

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta strojní – Ústav přístrojové a řídicí techniky**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Aplikace Shack-Hartmannova senzoru**

*Vysoká škola:* ČVUT v Praze

*Fakulta:* strojní

*Pracoviště:* Ústav přístrojové a řídicí techniky

*Akademický rok:* 2015/2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

*pro:* **Davidu KOVANDU**

*program:* Teoretický základ strojního inženýrství

*Název tématu:* **Aplikace Shack-Hartmannova senzoru**

*Název anglicky:* Shack-Hartmann sensor applications

*Zásady pro vypracování:*

1. rešerše metod měření vlnoplochy
2. nastudovat princip S-H senzoru
3. navrhnout vhodnou metodu pro měření s deformabilním zrcadlem
4. rešerše senzorů pro tyto měřicí metody

*Rozsah grafických prací:* max. 50 %

*Rozsah práce:* cca 25 stran + přílohy

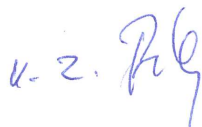
*Seznam odborné literatury:*

- Zicha, Němcová: Základy konstrukce přístrojů, doplňkové skriptum
- Čermák, Hlavička: Numerické metody
- Starikov a kol.: Wavefront reconstruction with a Shack-Hartmann sensor

*Vedoucí bakalářské práce:* Ing. Bc. Šárka Němcová, Ph.D.

*Datum zadání bakalářské práce:* 12. 4. 2016

*Termín odevzdání bakalářské práce:* 15. 6. 2016



doc. Ing. Jan Chyský, CSc.  
vedoucí ústavu



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
děkan fakulty

*V Praze dne:* 8. 4. 2016

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucí své bakalářské práce, Ing. Bc. Šárce Němcové, Ph.D, za její odborné vedení, rady a hlavně pevné nervy, které mi pomohly s vypracováním. Také bych chtěl poděkovat svým rodičům za umožnění studia na vysoké škole.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího bakalářské práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků bakalářské práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

V Praze, dne 29.6.2016

David Kovanda

# ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora:	<b>David Kovanda</b>
Název BP:	Aplikace Shack-Hartmannova senzoru
Anglický název:	Shack-Hartmann sensor applications
Rok:	2016
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojího inženýrství
Obor studia:	301R000 Studijní program je bezoborový
Ústav:	Ústav přístrojové a řídicí techniky
Vedoucí BP:	Ing. Bc. Šárka Němcová, Ph.D
Bibliografické údaje:	počet stran 37 počet obrázků 19
Klíčová slova:	vlnoplocha, Hartmann, Shack-Hartmann
Keywords:	wavefront, Hartmann, Shack-Hartmann
Anotace:	Tato práce pojednává o měření deformaci vlnoplochy a její následné korekci pomocí deformabilního zrcadla. Hlavní část se zabývá návrhem způsobu měření vlnoplochy.
Abstract:	This work deals with measuring deformation of a wavefront and its subsequent correction with deformable mirror. The main part of the work is a design of a way of measuring wavefronts.

# Obsah

1 Úvod	8
2 Fyzikální základ	9
2.1 Světlo	9
2.2 Definice vlnoplochy	11
2.3 Popis světelné vlny	12
3 Deformabilní zrcadlo	14
4 Měření vlnoplochy	18
4.1 Úvod do měřících metod	18
5 Interferometrické metody	19
5.1 Fizeaův interferometr	19
5.2 Twyman-Greenův interferometr	21
6. Geometrické metody	22
6.1 Foucaultův test	22
6.2 Hartmannův test	24
6.2.1 Historie Hartmannova testu	24
6.2.2 Použití a základní popis Hartmannova testu	24
6.2.3. Konstrukce Hartmannova testu	25
6.2.4 Transverzální aberace	28
6.3. Shack-Hartmannův test	29
6.3.1 Historie Shack-Hartmannova testu	29
6.3.2 Využití Shack-Hartmannova senzoru	29
6.3.3 Popis Shack-Hartmannova testu	30
6.3.4 Uspořádání Shack-Hartmannova testu	31
6.3.5 Pole mikročoček Shack-Hartmannova testu	32
6.3.6 Zpracování dat Shack-Hartmannova testu	33
6.3.7 Popis principu CCD	33
7 Závěr	35
8 Seznam použité literatury	36

# 1 Úvod

Tato bakalářská práce se zaměřuje na měření deformace vlnoplochy a její následné opravení pomocí deformabilního zrcadla.

Při průchodu světla optickým prostředím může docházet k deformaci světelného pole například vlivem nekvalitních materiálů nebo v důsledku optických aberací. V dnešní době ale existuje několik způsobů, jak zjistit tvar vlnoplochy světelného pole a případně tyto deformace odstranit. Mezi měřicí metody patří interferometrické a geometrické (paprskové) metody.

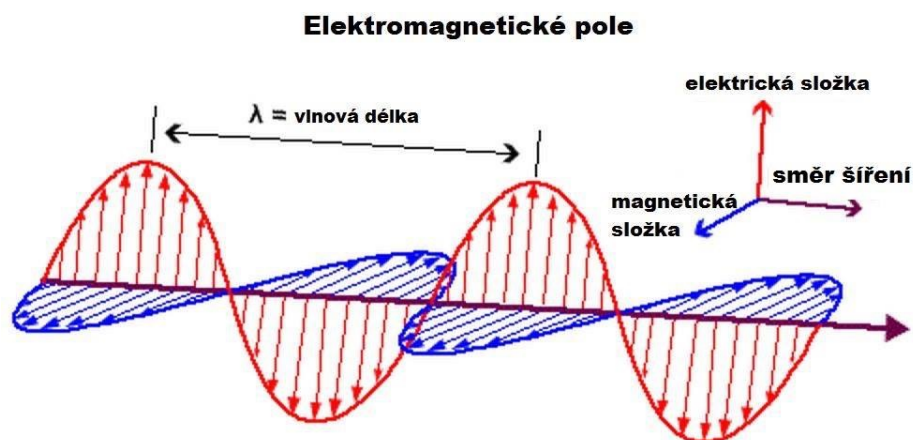
Tato práce se zaměřuje hlavně na geometrické metody a to zejména klasický Hartmannův test a jeho moderní modifikaci Shack-Hartmannův test. Cílem této práce je určit vhodnou metodu měření vlnoplochy a použít ji současně s deformabilním zrcadlem.



# 2 Fyzikální základ

## 2.1 Světlo

Podle elektromagnetické teorie světla, kterou vymyslel anglický fyzik J. C. Maxwell, je světlo složeno ze dvou složek. Základem teorie tvoří skutečnost, že měnící se elektrické pole vyvolává pole magnetické a naopak, měnící se pole magnetické vyvolává pole elektrické. Maxwell ukázal, že kmitavý elektrický obvod vysílá elektromagnetické vlny, které se šíří rychlostí světla.



Obr: 1 : Elektromagnetické pole, jeho složky a vlnová délka [3]

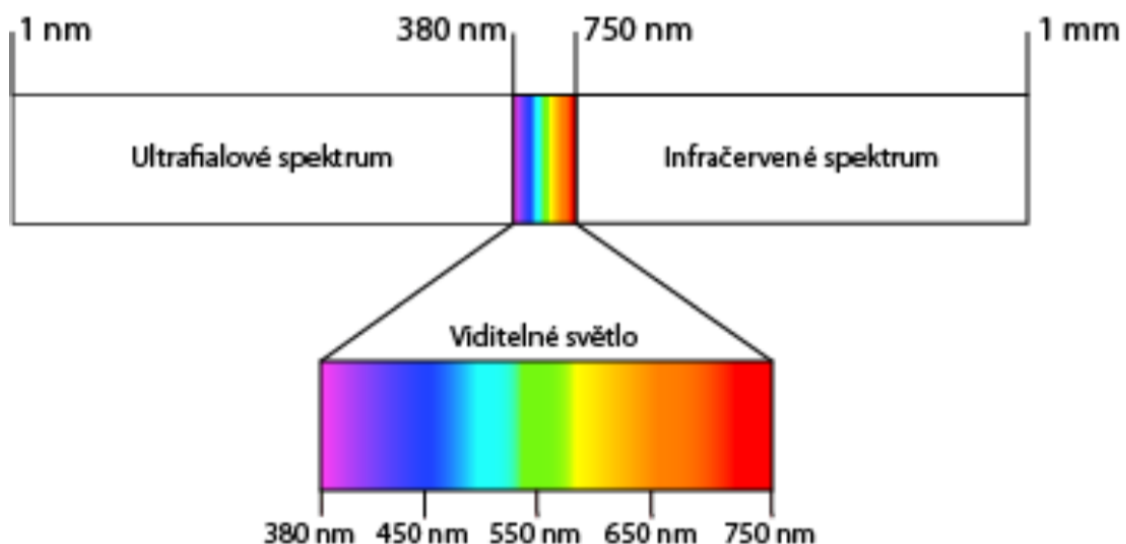
Spektrum optického záření dělíme na infračervené, viditelné a ultrafialové záření. Rozsah vlnových délek pro infračervenou oblast je 760 nm až 1 mm, viditelná oblast je ohraničena vlnovými délkami v rozsahu 380 nm až 760 nm a rozsah vlnových délek ultrafialového záření je 10 nm

až 400 nm. Člověk je lidským okem schopen vnímat pouze viditelnou část světelného spektra.

