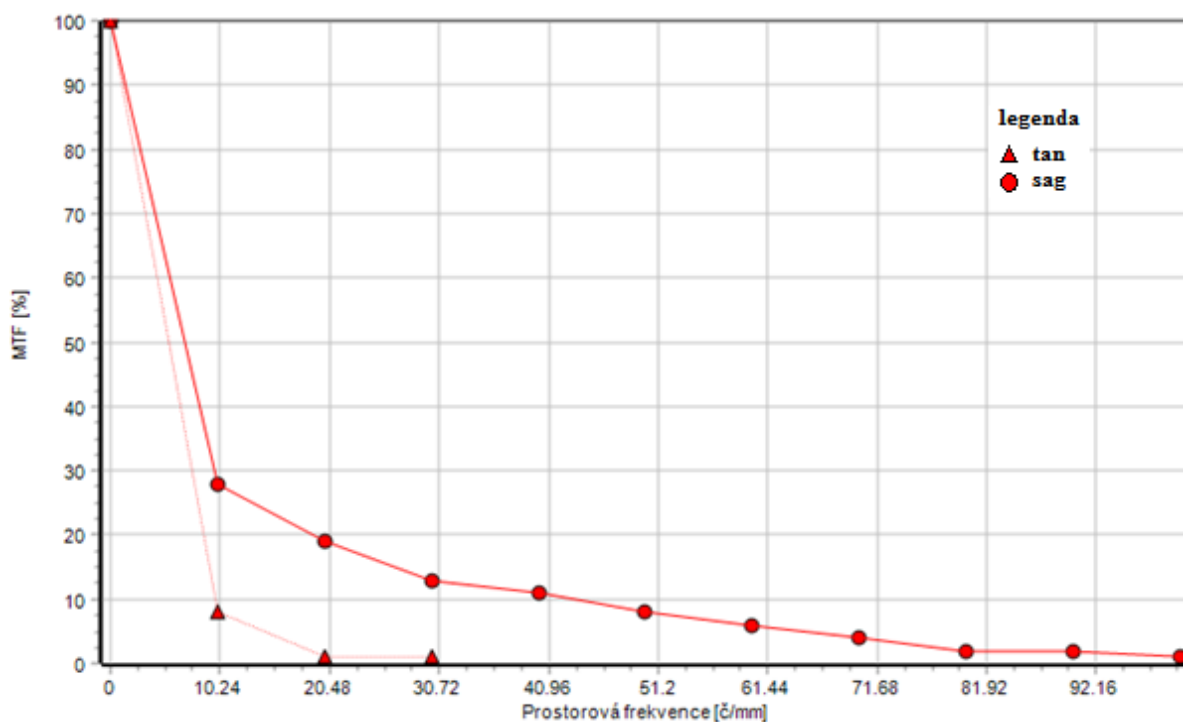
prostorová frekvence [č/mm]	naměřené hodnoty kontrastu [%]		teoretické hodnoty kontrastu [%]		rozdíl [%]	
	tan	sag	tan	sag	tan	sag
10	7	26	7	26	0	0
20	1	19	1	16	0	3
30	0	13	0	13	0	0
40	0	10	0	9	0	1
50	1	7	0	6	1	1
60	0	5	0	5	0	0
70	0	4	0	4	0	0
80	0	3	0	2	0	1
90	0	1	0	1	0	0
100	0	1	0	1	0	0



Obrázek 4.22: Naměřené hodnoty testové čočky s clonou $c=4$ pro předměťový úhel -6°

Měřeno mimo osu pro předměťový úhel $+6^\circ$ s $c = 4$, $\lambda = 1100$ nm s pološířkou 10nm. Teoretické hodnoty spočítány v programu ZEMAX. Rovina datum focal plane posun o 152 μm .

