

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI
KATEDRA OPTIKY



ASFÉRICKÉ PLOCHY V OPTICE

Bakalářská práce

VYPRACOVALA:

Jana Darebníková

obor : PŘÍSTROJOVÁ OPTIKA

studijní rok: 2008/2009

VEDOUcí BAKALÁŘSKÉ PRÁCE:

RNDr. Jaroslav Wagner, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci vypracovala samostatně a uvedla veškerou použitou literaturu a zdroje uvedené v seznamu použité literatury.

V Olomouci dne

.....

Podpis

Poděkování patří vedoucímu mé bakalářské práce RNDR.Jaroslavu Wagnerovi, Ph.D. , za ochotu, srozumitelné a věcné připomínky během tvorby práce a v neposlední řadě za věnovaný čas.

OBSAH:

1. ÚVOD	5
2. ASFÉRIKÉ PLOCHY A JEJICH VLASTNOSTI.....	6
2.1. Cartesiovy plochy.....	6
2.2. Osově nesymetrické plochy.....	10
2.3. Plochy obecné, sférické.....	12
3. METODY KONTROLY A MĚŘENÍ ASFÉRIKÝCH PLOCH.....	13
3.1. Kontaktní metody.....	13
3.2. Bezkontaktní metody.....	15
3.2.1. Metody geometrické optiky.....	16
3.2.2. Stínové zkoušky.....	18
3.2.3. Interferometrické metody měření.....	23
4. VÝROBA ASFÉRIKÝCH PLOCH.....	27
4.1. Broušení.....	28
4.2. Metody leštění.....	29
4.3. Metody tvarování.....	33
4.3.1. Metody kopírování založené na tvaru nástroje.....	33
4.3.2. Tvarovací metody založené na výpočtech.....	36
5. VYUŽITÍ ASFÉRIKÝCH POVRCHŮ.....	37
5.1. Využití v astronomii.....	37
5.1.1. Dvou-zrcadlové teleskopy.....	37
5.1.2. Tří-zrcadlové teleskopy.....	40
5.1.3. Čtyř-zrcadlové teleskopy.....	41
5.2. osvětlovací soustavy.....	42
5.3. Promítací přístroje.....	42
5.4. Fotografické objektivy.....	45
5.5. Brýlová optika.....	46
6. ZÁVĚR.....	47
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	48

1. Úvod.

Cílem mé bakalářské práce je sepsat souhrn informací o asférických plochách v optice.

Práce je rozdělena do čtyř hlavních částí, z nichž v každé se věnuji důležité kapitole v oblasti asférických ploch.

Nejprve se věnuji členění a popisu asférických ploch využívaných v optické praxi. Ve druhé části jsou sepsány metody kontroly a měření těchto ploch, které dělím na metody kontaktní a bezkontaktní, kde právě bezkontaktní metody měření vyzdvihují, pro jejich přesnost a také proto, že nedochází k přímému styku mezi měřidlem a měřenou plochou, tudíž k následnému jejímu poškození. Třetí hlavní kapitola je zaměřena na stručný popis výrobních technik pro výrobu asférických optických členů. Závěrečná čtvrtá část mé práce je souhrnem využití asférických ploch v optice, a to jak v přístrojové optice, jako jsou astronomické teleskopy s asférickými zrcadly a jinými korekčními prvky, tak v podobě členů do osvětlovacích soustav, promítacích přístrojů a fotografických objektivů. S použitím asférických ploch lze dosáhnout požadovaných vlastností optické soustavy poměrně jednoduchou stavbou. Často je to jediný způsob jak vyřešit optickou soustavu. Základní tvary asférických ploch se používají ke konstrukci asférických soustav již od 19.st. Složitá výroba dříve bránila širšímu využití. K výrobě asféry je potřeba zajistit posuv nástroje po obrobku ve dvou stupních volnosti. Z počátku bylo možné vyrábět pouze válcové plochy, parabolické a hyperbolické s velkými ohniskovými vzdálenostmi a Schmitovu desku statickou deformací při výrobě, toto změnil rozvoj automatických obráběcích center, který umožnil vyrábět asférické plochy libovolného tvaru s vyhovující přesností, kterou je možno ve výrobě opakovaně udržet, až $0,1\mu\text{m}$.

Důležité zastoupení mají asférické plochy i v brýlové optice ke korekci očních vad jako je presbyopie, nebo astigmatismus. Tyto korekční prvky zajišťují vysoce komfortní vidění pro člověka.

2. ASFÉRICKÉ PLOCHY A JEJICH VLASTNOSTI.

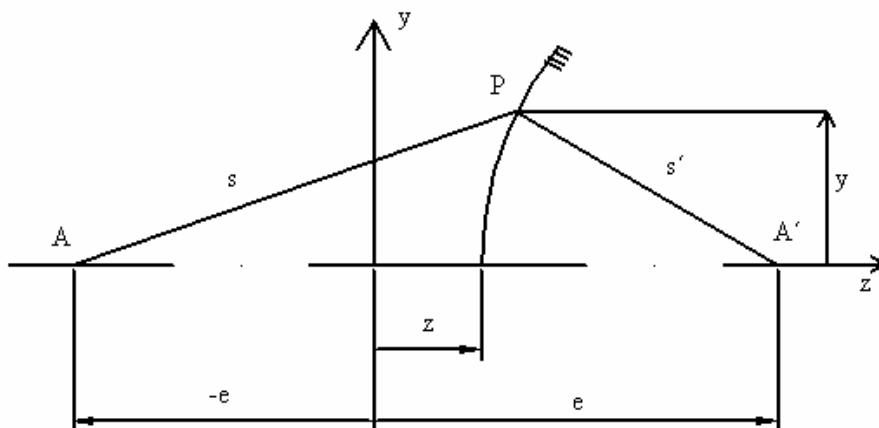
Hlavní použití asférických ploch v optice je korekce optických aberací dané soustavy a dosažení stigmatického zobrazení, předmětový bod se zobrazí ideálně do sdruženého obrazového bodu. Pro zobrazení ideální rotační plochy, která splňuje podmínky ideálního zobrazení je nutné vycházet ze základního principu šíření světla a to Fermatova principu.

Ten říká, že optické záření se šíří v prostoru z jednoho bodu do druhého vždy po takové křivce, aby její optická dráha urazila za nejkratší čas. Rovnice ideálního rozhraní z obr.1 musí splňovat tuto podmínku:

$$sn + s'n' = 2a = konst. \quad (1)$$

vyjádříme-li geometrické dráhy s a s' pomocí e, y a z , získáme rovnici plochy stigmatického zobrazení:

$$n\sqrt{(z+e)^2 + y^2} + n'\sqrt{(e-z)^2 + y^2} = 2a \quad (2)$$



Obr.1: Schéma určení rozhraní ideálního zobrazení bodu A do A'.

2. 1. Cartesiové plochy:

poledník plochy, která zobrazuje bod na optické ose stigmaticky znovu do bodu je křivka 4. stupně a odpovídající plocha je rotační plocha 4. stupně.

Jedině tento typ plochy je schopen zajistit stigmatické zobrazení, reálný obraz bodu je v konečné vzdálenosti od Cartesiové plochy, (jako první na tyto plochy upozornil Descartes, proto se těmto plochám říká také Descartesovy plochy). Výroba těchto ploch

je možná, ale dosti složitá, proto se v praxi častěji užívají degenerované plochy nikoli 4. ale 2. stupně.

Prvním případem degenerace stigmatické plochy rozhraní $n=n'$ je vyjádření obrazu na zrcadle, tím získáváme rovnici:

$$z^2(a^2n^2 - e^2n^4) + y^2a^2n^2 = a^2(a^2 - n^2e^2) \quad (3)$$

kde po dosazení $n=1$ a kde platí $a > e$ dostáváme rovnici **elipsy** ve středovém tvaru

$$\frac{z^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2 - e^2} = 1 \quad (4)$$

kde $e = \sqrt{a^2 - b^2}$ se nazývá lineární výstřednost, neboli excentricita. Je to poloviční vzdálenost mezi geometrickými ohnisky, a a b jsou velikosti poloos optické plochy. Geometrická ohniska jsou pak sdružené body stigmatického zobrazení eliptickou plochou.

Pokud uvažujeme v rovnici (4) $a < e$, pak dostáváme rovnici **hyperboly** ve středovém tvaru:

$$\frac{z^2}{a^2} - \frac{y^2}{e^2 - a^2} = 1 \quad (5)$$

zde také platí, že geometrická ohniska jsou sdružené body stigmatického zobrazení a nikoli optická ohniska. Pro excentricitu hyperboly platí vztah $e = \sqrt{a^2 + b^2}$, kde a i b jsou velikosti poloos.

Když zvolíme $2a=0$ ($2a$ je konstanta) dostaneme degenerovanou rovnici meridiánu 2. řádu, tvar kružnice:

$$z^2 + y^2 + 2ze \frac{n^2 + n'^2}{n^2 - n'^2} + e = 0 \quad (6)$$

kde kružnice je posunutá vůči středovému tvaru o $m = -e \frac{n^2 + n'^2}{n^2 - n'^2}$ a její poloměr

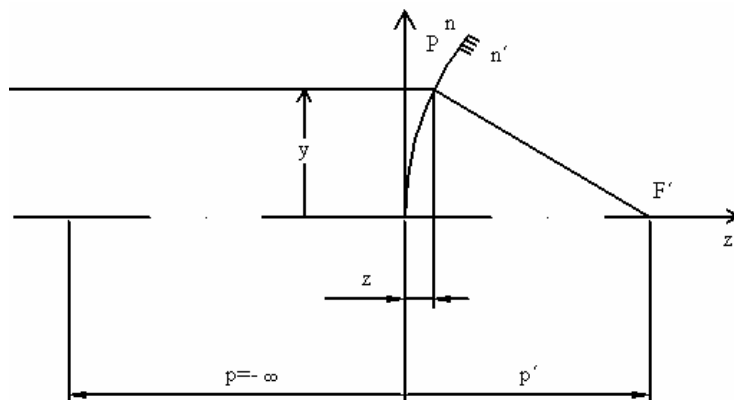
křivosti je $r^2 = n^2 \cdot e^2$. Také kulová plocha vykazuje sdružené body stigmatického zobrazení. a platí pro ně vztah mezi sečnými vzdálenostmi p a p' . Kde

$$pn = p'n' \quad (7)$$

Tyto body se využívají při konstrukci aplanatických sférických čoček. Jelikož aplanatické menisky nevytvářejí reálná obraz je potřeba je kombinovat s jinými optickými prvky.

Dalším požadovaným typem stigmatického zobrazení je zobrazení do nekonečna. Podle Fermatova principu z obrázku 2. vyjádřit rovnici požadovaného stigmatického rozhraní:

$$pn = n'\sqrt{(p'-z)^2 + y^2} + nz \quad (8)$$



Obr.2:schéma rozhraní ideálně zobrazující
z nekonečna do obrazového ohniska F' .

U toho zobrazení stačí plochy 2. řádu. Předpokládejme, že $n < n'$ a úpravou rovnice (8) získáme rovnici **elipsy** ve vrcholovém tvaru:

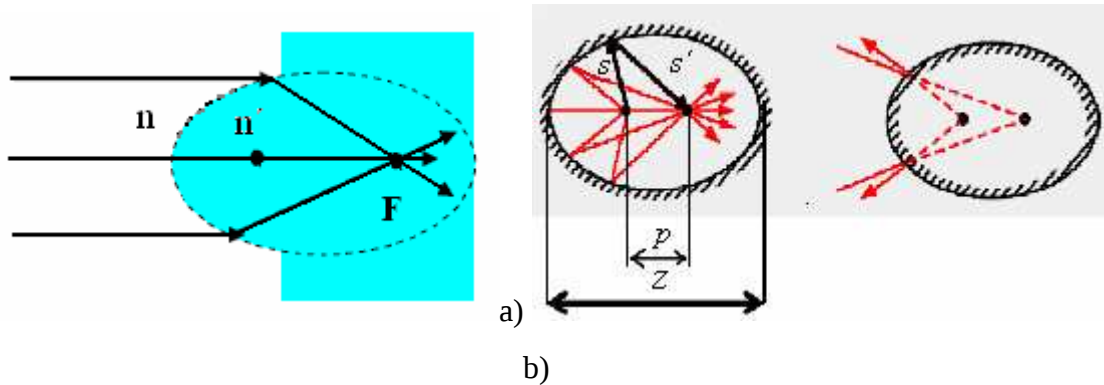
$$\frac{\left(z - \frac{p'n'}{n'+n}\right)^2}{\left(\frac{p'n'}{n'+n}\right)^2} + \frac{y^2}{\frac{p'^2(n'-n)}{n'+n}} = 1 \quad (9)$$

pro poloosy zde platí:

$$a = \frac{pn}{n'+n} \quad \text{a} \quad b = p'\sqrt{\frac{n'-n}{n'+n}} \quad (10)$$

Asfericita elipsy je: $-1 < K < 0$ (protáhlá elipsa ve směru šíření svazku)

$K > 0$ (zploštělá elipsa ve směru šíření svazku)

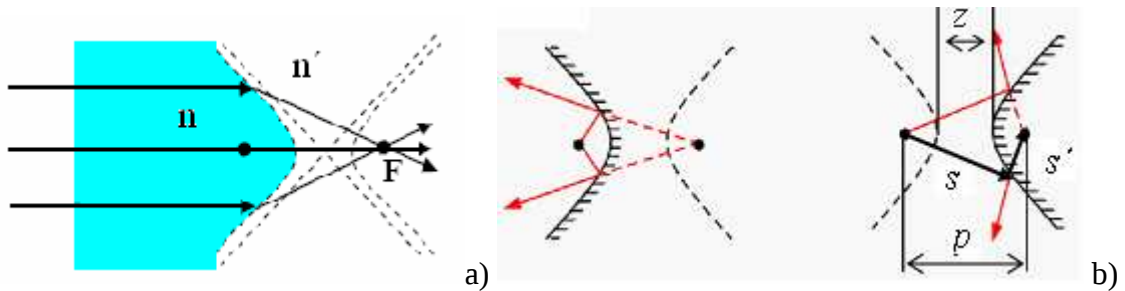


Obr.3:a) Elipsoidní lámavá plocha $n < n'$

b) Elipsoidní odrazná plocha

Zaměníme-li indexy lomu $n > n'$ vyjde z rovnice (8) rozhraní ve tvaru **hyperboly** s rovnicí ve vrcholovém tvaru:

$$\frac{\left(z - \frac{p'n'}{n' + n}\right)^2}{\left(\frac{p'n'}{n' + n}\right)^2} - \frac{y^2}{\frac{p'^2(n' - n)}{n' + n}} = 1 \quad (11)$$



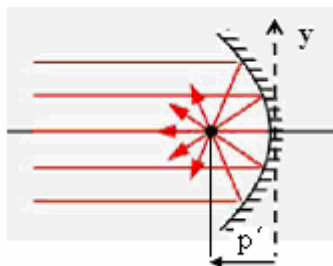
Obr.4: a) Hyperboloidní lámavá plocha ($n > n'$)

b) Hyperboloidní odrazná plocha

Asfericita hyperboly: $K < -1$

Poslední možností pro ideální zobrazení z nekonečna do bodu je použití reflektivního rozhraní(zrcadla), zde platí $n = -n'$. Úpravou rovnice (8) získáme rovnici, která definuje tvar **paraboly**.

$$y^2 = 4p'z \quad (12)$$



Obr.5: paraboloidní odrazná plocha

Asfericita paraboly: $K = -1$

Z uvedených poznatků je patrné že pro konstrukci optických rozhraní ideálně zobrazujících soustav se můžeme omezit na kuželosečky z nichž největší uplatnění v optické výrobě asférických optických povrchů má plocha typu rotačního hyperboloidu.

