



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

SENZOR VLNOPLOCHY

WAVEFRONT SENSOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Škaroupka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zbyněk Dostál, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství
Student: **Bc. David Škaroupka**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Přesná mechanika a optika
Vedoucí práce: **Ing. Zbyněk Dostál, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Senzor vlnoplochy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro konstrukci mikroskopů je důležitým požadavkem ověřování kvality zobrazovacích a osvětlovacích optických prvků, které má mikroskop využívat. Je tedy nutné navrhnout a vyrobit senzor vlnoplochy, kterým bude možno tuto kvalitu měřit. Návrh bude založen na principu DMD čipu.

Cíle diplomové práce:

Provést rešerši použití DMD čipu pro měření vlnoplochy.
Navrhnout optickou soustavu senzoru.
Vybrat vhodné optické komponenty.
Senzor sestavit a otestovat.

Seznam doporučené literatury:

WANG, F. Wavefront sensing through measurements of binary aberration modes. Applied Optics [online]. 2009, 48(15) [cit. 2019-11-07]. DOI: 10.1364/AO.48.002865. ISSN 0003-6935.

DLP® Technology and Products (Rev. E) - Texas Instruments, [on-line],
<http://www.ti.com/lit/ml/dlpb010e/dlpb010e.pdf>

FUKA, J. a HAVELKA, B. Optika a atomová fyzika: fyzikální kompendium pro vysoké školy. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1961.

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

V Brně, dne

L. S.

prof. RNDr. Tomáš Šikola, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Při průchodu světla optickou soustavou může v důsledku vad materiálů nebo optických aberací docházet k deformaci vlnoplochy světla. Deformace potom vede k nepřesnému zobrazování a případné deformaci obrazu. Tato diplomová práce se zabývá metodami snímání vlnoplochy, které jsou důležité pro určení nežádoucích chyb optických elementů a specifikaci jejich vlastností. Předmětem této diplomové práce je návrh a sestavení metody snímání světelné vlnoplochy po průchodu optickým aparátem za použití digitálního mikrozrcátkového zařízení. Práce pojednává o vlnových aberacích a geometrických vadách optických soustav. Rovněž jsou zde popsány druhy komerčních výrobků určené ke snímání vlnoplochy.

Summary

When the light passes through optical elements it can cause deformation of wavefront light due to the damage of materials and optical aberrations. The deformation leads to unprecise imaging and deformation of an image. The diploma work mentions wavefront sensing techniques which are important for determination inappropriate errors of optical elements and the specification of their properties. The purpose of the master's thesis is to suggest and investigate wavefront sensing methods after the light passes through the optical element while using the digital micromirror device. The work deals with the topic of wavefront aberrations and geometric optical defects of optical elements. Different kinds of commercial products determined for wavefront sensing are described too.

Klíčová slova

Snímání vlnoplochy, DMD, Optika, vysoká rychlost měření.

Keywords

Wavefront sensing, DMD, Optical, high-speed measurement.

ŠKAROUPKA, David. Senzor vlnoplochy [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124662>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav fyzikálního inženýrství. Vedoucí práce Zbyněk Dostál.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení Ing. Zbyňka Dostála, Ph.D., a všechny podklady jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

.....

V Brně 27. června 2016.

Děkuji Ing. Zbyňkovi Dostálovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady. Také děkuji Ing. Petru Bouchalovi, Ph.D. a Ing. Martinovi Antošovi, Ph.D. za rady a pomoc.

Obsah

Úvod	3
1 Vady optických prvků	5
1.1 Geometrické vady optických soustav	5
1.2 Vlnové aberace	11
1.2.1 Seidlovy aberace	11
1.2.2 Zernikeho polynomy	13
2 Metody snímání vlnoplochy	17
2.1 Interferenční metody	17
2.2 Neinterferometrické metody	18
2.2.1 Shack-Hartmannova metoda	20
2.3 DMD čip pro měření vlnoplochy	23
2.3.1 Digitální mikrozrcátkový systém	23
2.3.2 Princip snímání vlnoplochy pomocí DMD čipu a Walshových masek	25
2.3.3 Matematický popis principu metody snímání vlnoplochy pomocí DMD čipu	28
2.3.4 Snímání vlnoplochy po průchodu volnou optikou za pomoci DMD čipu	31
2.4 Shrnutí metod a dostupné komerční výrobky	32
3 Motivace a cíle práce	35
4 Návrh optické sestavy	37
4.1 Teoretický návrh	37
4.2 Optická simulace a výběr komponentů	38
4.3 Konstrukce senzoru	42
5 Experiment	47
5.1 Kalibrace	47
5.2 Snímání vlnoplochy za použití 4 binárních masek	49
5.2.1 Měření pro deformace odpovídající 10% maximální možné defor- maci zrcadla DZ	50
5.2.2 Měření pro deformace odpovídající 5% maximální možné deformaci zrcadla DZ	54
5.3 Snímání vlnoplochy za použití 8 binárních masek	57
5.3.1 Měření pro deformace odpovídající 10% maximální možné defor- maci zrcadla DZ	59
5.4 Hodnocení experimentu	62
6 Závěr	63

Úvod

Měření vlnoplochy a parametrů optických prvků je velmi důležité pro určení odchylek parametrů optických prvků deklarovaných výrobcem od jejich reálných hodnot. Znalost tvaru vlnoplochy po průchodu optickým aparátem určí kvalitu vlnoplochy a velikosti optických vad. Díky přesnému měření vlnoplochy jsme schopni porovnávat optické prvky se stejnými parametry a vybrat z nich ty s nejlepšími optickými vlastnostmi. To je důležité pro zhodnocení kvality měření, kvantifikování nepřesností měření a správné interpretaci naměřených dat. Metoda snímání vlnoplochy se používá v široké škále profesí jako například oftalmologie, optické testování nebo mikroskopie.

Kvalita optické vlnoplochy je významná zejména ve speciálním odvětví mikroskopie, které se nazývá digitální holografická mikroskopie. Holografické zobrazení je založeno na interferenci vlny ovlivněné vzorkem (signální vlna) a referenční vlny, která ve většině případů prochází nezávislou optickou cestou, kde je odražena nebo prochází přes referenční vzorek. Při interferenci dochází k porovnání měřené vlny s referenční vlnou a záznamu této informace do hologramu. Vytvořený hologram následně umožňuje numerickou rekonstrukci fázového zpoždění vneseného studovaným vzorkem. Nekompenzované deformace vlnoplochy signální nebo referenční vlny mohou zásadně ovlivnit fázovou rekonstrukci měřeného vzorku. Aby byl tento efekt minimální, při holografické mikroskopii se zpravidla používají v signální i referenční optické cestě stejné optické komponenty jako jsou například kondenzory, nebo mikroskopové objektivy. To zajišťuje, že tvar vlnoplochy signální a referenční vlny je v místě kde dochází k interferenci co nejvíce identický.

Identičnost obou větví je však zcela hypotetická a to z důvodů, že i shodné optické komponenty nemusejí mít stejné optické vlastnosti. Ideálnímu stavu pro přesné měření se můžeme alespoň přiblížit, za pomoci správného výběru optických elementů s co nejvíce shodujícími se optickými vlastnostmi. K tomuto výběru nám právě slouží přístroje pro snímání vlnoplochy světla.

Na trhu se nyní pohybuje několik různých druhů přístrojů využívající odlišné metody pro měření vlnoplochy světla. Mezi tyto metody patří například stříhová interferometrie, snímání zakřivení nebo nejnámější z nich Shack-Hartmannova metoda snímání vlnoplochy. Tyto jednotlivé metody, jejich výhody a nevýhody budou popsány v části 2. Právě nevýhody těchto metod mě motivovali k uskutečnění této diplomové práce, která bude zejména pojednávat o technice snímání vlnoplochy za pomoci DMD čipu v části 2.3. Tato metoda na rozdíl od ostatních využívá pro snímání intenzity světla fotodiody. Díky použití fotodiody eliminuje dvě největší nevýhody ostatních metod, které jsou vysoká cena a omezení velikosti měřené vlnoplochy. Za pomoci DMD čipu bychom měli také dosáhnout vyšší rychlosti snímání.

Nejprve se však zaměříme v části 1 na jednotlivé druhy optických vad a aberací pro zřetelnější pochopení této problematiky.

1 Vady optických prvků

Při základním navrhování optických soustav, nebo trasování paprsků optickými elementy se počítá s představou ideálního zobrazení. Tj. takového, že paprsky vycházející z bodu X se po průchodu optickou soustavou znovu střetnou v bodě X' . V tom případě se bod zobrazí jako bod a přímka jako přímka. Ideální zobrazení se však může uskutečnit jen tehdy jsme-li v těsné blízkosti paraxiálního prostoru. Paraxiální prostor je úzká oblast kolem optické osy, někdy nazývaná také jako Gaussův prostor, nebo prostor prvního řádu. Paprsky v tomto prostoru mají maximální odchylku od optické osy 2° .

V reálném prostředí ideální zobrazení poskytuje pouze rovinné zrcadlo. K odchylkám od ideálního zobrazení dochází tehdy pokud paprsky světla vycházejí mimo paraxiální prostor. Bod se v takové případě nezobrazí jako bod, ale jako malá ploška a přímka se zobrazí jako křivka. Dalším případem, kdy nenastane ideální zobrazení je průchod světla, které má více vlnových délek. Každé umístění bodu pak odpovídá dané vlnové délce. Těmto různým odchylkám od ideálního zobrazení říkáme aberace, neboli optické vady, které jsou důvodem zhoršení kvality obrazu. Příčiny vzniku aberací dělíme do těchto třech základních skupin.

Příčiny vzniku aberací:

- a) **Fyzikální** – lom a odraz paprsků na plochách, difrakce světla, disperze prostředí,...
- b) **Technologické** – špatné zpracování a chyby výroby optických elementů
- c) **Materiálové** – nehomogenita materiálu

1.1 Geometrické vady optických soustav

Podle šířky spektra vlnových délek světla procházejícího optickou soustavou dělíme optické vady na monochromatické a chromatické. Monochromatické vady se projevují po průchodu světla o jedné jediné vlnové délce. Tyto vady je dále možné dělit na osové a mimoosové. Při průchodu světla o více vlnových délkách (např. bílé světlo) dochází k disperzi světla, tudíž k různým lomům pro různé vlnové délky v závislosti na indexu lomu.

1. Monochromatické vady

- (a) osové – sférická aberace
- (b) mimoosové – zkreslení, zklenutí a astigmatismus, koma

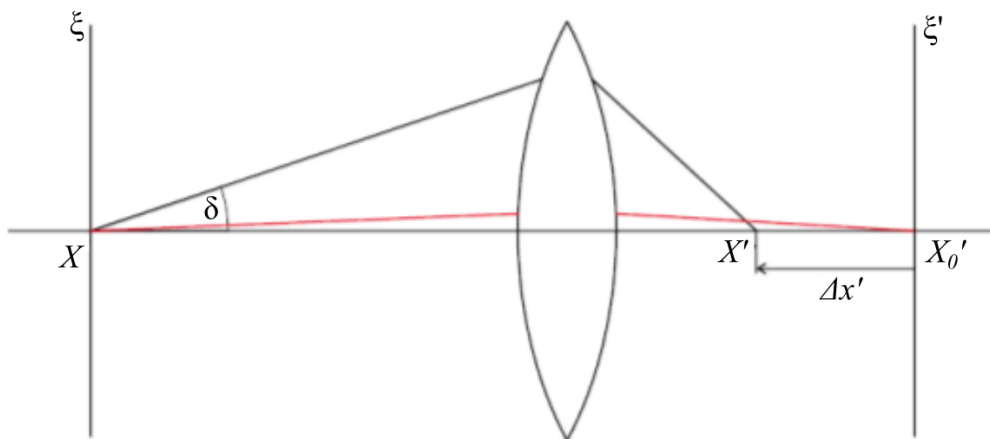
2. Chromatické (barevné) vady

- (a) velikosti obrazu – barevná vada velikosti
- (b) polohy obrazu – barevná vada polohy

Monochromatické vady

Sférická aberace

Ke sférické aberaci, neboli otvorové vadě dochází při zobrazování předmětu širokým světelným svazkem o jedné vlnové délce, který postupuje podél optické osy. Máme-li předmět ležící v bodě X na optické ose, z kterého vychází svazek paprsků, který dopadá na plochu čočky, tak se tento svazek bude lámat na první i na druhé ploše čočky. Paprsky, které vycházejí z předmětu pod úhlem $\delta > 2^\circ$ dopadnou na optickou osu v menších vzdálenostech od čočky, než-li paprsky paraxiální. Paraxiální paprsky vytvoří obraz v bodě X'_0 a paprsek dopadající pod úhlem δ vytvoří obraz v bodě X' . Vzdálenost mezi těmito body $\Delta x' = X'_0 X'$ označuje velikost podélné vady příslušná úhlu δ , který odpovídá dopadové výšce. U rozptylné čočky se bod X' nachází v levo od bodu X'_0 . Z toho vyplývá, že kombinací spojných a rozptylných čoček můžeme otvorovou vadu vykompenzovat [2, 3].



Obrázek 1: Znázornění chodu paprsků vytvářejících otvorovou vadu. Převzato a upraveno z [1].

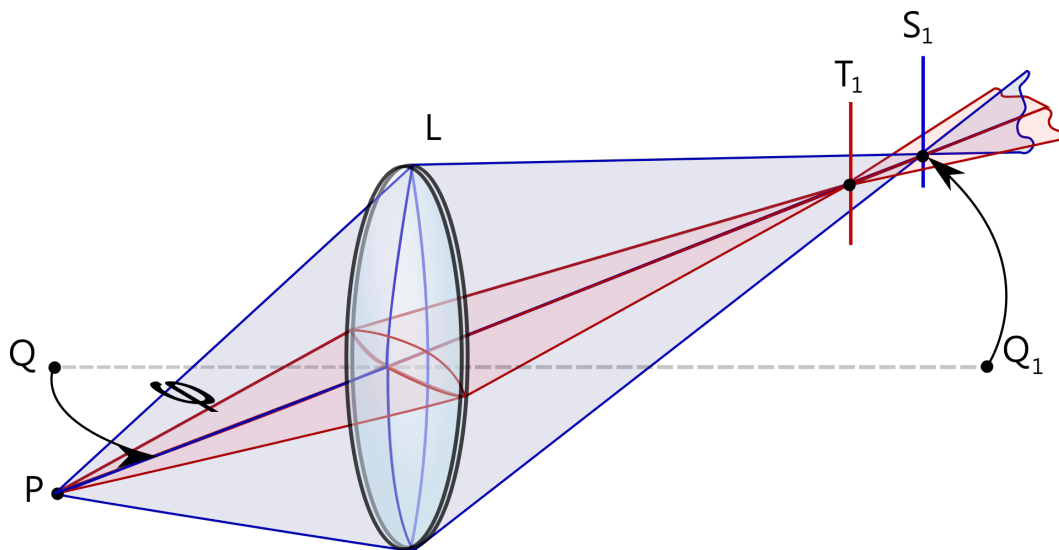
Mimoosové vady zobrazení

Zkreslení

Zkreslení, neboli distorze, se projevuje při zobrazení bodu ležícího mimo optickou osu jediným a to hlavním světelným paprskem. Z předmětu nacházejícího se v bodě Y vychází hlavní paprsek. Po průchodu optickou soustavou protíná paraxiální obrazovou rovinu v bodě Y' , který se neshoduje s ideálním bodem Y'_0 . Odchylka mezi body $\Delta y' = Y_0 Y'$ je hodnotou zkreslení. Čím dále je bod Y umístěn od optické osy, tím větší hodnotu má zkreslení, jehož příčinou je různá velikost příčného zvětšení v obrazovém poli. Pokud toto zvětšení roste se vzdáleností od optické osy, jedná se o kladné poduškové zkreslení. Pokud je tomu naopak, jedná se o záporné soudkové zvětšení [2, 3, 4].

Zklenutí a Astigmatismus

Tyto dvě vady mají mnohé společné. Obě se vyskytují při zobrazení mimoosového bodu za pomoci úzkého svazku paprsků. Pokud zobrazujeme za pomoci úzkého svazku paprsků, je na místě osvětlit pár informací. Svazek světla se dělí na hlavní paprsek a na paprsky v rovinách tangenciálních a sagitálních. Do tangenciální roviny patří předmětový bod, optická osa a hlavní paprsek. Sagitální rovina je rovina kolmá k rovině tangenciální. Po průchodu čočkou, paprsek vytvoří dvě rozdílná obrazová místa, v nichž se obrazy mění v úsečky. Světelný svazek má eliptický průřez, který se mění mezi obrazy na kruhový. Pokud zobrazujeme bodový zdroj soustavou zatíženou astigmatismem, obraz bude mít tvar krátké čáry nebo rozmazaného kroužku (mezi fokály). Vzniklý obraz je pak rozmazaný a deformovaný. Tato optická vada je zaviněna nepravidelným zakřivením lámavých ploch čočky. Astigmatismus lze korigovat za pomoci správného výběru poloměrů křivosti a optických mohutností daných optických elementů. Soustava, která má vykorigovanou astigmatickou vadu se nazývá anastigmat.

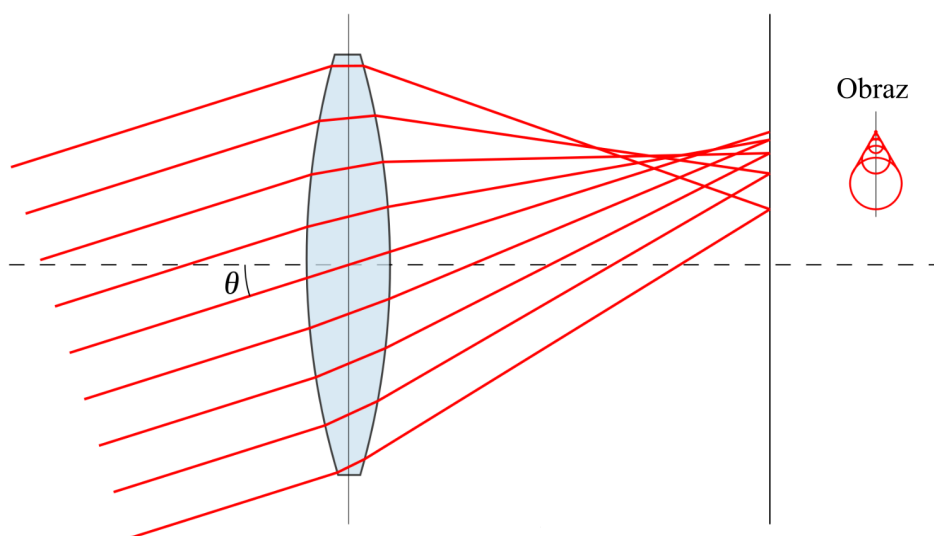


Obrázek 2: Znázornění chodu paprsků vytvářejících astigmatismus. Převzato z [5].

Zklenutí zorného pole je aberace, kdy body roviny kolmé k optické ose jsou zobrazovány na zakřivené ploše. Správně by měly být promítnuty v kolmé rovině k optické ose. Z toho vyplývá, že obraz bude na různých místech zakřivený a různě ostrý [2, 4, 6].

Koma

Koma se projevuje při zobrazování mimoosového bodu širokým svazkem paprsků. Tento svazek po průchodu optickou soustavou vytvoří komplikované obrazce připomínající kometu. Čím větší vzdálenost zdroje světla od osy optické soustavy, tím větší deformace obrazu.



Obrázek 3: Znárodnění chodu paprsků vytvářejících komu. Převzato a upraveno z [5].

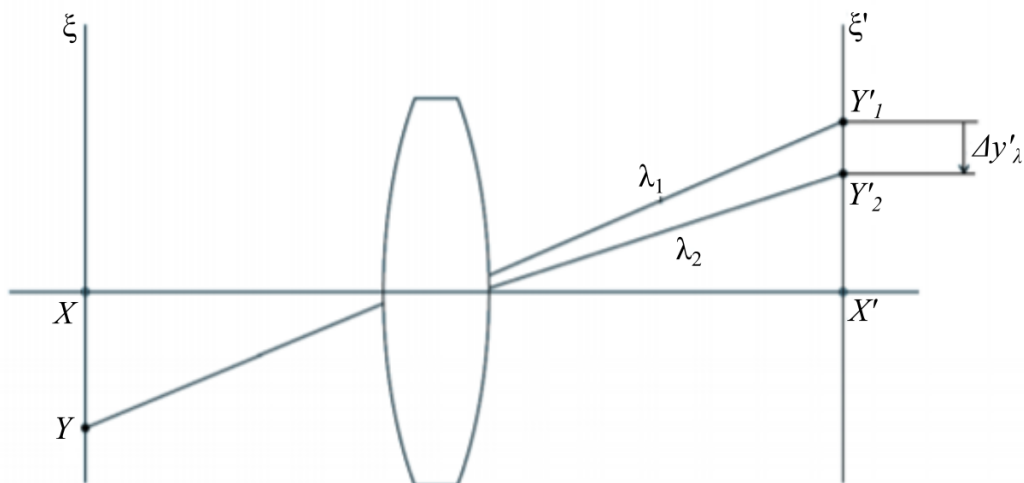
Deformace tohoto obrazu je dána sloučením paprsků, které dopadají na různá místa čočky pod rozdílným úhlem. Velikost této aberace je přímo úměrná tloušťce čočky, která způsobuje, že paprsky dopadající na periferii čočky se lámou více než paprsky procházející středem [2, 4, 6].

Chromatické vady

Příčinou chromatické vady je závislost vlnové délky na indexu lomu. Pokud tedy zobrazujeme pomocí polychromatického osvětlení dochází k takzvané disperzi, čímž je míněno, že každá vlnová délka se láme do jiného bodu. Paprsky s kratší vlnovou délkou (modré světlo) se lámou více a mají tedy větší index lomu. Oproti tomu paprsky s vyšší vlnovou délkou (červené světlo) se lámou dále od čočky, tudíž mají menší index lomu. Tento rozdíl v lámavosti bílého světla má za příčinu různou velikost a polohu obrazu pro jednotlivé vlnové délky. Tyto aberace označujeme jako barevná vada velikosti a polohy.