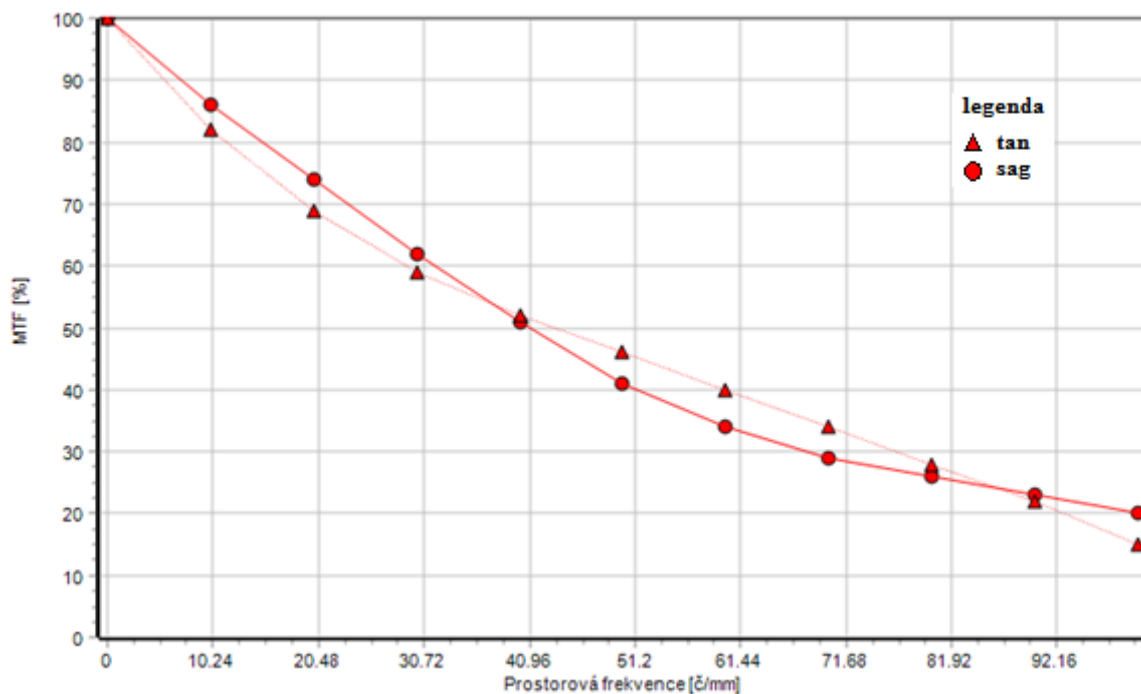
prostorová frekvence [č/mm]	naměřené hodnoty kontrastu [%]		teoretické hodnoty kontrastu [%]		rozdíl [%]	
	tan	sag	tan	sag	tan	sag
10	8	28	7	26	0	0
20	1	19	1	16	0	3
30	1	13	0	13	0	0
40	0	11	0	9	0	1
50	0	8	0	6	1	1
60	0	6	0	5	0	0
70	0	4	0	4	0	0
80	0	2	0	2	0	1
90	0	2	0	1	0	0
100	0	1	0	1	0	0



Obrázek 4.23: Naměřené hodnoty testové čočky s clonou $c=4$ pro předměťový úhel $+6^\circ$

Měřeno mimo osu pro předměťový úhel -3° s $c = 5,6$, $\lambda = 1100$ nm s pološířkou 10nm.
Teoretické hodnoty spočítány v programu ZEMAX. Rovina datum focal plane posun o 157 μm .

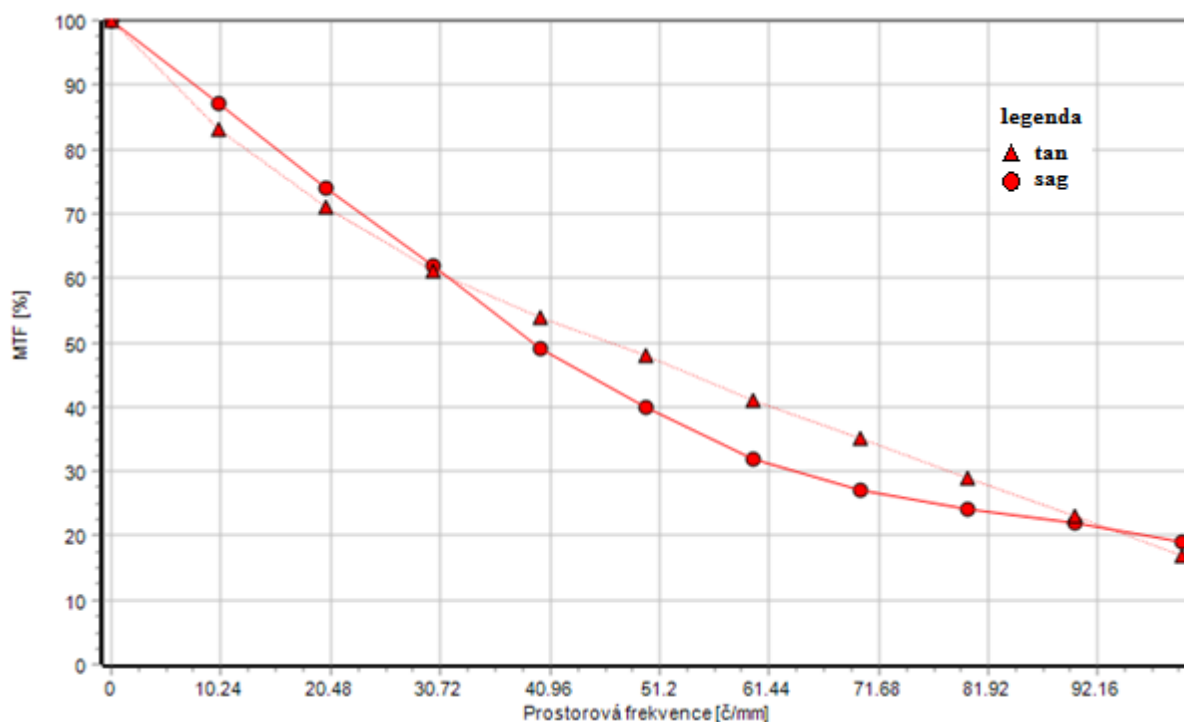
prostorová frekvence [č/mm]	naměřené hodnoty kontrastu [%]		teoretické hodnoty kontrastu [%]		rozdíl [%]	
	tan	sag	tan	sag	tan	sag
10	82	86	85	89	-3	-3
20	69	74	70	76	-1	-2
30	59	62	60	62	-1	0
40	52	51	52	49	0	2
50	46	41	46	39	0	2
60	40	34	41	31	-1	3
70	34	29	36	27	-2	2
80	28	26	30	25	-2	1
90	22	23	24	24	-2	-1
100	15	20	18	23	-3	-3



