

O11. Läätsede fookuskaugus ja mitmeläätiselise süsteemi kardinaalelemendid

Tööülesandeks on koondava ja hajutava läätsede fookuskauguste ja mitmeläätiselise süsteemi kardinaalelementide määramine

1. Eelteadmised

Peale tööjuhendis toodud teooria lühiülevaate on vaja optikaveebi “Geomeetiline optika” peatüki 2 alusel

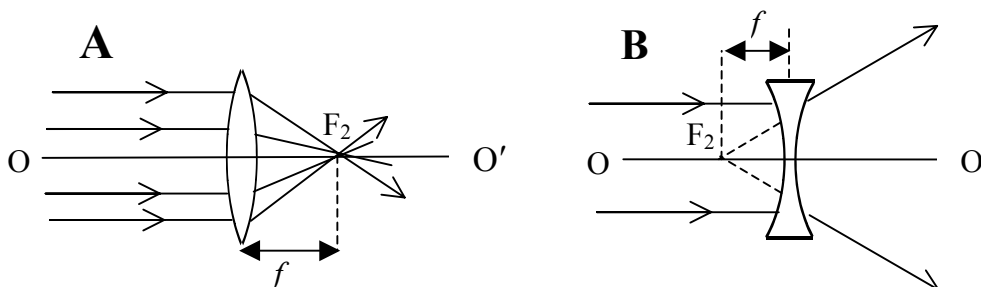
- osata konstrueerida kujutisi põhikiirte abil;
- teada märkide reegleid ja õhukese läätsede valemit.

2. Teoreetilised alused

Optiliste detailide (läätsed, peeglid, prismad jne.) komplekti, mis transformeerib (koondab, hajutab jne.) valgusallikast lähtuvat valgust, nimetatakse **optiliseks süsteemiks**. Optiline süsteem on **tsentreeritud**, kui teda moodustavate sfääriliste murdvate ja/või peegeldavate pindade kõverusraadiuste tsentrid paiknevad ühel sirgel. Üheks optilise süsteemi ülesandeks on kujutise tekitamine. Enamik kujutise tekkimise seaduspärasusi on kirjeldatavad lähtudes **geomeetrilise optika** lähendusest st valgust iseloomustatakse vaid levikusuunaga – valguskiirega. Optilise süsteemi poolt tekitatav kujutis on **paraksiaalses lähenduses** leitav, kui on teada minimaalne komplekt seda süsteemi iseloomustavaid karakteristikuid, mida nimetatakse optilise süsteemi **kardinaalseteks elementideks**. Kui kardinaalsed elemendid on teada, siis on kujutis määratav **põhikiirte** abil.

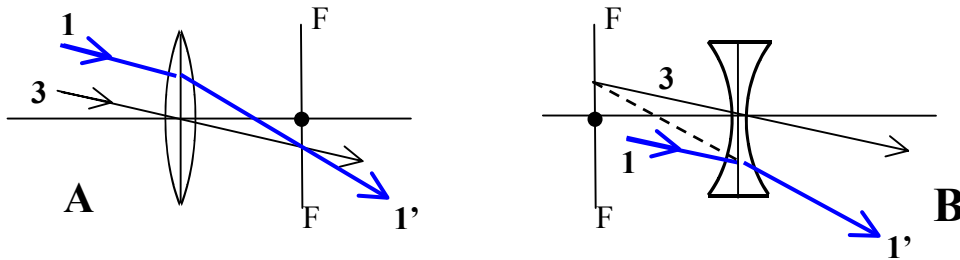
2.1 Õhuke lääts

Läätsede loetakse **õhukeseks**, kui tema paksus on palju väiksem, kui murdvate pindade kõverusraadiused. Mõlema kõverusraadiuse tsentrit läbivat sirget nimetatakse läätsede **optiliseks peateljeks** OO' . **Õhukese läätsede fookus** F on punkt, mida läbivad pärast murdmist optilise peateljega paralleelselt levivad kiired (joonis 1A: **koondav** lääts, **tõeline** fookus) või nende pikendused (joonis 1B: **hajutav** lääts, **näiv** fookus).