2.2. Osově nesymetrické plochy

Cylindrické a torické plochy

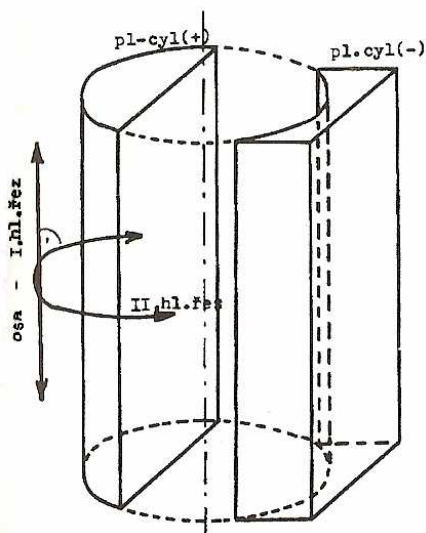
a) Plan-cylindrické čočky: Tvar této čočky je tvořen funkčními plochami odvozenými z plochy válce. Řezem rotačního válce, (který vidíme na obr.6) vedením rovnoběžně s podélnou osou rotačního válce. Podle vzdálenosti dělicí roviny od osy válce menší, či větší než je daný poloměr válce, získáme tak podobu konvexní, či konkávní cylindrické čočky.

Charakteristika cylindrických čoček: U cylindrických skel se v celé škále proměnných optických účinků rozlišující dva hlavní směry s extrémními hodnotami. V I.hlavním řezu plan-cylindrického skla probíhá každá rovina procházející osou válce. Optická mohutnost je zde nulová. Naopak u II.hlavního řezu, kde rovina kolmá k rotační ose váce protíná plan-cylindr a má maximální optický účinek.

Mezi I. a II. hlavním řezem se mění optický účinek čočky spojitě podle vztahu :

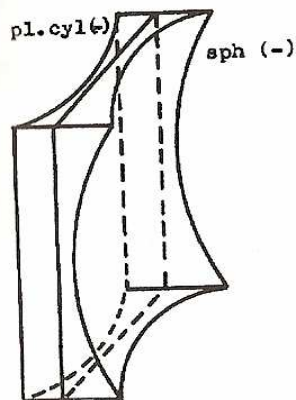
$$\varphi'_{\alpha} = \varphi'_{\max} \cdot \cos^2 \alpha \quad (13)$$

kde úhel α svírá obecná osa s osou II.hlavního řezu. Rozdíl optických mohutností v obou na sebe kolmých směrech určuje astigmatickou diferenci. U plan-cylindrické čočky se astigmatická diference rovná optické mohutnosti válcové plochy.



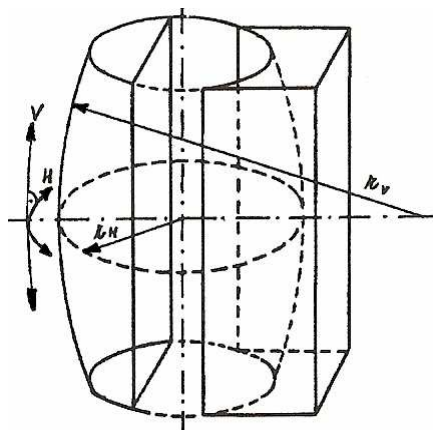
Obr.6: Schéma plan-cylindrické čočky. [2]

b) Sféro-cylindrické čočky: U tohoto typu čoček je základní plan rovina nahrazena plochou sférickou. Na obr.7 vidíme jednu z mnoha realizací sféro-cylindrických čoček. Výsledná optická mohutnost se udává ve dvou hodnotách, které jsou měřitelné v I. a II. hlavní ose. V I.hlavní ose již není hodnota nulová, nýbrž rovna sférické hodnotě plochy.



Obr.7: Schéma sféro-cylindrické čočky. [2]

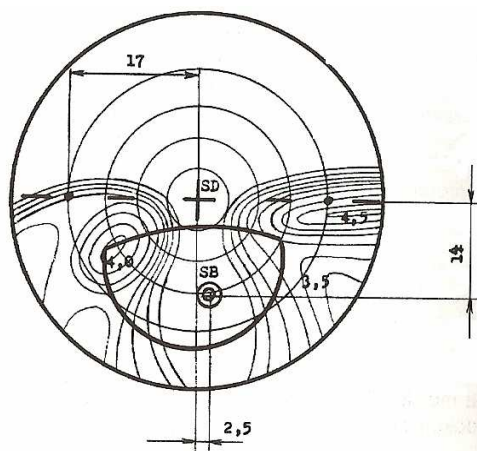
c) Sféro-torické čočky: Propočty a měřením se zjistilo, že sféro-cylindrické i plan-cylindrické čočky mají nepřijatelný stupeň astigmatismu šikmých paprsků při pohledu funkční periferní plochou čočky. Tuto vadu zobrazení odstraníme vhodným prohloubením cylindrické plochy. Torická plocha vzniká rotací oskulační kružnice mimo vlastní střed. Tvarově připomíná torická plocha sud, jak je to vidět na obr.8.



Obr.8: Schéma sféro-torické čočky. [2]

2.3. Plochy obecné, asférické.

Multifokální čočky: na obr.9 je zakreslen hrubý tvar průměrného multifokálního skla, jedná se o typ Varilux. Oblast se středem (SD) je určen pro korekci do dálky, která je i běžně měřitelná na fokometru. Střed (SB) je 14 mm pod středem (SD) a jedná se o střed oblasti do blízka. Na multifokálních čočkách je oblast do blízka značena kroužkem. Centrální pás je tvořen spojnicí těchto středů SD a SB, kde se optická mohutnost spojitě mění. Dříve byl tento centrální pás úzký 5-6 mm, což bylo nevyhovující a vedlo k astigmatismu periferní části. Nyní je centrální pás veliký více než 12mm, což je pro uživatele vyhovující. Dále na obr.9 vidíme pro srovnání náznak bifokálního segmentu, který u bifokálních skel zaručuje korekci do blízka. U bifokálních, nebo trifokálních skel není přechod mezi hodnotou do blízka a do dálky plynulý, jako je tomu u čočky multifokální, tudíž nejsou tak pohodlné, ale jejich cena je výhodnější.



Obr.9: Schéma multifokální čočky. [2]

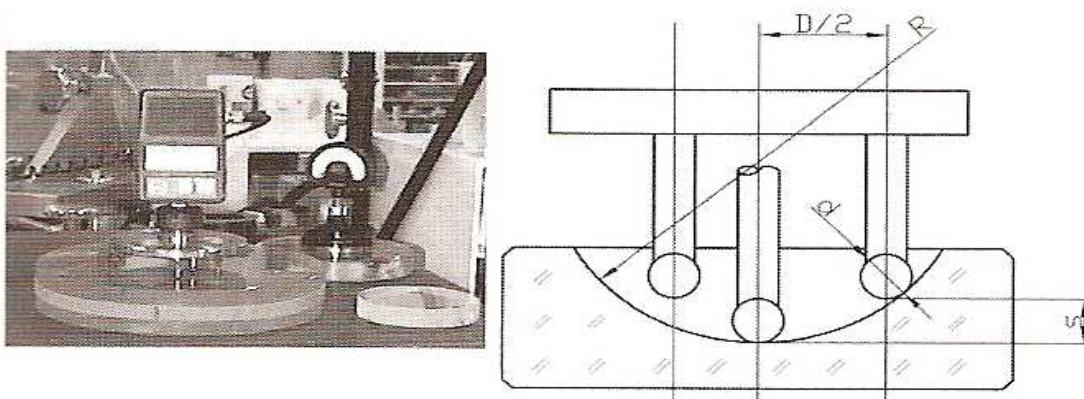
3. METODY KONTROLY A MĚŘENÍ ASFÉRICKÝCH PLOCH.

Při optické výrobě vlivem nedokonalosti technického výrobního procesu vznikají odchylky od požadovaného tvaru. Úkolem kontroly je zjistit, zda požadovaná součást splňuje dané parametry s určenými výrobními tolerancemi. Čím složitější součást vyrábíme, tím větší důraz je kladen na kontrolní operace během procesu výroby.

Kontrolní metody prováděné na asférických plochách lze rozdělit do dvou skupin, a to na kontaktní a bezkontaktní metody. Většinou se tyto metody kombinují pro přesnější vyhodnocení měřených parametrů. Zejména v kusové výrobě je třeba využívat obou metod, jelikož tato výroba je velmi drahá.

3.1. Kontaktní metody:

Sférometr: jedná se o nejjednodušší přístroj pro kontrolu optických ploch.



Obr.10: Sférometr pro kontrolu geometrie optických ploch a jeho schéma. [9]

Sférometr má v základním provedení tři nožky zakončené přesnými kuličkami ve středu je měřicí dotek, který určuje výšku vrchlíku poloměru křivosti v bodu měření. Poloměr křivosti můžeme vypočítat z rovnice:

$$R = \frac{(D/2)^2 + s^2}{2s} \pm \frac{d}{2} \quad (14)$$

kde D je průměr roztečné kružnice nožek měřidla, s je změřená výška kulovitého vrchlíku

a d je průměr dosedacích kuliček viz. obr.10.

Přesnost odečítání výšky kruhového vrchlíku závisí na typu použitého snímače, 10 až 0,1 μ m. Nevýhodou tohoto měření je, že nezískáme informace o celé ploše z jednoho měření, ale změřením sítě bodů a jejich následným vyhodnocením. U asférických ploch je přesnost tohoto měření vždy nižší v důsledku rozdílnosti poloměrů křivosti plochy v rovinách nožek. Pro asférické plochy se proto používá dvou-nožkového sférometru doplněného o skleněný kalibr na měřicím doteku. Při přiblížení tohoto kalibru k měřenému povrchu budeme pozorovat interferenční Newtonovy kroužky a podle nich určíme tvar měřené plochy. Přesnost sférometru pro měření asférických ploch se pohybuje v rozmezí 0,1-0,001mm, proto se používají hlavně pro kontrolu tvaru asférických ploch během broušení.

Třísouřadnicové měřicí stroje: jedná se o přesné masivní stroje o různých velikostech na vzduchovém vedení. Měřicí doteky jsou tvořeny safírovými kuličkami viz. obr.11.



Obr.11: Výměnné dotekové hlavice třísouřadnicových strojů. [9]

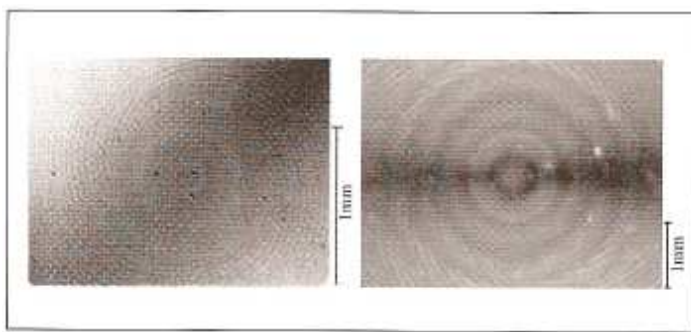
Stroj reaguje na přítlak 0,01N po přiblížení k měřenému povrchu. Podle typu stroje jsou různé tolerance měření rozměrů a to 20μm-10nm. Pro co nejpřesnější měření musejí být splněny přísné tepelné podmínky a antivibrační stabilita, proto byly dříve všechny měřicí centra umístěná do podzemních prostor, kde byly otřesy a rozruchy okolí nejnižší.

Výhodou této metody je možnost provádět kontrolu geometrie s velkou přesností nejen lokálně, ale i po celé ploše měřené součástky. U asférických ploch se na těchto strojích kontroluje hodnota vrcholového poloměru křivosti r_e , ta lze určit z polohových souřadnic $[x_i, y_i, z_i]$ a odpovídajících rádiusů vektorů $r_i (r^2 = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)$ alespoň u čtyř bodů změřených v oblasti vrcholu. Pokud změříme pouze čtyři základní body, můžeme určit vrcholový poloměr křivosti r_e z rovnice

$$Ar_e = b \quad (15)$$

$$\text{kde v maticovém tvaru: } A = \begin{pmatrix} x_1 - x_2 & y_1 - y_2 & z_1 - z_2 \\ x_1 - x_3 & y_1 - y_3 & z_1 - z_3 \\ x_1 - x_4 & y_1 - y_4 & z_1 - z_4 \end{pmatrix}, \quad b = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} r_1^2 - r_2^2 \\ r_1^2 - r_3^2 \\ r_1^2 - r_4^2 \end{pmatrix} \text{ a } r_e = \begin{pmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{pmatrix}$$

Mikrodrsnost: dalším parametrem, který je třeba sledovat je mikrodrsnost povrchu způsobená diamantovým nástrojem (trajektorií a vibracemi) viz. obr.12. Mikrodrsnost je potřeba měřit na ploše několika cm^2 aby nedošlo k poškození plochy, vytvoří se její replika z materiálů na bázi pryskyřic a až tato replika se proměřuje drsnoměrem, interferenčním, nebo skenovacím mikroskopem.



Obr.12: Různé mikrodrsnosti povrchu, které vznikly při jejich broušení. [9]

3.2. Bezkontaktní metody:

Bezkontaktní metody, které používáme pro měření asférických ploch můžeme rozdělit do čtyř skupin, a to na metody geometrické optiky, stínové zkoušky, metody

interferometrické a metody moire. Tyto metody jsou výhodnější, protože nedochází k přímému kontaktu mezi měřidlem a měřenou plochou, tak se nemohou navzájem ovlivňovat a hlavně nemůže dojít poškození měřeného povrchu, nebo k jiné deformaci.