Obrázek 4.24: Naměřené hodnoty testové čočky s clonou $c=5,6$ pro předměťový úhel -3°

Měřeno mimo osu pro předměťový úhel $+3^\circ$ s $c = 5,6$, $\lambda = 1100$ nm s pološířkou 10nm.
Teoretické hodnoty spočítány v programu ZEMAX. Rovina datum focal plane posun o 157 μm .

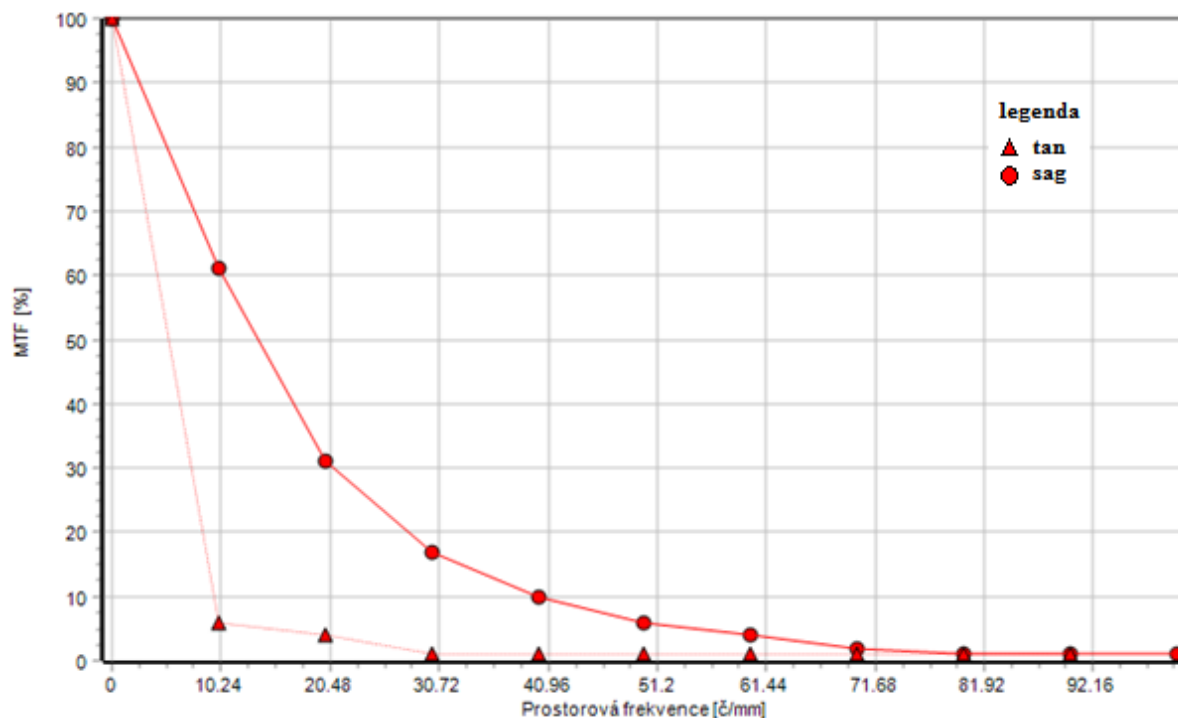
prostorová frekvence [č/mm]	naměřené hodnoty kontrastu [%]		teoretické hodnoty kontrastu [%]		rozdíl [%]	
	tan	sag	tan	sag	tan	sag
10	83	87	85	89	-2	-2
20	71	74	70	76	1	-2
30	61	62	60	62	1	0
40	54	49	52	49	2	0
50	48	40	46	39	2	1
60	41	32	41	31	0	1
70	35	27	36	27	-1	0
80	29	24	30	25	-1	-1
90	23	22	24	24	-1	-2
100	17	19	18	23	-1	-4



Obrázek 4.25: Naměřené hodnoty testové čočky s clonou $c=5,6$ pro předměťový úhel $+3^\circ$

Měřeno mimo osu pro předměťový úhel -6° s $c = 5,6$, $\lambda = 1100$ nm s pološířkou 10nm.
Teoretické hodnoty spočítány v programu ZEMAX. Rovina datum focal plane posun o 157 μm .