Nezákladnější informací, kterou musíme při popisu světelného záření znát, je vlnová délka, kterou značíme  $[\lambda]$ , základní jednotkou vlnové délky je metr  $[\text{m}]$ . Vlnová délka je dána vztahem (1) .

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1)$$

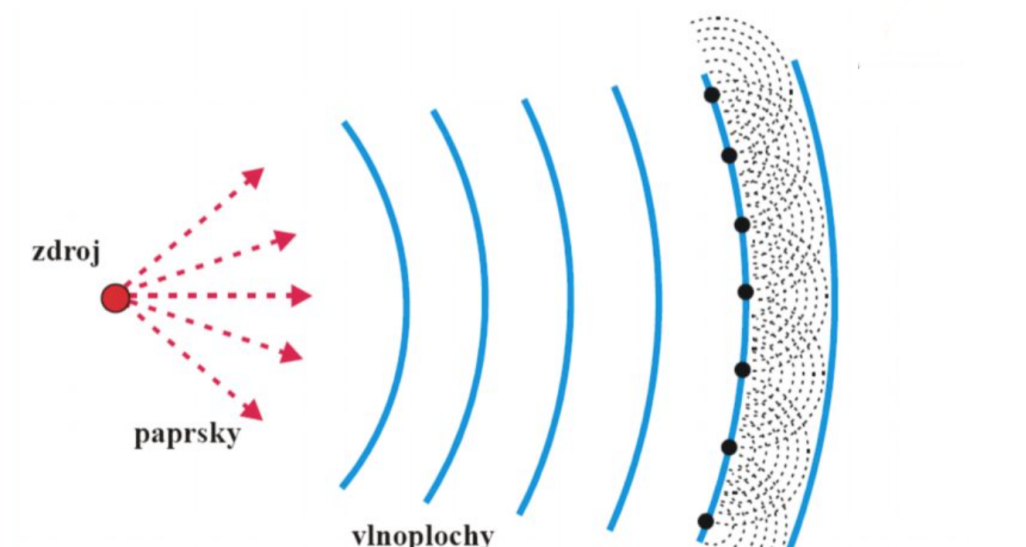
Kde  $c$  je značí rychlost světla ve vakuu ( $c = 299\,792\,458 \text{ ms}^{-1}$ ) a  $\nu$  značí frekvenci záření v Hertzech  $[\text{Hz}]$ . Vlnová délka udává barvu, viz obr. 2. [1,2]



Obr: 2 : elektromagnetické spektrum

## 2.2 Definice vlnoplochy

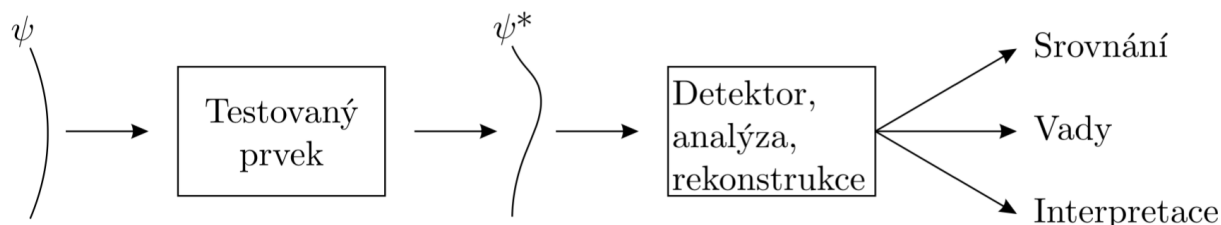
Vlnoplocha je definována jako množina bodů, z nichž všechny jsou v téže fázi. Podle Huygensova principu je každý bod vlnoplochy zdrojem vlnění. Vlnění příslušné k danému bodu se označuje jako elementární, tudíž každý bod vlnoplochy je zdrojem elementárního vlnění. Toto elementární vlnění se rozšíří na elementární vlnoplochy, a tak vlnění postupuje k dalším bodům prostředí.[1]



Obr: 3: Huygensův princip [5]

Princip testování optických prvků prostřednictvím rekonstrukce vlnoplochy světelné vlny objasňuje schéma na (obr.4), kde je naznačeno šíření světelné vlny  $\psi$  se známým tvarem vlnoplochy. Po průchodu testovaným prvkem se tvar vlnoplochy změní. Vlnoplochu změříme a následně můžeme provést srovnání s referenční vlnoplochou, určit koeficienty optických vad, případně v závislosti na typu testovaného

objektu interpretovat zjištěný tvar vlnoplochy jiným způsobem (může určovat například topografii povrchu objektu nebo rozložení indexu lomu, apod.).[4]



Obr: 4 : Princip testování optických prvků rekonstrukcí vlnoplochy. [4]

## 2.3 Popis světelné vlny

Světelnou vlnu můžeme matematicky popsat pomocí vlnové funkce  $\Psi(r, t)$  ve tvaru

$$\Psi(r, t) = \psi(r) \exp(i\omega t) = A(r) \exp[iW(r)] \exp(-i\omega t) \quad (2)$$

Vlnová funkce je závislá na dvou parametrech. První parametr je vektor  $r = (x, y, z)$ , který popisuje reálnou polohu vlny v kartézských souřadnicích, ale lze převést do jiného systému, například cylindrických souřadnic  $\rho, \theta$  a druhá složka je čas  $t[\mathbf{s}]$ .  $A(r)$ , resp.  $W(r)$  je amplituda, resp. fáze,  $\omega$  označuje úhlovou frekvenci světelné vlny. Jako vlnovou funkci tedy dále uvažujme pouze veličinu  $\psi(r)$  ze vztahu. Vlnoplochou obecně rozumíme plochu, pro kterou platí  $\psi(r) = \text{konst.}$  Jedná se o plochu, kde je amplituda i fáze

konstantní. V praxi je však tato podmínka splněna pouze ve speciálních případech a v dalším výkladu budeme za vlnoplochu považovat plochu, pro kterou platí  $W(r) = \text{konst.}$ , tedy pouze plochu konstantní fáze. Při rekonstrukci vlnoplochy například ze zaznamenaného interferogramu ve skutečnosti měříme průběh fázové funkce  $W(r)$  v rovině detektoru. Hodnoty  $W(r)$  tak představují fázové zpoždění jednotlivých bodů vlnoplochy oproti zvolené referenční hladině. Rovinu detektoru můžeme ztotožnit s rovinou  $z = 0$  a celý problém převést na dvourozměrný pomocí následujícího vztahu: [4]

$$z=0: (x,y,0) \equiv (x,y)=r \quad (3)$$

Dalším základním parametrem je optická intenzita. Optická intenzita je definována jako optický výkon na jednotku plochy, jednotkou optické intenzity  $I$  je  $[\text{Wcm}^{-2}]$ . Vztah pro určení hodnoty intenzity optické vlny je rovnice (4). Operace označená ostrými závorkami  $\langle \rangle$  je operací časové středování. Časový interval této operace při tom musí být mnohem delší než perioda optické vlny a při tom kratší než další uvažované časy (například délka trvání světelného impulsu). V případě monochromatické vlny je intenzita vyjádřena vztahem (5).

$$I(r) = 2 \langle \psi^2(r,t) \rangle \quad (4)$$

$$I(r) = |\Psi(r)|^2 \quad (5)$$

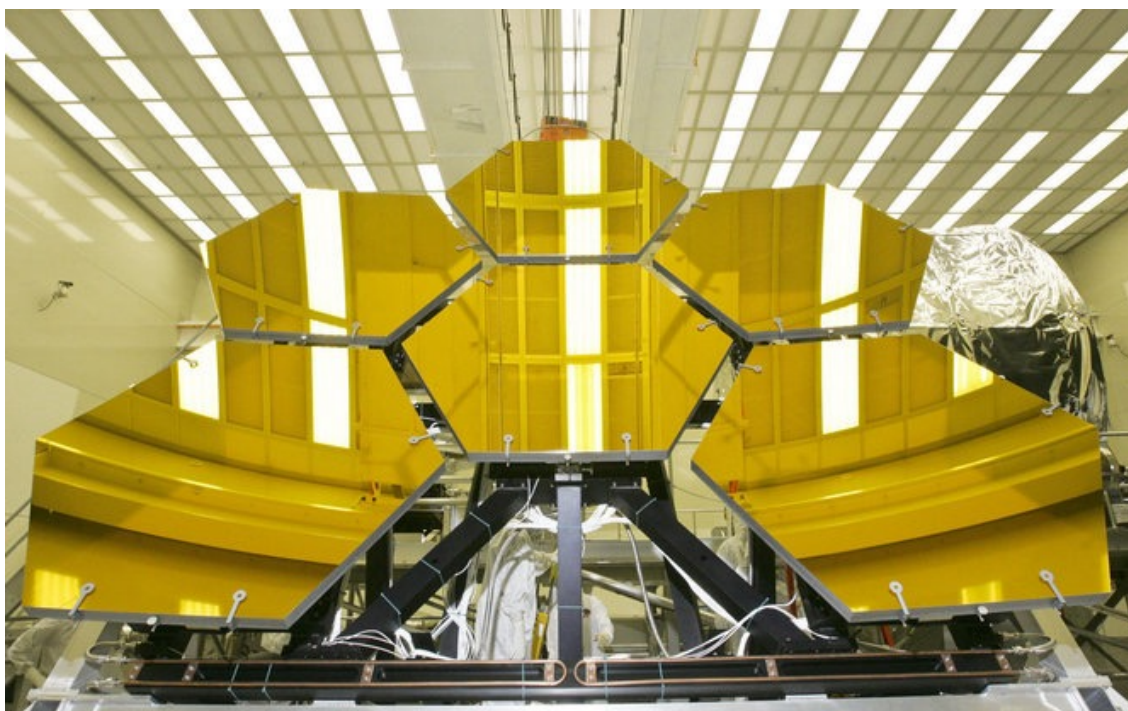
Optický výkon  $P(t)$ , jehož jednotkou je Watt (W), je vyjádřen jako optická intenzita dopadající na plochu  $A$  kolmou ke směru šíření světla. Jeho velikost získáme integrací optické intenzity přes plochu  $A$ , na kterou intenzita působí (6). [2]

$$P(t) = \int_A I(r,t) dA \quad (6)$$

## 3 Deformabilní zrcadlo

Naším hlavním cílem je narovnat vlnoplochu a jako vhodný fázový korektor nám poslouží řízené bimorfnní deformovatelné zrcadlo. Deformovatelná zrcadla se používají v kombinaci se senzory vlnoplochy a systémy řízení v reálném čase v adaptivní optice.