3.2.1. Metody geometrické optiky

Mezi tyto metody řadíme měření pomocí profiloměru, Hartmanovu zkoušku a Shack-Hartmanovu zkoušku.

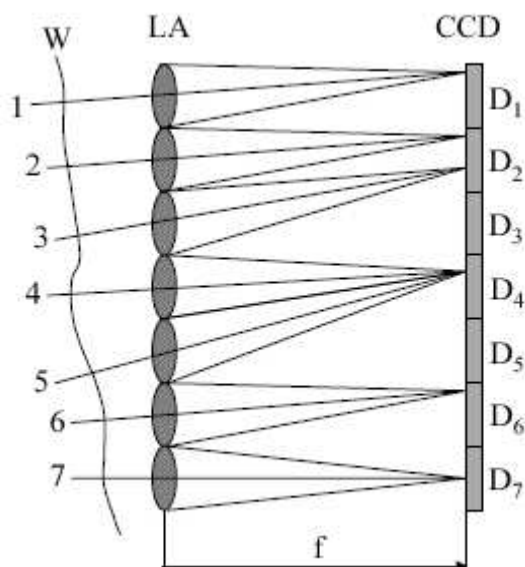
Profiloměr: principiálně nejjednodušší metoda pro měření tvaru asférických ploch.

Jedná se o zařízení s kolimátorem, ze kterého vychází rovnoběžný svazek paprsků různého průměru do nějž se vkládá měřená součást. Obraz sledujeme pomocí objektivu, snímáme jej kamerou a následně profil vyhodnotíme počítačem. Profiloměr dosahuje rozlišení pod 1 μ m. Výhodou těchto přístrojů je možnost sledovat celou plochu v řezu, snadno se zpracovávají a vyhodnocují výsledky, naopak nevýhodou je, že jej nelze použít pro pozorování tvarů dutých ploch.

Hartmanova zkouška: zkouška je založena na realizaci úzkých paprsků procházejících optickou soustavou, které jsou realizované pomocí Hartmanovy clony se spoustou malých otvorů. Tato clona je vložena do vstupní pupily kontrolované optiky. Osvětlíme-li ji rovnoběžným svazkem paprsků, tak že se v obrazovém prostoru vytvoří množina bodů, které jsou identifikovány ve dvou rovinách navzájem posunutých o známou vzdálenost na optické ose. Chod jednotlivých paprsků lze vypočítat z obou obrazů, také polohu ohniska soustavy a deformovaný tvar měřené optické plochy.

Shack-Hartmanovy metody: ke zpracování klasické Hartmanovy metody bylo zapotřebí vyrobit rastr stejně veliký jako měřená plocha, proto přepracována do jiné podoby, kde klasický rastr umístěvaný do vstupní pupily je nahrazen čočkovým rastrem typu hmyzího oka, který je umístěn v rovnoběžném svazku paprsků vycházejících z kolimátoru za obrazovou rovinou. Paprsky vytvořené čočkovým rastrem jsou promítnuty objektivem a kolektorem na fotodetektor na němž vytvoří síť bodů vytvořených jak měřenou součástí, tak referenčním zdrojem. Srovnáním polohy těchto bodů se určí odchylky geometrie měřené optické plochy. Výhodou této metody jsou malé rozměry čočkového rastru i měřících prvků. Nevýhodou je pak vysoká cena, proto poslední úprava této metody je vložení clony, jakožto rastru přímo před snímací CCD prvek a bodový zdroj je umístěn do uzlového bodu snímacího objektivu. Shack-Hartmanův senzor je tvořen maticí mikročoček LA a CCD senzorem. Plocha senzoru je

v počítači rozdělena na dílčí senzory D_i podle toho kolik mikročoček matice obsahuje . Na obr.13 má matice 7 mikročoček a tak je CCD senzor rozdělen na sedm dílků (dílčích senzorů) $D_1 - D_7$. Vlnoplocha W má obecný tvar a tak její normály mají v různých místech různý směr. Mikročočky soustředí svazek paprsků do ohniskové roviny, kde se nachází i CCD senzor. Velikost mikročoček je stejná jako velikost dílků senzoru.



Obr.13: Schéma Shack-Hartmanova senzoru [3]

Někdy se může stát, že na jednom dílku detektoru se bude nacházet více stop, v tom případě nejsme schopni rozhodnout od které části vlnoplochy pochází daná stopa. To vidíme na obr.13, kde na detektorech D_2 a D_4 se nacházejí dvě stopy. Abychom tomuto zabránili musíme omezit měřící rozsah senzoru na takové hodnoty vlnoplochy, jejíž velikost bodové stopy nepřesahuje hodnotu $\pm D/2f$, kde f je ohnisková vzdálenost mikročočky a D je její velikost.

Jednou z metod geometrické optiky je použití laserového svazku a rozmítače. Rozmítaný paprsek rastruje měřenou plochu a jeho odraženou stopu snímáme pomocí fotodetektoru. Tvar deformace určíme číselně z odchylek stopy od hlavní pozice. Tuto metodu obvykle kombinujeme s interferenčními metodami a tím docílíme, že lze proměřovat i plochy velkých rozměrů s dostatečnou přenosností.

Všechny bezkontaktní geometrické metody používáme pro referenční měření a tak docílíme mnohem přesnějších finálních měření interferenčními metodami.

3.2.2. Stínové zkoušky.

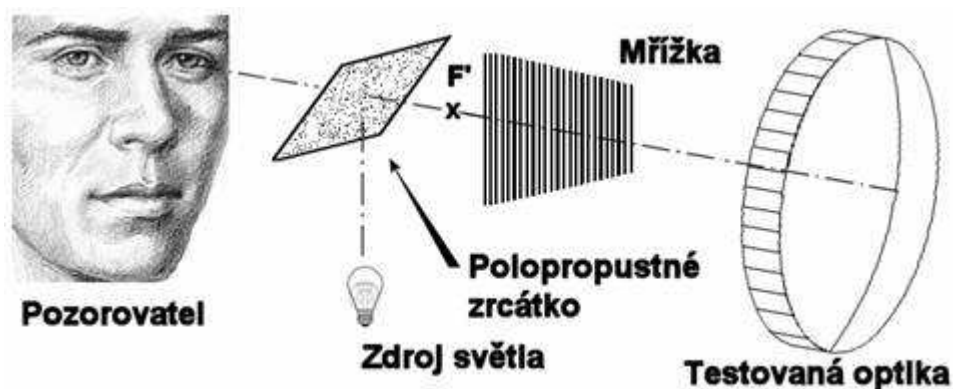
Stínové zkoušky člením do dvou skupin, kde základním testem je Foucaltova zkouška a její modifikací přesnější Ronchiho test.

Foucaltova zkouška: jedná se o nejstarší typ testu, který vycházel z toho, že paprsky vycházející ze středu křivosti na vnitřní stranu plochy kulového tvaru se bude odrážet zpět do jejich středu. Z toho plyne princip foucaltovy zkoušky. Do středu křivosti umístíme bodový zdroj světla a zrcadlo budeme ze stejného místa pozorovat, to se musí po celé ploše najednou rozzářit. Budeme-li pozorovanému paprsku a to do středu křivosti vkládat překážku (nejčastěji se jedná o otrou čepel), pokud je plocha přesně vyrobená, tak zhasne celá najednou. Pokud budeme vkládat překážku před středem křivosti, musí plocha zhasínat postupně ze směru vkládání čepele. U této zkoušky jsou vlastně zkoumány odstíny šedi. Foucaltova zkouška napomáhá nejen přesně určit střed křivosti plochy, ale hlavně odhalí vady na kontrolované ploše. Pokud má některá část plochy zrcadla menší poloměr křivosti, odhalíme jej vložením čepele do středu křivosti zrcadla, kde se za vadnou částí plochy objeví stín, který bude přicházet proti směru vkládání ostré čepele ještě dříve, než se zastíní celá plocha. Tato zkouška poukazuje přímo na zóny s vadami, nevýhodou této zkoušky je potřeba přísně bodového zdroje světla (často se využívá alobalového stínítka, do kterého je udělána díрка velmi ostrou špičkou jehly). Aby bylo pozorování efektivní, je tato zkouška prováděná za absolutní tmy, jelikož množství světla poskytnuté stínítkem je velmi malé nahradíme foucaltovu zkoušku modifikací, tzv. Ronchiho testem.

Ronchiho test: Ronchiho test je založen na principu Foucaltovy zkoušky, ale hlavní je, že odstraňuje nevýhody bodového zdroje světla. Místo něj se používá optické mřížky o hustotě zhruba 5č/mm a to jak ve zdroji světla tak pro pozorování.

Realizace Ronchiho testu: Testujeme objektiv, (např. zrcadlo). Do dvojnásobku ohniskové vzdálenosti umístíme světelný zdroj. Vzdálenost do které se promítne obraz objektivu je dána příslušnou zobrazovací rovnicí. Testovací mřížku umísťujeme za, nebo před obraz zdroje. Při pozorování testovaného objektivu (zrcadla) přes tuto mřížku, uvidíme na jeho povrchu soustavu tmavých a světlých pruhů. Tato soustava pruhů se nazývá Ronchigram. Posouváním testu směrem k obrazové rovině budou pozorované pruhy větší, roztáhnou se a jejich počet se zredukuje, až dospěje mřížka do

obrazové roviny, bude pozorovatelný již pouze jeden velký pruh, tento obraz je obdobný jako u základního Foucaltova testu. Naopak pohybem mřížky směrem od obrazové roviny vzroste počet pruhů a budou se nahušťovat. O kvalitě měřené plochy tedy usuzujeme podle průběhu a tvaru pozorovaných pruhů.



Obr.14: Zjednodušené schéma Ronchiho testu. [11]

Tok světla ze zdroje zobrazíme pomocí polopropustného zrcadla přes mřížku na testovanou optickou soustavu, od které se odráží optický svazek zpět k pozorovateli. Vracející svazek je pozorován přes optickou mřížku.

Ronchiho test je tedy složen z těchto částí:

a) Osvětlení: skládá se z difuzéru, vlastního zdroje světla a prostorového filtru. Na vlastní zdroj světla nejsou kladeny příliš velké nároky, nemusí být přísně monochromatický jako laser, stačí použít barevný filtr před obyčejnou žárovíčkou, nebo LED diodu. Pokud přece jen musíme použít laseru tak s výkonem do 1mW.

b) Prostorový filtr:

1) Dírková clona-využívá se pro všechny typy testů a je tvořen malým kruhovým otvorem. Výhodou dírkové clony je, že jeho výsledky jsou velmi zřetelné a vhodné zejména pro začátečníky. Nevýhodou je malé množství světla a tudíž zvýšené nároky na kvalitu pozorovací mřížky.

2) Štěrbina-poskytuje větší množství světla a využívá se u méně kvalitních mřížek.

3) Modulační mřížka- jedná se vlastně o x šěrbin vedle sebe, používáme dvě mřížky, popř. jednu velkou pro zdroj i pozorování

c) Testovací mřížka: může být tvořena jako lineární test, soustavou čar stejné tloušťky, nebo také kruhové testy či také testy tvořené křivkami. Hustota čar testu je 4 páry č/mm. Čím více čar, tím přesnější získáme výsledky testu. Nevýhodou je detailnější a zdouhavější práce s umístěním testu blíže k ohnisku, proto použití příliš hustých testů je také kontraproduktivní. Pro běžné orientační testy je doporučeno maximum cca. 15-20 párů č/mm. Citlivost a výkon mřížky nelze oddělovat od volby použitého zdroje z důvodů celkové přesnosti.

Různá uspořádání Ronchiho testu:

- a) Testovací mřížka i zdroj světla se nachází v blízkosti vrcholu křivosti, což je v dvojnásobku ohniskové vzdálenosti.
- b) Testovací mřížka je v ohniskové rovině a zdroj světla je v nekonečnu
- c) Testovací mřížka i zdroj světla jsou v ohniskové rovině, jedná se o autokolimační uspořádání.

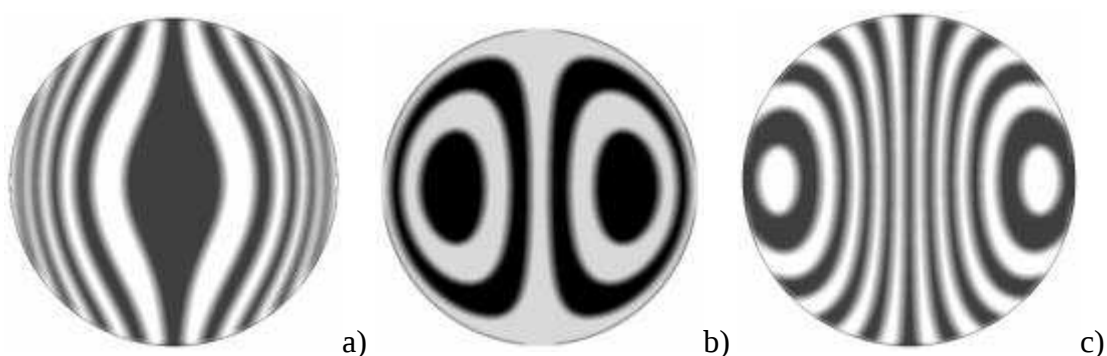
Vyhodnocení Ronchiho testu: Vlastnosti testované optiky posoudíme podle vzniklého Ronchigramu. Pro komplexní vyhodnocení je třeba znát hlavně hustotu mřížky (např. 10 párů č/mm), parametry objektivu a pozici testu.

Sférická plocha: klasická čárová lineární mřížka se používá pro testování sférických ploch. Nezáleží na tom, zda se mřížka umístí před, nebo za ohnisko. Pozorovaný obraz má podobný charakter. U Ronchigramu pozorujeme soustavu světlých a tmavých proužků. Posunem mřížky od ohniska se mění jejich počet. Nezáleží také na tom, zda je počet proužků sudý, nebo lichý, jestli jsou svislé či vodorovné, nebo jestli je ve středu světlý či tmavý pruh. (Tyto klasické testy se užívají i pro asférické plochy což bude později probíráno).

