



UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO
ODDELEK ZA FIZIKO

NAČRTOVANJE OPTIČNIH ELEMENTOV

Seminar pri Izbranih poglavjih iz uporabne fizike

mentor:
doc. dr. Primož Zihel

Aleks Žagar
Ljubljana, 3. april 2007

KAZALO

UVOD.....	4
1. KRATKA ZGODOVINA.....	5
2. OD NAČRTOVANJA DO IZVEDBE.....	5
3. MATERIALI.....	9
3.1. OPTIČNA STEKLA.....	9
3.2. MATERIALI Z MAJHNO RAZTEZNOSTJO.....	9
4. IZDELAVA STEKLA IN KRITERIJI.....	10
5. OPTIČNI ELEMENTI.....	11
6. PARAMETRI OPTIČNIH ELEMENTOV.....	13
7. ODPRAVLJANJE NAPAK LEČ IN ZRCAL.....	14
7.1. DISTORZIJA.....	14
7.2. KROMATIČNA ABERACIJA.....	14
7.3. SFERNA ABERACIJA	15
7.3.1. AKROMAT IN APOKROMAT	15
7.4. ASTIGMATIZEM.....	17
7.5. KOMA.....	17
8. PRIMERI OPTIČNIH SISTEMOV.....	18
8.1. PROJEKTOR.....	18
8.2. ŠIROKOKOTNO LEČJE.....	19
8.3. ZOOM LEČJE.....	19
8.4. OČALA ZA NOČNO OPAZOVANJE (OJAČEVALNIKI SLIKE).....	20
9. OPTIČNI ELEMENTI IN NAČRTOVANJE V ASTRONOMIJI	21
9.1. TIPI TELESKOPOV.....	21
9.1.1. REFRAKTOR.....	21
9.1.2. REFLEKTOR.....	22
9.1.3. KATADIOPTRIČNI TELESKOPI.....	22
9.2. PRIMER: NAČRTOVANJE IN GRADNJA VLT-ja.....	22
9.2.1. IZDELAVA ZRCALA.....	23
9.2.2. TESTI	24
ZAKLJUČEK.....	25
VIRI IN LITERATURA	26

POVZETEK

V seminarski nalogi predstavimo optične elemente in sisteme ter načrtovanje le-teh. Najprej na kratko pregledamo zgodovino izdelave in uporabe optičnih naprav. Povzamemo celoten proces od načrtovanja do izdelave in nato malce podrobneje opišemo posamezne probleme in glavne značilnosti. Predstavimo nekatere materiale in tehnike izdelave, ki se uporabljajo v industriji optičnih elementov. Večji del seminarja posvetimo različnim tipom optičnih elementov, ki tvorijo večje sisteme, načrtovanju in problemom, ki se pojavljajo ob tem. Za konec predstavimo še različne aspekte uporabe optike, predvsem v astronomiji in načrtovanje večjih teleskopov.

UVOD

Na začetku najprej definirajmo, kaj si pod pojmom »optični element« sploh predstavljamo. Optični element je širok pojem in zajema dosti več kot le navadne leče. Pri načrtovanju optičnih elementov moramo poleg namena in fizikalnih lastnosti samostojnega elementa upoštevati še funkcionalnost celotnega optičnega sistema in druge zunanje dejavnike, kot so cena, masa, velikost... Zato moramo pri načrtovanju optičnih elementov govoriti o splošnejšem načrtovanju optičnih sistemov, ki na želen način zbirajo in oddajajo svetlobo.

Kdo je prvi prišel na idejo izdelati optični element – lečo, ni popolnoma znano, vendar med začetnike daljnogleda in teleskopa prištevamo Galilea in Newtona [1]. Optiko v praktične namene uporabljamo vse od začetka 16. stoletja dalje. V večini pogledov je načrtovanje optičnih elementov danes znano področje, čeprav je tehnološko daleč od začetkov. Nekoč neprecenjivo drage in redke ročno izdelane optične naprave si v današnji tehnološki dobi lahko privoščimo po razumnih cenah v kratkem dobavnem času. Izdelava in načrtovanje sta tu poleg znanja o materialih in napredka v tehnologiji bistvenega pomena, zato smo se tu odločili načrtovanje optičnih elementov v povezavi z industrijo predstaviti z različnih aspektov.

1. KRATKA ZGODOVINA

Prvi zapisi o lečah oz. optičnih elementih z lastnostmi leč datirajo v antično Grčijo. Aristotel l. 424 pr. n. št. omenja uporabo zrcal ali leč za sežiganje sovražnikovega ladjevja. Najstarejši artefakt – kristal, obdelan v »obliko leče«, pa naj bi datiral celo v l. 640 pr. n. št. Iz obdobja rimskega cesarstva se pojavljajo zapisi o uporabi »lup« za povečavo in »konkavnih lečah« za korekcijo vida. Arabski matematik Ibn Sahl (cc. 940 – cc. 1000) naj bi med prvimi izračunal obliko leče in opisal nastanek slike v človeškem očesu. Prvi naočniki naj bi se pojavili v Italiji v 12. stoletju. Galileo Galilei (1564-1642) naj bi leta 1609 slišal za nizozemsko odkritje in si sestavil daljnogled (refraktor) iz zbiralne in razpršilne leče, ki si ju je izbrusil sam, kar ga je privedlo do znanih odkritij Jupitrovih lun. Isac Newton naj bi okoli leta 1670 zasnoval prvi reflektor [2]. Sodobna razširjena uporaba leč pa se je začela šele z napredkom tehnologije in znanja po industrijski revoluciji.

2. OD NAČRTOVANJA DO IZVEDBE

Lečo, optični element ali optične sisteme lahko opišemo s krivinskim polmerom, debelino, razdaljo med lečami, vrsto stekla, dodatki in mešanici v njem.... Vse te lastnosti in še mnoge druge definirajo naš optični sistem, njegovo uporabnost in namen. Vse druge lastnosti, kot so poti in obnašanje svetlobe v takih optičnih sistemih, lahko z uporabo matematike in geometrije več ali manj preprosto (za natreniranega optika) izračunamo in načrtujemo. Načrtovanje poteka v stilu vaj iz Optike in Fizike 1, kjer smo privzeli obosno aproksimacijo, pomembna pa je visoka natančnost (5 do 8 decimalnih mest). V današnjih časih to niti ne predstavlja velikega problema, lahko pa si predstavljamo, kako mukotrpnost so bili taki izračuni pred 100 leti. Za sistem 6 leč je npr. potrebno preračunati 200 poti žarkov na vsaki površini, torej cc. 3000 skupno za celotno lečje, če hočemo doseči potrebno natančnost [3]. Časovna zahtevnost takega ročnega računanja torej približno nanese 1000 delovnih ur, ki naj bi ga menda večinoma opravljali matematiki [3]. Za čimbolj realno sliko lečnih sistemov oz. izkoristek čimvečje površine leče računanje z obosnimi aproksimacijami ne pripomore k natančnosti, saj so pomembni tudi predvsem neobosni žarki. Računanje s prirejenimi formulami se tud zaplete in večinoma se zato pri načrtovanju zatekamo k numeričnemu računanju oz. uporabi računalnikov in aproksimacijam, ki omogočajo kompromis med natančnostjo in znanimi ter neznanimi faktorji. Delo in natančnost otežuje že sama narava svetlobe, ki je sestavljena iz več valovnih dolžin z različno disperzijo, kar ima za posledico različne optične aberacije. Znanje o minimizaciji sistemov in poznavanje optičnih aberacij pri prehodu svetlobe skozi optični element je torej osnova za načrtovanje [3]. Aberacije v procesu optimizacije lahko opišemo s pravilno uteženimi polinomi, kjer vsak člen predstavlja posamezno aberacijo, potence pa njeno magnitudo [4]. A tak pristop zopet pomeni le aproksimacijo, podobno kot zanemarjanje dejstva, da imajo aberacije učinek na celotno polje slike in ne le robove ali center. Čim boljši približki so tu za doseganje boljše natančnosti bistvenega pomena saj aberacije povzročijo, da se energija svetlobnega toka iz točke neregularno porazdeli po celotnem polju slike. Po drugi strani pa je potrebno pri načrtovanju imeti v mislih tudi kompromis med stroški izdelave in kakovostjo [4]. S prihodom računalnikov se je

torej spremenilo bolj malo, kar je presenetljivo dejstvo. Skrajšal se je le čas računanja. Število računskih parametrov se je povečalo. Kljub sklepanju enakih kompromisov pa so računalniki v optično načrtovanje le vnesli več prostostnih stopenj, saj lahko optimiziramo večje število elementov v krajšem času, kar omogoča večjo kontrolo aberacij oz. odstopanja od realnosti. Z računalniki lahko danes računamo poti 200000 žarkov / sekundo, celoten proces načrtovanja pa še vedno ostaja dokaj zapleten, saj je potrebno dobro poznavanje materialov, tehnikalij in programskih jezikov, kar lahko potrdim iz izkušenj, saj se kljub dolgotrajnemu seznanjanju z OSLO (Optics Software for Layout and Optimization) programsko kodo, v programu nisem preveč znašel. Uspelo pa mi je pregledati lečja v bazi in lastnosti, nekatere prikazane tudi na spodnjih slikah 1, 2, 3 in 4 [5]. V uporabi so različni programski paketi, npr. OSLO, Zemax, CODE-V, Sigma... Načrtovanje poteka tako, da v tak program najprej vnesemo osnovne faktorje, kot so reflektivnost, število elementov, velikost, teža – izbira materiala, krivinske polmere... Nato lahko optimizacijo takega optičnega sistema prepustimo računalniku ali pa iz baze podatkov izberemo že obstoječ, podoben optični sistem in ga prilagodimo glede na željeno končno funkcijo in obliko optičnega sistema. Končen optičen sistem se nato preveri z analizo korelacij, aberacij in ostalih lastnosti. Kakovost in lastnosti sistema lahko opazujemo in prilagajamo glede na analizo poti žarkov, energijsko analizo, porazdelitveno funkcijo, diagram preslikave valovnih front, aberacije... Tako optimiziran optični sistem je tako pripravljen za izdelavo, tu pa se težave lahko šele začnejo, saj se rešitve morda ne skladajo z industrijskimi pogoji, kot so npr. čim manjša cena surovin, kar pogojuje primerno ceno končnega izdelka, tehnična zmožnost izdelave, enostavnost izdelave, časovna zahtevnost... Če povzamem so tako:

1. glavni cilji načrtovanja:

- optimalen končni izdelek, ki zadosti zahtevam naročnika
- primerna, dosegljiva cena

2. tipične zahteve pri načrtovanju:

- čim večja natančnost (odprava aberacij)
- primerna izbira materialov
- upoštevanje standardov
- čimmanjša časovna zahtevnost in kompleksnost izdelave
- dolgotrajnost izdelka
- majhna teža

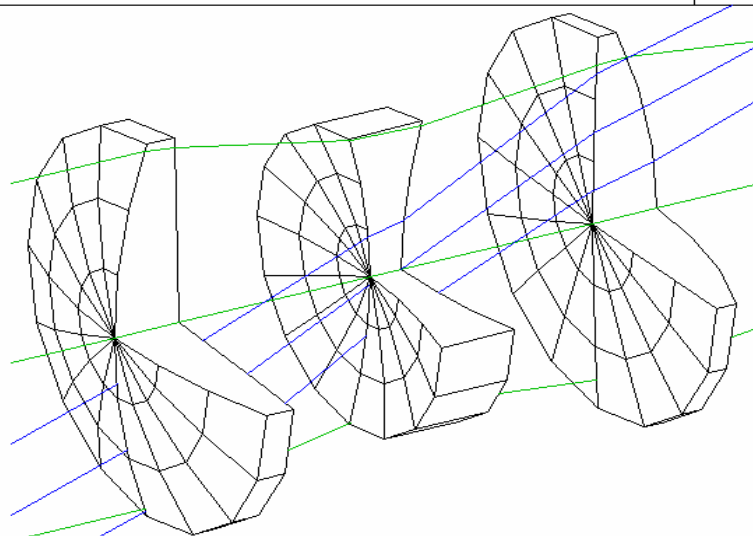
3. omejitve pri načrtovanju:

- kompromis med stroški izdelave in kakovostjo
- časovna in tehnična zahtevnost izdelave
- omejitve pri izbiri materialov
- zunanji dejavniki (klima, okolje...)
- upoštevanje numeričnih aproksimacij za opis realnega sistema

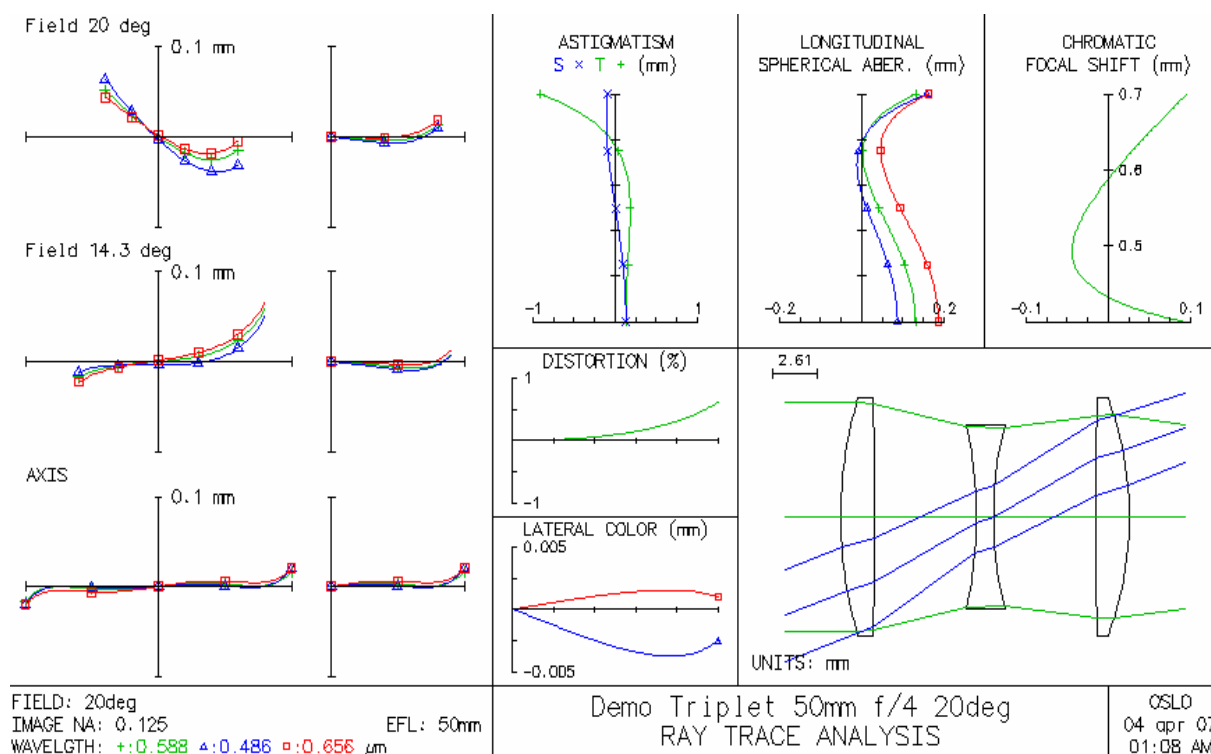
Demo Triplet 50mm f/4 20deg
 FOCAL LENGTH = 50 NA = 0.125

UNITS: MM
 DES: OSLO

3.02

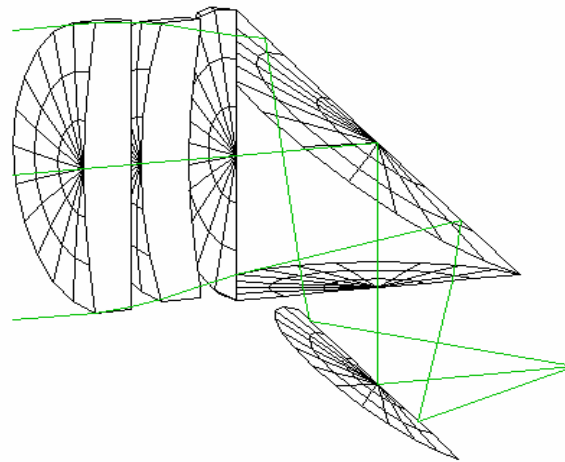


Slika 1: Shematski prikaz poti žarkov pri tripletu z efektivno goriščno razdaljo 50 mm, sestavljenemu iz dveh plankonvexnih leč in srednje, bikonkavne [5].

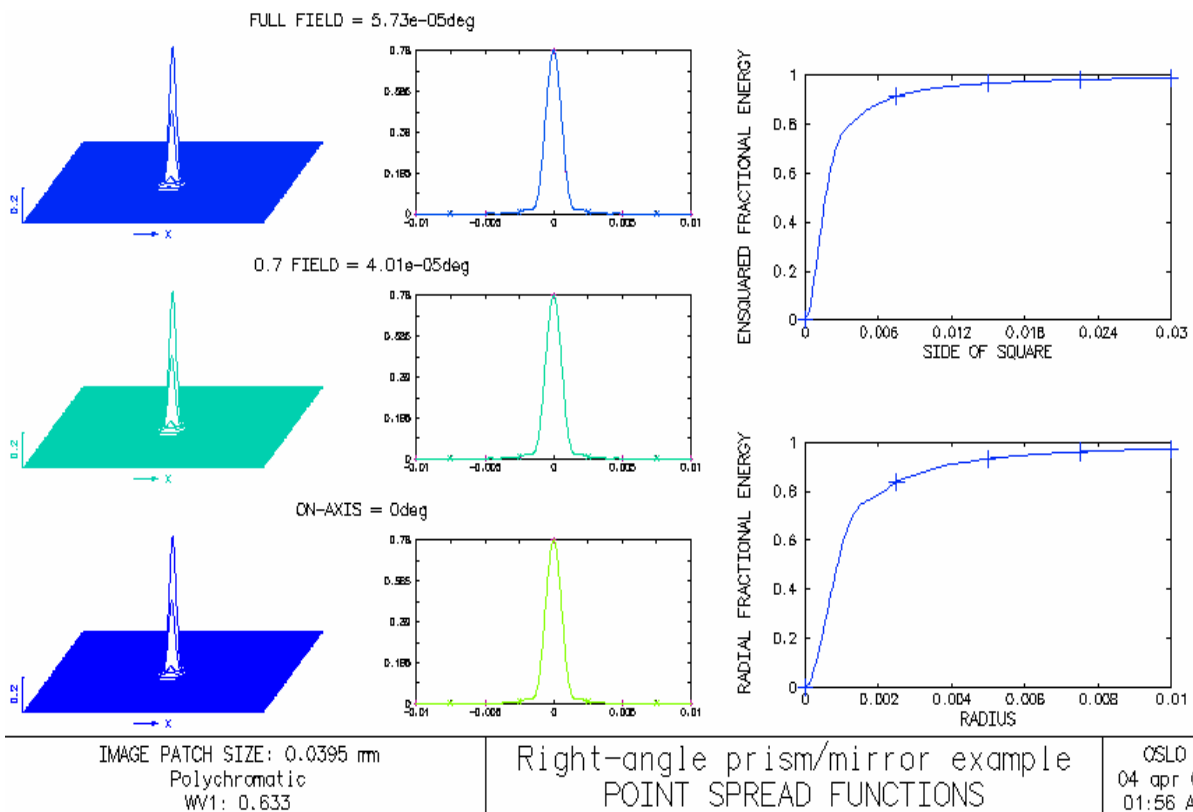


Slika 2: Aberacije zgornjega tripleta in vidno polje; na zgornjih slikah levo je prikazana analiza napake poti žarkov v odvisnosti od oddaljenosti centra lečja (presečišče) pri treh različnih zornih kotih (20°, 14.3° in obosnih žarkih) za tri različne valovne dolžine (legenda-zelena, modra, rdeča). Opazimo lahko, da so napake pri preslikavi optičnih žarkov za vse tri valovne dolžine primerljive in so najmanjše pri obosni aproksimaciji. Na zgornjih slikah desno so prikazane odvisnosti aberacij (astigmatizem, longitudinalna sferična aberacija in kromatična aberacija) od valovne dolžine. Posebno izraziti sta barvna napaka in fazni zamik v odvisnosti od valovne dolžine, ki prikazujeta apokromatske in akromatske lastnosti lečja (glej 7.3.1.) za modre in zelene valovne dolžine. Na spodnji sliki desno pa je shematski profil lečja [5].

10.5



Slika 3: Shematski prikaz poti žarkov pri optičnem sistemu, sestavljenem iz dveh leč, prizme in zrcalnega elementa (npr, primer persikop). Sistem vhodnih dveh leč poskrbi za odpravo sferične in kromatične aberacije, prizma in zrcalni element pa za preslikavo optičnega snopa v zeleno smer.



Slika 4: Porazdelitve polja valovnih front (PSF) in energijska analiza zgornjega sistema. Na grafih levo je prikazana porazdelitev preslikave polja valovnih front točkastega izvora pri treh različnih pokritostih polja (celotno polje, 07 % polja in obosna aproksimacija). Iz oblike porazdelitve lahko sklepamo na uklonsko interferenčne pojave pri preslikavi svetlobnega polja v optičnem sistemu. Iz energijske analize na desni pa je razvidno, da se v primarni vrh uklonskega vzorca, Airyev disk, preslika cc. 85% celotnega svetlobnega toka.