Barevná vada velikosti

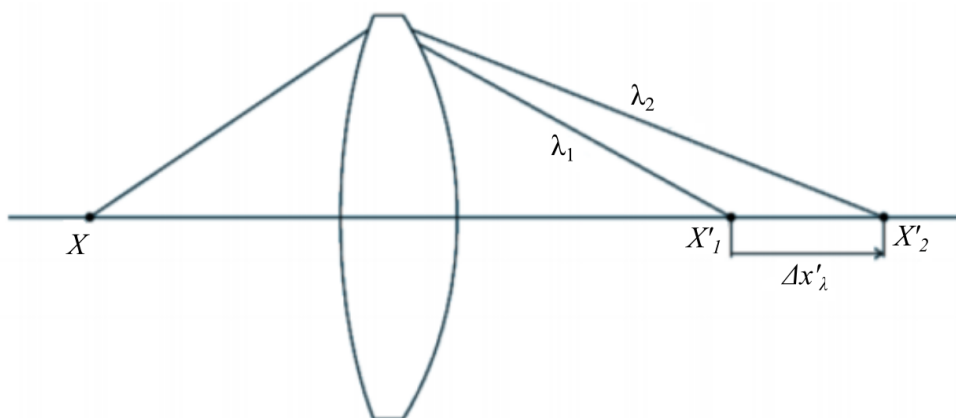
Vada je znázorněna na obrázku 4, kde polychromatický paprsek vycházející z bodu Y v rovině ξ mimo optickou osu dopadá na první rozhraní čočky, kde dochází k disperzi. Na druhém rozhraní čočky dochází ke stejnému jevu a tím je vada ještě zvětšena. Paprsky s vlnovou délkou λ_1 a λ_2 dopadají na rovinu ξ' , kde vytvářejí obraz Y'_1 a Y'_2 . Vzdálenost mezi těmito body nazýváme barevná vada velikosti. Důsledkem této aberace je barevně lemovaný obraz předmětu [2, 4, 7].



Obrázek 4: Znázornění chodu paprsků vytvářejících barevnou vadu velikosti. Převzato a upraveno z [1].

Barevná vada polohy

Tato aberace se projevuje různými polohami obrazu pro různé vlnové délky. Tato vada polohy je zobrazena na obrázku 5, kde polychromatické světlo vychází z bodu X , který leží na optické ose. Po průchodu čočkou dojde k disperzi a paprsky s rozdílnou vlnovou délkou λ_1 a λ_2 dopadají na rozdílné místa na optické ose. Vzdálenost mezi nimi $\Delta x'_\lambda$ udává velikost barevné vady polohy. Důsledkem je rozostření obrazu [2, 4].



Obrázek 5: Znázornění chodu paprsků vytvářejících barevnou vadu polohy. Převzato a upraveno z [1].

1.2 Vlnové aberace

Vady uvedené výše jsou vady optického zobrazení popisované z hlediska geometrické optiky, tedy vady nižších řádů. Reálný optický systém je zatížen nejen těmito vadami, ale také vadami vyšších řádů. Tyto vady lze popsat pomocí vlnové optiky. Vlnová optika, jak již plyne z názvu, nahlíží na světlo jako na elektromagnetické vlnění a zabývá se jevy jako interference, difrakce, ohyb a polarizace světla. Světelné elektromagnetické vlnění se pohybuje v prostoru pomocí Huygensova principu. Vlnoplochy tedy myslíme množinu bodů kmitající stejnou fází. Tyto vlnoplochy jsou v praxi často postiženy různými vlnovými aberacemi.

K přesnému popisu vlnových aberací využíváme Seidlovy koeficienty a Zernikovy polynomy. Seidlovy koeficienty lze použít primárně pro výpočet aberací nižšího řádu. Zernikovy polynomy lze popsat aberace vyšších řádů.

1.2.1 Seidlovy aberace

Tvar vlnoplochy po průchodu reálnou čočkou, může být velmi složitý, protože je ovlivněn řadou náhodných chyb, které mohou být způsobeny designem, výrobou nebo špatnou montáží čočky. Tyto deformace, neboli aberace je možné popsat dobře definovanými vzorci, díky kterým můžeme matematicky definovat druh aberace, bez ohledu na to, zda je způsobena přirozenou vadou čočky nebo chybami při výrobě.

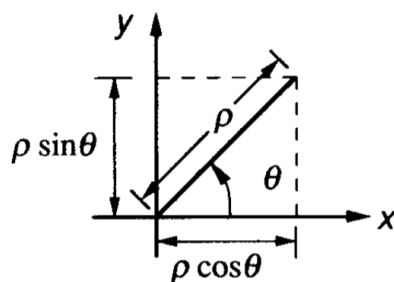
V této části jsou zhodnoceny obecné charakteristiky primárních monochromatických aberací rotačně symetrických optických systémů. Abychom popsali aberace takového systému, specifikujeme tvar vlnoplochy vycházející z výstupní apertury. Pro každý bod objektu bude kvazi-sférická vlnoplocha konvergovat k bodu paraxiálního obrazu. Konkrétní obrazový bod je specifikován souřadnicemi paraxiálního obrazu (x_0, y_0) . Vlnoplocha může být rozšířena jako mocninná řada čtyř proměnných x, y (souřadnice výstupní pupily) a x_0, y_0 (souřadnice bodu obrazu). Je možné vybrat souřadnicový systém tak, aby obrazový bod ležel v rovině obsahující osy x a z , takže y se rovna nule. Proto distribuce vlnoplochy $W(x, y, x_0)$ lze zapsat jako:

$$\begin{aligned} W(x, y, x_0) &\equiv W(x^2 + y^2, xx_0, x_0^2) \\ &= a_1(x^2 + y^2) + a_2xx_0 + a_3x_0^3 + b_1(x^2 + y^2)^2 \\ &\quad + b_2xx_0(x^2 + y^2) + b_3x^2x_0^2 + b_4x_0^2(x^2 + y^2) + b_5xx_0^3 + b_6x_0^4 \dots \end{aligned} \tag{1}$$

Více informací k odůvodnění formy zápisu W uvedené v rovnici 1 je uvedeno v [8]. První člen součtu ve vzorci 1 reprezentuje defokusaci, to jest podélný posuv středu referenční sféry, zatím co druhý člen ve vzorci 1 reprezentuje příčný posuv středu referenční sféry, běžně nazývaný sklon. Třetí člen ve vzorci 1 vede k fázovému posuvu, který je konstantní napříč celou výstupní aperturou. Tím pádem nemá vliv na tvar vlnoplochy a na obraz. Pokud bychom uvažovali o monochromatickém osvětlení, mají tyto tři členy obvykle koeficienty rovné nule. Nicméně tyto výrazy mají nenulové koeficienty pro širokopásmové osvětlení a vedou k chromatickým aberacím [9].

Šest výrazů s koeficienty b_1 až b_6 jsou čtvrtého řádu s proměnnými x, y a x_0 , pokud jsou vyjádřeny jako aberace vlnoplochy. Pokud jsou vyjádřeny jako aberace přímočarého paprsku, pak jsou výrazy s koeficienty třetího řádu [9]. Prvním pěti aberacím třetího řádu se říká Seidlovi aberace po L. Seidelovi, který v 19. století definoval explicitní vzorec 3 pro výpočet aberací nižšího řádu mezi které patří:

- Sférická vada
- Koma
- Astigmatismus
- Zklenutí
- Zkreslení



Obrázek 6: Vztah mezi pravoúhlými a polárními souřadnicemi. Převzato z [9].

Pro vyjádření Seidlových aberací, budou souřadnice výstupní apertury vyjádřeny v polárních souřadnicích podle obrázku 6, takže:

$$x = \rho \cos \theta, \quad (2)$$

$$y = \rho \sin \theta.$$

Radiální souřadnice ρ je obvykle normována tak, že je rovna 1 na okraji výstupní apertury. Souřadnice pole x_0 je také obvykle normována tak, aby byla rovna 1 v maximální poloze pole. Ve zbývajících částech budou použity normované souřadnice. S využitím polárních souřadnic, můžeme rozvoj vlnoplochy 1 zapsat jako Seidlovi aberační koeficienty:

$$W(\rho, \theta) = \frac{1}{8}S_I\rho^4 + \frac{1}{2}S_{III}\rho^3 \cos \theta + \frac{1}{2}S_{III}\rho^2 \cos^2 \theta + \frac{1}{4}(S_{III} + S_{IV})\rho^2 + \frac{1}{2}S_V\rho \cos \theta, \quad (3)$$

kde jednotlivé části tohoto výrazu určují základní aberace, které jsou popsány na obrázku 7. [9]

sférická vada	$\frac{1}{8}S_I$
koma	$\frac{1}{2}S_{II}$
astigmatismus	$\frac{1}{2}S_{III}$
zklenutí	$\frac{1}{2}S_V$
zkreslení	$\frac{1}{4}(S_{III} + S_{IV})$

Obrázek 7: Seidlovy aberace. Převzato z [1].

1.2.2 Zernikeho polynomy

Výše popsané matematické vyjádření aberací pomocí Seidlových vzorců má své limity. Nelze s nimi popsat aberace vyšších řádu. Z toho důvodu v roce 1948 holandský fyzik F. Zernike popsal vlnové aberace pomocí matematické analýzy polynomů. Tyto polynomy lze využít pro aproximaci spojité funkce na kružnici o jednotkovém poloměru, kde funkce na oblasti tvoří úplný ortogonální systém. Tento systém má velké pole využití. Lze ním určit aberace optických prvků a tím otestovat jejich kvalitu. V oftalmologii jsou Zernikeho polynomy využívány pro modelování povrchu rohovky a následnému určení aberací lidského oka. Také výpočet tvaru vlnoplochy z interferogramů, které lze získat pomocí stříhové interferometrie je dosažen pomocí těchto polynomů. Nyní popíšeme výpočet koeficientů Zernikeových polynomů pro aproximaci známé funkce. Označme Z_j jako úplný ortonormální systém Zernikeových polynomů. Fázovou funkci $W(\rho, \theta)$, jejíž hodnoty jsou známé na celé oblasti ohraničené jednotkovou kružnicí, lze v reprezentaci J polynomů systému Z_j (j -tý Zernikeho polynom) aproximovat tímto vztahem [10]:

$$W(\rho, \Theta) = \sum_{j=1}^J c_j Z_j(\rho, \theta), \quad (4)$$

kde c_j je koeficient polynomu:

$$Z_j(\rho, \Theta) = \begin{cases} \sqrt{n+1} R_n^0(\rho) & m = 0 \\ \sqrt{2(n+1)} R_n^m(\rho) \cos(m, \rho) & m \neq 0 \text{ a } j \text{ je sudé} \\ \sqrt{2(n+1)} R_n^m(\rho) \sin(m, \rho) & m \neq 0 \text{ a } j \text{ je liché,} \end{cases} \quad (5)$$

kde $R_n^m(\rho)$ označuje radiální polynom.

$$R_n^m(\rho) = \sum_{s=0}^{\frac{n-m}{2}} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! \left(\frac{n+m}{2} - s\right)! \binom{\frac{n-m}{2}}{s}} \rho^{n-2s}, \quad (6)$$

kde indexy n označuje radiální řád, index m označuje azimutální index [11] a s indexem j souvisí následovně:

$$n = (\sqrt{2j-1} + 0.5)_{int} \quad (7)$$

$$m = \begin{cases} 0 & \text{pro } n = 0 \\ 2 \left(\frac{2j+1-n(n+1)}{4} \right)_{int} & \text{pro } n \text{ je sudé} \\ 2 \left(\frac{2j+1-n(n-1)}{4} \right)_{int} - 1 & \text{pro } n \text{ je liché.} \end{cases} \quad (8)$$

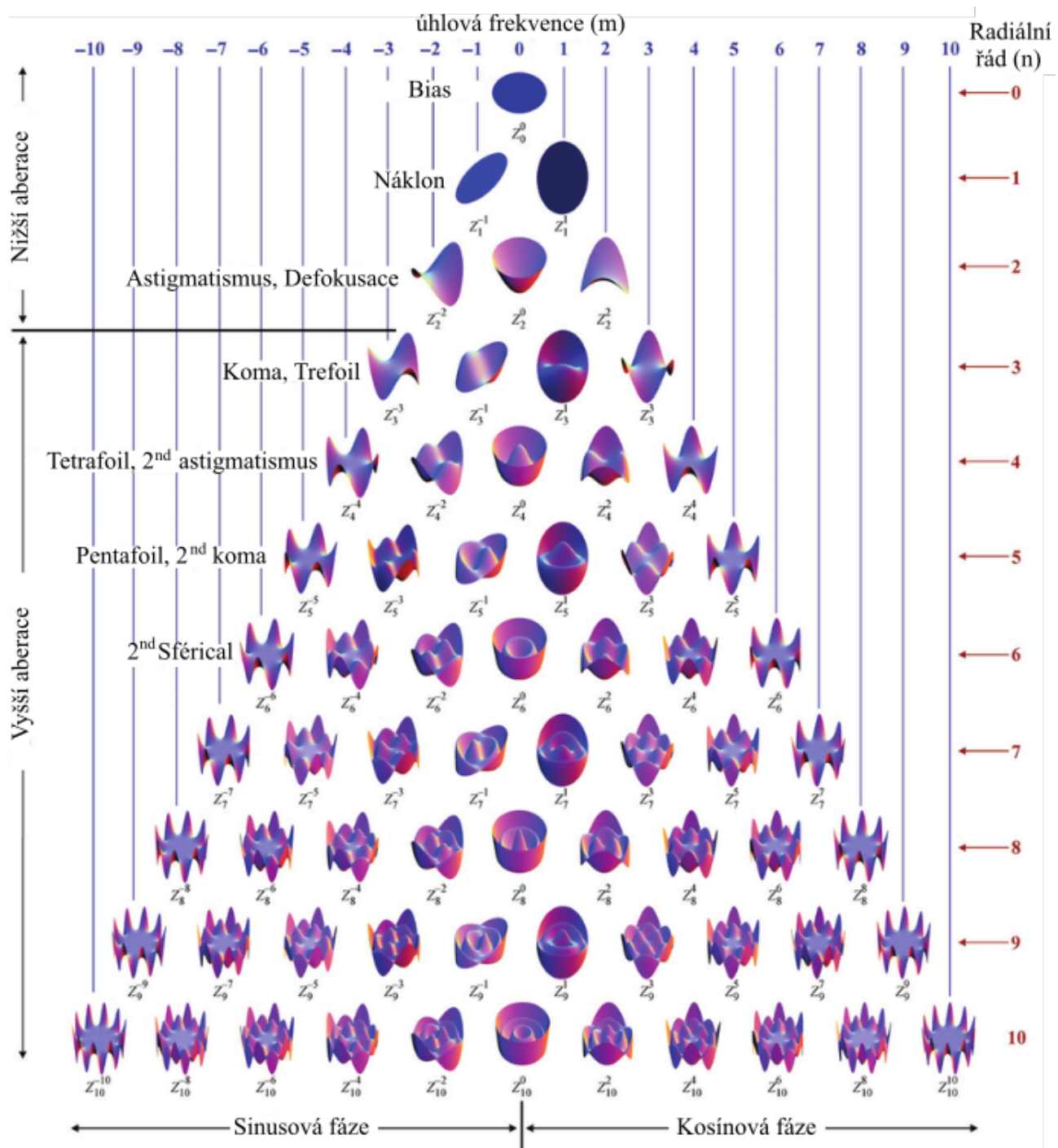
Index *int* znázorňuje, že po výpočtu je bráno nejbližší menší přirozené číslo výsledné hodnoty výrazu v závorce. Jelikož se jedná o úplný ortogonální systém, pro koeficienty c_j platí [10, 20]:

$$c_j = \frac{1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} W(\rho, \theta) Y_j(\rho, \theta) d\rho d\theta \quad (9)$$

Přehled Zernikeho polynomů je uvedený v tabulce na obrázku 8 a jejich grafická interpretace je na obrázku 9.

Řád aberace	Koeficient		Matematické vyjádření aberací	Název aberace
1. řád	Z_1^{-1}	Z_1	$2\rho \sin \theta$	Naklopení Y
	Z_1^1	Z_2	$2\rho \cos \theta$	Naklopení X
2. řád Nižší aberace	Z_2^{-2}	Z_3	$\sqrt{6}\rho^2 \sin(2\theta)$	Astigmatismus Y
	Z_2^0	Z_4	$\sqrt{3}(2\rho^2 - 1)$	Defokusace
	Z_2^2	Z_5	$\sqrt{6}\rho^2 \cos(2\theta)$	Astigmatismus X
3. řád	Z_3^{-3}	Z_6	$\sqrt{8}\rho^3 \sin(3\theta)$	Trefoil Y
	Z_3^{-1}	Z_7	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho) \sin \theta$	Koma Y
	Z_3^1	Z_8	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho) \cos \theta$	Koma X
4. řád Vyšší aberace	Z_3^3	Z_9	$\sqrt{8}\rho^3 \cos(3\theta)$	Trefoil X
	Z_4^{-4}	Z_{10}	$\sqrt{10}\rho^4 \sin(4\theta)$	Tetrafoil Y
	Z_4^{-2}	Z_{11}	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2) \sin(2\theta)$	Sekundární astigmatismus Y
	Z_4^0	Z_{12}	$\sqrt{5}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	Otvorová vada
	Z_4^2	Z_{13}	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2) \cos(2\theta)$	Sekundární astigmatismus X
	Z_4^4	Z_{14}	$\sqrt{10}\rho^4 \cos(4\theta)$	Tetrafoil X
5. řád	Z_5^{-5}	Z_{15}	$\sqrt{12}\rho^5 \sin(5\theta)$	Pentafoil Y
	Z_5^{-3}	Z_{16}	$\sqrt{12}(5\rho^5 - 4\rho^4) \sin(3\theta)$	Sekundární trefoil Y
	Z_5^{-1}	Z_{17}	$\sqrt{12}(10\rho^5 - 12\rho^3 + 3\rho) \sin \theta$	Sekundární koma Y
	Z_5^1	Z_{18}	$\sqrt{12}(10\rho^5 - 12\rho^3 + 3\rho) \cos \theta$	Sekundární koma X
	Z_5^3	Z_{19}	$\sqrt{12}(5\rho^5 - 4\rho^4) \cos(3\theta)$	Sekundární trefoil X
	Z_5^5	Z_{20}	$\sqrt{12}\rho^5 \cos(5\theta)$	Pentafoil X
6. řád	Z_6^{-6}	Z_{21}	$\sqrt{14}\rho^6 \sin(6\theta)$	Hexafoil Y
	Z_6^{-4}	Z_{22}	$\sqrt{14}(6\rho^6 - 5\rho^4) \sin(4\theta)$	Sekundární tetrafoil Y
	Z_6^{-2}	Z_{23}	$\sqrt{14}(15\rho^6 - 20\rho^4 + 6\rho^2) \sin(2\theta)$	Terciální astigmatismus Y
	Z_6^0	Z_{24}	$\sqrt{7}(20\rho^6 - 30\rho^4 + 12\rho^2 - 1)$	Sekundární otvorová vada
	Z_6^2	Z_{25}	$\sqrt{14}(15\rho^6 - 20\rho^4 + 6\rho^2) \cos(2\theta)$	Terciální astigmatismus X
	Z_6^4	Z_{26}	$\sqrt{14}(6\rho^6 - 5\rho^4) \cos(4\theta)$	Sekundární tetrafoil X
	Z_6^6	Z_{27}	$\sqrt{14}\rho^6 \cos(6\theta)$	Hexafoil X

Obrázek 8: Zernikeho polynomy. Převzato z [1].



Obrázek 9: Grafické spracování tvarů vlnoploch zatížených různými druhy aberací. Převzato a upraveno z [12].

2 Metody snímání vlnoplochy

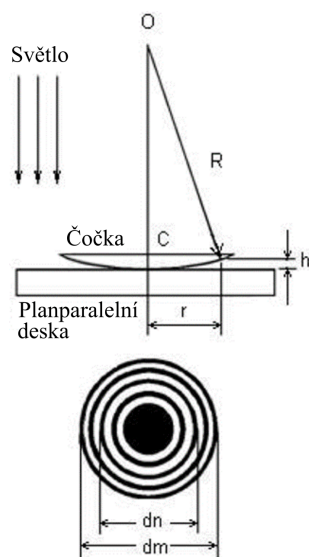
Technologie pro snímání vlnoplochy byla vyvinuta na základě optické teorie před více než sto lety, a to v oboru astronomie. V tomto oboru se používala zejména pro korekci aberací vyššího řádu hvězdářských dalekohledů pro zkvalitnění jejich optických vlastností.

Na následujících stranách budou popsány techniky měření vlnoplochy, které slouží k určení kvality optických prvků. V prvním části budou popsány metody využívající k určení tvaru vlnoplochy interference vln. Dále budou uvedeny neiteroferimetrické metody, které umožňují rekonstrukci vlnoplochy lokálním měřením jejich gradientu a fungují na principu detekce vlnoplochy.

2.1 Interferenční metody

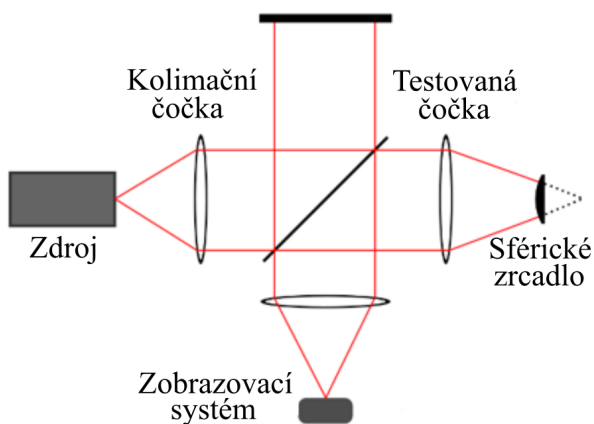
Jedním z nejjednodušších principů určení tvaru povrchu optického elementu je za pomoci Newtonova interferometru. Tato metoda je založena na odrazu světelné vlny od polopropustného rozhraní, které je tvořeno dvěma prvky, mezi kterými je vzduchová mezera. Jeden z prvků je prvek testovací a druhý referenční, u kterého je znám jeho tvar. Po odrazu na těchto rozhraních spolu vlny interferují. Rozdílem vzdálenosti a tvaru povrchu mezi testovacím a referenčním prvkem se mění také rozteč a tvar interferenčních kroužků. Z interferenčních kroužků pak lze numerickou metodou získat tvar testovaného prvku. Tato metoda je nejčastěji využívána pro testování jednoduchých čoček, planparalelních destiček, apod.