Vzhled Ronchigramu ovlivněném aberací: Vliv jednotlivých aberací na vzhled Ronchigramu bude popsán na souvisejících obrázcích, z důvodu názornosti je projev aberací na jednotlivých obrázcích zvětšen. Ve skutečnosti bývá jejich projev mnohem menší, s projevy ostatních vlivů. Kromě aberací odhalí Ronchigram i nedokonalosti

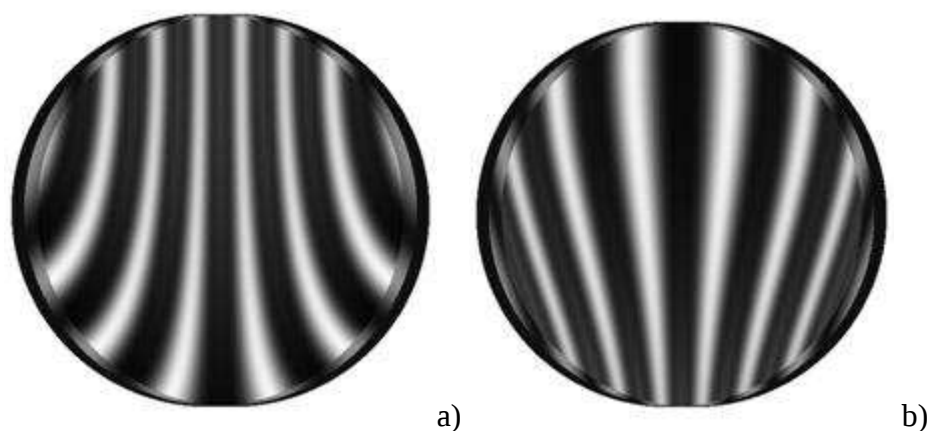
spojené s výrobou měřené plochy, což jsou lokální deformace zrcadla: sféra ve sféře (což je probroušený střed), prstenec, či sražené okraje.

Sférická aberace: Ronchigram je ideální pro odhalení sférické aberace. Při pečlivé práci odhalí deformaci vlnoplochy až o velikostech $1/20 \lambda$. Podle obrázku je zřetelné, že sférická aberace způsobuje lineárního testu prohnutí čar. Přitom míru a směr prohnutí závisí na pozici mřížky, zda je před či za ohniskem a velikosti posuvu od obrazové roviny.



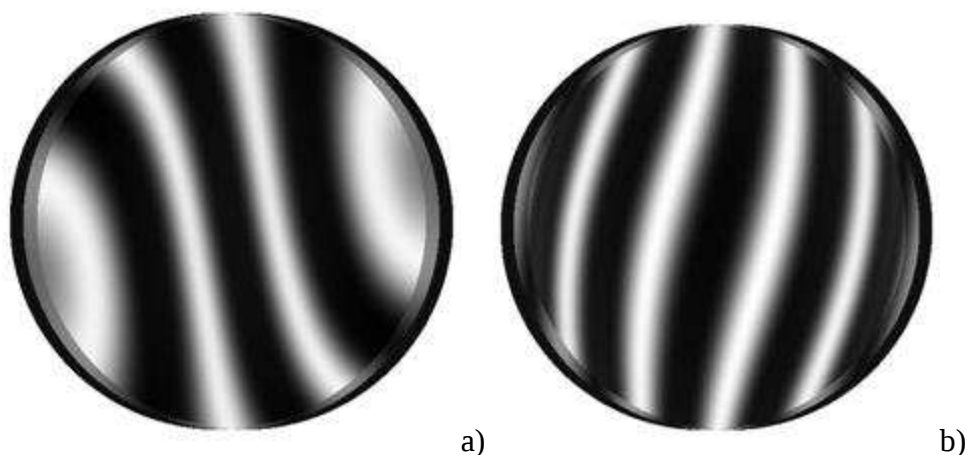
Obr.15: Ronchigram znázorňující sférickou aberaci: Mřížka je umístěná a) před obrazovou rovinou, b) těsně za obrazovou rovinou, c) za obrazovou rovinou. [11]

Koma: Ronchigram není přímo určen pro odhalení této nesymetrické aberace, ale i tak jej lze touto metodou dobře odhalit. Deformaci vlnoplochy odhalíme až do velikosti $1/10 \lambda$. Na obr.16 vidíme projevy komy jako nahuštění čar na jednu stranu a na opačné straně se naopak proužky rozestoupí.



Obr.16: Ronchigram komy.: parabolická plocha s umístěním mřížky a) před obrazovou rovinou b) za obrazovou rovinou. [11]

Astigmatismus: pro tuto aberaci také není Ronchigram primárně určen, stejně jak je tomu u komy. Astigmatismus zjišťujeme pozorováním bodového zdroje pomocí okuláru před a za ohniskem. Pozorování astigmatismu není jednoduché a v některých případech jej Ronchigram vůbec neodhalí. U této metody je potřeba pootáčet zrcadlo, popřípadě mřížku podél optické osy. Úhel 45° , který svírá s optickou osou astigmatismu příslušný test, je nejcitlivější. Astigmatismus odhalíme natáčením pruhů. Podle rychlosti přetáčení pruhů pozná zkušený pozorovatel velikost astigmatismu s deformací vlnoplochy až do velikosti $1/10\lambda$.



Obr.17: Ronchigram astigmatismu. [11]

Nesférické plochy: pozorování průběhu nesférických ploch je daleko složitější, ale i tak je možné je využít pro pozorování základními lineárními testy. Vyhodnocení tohoto testu je však složitější, proto je výhodnější použít některého z nelineárních testů. U asférických ploch jsou tyto pozorované čáry testu zakřivené, tudíž není jednoduché jej u lineárního testu správně odhadnout. To dokáže velmi dobře kvalifikovaný pracovník. Výhodnější jsou však nelineární testy s předem napočítanými a vyměřenými hodnotami pomocí počítačových programů.

Test sférických ploch Mobsby: tento test byl původně určen pouze pro testování paraboloidních ploch, ale po úpravách průběhu křivek byl přepočítán a tak jej lze používat pro jakékoli plochy. Tyto návrhy se zpracovávají pomocí celé řady počítačových programů (např. InvRon, MODAS). Bodový zdroj umístíme do dvojnásobku ohniskové vzdálenosti objektivu, u asférických zrcadel je to ve středu křivosti centrální části zrcadla. Pro každou testovací mřížku je navržena přesně

definovaná vzdálenost, zpravidla před obrazovou rovinou. V ideálním případě, pokud správně umístíme test, budeme pozorovat rovnoběžné pásy jako u sférické plochy. Konečná interpretace testu, projevy aberací a vad, je prakticky shodná s lineárním testem, tudíž lze použít závěry patřící sférickým plochám.

Popov-Terebitz kruhový test: pravidla použití tohoto testu jsou stejná jako u testu Mobsby. Tento test se skládá ze soustředných kružnic. Vzdálenost těchto kružnic navzájem od sebe je zvolena tak, aby při ideální ploše zrcadla paraboloidního tvaru, také známé excentricitě plochy, byly v obraze viděny soustředné kruhy shodné tloušťky. Na rozdíl od předchozího testu je zde možné velmi dobře testovat nesymetrické aberace jako je koma a astigmatismus, také se tímto testem dobře definují lokální deformace zrcadla. Koma se zde projevuje prodloužením soustředných kružnic v jednom směru od středu testu. Dále astigmatismus se projeví prodloužením podél celé jedné osy a tak namísto kružnice pozorujeme elipsu. Zúžením, nebo rozšířením pásů neprojevují vady testovaného zrcadla.

3.2.3. Interferometrické metody měření

Jsou to jedny z nejpřesnějších bezkontaktních metod měření, založených na dvousvazkové interferometrii. Dosahují přesnosti měření o velikosti $\lambda/20$ až $\lambda/100$. Měření je prováděno pomocí vhodných interferometrů, Twyman-Greenova typu, nebo Fizeaova typu. Tvar asférických ploch lze díky rozvoji CCD senzorů a piezoelektrických posuvů plně automaticky vyhodnocovat. Vypočítanými algoritmy určíme fázi kontrolovaného vlnového pole. Na základě změřené intenzity interferenčního pole, které vzniká mezi kontrolovanou vlnovou plochou interferující s referenčním vlnovým polem. Principem je převedení referenční vlnoplochy, která je sférická, nebo rovinná na vlnoplochu asférickou. Tak v místě měření nastane situace, kdy referenční vlnoplocha bude mít shodný tvar jako měřená asférická plocha. Bude-li mít kontrolovaná asférická plocha ideální tvar, tak odražená vlnoplocha od měřené plochy, bude mít tvar stejný. V případě odchylek od ideálního tvaru měřené asférické plochy, bude odražená vlnoplocha také deformovaná a tak se bude lišit od referenční vlnoplochy. Právě interferencí těchto dvou vln získáme interferenční pole, které bude vypovídat o odchylkách měřeného asférického povrchu od jejího ideálního tvaru. Při interferenci dvou monochromatických, lineárně polarizovaných koherentních vln s komplexními amplitudami dostaneme:

$$U_0 = A_0 \exp(i\varphi_0) \text{ a } U_R = A_R \exp(i\varphi_R) \quad (16)$$

indexy R popisují referenční pole a indexy 0 pole měření u A , což je amplituda a φ příslušná fáze.

$$I = I_0 + I_R + 2\sqrt{I_0 I_R} \cos(\varphi_R - \varphi_0) = A + B \cos(\varphi) \quad (17)$$

Světlé interferenční proužky (maxima intenzity) u výsledného interferenčního obrazce jsou rozdílem obou fází u kterých platí tato podmínka:

$$\varphi_R - \varphi_0 = \pm 2n\pi \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (18)$$

pak také tmavé proužky (minima intenzity) musí splňovat v daných místech tuto podmínku:

$$\varphi_R - \varphi_0 = \pm 2n\pi + \pi \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (19)$$

kontrast interferenčních proužků je popsán tímto vztahem:

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (20)$$

určením fázového rozdílu těchto dvou polí vyhodnotíme interferenční pole v bodech $\varphi(x, y)$ interferometru, což znamená že určíme neznámé A, B z rovnice (17). Pro určení tří neznámých v této rovnici potřebujeme mít minimálně tři hodnoty naměřené intenzity pro různé hodnoty fázového posuvu φ_K referenčního pole. Odtud následně řešíme rovnici typu:

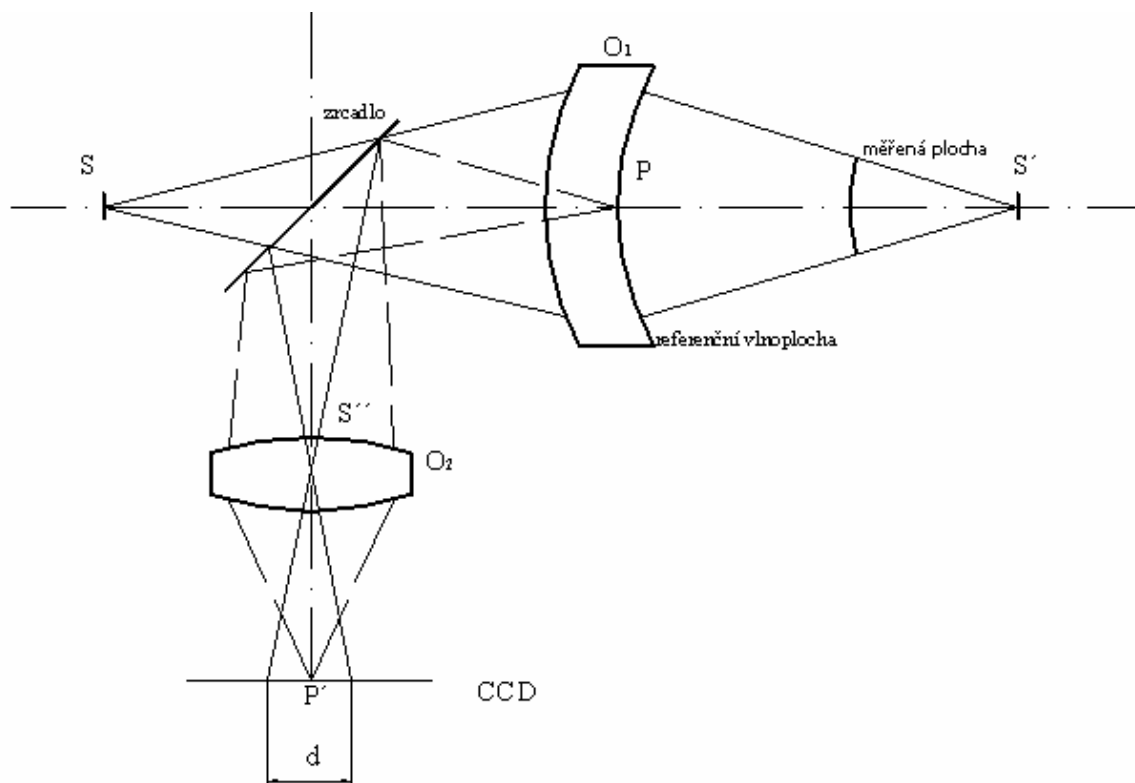
$$I_i = A + B \cos(\varphi - g_i) \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (21)$$

podle fázového posunutí interferenčních polí snadno vyhodnotíme jejich dráhový rozdíl:

$$W = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (22)$$

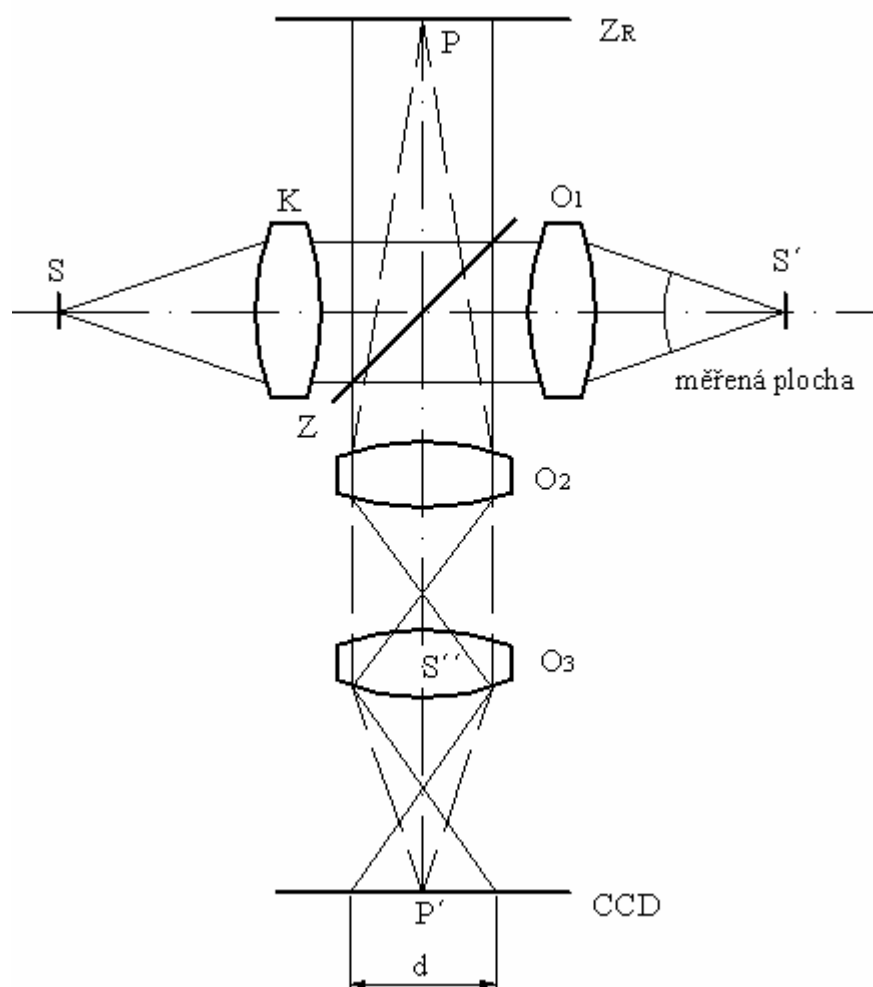
kde λ je vlnová délka použitého světla.