3. MATERIALI

Materiali za optične elemente so večinoma trdni in prozorni materiali v optičnem delu spektra oz. materiali uporabni za preusmerjanje, filtriranje in transformacijo svetlobe v druge dele spektra. Še v drugi polovici 20. stoletja so kljub različnim kristalom, uporabnim v optične namene, pojem »optični materiali« enačili le s steklom. Šele z odkritjem laserja v začetku 70. let in razvojem tehnologije se je začela raznolika in natančnejša uporaba eksotičnih optičnih materialov, katerih lastnosti niti niso bile še dobro določene [6]. Odkrivanje novih in razširjanje uporabnosti že znanih materialov se po več kot četrt stoletja nadaljuje še danes. Večinoma razvoj sloni na potrebah vojaške industrije, medicine, vesoljskih tehnologij in znanosti. Po letu 1970 je v optiki pomembno vlogo začelo igrati infrardeče področje optičnega spektra, kar je med optične materiale uvrstilo še različne tipe kovin. Sam pojem »optični material« se nato je po 1980 močno razširil z uporabo materialov v optoelektroniki in z začetki optičnih vlaken [6]. Z razvojem vesoljske industrije in medicine se je povečala tudi potreba po lažjih optičnih materialih in materialih z majhnim prostorninskim raztezkom. Danes poleg novo razvijajočih materialov v optične namene uporabljamo več sto različnih vrst stekla, optičnih kristalov, zlitin kovin, silicija, keramike, plastike in materialov z dobro prevodniškimi lastnostmi [6]. Nekoliko bolj podrobno sem si ogledal dva najbolj razširjena tipa optičnih materialov.

3.1. OPTIČNO STEKLO

Steklo je amorfno, prozoren material. Steklo v najosnovnejši formi je mešanica silicijevega dioksida, različnih kovin in kalcija. Bistvo izdelave je v samem ulivanju mešanice, pa tudi v oblikovanju in ohlajanju mešanice, da tvori trdno agregatno stanje in ne kristalizira. Za optične elemente iz stekla, kot so npr. leče, želimo čimmanj optično nehomogeno strukturo, čimboljšo transparenco v vidnem spektru, trdnost, majhen prostorninski raztezek in dobre prevodniške lastnosti oz. čim manjšo temperaturno odvisnost. Pomembna je tudi odpornost na kemične substance (pH) in teža. Lastnosti, ki jih bolj ali manj poudarimo z različnimi mešanicami in dodatki, ki vplivajo na lomni kvocient, disperzijo in transparenco, so določene s standardi. Glede na te osnovne parametre in lastnosti ločimo npr. dva tipa stekla – krovno (crown) in kremenovo (flint) [6]. Ločita se po lomnih količnikih, n_d in disperzijskem Abbe-jevem številu, v_d za rumeno helijevo črto z $\lambda = 587.56$ nm (Abbe-jevo število (v) je podobno kot lomni količnik brezrazsežno število, ki določa disperzijo prozorne snovi. Snov z nizko disperzijo ima veliko Abbejevo število.). Pod krovno (oznaka K) štejemo stekla z $n_d > 1.60$, $v_d > 50$ in $n_d < 1.60$, $v_d > 55$; pod kremenova (oznaka F) pa z $n_d > 1.60$, $v_d < 55$.

3.2 MATERIALI Z MAJHNO RAZTEZOSTJO

V refleksni optiki je najpomembnejši kriterij majhna temperaturna odvisnost materialov. Za razliko od optičnega stekla je izdelava bolj preprosta, saj lokalne variacije temperature na površini pri brušenju in poliranju nimajo bistvenega učinka na kvaliteto, pa tudi nehomogenosti znotraj materiala ne igrajo bistvene vloge pri optičnih lastnostih. Materiali za zrcala se v glavnem delijo v tri skupine: stekla z majhno

razteznostjo, silicij-titan stekla in keramiko [6]. Keramike, npr. Zerodur, in stekla z majhnim prostorninskim raztezkom npr. Pyrex, imajo amorfnu strukturo in se od ostalih stekel ločijo bistveno le po razteznosti. Stekla z bazo silicija in titana pa imajo lahko trdno ali lažjo penasto strukturo in so med najbolj uporabljenimi materiali v astronomiji. Iz takega materiala je primarno zrcalo vesoljskega teleskopa Hubble [6].

4. IZDELAVA STEKLA IN KRITERIJI

Pri samem načrtovanju elementov je glede na želene lastnosti končnega optičnega sistema poleg različnih mešanic, dodakov oz. materialov potrebno izbrati tudi točno določene postopke in spremenljivke (npr. temperatura) med izdelavo. Potrebno je dobro ravnovesje med mehničnimi, termičnimi, optičnimi in kemijskimi lastnostmi. Najpomembnejši faktor pri izdelavi je mešanje, ki poskrbi za homogenost. Pomembno vlogo pa igra tudi počasno ohljanje, ki preprečuje nastajanje notranjih napetosti. Premešane in zmlete sestavine nato pri različnih tlakih stalijo pri temperaturah od 1300 °C do 1500 °C in počasi ohladijo. Pri izdelavi odpornejšega stekla nato steklo lahko še enkrat segrejejo nad 700 °C in nato hitro ohladijo na 20°C, kar nekoliko spremeni površino in strukturo [6]. Pomembno vlogo pri izbiri prave temperature igrajo dodatki. Kalcij npr. poskrbi za bolj stabilno strukturo, razni alkalni dodaki, npr. CaCO₃, pa z disintegracijo pri visokih temperaturah sprošča med segrevanjem nastali CO₂, ki tvori mehurčke v steklu, katerih delež se zmanjša z ustreznimi drugimi dodatki. Glavna izdelovalca različnih optičnih specialnih vrst stekla sta podjetji Hoya Optics in Schott Glass Technologies, ki pokrivata kar 75% svetovnega trga [6].

Po pravilni pripravi stekla in poliranju sledijo optični, kemični, mehnični in termični testi kakovosti stekla. Testirajo se vse notranje nepravilnosti v steklenih ploščah, kot so velikost zračnih mehurčkov, tujki v steklu, razpoke, diskontinuitete... Ti testi določajo standarde, ki so dokaj strogi. Po standardih o nehomogenosti stekla uporabljajo za optično steklo le stekla z najmanjšo skupno površino nehomogenosti (npr. zračnih mehurčkov) na 100 cm³ testnega vzorca, ki jih razdelijo v 4 razrede kakovosti po tabeli 1.

kakovost glede na nehomogenosti	skupna površina nehomogenosti mm ² /100 cm ³ testnega vzorca
0	od 0.00 do 0.03
1	od 0.03 do 0.10
2	od 0.10 do 0.25
3	od 0.25 do 0.50

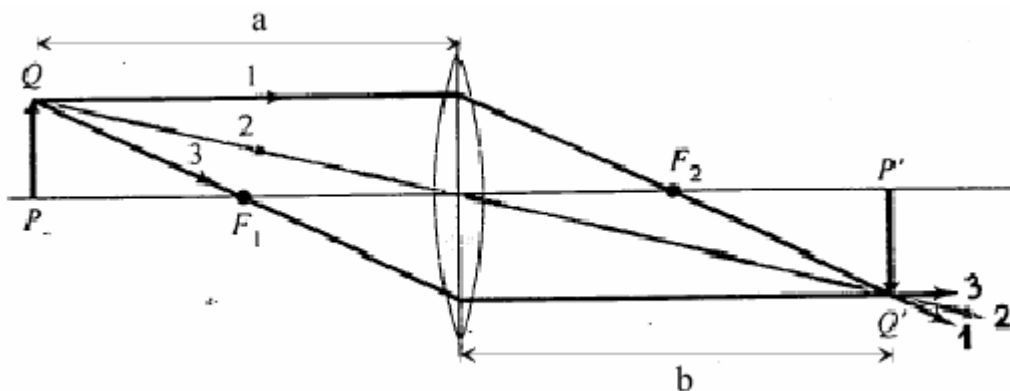
Tabela 1, Kakovostni razredi optično specialnega stekla glede na nehomogenosti v njem; po kvaliteti si sledijo od najboljšega (0) proti slabšim (4) [6].

Z veliko natančnostjo so izmerjeni tudi vsi parametri in lastnosti stekla, npr. lomni količnik pri različnih valovnih dolžinah je merjen na vsaj 5 decimalnih mest, saj to pripomore k natančnosti pri preračunavanju popravkov aberacij. Pri refleksnih

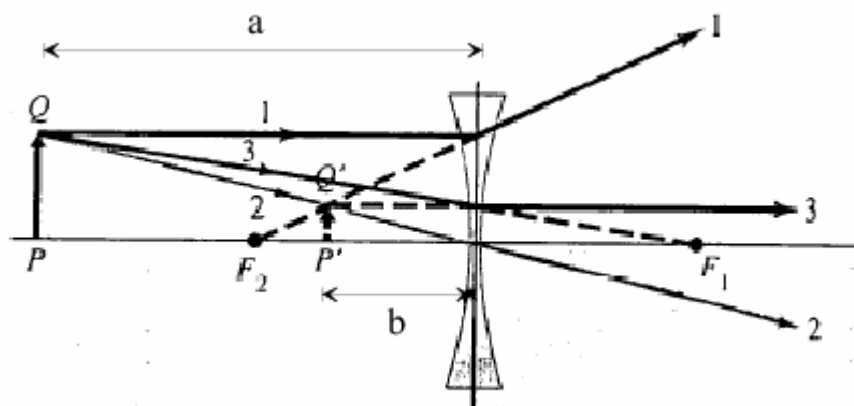
optičnih elementih pa so pomembni še dodatni optični testi, ki jih bomo omenil kasneje.

5. OPTIČNI ELEMENTI

Osnovni gradniki optičnih sistemov so različni tipi leč, zrcal, prizme... Leče in zrcala poleg različnih fizikalnih lastnosti (npr. transmisivnost, lomni količnik...), velikosti zornega polja (ozkokotne, širokokotne leče), delimo na več vrst tudi glede na obliko: sferične, asferične, parabolne... Glavna delitev leč je na zbiralne (konveksne) in razpršilne (konkavne) leče, ki pa se delijo v še več podskupin (slike 5, 6, 7). Iz takih različnih leč lahko sestavljamo lečja – optične sisteme, ki služijo različnim namenom, saj različne leče oz. sistemi leč različno vplivajo na nastanek slike.