Existuje mnoho konceptů deformovatelného zrcadla. U segmentová konstrukce jsou zrcadla tvořena nezávislými plochými zrcadlovými segmenty. Každý segment se může pohybovat v malé vzdálenosti tam a zpět, aby se výsledná vlnoplocha po odrazu na zrcadle přiblížila požadované vlnoploše. Výhodou těchto zrcadel je, že se segmenty navzájem téměř nebo vůbec neovlivňují.



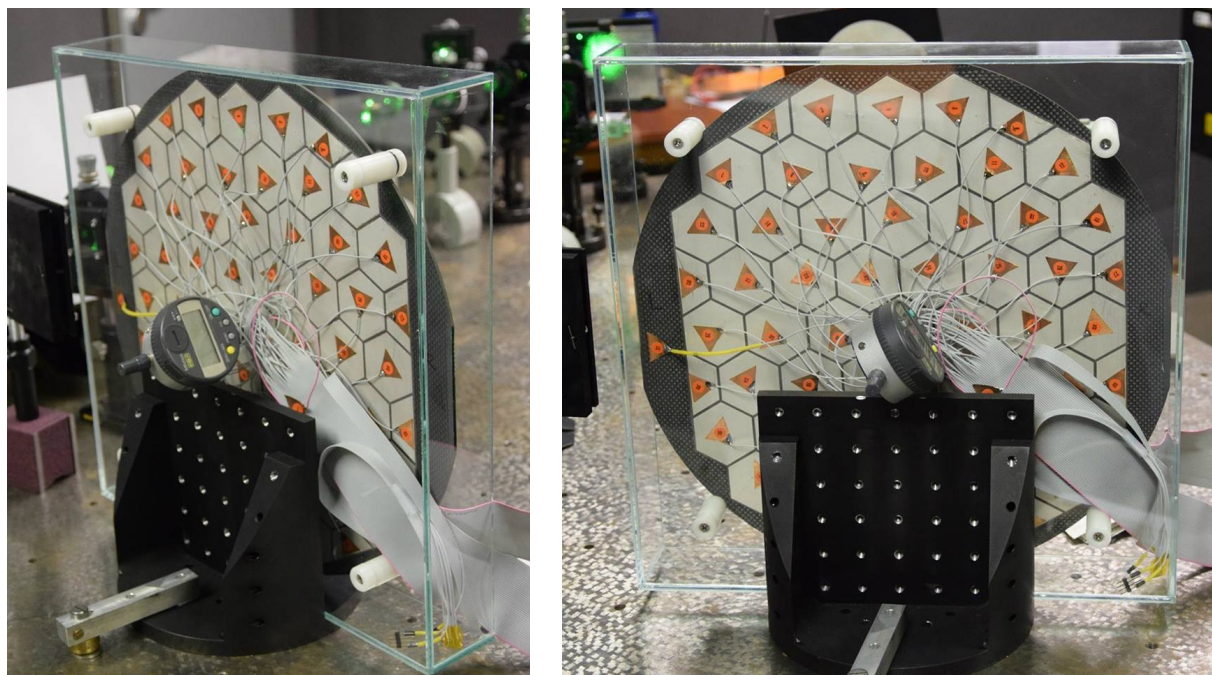
Obr. 5. : Segmentové zrcadlo: James Webb space telescope

Další způsob je založen na koncepci tenkého zrcadla s diskrétními aktuátory. Tvar zrcadla je řízen jednotlivými akčními členy, které jsou upevněny v rámu za zrcadlem. Tvar zrcadla závisí na kombinaci sil vyvozených aktuátory a na způsobu, jakým je zrcadlo připevněno k rámu a na materiálu zrcadla. Tato zrcadla umožňují plynulou regulaci vlnoplochy s velmi velkým množstvím stupňů volnosti.

Membránová koncepce: zrcadla jsou tvořena tenkou vodivou reflexní membránou, která je přetažena přes pevnou plochu rámu. Membrána může být deformována elektrostaticky použitím řídicích napětí na segmentových elektrodách, které mohou být umístěny pod nebo nad membránou. Elektrody umístěné před membránu jsou transparentní. Membrána se může pohybovat dopředu a dozadu vzhledem k referenční oblasti.

Biomorfní koncepce: zrcadla jsou tvořena dvěma nebo více vrstvami různých materiálů. Jedna nebo více (aktivních) vrstev je vyrobena z piezoelektrického nebo elektrostričního materiálu. Elektrodová struktura je vzorovaná na aktivní vrstvu pro umožnění místní reakce. Zrcadlo je deformováno, když přiložíme napětí na jednu nebo více elektrod. V důsledku piezoelektrického jevu nastane prodloužení v příčném směru nebo podélném, což má za následek lokální změnu zakřivení zrcadla.

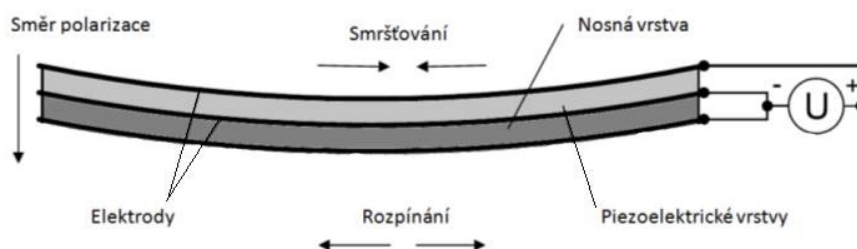
Naše zrcadlo o průměru 300mm je založeno na bimorfní struktuře s kompozitním jádrem a keramickou piezo vrstvou se 60 segmentovými elektrodami (obr. 6.) .



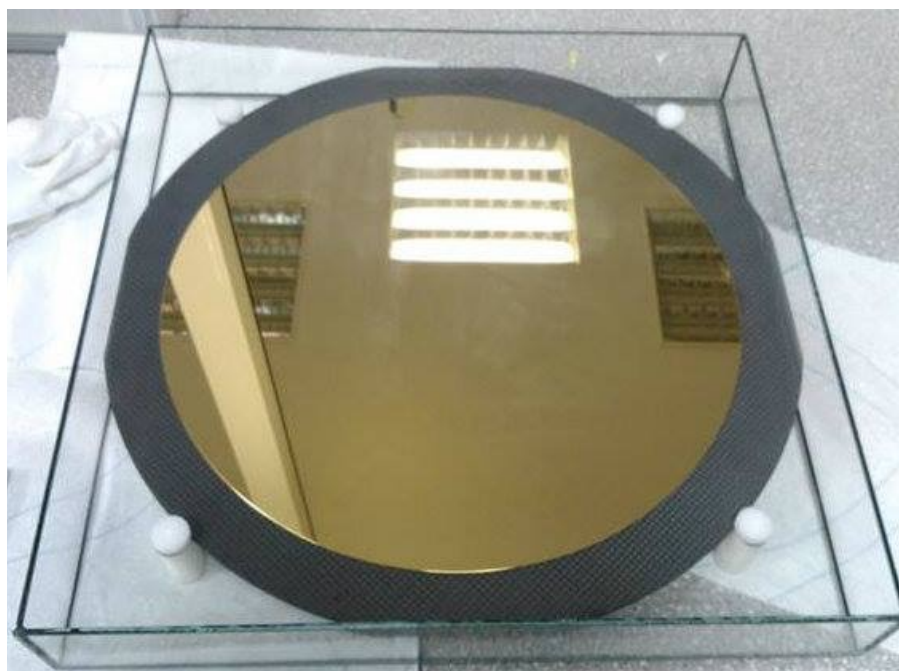
Obr. 6. : Elektrody deformabilního zrcadla



Bimorfní piezoelektrická struktura (obr. 7.) je složena z jedné piezoelektrické vrstvy a nosné desky. Princip této struktury je založen na příčném piezo efektu. Materiál se rozpíná kolmo na osu polarizace, elektrické pole působí ve směru nebo proti směru polarizace piezoelektrických vrstev. Když jsou směry polarizace a elektrického pole stejné, vrstva se rozpíná, v opačném případě se vrstva stahuje. Tento jev se projevuje lokálním prohýbáním zrcadla.[7]



Obr. 7. : Struktura zrcadla [7]



Obr. 8. : Zlatá reflexní vrstva [7]

# 4 Měření vlnoplochy

## 4.1 Úvod do měřících metod

Dnešní požadavky na měřící, zobrazovací a diagnostické systémy v oblasti optiky vedou k rozvoji vyhodnocovacích metod fáze optických vlnových polí, jež mohou být využity ve spektru vědeckých a průmyslových aplikací. V praxi se využívá několik principů vyhodnocování fáze, resp. jejich změn, jsou založeny na detekci intenzity záření na definovaných místech v prostoru v jednom nebo více časových okamžicích. Metody vyhodnocování fáze můžeme v principu rozdělit na interferometrické a neinterferometrické.