Je důležité zdůraznit, že tato metoda neurčuje přímo tvar vlnoplochy, ale strukturu interferenčních proužků, která určuje rozdíl vlnoplochy měřené od vlnoplochy referenční [13].



Obrázek 10: Princim Newtonova interferometru. Převzato a upraveno z [14].

Newtonův interferometr nám ukázal, jak můžeme změřit vlnoplochu po odrazu od měřeného elementu. Pokud však chceme měřit vlnoplochu po průchodu optickým prvkem můžeme použít Twymanův–Greenův interferometr, který vychází z Michelsonova interferometru. Rozbíhavý světelný svazek vycházející ze zdroje je kolimován čočkou a následně rozdělen do dvou větví pomocí děliče svazků. Jedna část je odražena na rovinné zrcadlo a druhá projde skrz dělič svazků směrem k sférickému zrcadlu. Prvek pro testování vložíme do předmetové větve se sférickým zrcadlem. Prvkem projde paprsek, který je následně odražen zrcadlem zpět směrem k testovanému prvku. Paprsek znovu projde elementem, poté se odráží od děliče svazků a vlny z obou větví doputují na detektor, kde dochází k interferenci mezi testovanou a referenční vlnou. Z interferenční struktury poté můžeme získat studované vlastnosti. Twymanův–Greenův interferometr je možné využít pro měření čoček, mikroskopových objektivů apod [15].



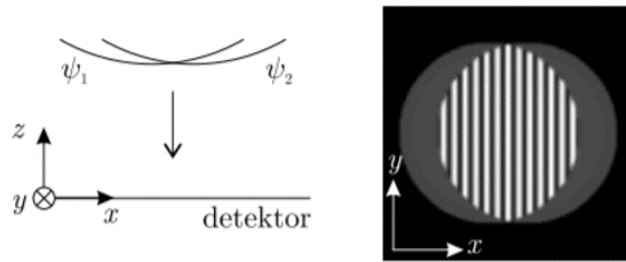
Obrázek 11: Twymanův–Greenův interferometr. Převzato a upraveno z [16].

Výše zmíněné metody umožňují výpočet vlastností optických elementů za pomoci získané interferenční struktury.

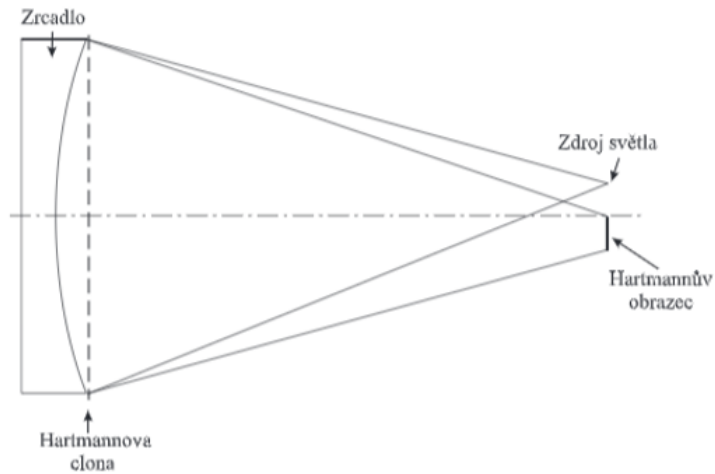
Výjimkou je stříhová interferometrie, která je založena na interferenci dvou příčně posunutých vln stejných vlastností. V oblasti, kde dochází k překrytí svazků pozorujeme interferenci těchto vln, ze které je možné následně vypočítat tvar vlnoplochy. Tento princip je znázorněn na obrázku 12. Další metody a podrobnější informace o nich jsou uvedeny v [17, 18, 19].

2.2 Neinterferometrické metody

Jednou z prvních metod, která nevyužívala interferenci světla pro získání vlnoplochy po průchodu optickým prvkem byl Hartmannův test pro kontrolu kvality konkávních zrcadel. Tento test je založen na tom, že před testované zrcadlo je umístěno stínítko. Toto stínítko má pravidelně uspořádané clony. V rovině středu křivosti zrcadla je umístěn bodový zdroj, jímž je osvětleno stínítko. Pokud je tvar sférického zrcadla dokonalý, zobrazí se clony zmenšeně ve stejné symetričnosti. Pokud je sférické zrcadlo nesymetrické, pak se clony zobrazí na jiném místě nežli v případě ideálního zrcadla [21].



Obrázek 12: Princip stříhové interferometrie. Převzato z [20]

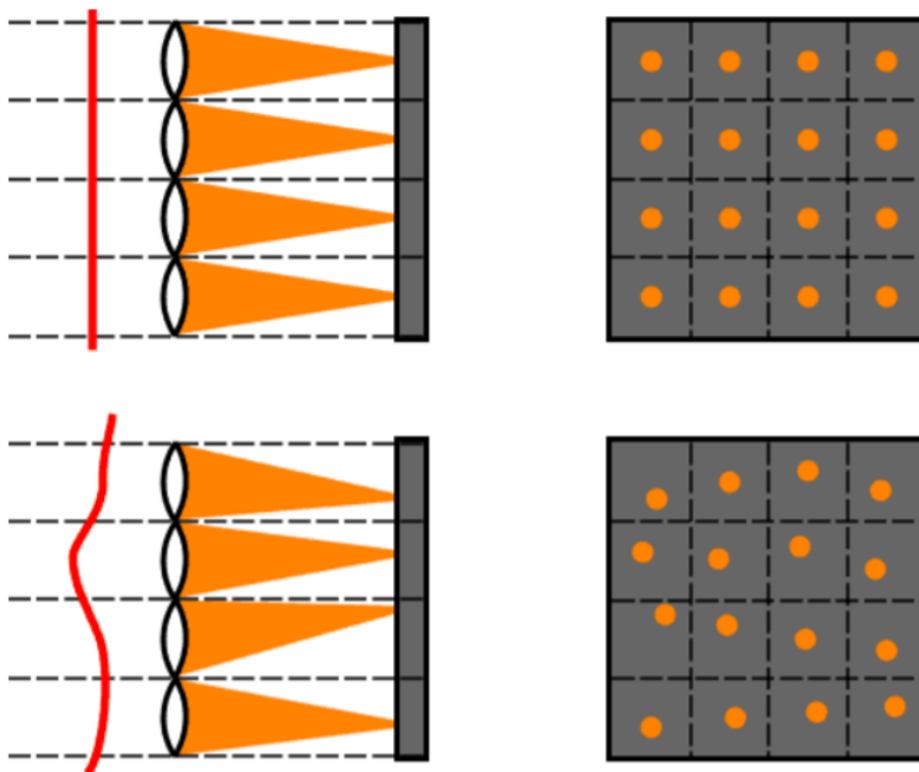


Obrázek 13: Hartmannův test. Převzato z [22]

Pro náročnější testování optických elementů, jako jsou složitější čočky, nebo mikroskopové objektivy, je využívána Shack-Hartmannova metoda, jejíž princip je popsán v další podkapitole [21].

2.2.1 Shack-Hartmannova metoda

Základem této metody je Shack Hartmanův detektor, který se skládá z pole mikročoček a plošného detektoru intenzity světla (CCD nebo CMOS čip). Světlo nejdříve prochází polem mikročoček. Každá mikročočka fokusuje paprsek na senzor světla, který je umístěn v ohniskové rovině mikročoček. Každá mikročočka má své vlastní ohnisko, a tím se na detektoru vytváří stejné množství světelných stop jako je mikročoček. Polohy stop na detektoru souvisejí s průměrným gradientem vlnoplochy dopadající na mikročočky a její ohniskovou vzdáleností.

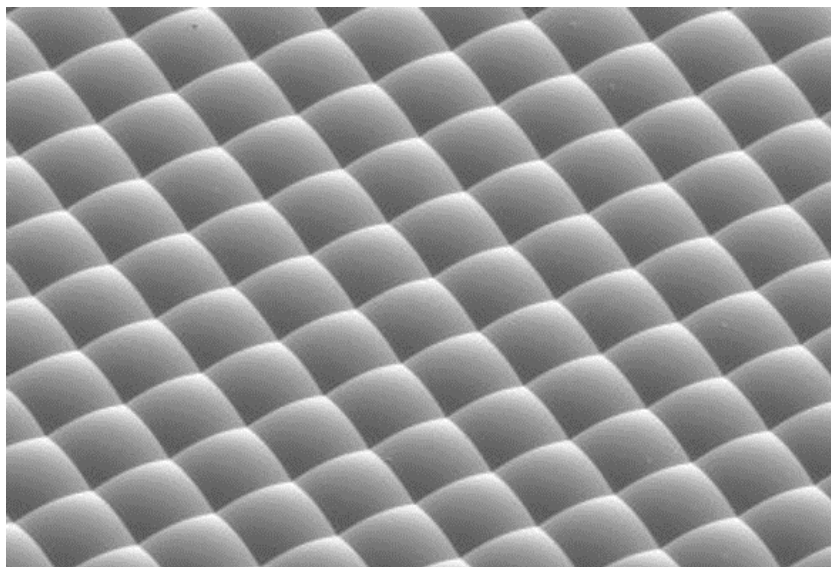


Obrázek 14: Shack-Hartmannova metoda. Převzato z [23].

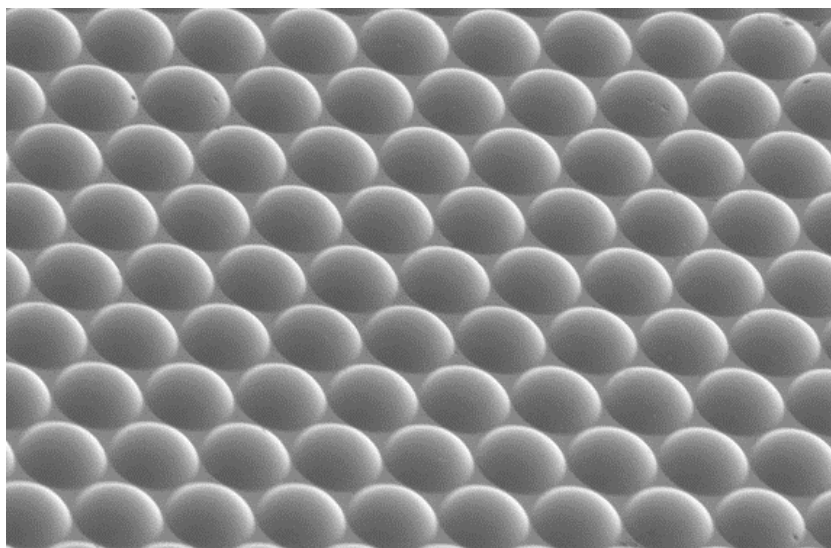
Zde může nastat problém při situaci, kdy měřená vlnoplocha má velkou deformaci. V takovém případě by mohlo dojít k překrytí jednotlivých stop a tím k chybnému výpočtu tvaru vlnoplochy. Tomuto problému se dá zabránit určením oblasti na detektoru, kam může dopadnout světlo procházející jednotlivými mikročočkami. Plocha detektoru je tedy rozdělena na několik částí jejichž počet a rozmístění odpovídá počtu mikročoček. Při dopadu rovinné vlny tvoří stopy na detektoru pravidelnou síť. Pokud dopadá na Shack Hartmanův detektor deformovaná vlnoplocha, jednotlivé středy světelných stop budou posunuty, jak můžete vidět na obrázku 14.

V dnešní době se můžeme potkat s několika druhy Shack Hartmanových detektorů, které se liší svými konstrukčními parametry. Jeden z nejdůležitějších parametrů je kvalita CCD nebo CMOS čipu. Pro co nejpřesnější měření je zapotřebí detektor s co nejmenším počtem chybových pixelů a co nejvyšší precizností výroby a jakostí produktu.

Nejčastěji se využívají CCD čipy s malou velikostí pixelů a velkým rozlišením. Pokud chceme kvalitní čip pro měření, dosti se to odrazí na ceně přístroje. Dalším rozdílem je různé zpracování pole mikročoček, které se mohou lišit ve tvaru jednotlivých mikročoček, tak v použitém materiálu. Nejčastěji se však používá křemenné nebo akrylátové sklo. Nej-používanější tvar je tvar sférický, ale pro lepší kvalitu je možné vyrobít i tvar asférický. Shack Hartmanovi senzory obvykle obsahují pole o velikosti 20x20 až 200x200 mikročoček. Při výrobě plochy mikročoček je důležité dbát na přesnost dodržení parametrů u jednotlivých mikročoček jako je např. ohnisková vzdálenost. Ta se může lišit o 1-3%. Přesnost měření, dynamický rozsah a citlivost je tedy dána vhodnou kombinací pole mikročoček a detektoru záření [24, 23].



Obrázek 15: Čtvercový tvar mikročoček. Převzato z [25].



Obrázek 16: Sférický tvar mikročoček. Převzato z [25].

Shack Hartmanova metoda je nejvíce používanou metodou pro měření tvaru vlnoploch. Má však několik nevýhod jako např. omezení velikosti měřené vlnoplochy rozměry čipu, pro korektní měření je zapotřebí vysoké intenzity světla a mezi hlavní nevýhody patří také velmi vysoká pořizovací cena a to z důvodů nízkého počtu vyrobených kusů za rok.

Tyto nevýhody mě motivovaly k testování nové metody, která je založena na DMD čipu. Použitím těchto komponentů lze docílit jak výrazné snížení ceny, tak odstranit potíže s 2D snímáním, jako je nedostatečná intenzita světla nebo velikost měřené vlnoplochy [23, 24].

2.3 DMD čip pro měření vlnoplochy

2.3.1 Digitální mikrozrcátkový systém

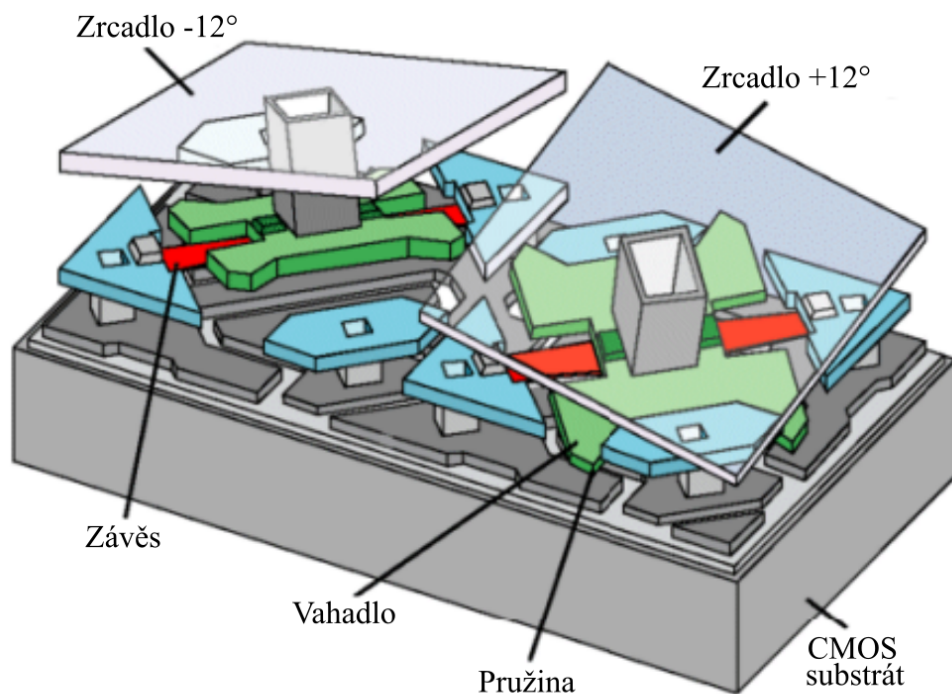
Digitální mikrozrcátkový systém neboli DMD čip (z anglického Digital Micromirror Device) patří stejně jako piezoelektrická deformovaná zrcadla do skupiny mikroelektromechanických systémů (MEMS). Technologie DMD byla vyvinuta v roce 1987 společností Texas Instrument Inc [26]. DMD čipy původně vznikly pro použití v projektorech, ale pro jejich vynikající vlastnosti, cenovou a komerční dostupnost se dostaly i do dalších zařízení a jejich využití pro různé aplikace stále stoupá [27].

DMD čip je tvořen miliony mikroskopických pohyblivých zrcátek, která jsou umístěna vedle sebe a společně vytváří aktivní obdélníkové pole čipu. Podobně jako prostorový modulátor světla SLM (z anglického Spatial light modulator) se DMD čip využívá pro modulaci světla, hlavně díky vysoké odrazivosti zmíněných mikrozrcátek. Zrcátka je možné ovládat pomocí elektrických impulzů a to v rozsahu naklonění $\pm 12^\circ$, tedy každé jednotlivé zrcátko může být nakloněno úhlopříčně kolem své osy o $+12^\circ$ (vypnuto), nebo -12° (zapnuto). Pokud jsou zrcátka v poloze zapnuto, dochází k odrazu světla do dalších částí optické sestavy. Pokud je zrcátko v poloze vypnuto, světlo se neodráží do optického systému a musí být blokováno. DMD čip je schopen generovat různé odstíny šedé i spojitě proměnnou amplitudovou modulaci a to díky rychlému střídání polohy mezi stavem vypnuto a zapnuto. Například při přehrávání videa může zrcátko vykonat až několik tisíc pohybů za sekundu.

Jednotlivá hliníková mikrozrcátka mají velikost v řádu mikrometrů a jsou připevněna na vahadla. Tato vahadla jsou pak zavěšena na dvou torzních závěsech, jež jsou uchyceny na obou koncích a jejichž střed je možný otáčet. Celý čip je pak umístěn na CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor) substrátu, jak je ukázáno na 17. Vzhledem k velikosti a hmotnosti zrcátek, není tento mechanismus nijak výrazně mechanicky namáhán.

Poloha jednotlivých zrcátek je kontrolována pomocí elektrostatického pole, které je tvořeno dvěma páry elektrod. Jeden pár elektrod má za úkol správné natočení zrcátka a pomocí druhé dvojice nastavujeme polohu zrcátka na vahadle. Na obě dvojice je zpravidla přiveden stejný náboj. Pod každým mikrozrcátkem je tzv. paměťová buňka, která je napojena na elektrodu ovládající polohu zrcátka. Pro pohyb zrcátka musí být z této buňky vyslán příslušný signál. Jakmile jsou do buňky přivedeny informace o pohybu, je přivedeno napětí na elektrody. Díky tomu se mezi elektrodou a zrcátkem vytvoří elektrostatická síla a dojde k pohybu zrcátka. Následným přivedením napěťového impulzu z paměťové buňky dojde k dalšímu požadovanému pohybu zrcátka. Tyto napěťové impulzy, které ovládají pohyb zrcátek jsou generovány DLP (Data Loss Prevention) ovladačem [27, 28].

Napětí za pomoci něhož otáčíme zrcátka, nabývá pouze určitých hodnot. Tím je snížena počet úrovní napětí, které jsou potřeba pro adresaci jednotlivých pixelů. Díky tomu mohou být pixely řízeny z paměťové buňky. Tímto způsobem je možné natáčet všechna zrcátka současně, změnou napětí na všech zrcátkách ve stejnou dobu. Tato vlastnost přesného načasování je zároveň největší výhodou DMD čipů, zvláště u promítání dynamických masek.



Obrázek 17: Princip DMD čipu. Převzato a upraveno z [29].

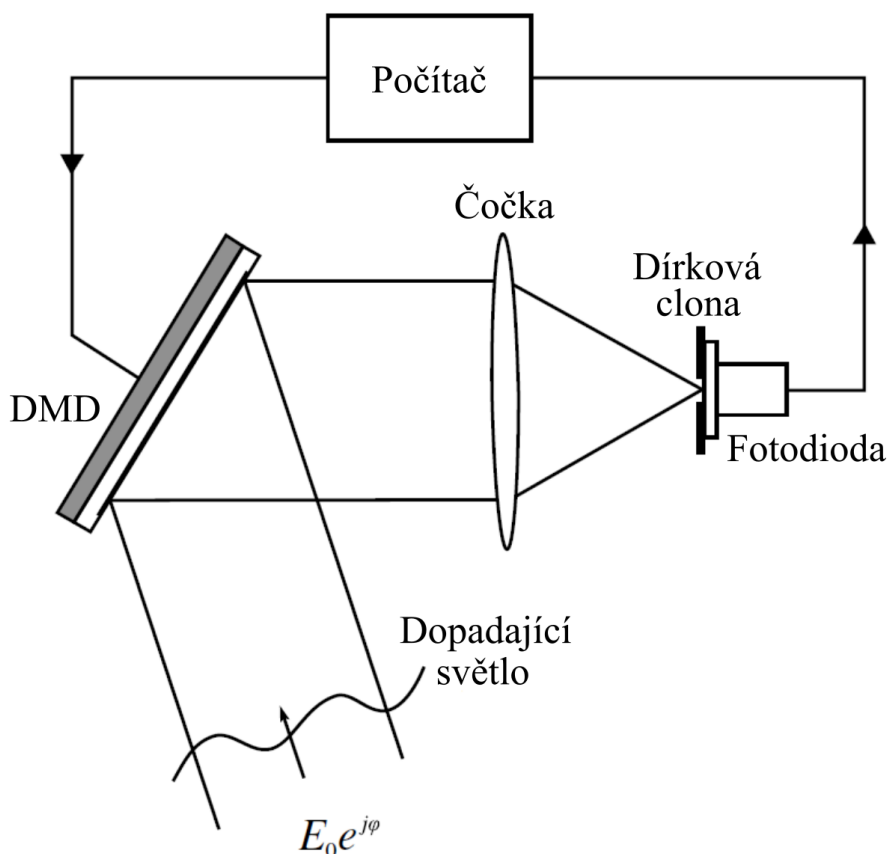
Díky rozložení všech komponentů pod zrcátka, mohou být zrcátka těsně vedle sebe a tím neubírat aktivní zobrazovací plochu. V promítané masce pak nevznikají tmavé proužky. Světelný výkon soustavy a kontrast obrazu je díky vysoké odrazivosti zrcadel dán jen intenzitou světla světelného zdroje [27].

2.3.2 Princip snímání vlnoplochy pomocí DMD čipu a Walshových masek

V této části pojednávám o technice snímání vlnoplochy, kterou publikoval Feiling Wang [30]. Tato metoda získává fázi světla pomocí binární modulace intenzity, které je dosaženo promítáním binárních masek na DMD čip. Tyto binární masky jsou kruhové obrazce, které vycházejí z Walshových masek.