Pro realizaci interferometrické metody potřebujeme vhodně konstruovaný interferometr Fitzeauova, nebo Twyman-Greenova typu. Princip těchto interferometrů vidíme na obrázcích 18 a 19, kde velikost interferenčního obrazce označujeme jako d .



Obr.18: Schéma Fitzeauova interferometru.

U Fitzeauova interferometru se vlnoplocha od bodového zdroje deformuje rovnou do tvaru měřené plochy, od té se odrazí zpět a interferuje s referenční vlnoplochou, která se odráží od poslední plochy objektivu O_1 . Aby nedocházelo k nechtěným interferenčním jevům od ostatních ploch musí být pokryty antireflexními vrstvami. Při použití zdroje světla konečné velikosti, budeme interferenční proužky lokalizovat na odrazné ploše objektivu a následně pomocí zrcadla a objektivu O_2 snímány. Tato metoda je bezkontaktní modifikace použití kalibru. Nevýhodou této metody je velký dráhový rozdíl mezi měřenou a referenční vlnoplochou. Jako zdroj světla se proto používá laser.



Obr.19.: Schéma interferometru Twyman-Greenova typu.

Druhý typ používaného interferometru je Twyman-Greenův, který využívá interference rovinných vlnoploch. Kolimátor K transformuje bodový zdroj světla S na rovinnou vlnoplochu. Tato vlnoplocha je rozdělena na zrcadle Z na referenční větev se stavitelným referenčním zrcadlem Z_R a na měřicí větev s objektivem O_1 , který deformuje plochu pro odraz na měřicí ploše. Následně po odrazech spolu vlnoplochy interferují a interferenční proužky jsou snímány pomocí objektivů O_2 a O_3 . Tento typ interferometrů má velký rozsah pracovních vzdáleností při zachování nultého interferenčního řádu. Další výhodou je možnost aktivně měnit hodnotu intenzit záření, abychom dosáhli maximálního kontrastu interferenčních proužků. Interferenční metody se používají zejména k závěrečným kontrolám vyleštěných povrchů a také pro kontrolu broušených náročných a velkých optických ploch. Kontrola se provádí v IR oblasti, nejčastěji se používá CO_2 laseru $10,6\ \mu m$.

Moiré interference: v případě měření ploch, kdy je rozteč proužků interferenčního obrazce je tak malá, že jednotlivé proužky nelze rozeznat využijeme metodu moiré interference. Tato interference je pozorovatelná i v běžném životě, všude tam, kde se překrývají dva rastry. Principem tedy je interference dvou překrytých čárových rastrů, čímž zviditelníme jejich rozdíl. Rozteč proužků t je konstantní, tato rozteč t a úhel natočení φ jsou dány vztahem:

$$t_m = \frac{t}{2 \sin \frac{\varphi}{2}} \quad (23)$$

Úhly natočení se volí $\varphi = (0^\circ, 60^\circ)$, tak je rozteč moiré proužků vždy větší, než rozteč u jiného rastru. Takto zviditelníme i hodně gradientní interferenční pole. Nejčastěji se této interference využívá v rovině fotodetektoru, vzniklé za použití dvou vlnových délek zdroje záření, které prochází měřicí soustavou interferometru.

4. Výroba asférických ploch.

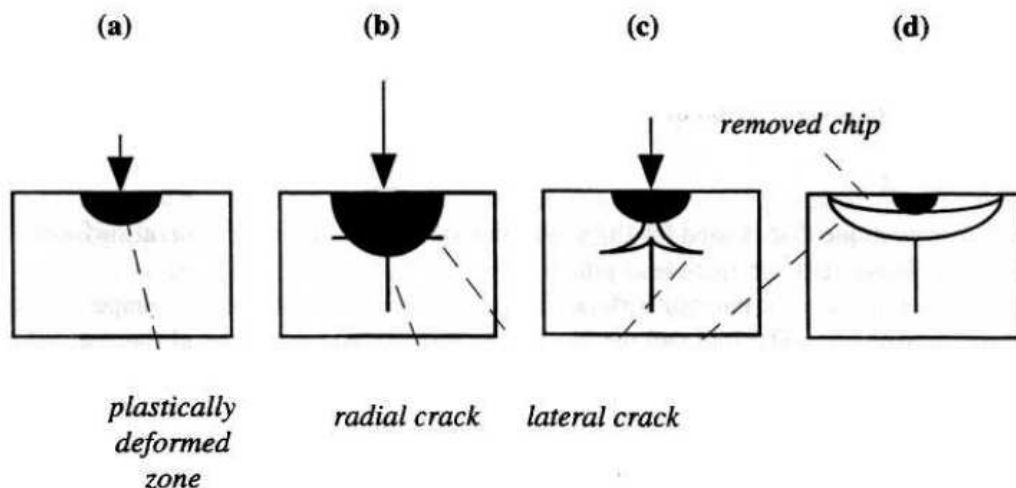
Techniky výroby asférických povrchů z křehkých materiálů spočívají ve vytváření v nejméně dvou následných krocích.

1. Nejdříve je hrubé tvarování, broušení pomocí brusiv a brousících nástrojů, kterými vygenerujeme asférický tvar. Odstranění materiálu je způsobeno ostrými hranami brusiva, či hrotem brousícího nástroje. Materiál je odstraněn velkou rychlostí a zanechává povrch s namáhanou a poškozenou podpovrchovou vrstvou, která musí být následnými operacemi odstraněna.
2. Druhou operací je leštění, kde nerovnosti a podpovrchové poškození z předchozích operací odstraníme pomocí vhodně zvoleného leštícího procesu.

Procesy odstranění materiálu: kvalita povrchu, úroveň nerovností a množství podpovrchového poškození je vytvořena broušením povrchu, po kterém obvykle následují konečné úpravy. Je třeba vybrat vhodnou metodu, nebo i několik metod najednou: leštění volným novým leštivem, tvárné broušení, chemicko-mechanické leštění, leštění miskou s leštivem, tvárné strojní obrábění, magnetorheogická konečná úprava MRF, žárové a laserové leštění, leštění svazkem iontů, obrábění pomocí trysek s brusivem a leptání pomocí plazmy.

4.1. Broušení.

Jedná se o tvárný proces odstranění materiálu broušením optických povrchů. Při vnikání nástroje do materiálu dochází k jeho odstranění v podobě pilin a šupinek, při této práci vznikají podpovrchové trhliny jak je ukázáno na obr.20, musíme si dávat pozor na překročení kritické hodnoty, která by zasahovala příliš hluboko do opracovávané plochy a nešla odstranit dalšími pracovními kroky.



Obr.20: Náčrtek odstranění křehkého materiálu v režimu křehkého broušení, nebo lapování optických povrchů. a) Zvýšené zatížení má za následek deformaci plochy v místě kontaktu s hrotem nástroje. b) Maximální zatížení má za následek zvětšení paprskovitých prasklin. c) Paprskovité trhliny jsou vytvořeny i po stranách, rostou s úbytkem materiálu. d) Po odstranění materiálu zůstává díra s paprskovitými trhlinami pod povrchem. [5]

Pokud je uvedená energie nižší než energie potřebná pro zahájení tvorby prasklin, materiál odstraňujeme krátkými pohyby pomocí viskózní kapaliny. Energie E_p potřebná pro tvárnutí materiálu deformací je přímo úměrná deformovanému obsahu s energií E_c , potřebné pro vytvoření prasklin je funkce vytvořené oblasti ve které se šíří praskliny. Procento odstraněného materiálu může být popsáno takto :

$$\frac{E_p}{E_c} \propto d_i \quad (24)$$

kde d_i značí hloubku průniku deformace. Tvárné broušení zanechává obráběný skleněný povrch leštitelný s podpovrchovým poškozením které je snadno odstranitelné

vhodným leštícím procesem. Největší podíl odstranění materiálu je dosaženo během tvrdého výrobního cyklu. Kontrola pozice a rychlost nástroje s ohledem na obrobek, který je vyrobený pevným přesným brusem, nebo jediným hrotem diamantového soustruhu (SPDT). Kromě toho je možné dosáhnout tohoto tvárného broušení jemným výrobním cyklem pomocí volného broušení.

Obrábění jílovou kaší pomocí trysky (ASJ): Přesně směřovaná jílová kaše vysoké viskozity, obsahující brusný polymer je aplikovaná na povrch za použití vysokotlaké trysky. Polymer molekulové velikosti naráží do povrchu a odstraní jeho částičky na požadovanou drsnost.

4.2. Metody leštění.

Mezi metody leštění, které se využívají k výrobě asférických ploch a budou v této práci uváděny patří leštění pomocí nového volného leštiva, chemicko-mechanické leštění, miskové leštění (OFE), obrábění pružnou emisí (EEM), magnetorheologické dokončování (MRF), laserové žárové leštění, leštění svazkem iontů (IBF) a leptání pomocí plazmy.

Leštění pomocí nového volného leštiva: tradiční výrobní technika, která je užívána na výrobu rovinných a sférických povrchů. Následuje po tvárném broušení, kde je leštění prováděno novým volným leštivem. Na povrch nástroje je naložena smůla, která nemá přímo sférický tvar. Pracovní nástroj a obrobek jsou v plošném dotyku a materiál je odstraňován brusnými zrny (např. oxidy kovu), které se náhodně pohybují v jílové kaši (obvykle s vodou), mezi nástrojem se smůlou a obráběným kusem. Na leštění se podílí velké množství proměnných:

- druh a množství napětí
- druh používaného brusiva a jeho fyzikální vlastnosti (tvar brusných částic a tvrdost)
- chemické vlastnosti
- koncentrace, teplota a chemická zpětná reakce na jílovou kaši
- chemické a fyzikální vlastnosti nástroje
- chemické a fyzikální vlastnosti používaného skla
- podmínky prostředí (např. pokojová teplota)

Materiál odstraňujeme mechanicky i chemicky, což závisí na pracovní emulzi a vzájemném pohybu nástroje s obrobkem.

Rychlost odebrání materiálu je dána vzorcem :

$$\frac{dh}{dt} = c_{Pres} \frac{L}{Q} \frac{ds}{dt} \quad (25)$$

kde L označuje záběr, Q oblast styku mezi nástrojem a obrobkem, ds/dt paralelní rychlost nástroje k povrchu a c_{Pres} konstanta závisí na průběhu parametru.

Tradiční leštění spočívá v procesu, kdy je každý bod formy ve styku s každým bodem obráběného povrchu, větší odběr materiálu nastává u míst s vyvýšeným povrchem. Toto, spolu s účinky smoly způsobuje srovnání povrchu, proto je tradiční technika broušení a leštění samoopravným procesem, během kterého se z nedokonalých povrchů vytvoří povrchy vysoké kvality. Během tohoto procesu pracujeme s mnoha pracovními nástroji s poměrnou rychlostí, které jsou seřizeny s vysokou přesností. Tato výrobní technika je odkázána na velmi jemné výrobní cykly. Pro výrobu asférických povrchů, které vyžadují malé odchylky od sférické plochy lze využít tradiční samoopravný proces plošného dotyku s leštící smolou, tlak se rozloží po povrchu obrobku. Tento proces s plošným dotykem se užívá na výrobu malých povrchů s malými odchylkami od kulové plochy.

Pro strmější asférické povrchy, kde je již velká odchylka od sférické plochy je nezbytné použít výrobní techniky, které využívají lineárního, nebo bodového kontaktu. Pokud je to možné, využíváme pro samoopravný proces lineárního kontaktu, pokud to není možné volíme proces s kontaktem hrotu (bodu). Tvrdost a tvarová přesnost vyráběného povrchu závisí na tuhosti stroje. Tyto výrobní techniky jsou odkázány na použití tvrdých cyklů, kde je soustružení optických prvků prováděno diamantem.

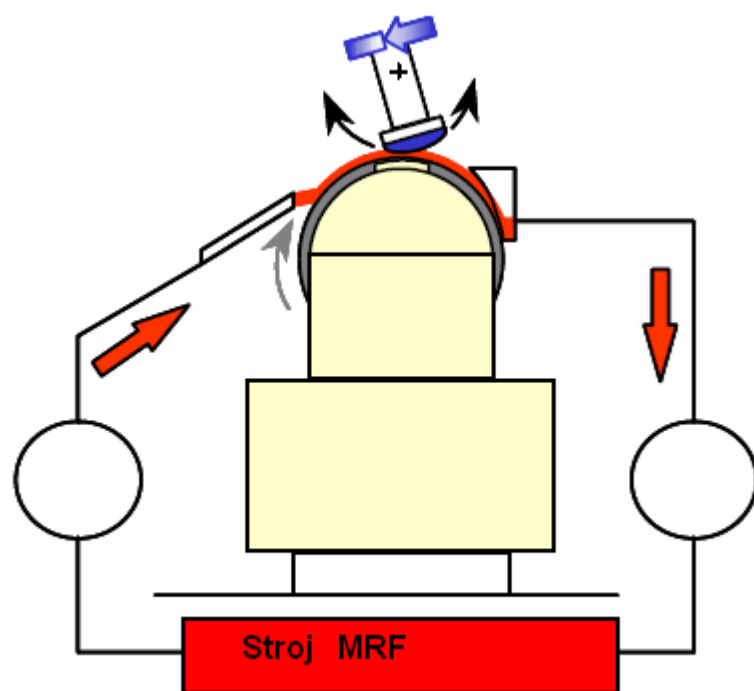
Chemicko-mechanické leštění: skla jsou rozpustné např. v roztocích kyseliny s vodou. Následně mohou být takové chemické reakce použity pro hlazení optických povrchů.