Interferometrické jsou nejvíce využívanými metodami v praxi, jsou založeny na interferenci dvou nebo více vlnových polí. Jejich nevýhodou je vysoká citlivost na mechanické vibrace, zvýšené požadavky na experimentální realizaci a omezený dynamický rozsah měření. Při kontrole v optickém průmyslu se nejvíce používá interferometrů Twyman-Greenova nebo Fizeauova typu.

Neinterferometrické neboli geometrické metody jsou založeny na gradientní metodě vyhodnocování fáze, což znamená, že určujeme gradient fázových hodnot (resp. gradientu vlnoplochy) na diskrétní síti bodů v prostoru. Složky gradientu (tj. hodnoty derivací ve dvou různých směrech) jsou určovány nepřímo měřením prostorového rozdělení intenzity vlnového pole dopadajícího na detektor záření. Z naměřených hodnot gradientu vlnoplochy lze poté pomocí vhodných numerických

metod rekonstruovat hodnoty fáze vlnového pole. Tyto metody jsou v současnosti na velkém vzestupu a začínají se velmi zdokonalovat a zlepšovat své využití v praxi. Jsou také konstrukčně jednodušší, a tím i finálně dostupnější než interferometrické metody. Využívá se hlavně v oblasti optické metrologie v průmyslu, adaptivní optiky a očního lékařství. Do těchto metod patří např. Ronchiho test a Foucaultův test. Všechny tyto zkoušky jsou používány v modernizovaných a modifikovaných verzích. Také sem patří některé metody, které se využívají hlavně v oblasti adaptivní optiky a hlavně kontroly kvality optických soustav. Jedná se hlavně o Hartmannovu zkoušku a její moderní modifikaci Shack-Hartmannovu metodu.

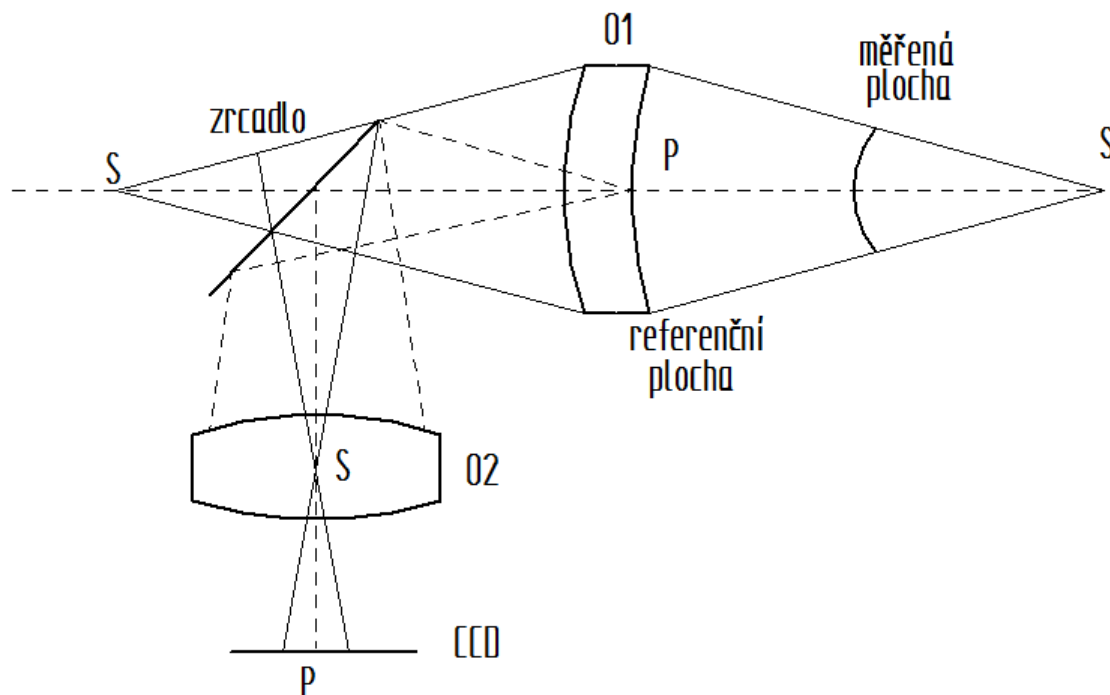
Dále se ještě začínají rozvíjet metody určování fáze vlnového pole na bázi řešení rovnic pro transport energie v elektromagnetickém poli. Tento typ metod je založen na numerické rekonstrukci fáze vlnového pole z přímého měření prostorového rozdělení intenzity pomocí matematických metod pro řešení parciální diferenciální rovnice transportu energie v elektromagnetickém poli. Důležitým aspektem metody je správné určení prostorové změny intenzity vlnového pole v místech prostoru (obvykle rovinná plocha). Velkými výhodami těchto metod jsou relativně nízké experimentální nároky a požadavky na vlastnosti vlnového pole.

## **5 Interferometrické metody**

### **5.1 Fizeaův interferometr**

Princip Fizeauova interferometru je znázorněn na obrázku

(obr. 9.) , d zde značí velikost průměru interferenčního obrazce. Světlo vychází ze zdroje S, který se nachází v předmětové ohniskové rovině objektivu O1, a prochází přes polopropustné zrcadlo Z. Vlnoplocha bodového zdroje se deformuje přímo do tvaru měřené plochy, od které se odrazí zpět a interferuje s referenční vlnoplochou odraženou většinou od zadní plochy objektivu O1. Ostatní optické plochy objektivu O1 proto musejí být pokryty antireflexními vrstvami, aby nedocházelo k rušivým interferencím s jinými odraženými paprsky. Pokud jsou použity zdroje záření konečné velikosti, budou se interferenční proužky nacházet na odrazné referenční ploše objektivu. Tyto interferenční proužky jsou snímány pomocí zrcadla Z a objektivu O2, jehož pupila je umístěna v obrazu zdroje. Výhodou této metody je celistvost celého řešení a podobná hodnota reflexe referenční plochy a nepokovené měřené optické plochy asi 4 %. Nevýhodou je velký dráhový rozdíl mezi referenční a měřenou vlnoplochou, z tohoto důvodu se zde jako zdroj záření používá hlavně laser.[8,9]