Popis optické sestavy pro snímání pomocí DMD čipu

Na obrázku 18 je znázorněná sestava pro snímání vlnoplochy. V našem případě budeme používat DMD čip, jako amplitudový modulátor dopadající vlnoplochy. Dopadající světlo se šíří směrem k DMD čipu kde dochází k modulaci intenzity pomocí promítaných masek. Po odražení je světlo pomocí čočky fokusováno na detektor, před kterým je předřazena dírková clona sloužící jako filtr aberačních módů.



Obrázek 18: Schéma optické sestavy pro snímání vlnoplochy pomocí modulace binární intenzity. Převzato a upraveno z [30].

Jako detektor je použita fotodióda. Jednoduché detektory, jako fotodióda, mají vyšší výkon než 2D detektory a mnohem nižší cenu. Při použití bodového detektoru je možné fokusovat světlo z celé apertury do jednoho místa a změřit množství světelné energie.

To je důležité pro snímání vlnoplochy s malou světelnou intenzitou. Kromě toho je dynamický rozsah u bodových detektorů mnohem vyšší než u plošných detektorů, což je velká výhoda pro konstrukci přístroje pro snímání vlnoplochy s velkou rychlostí a citlivostí. Bohužel bodové detektory jsou schopné získat najednou pouze jednorozměrná data, což pro konvenční snímání vlnoplochy nestačí, proto je nutné vyvinout algoritmy pro rekonstrukci vlnoplochy z naměřených dat.

Feiling Wang našel druh binárního aberačního modu, který koresponduje s MOW funkcemi. Na základě tohoto zjištění navrhl techniku snímání vlnoplochy, která využívá jako detektor fotodiodu. Jeho princip je filtrace a detekce aberačních modů. Aberační mody jsou řadou kompletních a ortogonálních binárních (MOW) funkcí.

Je však potřeba si uvědomit, že modulační frekvence DMD čipu, je obvykle cca sto tisíc hertzů. Počet modů použitých pro rekonstrukci určuje přesnost snímání vlnoplochy. Čím více je použito Walshových funkcí tím přesnější je snímání vlnoplochy.

Matematický model snímání vlnoplochy je vytvořen pomocí binární modulace intenzity a filtrace binární aberace. Abychom omezili počet potřebných MOW funkcí na co nejmenší, vytvoříme sadu masek tím, že využijeme lineární transformaci mezi různými aberačními mody.

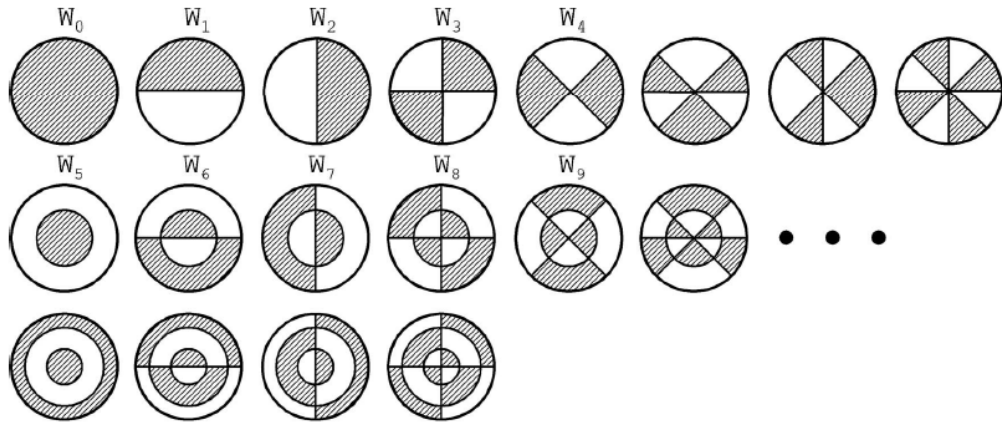
Tato metoda tedy umožňuje rychlé snímání vlnoplochy za pomoci DMD čipu, který moduluje distribuci intenzity světla a bodového detektoru, který měří série intenzit světla, která závisí na daném koeficientu binárního aberačního modu. Tato technika detekuje energii fokusovaného světla na bodový detektor, který je schopen dosáhnout vysokého poměru signál-šum. Ideální využití této techniky může být například v astronomii, pro měření rychle se měnící vlnoplochy, nebo pro měření za snížených světelných podmínek. Kromě toho může být také potenciálním technickým řešením v některých oblastech, ve kterých by měla být omezena nebo snížena světelná energie, jako je měření oční aberace.

Walshovy masky

Tento princip (technika) snímání vlnoplochy využívá řadu binárních ortogonálních funkcí, které mají kruhovou aperturu. Tyto funkce mají pouze dvě hodnoty -1 a 1, které vyplňují segmenty v kruhové apertuře. Segmenty jsou vytvořeny rozdělením kruhové apertury pomocí úhlu azimutu σ a poloměru ρ . Rozdělení a přiřazení hodnot podél azimutálního směru se řídí původním Walshovým uspořádáním. Poloměry pro určení segmentů jsou pro pohodlí pozdějšího použití rozděleny tak, aby byl každý kroužek tvořen dvěma sousedními dělicími poloměry a a b tvořící stejnou hodnotu v následujícím integrálu.

$$\iint_{a \leq \rho < b} e^{-\frac{\rho^2}{\sigma^2}} p \, d\rho \, d\theta, \quad (10)$$

kde σ je konstanta. Hodnoty v jednotlivých částech funkcí v radiálním směru jsou potom přiřazeny podle Walshovy posloupnosti. Obrázek 19 znázorňuje skupinu funkcí nízkého řádu vytvořených tímto způsobem.



Obrázek 19: Walshovy funkce pro polární souřadnicový systém. Tyto funkce mají pouze dvě hodnoty, 1 a -1. Stínovaným oblastem je přiřazena hodnota 1; bílým oblastem je přiřazena hodnota -1. Převzato a upraveno z [31].

Symbol W_l je použit k označení těchto Walshových MOW (z anglického mode-field-fitted Walsh) funkcí v daném módu. Protože MOW funkce mohou být vytvořeny z dvou-rozměrných Walshových funkcí pomocí lineární transformace, zachovávají si některé z užitečných vlastností Walshových funkcí: vytvářejí ortogonální kompletní řadu v kruhovém otvoru. Díky speciální metodě radiálního dělení lze ortogonalitu funkcí MOW vyjádřit jako

$$\iint_A e^{-\frac{\rho^2}{\sigma^2}} W_l(\rho, \theta) W_{l'}(\rho, \theta) d\rho d\theta = C \delta_{l,l'}, \quad (11)$$

kde C je konstanta určená σ . Integrál se provádí přes kruhový otvor.

Stejně jako Walshovy funkce mohou být funkce MOW seskupeny do podskupin, které lze pohodlně použít k rozšíření dalších funkcí až do určitého prostorového rozlišení. Při použití Walshovy konvence mohou být tyto podmnožiny označeny jejich pořadovými čísly, která jsou podobná prostorovým frekvencím nebo prostorovým rozlišením. Například W_0 až W_3 tvoří podmnožinu pořadového čísla 4. Všech osm funkcí v první řadě na obrázku 18 tvoří větší podmnožinu s vyšším pořadovým číslem 8. Tyto podmnožiny funkcí MOW jsou matematické skupiny. Vlastnost funkcí MOW, která se ukáže jako velmi užitečná, je, že součin libovolných dvou funkcí MOW je funkcí MOW s pořadovým číslem nepřesahujícím vyšší z obou původních pořadových čísel. Jinými slovy, pokud zvolíme podmnožinu řady MOW, která bude reprezentovat vlnoplochu pro určitý problém, je produktem všech dvou funkcí MOW v podmnožině pouze MOW funkce v rámci podmnožiny [31].

2.3.3 Matematický popis principu metody snímání vlnoplochy pomocí DMD čipu

Vzorec binární intenzity

Původní metoda využívala k modulaci SLM [31], které pomocí binárních masek upravovalo fázi vlny. Aby bylo možné použít DMD je nutno masky převést na amplitudové a upravit původní fázově založený výpočet na amplitudový [30]. Ve srovnání s fázovou modulací je intenzitní modulace druh nepřímé metody ovlivňující fázové rozložení dopadajícího světla. Nalezení vhodných vzorců pro modulaci intenzity je velmi důležité. Vzorce, které pro rekonstrukci vlnoplochy potřebujeme, by měly mít spojení mezi amplitudou a fází. Kromě toho by měly být odvozeny z aberačních modů, v našem případě z MOW funkcí. Použijeme sérii vzorců pro modulaci binární intenzity

$$T_k = \frac{1 + W_k}{2}, \quad (12)$$

kde W_k je k -tá MOW funkce a T_k je odpovídající hodnota modulace binární intenzity. Jak je znázorněno na obrázku 20, vzorce pro modulaci intenzity mají dvě hodnoty 1 a 0, které odpovídají pixelům, které odrážejí (zapnuté) světlo a které ho neodrážejí (vypnuté). Tyto funkce jsou generovány pomocí DMD čipu.

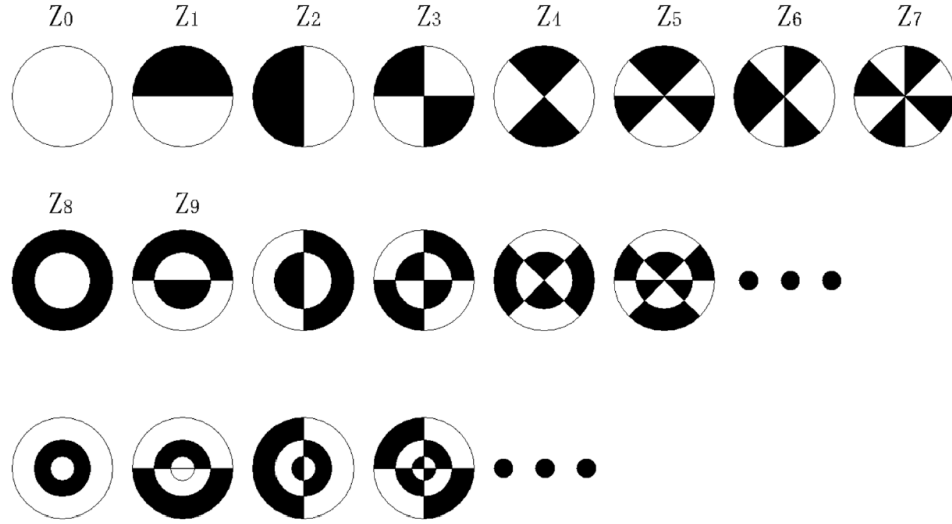
Princip snímání vlnoplochy

Uspořádání optické sestavy pro snímání vlnoplochy pomocí DMD čipu je znázorněno na obrázku 18. Jak již bylo zmíněno DMD čip je složen z velkého počtu mikrozrcátek, které fungují jako optický přepínač. Počítač ovládá DMD čip tak, aby moduloval intenzitu dopadajícího světla s různými vzory binární intenzity. Poté čočka zaostří modulované světlo do filtru binárních aberačních režimů (dírková clona). Následně detektor, v našem případě fotodiody, detekuje intenzitu světla po binární aberační filtraci a posílá naměřena data postupně do počítače. Počítač zpracovává data a vypočítává koeficienty funkce MOW.

Jak je diskutováno v [32], Fourierova difrakční teorie ukazuje, že signál měřený fotodiody je dán

$$I = D_0 \left| \int \int_A E(x, y) dx dy \right|^2, \quad (13)$$

kde $E(x, y)$ je dopadající světelné pole a D_0 je úměrná energie dopadajícího světla. Integrovaná doména A je clona senzoru. Podle výše uvedeného integrálu by mělo být rozdělení dvou sousedních poloměrů a a b ve funkcích MOW upraveno podle následujícího integrálu, aby se dírková clona stala filtrem s funkcí MOW.



Obrázek 20: Modulace binární intenzity. Tmavým částem je přiřazena 0 (neodrážejí světlo) a světlým místům je přiřazena 1 (odrážejí světlo). Převzato z [30].

$$\iint_{a < \rho < b} \rho \, d\rho \, d\Theta, \quad (14)$$

kde každá dvojice poloměru vytváří stejnou hodnotu. Dírková clona je schopna podporovat nejmenší pořadí MOW funkcí a může pracovat jako filtr v režimu binární aberace. Následující text vysvětluje matematický postup snímání vlnoplochy. Dopadající vlnoplocha φ může být popsána sumou $N + 1$ MOW funkcí:

$$\begin{aligned} E(x, y) &= E_0 \exp(i\varphi) = E_0 \exp\left(j \sum_{l=0}^N a_l W_l\right) \\ &= E_0 \cdot \prod_{l=0}^N [\cos(a_l W_l) + j \sin(a_l W_l)] \\ &= E_0 \cdot \sum_{l=0}^N B_l(a_1, a_2, a_3, \dots, a_N) W_l, \end{aligned} \quad (15)$$

kde E_0 reprezentuje amplitudu dopadajícího světla. a_l je koeficient l -té MOW funkce (a_0 je bezvýznamné) a B_l představuje koeficient polynomu W_l . Poté lze binární modulaci intenzity charakterizovat jako

$$\begin{aligned} T_k \cdot E(x, y) &= E_0 \frac{1 + W_k}{2} \sum_{l=0}^N B_l(a_1, a_2, a_3, \dots, a_N) W_l \\ &= \frac{E_0}{2} \left[\sum_{l=0}^N B_l(a_1, a_2, a_3, \dots, a_N) W_l + W_k \sum_{l=0}^N B_l(a_1, a_2, a_3, \dots, a_N) W_l \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

Index k může být libovolné celé číslo od 0 do N , což ukazuje aktuální vzorec modulace intenzity. Za zaostřovací čočkou dírková clona filtruje binární aberační mody modulaného světla a propouští pouze základní mody. Takže všechny části v rovnici 16 budou zanedbány, s výjimkou části, která obsahuje W_0 . Proto může být intenzita světla, kterou fotodioda zaznamená, zapsána jako

$$I_k = D \cdot \frac{E_0^2}{4} |B_0(a_1, a_2, a_3, \dots, a_N) + B_k(a_1, a_2, a_3, \dots, a_N)|, \quad (17)$$

kde D je konstanta úměrnosti. Modulací intenzity světla se všemi N vzory od T_0 do T_N , získáme sérii intenzit a poté vytvoříme následující sadu rovnic:

$$\begin{aligned} I_0 &= D \cdot \frac{E_0^2}{4} |B_0(a_1, a_2, a_3, \dots, a_N) + B_0(a_1, a_2, a_3, \dots, a_N)| \\ I_1 &= D \cdot \frac{E_0^2}{4} |B_0(a_1, a_2, a_3, \dots, a_N) + B_1(a_1, a_2, a_3, \dots, a_N)| \\ I_2 &= D \cdot \frac{E_0^2}{4} |B_0(a_1, a_2, a_3, \dots, a_N) + B_2(a_1, a_2, a_3, \dots, a_N)| \\ &\vdots \\ I_N &= D \cdot \frac{E_0^2}{4} |B_0(a_1, a_2, a_3, \dots, a_N) + B_N(a_1, a_2, a_3, \dots, a_N)|. \end{aligned} \quad (18)$$

Rovnice 17 je typická nelineární rovnice o N neznámých, kde k je konstanta, která zohledňuje intenzitu záření i její normování vůči maximální dopadající intenzitě při měření, kterou lze vyřešit mnoha metodami, jako je genetický algoritmus, iterační metoda, neuronové sítě nebo stoupání do kopce. Když budou všechny koeficienty binárních aberačních módů získány pomocí vyřešení rovnice 18, dopadající vlnoplocha ϕ může být rekonstruována pomocí vzorce [30]

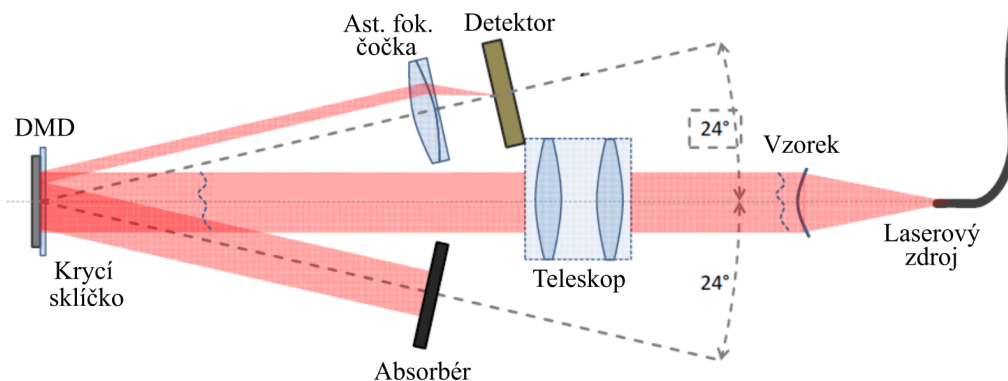
$$\phi = \sum_{l=0}^N a_l W_l. \quad (19)$$

2.3.4 Snímání vlnoplochy po průchodu vlnou optikou za pomoci DMD čipu

Testování optických prvků asférického tvaru, nebo optických elementů vyrobených za pomoci freeform technologie bylo vždy komplikované. V roce 2013 byl vydán článek napsaný S. Stuerwaldem a R. Schmittem [33], který popisuje metodu snímání vlnoplochy těchto problematických tvarů optických elementů pomocí DMD čipu. V článku je popsáno, že pro využití DMD čipu se rozhodli právě pro jeho skvělé vlastnosti jako je vysoké laterální rozlišení a velmi rychlé skenování.

Základní myšlenkou této metody je vybírat jednotlivé dílčí části testované vlnoplochy pomocí DMD čipu a následně měřit jejich směr šíření. Tedy jde o skenovací metodu vlnoplochy. Určitou možnou překážkou pro takové měření může být vliv difrakce, která vzniká díky malým rozměrům mikrozrcátek v DMD čipu.

Experimentální sestava přístroje pro tento typ snímání vlnoplochy je znázorněna na obrázku 21. Jako zdroj vlnoplochy je použit bodový zdroj světla. V tomto případě je to laserová dioda vázaná do vlákna. Vlnoplocha vycházející ze zdroje je kolimována testovaným optickým prvkem či jejich soustavou. Po průchodu testovací optikou je vlnoplocha fokusována fokusační čočkou na DMD čip. Pomocí zrcátek DMD čipu je vybrána oblast, která má být snímána pomocí plošného detektoru, CCD či CMOS kamery. Zbylá část je odražena směrem k absorbéru. Analýza se provádí na stejném principu jako u Shack-Hartmannovy metody s tím rozdílem, že není potřeba pole mikročoček, ale stačí jediná fokusační asférická čočka pro zaostření svazku na detektor. S výhodou může být využita vysokorychlostní kamera [33].



Obrázek 21: Schématický nákres experimentálního uspořádání pro laterální skenovací systém vlnoplochy. Sférická vlnoplocha je po průchodu testovaným optickým elementem deformovaná. Následně je pomocí dalekohledu fokusována na aktivní plochu DMD čipu. Vybraná část je od DMD čipu odražena a následně analyzována. Zbytek vlnoplochy je pohlcen absorbérem. Převzato a upraveno z [33].

2.4 Shrnutí metod a dostupné komerční výrobky

Jak již bylo řečeno výše, nejpoužívanější metodou pro měření vlnoplochy je Shack-Hartmannova metoda. V dnešní době můžeme najít hned několik firem, které nabízí hotové komplety využívající tuto metodu. Mezi nejvýznamnější prodejce patří například firma Thorlabs [34], Imagine Optic [35] nebo holandský výrobce Flexible Optical. Každá z těchto firem nabízí hned několik možností výběru. Jednotlivé přístroje pro měření vlnoplochy se liší svými vlastnostmi a parametry.

Firma Thorlabs rozděluje senzory vlnoplochy do 3 hlavních kategorií:

- General Purpose
- Large Aperture
- High Speed

Každá z těchto kategorií má pak na výběr ve svém portfoliu 3 produkty, které se navzájem liší především existencí antireflexní vrstvy a rozmezím vlnového spektra, pro které je senzor určen. Hlavní rozdíl mezi vlastnostmi General Purpose, Large Aperture a High Speed senzory jsou vypsány v tabulce 1.

Tabulka 1: Tabulka vlastností a specifik hlavních typů senzorů vlnoplochy od firmy Thorlabs.

Typ	Maximální velikost senzoru (Rozlišení kamery)	Maximální rychlost	Přesnost vlnoplochy	Citlivost vlnoplochy
General Purpose	11.34 mm x 7.13 mm (1936 x 1216 pixels)	až do 64 fps	až do $\lambda/60$	až do $\lambda/200$
Large Aperture	11.26 mm x 11.26 mm (2048 x 2048 Pixels)	až do 289 fps	až do $\lambda/40$	až do $\lambda/120$
High Speed	7.20 mm x 5.40 mm (1440 x 1080 pixels)	až do 1120 fps	až do $\lambda/60$	až do $\lambda/200$

U každého typu je možnost vybrat si ze 3 modelů. První je určen pro vlnovou délku 300-1100 nm s velikostí pixelu 150 μm . Další dva modely jsou určeny pro vlnovou délku 400-900 nm, mají navíc antireflexní úpravu a je na výběr velikost pixelu 150 μm nebo 300 μm . Cena u prvního modelu se pohybuje kolem 95 000 Kč, u typu senzoru s větší aperturou je to okolo 130 000 Kč a u vysoko rychlostního typu se cena může vyšplhat až na 150 000 Kč.

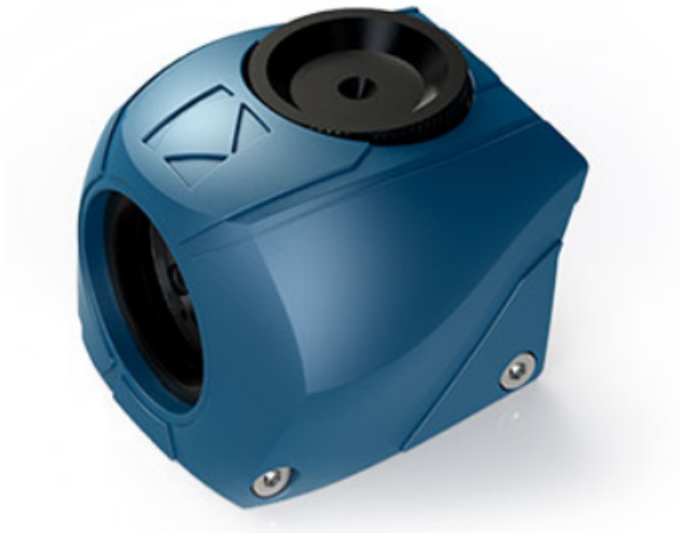


Obrázek 22: Vysokorychlostní senzor pro snímání vlnoplochy od firmy Thorlabs. Převzato z [34].