Toto leptání bez mechanického kontaktu má za následek, že se na povrchu objevují nechtěné jamky, proto se chemické reakce používají převážně k vyhlazení povrchu během lapování, nebo miskového leštění OFE, které bude následně popsáno.

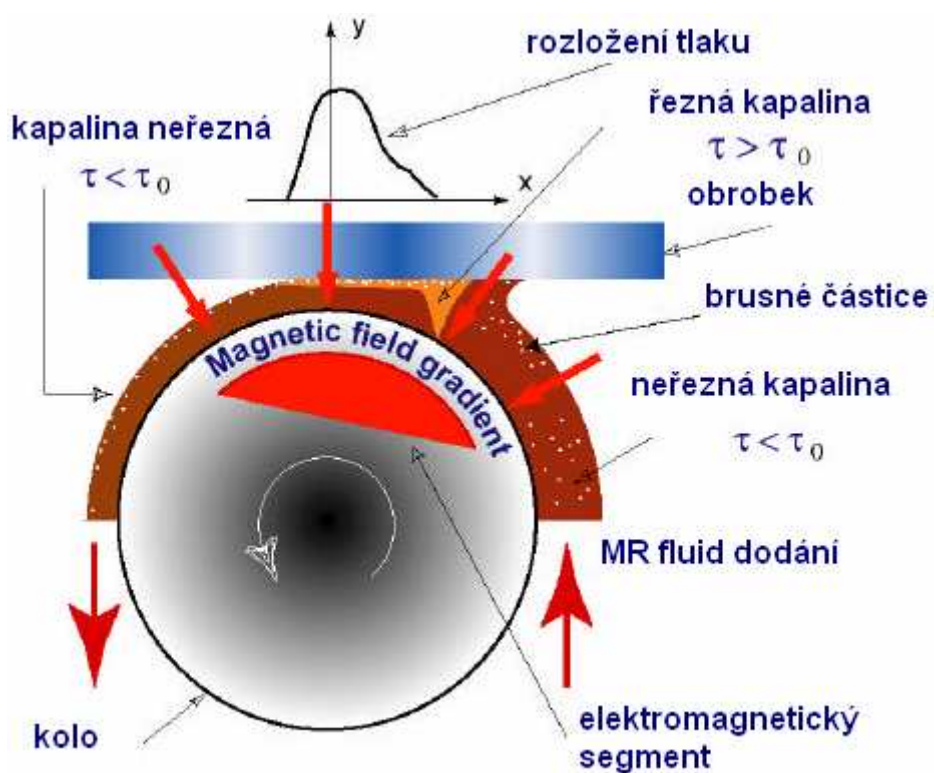
Miskové leštění OFE: miskové leštění je proces obvykle používaný pro dokončení hladkého povrchu křemíku na výrobu destiček (s přesností 12nm efektivní hodnoty), je to proces volného leštění, kde nástroj i obrobek jsou ponořeny do leštící jílové kaše. Nástroj pluje po této kaši určité tloušťky na vrstvě smůly, nebo teflonu. Povrch obrobku mnohanásobného průměru je leštěn pomocí leštících zrněk, nejčastěji oxidu céru. Díky otáčivé rychlosti obráběného kusu jsou leštící částice přepravované po povrchu který leští a klesají ke spodní části misky.

Obrábění pružnou emisí EEM: minimalizuje styk ploch obrobku s pracovním nástrojem. Pro obrábění povrchu pružnou emisí EEM používáme plovoucího leštícího procesu, kde nástroj (polyuretanová koule) pluje na kapalně vrstvě obsahující brusná zrna. Tloušťka této kapalně vrstvy se rovná průměru brusných zrn. Parametry určující průběh obrábění zahrnují: hydraulický tlak vygenerovaný nástrojem a kinetickou energii brusného materiálu.

Magnetorheologické dokončování (MRF): zatímco u technologie EEM není brusný materiál přímo na povrchu, pracovní nástroj u Magnetorheologického procesu MRF není v přímém kontaktu. Prchavá látka obsahující magneticky citlivé částičky smíchané s leštící směsí oxidu céru, který využívá magnetického pole. Tento proces využíváme pro lokální leštění a tvarování. V zóně, kde je aplikované magnetické pole donutí magneticky citlivé částičky leštivo pracovat na leštěném povrchu. Výsledná přesnost povrchu je 1nm efektivní hodnoty. Díky pohybovému charakteru nedochází k opotřebení nástroje, který je ochlazován dokončovací kapalinou a zároveň spolu s ní jsou odplavovány zbytky odstraněného materiálu.



Obr.21: Stroj pro generaci MRF metody. [7]



Obr.22: Popis metody MRF. [7]

Laserové žárové leštění: Používá se laserového paprsku (např. z CO₂ laseru) nebo žáru. Optické povrchy ze skla tak mohou být vyhlazeny teplem. Laserové žárové leštění je porovnáváno mezi dvěma účinky. Na jedné straně je nutné udržovat stálou teplotu, která je nutná pro získání tvaru povrchu (povrch taje mírně). Na druhé straně povrch musí být dostatečně zahřátý. Postupným zchlazením odstraníme podpovrchové napětí z předchozího hrubého tvarování. Při rychlém zchlazení se odvádí velké množství energie v krátkém čase, to má za následek tepelné pnutí v optickém povrchu, kterému se snažíme vyhnout. Drsnost povrchu se zde rovná 1nm efektivní hodnoty.

Leštění svazkem iontů (IBF): při leštění svazkem iontů je optický povrch vystavený působení svazku iontů načež je přebytečný materiál odstraněn rozprašováním. Rychlost prskání závisí na úhlu mezi nahodilým paprskem a lokálním povrchem. Možné jsou tři různé druhy svazků leštících iontů. Pro srovnání např. diamantový film jako optický nátěr je nanesen před operací a má prskavé charakteristické rysy jako leštěný povrch. Dále použitý iontový svazek je souběžný k lokálnímu vyhlazenému povrchu. Různé publikace poukazují na to, že obrábění pomocí svazku iontů vyžaduje plynulý start, který udržuje drsnost povrchu během tvarování. Leštění svazkem iontů se používá jako dokončovací operace, kde již nevzrůstá drsnost povrchu. To může být provedeno jak pro výrobu masky, tak výrobu optického povrchu.

Leptání pomocí plazmy: optické plochy mohou být formovány a leštěny plazmou. Plazmo chemické leptání (PACE). Malý, plazmový nástroj je posunut na povrch a materiál lokálně odleštěn. Jedná se o bezkontaktní metodu, která se aplikuje pomocí leptání. Povrchy o kvalitě 1nm efektivní hodnoty jsou dosahovány na křemičitém skle.

4.3. Metody tvarování.

Metody tvarování (SM) mohou být rozděleny do dvou kategorií: založené na tvaru nástroje a metody založené na výpočtu povrchu.

4.3.1. Metody kopírování založené na tvaru nástroje: tyto druhy technik na generování asférických optických povrchů broušením lze zhotovit těmito způsoby:

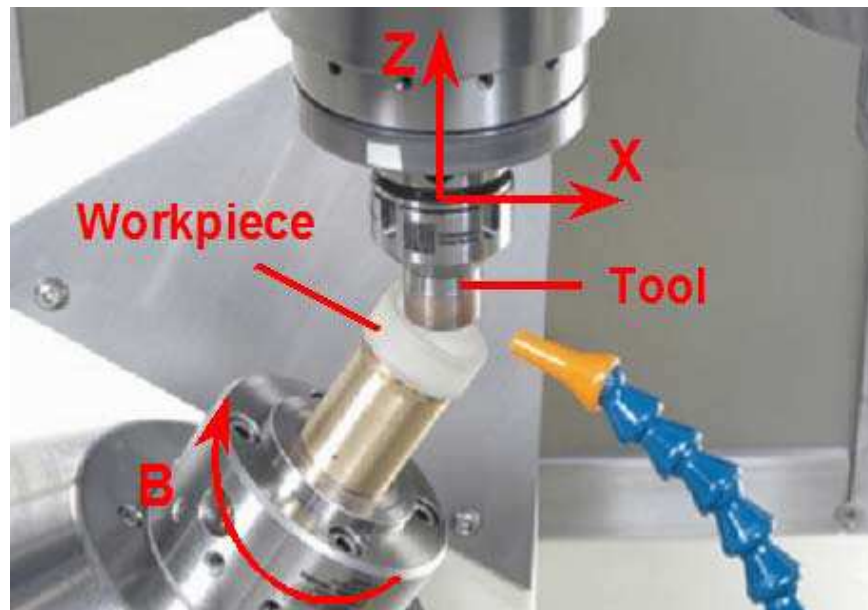
A) použitím plošného kontaktu, B) použitím lineárního (čárového) kontakt, C) pomocí bodového kontaktu.

A) Popis tvarovacích metod používajících plošného kontaktu.

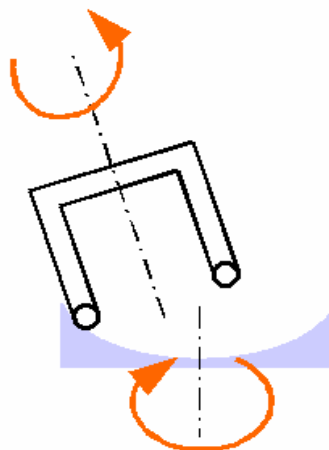
Tvar povrchu nástroje je přímou kopií požadovaného optického povrchu. Jsou to tvarovací metody využívající volného brusiva a leštiva pro výrobu nejen sférických ploch, ale také aférických povrchů s malými odchylkami od kulové plochy. Záleží na účincích používané směs a charakteristice kontrolního procesu (např. ráz, tlak, záběr, nebo rozložení pracovního materiálu po povrchu nástroje), hodně závisí na zručnosti pracovníka. Dopředu určeným způsobem lze také deformovat pracovní vzor (např. pod tlakem). Následně je tento přetížený povrch opracováván broušením a leštěním do plochého, sférického, nebo asférického povrchu, který získává tvar povrchu podle formy. Tímto způsobem získáváme netočivé souměrné asférické povrchy.

B) Popis tvarovacích metod používajících lineární čárový kontakt.

Tato metoda se používá pro generaci strmějších asférických povrchů, kde nemůže být aplikována metoda plošného kontaktu. Asférický tvar je vytvořen kopírováním tvaru dvojrozměrného ostří, které má obrácený tvar příčného řezu vyráběného povrchu a obsahuje osy souměrnosti. Obráběný kus rotuje a ostří je upevněné nad obrobkem. Toto spolu s opotřebením nástroje má za následek velké povrchové chyby. Abychom se jim vyhnuli, je navržena metoda, kde jsou dva rotační válce uloženy nahoře, takže jejich osy souměrnosti svírají úhel a jsou umístěny kolmo k ose souměrnosti rotačního obrobku (obě osy válce se kříží a osy souměrnosti obrobku jsou v různých výškách). Během broušení se oba válce obrušují a tak vzniká hyperboloidní povrch. Za účelem dosáhnout prospěšných chyb zaručíme růst určitých faktorů, mezi tvarovacím ostřím a vytvářeným povrchem. Machersen vyvinul metodu, během které se korigují zkopírované tvary meridionální linky, pro výrobu rotačně symetrických povrchů kuželoseček. Vinocur popsala metodu lineárního čárového kontaktu, která je založená na vytváření křivek. Rotační válec obr.23 je upevněn nad obrobkem takovým způsobem, že se jeho osy souměrnosti kříží s osami souměrnosti rotačního obrobku. Tímto způsobem se kruhový průřez trubky přenáší na požadovanou plochu. Vychýlením trubky podél kolmé osy k oběma osám souměrnosti mají za následek mimosový tvar plochy, která se přibližuje kuželovitému povrchu.



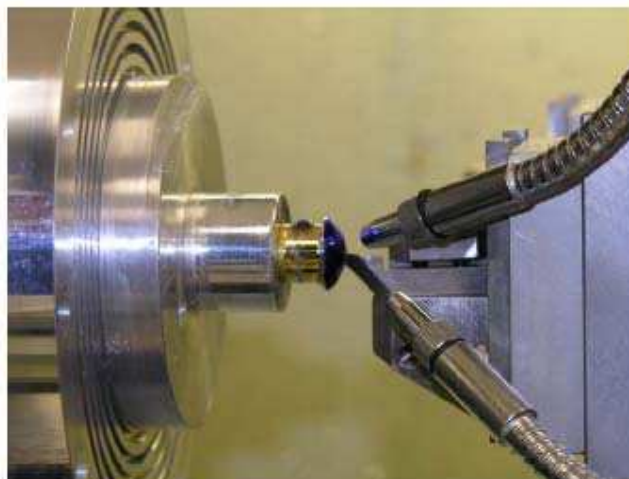
Obr.23: a) Rotační obrobek je opracováván válcovým nástrojem. [7]



b) schéma obrázku 23 a. [7]

C) Popis tvarovacích metod používajících bodový kontakt.

Mimo jiné, je možné kopírovat dopředu danou trajektorii malého nástroje rovnou v materiálu, např. jednotlivé body diamantového soustružení SPDT, jak vidíme na obr.24, nebo přesné broušení. Nástroj a obrobek jsou v bodovém kontaktu a dráha nástroje podél meridionální linie podává výsledky přímo na tvar povrchu. Tyto výrobní techniky mají vysoké nároky na přesné vedení nástroje a požaduje velmi pevnou konstrukci stroje, která musí být izolovaná od okolního chvění. Proto aplikujeme tento druh tvarovací metody s použitím tvrdého cyklu obráběcího stroje s požadovanou přesností.



Obr.24: Diamantové broušení za pomoci bodového kontaktu. [7]

4.3.2. Tvarovací metody založené na výpočtech.

Z hlediska vývoje lze tyto tvarovací metody pro získání sférických povrchu rozdělit do dvou skupin: Tvarování za použití kontaktu, který se dopředu spočítá a tvářecí metody za pomoci malého nástroje s předem vypočítanou trajektorií a zvolenou rychlostí otáčení nástroje. Dopředu daný, (s možností změny) způsob tvarování, kde velikost plochy ve styku se sférickou, nebo plochou formou (např. vyrobený ze smůly), povrch obrobku je opracován brusivem a následně poté novým leštivem. Asférický povrch můžeme vytvořit za pomoci leštících segmentů. Vypočítaný iontový svazek využívá projevy masek na stejném principu. Přetížené obráběcí kolo, za pomoci velkého, tvrdého leštícího nástroje, který užívá plošného dotyku spolu s novým volným leštivem se používá na výrobu velkých sférických zrcadel. Tvar nástroje se během procesu aktivně mění podle požadavků na asférickou plochu. Leštění CCP je řízeno počítačem, kde malý leštící nástroj je nad vyráběným povrchem, která je opracován novým leštivem. CCP se vyznačuje opakováním během procesu, kde se utváří tvar plochy za stálé korekce dráhy nástroje.