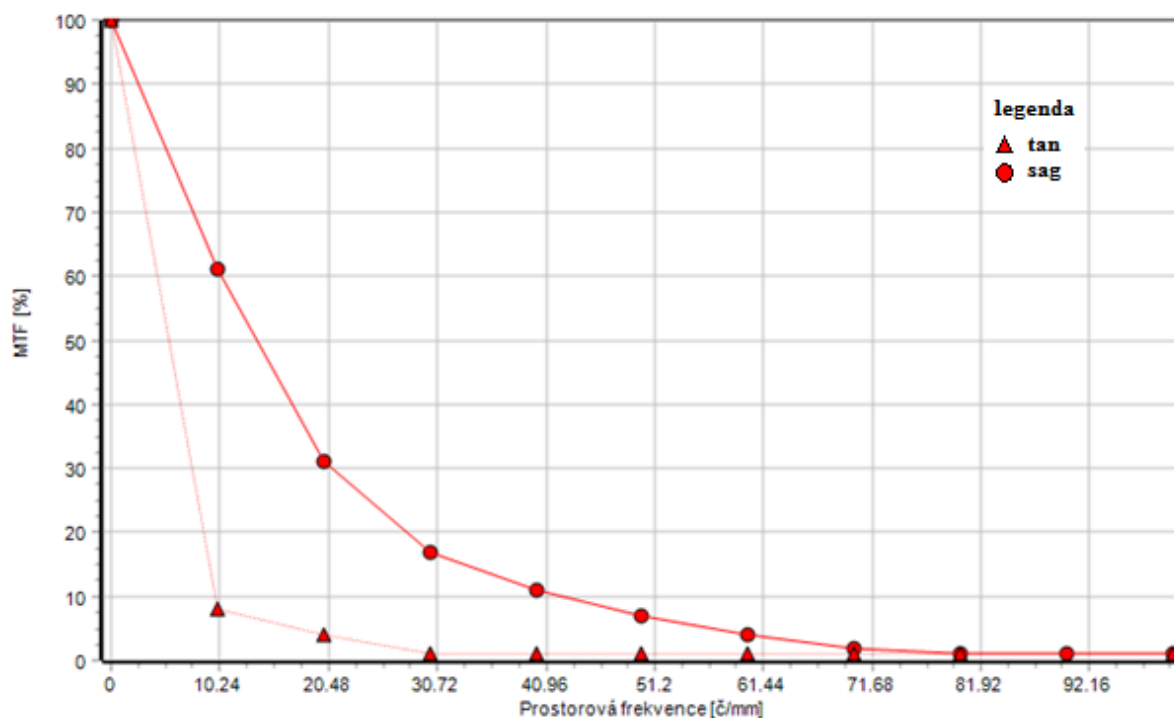
prostorová frekvence [č/mm]	naměřené hodnoty kontrastu [%]		teoretické hodnoty kontrastu [%]		rozdíl [%]	
	tan	sag	tan	sag	tan	sag
10	6	61	6	64	0	-3
20	4	31	5	31	-1	0
30	1	17	1	17	0	0
40	1	10	0	11	1	-1
50	1	6	1	7	0	-1
60	1	4	0	4	1	0
70	1	2	0	2	1	0
80	1	1	0	0	1	1
90	1	1	0	1	1	0
100	0	1	0	1	0	0



Obrázek 4.26: Naměřené hodnoty testové čočky s clonou $c=5,6$ pro předměťový úhel -6°

Měřeno mimo osu pro předměťový úhel $+6^\circ$ s $c = 5,6$, $\lambda = 1100$ nm s pološířkou 10nm.
Teoretické hodnoty spočítány v programu ZEMAX. Rovina datum focal plane posun o 157 μm .