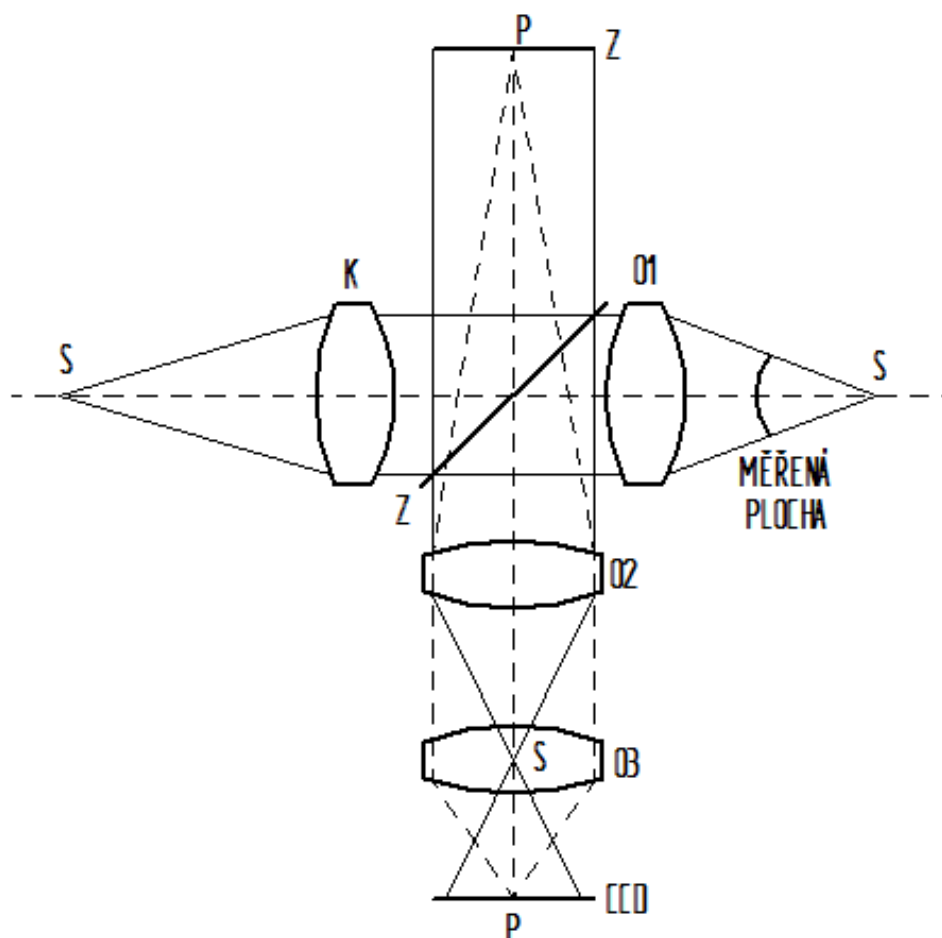


Obr. 9. : Fizeaův interferometr

## 5.2 Twyman-Greenův interferometr

Twyman-Greenův interferometr využívá oproti Fizeauovu typu interference rovinných vlnoploch. Na obrázku (Obr. 10.) můžeme vidět schéma tohoto interferometru, d zde značí velikost průměru interferenčního obrazce. Bodový zdroj S je po průchodu kolimátorem K transformován na rovinnou vlnoplochu. Ta dopadá na zrcadlo Z, kde se rozdělí na referenční větev vybavenou stavitelným rovinným referenčním zrcadlem ZR a měřicí větev s objektivem O1, který požadovaným způsobem deformuje vlnoplochu pro odraz na měřené ploše. Referenční vlna směřuje k referenčnímu rovinnému zrcadlu ZR, kde se odrazí a po průchodu polopropustným zrcadlem Z dojde k objektivu O2. Druhá část světla prochází polopropustným zrcadlem Z až k objektivu O1, který ji transformuje na sférickou vlnu. Tato vlna pak dopadá na měřenou plochu. Měřený vzorek je umístěn tak, aby jeho „střed křivosti“ byl prakticky shodný se středem křivosti sférické vlny vycházející z objektivu O1. Obraz S' zdroje S se nachází ve středu křivosti sférické vlny vycházející z objektivu O1. Sférická vlna se odrazí od měřené čočky, pak prochází objektivem O1, odráží se od polopropustného zrcadla Z a dopadá na objektiv O2. V tomto prostoru dochází k interferenci referenční a sférické vlny. V bodě S'' se pomocí objektivu O2 vytvoří obraz zdroje S, který je identický s obrazovým ohniskem tohoto objektivu. Za objektivem O2 leží objektiv O3, jehož střed vstupní pupily je totožný s bodem S''. Interferenční obrazce jsou lokalizované na referenční rovinné ploše, kde je lze pomocí objektivů O2 a O3 snímat a dále vyhodnocovat. Výhodou tohoto typu interferometru je velký rozsah pracovních vzdáleností při zachování pozorování nultého interferenčního řádu a dále taky možnost

aktivně měnit hodnotu intenzity záření v referenční větvi, aby bylo dosaženo maximálního kontrastu interferenčních proužků. [8,9]



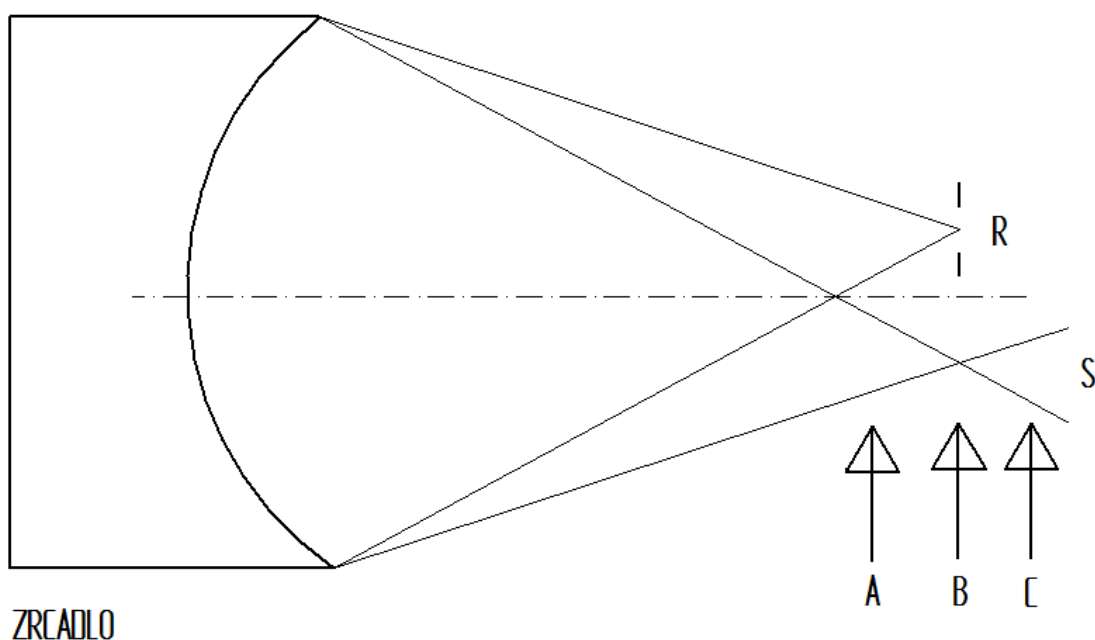
Obr. 10. :Twyman-Greenův interferometr

## 6. Geometrické metody

### 6.1 Foucaultův test

Foucaultův test byl popsán v roce 1858 francouzským fyzikem Léonem Foucaultem. Jedná se o nejstarší typ testu, který vycházel z toho, že jakýkoliv paprsek vycházející ze středu na vnitřní stranu kulové plochy, se musí odrazit opět do jejího středu. Z toho vyplývá, že když

umístíme bodový zdroj do středu křivosti a zrcadlo budeme ze stejného místa pozorovat, tak se musí po celé ploše najednou rozzářit. Kdybychom do středu křivosti pozorovaného paprsku opatrně vkládali překážku (nejčastěji se jedná o ostrou čepel), musí zrcadlo zhasnout najednou. Pokud budeme vkládat překážku před středem křivosti, musí plocha zhasínat postupně ze směru vkládání čepelky a naopak za středem křivosti musí zhasínat ze směru proti směru vkládání. Celý tento princip je vyznačen na (obr. 11.), kde R vyznačuje bodový zdroj světla, A stav bříty před středem křivosti, B stav bříty na středu křivosti a C stav bříty za středem křivosti.



Obr. 11. : Popis Foucaultovy zkoušky

Touto zkouškou se dají velmi přesně najít střed křivosti zrcadel, ale také odhladit jejich vady na ploše kontrolovaného zrcadla. Pokud má některá část plochy zrcadla menší poloměr křivosti, odhalíme jej vložením čepelky do středu křivosti zrcadla, kde se za vadnou částí plochy objeví stín, který bude přicházet proti směru vkládání ostré čepelky ještě dříve, než se

zastíní celá plocha. Tento test sice přesně ukazuje zóny, kde se vady vyskytují, ale její velkou nevýhodou je nutnost bodového zdroje světla (často se využívá alobalového stínítka, do kterého je udělána dírka velmi ostrou špičkou jehly). Tímto je ovlivněno světlo dopadající na plochu zrcadla a zkouška je tedy efektivní pouze při absolutní tmě.

## **6.2 Hartmannův test**

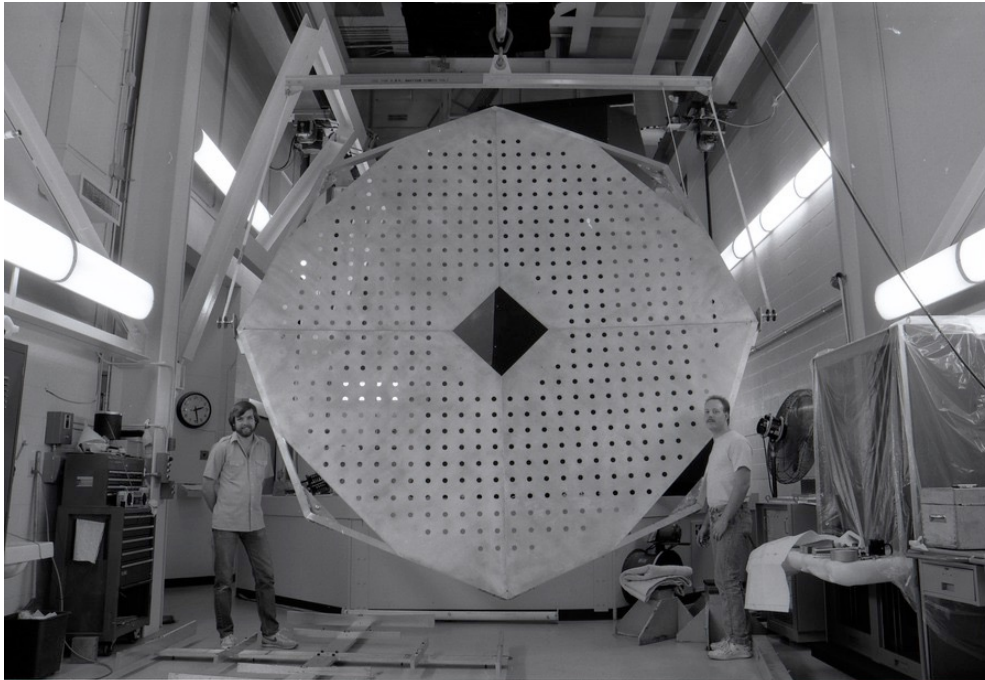
### **6.1.1 Historie Hartmannova testu**

Johannes Hartmann (1865 – 1936) byl významným německým astrofyzikem. V roce 1900, kdy vynalezl svůj screen test působil jako profesor na univerzitě v německé Postupimi. Pracoval na teleskopu, který vykazoval špatné výsledky obrazu. Rozhodl se tedy najít příčinu problému, a proto vyvinul tento test. Pro testování optiky vyrobil děrovanou clonu, kterou postavil před aparaturu teleskopu a zaznamenal na fotografický snímek. Poté umístil clonu do jiné vzdálenosti a postup opakoval. Po vyvolání obou desek vznikly dva bodové diagramy. Po spojení bodů na diagramu a ze znalosti rozdílů vzdálenosti obou clon, zjistil, že problém byl na primární čočce teleskopu, která byla nahrazena jinou.[10]

### **6.2.2 Použití a základní popis Hartmannova testu**

Hartmannův test je jediný test, kterým lze změřit vlonoplochu velkých rozměrů. Měří se jím hlavně zrcadla a čočky, které se vyskytují v teleskopech. Např. v americkém Kitt Peak National Observatory, kde se nachází 3,5m teleskop WIYN byla zhotovena maska velká 3,5m viz. (obr. 12.)