Slika 5: Shematski prikaz poti treh standardnih žarkov, ki so v uporabi pri načrtovanju, za bikonveksno lečo [7].



Slika 6: Shematski prikaz poti treh standardnih žarkov, ki so v uporabi pri načrtovanju, za bikonkavno lečo [7].

Osnovni optični gradniki v optičnih napravah so večinoma skupki dveh, treh ali več leč, zato že sam izračun gorišča slike lahko predstavlja manjši geometrijski izziv. Izpeljava lastnosti slike [enačba leče - enačba (1) in povečava - enačba (2)] za eno samo (tanko) lečo je geometrijsko preprosta in da rezultat

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} = (n-1) \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right), \quad (1)$$

$$\frac{y'}{y} = \frac{b}{a} = \frac{f}{a-f}, \quad (2)$$

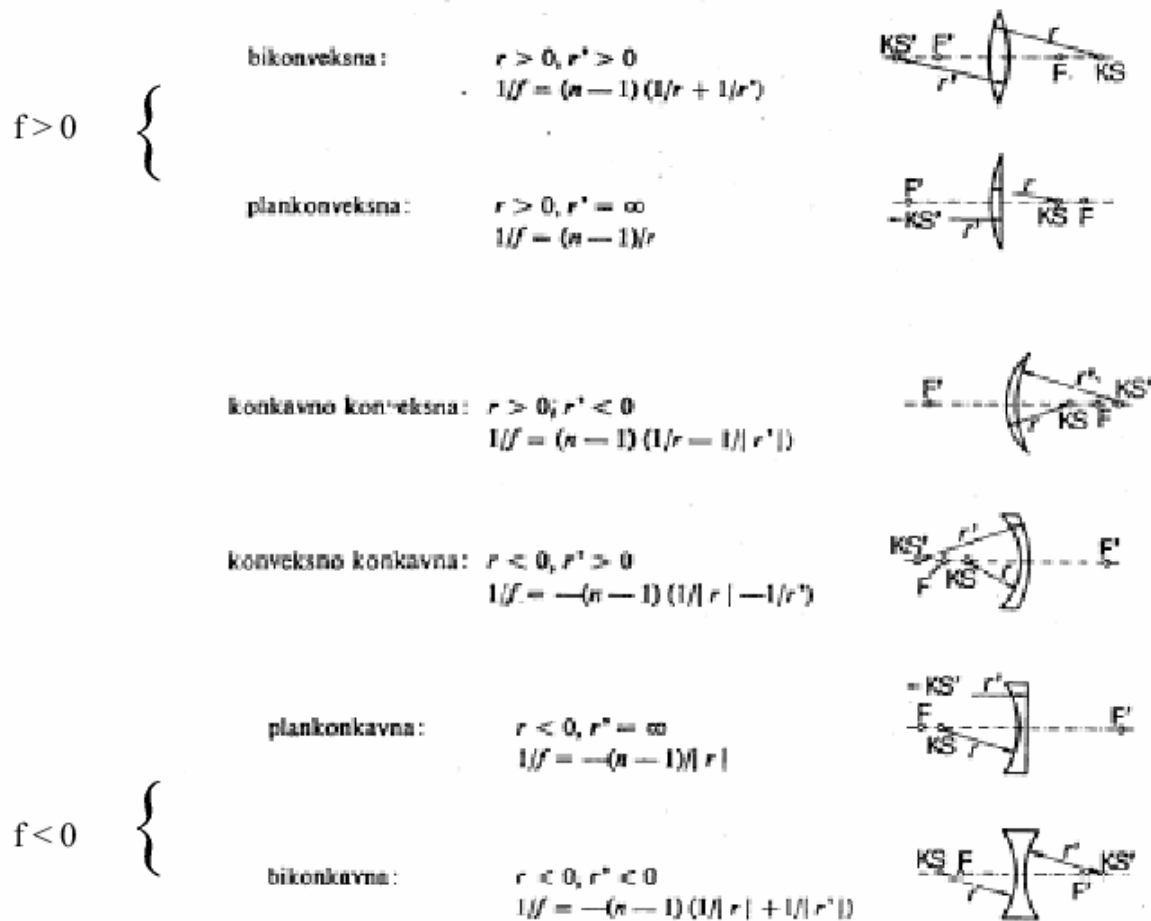
kjer je f oddaljenost goriščne ravnine, a oddaljenost predmeta in b oddaljenost slike od leče. V realnosti pa leče niso tanke in je debelino potrebno upoštevati. Za debelo lečo, kjer je potrebno upoštevati še debelino leče, dobimo enačbo

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n-1)d}{nR_1R_2} \right], \quad (3)$$

kjer je n lomni količnik, R_1 in R_2 krivinska polmera leče, d pa debelina leče [2]. Pri sistemih več leč, kjer se stvari zakomplicirajo, pa se dandanes iz praktičnih razlogov za načrtovanje uporablja računalnike. Za nastanek želene slike je pomembna postavitev in razdalja med lečami. Osnovna formula za izračun gorišča sistema dveh leč je

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{s}{f_1 f_2}, \quad (4)$$

kjer je s razdalja med lečama z goriščnima razdaljama f_1 in f_2 [7].



Slika 7: različni tipi leč in ustrezne enačbe za izračun goriščne razdalje; bikonveksna, plankonveksna, konkavno konveksna, konveksno konkavna, plankonkavna, bikonkavna [7]

6. PARAMETRI OPTIČNIH ELEMENTOV

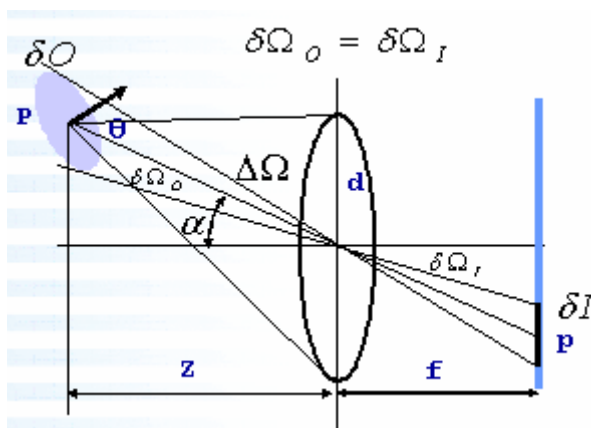
Poleg že naštetega moramo pri načrtovanju optičnih naprav upoštevati še različne fizikalne parametre optičnih elementov, kot so resolucija, kontrast, velikost zbiralnih površin optičnih elementov, težo, mejno magnitudo, ločljivost (Rayleighov kriterij)

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}, \quad (5)$$

kjer sta D premer odprtine (leče) in λ valovna dolžina; globinsko ostrino, vidno polje

$$\vartheta = 2 \arctan \frac{h}{2f}, \quad (6)$$

kjer je h velikost slike v fokusu; povečavo [enačba (2)], gorišče in oddaljenost predmetov [enačbi(1) in (3)], optična moč F , osvetljenost slike... Pri izpeljavi fotometrične enačbe oz. osvetljenosti slike si lahko pomagamo s sliko 8, samo izpeljavo smo opravili pri Astronomiji in Fiziki 1, zato tu le povzemam rezultat [8].



Slika 8: izpeljava osvetljenosti; P določa svetlobno polje izvora in ustrezno preslikavo le-tega na zaslon, α določa kot izvora glede na osno ravnino leče, z je oddaljenost izvora od leče, d premer odprtine (leče), f goriščna razdalja, $\Delta\Omega$ pa določa zorni kot izvora [8].

$$E(p) = L(p) \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{f} \right)^2 \cos^4 \alpha, \quad (7)$$

kjer je E osvetljenost [W/m^2], L svetlost [$\text{W}/(\text{sr}/\text{m}^2)$], f efektivna goriščna razdalja, d pa premer odprtine. Iz rezultata je razvidno, da je osvetljenost slike sorazmerna s svetlostjo predmeta in pada s četrto potenco kosinusa vpadnega kota. Odvisna pa je tudi od optične moči

$$F = \frac{f}{d}. \quad (8)$$

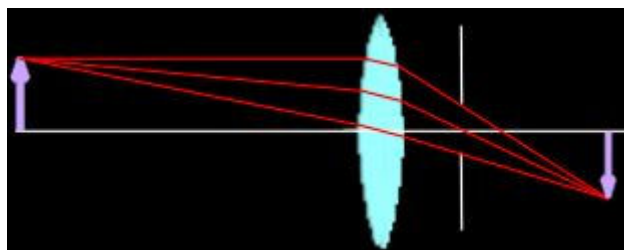
Za večjo osvetljenost slike (npr. pri projektorjih) se splača torej poskrbeti za čimbolj obosne žarke in manjše krivinske radije ter manjšo optično moč. To najlažje zagotovimo z velikimi lečami oz. sistemi več leč. Tu pa se pojavi problem izbire pravih materialov, omejitve pri konstrukcijah takih sistemov in velika masa.

7. ODPRAVLJANJE NAPAK LEČ IN ZRCAL

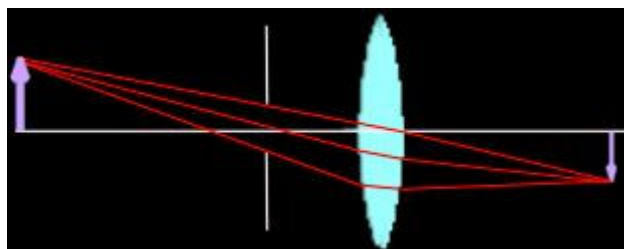
Pri načrtovanju optičnih sistemov je potrebno poskrbeti za čim boljšo sliko, kar pomeni tudi odpravo optičnih napak. Leča povzroči tudi napake. Zaradi loma svetlobe v steklu se pojavljajo poleg pozitivnih učinkov tudi negativni, ki zmanjšajo kvaliteto slike. Poglejmo te napake kar po vrsti.

7.1. DISTORZIJA

Je napaka leče, ki povzroči neostro sliko na robovih slikovnega polja in izbočenost slike, kar je razvidno s slike 11. Distorzija ali ukrivljenost slikovnega polja je odvisna od lege zaslonke glede na tanko zbiralno lečo. Lega zaslonke pogojuje obliko in stopnjo distorzije. Na slikah 9, 10 in 11 vidimo vpliv lege zaslonke na odslikavo predmeta in viden učinek distorzije na fotografiji.