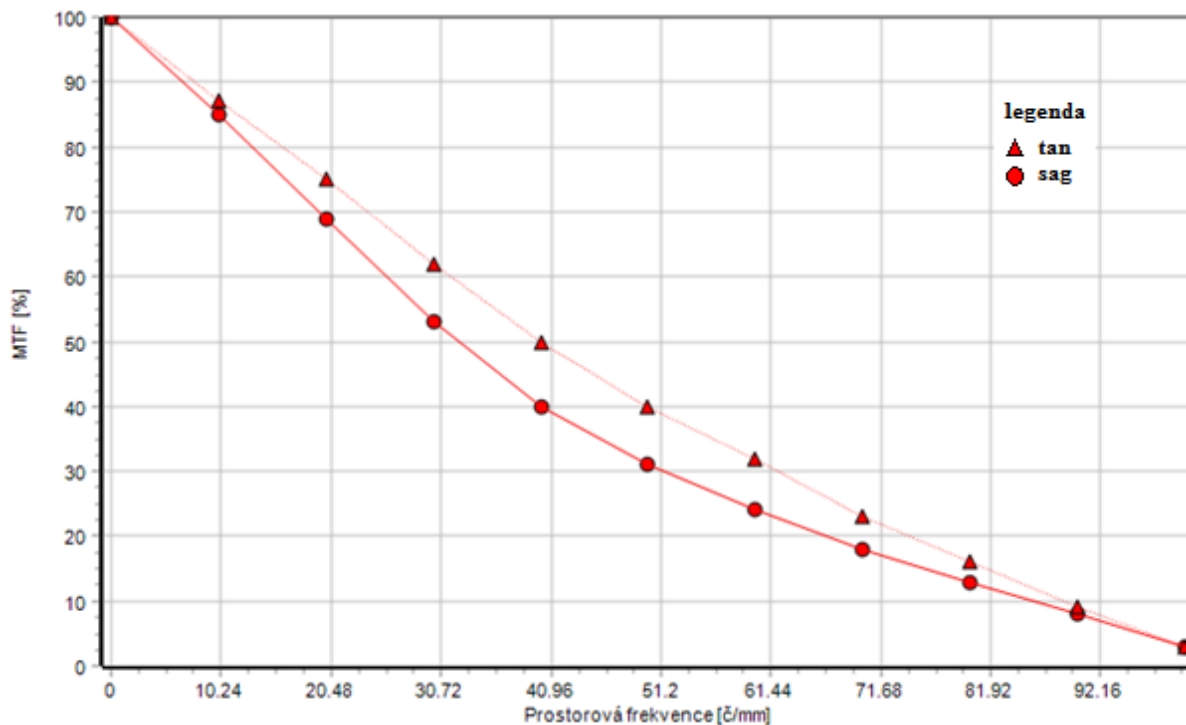
prostorová frekvence [č/mm]	naměřené hodnoty kontrastu [%]		teoretické hodnoty kontrastu [%]		rozdíl [%]	
	tan	sag	tan	sag	tan	sag
10	8	61	6	64	2	-3
20	4	31	5	31	-1	0
30	1	17	1	17	0	0
40	1	11	0	11	1	0
50	1	7	1	7	0	0
60	1	4	0	4	1	0
70	1	2	0	2	1	0
80	1	1	0	0	1	1
90	0	1	0	1	0	0
100	1	1	0	1	1	0



Obrázek 4.27: Naměřené hodnoty testové čočky s clonou $c=5,6$ pro předměťový úhel $+6^\circ$

Měřeno mimo osu pro předměťový úhel -3° s $c = 8$, $\lambda = 1100$ nm s pološířkou 10nm. Teoretické hodnoty spočítány v programu ZEMAX. Rovina datum focal plane posun o 256 μm .