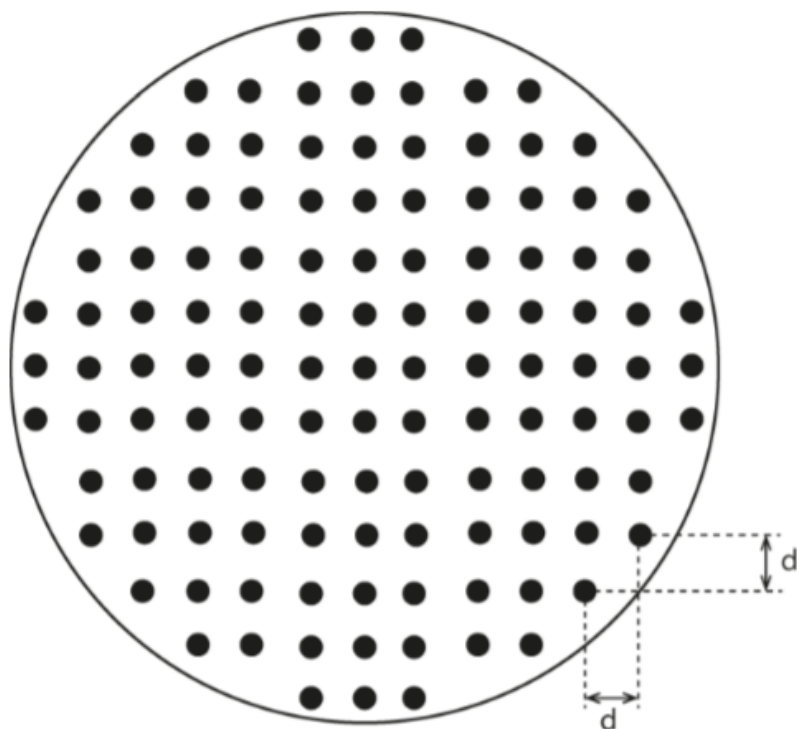


Obr. 12. : Hartmannova clona (3,5 m) teleskopu

Zásadní výsledek testu je v tom, že tímto testem jsme schopni odhalit chyby povrchu zrcadla. Chybami jsou myšleny hlavně výrobní vady, kdy zrcadlo nemá přesně požadovaný tvar např. paraboloidický nebo sférický. Na povrchu zrcadla mohou být také drobná vyboulení, popřípadě výdutě.  
[11]

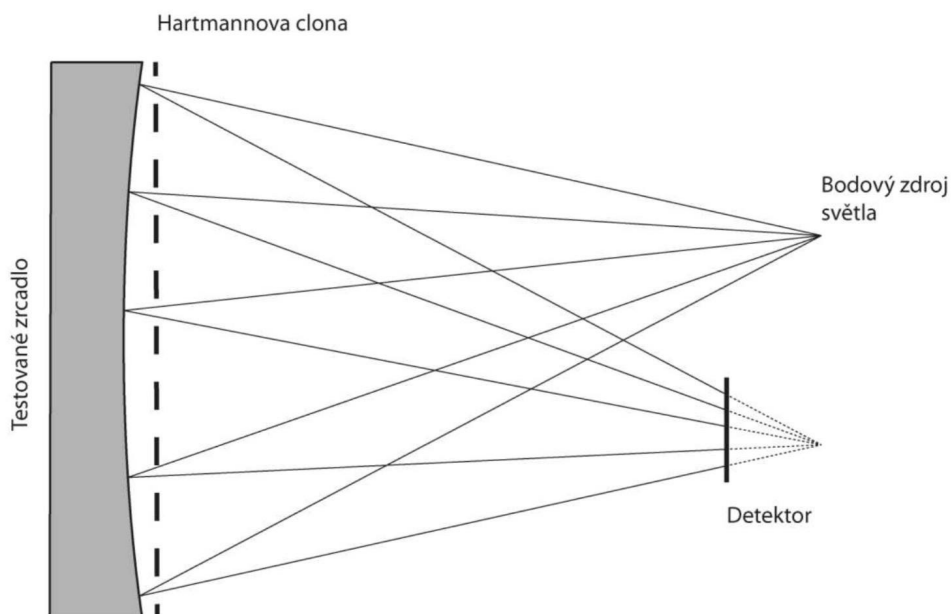
### 6.2.3. Konstrukce Hartmannova testu

Co se týče konstrukce patří Hartmannův test mezi ty nejjednodušší. Před námi testované zrcadlo nebo čočku postavíme Hartmannovu clonu (obr. 13.), která je z neprůhledného materiálu a jsou v ní vyhotoveny otvory, které jsou rozmístěny v přesném poli.

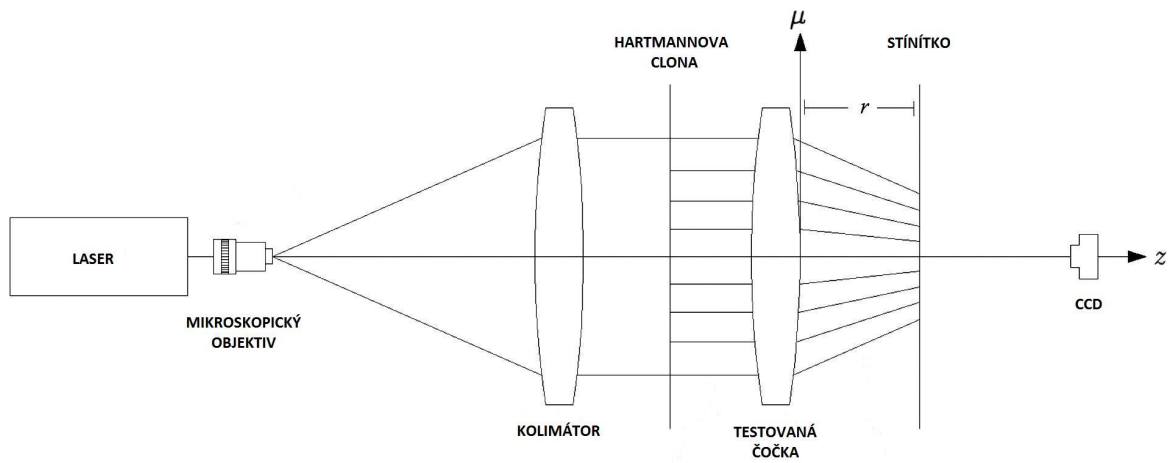


Obr. 13. : Hartmannova clona [12]

Poté bodovým zdrojem světla osvítíme námi testovaný prvek přes Hartmannovu clonu. Paprsky odražené od zrcadla projdou přes děrovanou clonu a vytvoří bodový diagram na stínítku (obr. 16.) s rastrem.

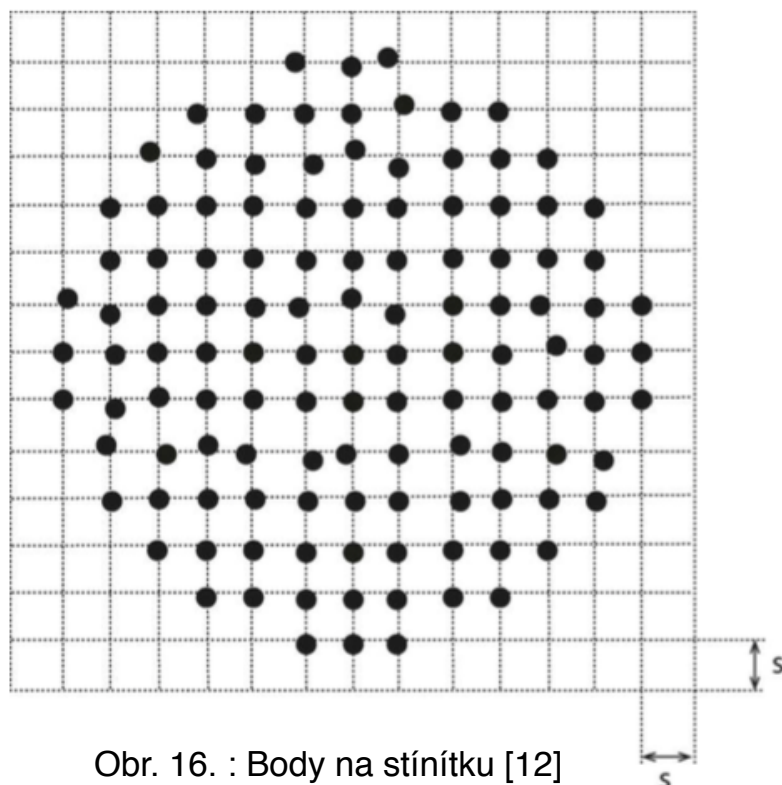


Obr. 14. : Nasvícení zrcadla bodovým zdrojem [2]