Slika 9: vbočena distorzija, zaslonka za lečo [9]



Slika 10: sodasta distorzija, zaslonka pred lečo [9]

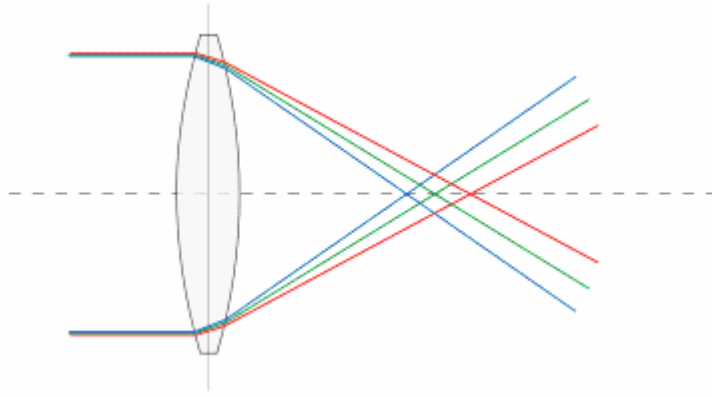


Slika 11: viden učinek distorzije [9]

Distorzija v sliki ni tako problematična, ker naša logika videnja prostora tega tako sprejema že zaradi perspektive. Vendar same aberacije ne smemo mešati z učinki perspektive, ki jo ustvarjajo širokokotni objektivni.

7.2. KROMATIČNA ABERACIJA (BARVNA NAPAKA)

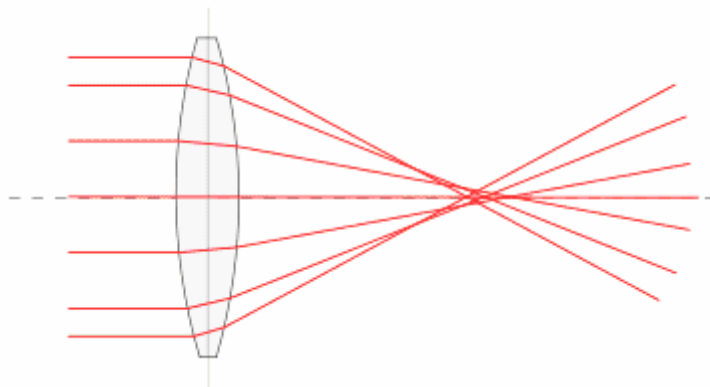
Je posledica razklona žarkov različnih valovnih dolžin pri lomu skozi lečo. Nastane ob robovih leče kot mavrično obarvanje kontrastnih robov slike, predvsem svetlejših točk. Barvni razklon leče je odpravil akromat, večlečni sistem z različnimi lomnimi količniki, ki kompenzirajo medsebojno kromatično aberacijo in tvorijo sliko pri različnih valovnih dolžinah v istem gorišču (glej 7.3.1). Pri izdelavi prvih refraktorjev so efekt kromatične aberacije poskušali zmanjšati z dolgimi goriščnimi razdaljami, kar je imelo za posledico nepraktične, dolge teleskope, majhno zorno polje, slabšo svetlost, a dober kontrast in so bili primerni za opazovanje planetov in Lune. Bolj nazoren prikaz kromatične aberacije vidimo na sliki 12.



Slika 12: Prikaz kromatične aberacije, ki je posledica razklona žarkov različnih valovnih dolžin pri lomu skozi lečo [9].

7.3. SFERIČNA ABERACIJA (NAPAKA PASOV)

Je optična napaka, ki povzroči neostrino slike. Pojavlja se ob robovih slike. Običajna leča zaradi sferične oblike lomi žarke v neko točko, ki pa ne sovpada za vse vpadne žarke. Žarki, ki prihajajo v lečo blizu sredine, se srečujejo bolj dlje za njo kot tisti, ki vpadejo v lečo na robovih, kar je razvidno s slike 13. Tako se izkaže, da goriščnica ni neka strogo definirana točka, zato film ali senzor postavimo v lego, ki je neka najboljša rešitev. Ta lega je v točki, kjer velikost neostrinskih krožcev še vedno omogoča dovolj ostro sliko. Nastane zaradi izbočenosti projekcijskega polja, zmanjšuje pa jo apokromat.

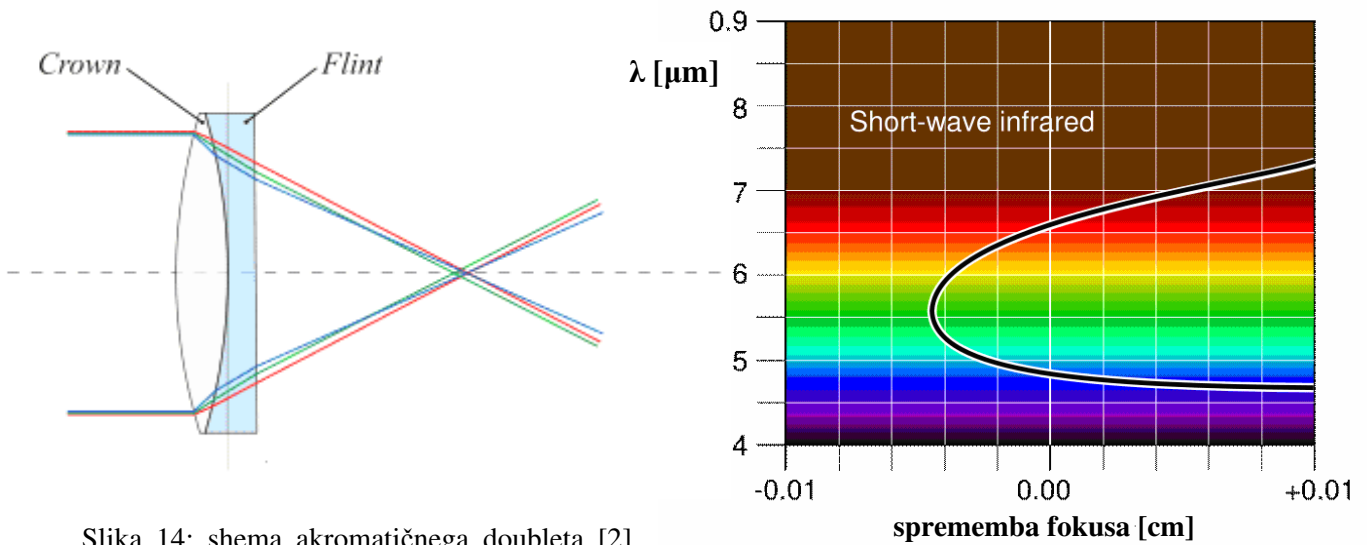


Slika 13: Sferična aberacija, ki je posledica različne preslikave obosnih in robnih žarkov v goriščno ravnino [9].

7.3.1. AKROMAT IN APOKROMAT

Najenostavnejši primer akromata je dvojni sistem leč - dublet, ki zmanjšuje učinke kromatične aberacije. Tipčno je sestavljen iz konkavne leče iz kremenovega stekla z visoko disperzijo in konveksne leče iz krovnega stekla z nizko disperzijo. Na ta način skupaj zloženi leči izničita medsebojni aberaciji dveh različnih valovnih dolžin in tvorita lečo, ki deluje kot konveksna ter preslika dve različni valovni dolžini v isto gorišče. Akromati so tipično sestavljeni tako, da imata rdeča in modra valovna dolžina

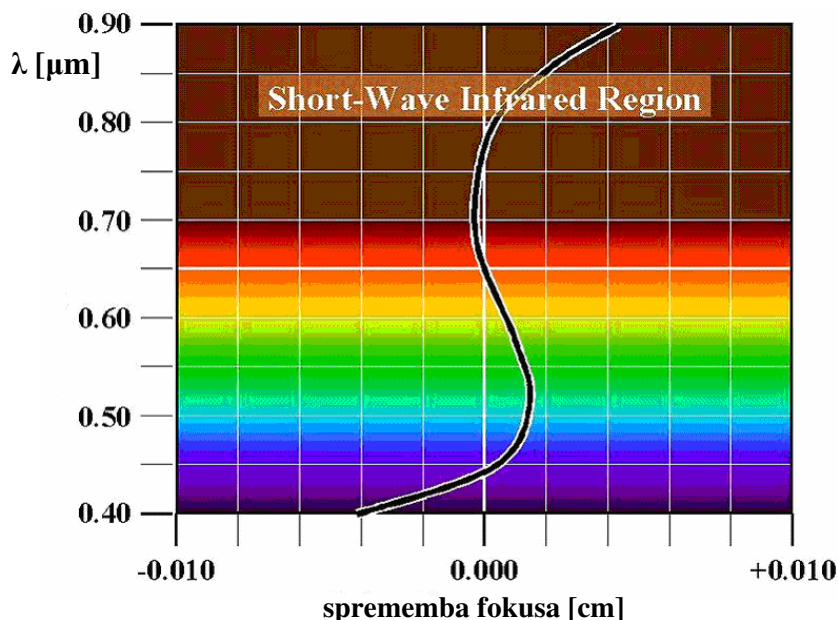
isto gorišče, kar prikazuje slika 14. Zanimivo je, da je bil izumljen že leta 1733. Sliki 15 in 16 prikazujeta omenjeno odpravo kromatične in sferične aberacije.



Slika 14: shema akromatičnega doubleta [2]

Slika 15 (desno): odvisnost barvne napake v odvisnosti od λ pri akromatu; Slika prikazuje graf spremembe fokusa v odvisnosti od λ za akromat z lomnim količnikom in Abbejevim številom obeh leč določenima tako, da goriščni ravnini rdeče in modre valovne dolžine sovpadata. Kromatična aberacija je tu modelirana s polinomom druge stopnje [2].

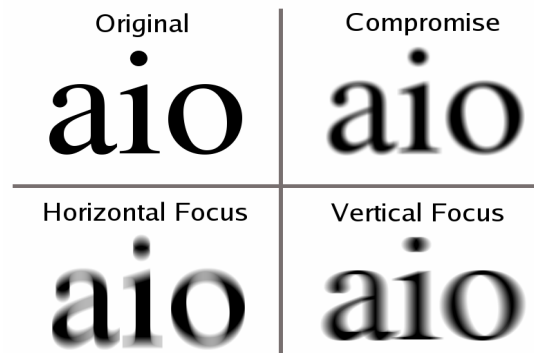
Apokromat je le izboljššan akromat. Medtem ko akromat preslika dve različni valovni dolžini v isto gorišče, so apokromati načrtovani za izenačnje fokusa treh različnih valovnih dolžin (navadno rdeče, zelene, modre). Prav tako bolje odpravijo sferično aberacijo, saj zmanjšamo razliko med disperzijo treh valovnih dolžini. Tretji način za odpravo napak pa so asferične oblike leč.



Slika 16: odvisnost barvne napake od valovne dolžine pri apokromatu; Slika prikazuje graf spremembe fokusa v odvisnosti od λ za apokromat z lomnim količnikom in Abbejevim številom treh leč navadno določenimi tako, da goriščne ravnine modre, zelene in rdeče valovne dolžine sovpadajo. Kromatična aberacija je tako modelirana s polinomom tretje stopnje [2].