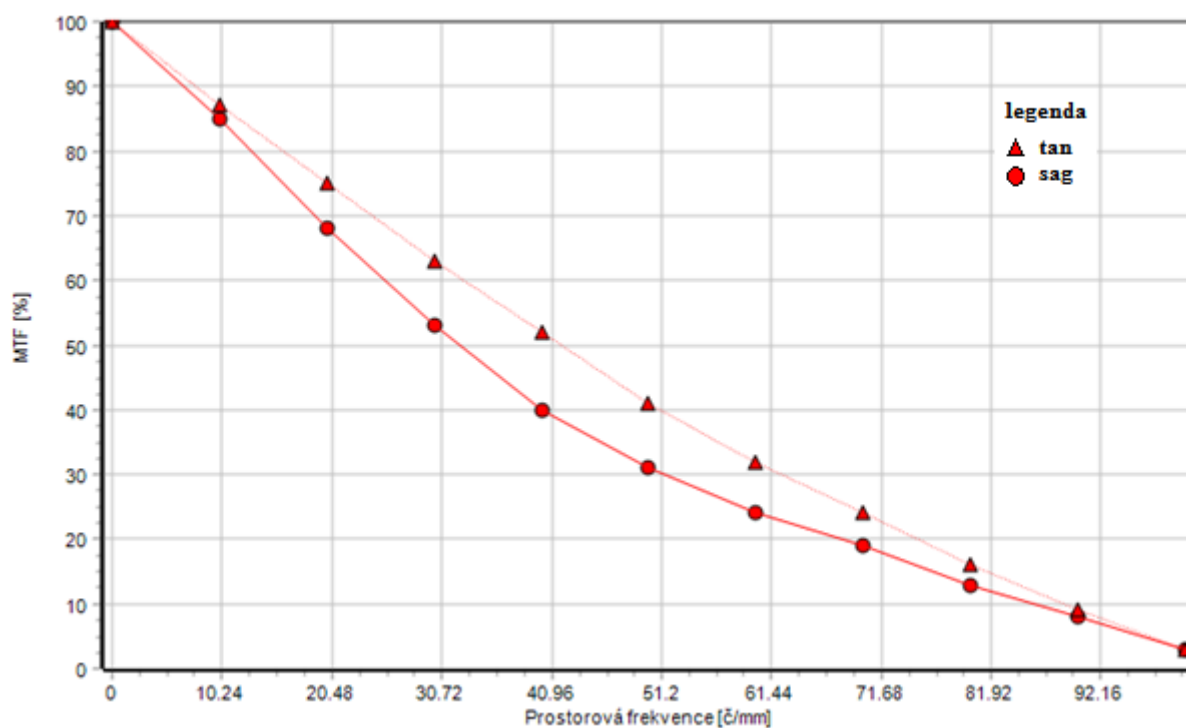
prostorová frekvence [č/mm]	naměřené hodnoty kontrastu [%]		teoretické hodnoty kontrastu [%]		rozdíl [%]	
	tan	sag	tan	sag	tan	sag
10	87	85	88	86	-1	-1
20	75	69	77	69	-2	0
30	62	53	65	53	-3	0
40	50	40	55	40	-5	0
50	40	31	44	31	-4	0
60	32	24	35	25	-3	-1
70	23	18	26	21	-3	-3
80	16	13	18	16	-2	-3
90	9	8	11	10	-2	-2
100	3	3	5	5	-2	-2



Obrázek 4.28: Naměřené hodnoty testové čočky s clonou $c=8$ pro předměťový úhel -3°

Měřeno mimo osu pro předmětový úhel $+3^\circ$ s $c = 8$, $\lambda = 1100$ nm s pološířkou 10nm. Teoretické hodnoty spočítány v programu ZEMAX. Rovina datum focal plane posun o 256 μm .

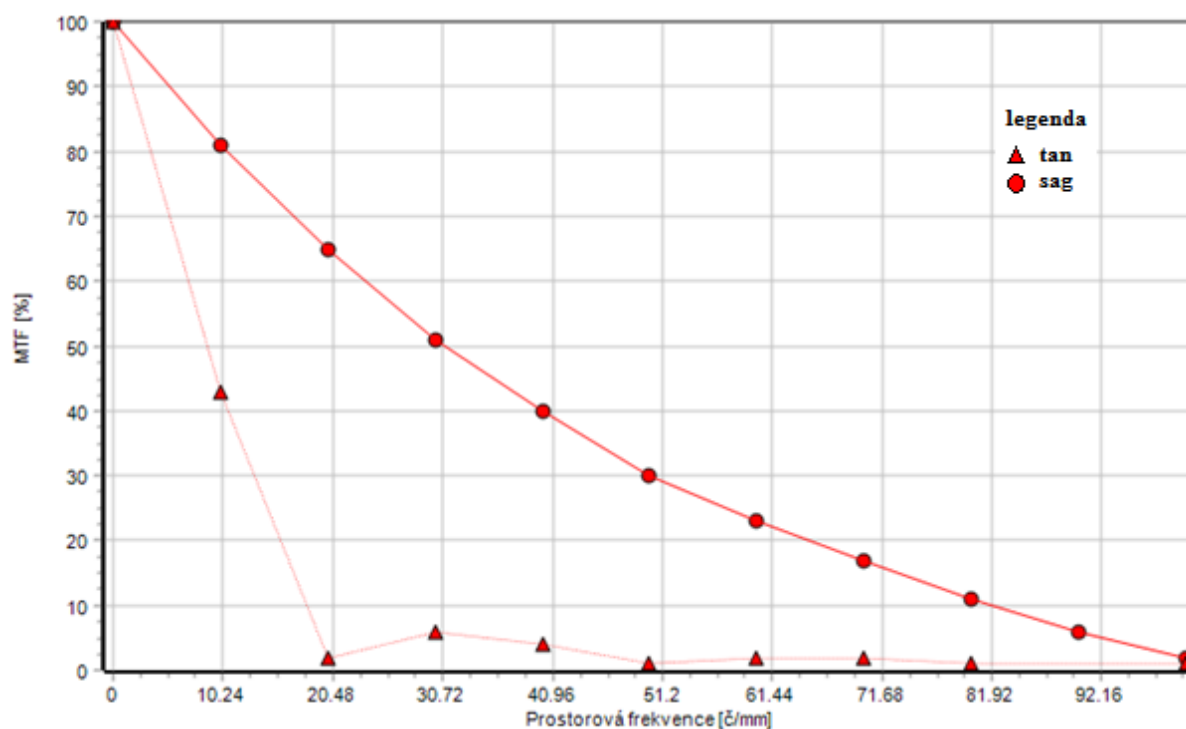
prostorová frekvence [č/mm]	naměřené hodnoty kontrastu [%]		teoretické hodnoty kontrastu [%]		rozdíl [%]	
	tan	sag	tan	sag	tan	sag
10	87	85	88	86	-1	-1
20	75	68	77	69	-2	-1
30	63	53	65	53	-2	0
40	52	40	55	40	-3	0
50	41	31	44	31	-3	0
60	32	24	35	25	-3	-1
70	24	19	26	21	-2	-2
80	16	13	18	16	-2	-3
90	9	8	11	10	-2	-2
100	3	3	5	5	-2	-2