Firma Imagin Optic vyrábí hned několik moderních druhů senzorů pro snímání světelné vlnoplochy. Svoje přístroje rozděluje zejména podle druhu použití a potřebných parametrů uživatele. Výčet hlavních typů přístrojů nabízených touto firmou a jejich vlastností naleznete v tabulce 2.

Tabulka 2: Tabulka vlastností a specifik hlavních typů senzorů vlnoplochy od firmy Imagin Optic.

Typ	Hlavní výhoda	Rozsah vlnové délky	Přesnost vlnoplochy
HASO4 BroadBand	Jediný senzor vlnoplochy, který má absolutní přesnost $\lambda/100$ rms, velkou dynamiku a linearitu.	400nm - 1100 nm	$\lambda/100$
HASO4 First	Dodávaný s WaveView softwarem, který má až 150 funkcí. Optimalizace pro vaši vlnovou délku.	400 - 1000 nm	$\lambda/100$
HASO4 VIS	Určen speciálně pro aplikace ve viditelném spektru vlnových délek.	400 - 700 nm	$\lambda/100$
HASO4 NIR	Určen pro telekomunikaci a oblast infračerveného záření.	1500 - 1600 nm	$\lambda/35$
HASO4 Fast	Pro rychlé snímání vlnoplochy. S frekvencí snímání až 1 kHz.	400nm - 900 nm	$\lambda/100$



Obrázek 23: Senzor vlnoplochy HASO4 BroadBand od firmy Imagine Optic. Převzato z [35].

Na trhu je velký výběr různých typů přístrojů pro snímání vlnoplochy s různými parametry od různých výrobců. Jedno mají však společné a to princip, kterým vlnoplochu snímají. Shack-Hartmannův princip má však několik nedostatků jako například omezení velikosti měřené vlnoplochy rozměry čipu. Jak si můžete všimnout v tabulce 1 maximální rozměr senzoru od firmy Thorlabs je 11,34 mm x 7,13 mm. DMD čip využitý v mém experimentu má rozměr 19,35 mm x 12,1 mm. DMD čipy je možné pořídit i ve větších velikostech, aniž by se výrazně změnila pořizovací cena na rozdíl od ceny CCD čipu, kde cena s velikostí čipu výrazně roste. Čímž narážíme na další nevýhodu, kterou je pořizovací cena těchto přístrojů. Také je pro korektní měření zapotřebí dostatečná a nemalá velikost intenzity světla.

3 Motivace a cíle práce

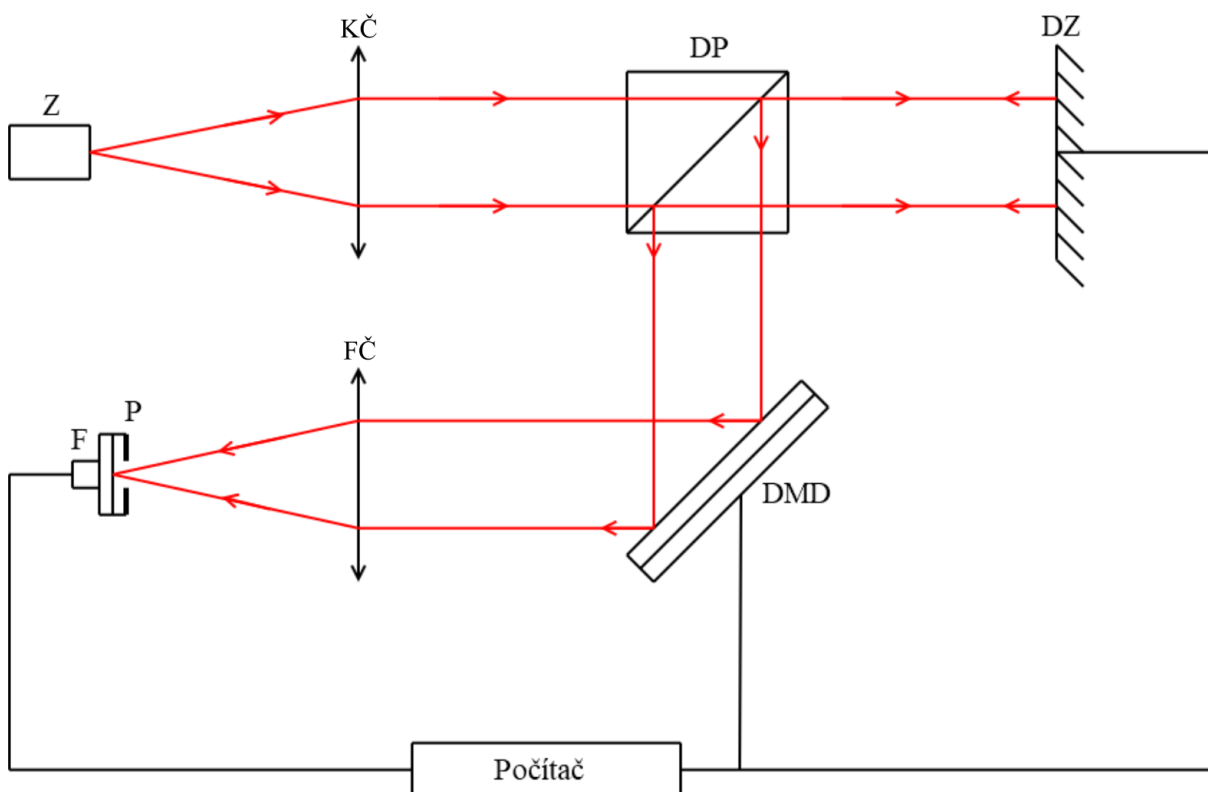
Pro konstrukci a nastavení mikroskopů je velmi důležitá kontrola kvality zobrazovacích vlastností optických prvků z nichž je mikroskop sestaven. Tato kontrola se provádí pomocí snímání vlnoplochy po průchodu optickým prvkem. Se zvyšujícím se zájmem využívání digitálního zařízení a výpočetní techniky je možné využít digitální techniky pro analýzu vlnoplochy. Jako digitální prvek bude použit DMD čip, díky kterému je možné odstranit, nebo minimalizovat nevýhody běžně využívaných technik a také snížit pořizovací náklady těchto systémů.

1. Navrhnout optickou soustavu senzoru
2. Vybrat vhodné optické komponenty
3. Navrhnout systém upnutí DMD čipu
4. Vytvořit program pro generování masek
5. Senzor sestavit a otestovat

4 Návrh optické sestavy

4.1 Teoretický návrh

Před samotným návrhem sestavy bylo nutné promyslet funkčnost, použití a cíl využití mého budoucího přístroje. Jelikož celý nápad uskutečnit tento projekt vznikl při kalibraci holografického mikroskopu, budu sestavu vytvářet právě pro měření vlnoplochy, kterou ovlivňují všechny optické komponenty holografického mikroskopu.



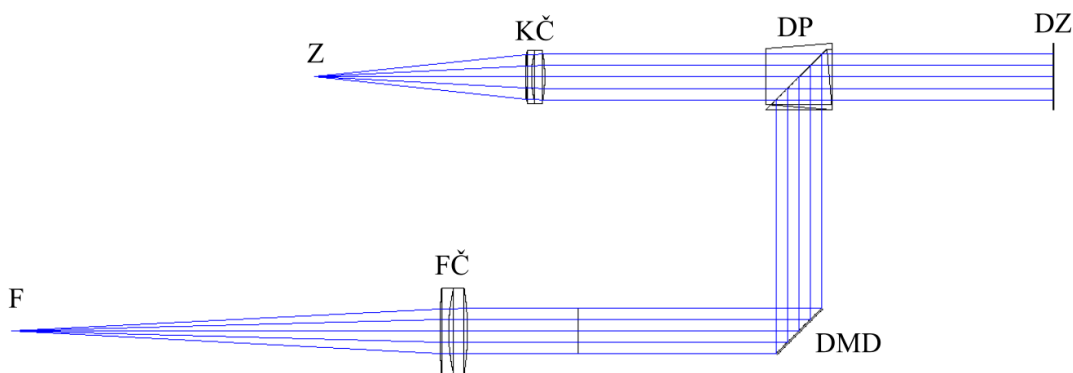
Obrázek 24: Schéma přístroje pro měření vlnoplochy za pomoci DMD čipu, kde Z - zdroj, KČ - první čočka, DP - dělič paprsků 50:50, DZ - deformovatelné zrcátko, DMD - DMD čip, FČ - druhá čočka, P - dírková clona, F - fotodioda.

Na úplném začátku mé sestavy je bodový zdroj světla Z, který bude generovat světelný svazek a tím pádem vlnoplochu pro pozdější snímání. Druhý element sestavy je kolimační čočka KČ, která má za úkol z rozbíhavého svazku světla, který vychází ze zdroje Z, vytvořit rovnoběžný svazek a zároveň simuluje měřený prvek. V budoucnu bude první čočka KČ nahrazena optickým elementem, jehož parametry bude potřeba měřit. Za čočkou se nachází dělič paprsků DP v poměru 50:50. Díky děliči DP paprsek nejdříve projde na deformovatelné zrcátko DZ, jehož nastavením simulují požadovaný tvar vlnoplochy či vnesu druh aberace, kterou má senzor změřit. Vytvořená vlnoplocha dále pokračuje zpět k děliči DP, kde se odráží směrem k DMD čipu. Na DMD čipu jsou promítány Walshovy masky, tím pádem je vždy 50% mikrozrcátek v pozici zapnuto (odrážejí světlo) a zbylá polovina je v režimu vypnuto (neodrážejí světlo). Po odrazu od mikrozrcátek

je svazek fokusován pomocí fokusační čočky FČ na fotodiodu. Nežli však fokusovaný paprsek dopadne na fotodiodu F, je nejprve filtrován pomocí dírkové clony P, která leží těsně před detektorem. Naměřený signál je poté posílán do počítače, který zároveň ovládá DMD čip a deformovatelné zrcátko DZ. Hodnoty naměřeného signálu a hodnoty MOW funkcí z DMD čipu jsou analyzovány a pomocí matematického algoritmu je vypočítán tvar vlnoplochy. Ten je poté porovnán s tvarem vlnoplochy, který se generuje pomocí deformovatelného zrcátka DZ, čímž je zjištěna přesnost snímání mé sestavy a správnost techniky.

4.2 Optická simulace a výběr komponentů

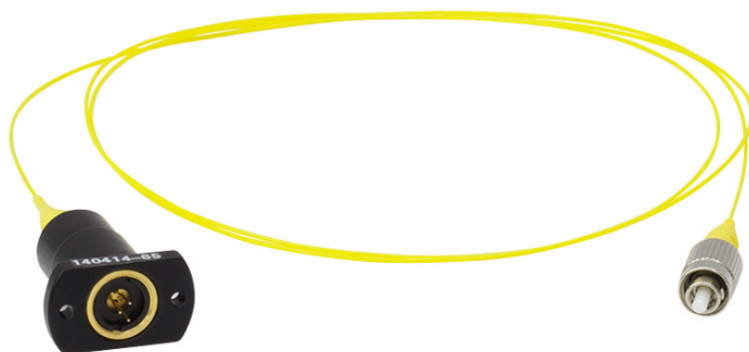
Před samotným uskutečněním experimentu podle teoretické části je důležité provést simulaci celé sestavy v programu Zemax a zjistit specifické požadavky jako například ohniskové vzdálenosti čoček, nebo velikost dírkové clony.



Obrázek 25: Schéma simulace trasování sestavou přístroje pro měření vlnoplochy za pomoci DMD čipu v programu Zemax, kde Z-zdroj, KČ-první čočka, DP-dělič paprsků 50:50, DZ-deformovatelné zrcátko, DMD-DMD čip, FČ-druhá čočka, F-fotodioda.

Při výběru komponentů je dobré začít od začátku sestavy, proto jsem začal zdrojem záření Z. Jako zdroj záření Z jsem vybral diodu navázanou do optického vlákna od firmy Thorlabs, s označením LP660-SF20, která generuje světlo o vlnové délce 658 nm. Typický výkon této diody je 20 mW a může dosáhnout maxima až 25 mW. Délka optického vlákna je 1 m, což je vyhovující vzhledem k tomu, že celá sestava bude kompletována na optické pracovní desce.

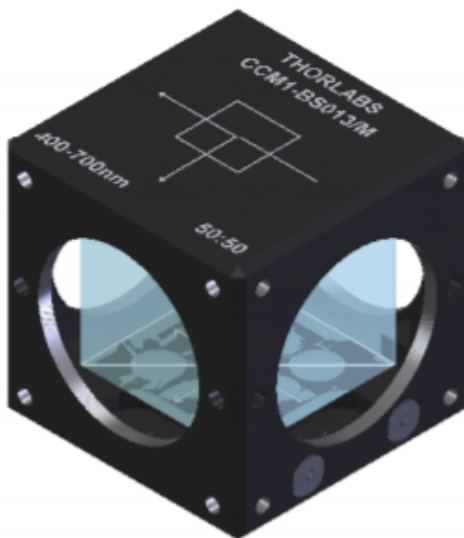
Nyní je potřeba vybrat vhodné čočky FČ a KČ. Jako první čočku s označením KČ, která je určena pro transformaci rozbíhavého svazku světla na rovinnou vlnu, jsem vybral u firmy Edmund Optics s katalogovým označením 32-327. Jedná se o achromatický doublet s ohniskovou vzdáleností 100 mm a průměrem 25 mm. První čočka tohoto doubletu má tvar konvexkonkávní a je z N-SF5 materiálu. Druhá bikonvexní část je z N-BK7. Rozdíl materiálů je zejména z důvodu korekce aberací, což je u našeho typu přístroje velmi důležité, aby bylo do svazku světla vneseno co nejmenší množství aberací. Na čočce je nanášena vrstva MgF_2 , která propouští světlo o vlnové délce v rozpětí 400-700 nm.



Obrázek 26: Dioda vázaná do vlákna od firmy Thorlabs s označením LP660-SF20. Převzato z [34].

Druhá čočka FČ sestavy také od firmy Edmund Optics [36] s označením 32-925 je téměř totožná s první čočkou. Liší se od první velikostí apertury, která je nyní 40 mm a ohniskovou vzdáleností, která je 200 mm.

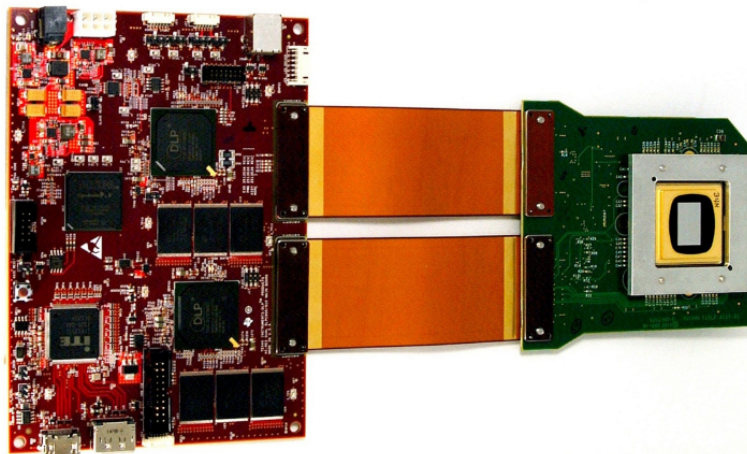
Dalším optickým elementem v sestavě je dělič svazků DP. Tato komponenta má za úkol rozdělit svazek tak, aby bylo možné před dopadem na DMD čip vlnoplochu deformovat, pomocí deformovatelného zrcátka DZ. Do naší sestavy jsem zvolil nepolarizační hranol od firmy Thorlabs [34] s označením CCM1-BS013/M, na kterém je nanášena antireflexní vrstva pro vlnovou délku v rozsahu 400-700 nm, čímž dělič DP zapadá do naší sestavy. Rozdělení paprsků po průchodu tímto hranolem je 50:50. Čistá apertura je 20,3 mm. Velkou výhodou tohoto produktu je implementace hranolu do klece, která je přizpůsobena k upnutí na optické pracovní desce pomocí závitů M4.



Obrázek 27: Dělič svazků s poměrem 50:50 od firmy Thorlabs s označením CCM1-BS013/M. Převzato z [34].

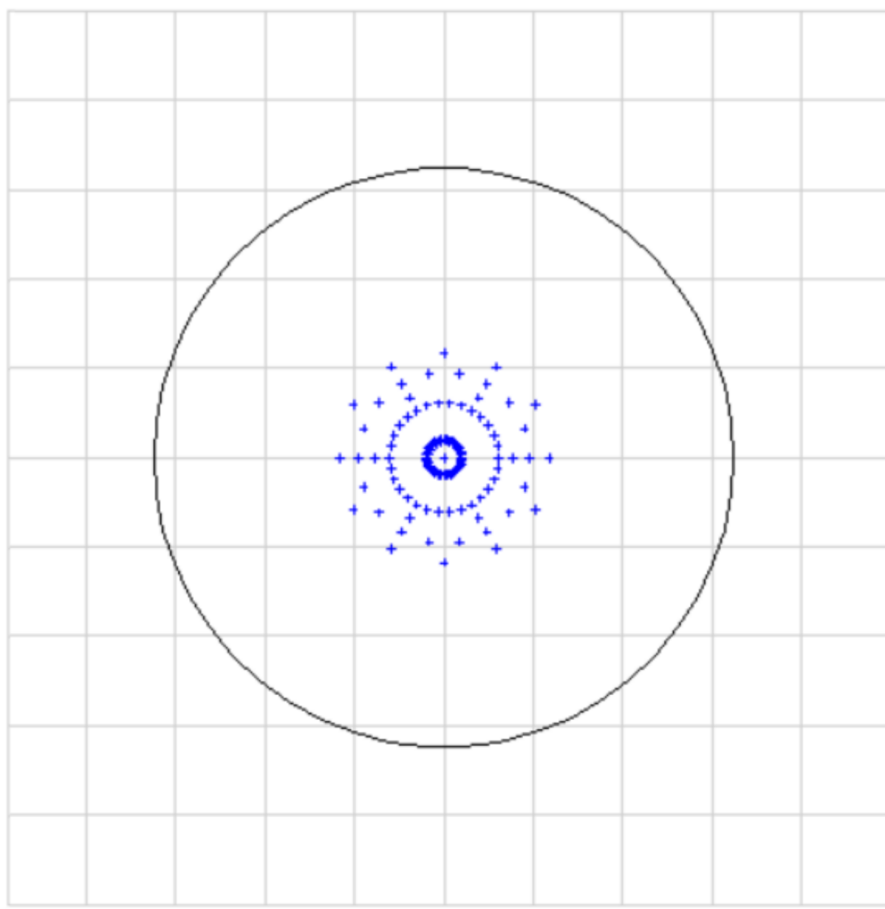
Deformovatelné zrcátko DZ v mé sestavě, jehož výrobcem je také společnost Thorlabs [34], má katalogové označení DMP40/M-F01. Firma Thorlabs k tomuto zařízení poskytuje software, ve kterém je možné nastavit typ požadované aberace a také její míru velikosti v rozmezí -1 až 1. Velkou výhodou je možnost propojení deformovatelného zrcátka DZ se snímačem vlnoplochy, který využívá metodu Shack-Hartmann. Při propojení těchto dvou přístrojů je možné přesně nastavit zrcátko DZ do takové polohy, aby svazek světla měl dokonale korigovanou vlnoplochu. Další výhodou této kompatibility je možnost přesně definovat simulovanou aberaci. Těchto výhod bohužel nebylo možné využít, z důvodů vysokých pořizovacích nákladů tohoto senzoru vlnoplochy.

Jako zástupce DMD čipu jsem vybral zařízení od firmy Texas Instrumental s označením DLP9000 Family of 0.9 WQXGA Type A. Rozlišení tohoto čipu je 2560x1600, což je plocha s více jak 4 miliony mikrozrcátek. Šířka aktivní plochy mikrozrcátek je 19,35 mm, výška 12,09 mm a náklon 12°. Design je přizpůsoben pro vlnovou délku 400-700 nm a reflexe zrcátek je 84%. Tento DMD čip má 2 možnosti vysokorychlostního nastavení. Bude tedy použit DLP9000X With a Single DLPC910 Digital Controller, jehož rychlost pro 1-Bit Binary Patterns je až 14989 Hz a pro 8-bitový obraz se stupni šedi je rychlost až 1873 Hz.



Obrázek 28: DMD čip s označením DLP9000 Family of 0.9 WQXGA Type A od firmy Texas instrumental. Převzato z [37].

V programu Zemax jsem nechal v rovině fotodiody F zobrazit Spot diagram, kde bylo zjištěno, že hodnota RMS radiusu, který určuje teoretickou velikost stopy je 1,3 μm . Průměru Airyho disku je 6,5 μm . Airyho disk představuje difrakční limit sestavy, tedy nejmenší plošku do které jde na základě optických principů světlo nafokusovat. Pomocí této hodnoty jsem zvolil velikost dírkové clony, která má 10 μm . Objednána byla od firmy Thorlabs a její katalogové označení je P10D. Spot diagram je znázorněn na obrázku 29 a vybraná dírková clona je na obrázku 30.



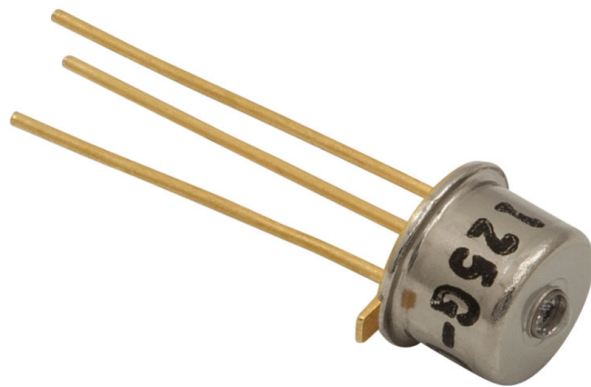
RMS radius = 1,3 μm
Airy radius = 6,5 μm

Obrázek 29: Spot diagram generovaný programem Zemax.