7.4. ASTIGMATIZEM

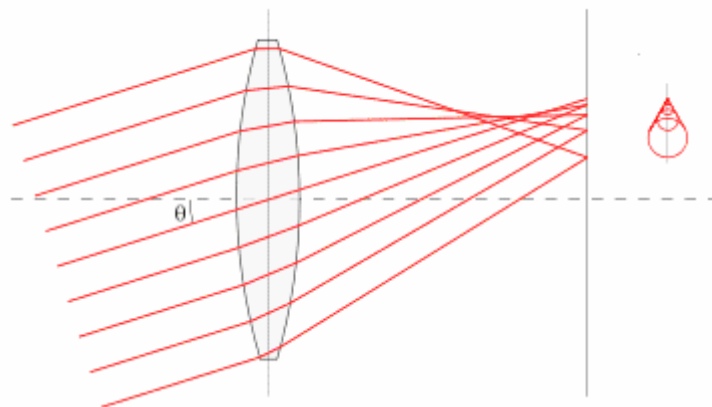
Napaka se pojavlja za žarke daleč izven optične osi. Sliko deformira tako, da se v eni dimenziji raztegne, v drugi pa skrči, kar je razvidno s slike 17.



Slika 17: vidna posledica astigmatizma, v levem spodnjem delu slike je primer horizontalnega popačenja, v spodnjem desnem delu slike je primer vertikalnega popačenja, v zgornjem delu pa je primer originala in kompromis (desno), ki ga lahko dosežemo s popravki dodatnih leč [2].

7.5. KOMA

Slike točke, ki se nahaja izven optične osi, ni več točka, temveč madež z repkom, ki spominja na komet, kar je prikazano na sliki 18. Odtod ime. Odpravimo jo z zaslonko pred objektivom in s primerno nastavljenimi krivinskimi polmeri leč.



Slika (18):shematski prikaz nastanka kome in prikaz popačenja slike [2]

Poleg teh napak se v sliki lahko pojavijo druge napake, kot so vinjet, popačenja neostrine v obliki mačjih oči in bokeha [2], v sliki pa se lahko odslikajo razni odsevi izvora svetlobe na površinah leč ali filtrov. Na tak način lahko v sliki opazimo razne odseve v obliki zaslonke, odboj od površine filtra in odsev na površini leč.

Pri načrtovanju lečnih sistemov poskušamo take napake odpraviti oz. optimizirati, čeprav to ni vedno možno. Da zadostimo vsem naštetim zahtevam, je potrebno

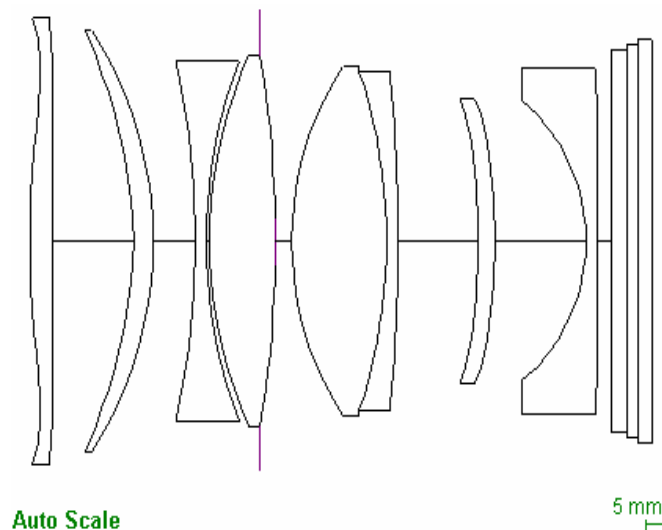
natančno brušenje določene oblike in poliranje. Astronomska zrcala so npr. polirana na manj kor $\lambda/8$ [10]. Na elemente se naprevajo antireflekcijske plasti, večplastne prevleke za določen efekt, itd. V Sloveniji takšne elemente proizvaja in načrtuje Fotona. V prizvodnji imajo opravka od izdelave mikro leč s premerom nad 10 mm, brušenja, laserskega rezanja, lepljenja optičnih komponent, izdelave astronomskih zrcal premera do 200 mm do konstrukcije optičnih prekritij po želji naročnika in poliranja, kvalitete ravnosti $\lambda/10$ na premeru 200 mm. Delovni procesi v oddelku za optiko in naprevanje vključujejo konstruiranje optičnih prekritij (računalniški program Optical Coating Design), nanos le-teh z vakuumskimi in tankoplastnimi tehnologijami (naparevalniki Balzers), meritve optičnih karakteristik prekritij (spektrofotometer Perkin Elmer lambda) in testiranja prekritij na abrazijo in kemične vplive [11].

8. PRIMERI OPTIČNIH SISTEMOV

Za prikaz kompleksnosti optičnih sistemov sem si ogledal in dodal shematsko konstrukcijo lečja za primere iz vsakdanje uporabe.

8.1. PROJEKTOR

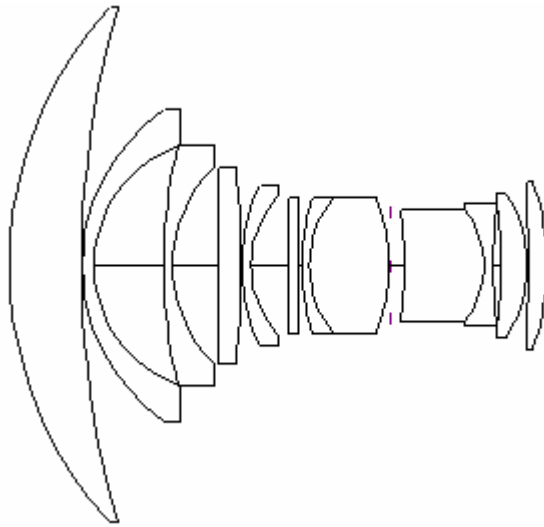
S projektorjem preslikujemo predmet na oddaljen zaslon. Projektor zato vsebuje zbiralno lečo s kratko goriščno razdaljo, ki nam na zaslonu da obrnjeno realno sliko. Sliši se enostavno! Pri načrtovanju projektorjev je bistvenega pomena, da izkoristimo čim večji del površine leče (ne le obosni del), teža, dobra resolucija in velikost slike in enostavnost uporabe, kar dosežemo z sistemom leč. Na sliki 19 je primer projekcijskega lečja sistema 11 leč iz baze OSLO.



Slika 19: sistem 11 leč za projektorje [5]; centralni lečji (dubleta) služita za odpravo kromatične aberacije, vidna je tudi zaslonka za odpravo kome, samostojni leči - druga leča z desne (konveksno konkavna) in peta leča z leve (konveksno konkavna) – služita najbrž za fokusiranje slike, medtem ko izhodna asferična leča (levo) in vhodni lečni sistem služita za izravnanje kotov slike oz. zmanjšujeta kot žarkov glede na optično os, kar zmanjšuje distorzijo in poveča izkoristek obosnega dela leče. Sliko nato lahko v zeleno smer preslikamo s prizmo. Problem pri načrtovanju takih sistemov je velika masa.

8.2. ŠIROKOKOTNO LEČJE

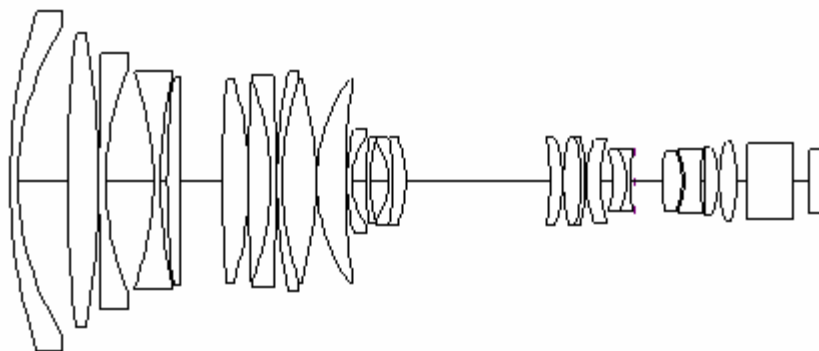
Na sliki 20 je primer super široko kotnega okularja.



Slika 20: širokokotni okular tipa Nagler, sistem 12 elementov z zornim poljem 50 - 65° [5]; plankonveksni sistem leč na vhodni strani optičnega sistema (desno), služi zbiranju in preslikavi žarkov vzporedno optični osi, kar omogoča natančnejše načrtovanje v približku obosne aproksimacije. Žarki iz npr. teleskopa tako padejo na apokromatsko lečje, ki jih nato preko korekcijskih elementov z naraščujočimi krivinskimi polmeri razprši na izhodno konkavno konveksno razpršilno lečo z največjim krivinskim polmerom, kar učinkovito pomeni večjo zbiralno površino in tako boljšo optično moč, večje zorno polje ter ločljivost. Prav tako ima tak sistem gorišče bližje, kot bi ga imelo podobno lečje z manjšimi krivinskimi polmeri, kar pri okularjih tudi pričakujemo.

8.3. ZOOM LEČJE

Na sliki 21 je primer lečja za povečavo in približevanje slike.



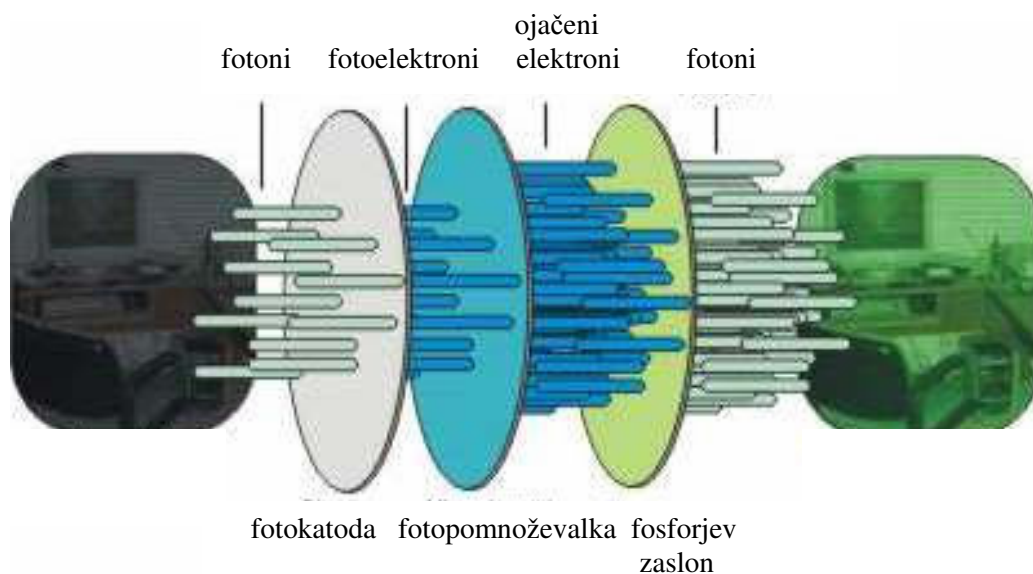
Slika 21: zoom objektiv, sistem 27 elementov, zorno polje cc. 40° [5]; podobno kot pri širokokotnem okularju, s slike 20, se tudi pri tem sistemu leč krivinski polmer povečuje [od izhoda, v npr. fotoaparatu, (desno) proti vходу (levo)] iz istega razloga. Vmesni korekcijski sistemi elementov služijo za fokus in korekcijo kromatične ter sferične aberacije.