Obrázek 4.29: Naměřené hodnoty testové čočky s clonou $c=8$ pro předmětový úhel $+3^\circ$

Měřeno mimo osu pro předměťový úhel -6° s $c = 8$, $\lambda = 1100$ nm s pološířkou 10nm. Teoretické hodnoty spočítány v programu ZEMAX. Rovina datum focal plane posun o 256 μm .

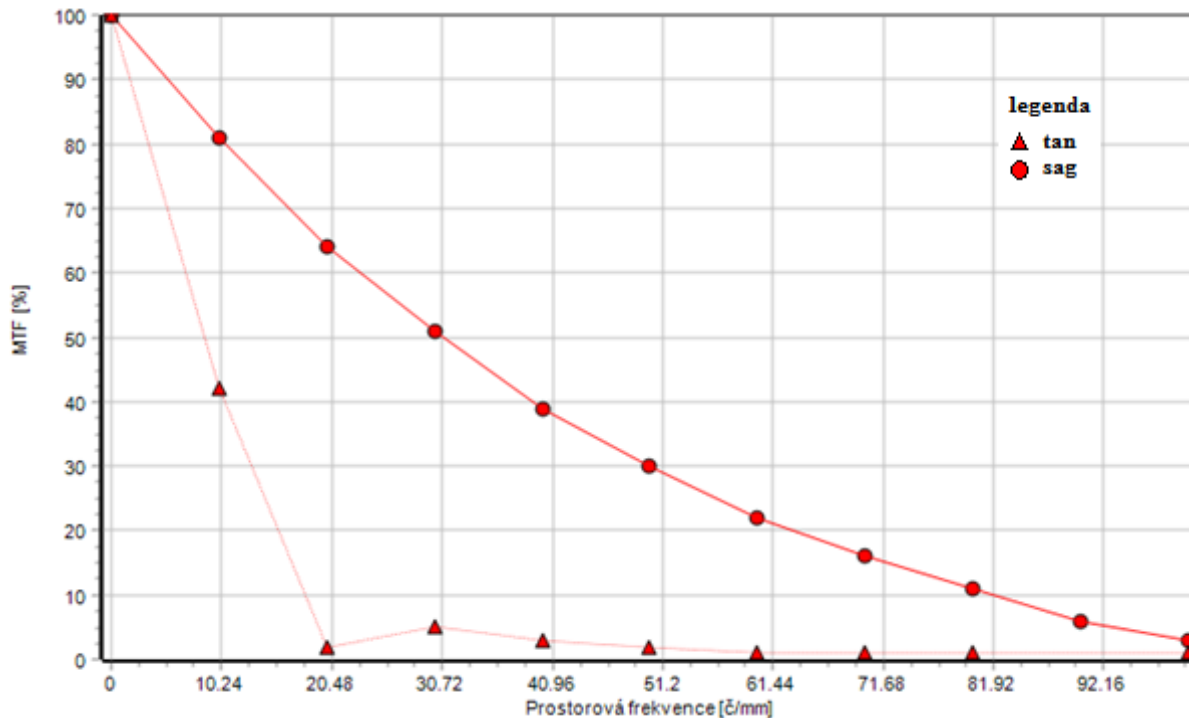
prostorová frekvence [č/mm]	naměřené hodnoty kontrastu [%]		teoretické hodnoty kontrastu [%]		rozdíl [%]	
	tan	sag	tan	sag	tan	sag
10	43	81	40	83	3	-2
20	2	65	1	65	1	0
30	6	51	4	50	2	1
40	4	40	1	39	3	1
50	1	30	1	30	0	0
60	2	23	1	22	1	1
70	2	17	0	17	2	0
80	1	11	1	12	0	-1
90	0	6	1	8	-1	-2
100	1	2	1	4	0	-2