Obrázek 30: Dírková clona od firmy Thorlabs s označením P10D. Převzato z [34].

Pro detekci světla byla vybrána fotodioda od firmy Thorlabs [34] s označením FDS025, která může snímat světlo o vlnové délce v rozmezí 400-1100 nm, přičemž maximální citlivost detekce je na vlnové délce 750 nm. Průměr aktivní plochy snímače je 0,25 mm. Doba odezvy tohoto detektoru je 47 ps. Před tímto detektorem je umístěna dírková clona, která má průměr dírky $10 \pm 1 \mu\text{m}$.

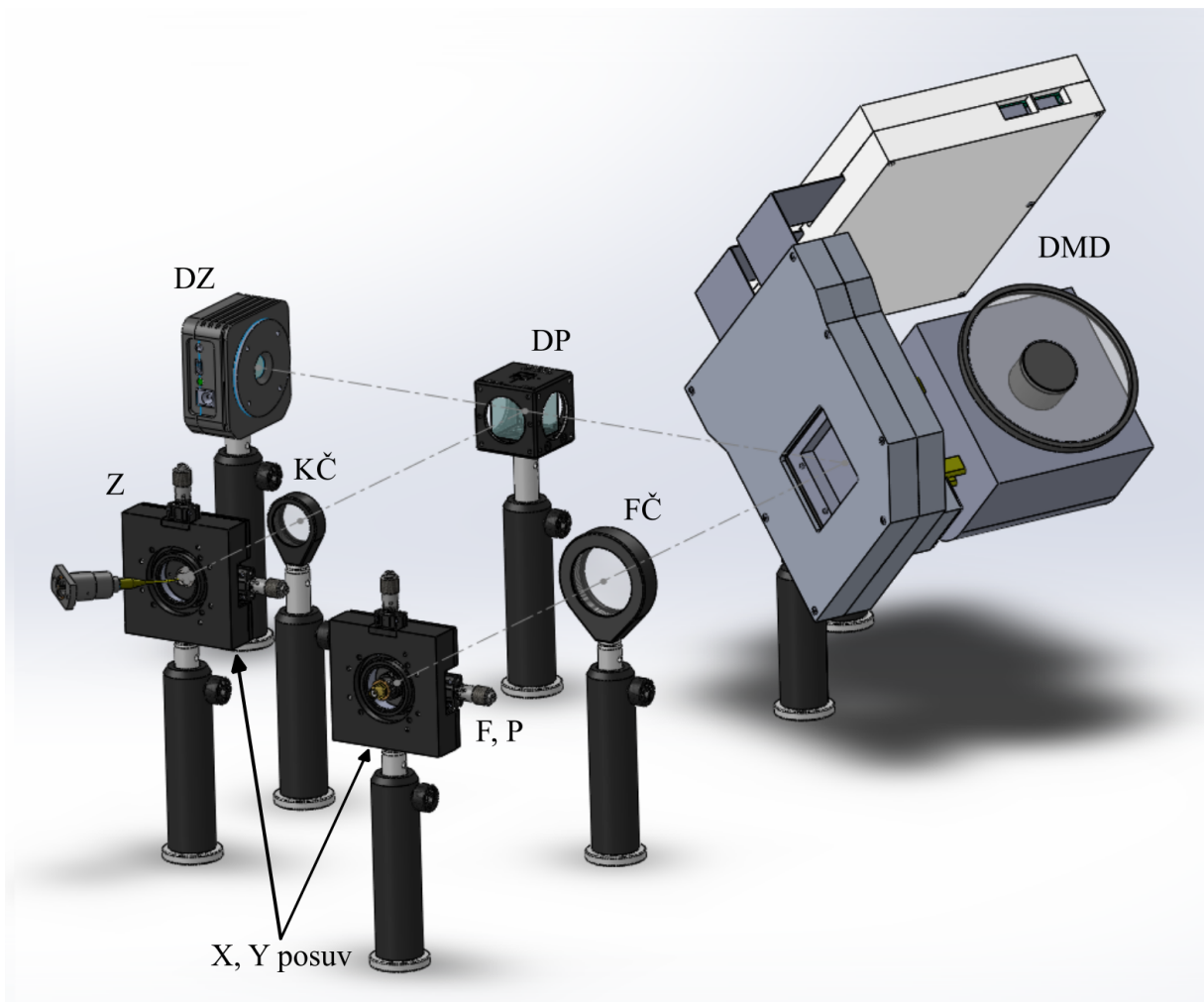


Obrázek 31: Fotodioda od firmy Thorlabs s označením FDS025. Převzato z [34].

4.3 Konstrukce senzoru

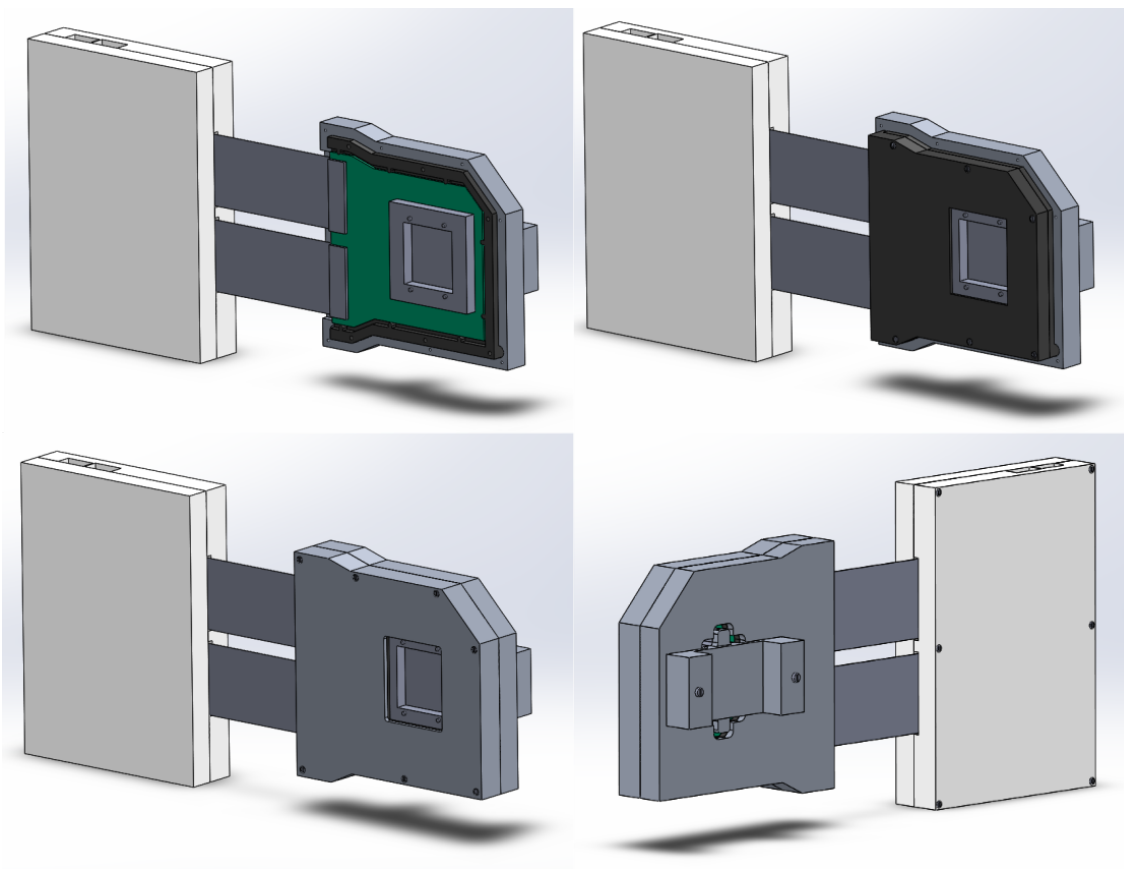
Jak již bylo zmíněno výše, celá sestava je umístěna na optické pracovní desce, tudíž je nutné všechny komponenty upnout k této desce a zajistit jejich správné pozice. Toho jsem docílil pomocí magnetických držáků od firmy Thorlabs, jak můžete vidět na obrázku 32. Spodní magnetická část zajišťuje pohodlnou manipulaci optických komponentů po pracovní desce. Díky tomuto systému jsem byl schopen nastavit správnou vzdálenost kolimační čočky KČ od zdroje Z, tak aby byl svazek světla za čočkou rovinného charakteru. Testování zda je svazek světla za čočkou rovinný, bylo dosaženo pomocí stínítka s ryskou. Stínítka bylo umísťováno do různých vzdáleností za čočkou KČ a na rysce byly odečítány hodnoty průměru stopy světelného svazku. Pokud se průměr stopy schodoval ve všech vzdálenostech, byl předpokládán rovinný charakter světelného svazku. Stejnou metodou byl ověřen charakter svazku po odrazu na deformačním zrcátku DZ.

Čočky KČ a FČ jsou upnuté v držáku od firmy Thorlabs [34] s označením LMR40/M pro čočku s průměrem 40 mm a LMR1/M pro čočku s průměrem 25 mm. Dioda navázaná do vlákna a fotodioda, tedy detektor, jsou uchyceny v křížovém stolku od stejného výrobce, jak je vidět na obrázku 32. Díky posuvu v laterálním směru zdroje Z jsem byl schopen přesně vycentrovat průchod světelného svazku optickými elementy. Křížový stolec s detektorem F a dírkovou clonou P zase sloužil k nalezení ideální polohy, při které je dosažena maximální hodnota intenzity světla dopadající na detektor F a která odpovídá středu fokusovaného svazku.



Obrázek 32: Kompletní vizualizace sestavy v programu Solidworks, kde Z-zdroj, KČ-první čočka, DP-dělič paprsků 50:50, DZ-deformovatelné zrcátko, DMD-DMD čip, FČ-druhá čočka, F-fotodioda.

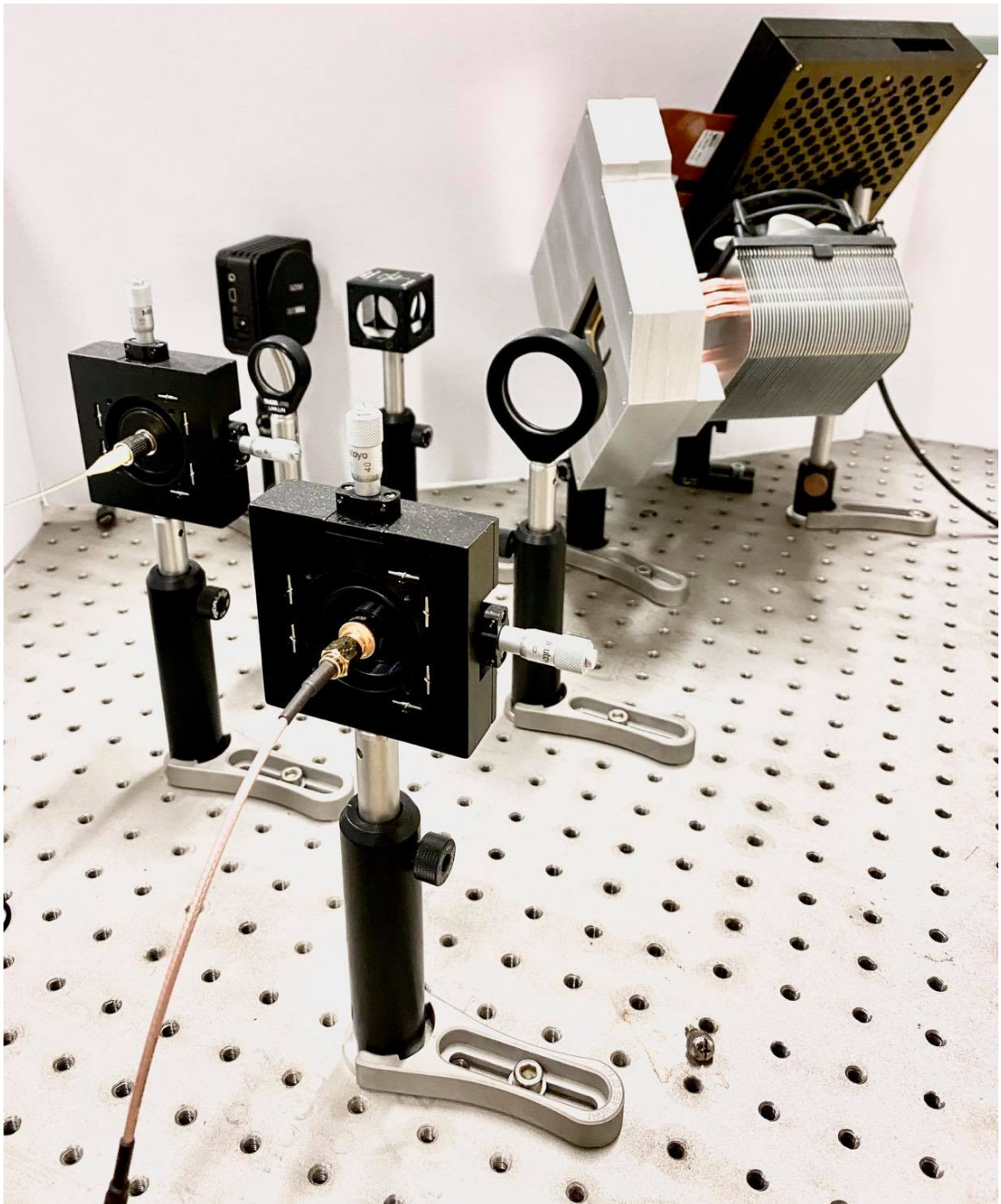
DMD čip se prodává bez možnosti zakoupení vhodného uložení a jakéhokoliv systému upnutí k pracovní desce. Proto jsem pro uložení DMD čipu navrhl kryt s možností upnutí pomocí závitů k výše zmíněným držákům. Ochranný obal se skládá z několika částí, které můžete vidět na obrázku 33.



Obrázek 33: Jednotlivé části ochranného obalu pro DMD čip.

Zadní část, která ukrývá elektroniku DMD čipu, je chráněna plastovou krabičkou, kterou jsem navrhl v Solidworks a následně nechal vytisknout na 3D tiskárně. Samotný kryt DMD čipu je složen ze 2 vrstev. První je stejně jako u části s elektronikou vytisknuta na 3D tiskárně z plastu. Druhá vrstva krytu je z hliníku, což DMD čipu dodává dostatečnou ochranu a možnost stabilního upnutí k optické pracovní desce. Na posledním ze 4 obrázků je možné si všimnout držáku chlazení, který je pomocí teplovodné pasty uchycen na chladič komponent DMD čipu a pro robustnost přišroubován k hliníkovému obalu. Jako chladič byl vybrán chladič na procesory od firmy ARCTIC s označením Freezer 7 Pro Rev.2. Tato kompletní sestava ochranných obalů, chlazení a celkový reálný vzhled sestavy je znázorněna na obrázku 34 ¹.

¹Veškeré výkresy těchto dílů jsou přílohou diplomové práce.



Obrázek 34: Reálná situace upnutí DMD čipu a chlazení na pracovní desku v laboratoři.

5 Experiment

Po úspěšném upnutí všech komponentů na pracovní desku, následovném vycentrování a zaostření všech optických elementů bylo možné začít se samotným otestováním funkčnosti mého senzoru vlnoplochy.

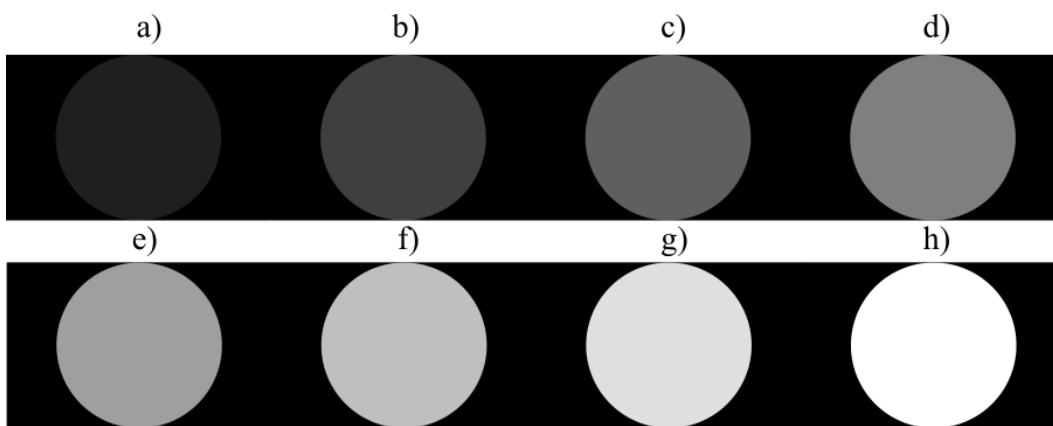
Pro nahrávání MOW funkcí, nastavování časového intervalu binárních masek na DMD čipu a pro celkové řízení tohoto zařízení bylo využito knihovny Pycrafter 6500 v programu Python [38].

5.1 Kalibrace

Prvním krokem pro nastavení mého senzoru bylo ověřit, která stopa generovaná DMD čipem patří odrazu světla odpovídající on-state a off-state poloze mikrozrcátek. Tedy která stopa odpovídá odrazu od zrcátek v poloze $+12^\circ$ a která odpovídá mikrozrcátkům v poloze -12° . Toho jsem dosáhl pomocí promítnutí čistě bílé, černé a proužkované masky na DMD čip a pozoroval jsem jaké stopy odpovídají těmto maskám. Odraz dopadajícího světla od bílé masky reprezentuje odraz od mikrozrcátek v poloze $+12^\circ$ a právě tento odraz bude pomocí čočky FČ fokusován na fotodiodu F.

Jelikož je zapotřebí změřit intenzitu dopadajícího světla pomocí fotodiody F generující napětí, které odpovídá intenzitě dopadajícího záření. Je tedy důležité zjistit vztah mezi hodnotami těchto dvou veličin. DMD čip pracuje ve video módu s 8-bitovou reprezentací obrazu, je tedy nutné všechny binární masky, které budou následně použity převést do 8-bitů. Kalibrace bylo dosaženo vygenerováním MOW binární funkce s označením Z0 a jejím následným vynásobením 8 konstantami, které zajistily 8 různých hodnot šedi v rámci rozsahu 8-bitového obrazu. To znamená, že bylo získáno 8 masek, které definují množství světla s rozdílnou intenzitou posílaného do on-state směru svazku. Masky byly na DMD čip nahrávány ve formátu png. Tyto masky jsou znázorněny na obrázku 35. Všechny používané masky byly generovány pomocí programu Python².

²Kód pro tento generátor je součástí přílohy této diplomové práce.



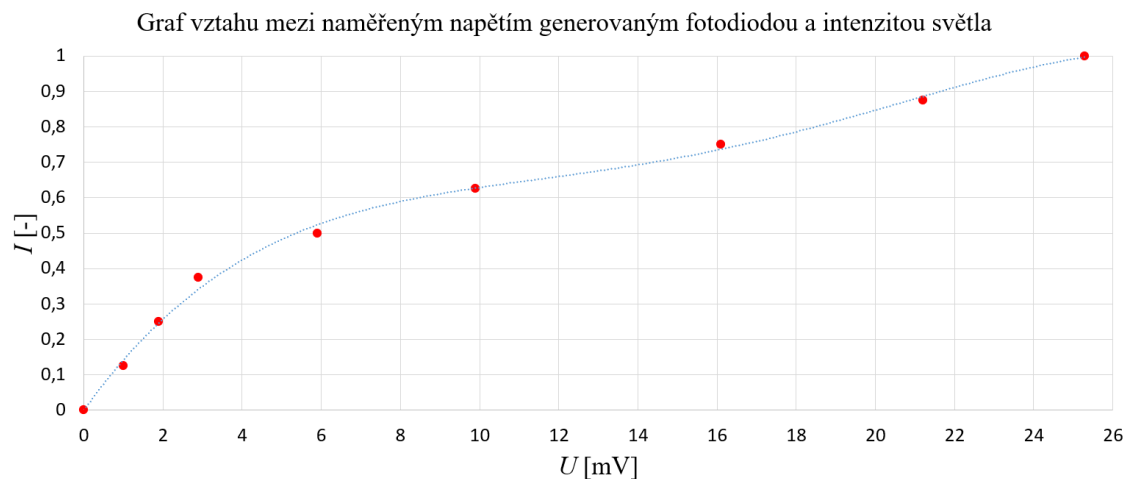
Obrázek 35: a) Binární maska vynásobená hodnotou 32, b) maska vynásobená hodnotou 64, c) maska vynásobená hodnotou 96, d) maska vynásobená hodnotou 128, e) maska vynásobená hodnotou 159, f) maska vynásobená hodnotou 191, g) maska vynásobená hodnotou 223, h) maska vynásobená hodnotou 255.

Maska s hodnotou 255 odpovídá intenzitě o hodnotě 100%, maska vynásobená hodnotou 223 odpovídá intenzitě o hodnotě 87,5%, maska vynásobená hodnotou 128 odpovídá intenzitě o hodnotě 50% a tak dále. Jak je znázorněno na obrázku 35, část masek je ve stupních šedi. DMD čip díky možnosti rychlého natáčení zrcátek mezi on-state a off-state může bezproblému generovat i výše zmíněné masky ve stupních šedi.

Naměřené hodnoty napětí pro těchto 8 masek byly následně vyneseny do grafu viz. obrázek 36. Křivka grafu byla proložena polynomem druhého stupně a následně byl vygenerován vzorec 20 pro výpočet intenzity I :

$$I = 1,04 \cdot 10^{-5} \cdot U^4 + 1,50 \cdot 10^{-2} \cdot U^2 + 1,56 \cdot 10^{-1}U + 4,53 \cdot 10^{-4}, \quad (20)$$

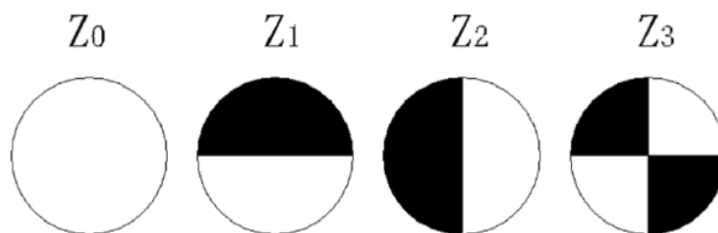
kde U je hodnota naměřeného napětí pro danou masku.