5. Využití asférických povrchů.

5.1. Využití v astronomii.

V astronomii se užívá asférických zrcadel, které jsou výhodné pro korekci aberací, zejména sférické aberace a komy. Užívají se různé kombinace zrcadel, jak bude uvedeno níže a to u dalekohledových reflektorů se dvěma, třemi a čtyřmi zrcadly.

5.1.1. Dvou-zrcadlové teleskopy:

a) Klasický Cassegrainův teleskop:

$$-K_1 = -1, K_2 = -\left(\frac{m+1}{m-1}\right)^2$$

-výhodou je kratší stavební délka

b) Dall-Kirkham, Pressman-Camichel:

$$-1 < K_1 < 0, K_2 = 0$$

-výhodou je snadná výroba

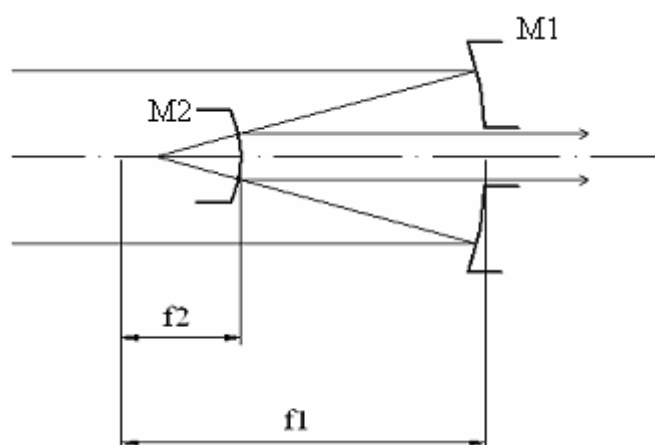
-nevýhodou jsou dosti velké aberace

c) Ritchey-Chvétien:

$$-K_1, K_2 < -1$$

-výhody tohoto typu jsou nulová koma, větší zorné pole než klasický Cassegrain

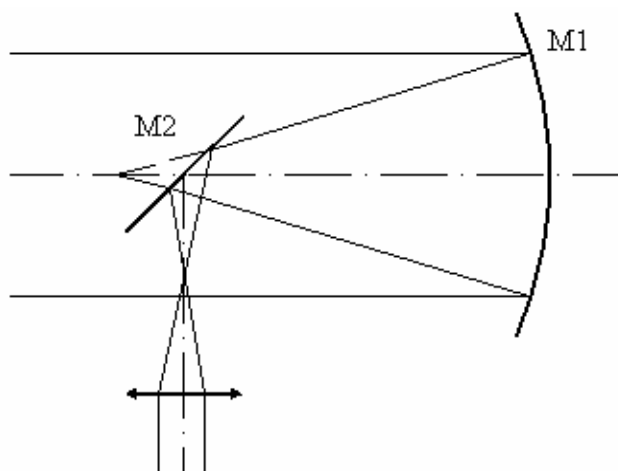
-nevýhodami je složitější výroba, je zde nutný korektor



Obr.25: Klasický Cassegrain.

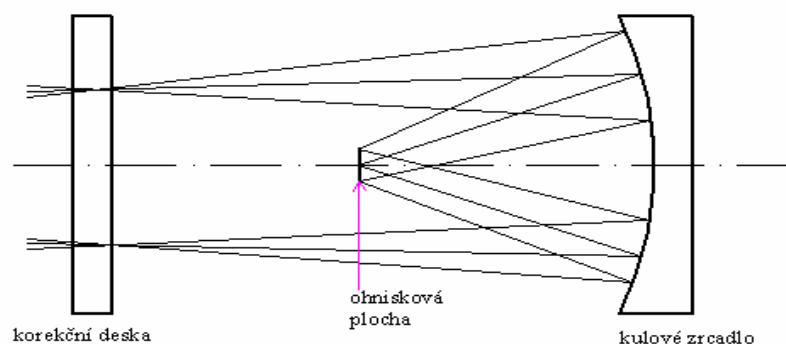
d) Newtonův teleskop:

$$-K_1 = -1, K_2 = 0$$



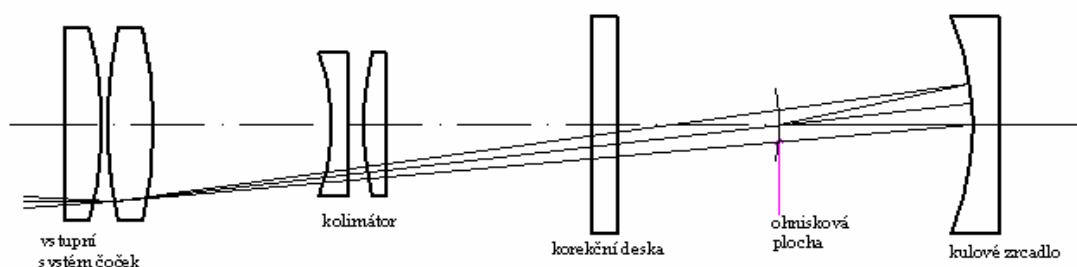
Obr.26: Newtonův teleskop.

Schmidtova kamera: primární zrcadlo Schmidtovy kamery je tvořeno sférickou plochou o velké světelnosti. Kulové zrcadlo má velké množství optických os a kterýkoli paprsek vstupující do kamery se pohybuje poblíž optické osy. Sférické zrcadlo tudíž postrádá chyby parabolických zrcadel, komu a astigmatismus. Avšak sférické zrcadlo má velkou sférickou aberaci, kterou korigujeme pomocí korekční desky, která je vložena do středu křivosti zrcadla. Schmidtovou korekční deskou zobrazujeme velké zorné pole bez zkreslení. Nevýhodou je, že nevyužijeme celou plochu sférického zrcadla, a to proto, že korekční desky mají menší průměr jak kulové zrcadlo, většinou jsou velké jako 1/3 průměru zrcadla.



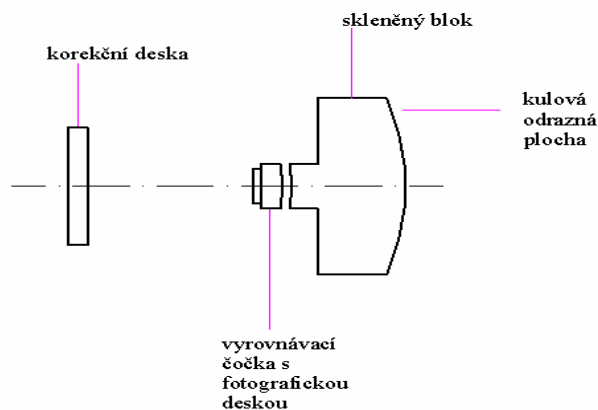
Obr.27: Schmidtova kamera

Mainel-Schmidtova kamera: tato kamera je tvořena kolimátorem a klasickou Schmidtovou kamerou, která je popsána výše. Používá se u velkých dalekohledů, pro zvýšení světelnosti. Dalekohled shromáždí světlo, které promítneme kolimátorem, čímž vytvoříme rovnoběžný svazek, který dopadá do světelné kamery a vytváří obraz. Výhodou tohoto uspořádání je, že je možno mezi kolimátor a Schmidtovu kameru umístit další zařízení, jako jsou filtry a hranoly. Celé toto zařízení není příliš objemné, tudíž nedochází k deformacím vlivem vlastní váhy optických členů.



Obr.28: Mainel-schmidtova kamera

Pevná Schmidtova kamera: další modifikací Schmidtovy kamery je Pevná Schmidtova kamera, která je tvořena blokem skla, na který doléhá vyrovnávací čočka. Ta má za úkol vyrovnávat ohniskovou plochu do roviny. Na tuto vyrovnávací čočku přiléhá fotografická deska. Abychom eliminovali různost indexů lomu mezi rozhraními (čočkou, vzduchovou mezerou a deskou), tak nanášíme na styčnou plochu imerzní kapalinu s podobným indexem lomu ze kterého jsou vyrobeny skleněné komponenty.



Obr.29: Pevný Schmidt

5.1.2. Tří-zrcadlové teleskopy:

a)Paul-Baker:

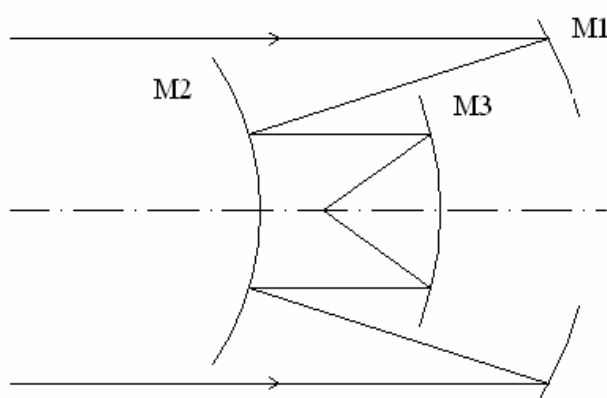
$$-K_1 = -1, K_2 = 0, K_3 = 0, R_2 = R_3$$

-pro kompenzaci sférické aberace slouží asféricity K2 a K3

-střed křivosti M3 je také vrcholem M2 (M3 a M2 se jeví podobně jako Schmidova komora)

-nevýhody málo prostoru pro spektroskop, vignetace 20% světla, M3 musíme stínit od rozptýleného světla

-křivosti zrcadel je dána efektivní hodnota ohniska



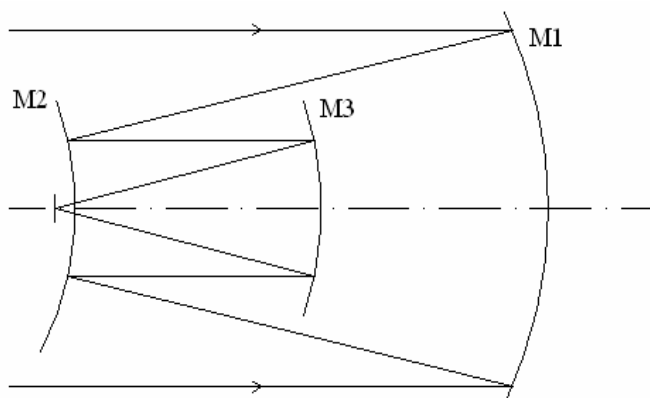
Obr.30: Paull-Baker teleskop

b)Korsch:

$$-K_1, K_2, K_3 < -1$$

-výhodou je více místa pro instrumenty

-mezi M2 a M3 je mírně sbíhavý paprsek

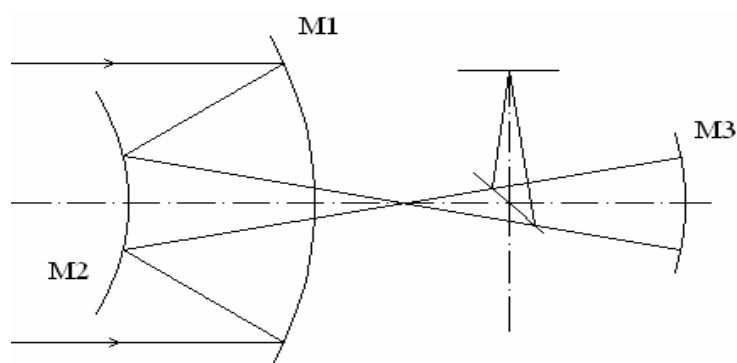


Obr.31: Korsch teleskop

c)dvouosý Korsch:

-ve výstupní pupile je umístěno skloněné zrcadlo

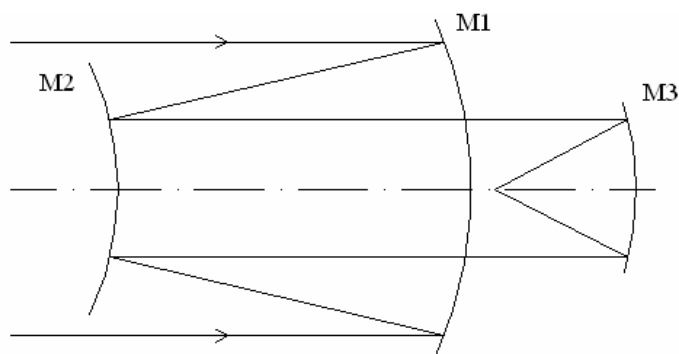
- ve středu FO je úplná vignetace
- ohnisková rovina je chráněna od rozptýleného světla



Obr.32: dvouosý teleskop Korsch

d)Robb:

- $K_1, K_2, K_3 \prec -1$ dále se u M1 a M2 přidávají vyšší asférické členy
- velká vinětace



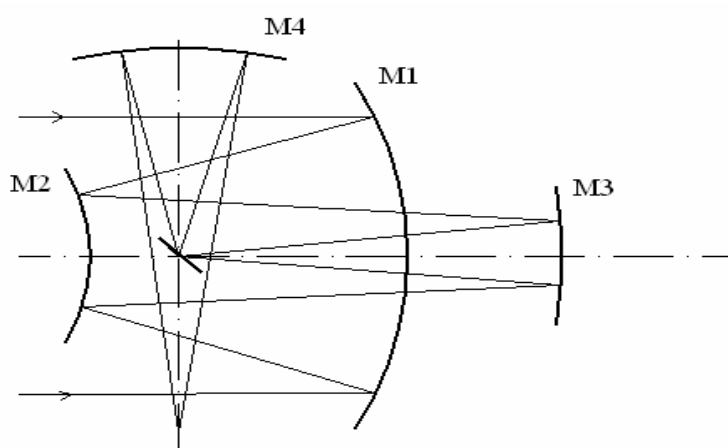
Obr.33: Robb teleskop

5.1.3. Čtyř-zrcadlové teleskopy

a)Paul-Schmidt:

- $K_1 = 0, K_2 = -1, K_3 = 0, K_4 \prec -1$
- koma i astigmatismus jsou zde nulové, ale sférická aberace je větší než nula
- zrcadlo M3 podobně jako Paul-Bakerův teleskop zobrazí výstupní pupilu afokálního teleskopu na zrcadlo M4, tím korigujeme sférickou aberaci primárního zrcadla
- ve středu křivosti m3 se nachází výstupní pupila afokálního zrcadla
- výhodný pro budoucí velká zrcadla

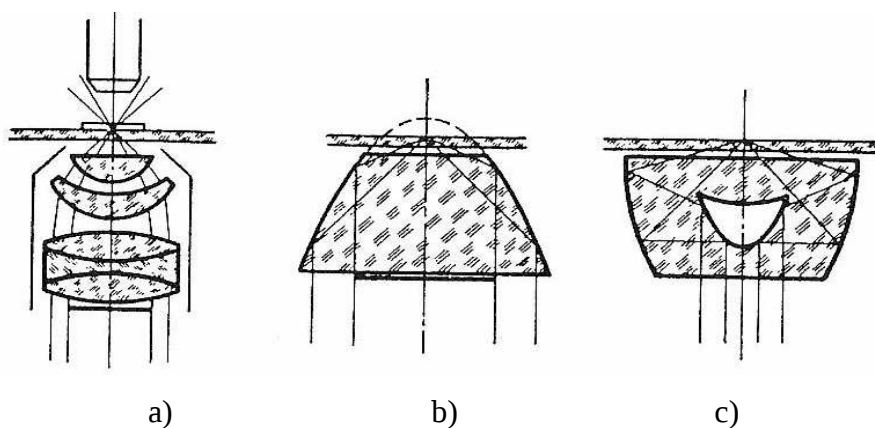
-zatím nebyl realizován



Obr.34: Paul-Schmidt teleskop.