Obr. 15. : Hartmannova zkouška čočky

Obrazy bodů se poté vyhodnotí. Pokud je zkoušený prvek ideální, obrazy bodů se na mřížce stínítka zobrazí přesně do průsečíků. Pokud geometrie povrchu zkoušeného prvku není ideální, dojde k odrazu světla pod jiným úhlem než v případě ideálního tvaru plochy. Vady zrcadla se na stínítku projeví tím, že světelné body se zobrazí mimo optickou své ideální pozice. Tento jev nazýváme transverzální aberace.[2,12]



Obr. 16. : Body na stínítku [12]

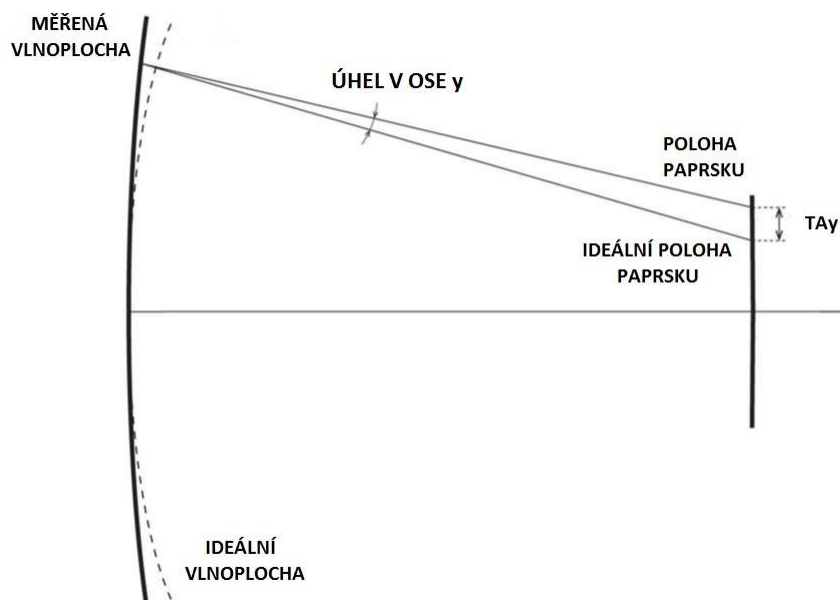
## 6.2.4 Transverzální aberace

Matematicky jsou tyto chyby popsány rovnicemi (7) a (8).

$$W(x,y) = \frac{1}{r} \int_0^x TA_x(x,y) dx \quad (7)$$

$$W(x,y) = \frac{1}{r} \int_0^y TA_y(x,y) dy \quad (8)$$

Funkce  $W(x,y)$  je funkcí deformace vlnoplochy, kde  $TA_x$  respektivě  $TA_y$  jsou vzdálenosti polohy ideálního paprsku a polohy paprsku, který byl naměřen. Hodnota  $r$  je vzdálenost pupily (otvor ve stínítku) od posuzované plochy.[12]



Obr. 17. : Transverzální aberace

## **6.3 Shack-Hartmannův test**

### **6.3.1 Historie Shack-Hartmannova testu**

O vývoj Shack-Hartmannovy metody se hlavně zasloužila armáda Spojených států amerických, která v době studené války potřebovala snímkovat satelity na oběžné dráze pomocí pozemních teleskopů. Samozřejmě vyžadovali, aby snímky byly velmi detailní a ostré. Kvalitu snímků velmi ovlivňoval průchod světla atmosférou, kde byly ve vysoké míře ovlivněny turbulencemi. Americká armáda se obrátila na Optical Sciences Center na univerzitě v Arizoně s žádostí, zda je možné zlepšit obrazovou kvalitu snímků umělých družic ze země. Pověřený pracovník Aden Meinel navrhl použití Hartmannova testu. Bohužel se testování neosvědčilo, a to hlavně z důvodu malé intenzity světla a nepřesného vyhodnocování středů stop. Proto Meinel pověřil Dr. Rolanda Shacka, aby test zdokonalil.

Roland Shack navrhl nahradit díry ve stínítku mikročočkami. Problém ale nastal při výrobě pole mikročoček, přičemž každá mikročočka měla mít průměr asi 1 mm a ohniskovou vzdálenost 100 až 150 mm. Proto pověřili Dr. Bena Platta a ten po několika neúspěších pole vyrobil a kompletní Shack-Hartmannův senzor byl úspěšně otestován v roce 1971. [10,11]

### **6.3.2 Využití Shack-Hartmannova senzoru**

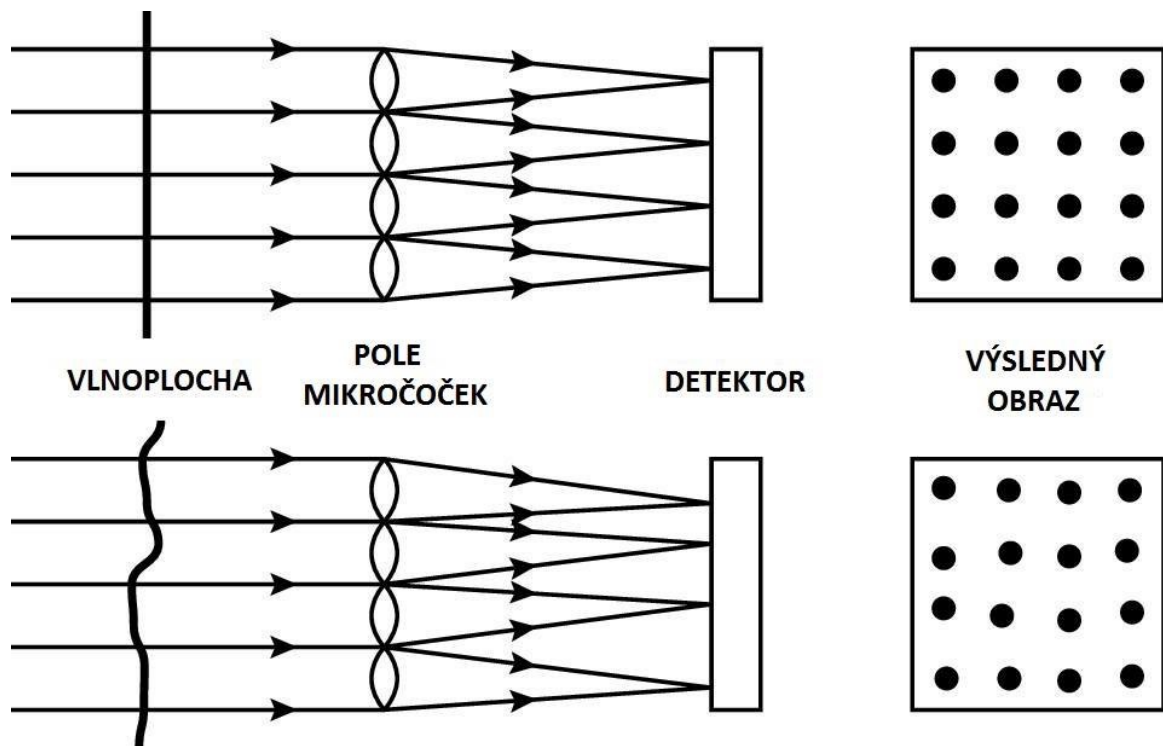
Paralelně s armádou Spojených států amerických objevili potenciál Shack-Hartmannova testu také civilní astronomové. K rapidnímu rozvoji

využití testu v civilním sektoru však došlo až po roce 1977, kdy Ray Wilson z European Southern Observatory navštívil svého kolegu Rolanda Shacka a z této návštěvy si přivezl jedno z originálních polí čoček. V tuto chvíli se začala naplno rozvíjet tzv. adaptivní optika, která do této doby nemohla být použita, protože původní Hartmannův test je pro tyto účely příliš zdlouhavý. Ve chvíli, kdy došlo k rozšíření CCD kamer, nastal v rozvoji adaptivní optiky opravdový boom. Prvním teleskopem, který aktivně využíval adaptivní optiky ke korekci optických aberací byl 3,6 metrový teleskop „ESO“ v roce 1989.