Obrázek 36: Graf vztahu mezi naměřeným napětím U generovaným fotodiodou a intenzitou světla I . Kolečka označují naměřené body.

5.2 Snímání vlnoplochy za použití 4 binárních masek

Nyní je možné přejít k samotnému snímání vlnoplochy. První měření bylo provedeno za pomoci 4 MOW funkcí a to Z_0 , Z_1 , Z_2 a Z_3 , které jsou na obrázku 37. Nejprve byly nasnímány hodnoty pro situaci, kdy deformovatelné zrcátko DZ simuluje rovinné zrcadlo, abychom věděli, jakými aberacemi je zatížený systém po justáži.



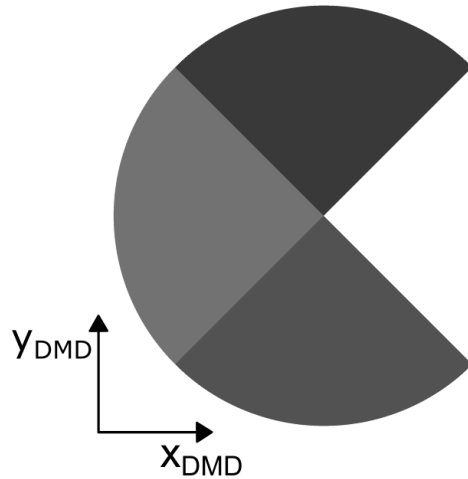
Obrázek 37: MOW funkce s označením Z_0 , Z_1 , Z_2 , Z_3 .

Hodnoty naměřeného napětí pro tyto čtyři masky bez použití deformovatelného zrcátka a vypočítané hodnoty normované intenzity světla podle vzorce 20 jsou v tabulce 3. Po získání hodnoty intenzity světla je možné vypočítat koeficienty funkce MOW pomocí matematického výpočtu, který je uvedený v části 2.3.3. Tento výpočet byl opět proveden pomocí kódu v programu Python, jež je součástí přílohy.

Tabulka 3: Naměřené hodnoty napětí a následný výpočet hodnot intenzity a koeficientů MOW funkcí pro vlnoplochu bez deformace.

Maska	Napětí [mV]	Normovaná intenzita	Koeficient MOW funkce
Z_0	25,3	1,000	$a_0=0,000$
Z_1	18,6	0,811	$a_1=78,090$
Z_2	25,3	1,000	$a_2=55,122$
Z_3	7,6	0,581	$a_3=109,378$

Pomocí využití vzorce 19 byly v programu Python vypočítány hodnoty vlnoplochy a následně pro vykreslení do obrázku 38 normovány. Tento obrázek vlnoplochy ilustruje základní vadu mého systému. Pro zjednodušení následné interpretace mého experimentu, budeme tuto vlnoplochu označovat V_1 .



Obrázek 38: Normovaný tvar vlnoplochy bez použití deformovatelného zrcátka orientovaný v souřadnicovém systému DMD čipu, tedy vlnoplocha V1.

V programu od firmy Thorlabs [34] k deformovatelnému zrcátku DZ lze nastavit hodnotu napětí od -1 do 1. Čím větší odchylka hodnoty od 0, tím větší zakřivení zrcátka a tím výraznější vada. Jelikož je tento experiment prvotní, není znám měřicí rozsah senzoru. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl vnést do systému jen malé aberace. Pro své měření jsem zvolil hodnotu 0,1, která odpovídá 10% maximální možné deformaci zrcadla DZ a hodnotu 0,05, která odpovídá 5% maximální možné deformaci zrcadla DZ.

Pro můj experiment jsem zvolil tyto aberace: astigmatismus pod 45° , který odpovídá Zernikeho polynomu číslo 4, defokus s číslem 5 a comu v ose x_{DZ} , která odpovídá Zernikeho polynomu číslo 8.

5.2.1 Měření pro deformace odpovídající 10% maximální možné deformaci zrcadla DZ

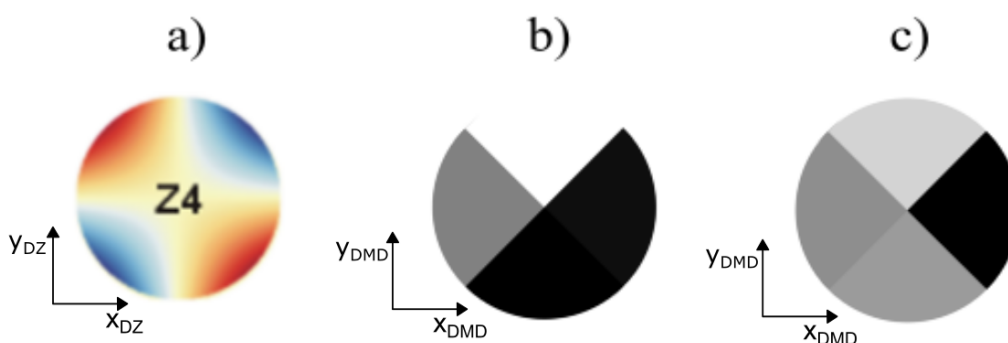
Astigmatismus ve 45°

V následující tabulce číslo 4 jsou hodnoty pro astigmatismus ve 45° .

Vypočtené koeficienty byly vloženy do vzorce 19 a program pro výpočet vygeneroval hodnoty pro tuto vlnoplochu. Následně byla odečtena od této vygenerované vlnoplochy vlnoplocha bez deformace, tedy vlnoplocha s označením V1. Tím byla odečtena aberace, která zatěžuje můj systém a byla získána vlnoplocha odpovídající simulované vlnoploše pomocí deformovatelného zrcátka viz obrázek 39 c).

Tabulka 4: Naměřené hodnoty napětí a následný výpočet hodnot intenzity a koeficientů MOW funkcí pro vlnoplochu zatíženou astigmatismem v ose 45° . Při velikosti deformace zrcadla DZ odpovídající 10%.

Maska	Napětí [mV]	Normovaná intenzita	Koeficient MOW funkce
Z0	3,6	0,397	$a_0=0,000$
Z1	1,5	0,203	$a_1=-26,372$
Z2	3,6	0,397	$a_2=9,952$
Z3	2,6	0,316	$a_3=-7,873$



Obrázek 39: Tvar vlnoplochy pro astigmatismus v ose 45° , kde a) je teoretický tvar vlnoplochy podle Zernikeho polynomu b) odpovídá naměřené vlnoploše a c) je tvar vlnoplochy po odečtení vlnoplochy V1. Obrázky b) a c) jsou normovány.

Výsledné masky jsou otočeny o 45° z důvodů natočení DMD čipu, čímž narážím na první problém této techniky. Jak lze vidět, astigmatismus v ose 45° má nejvíce zakřivené části tam, kde mnou vybrané masky mají přechod mezi segmenty. Z toho vyplývá, že je velmi důležité vybírat masky podle snímané aberace, kterou ale v přímém testování reálné optiky neznáme, nebo zvolit více masek a tím navýšit počet segmentů a přesnost snímání.

Dal by se však očekávat stejný odstín šedé ve všech 4 segmentech výsledné vlnoplochy a to z důvodu symetrického rozložení vlnoplochy vůči segmentům masek, které byly použity pro toto měření. Bohužel ani tohoto předpokladu nebylo docíleno.

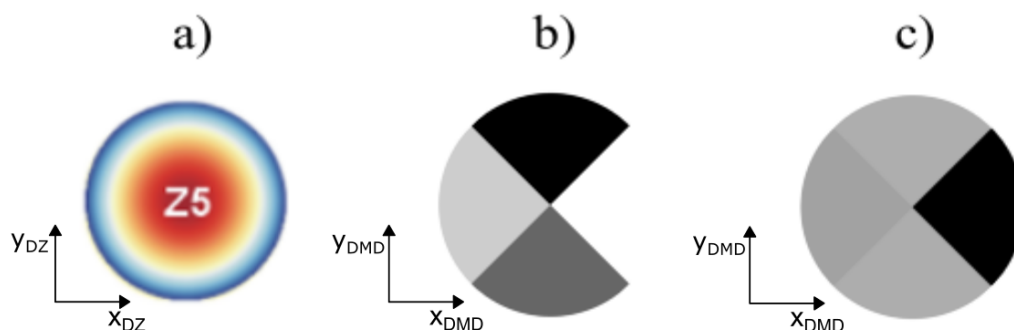
Defokusace

Jako další aberaci pro testování našeho detektoru vlnoplochy jsem zvolil defokusaci. Naměřené hodnoty pro defokusaci s hodnotou napětí přivedenou na deformovatelné zrcátko rovnou 10% maximální deformace zrcadla DZ jsou v tabulce 5.

Tabulka 5: Naměřené hodnoty napětí a následný výpočet hodnot intenzity a koeficientů MOW funkcí pro vlnoplochu zatíženou defokusací. Při velikosti deformace zrcadla DZ odpovídající 10%.

Maska	Napětí [mV]	Normovaná intenzita	Koeficient MOW funkce
Z0	1,3	0,179	$a_0=0,000$
Z1	0,8	0,116	$a_1=16,566$
Z2	1,3	0,179	$a_2=-5,765$
Z3	0,3	0,046	$a_3=39,259$

Další postup zpracování dat je stejný jako u předchozího snímání vlnoplochy. Výsledné grafické zpracování vlnoplochy zatížené defokusací jsou na obrázku 40.



Obrázek 40: Tvar vlnoplochy pro defokusaci, kde a) je teoretický tvar vlnoplochy podle Zernikeho polynomu b) odpovídá naměřené vlnoploše a c) je tvar vlnoplochy po odečtení vlnoplochy V1. Obrázky b) a c) jsou normovány.

Zde se setkávám s podobným problémem jako u astigmatismu. Jelikož je deformace vlnoplochy u defokusace závislá pouze na radiálních souřadnicích, bylo by vhodnější zvolit masky, jejichž segmenty jsou též rozděleny do segmentů ve tvaru mezikruží a tím získat větší přesnost. Avšak při použití masek s úhlovou segmentací nebyl program pro výpočet schopen konvergovat ke správnému řešení pro zadané hodnoty.

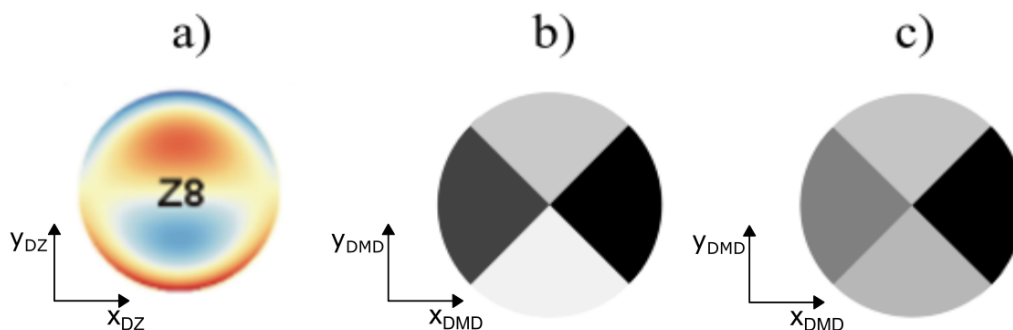
Byl očekáván stejný odstín šedé ve všech 4 segmentech výsledné vlnoplochy a to z důvodu symetrického rozložení deformace vlnoplochy. Odstín šedé ve třech částech výsledné vlnoplochy téměř odpovídá tomuto očekávání.

Koma v ose x_{DZ}

Jako poslední aberaci pro testování jsem zvolil koma v ose x_{DZ} . Hodnoty pro tuto aberaci jsou v tabulce 6. Výsledné grafické zpracování naměřených a následně zpracovaných dat je na obrázku 41.

Tabulka 6: Naměřené hodnoty napětí a následný výpočet hodnot intenzity a koeficientů MOW funkcí pro vlnoplochu zatíženou komou v ose x_{DZ} . Při velikosti deformace zrcadla DZ odpovídající 10%.

Maska	Napětí [mV]	Normovaná intenzita	Koeficient MOW funkce
Z0	20,0	0,857	$a_0=0,000$
Z1	18,6	0,811	$a_1=-2,258$
Z2	19,5	0,840	$a_2=-9,103$
Z3	2,5	0,307	$a_3=-32,080$



Obrázek 41: Tvar vlnoplochy pro koma v ose x_{DZ} , kde a) je teoretický tvar vlnoplochy podle Zernikeho polynomu b) odpovídá naměřené vlnoploše a c) je tvar vlnoplochy po odečtení vlnoplochy V1. Obrázky b) a c) jsou normovány.

Zde je viditelné, že segmenty u obrázku a) jsou stejně orientované jako u masek, které jsem zvolil. Avšak předpokládaný výsledek u kterého by červená barva na obrázku 41 a) měla odpovídat světlejšímu odstínu šedé a modrá barva tmavšímu odstínu šedé na obrázku 41 c) nebyl naplněn.

5.2.2 Měření pro deformace odpovídající 5% maximální možné deformaci zrcadla DZ

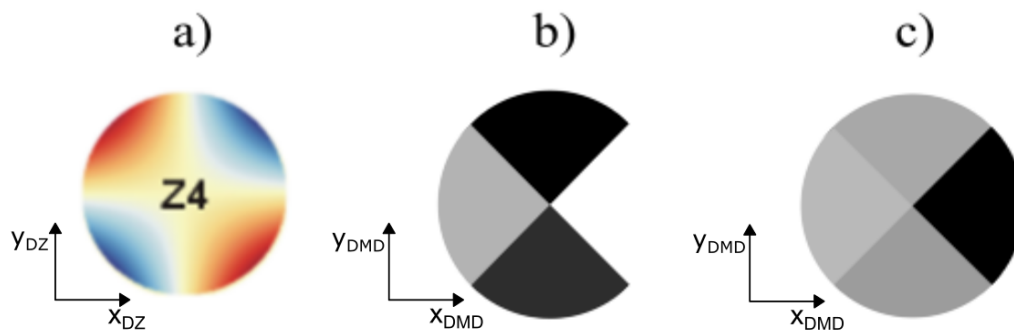
Naměřená data odpovídají předpokladům, ale přesnost měření je stále velmi nízká, proto zkusím snížit hodnotu napětí přivedenou na deformovatelné zrcátko o polovinu. Tedy na hodnotu 0,05, která odpovídá 5% maximálního zatížení. Tím by se stopa na detektoru vlivem menší deformace svazku měla zmenšit, díky čemuž bychom měli být schopní měřit větší hodnoty napětí. Postupy zpracování dat jsou stejné jako doposud, proto je již nebudu více komentovat.

Astigmatismus ve 45°

V tabulce 7 jsou vypsány hodnoty pro astigmatismus v ose 45° s přivedeným napětím odpovídajícím 5% maximální hodnoty deformace deformovatelného zrcátka DZ. Grafické zpracování hodnot pro astigmatismus v ose 45° při velikosti deformace zrcadla DZ odpovídající 5% je na obrázku 42.

Tabulka 7: Naměřené hodnoty napětí a následný výpočet hodnot intenzity a koeficientů MOW funkcí pro vlnoplochu zatíženou astigmatismem v ose 45°. Při velikosti deformace zrcadla DZ odpovídající 5%.

Maska	Napětí [mV]	Normovaná intenzita	Koeficient MOW funkce
Z0	13,5	0,688	$a_0=0,000$
Z1	7,2	0,570	$a_1=26,161$
Z2	13,6	0,690	$a_2=20,142$
Z3	6,1	0,533	$a_3=27,735$



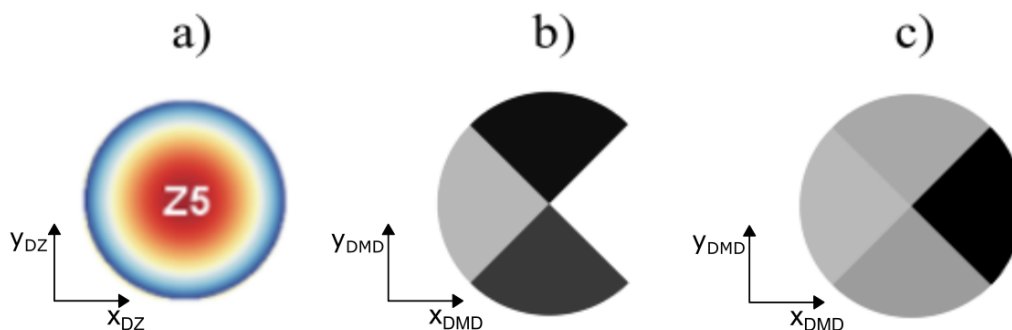
Obrázek 42: Tvar vlnoplochy pro astigmatismus v ose 45°, kde a) je teoretický tvar vlnoplochy podle Zernikeho polynomu b) odpovídá naměřené vlnoploše a c) je tvar vlnoplochy po odečtení vlnoplochy V1. Obrázky b) a c) jsou normovány.

Defokusace

V tabulce 8 jsou vypsány hodnoty pro defokusaci s přivedeným napětím odpovídajícím 5% maximální hodnoty deformace deformovatelného zrcátka DZ a na obrázku 43 je vyobrazené grafické zpracování naměřených hodnot pro tuto aberaci.

Tabulka 8: Naměřené hodnoty napětí a následný výpočet hodnot intenzity a koeficientů MOW funkcí pro vlnplochu zatíženou defokusací. Při velikosti deformace zrcadla DZ odpovídající 5%.

Maska	Napětí [mV]	Normovaná intenzita	Koeficient MOW funkce
Z0	20,0	0,857	$a_0=0,000$
Z1	16,5	0,752	$a_1=21,636$
Z2	20,6	0,877	$a_2=5,301$
Z3	1,5	0,203	$a_3=69,552$



Obrázek 43: Tvar vlnplochy pro defokusaci, kde a) je teoretický tvar vlnplochy podle Zernikeho polynomu b) odpovídá naměřené vlnploše a c) je tvar vlnplochy po odečtení vlnplochy V1. Obrázky b) a c) jsou normovány.

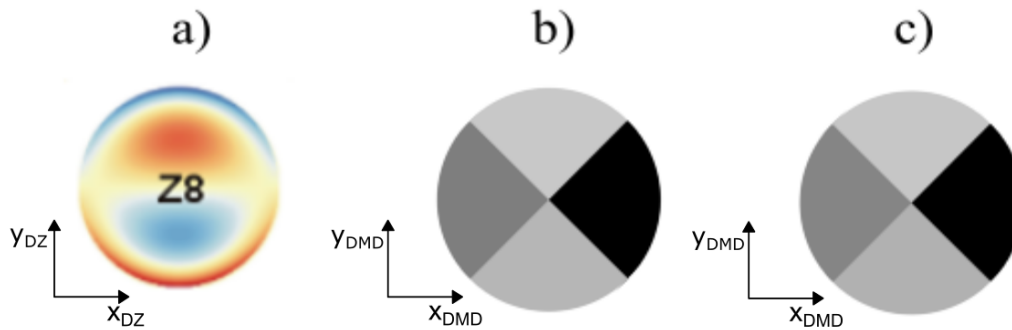
Jako při předešlém měření defokusace byl očekáván stejný odstín šedé ve všech 4 segmentech výsledné vlnplochy a to z důvodu symetrického rozložení deformace vlnplochy. Odstín šedé ve třech částech výsledné vlnplochy téměř odpovídá tomuto očekávání.

Koma v ose x_{DZ}

V tabulce 9 jsou vypsané hodnoty pro koma v ose x_{DZ} s přivedeným napětím odpovídajícím 5% maximální hodnoty deformace deformovatelného zrcátka DZ a na obrázku 44 je vyobrazené grafické zpracování naměřených hodnot pro tuto aberaci.

Tabulka 9: Naměřené hodnoty napětí a následný výpočet hodnot intenzity a koeficientů MOW funkcí pro vlnoplochu zatíženou komou v ose x_{DZ} . Při velikosti deformace zrcadla DZ odpovídající 5%.

Maska	Napětí [mV]	Normovaná intenzita	Koeficient MOW funkce
Z0	27,1	1,000	$a_0=0,000$
Z1	21,2	0,897	$a_1=-70,821$
Z2	26,5	1,000	$a_2=-53,001$
Z3	5,3	0,498	$a_3=-124,979$

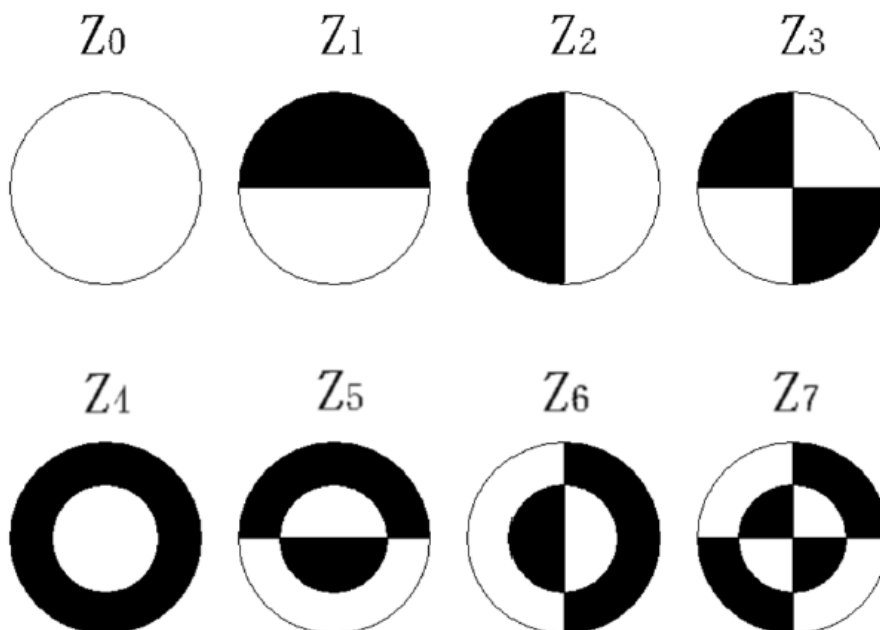


Obrázek 44: Tvar vlnoplochy pro koma v ose x_{DZ} , kde a) je teoretický tvar vlnoplochy podle Zernikeho polynomu b) odpovídá naměřené vlnoploše a c) je tvar vlnoplochy po odečtení vlnoplochy V1. Obrázky b) a c) jsou normovány.