5.2. Osvětlovací soustavy.

Jelikož potřebujeme osvětlovat dva druhy předmětu a to průhledné a neprůhledné, přichází v úvahu dva druhy osvětlení, osvětlení odrazem a osvětlení lomem, podle druhu vedení paprsků osvětlení tmavým, či světlým pozadím. Světlé pozadí dostaneme pravidelným lomem či odrazem a vycházející paprsky se dostanou do oka. Naopak u tmavého pozadí se dostane světlo do oka odchýlené ohybem na předmětu.



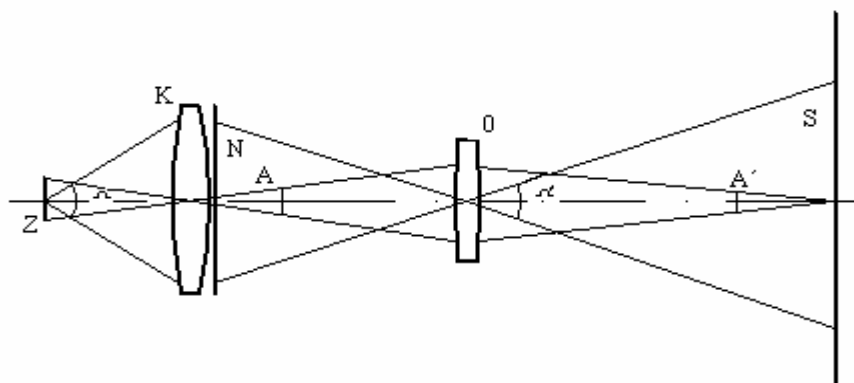
Obr.35: Kondenzory pro osvětlení tmavým polem: a) kondenzor s clonou, b) kondenzor paraboloidický, c) kondenzor kardioidický. [12]

5.3. Promítací přístroje:

Jedná se o přístroje které slouží k pořízení zvětšeného obrazu pozorovaného předmětu, který je rovinný a vysoce osvětlený. Promítací přístroje se skládají ze dvou částí: osvětlovací soustavy a promítací soustavy, tyto součásti musí být navzájem velmi

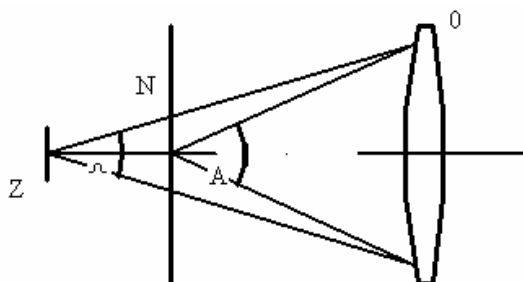
přesně seřízeny, aby vše správně fungovalo. Tyto promítací přístroje dělíme na dvě skupiny:

- 1) Diaskopické—u těchto přístrojů zobrazujeme předmět paprsky, které tímto předmětem procházejí. Přístroje se pak nazývají Diaskopy a používají se pro promítání diapozitivů, promítání filmů, zvětšování negativů, kontrole strojních součástí aj.
- 2) Episkopické—u těchto přístrojů jde o promítání neprůhledných předmětů, zkoumaný předmět osvětlíme a zobrazení se účastní odražené paprsky. Přístroje se pak nazývají Episkopy a používají se k promítání map, rysů, obrázků apod.



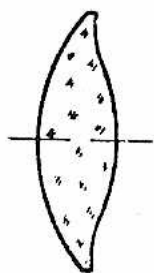
Obr.36: Optická soustava osvětlovacího a promítacího zařízení

Na obr.36 je světelný zdroj Z nahrazený plochou kondenzoru, která osvětluje rovnoměrně. Kdyby objektiv pojal všechny paprsky vyšlé ze zdroje, které projdou předmětem, tak by bylo možné se obejít bez kondenzoru, objektiv by však musel mít velký otvor jak to vidíme na obr.37.



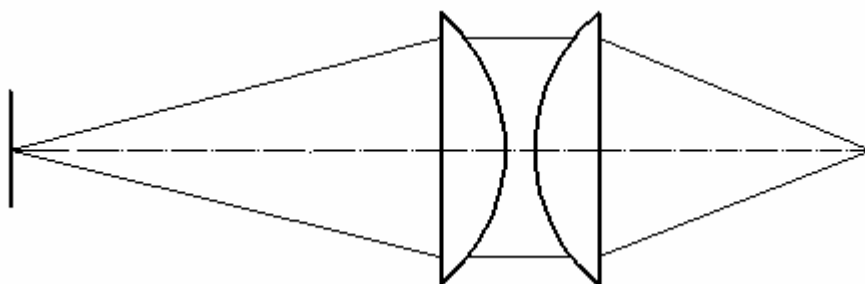
Obr.37: Osvětlení bez kondenzoru.

V praxi se užívá asférických kondenzorů zrcadlových i čočkových k eliminaci otvorové vady a komy. Příklad asférického kondenzoru vidíme na obr.38.

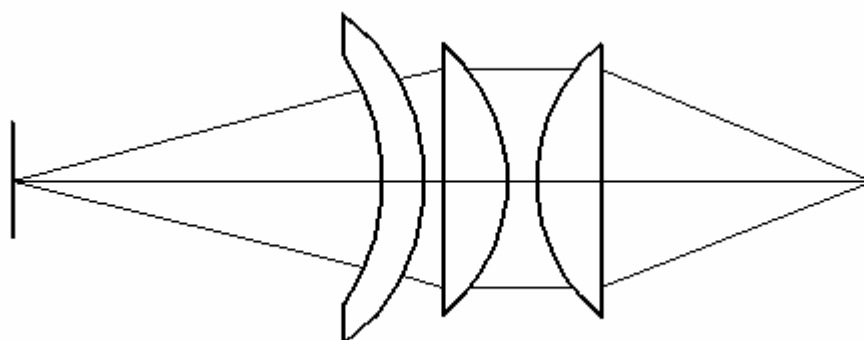


Obr.38: Asférický kondenzor. [12]

Další uvedené kondenzory jsou složeny z více optických komponentů, dvoudílné obr.39 a trojdílné obr.40.

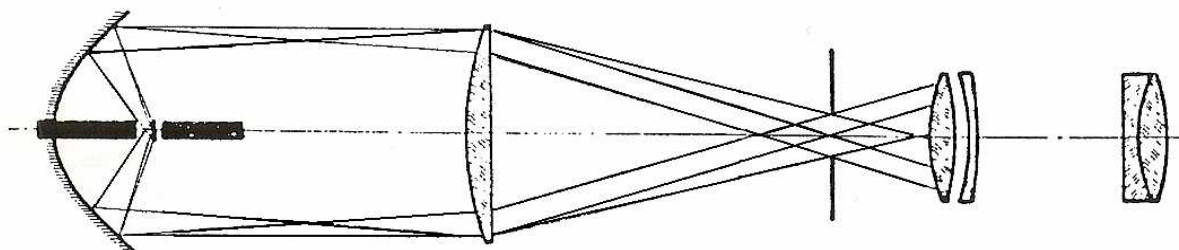


Obr.39: Dvoudílný kondenzor.

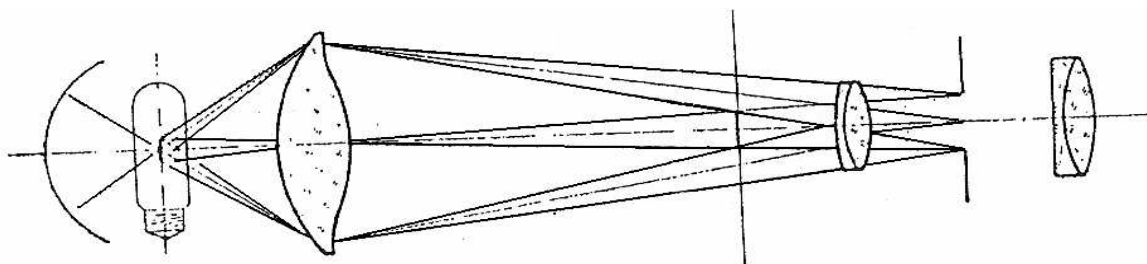


Obr.40: Trojdílný kondenzor.

Zrcadlové kondenzory jsou obvykle tvořeny elipsoidními, nebo paraboloidními zrcadly. Často tyto zrcadla kombinujeme ještě s vhodnými čočkami.



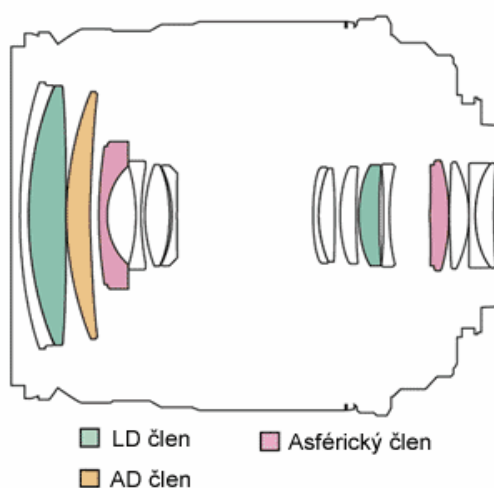
Obr.41: Optická soustava na promítání normálního filmu s paraboloidním zrcadlem. [12]



Obr.42: Optická soustava s asférickým členem na promítání úzkého filmu. [12]

5.4. Fotografické objektivy:

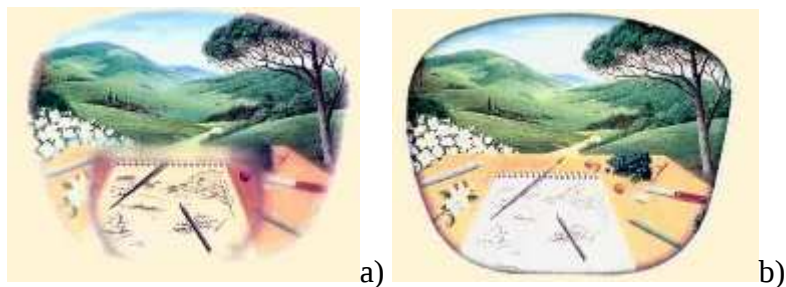
Asférickým objektivem můžeme nazývat takový objektiv, kde alespoň jeden člen má jiný tvar než kulový. Tento asférický optický člen má za úkol kompenzovat celou řadu vad způsobených ostatními optickými členy objektivu. Použitím asférického členu snížíme počet jiných použitých členů.



Obr.43: Objektiv Tamron AF 18-250mm F/3.5-6.3 Di II LD Aspherical (IF) Macro je vybaven LD a AD členy (členy s nízkou disperzí pro korekci barevné vady) a dvěma asférickými členy pro korekci sférické vady a astigmatismu. [4]

5.5. Brýlová optika:

Multifokální brýlové čočky: užívají se pro korekci presbiopie (vetchozrakosti). Tyto aférické povrchy umožňují presbyopům vidění jak do blízka, tak do dálky a to individuálně se měnícím plynulým přechodem dioptrické hodnoty, kde se spojitě mění funkční poloměr křivosti. U bifokálních, nebo trifokálních skel, kde přechod není plynulý, ale na čočce pro korekci do dálky je umístěn čtecí segment pro korekci do blízka, proto multifokální čočka nám zprostředkovává komfortnější vidění.



Obr.44: a) vidění bifokálním sklem, b) vidění multifokálním sklem [10]

Cylindrické a torické čočky: těchto typů skel se užívá pro korekci očního astigmatismu. Členění druhů těchto čoček jsem uvedla výše.

6.Závěr.

Ve své bakalářské práci byla řešena problematika použití, výroby a kontroly asférických ploch v optice. Tématika asférických ploch je aktuální, velmi zajímavá a obsáhlá, proto by si zasloužila hlubší studium. Předložená práce je pouze stručným přehledem pro základní orientaci a pochopení asférických prvků, jejich výroby, měření a použití. Většina zdrojů, ze kterých bylo možno čerpat je napsána v anglickém jazyce, tudíž bylo obtížnější danou problematiku správně pochopit. O to více mě to motivovalo při mé práci a snaze načerpat co nejvíce informací.

Seznam použité literatury:

- [1] Horn, : Optical production technology, A. Hilger ,London 1972

- [2] Rutrle, : Brýlová optika, Institut pro vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, Brno1993

- [3] Mikš, Novák: MODIFIKACE SHACK-HARTMANNOVA SENZORU, CVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra fyziky,
http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/matlab03/miks3.pdf

- [4] http://www.fotoroman.cz/glossary2/2_aspherical.htm

- [5] Olivek, Fahnle and Hedser var Brug: Novel approaches to generate aspherical optical surfaces .
http://www.optica.tn.tudelft.nl/publications/Thesis/Oliver_Faehnle.pdf

- [6] přednášky Doc.Řeháčka, OPT/AO

- [7] <http://www-optics.unine.ch/events/engelberg2007/pdf/WE2%20-%20Processing%20and%20Metrology%20-%20Tiziani.pdf>

- [8] <http://jakub.serych.cz/lesteni-zkouseni-zrcadla>

- [9] Hošek, : Měření kvality asférických optických ploch, Ústav přístrojové a řídicí techniky, FS ČVUT, Praha. Ústav termodynamiky AV ČR, Praha, JMO 2/2006.

- [10] <http://www.optika-iva.cz/multi.php>

- [11] Astropic č.1, ročník 2006, <http://www.astropis.cz/>

- [12] Fuka, Havelka, : Optika.Praha 1961

- [13] přednášky RNDr. Palatky, SLO/MNZS

- [14] <http://stelweb.asu.cas.cz/web/dalekohled/zrcadloved.php>