Shack-Hartmannův test záhy našel uplatnění také v medicíně. Ukázalo se, že je velice vhodný pro měření různých očních vad. Josef Bill na Univerzitě v Heidelbergu první použil Shack-Hartmannova testu pro změření topografie rohovky. První měření se uskutečnilo v polovině osmdesátých let dvacátého století. Později tento test rozvinul a upravil pro měření dalších očních vad. [10,11,12]

### **6.3.3 Popis Shack-Hartmannova testu**

Jak již bylo zmíněno, Shack-Hartmannův test je moderní modifikace původního Hartmannova testu. Základem senzoru je místo dírkové clony pole mikročoček a plošný detektor záření nejčastěji CCD nebo CMOS senzor. Světlo, které projde mikročočkami, je fokusováno a zachyceno světelným detektorem. V zachyceném obraze je zobrazeno několik světelných stop, neboť každá mikročočka vytváří své vlastní ohnisko.[12]



Obr. 18. : Schéma Shack-Hartmannova senzoru

### 6.3.4 Uspořádání Shack-Hartmannova testu

Přesné uspořádání Shack-Hartmannova testu samozřejmě závisí na konkrétní aplikaci. Základní uspořádání však zůstává principiálně stejné. Zdrojem světla pro Shack-Hartmannův test je většinou laserový svazek. Měřeným objektem je ve většině případů čočka, u které je nutné zjistit její vlastnosti. V případě, že máme zájem změřit zakřivení vlnoplochy samotného laserového paprsku, mezi zdrojem světla a senzorem se nenachází žádné jiné optické zařízení. Samotný senzor, kterému se v praxi běžně říká Shack-Hartmannův senzor, se skládá ze dvou částí. Těmito částmi jsou pole čoček a detektor. Jako detektor se

používají elektronické světlocitlivé čipy nejčastěji typu CCD. Tento elektronický detektor umožňuje snímání jednotlivých snímků s vysokou frekvencí. Jednotlivé snímky jsou pak většinou přes komunikační rozhraní přesunuty do počítače k dalšímu zpracování. [12]

### 6.3.5 Pole mikročoček Shack-Hartmannova testu

V dnešní době existuje velké množství Shack-Hartmannových senzorů, které jsou odlišné svými konstrukčními parametry. Pole mikročoček se dnes vyrábějí v konfiguracích, liší se hlavně v rozměrech s různými ohniskovými vzdálenostmi viz. (obr. 18.)

VELIKOST POLE	ROZMĚRY POLE [mm]	PRŮMĚR MIKROČOČKY [mm]	OHNISKOVÁ VZDÁLENOST [mm]	OHNISKOVÝ POMĚR
100 × 100	50 × 50	0.5	8.31	16.6
60 × 60	61 × 61	1.0	40.0	40.0
55 × 55	62 × 62	1.1	105.0	95.5
30 × 30	70 × 70	2.2	209.0	95.0

Obr. 19. : Rozměry polí mikročoček

Jsou vyráběna většinou z běžného optického nebo křemenného skla nebo z plastických hmot. Tvar povrchu mikročoček je nejčastěji sférický, ale dají se vyrobit i asferického tvaru.[12]



### **6.3.6 Zpracování dat Shack-Hartmannova testu**

Výsledný obraz bodů po průchodu mikročoček je zaznamenáno fotocitlivým senzorem. Poté se data exportují do PC, kde se pomocí matematických algoritmů spočítá výsledná vlnoplocha paprsku.

### **6.3.7 Popis principu CCD**

Existují dvě základní technologie čipu. CCD (Charge Coupled Device) a CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor). Pro realizaci Shack-Hartmanova testu je vhodnější použít CCD čip z důvodu větší kvality výsledného obrazu, který je při našem testu velmi důležitý. CCD senzor se dá také používat při slabším zdroji světla, takže se využívá např. i ve vesmírných dalekohledech.

CCD je zařízení, které přeměňuje energii dopadajícího světla na energii elektrického signálu. Jedná se o světločivý křemíkový plátek uložený nad kovovou elektrodou, která je izolována vrstvou  $\text{SiO}_2$  (křemen). Základním principem celého zařízení je opakování dvou základních kroků 25krát za sekundu. Dají se používat i při slabším zdroji světla.

V prvním kroku dopadají fotony na atomy křemíku uvnitř CCD, odkud se na základě fotoefektu uvolňují záporně nabitě elektrony. Klade

nabitá elektroda, která je umístěná pod každým pixelem a oddělená od křemíku izolační vrstvou křemene, zachycuje takto uvolněné elektrony. Dopadne-li na CCD více světla, vytváří se obraz, v němž jasné oblasti odpovídají pixelům, z nichž se uvolnilo více elektronů. Druhým krokem je pak čtení tohoto obrazu pixel po pixelu, čímž vzniká videosignál. Měření (čtení) probíhá tak, že se kladný náboj vlnivě přesouvá podél elektrod v každém sloupci pixelů a „stahuje“ elektrony z jednoho pixelu na druhý. Elektrony v nejnižším čidle sloupce se pak přenesou do CCD uspořádaných v řadě za sebou, přičemž každá řada obsahuje svoji sadu elektrod. Ty tlačí skupiny elektronů jednu po druhé až k terminálu na konci zařízení. Po přečtení celé řady se celý proces opakuje, takže se postupně přesouvá další řada elektronů. Tímto způsobem se všechny elektrony zachycené na čidlovém mikroprocesoru přenesou k terminálu a tam vytváří kontinuální signál. Vrcholy na tomto signálu odpovídají nejjasnějším pixelům, tj. místům, z nichž se uvolnilo nejvíce elektronů.

[13]

# 7 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vypracovat rešerši, nastudovat problematiku měření zakřivení vlnoplochy a určit vhodnou metodu měření pro naši úlohu s deformabilním zrcadlem. Důležitou součástí této práce musel být fyzikální základ, který jasně definuje všechny uvedené pojmy, které jsou při měření a následném vyhodnocení potřebné. V další kapitole jsem definoval pojem deformabilní zrcadlo, které je v našem pokusu hlavním prvkem.

V hlavní části této práce jsem se zabýval možnými typy měřících senzorů vlnoploch, ze kterých jsem měl určit jednu metodu, kterou aplikujeme v úloze společně s deformabilním zrcadlem. Ze všech metod jsem pro naše účely na základě lepší konstrukční dostupnosti vybral metodu klasického Hartmanna. Hartmannova zkouška je oproti modernější Shack-Hartmannově vhodnější ve své jednoduchosti a lepší vyrobiteľnosti, protože pole čoček pro 300mm deformabilní zrcadlo by bylo velmi nákladné a při potřebě velké přesnosti také velmi náročné na výrobu.

Tato práce by měla sloužit jako teoretický základ pro vytvoření výpočtového modelu v Matlabu určeného k vyhodnocení tvaru vlnoplochy a její následné narovnání pomocí deformabilního zrcadla. Na výpočtovém modelu jsem pracoval, ale zatím není plně funkční, proto se mu budu v budoucnu nadále věnovat, aby byl použitelný pro naši aplikaci. Také bych se chtěl zabývat návrhem masky pro Hartmannův test a uskutečnit měření deformace vlnoplochy a následného narovnání naším deformabilním zrcadlem.

# 8 Seznam použité literatury

1. FUKA, Josef. Optika a atomová fyzika I.: Optika. SPN, 1961.
2. NOVÁK, Adam. Hartmannův test-rešerše. Liberec: TUL, 2010
3. NOVÁK, Ivo. Účinky elektromagnetického pole na lidský organismus. [on-line]. 2015. Dostupné z: <http://elektro.tzb-info.cz/docu/clanky/0133/013319o4.jpg>
4. BARTONÍČEK, Jan. Zařízení pro měření vlnplochy mikroskopových objektivů. Brno: VUT 2013
5. Maťátko. Milan, Optika vlastnosti světla. OP vzdělání pro konkurenceschopnost
6. Deformable Mirror Concepts. [on-line]. Poslední aktualizace 2016. Dostupné z [http://www.liquisearch.com/deformable\\_mirror/deformable\\_mirror\\_concepts](http://www.liquisearch.com/deformable_mirror/deformable_mirror_concepts)
7. Zicha, Josef, Němcová, Šárka, Orlita, Radek. Adaptivní bimofrní zrcadlo. Praha: ČVUT 2013
8. Hošek, Jan, Měření kvality asférických optických ploch, Jemná mechanika a optika. [online], 2006 dostupné z: <http://jmo.fzu.cz/2006/Jmo-02/JMO-200602.pdf>
9. Kajnar, P., Kajnar, M., Současné trendy a možnosti v bezkontaktní analýze tvaru optických ploch, Jemná mechanika a optika [online], 2010. dostupné z: <http://jmo.fzu.cz/2010/Jmo-05/JMO-201005.pdf>
10. Neal, , Daniel R. Shack-Hartmann sensor engineered for commercial measurement Applications. Albuquerque. WaveFront Sciencies. 2004.
11. Neal , Daniel R. – SCHWEIGERLING, Jim. Historical Development of the Shack- Hartmann Wavefront Sensor, Tuscon, University of Arizona.
12. Malacara, Daniel. Optical shop testing. 3rd ed. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2007. ISBN 0471484040.

13. Reichl, Jaroslav. CCD - základní princip [on-line] dostupné z <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/748-ccd-zakladni-princip>
14. Vraštil, M., Využití Shack-Hartmannova senzoru pro měření kvality obrazu optických soustav, Jemná mechanika a optika [online], 2009, 2, dostupné z: <http://jmo.fzu.cz/2009/Jmo-02/JMO-200902.pdf>
15. Novák J., Novák P., Interferometrické metody vyhodnocování fáze vlnového pole v optice, Jemná mechanika a optika [online], 2008, 11-12, dostupné z: <http://jmo.fzu.cz/2008/Jmo-11-12/JMO-200811-12.pdf>
16. Mikš A., Novák J., Modifikace Shack-Hartmannova senzoru, ČVUT Praha [online] dostupný z: [http://dsp.vscht.cz/konference\\_matlab/matlab03/miks3.pdf](http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/matlab03/miks3.pdf)
17. Zicha, Josef a Šárka NĚMCOVÁ. Základy konstrukce přístrojů: doplňkové skriptum. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 8001017516.
18. Interference [online] dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Interference>
19. Základy fyzikálně-optických měření II – optometrie: Návod k úlohám, Brno: Masarykova univerzita, 2007
20. Havelka B., Geometrická optika I. díl, 1. vydání, Nakladatelství ČSAV Praha, 1955