

3. Sfääriliste peeglite kõverusraadiuse ja fookuskauguse määramine¹

3.1. Tööülesanne

Määrata kumer- ja nõguspeegli kõverusraadiused R ja fookuskaugused f . Veenduda summa $\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2}$ jäävuses.

3.2. Töövahendid

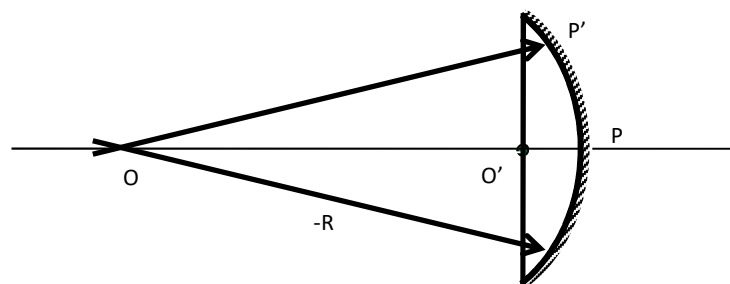
Mõõtjoolauaga varustatud optiline pink, ratsurid², kumer-, nõgus- ja tasapeegel, 3 varba teravikega, tuntud pikkusega kaugusmõõdik.

3.3. Töö käik

3.3.1. Teoreetilised alused

Sfäärilistel peeglitel on peegelpinnaks osa kerapinnast ehk sfäärist. Nõguspeeglil on peegelpinnaks kera sisepind, kumerpeeglil kera välispind. Sfäärilise peegli väline kontuur on harilikult ringjoon. Sel juhul moodustavad sfääri tsentrist O väljuvad ja peegli väliskontuuri puutuvad kiired koonuse, mis piirab teatud osa ruumist. Järgnevas käsitluses eeldame, et see ruuminurk on väike.

Peegelpinna moodustava sfääri raadiust nimetatakse peegli kõverusraadiuseks ja tähistatakse tähega R . Vastavalt märkide reeglile loeme kõverusraadiuse positiivseks, kui sfääri keskpunkt O asub sfäärilisest pinnast paremal ja negatiivseks, kui O asub sfäärilisest pinnast vasakul. Seejuures eeldatakse, et valgus langeb peeglile vasakult. Joonistele kantud lõikude pikkused loetakse alati positiivseteks. Seepärast on joonistel kõigi negatiivsete suuruste ees miinusmärk. Seega on joonisel 3.1 kujutatud nõguspeegli kõverusraadius negatiivne.



Joonis 3.1. Nõguspeegel

¹ Juhendi koostamisel on kasutatud kogumikku: I. Rammo, Optika praktikum I Kiirteoptika, TRÜ 1976 (P.Paris 2011)

² Ratsuriks nimetame optilisel pingil liikuvat statiivi töös vajalike detailide kinnitamiseks.

Sfääri tsentrit nimetatakse peegli **kõverustsentriks** O . Sirge, mis läbib kõverustsentri O ja sfäärilise peegli välise kontuuri tsentri O' , nimetame **optiliseks teljeks**. Telje lõikepunkti peegliga nimetame peegli **pooluseks** P . Sirge, mis läbib sfääri tsentri O aga ei läbi peegli poolust (näiteks sirge OP'), nimetame **optiliseks abiteljeks**.

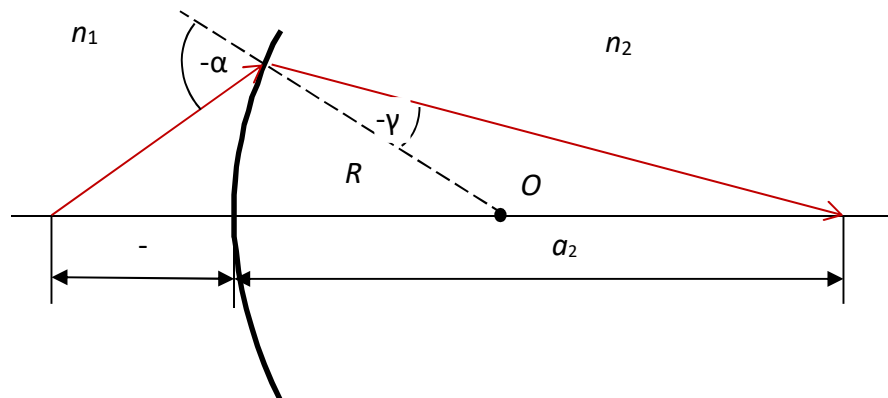
Erinevalt sfääriliste murdvate pindadega läätsest on sfäärilise peegli kõik teljed optiliselt samaväärsed. Mingil optilisel teljel asuvast valguspunktist väljuvad kiired lõikuvad pärast peeglis peegeldumist punktis, mis asub samal optilisel teljel.