Obrázek 4.30: Naměřené hodnoty testové čočky s clonou $c=8$ pro předměťový úhel -6°

Měřeno mimo osu pro předměťový úhel $+6^\circ$ s $c = 8$, $\lambda = 1100$ nm s pološířkou 10nm. Teoretické hodnoty spočítány v programu ZEMAX. Rovina datum focal plane posun o 256 μm .

prostorová frekvence [č/mm]	naměřené hodnoty kontrastu [%]		teoretické hodnoty kontrastu [%]		rozdíl [%]	
	tan	sag	tan	sag	tan	sag
10	42	81	40	83	2	-2
20	2	64	1	65	1	-1
30	5	51	4	50	1	1
40	3	39	1	39	2	0
50	2	30	1	30	1	0
60	1	22	1	22	0	0
70	1	16	0	17	1	-1
80	1	11	1	12	0	-1
90	0	6	1	8	-1	-2
100	1	3	1	4	0	-1



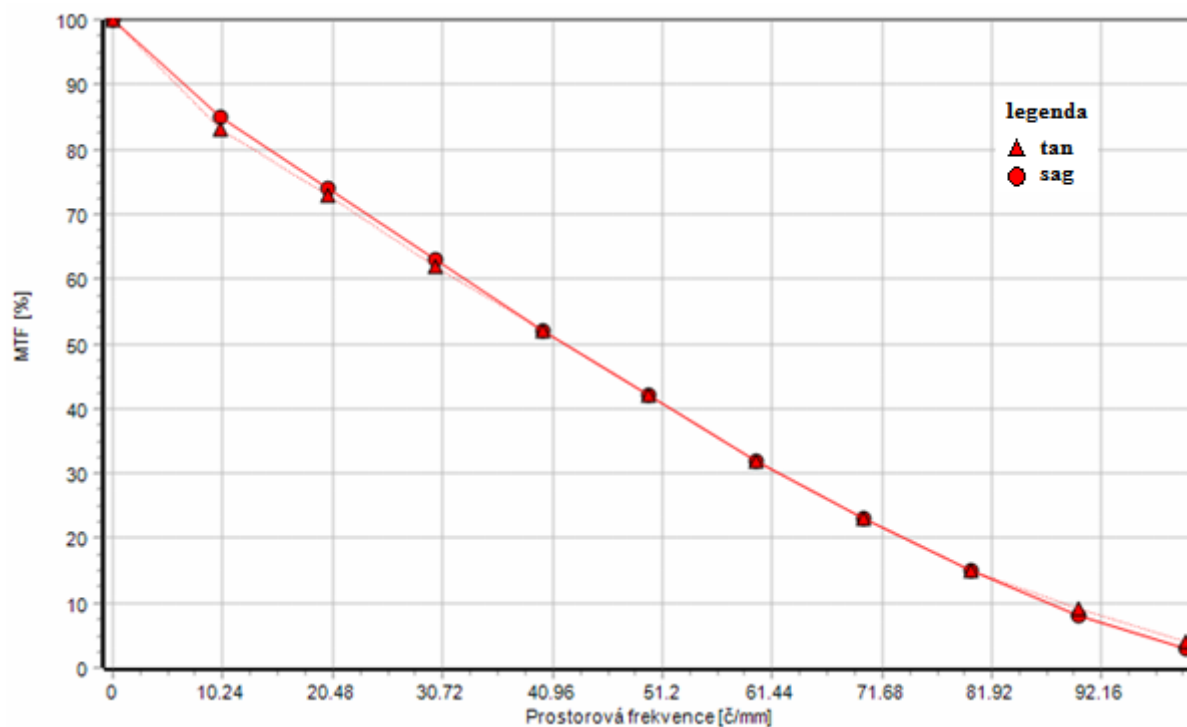
Obrázek 4.31: Naměřené hodnoty testové čočky s clonou $c=8$ pro předměťový úhel $+6^\circ$

B. Čočkový kolimátor

Měření na ose:

Měřeno na ose pro $c = 8$, $\lambda = 1100$ nm s pološířkou 10 nm. Teoretické hodnoty spočítány v programu ZEMAX.

prostorová frekvence [č/mm]	naměřené hodnoty kontrastu [%]	teoretické hodnoty kontrastu [%]	rozdíl [%]
10	84	88	-4
20	74	77	-3
30	63	66	-3
40	52	55	-3
50	42	45	-3
60	32	35	-3
70	23	26	-3
80	15	17	-2
90	9	10	-1
100	4	4	0



Obrázek 4.32: Naměřené hodnoty testové čočky s clonou $c=8$