8.4. OČALA ZA NOČNO OPAZOVANJE (OJAČEVALNIKI SLIKE)

Objektiv očal za nočno opazovanje (»nightvision«, primer na sliki 22) je načrtovan tako, da prepušča šibko vidno svetlobo in bližnje infrardeče območje. To šibko svetlobo s pomočjo fotoefekta in fotopomnoževalkami ojačijo in ojačene fotoelektrone vodijo na zaslon s fosforjevim premazom, kjer fotoelektroni povzročijo izsevanje fotonov. Te fotone v zelenih valovnih dolžinah lahko direktno zaznavamo prek okularja, kot je prikazano na sliki 23. Pri načrtovanju takega optičnega sistema je potrebno poskrbeti za čim boljšo transparentco, zorno polje in resolucijo, kar dosežemo s premazi optičnih površin in več elementi.



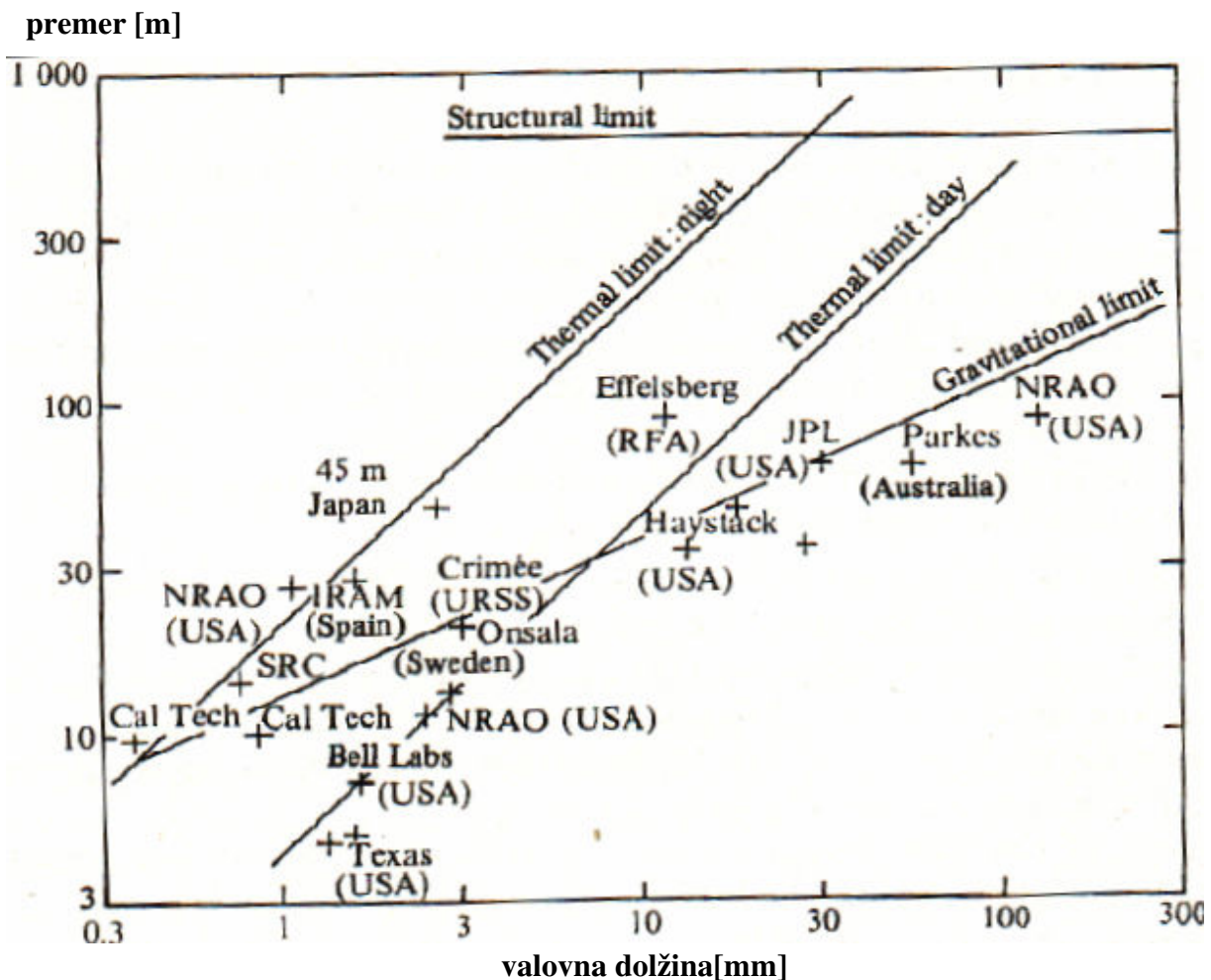
Slika 22: primer očal - ojačevalnika slike, ki ga v vojaške namene proizvaja B.E. Meyers podjetje [12].



Slika 23: shematski prikaz delovanja ojačevalnika slike; Fotoni iz vira padejo na fotokatodo, ki preko fotopomnoževalnih elementov ojačene fotoelektrone izseva na fosforjev zaslon, kjer lahko preko okularja direktno opazujemo ojačene izsevane fotone [12].

9. OPTIČNI ELEMENTI IN NAČRTOVANJE V ASTRONOMIJI

Prav tako kot optični elementi sami je pomembna tudi konstrukcija in podpora le teh. Bistvenega pomena pri načrtovanju smiselno še optimalne velikosti in tipov teleskopov je upoštevanje limit, ki jih določa nosilnost strukture, termika in gravitacija. Na grafu spodaj so prikazane vse tri limite in diametri paraboličnih anten v odvisnosti od valovne dolžine. Graf je sicer mišljen za radijsko astronomijo, za optični del spektra lahko podobno definiramo omejitve, le skala se bistveno zmanjša.



Slika 24: Iz gornjega grafa je razvidno da so pri načrtovanju odločilni tudi zunanji dejavniki oz. omejitve. Na grafu so prikazane konstrukcijska (structural), termična (thermal), gravitacijska (gravitational) limita in premeri radijskih paraboličnih anten v odvisnosti od valovne dolžine. Graf lahko mirne vesti ekstrapoliramo za primer manjših optičnih valovnih dolžin, saj se občutno zmanjša le skala [13].

9.1. TIPI TELESKOPOV

9.1.1. REFRAKTOR

Refraktorji so lečni sistemi, ki za objektiv uporabljajo dve, štiri ali več leč (akromatični, apokromatični tipi). Kot smo že omenili je slabost akromatičnega objektiva barvna napaka, medtem ko apokromatični nimajo več vidne barvne napake,

a so dragi. Bistvena slabost je tudi omejitev velikosti objektiva na cc. 1 m. Načrtovanje ni bistveno drugačno od načrtovanja podobnih lečnih sistemov.

9.1.2. REFLEKTOR

Reflektorji za objektiv uporabljajo vbočeno parabolično zrcalo. Že sama oblika zrcala ima pomembno vlogo pri načrtovanju. Zaradi dobrega kompromisa med ceno, težo, enostavnostjo izdelave in velikostjo optičnih elementov so vsi večji teleskopi tega tipa. Prav tako je pomembna lastnost, da nimajo barvne napake in nismo omejeni le na določeno področje valovnih dolžin. Pojavljajo pa se optične napake proti robu vidnega polja (koma, ukrivljenost polja), kar lahko rešimo z zaslonkami, ki nam omejijo polje [14]. Pri načrtovanju je potrebno poleg že znanih dejavnikov upoštevati tudi to, kakšno funkcijo bo imel teleskop, lokacijo in termalno stabilnost (vremenske pogoje), tip postavitve elementov, tip montaže in to kakšen spekter svetlobe bomo opazovali. Potrebno je preračunati optimalno velikost optičnih elementov, npr. sekundarnega zrcala, da ne omeji odvečnega vidnega polja [14]. Ogromne razlike so že v naparevanju zrcal, zaradi različnih refleksijskih lastnosti materialov. V uporabi so najpogostejše Al+So₂ prevleke, bakrene, srebrne se uporabljajo npr. za opazovanje v modrem delu spektra, zlate pa od 1 μm dalje [14]. Glede na postavitev elementov ločimo več osnovnih tipov:

- Newton (parabolično ali sferično primarno, ravno sekundarno zrcalo)
- Cassegrain (parabolično primarno, hiperbolično sekundarno zrcalo)
- Ritchey-Chretien (obe zrcali hiperbolični, namenjen profesionalni rabi)
- Dall-Kirkham (eliptično primarno in izbočeno sferično sekundarno)
- Schiefspiegler (nagnjeno primarno zrcalo)