Sfäärilise peegli valemi tuletamisel lähtume paraksiaalsete kiirte võrrandist (vt. ka M. Laan Geomeetiline optika: <http://www.physic.ut.ee/instituudid/efti/loengumaterjalid/opt/optika/geoopt/GO2/pt2.htm>):

$$\frac{n_2}{a_2} - \frac{n_1}{a_1} = \frac{n_2 - n_1}{R}. \quad (3.1)$$

Valemis (3.1) on n_1 ja n_2 vastavalt esimese ja teise keskkonna murdumisnäitajad (joonis 3.2), R – keskkondi eraldava sfäärilise pinna kõverusraadius, a_1 – eseme kaugus ja a_2 – kujutise kaugus sfäärilise pinna poolustest. Valem on rakendatav ka peegeldumise puhul, kui arvestada, et peegeldumisel muutub valguse levikusuund ning langev ja peegelduv kiir levivad samas keskkonnas. Valemi kasutamiseks peegli puhul tuleb teha valemis (3.1) asendus $n_2 = -n_1$, saame sfäärilise **peegli valemi**:

$$\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{2}{R}. \quad (3.2)$$



Joonis 3.2. Kiirte murdumine ühel sfäärilisel pinnal.

Valemi (3.2) kasutamisel on vajalik silmas pidada märkide reeglit, mille kohaselt kaugusi mõõdetakse sfäärilise peegli poolusest ja loetakse negatiivseteks, kui nad on suunatud vasakule, ning positiivseteks, kui nad on suunatud peegeldavast pinnast paremale.

Optilise teljega rööpselt langevad kiired koonduvad pärast peegeldumist nõguspeeglis **fookusesse** F , mille kaugust peeglist nimetatakse **fookuskauguseks** ja tähistatakse f . Kui

eeldada, et lõpmatuses tulevad kiired koonduvad fookuses ja asendades valemis (3.2) $a_1 = -\infty$, saame

$$a_2 = f = \frac{R}{2}. \quad (3.3)$$

Valemi (3.2) võime nüüd kirjutada ka kujul:

$$\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{1}{f}. \quad (3.4)$$

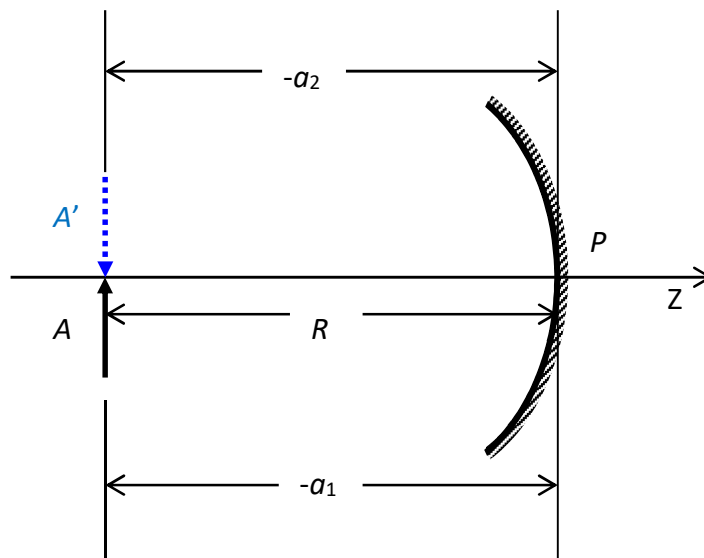
Valemis (3.4) on fookuskauguse märk määratud sfäärilise pinna kõverusraadiuse märgiga.

Valguspunkti lähenemisel sfäärilisele peeglile suureneb kujutise kaugus peeglist $-a_2$. Juhul kui $a_1 = R$, siis $a_2 = R$, s.t. kõverustsentrilt väljunud kiired koonduvad pärast peegeldumist uuesti kõverustsentrissse. Kui $a_1 = f$, siis $a_2 = \pm\infty$, s.t. fookuses asuv valguspunkt annab kujutise lõpmata kaugel. Kui $|a_1| > |f|$, siis $a_2 > 0$, s.o. kui valguspunkt asub fookuse ja peegli vahel, siis tekib näiv kujutis peegli taga.