Stejně jako při předešlém měření komy by červená barva na obrázku 44 a) měla odpovídat světlejšímu odstínu šedé a modrá barva tmavšímu odstínu šedé na obrázku 44 c). Tento předpoklad opět nebyl splněn. Jak je vidět v tabulkách, hodnoty měřeného napětí při deformaci zrcadla DZ odpovídající 5% se podle očekávání zvýšily, avšak na přesnost měření to nemělo relevantní dopad.

5.3 Snímání vlnoplochy za použití 8 binárních masek

Pro zvýšení přesnosti snímání vlnoplochy je zapotřebí použít více masek. Proto jsem provedl měření u stejných aberací se stejnou hodnotou, ale snímání je nyní provedeno za pomoci 8 binárních masek s označením Z0-Z7, které jsou na obrázku 45.



Obrázek 45: MOW funkce s označením Z0, Z1, Z2, Z3, Z4, Z5, Z6, Z7.

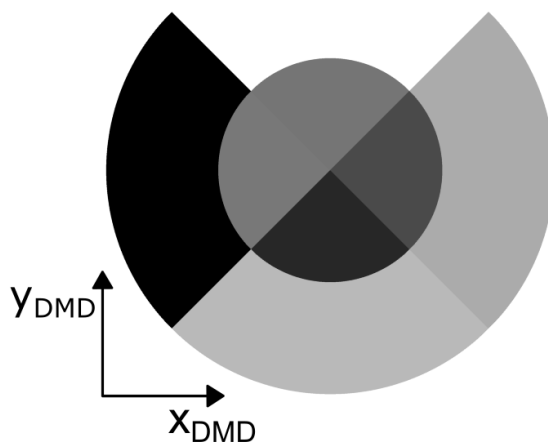
Měření proběhlo pro stejné typy a hodnoty aberací jako v předchozích dvou měření. Postupy získání a zpracování dat jsou také stejné s tím rozdílem, že jsem pracoval s dvojnásobkem dat. Díky dvojnásobnému počtu naměřených dat došlo k výraznému zvýšení obtížnosti rovnic a zvýšení řešených neznámých. Výpočty koeficientů trvaly až desítky hodin. Čímž jsem narazil na další nedostatek této metody, jež bude rozebrán podrobněji v závěru tohoto experimentu.

Tabulky s hodnotami a grafické výsledky snímání budu prezentovat ve stejné posloupnosti jako v předchozích měřeních. Nejdříve je nutné změřit hodnoty pro jednotlivé masky bez použití deformace pomocí zrcátka DZ a následně vypočítat koeficienty pro tyto hodnoty, z nichž získáme potřebnou vlnoplochu. Tato vlnoplocha nám opět určuje zatíženost našeho systému.

Tabulka 10: Naměřené hodnoty napětí a následný výpočet hodnot intenzity a koeficientů MOW funkcí pro vlnoplochu bez deformace.

Maska	Napětí [mV]	Normovaná intenzita	Koeficient MOW funkce
Z0	25,3	1,000	$a_0=0,000$
Z1	18,6	0,811	$a_1=-2,349$
Z2	25,8	1,000	$a_2=29,292$
Z3	7,6	0,581	$a_3=-25,025$
Z4	0,3	0,046	$a_4=-27,958$
Z5	20,5	0,873	$a_5=24,363$
Z6	29,0	1,000	$a_6=22,464$
Z7	7,6	0,581	$a_7=-33,122$

Výsledná vlnoplocha je graficky zpracována na obrázku 46.



Obrázek 46: Normovaný tvar vlnoplochy bez použití deformovatelného zrcátka. Tedy vlnoplocha V2.

Tuto vlnoplochu označím V2 a bude se opět odečítat od naměřených hodnot při deformaci pro získání simulované vlnoplochy.

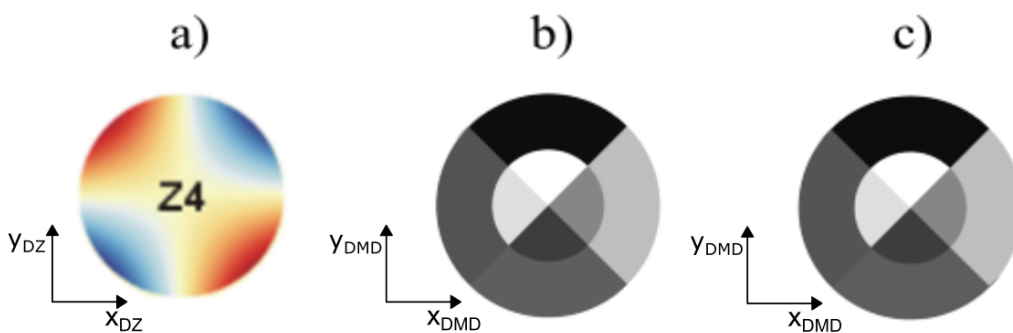
5.3.1 Měření pro deformace odpovídající 10% maximální možné deformaci zrcadla DZ

Astigmatismus ve 45°

V tabulce 11 jsou vypsané hodnoty pro astigmatismus v ose 45° s přivedeným napětím odpovídajícím 10% maximální hodnoty deformace deformovatelného zrcátka DZ a na obrázku 47 je znázorněno grafické zpracování naměřených dat.

Tabulka 11: Naměřené hodnoty napětí a následný výpočet hodnot intenzity a koeficientů MOW funkcí pro vlnoplochu zatíženou astigmatismem v ose 45°. Při velikosti deformace zrcadla DZ odpovídající 10%.

Maska	Napětí [mV]	Normovaná intenzita	Koeficient MOW funkce
Z0	3,6	0,397	$a_0=0,000$
Z1	1,5	0,203	$a_1=-1273,712$
Z2	3,6	0,397	$a_2=1766,754$
Z3	2,6	0,316	$a_3=2792,066$
Z4	0,1	0,016	$a_4=3898,670$
Z5	1,6	0,214	$a_5=6319,553$
Z6	3,5	0,390	$a_6=-1062,998$
Z7	2,6	0,316	$a_7=1664,259$



Obrázek 47: Tvar vlnoplochy pro astigmatismus v ose 45°, kde a) je teoretický tvar vlnoplochy podle Zernikeho polynomu b) odpovídá naměřené vlnoploše a c) je tvar vlnoplochy po odečtení vlnoplochy V2. Obrázky b) a c) jsou normovány.

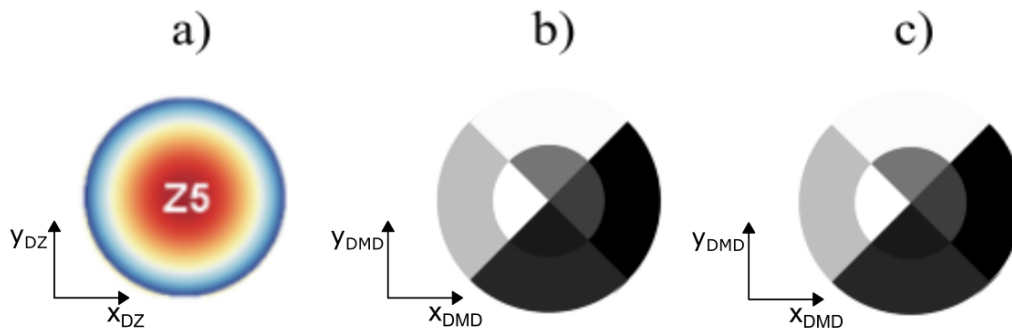
Od výsledného tvaru vlnoplochy na obrázku 47 c) bylo očekáváno symetrické rozložení stupně šedi ve všech segmentech. Toto očekávání jak můžete vidět nebylo naplněno.

Defokusace

V tabulce 12 jsou vypsány hodnoty pro defokusaci s přivedeným napětím odpovídajícím 10% maximální hodnoty deformace deformovatelného zrcátka DZ a na obrázku 48 je znázorněno grafické zpracování naměřených dat.

Tabulka 12: Naměřené hodnoty napětí a následný výpočet hodnot intenzity a koeficientů MOW funkcí pro vlnplochu zatíženou defokusací. Při velikosti deformace zrcadla DZ odpovídající 10%.

Maska	Napětí [mV]	Normovaná intenzita	Koeficient MOW funkce
Z0	1,3	0,179	$a_0=0,000$
Z1	0,8	0,116	$a_1=-6969621,995$
Z2	1,3	0,179	$a_2=-798322,593$
Z3	0,3	0,046	$a_3=747250,752$
Z4	0,2	0,031	$a_4=-201279,627$
Z5	0,8	0,116	$a_5=-1192318,706$
Z6	1,3	0,179	$a_6=1256948,086$
Z7	0,4	0,061	$a_7=-27700623,095$



Obrázek 48: Tvar vlnplochy pro defokusaci, kde a) je teoretický tvar vlnplochy podle Zernikeho polynomu b) odpovídá naměřené vlnploše a c) je tvar vlnplochy po odečtení vlnplochy V2. Obrázky b) a c) jsou normovány.

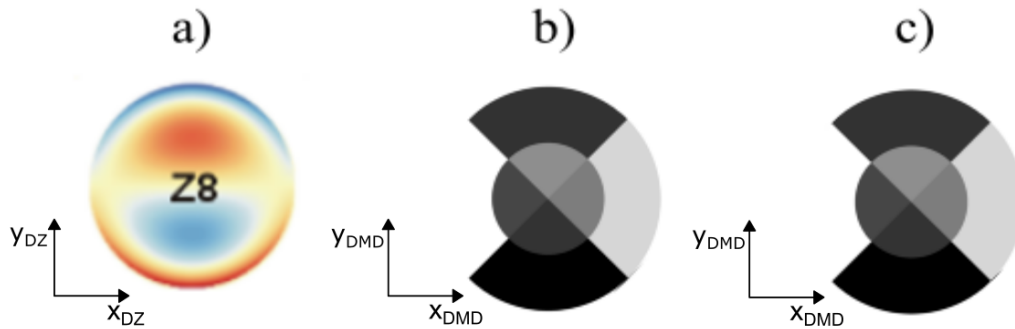
U tohoto měření byla očekávána stejná úroveň šedé ve vnitřních čtyřech segmentech, stejně jako ve vnějších čtyřech segmentech s tím rozdílem, že vnitřní kruhový segment měl mít světlejší barvu než segment vnější. Opět tento předpoklad nebyl naplněn.

Koma v ose x_{DZ}

V tabulce 13 jsou vypsány hodnoty pro koma v ose x_{DZ} s přivedeným napětím odpovídajícím 10% maximální hodnoty deformace deformovatelného zrcátka DZ a na obrázku 49 je znázorněno grafické zpracování naměřených dat.

Tabulka 13: Naměřené hodnoty napětí a následný výpočet hodnot intenzity a koeficientů MOW funkcí pro vlnoplochu zatíženou komou v ose x_{DZ} . Při velikosti deformace zrcadla DZ odpovídající 10%.

Maska	Napětí [mV]	Normovaná intenzita	Koeficient MOW funkce
Z0	20,0	0,857	$a_0=0,000$
Z1	18,6	0,811	$a_1=-1911414,801$
Z2	19,5	0,840	$a_2=2307290,209$
Z3	2,5	0,307	$a_3=6236834,008$
Z4	0,9	0,129	$a_4=-1936184,325$
Z5	16,4	0,750	$a_5=-810204,962$
Z6	17,7	0,785	$a_6=-2011110,537$
Z7	2,7	0,325	$a_7=6165846,995$



Obrázek 49: Tvar vlnoplochy pro koma v ose x_{DZ} , kde a) je teoretický tvar vlnoplochy podle Zernikeho polynomu b) odpovídá naměřené vlnoploše a c) je tvar vlnoplochy po odečtení vlnoplochy V2. Obrázky b) a c) jsou normovány.

Při měření komy v ose x_{DZ} výsledná vlnoplocha odpovídá předpokladům. Modrá barva na obrázku 49 a) by měla odpovídat tmavšímu odstínu šedé na obrázku 49 c) a červená barva by měla odpovídat světlejšímu odstínu šedé. Tento předpoklad je splněný, avšak přesnost je stále velmi nedostačující.

Při měření vlnoplochy pro 8 masek s přivedeným napětím odpovídajícím 5% maximální hodnoty deformovatelného zrcátka DZ program nebyl schopen konvergovat naměřené data. Vzhledem k předešlému měření pomocí 4 masek se však dá předpokládat, že k přesnějším snímání vlnoplochy by snížením napětí na DZ nedošlo.

5.4 Hodnocení experimentu

I při maximální snaze, správné kalibraci, upnutí a centralizaci komponentů je zřejmé z naměřených dat a výsledných grafických zpracování vlnoploch, že tato metoda není zcela vyhovující. Při použití 4 masek pro měření vlnoploch výsledek neodpovídá vnesené deformaci vlnoplochy. Při použití více masek je doba výpočtu velmi zdlouhavá a v některých případech data nekonvergují. Navíc je nutné předvídat aberaci, kterou je měřený systém zatížen pro správné zvolení druhu masek, což je v reálné situaci téměř nemožné, nebo komplikované. Z důvodu výše vyjmenovaných nedostatků metoda nesplňuje počáteční předpoklady jako rychlost, schopnost správně rozeznat tvar vlnoplochy a cenovou dostupnost.

Rychlost snímání je limitována rychlostí výpočtu koeficientů MOW funkce, která při vyšším počtu masek trvá i několik hodin a v mnoha případech data nekonvergují. Tento problém je nejpravděpodobněji zapříčiněn velmi komplikovaným tvarem rovnic v řešené soustavě. S tímto problémem je spojen i parametr schopnosti správně rozeznat tvar vlnoplochy, který je závislý na počtu masek. Jejich navýšení však vede ke předešlému problému této metody. Cena komponentů pro metodu snímání vlnoplochy pomocí DMD čipu je sice levnější, avšak pro navýšení přesnosti a rychlosti je zapotřebí velmi výkonný počítač, který by cenu celkové sestavy výrazně navýšil.

6 Závěr

Tato diplomová práce se ve své první části věnuje stručnému přehledu vad optických prvků a popisuje různé metody snímání vlnoplochy. Také je zde popsán princip a funkčnost DMD čipu a shrnuty druhy dostupných komerčních výrobků. Hlavní částí práce je návrh a popis optické sestavy pro snímání vlnoplochy za pomoci DMD čipu.

Pro správný výběr komponentů jsem vytvořil simulaci optické sestavy v programu Zemax, kde bylo ověřeno trasování světelného svazku a podle simulovaných dat byly vybrány potřebné komponenty pro reálnou kompletaci sestavy. Pro uchycení DMD čipu na pracovní desku v laboratoři a jeho ochranu před poškozením jsem navrhl ochranný kryt v programu Solidworks, který se skládá z vnitřní plastové vrstvy a vnější hliníkové části. Plastová část byla vyrobena za pomoci 3D tisku a hliníková část byla obráběna.

Po připevnění a kalibraci světelného svazku jsem provedl experiment, jehož výsledek nebyl zcela pozitivní. Bylo zjištěno několik zásadních komplikací. Dospěl jsem k závěru, že pro adekvátní snímání dané vlnoplochy je zapotřebí zvolit správné masky, tudíž je dopředu potřeba znát druh aberace jíž je vlnoplocha zatížena. Tomuto problému lze předcházet zvýšením počtu masek, čímž se zkomplikuje matematický výpočet, který trvá několik hodin a v některých případech vypočtené hodnoty nekonvergují.

Možnou alternativou pro správnou funkčnost je úprava sestavy pro metodu, jež je popsána v kapitole 2.3.4.

Příloha mé diplomové práce obsahuje text této práce v digitální podobě, výkresy a 3D modely ochranného obalu v programu SolidWorks a simulaci optické sestavy v programu Zemax.

Reference

- [1] CVANCIGEROVÁ, Gabriela. *Vady optického zobrazování*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Lékařská fakulta. Vedoucí práce MUDr. Jan Richter.
- [2] POLÁŠEK, Jaroslav. *Technický sborník oční optiky*. 2. Praha: Nakladatelství technické literatury ve Středisku interních informací, 1975.
- [3] FALHAR, Martin. Optické vady a oko: 1. část. *Česká oční optika* [online]. 2006, (1), 56-59 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: www.4oci.cz
- [4] JEXO VÁ, Soňa. Vybrané kapitoly z geometrické a vlnové optiky. *Česká oční optika* [online]. 2008, (1), 72-80 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: www.4oci.cz
- [5] KROCH, Sebastian. Vady optických soustav. In: *Wikiskripta* [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Vady_optick%C3%BDch_soustav
- [6] FALHAR, Martin. Optické vady a oko: 2. část. *Česká oční optika* [online]. 2006, , 58-62 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: www.4oci.cz
- [7] FALHAR, Martin. Optické vady a oko: 3. část. *Česká oční optika* [online]. 2006, , 64-68 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: www.4oci.cz
- [8] WELFORD, W. *Aberrations of Optical Systems* [online]. New York: Routledge, 2017 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9781315136530>
- [9] WYANT, James C. a Katherine CREATH. Basic wavefront aberration theory for optical metrology. *Applied optics and optical engineering* [online]. 1992, (2), 15-31 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <http://rohr.aiax.de/BasicAberrationsandOpticalTesting.pdf>
- [10] MAHAJAN, Virendra N. a José Antonio DÍAZ. Imaging characteristics of Zernike and annular polynomial aberrations. *Applied Optics*. **2006**(10), 2062-2074.
- [11] MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. *Statistické zpracování experimentálních dat*. Praha: Plus, 1994.
- [12] LAKSHMINARAYANAN, Vasudevan a Andre FLECK. Zernike polynomials: a guide. *Journal of Modern Optics* [online]. 2011, **58**(7), 545-561 [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.1080/09500340.2011.554896. ISSN 0950-0340. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09500340.2011.554896>
- [13] MANTRAVADI, M. V. a D. MALACARA. Lateral shearing interferometers. *Optical shop testing*. 1992, **59**, 1-45.
- [14] Newtonův interferometr. In: *Astronomrn: SOARE ÎN H-ALPHA* [online]. 2019 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://astronomrn.wordpress.com/2019/01/26/soare-in-h-alpha/>

- [15] MALACARA, D. Twyman-Green interferometer. *Optical shop testing*. 1992, s. 46-96. ISBN 0471522325.
- [16] Twyman-Green interferometer. In: *Wikipedia* [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Twyman%E2%80%93Green_interferometer#/media/File:Twyman-Green_Interferometer.svg
- [17] CORNEJO-RODRIGUEZ, A. Ronchi test. *Optical shop testing*. ISBN 0471522325.
- [18] HARIHARAN, P. Multiple-pass interferometers. *Optical Shop Testing*. 2007. s. 259-266. ISBN 0471484040.
- [19] MALLICK, S. a D. MALACARA. Common path interferometers. *Optical shop testing*. 1992, s. 95-122. ISBN 0471522325.
- [20] BARTONÍČEK, J. *Zařízení pro měření vlnoplochy mikroskopových objektivů*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojíního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Tomáš Slabý.
- [21] MALACARA-DOBLADO, D. a GHOZEIL. I Hartmann, Hartmann-Shack, and other screen tests. *Optical shop testing*. 2007, s. 361-397. ISBN 0471484040.
- [22] PECH, Miroslav. *Charakterizace povrchu optických reflexních ploch*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012. ISBN 978-80-244-3073-7.
- [23] HRÁZDILA, Štěpán. *Princip činnosti a použití Shackova - Hartmannova senzoru vlnoplochy*. Olomouc, 2013. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Prof. RNDr. Zdeněk Bouchal, Dr.
- [24] HONGBIN, Yu, Zhou GUANGYA, Chau Fook SIONG, Lee FEIWEN a Wang SHOU-HUA. A tunable Shack—Hartmann wavefront sensor based on a liquid-filled microlens array. *Journal of Micromechanics and Microengineering* [online]. 2008, **18**(10) [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.1088/0960-1317/18/10/105017. ISSN 0960-1317. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0960-1317/18/10/105017>
- [25] Micro-Lens Structures. In: *Planetech* [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: https://www.planetech.com/Lightguides/Custom_MicroLens_Arrays.html
- [26] Texas Instruments. *Texas instruments* [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.ti.com/>
- [27] REICHL, V. M. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006-2018 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- [28] NESBITT, Ryder S., Steven L. SMITH, Raymond A. MOLNAR, Stephen A. BENTON a Stephen A. BENTON. *Title Holographic recording using a digital micromirror device/title* [online]. In: . 1999-3-25, s. 12-20 [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.1117/12.343767. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=978640>

- [29] Technologie projektorů a jejich kvality. *P tuning* [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://pctuning.tyden.cz/hardware/monitory-lcd-panely/12213-technologie-projektoru-a-jejich-kvality?start=3>
- [30] WANG, Shuai, Ping YANG, Mingwu AO, Lizhi DONG a Bing XU. Wavefront sensing by means of binary intensity modulation. *Applied Optics* [online]. 2014, **53**(35) [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.1364/AO.53.008342. ISSN 0003-6935. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ao-53-35-8342>
- [31] WANG, Feiling. Wavefront sensing through measurements of binary aberration modes. *Applied Optics* [online]. 2009, **48**(15) [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.1364/AO.48.002865. ISSN 0003-6935. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ao-48-15-2865>
- [32] BOOTH, Martin. Wave front sensor-less adaptive optics: a model-based approach using sphere packings. *Optics Express* [online]. 2006, **14**(4) [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.1364/OE.14.001339. ISSN 1094-4087. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-14-4-1339>
- [33] STUERWALD, S., R. SCHMITT, Michael R. DOUGLASS a Patrick I. ODEN. *DMD-based scanning of steep wavefronts for optical testing of freeform optics* [online]. In: . 2013-3-8, 86180L- [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.1117/12.2004845. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2004845>
- [34] Thorlabs. *Thorlabs* [online]. [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com>
- [35] Imagine optic. *Imagine optic: HASO4* [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.imagine-optic.com/product/haso4-broadband-2/>
- [36] Edmund optic. *Edmund Optic* [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/>
- [37] DMD čip. *DLP9000 Family of 0.9 WQXGA Type A* [online]. [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <http://www.bdtic.com/cn/ti/dlplcr9000evm>
- [38] POZZI, P., D. WILDING, O. SOLOVIEV, H. VERSTRAETE, L. BLIEK, G. VDOVIN a M. VERHAEGEN. High speed wavefront sensorless aberration correction in digital micromirror based confocal microscopy. *Optics Express* [online]. 2017, **25**(2) [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.1364/OE.25.000949. ISSN 1094-4087. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=oe-25-2-949>