9.1.3. KATADIOPTRIČNI TELESKOPI

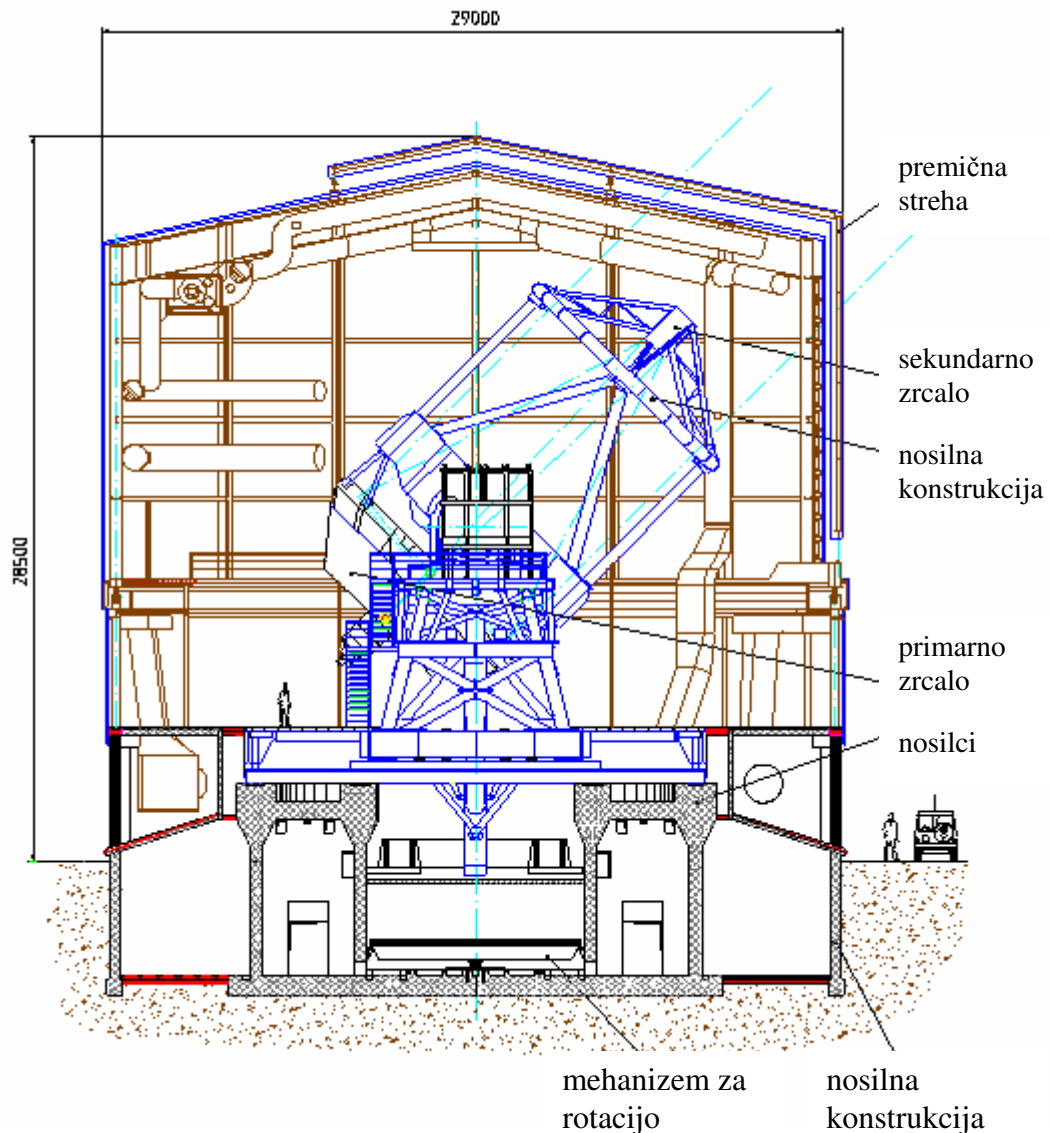
O tem tipu govorimo, ko je objektiv kombinacija reflektorja in refraktorja, kar ima prednosti pri odpravi aberacij. Ni npr. izrazite barvne napake in kome. Slabost pa je zopet kompleksnejša izdelava in tudi dražja cena, čeprav so še vedno cenejši kot apokromatični teleskopi. Ločimo 2 osnovna tipa:

- Schmidt-Cassegrain (korekcijska leča za odpravo sferične aberacije)
- Maksutov-Cassegrain (močno ukrivljena korekcijska leča s sferičnima površinama, sekundarno zrcalo je aluminiziran del korekcijske leče)

9.2. PRIMER: NAČRTOVANJE IN GRADNJA VERY LARGE TELESCOPE (VLT)

ESO Very Large Telescope je projekt štirih osemmetrskih teleskopov, ki so med seboj povezani. Skupna zbiralna moč je tako primerljiva z zbiralno močjo teleskopa s premerom 16 m. Načrtovan opazovalni spekter je od bližnje UV do 25 μm v infrardečem območju valovnih dolžin [15]. Pred začetkom načrtovanja in gradnje je potrebno opraviti teste na lokaciji, kot so npr. vlažnost, vetrovnost, nevarnost potresov..., da določimo vse parametre v načrtovanju. Spodnja slika 25 še najbolj

prikazuje obsežnost takega projekta, ki poleg točne adaptivne optike zajema tudi točno konstrukcijo, upoštevati pa je potrebno tudi, da gre za štiri take teleskope, ki naj bi usklajeno delovali in imeli čimbolj enake optične in fizikalne lastnosti.



Slika 25: shema celotne konstrukcije; S slike je razvidno nacrtovanje postavitve teleskopa, od montaže in mehanske podpore optike do nosilne in zaščitne konstrukcije. Že iz velikosti same je očitno, da gre za zahteven projekt, kjer je potrebno usklajeno delovanje vseh naštetih elementov za doseg čim večje natančnosti. Mehanizem za rotacijo pod teleskopom mora npr. delovati v okviru mikrometra natančno, sicer natančnost optike nima pomena [15].

9.2.1. IZDELAVA ZRCALA

Sekundarno zrcalo

Sekundarno zrcalo je sistem zrcal konveksno hiperbolične oblike iz berilija (M2), z Al prevleko, premerom 1116 mm in težo: 51 kg. Kontrolni mehanizem ima 5 možnih smeri pomikov, tako da je z nastavitvami položaja in orientacije možno popraviti fokus in komo [15].

Primarno zrcalo

Primarno zrcalo iz Zerodura ima premer 8.2 m, oblika pa je kontrolirana z adaptivno optiko preko 150 aksialnih pnevmatičnih mehanizmov, ki prilagajajo položaj glede na rezultate senzorjev. Preračunavanje enakomerne porazdelitve podpornih točk je bistvenega pomena, da zrcalo porazporedi težo in obdrži željeno obliko v kateremkoli položaju [15].

Da dobimo parabolično obliko, je zrcalo ulito med rotacijo. Kasnejše oblike se lahko popravlja z brušenjem in poliranjem. V postopku izdelave se v konkavno matrico ulije 45 ton mešanice, ki jo nato ohlajajo med rotacijo. Ko temperatura pade do približno 800°C in ima material dovolj veliko viskoznost, da obdrži obliko, zrcalo v posebni peči počasi (2-3 mesece) ohlajajo na sobno temperaturo. Najprej sledi proces odstranitve tanke plasti konveksne površine, ki je med procesom ohlajanja kristalizirala (ima drugačen temperaturni raztezek, kar lahko v nadaljnjem procesu ogrozi celotno strukturo). Nato pa se zbrusi konkavna površina. Sledi cikel keramizacije, kjer celotno zrcalo zopet segrevajo in ohlajajo v peči 9 mesecev, nakar sledi brušenje v končno obliko. Sledi transport zrcala do novega bivališča, kjer nanj pritrdijo nosilce za podporo adaptivne optike, kar traja cc. 2 meseca. Fino brušenje, ki sledi je kontrolirano na 0.5 mikrona natančnosti, za tem pa sledi še več stopenj poliranja. Oba procesa sta kontrolirana z interferometrom pri 633 nm. Spolirano zrcalo je zbrušeno do natančnosti 20 nm [15]. V končni fazi se nanesejo še prevleke, ki skrbijo za zaščito in boljše optične lastnosti.

9.2.2. TESTI

Testiranje se izvaja že med samim procesom izdelave. Končni test pa je test kakovosti, ki ugotovi ali dano zrcalo ustreza standardom. Testirajo so različne fizikalne količine od teže, dimenzij, lastnosti materiala, Youngovega modula, temperaturne odvisnosti, napetosti na robovih do geometrije in optičnih kakovosti. Testi potekajo na več neodvisnih načinov (npr. optično določeno obliko zrcala testirajo s sferometrijo, Hartmannovim testom in laserskim merjenjem razdalj) [10]. Istočasno se testirajo še morebitne sistematične napake, ki zagotavljajo ustreznost testnih rezultatov.

ZAKLJUČEK

Na prvi pogled se morda zdi, da sta načrtovanje in izdelava optičnih elementov večinoma enostavna, dodelana in znana. Znanih je več tisoč patentov. Načrtovanje si lahko olajšamo z računalniškimi programi, ki nam vrnejo že optimizirane rešitve za poljubno uporabnost. Vendar se hitro pokaže, da je samo načrtovanje optičnih sistemov kompleksno in odprto področje. Bistvo samo pa je v izdelavi, ki je od začetkov v 16. stoletju tako napredovala, da o enostavnosti in dodelanosti tega področja nikakor ne moremo govoriti, saj uporaba in odkrivanje novih tehnologij ter materialov prestavljata meje in odkrivata nove načine v uporabi ter načrtovanju optičnih elementov.

REFERENCE

- [1] J. Strnad, Razvoj fizike
- [2] <http://en.wikipedia.org>
- [3] <http://www.imx.nl/photosite/leica/technics/optics01/>
- [4] M. Laikin, Lens design
- [5] OSLO (Optics Software for Layout and Optimization)
- [6] H. H. Karow, Fabrication methods for precision optics
- [7] J. Strnad, Fizika 2
- [8] <http://vison.fe.uni-lj.si>
- [9] <http://www.astrokaktus.com/DigitalPhotography/index.html>
- [10] R. N. Wilson, Reflecting telescope optics 2
- [11] <http://www.fotona.si/>
- [12] <http://electronics.howstuffworks.com/>
- [13] skripta Tomaža Zwittera, predavanja Uvod v astronomska opazovanja
- [14] W. B. Elmer, The Optical Design Of Reflectors
- [15] <http://www.eso.org/>

Viri in Literatura:

OSLO (Optics Software for Layout and Optimization)

<http://www.fotona.si>

<http://en.wikipedia.org>

<http://vision.fe.uni-lj.si>

<http://www.astrokaktus.com>

<http://electronics.howstuffworks.com>

<http://www.eso.org>

<http://www.imx.nl/photosite/leica/technics/optics01/>

<http://www.jb.man.ac.uk/public/viewtels.html>

<http://www.europa.com/~telscope/atsabstr.txt>

<http://www2.arnes.si/~gljsentvid10/teleskopi.html>

H. H. Karow, Fabrication Methods For Precision Optics (John Wiley & Sons, New York, 2004).

J. Strnad, Fizika 2 (*DMFA*, Lj, 1995).

J. Strnad, Razvoj Fizike (*DZS*, Lj, 1996).

M. Laikin, Lens Design (Marcel Dekker, New York, 1995).

W. J. Smith, Modern Lens Design (McGraw-Hill, New York, 1992).

P. Mouroulis in J. Macdonald, Geometrical Optics And Optical Design (Oxford, New York, 1997).

W. B. Elmer, The Optical Design Of Reflectors (Springer, Berlin, 1996).

R. N. Wilson, Reflecting Telescope Optics 2 (Springer, Berlin, 1999).