3.3.2. Eksperiment

3.3.2.1. Nõguspeegli kõverusraadiuse määramine

Paigutame ratsuritesse kinnitatud nõguspeegli ja teravikuga varva A optilisele pingile. Varb tuleb asetada peegli ette teravik ülespoole nõnda, et teraviku ots asuks peegli optilisel teljel (joonis 3.3). Vajadusel valgustame teravikku kõrvalt lambiga. Ratsurit nihutame optilisel pingil, kuni teravik ots ja selle ümberpööratud kujutis ühtivad.



Joon. 3.3 Nõguspeegli kõverusraadiuse määramine

Vaadata tuleb sobivalt kauguselt teraviku ja peegli suunas. Ühtelangemine peab olema parallaksita, s.t. peab puuduma teraviku ja tema kujutise näiv nihkumine silma liigutamisel risti optilise teljega. Õige asetuse korral on kujutis teravikuga sama suur, kuid ümberpööratud. Peegli kõverusraadiuse leidmiseks tuleb leida teravikuga varva A kauguse nõguspeegli poolusest P .

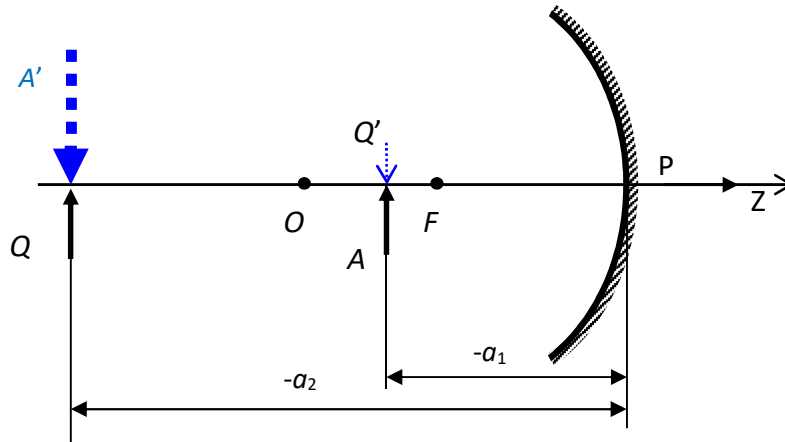
Üldjuhul optilise pingi teljega ristuv tasand, milles asub meid huvitav detail (näiteks peegli poolus), ei lange ühte ratsuri lugemimärki läbiva optilise pingiga ristuva tasandiga. Seega kahe ratsuri lugemimärgi näidud ei määra vahetult ratsuritele kinnitatud detailide vahelist kaugust. Detailide vahelise tegeliku kauguse määramiseks tuleb teada ratsurite lugemismärkide erinevusele lisatava paranduse suurust. Selle määramiseks on otstarbekas kasutada optilist laserkauguse mõõtjat Leica. Varasem metallist kaugusmõõdiku kasutamine põhjustas peeglite pindadel olulisi kahjustusi. Töös on vaja määrata parandused optilise süsteemi iga vaadeldava detailide paari jaoks (näiteks sfäärilise peegli poolus – teravik, sfäärilise peegli poolus – tasapeegel jne.)

Nende detailide vahekauguse mõõtmisel, kus pole metallvardaga puudutamisel kahjustamise ohtu, võib kasutada ka n.n. kaugusmõõdikut, milleks on tuntud pikkusega l_0 metallist varb. See varb on kinnitatud teise, vertikaalse käepideme külge. Kaugusmõõdik asetatakse piki optilist telge detailide vahele, mille vaheline kaugus meid huvitab. Nihutame vaadeldavad detailid ettevaatlikult kaugusmõõdiku otstega puutesse. Nüüd vastab nendevaheline kaugus kaugusmõõdiku pikkusele l_0 . Sama kaugus määratuna ratsurite lugemismärkide järgi olgu l_1 . Erinevus $\Delta l = l_0 - l_1$ ongi parandus, mis tuleb lisada (arvestades tema märki) ratsurite näitude järgi määratud kaugusele, et saada meid huvitavate optilise süsteemi detailide vahelist tõelist kaugust..

Arvestades eespooltoodut, leiame parandusliikme Δl peegli ja teravikuga varva jaoks, kirjutame protokollis varva ja peegli ratsurite lugemismärgi näidud Z_A ja Z_P ning arvutame $a_1 = a_2 = R$

3.3.2.2. Nõguspeegli fookuskauguse määramine

Katses kasutame kahte teravikuga varba, mis asetatakse ratsuritesse, teraviku otsad nõguspeegli optilisel teljel. Esimese varva A paigutame kõverustsentrini ja fookuse vahele nii, et temast tekiks 2-3 korda suurendatud kujutis A' (joonis 3.4).



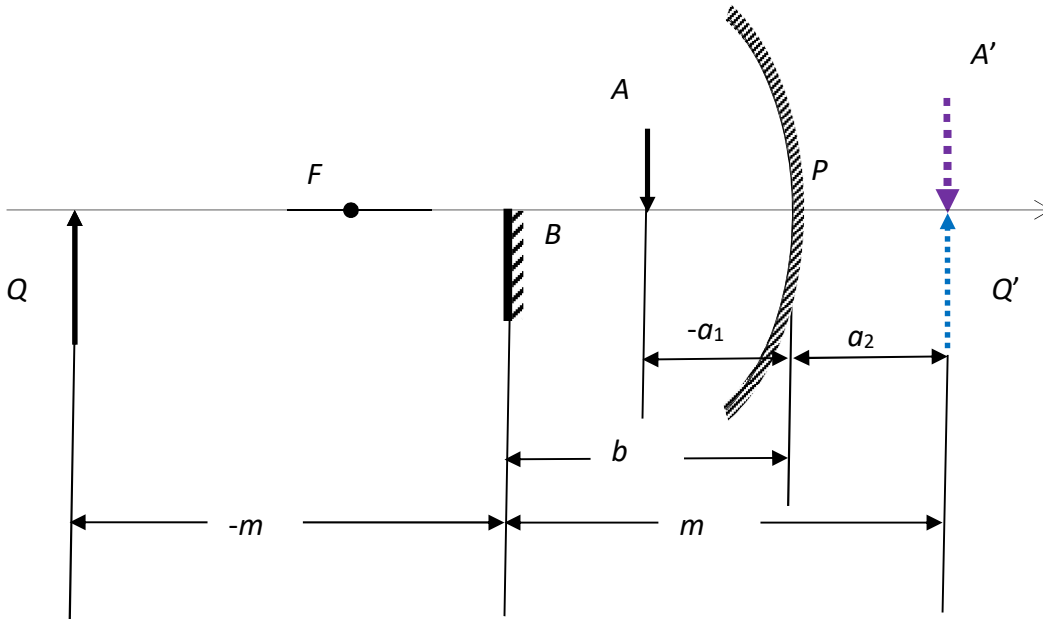
Joonis 3.4. Nõguspeegli fookuskauguse määramine.

Teise varva Q paigutame nõnda, et tema teraviku ots ühtiks esime varva teraviku otsa kujutisega A' . Ühtelangemine peab olema parallaksita, s.o. peab puuduma teraviku ja teraviku kujutise näiv nihkumine teineteise suhtes silma liikumisel risti optilise teljega. Sel juhul ühtib varva Q ümberpööratud kujutise Q' teravik esimese varva A teravikuga. Määrame nüüd ratsurite lugemimärkide järgi teravike ja peegli pooluse koordinaadid Z_Q , Z_A , ja Z_P ja kanname tabelisse. Nende andmete järgi, võttes arvesse parandusi Δl , arvutame kaugused a_1 ja a_2 .

Katset kordame veel vähemalt kahel korral ja veendume summa $\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{1}{f}$ jäävuses ning arvutame fookuskauguse. Katseandmed ja arvutustulemused paigutame tabelisse.

3.3.3.3. Nõguspeeglis tekkinud näiva kujutise kauguse määramine

Kui valguspunkt asub nõguspeegli ja tema fookuse vahel, siis tekib peeglis näiv kujutis, mis asub peegli taga; kujutise kaugus a_2 valemis (3.4) on sel juhul positiivne. Näiva kujutise asend on määratav tasapeegli B abil (joonis 3.5). Viimase paigutame nõguspeegli ette nii, et tema peegelpind oleks risti peegli optilise teljega ja tema ülemine serv asuks peegli optilist telge läbival rööhttasandil.



Joonis 3.5. Näiva kujutise kauguse määramine.

Objektiks kasutame varba A , mis on paigutatud teravik allapoole vastavasse rõngakujulisse raami. Raami koos vardaga kinnitame ratsurisse, asetame ta peegli ja selle fookuse vahele, kus me saame teda ka nihutada.

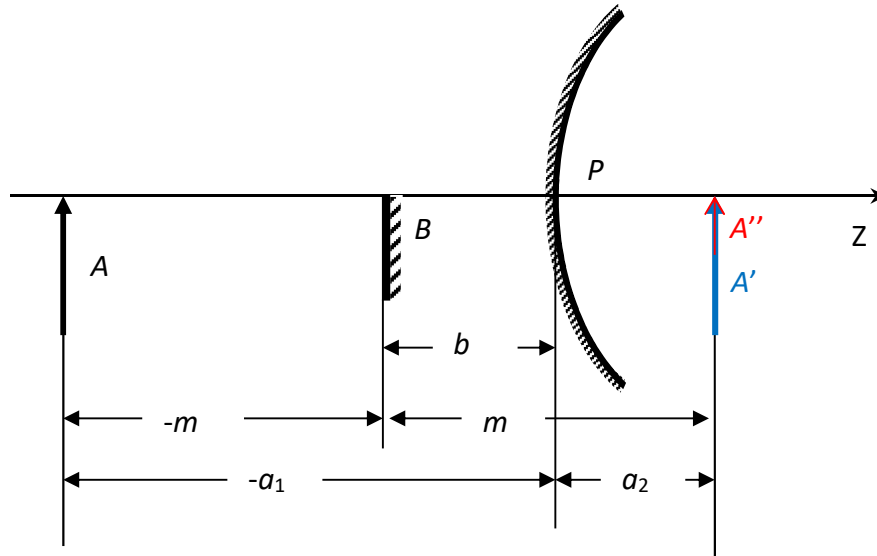
Tasapeegli B ette paigutame veel teise varba Q , mille teravik on pööratud üles. Nihutame peeglit B seni, kuni teraviku Q näiv kujutis Q' tasapeeglis ühtib parallaksivabalt teraviku A näiva kujutisega A' nõguspeeglis.

Nüüd määrame ratsurite lugemimärkide järgi teravike koordinaadid Z_Q , Z_A ning peeglite koordinaadid Z_B , Z_P ja kanname tabelisse. Arvutame (parandusi arvesse võttes) kauguse m tasapeegli B ja teraviku Q vahel (kaugus BQ). Selle lõigu pikkus, on absoluutväärtuselt võrdne lõigu BQ' pikkusega (joonis 3.5). On vaja arvutada ka tasapeegli B kaugus b nõguspeegli poolusest ning ka teraviku A kaugus $-a_1$ nõguspeegli poolusest. Kuna kaugused $BQ = BQ' = m$, siis vastavalt joonisele $m = b + a_2$, millest $a_2 = m - b$, kus $b > 0$ ja tähistab kaugust tasapeegli ja nõguspeegli vahel. Mõõtmiste ja arvutuste tulemused kanname tabelisse. Katset kordame vähemalt teraviku A kolme erineva asendi korral.

3.3.3.4. Kumerpeegli kõverusraadiuse määramine

Kuna kumerpeeglis tekib alati näiv kujutis, siis ei saa selle asukohta leida otseselt. Võtame vertikaalse varba A , mille teravik on üheaegselt objektiks kumer- ja tasapeeglile (joonis 3.6). Varva paigutame kumerpeegli ette nii, et ta asetseks peegli optilisel teljel. Kui peegel ja varb on asetatud kohale õigesti, siis teraviku ots, tema kujutis A' ja peegli

poolus asuvad samal teljel. Tasapeegli paigutame varva ja kumerpeegli vahele nii, et tema ülemine serv asuks kumerpeegli poolust läbivas horisontaaltasandis. Tasapeeglit nihutame optilisel pingil nii, et kaoks parallaks varva näivate kujutiste vahel tasa- ja kumerpeeglis. Kujutis A'' , mille annab kumerpeegel, on väiksem kujutisest A' , mille annab tasapeegel.



Joonis 3.6. Kumerpeegli kõverusraadiuse ja fookuskauguse määramine.

Nüüd määrame ratsurite lugemimärkide järgi teraviku ja tasa- ning kumerpeegli koordinaadid Z_A , Z_B ja Z_P ning kanname tabelisse. Nende andmete järgi (arvestades parandusi) arvutame teraviku kauguse a_1 kumerpeeglist, kauguse b peeglite vahel ja kauguse m varva ja tasapeegli vahel.

Näiva kujutise kaugus kumerpeeglist $a_2 = m - b$. Jooniselt 3.6 on näha, et näiva kujutise kaugus tasapeeglist m on positiivne. See kaugus on absoluutväärtuselt võrdne teraviku A kaugusega tasapeeglist. Leiame a_2 väärtused varva A kolme erineva kauguse korral kumerpeeglist.

Andmed paigutame tabelisse ning arvutame peegli kõverusraadiuse ja fookuskauguse. Hindame kõigi katsete juures mõõtemääramatusi.

3.4. Küsimusi

1. Nimetage mõningaid sfääriliste peeglite rakendusi.
2. Millised erinevused on kujutise tekitamisel sfäärilistel peeglitel võrreldes sfääriliste läätsedega? Millised on eelised, millised puudused?