Joonis 1. A – koondav lääts: F_2 – tõeline (tagumine) fookus; f – fookuskaugus; B – hajutav lääts: F_2 – näiv (tagumine) fookus; f – fookuskaugus.

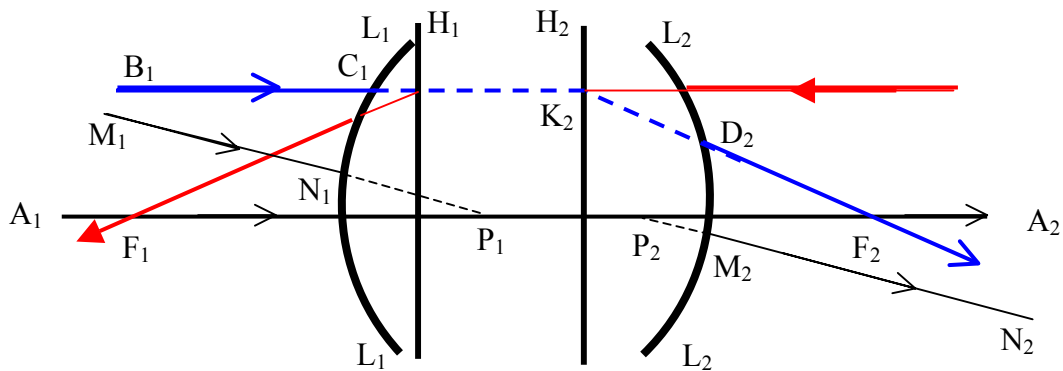
Optilise peateljega paralleelse kiirtekimbu levikul vasakult paremale läbivad kiired (või nende pikendused) pärast murdumist tagumisi fookusi F_2 . Suunates läätsele paralleelse kiirtekimbu paremalt, saame leida eesmised fookused F_1 . Kui mõlemal pool läätse on sama keskkond, siis on fookuste F_1 ja F_2 kaugused läätse keskpunktist ehk **fookusekaugused f** , absoluutväärtuselt võrdsed. Tasandeid, mis läbivad fookusi ja on risti optilise peateljega nimetatakse **fokaaltasanditeks**. Paralleelsed kiired, mis langevad koondavale läätsele optilise peatelje suhtes kaldu, lõikuvad pärast murdumist fokaaltasandis. Hajutava läätse puhul lõikuvad fokaaltasandis kiirte pikendused.



Joonis 2. Kiire käigu leidmine juhul, kui tagumine fokaaltasand FF on teada.

Joonis 2 selgitab, kuidas leida läätsele langeva suvalise kiire levikusuund pärast murdumist. Leidmaks kiire 1 **kaaskiirt** $1'$ kasutame kiirega 1 paralleelset põhikiirt 3, mis läbib õhukese läätse keskpunkti. Teades, et läätsele langevad paralleelsed kiired pärast murdumist lõikuvad fokaaltasandis (hajutava läätse puhul lõikuvad kiirte pikendused), saab leida kaaskiire levikusuuna.

2.2. Optiline süsteem



Joonis 3. Optilise süsteemi kardinaalelemendid

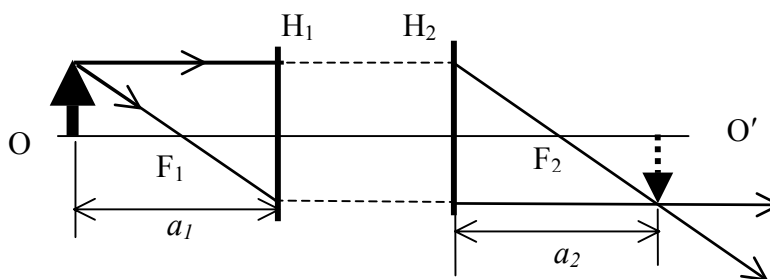
Olgu nüüd tegemist paljudest murdvatest pindadest koosneva tsentreeritud optilise süsteemiga. Piirdume jällegi juhuga, kus süsteemist vasakul ja paremal paiknev keskkond on sama. Joonisel 3 on L_1L_1 süsteemi esimene ja L_2L_2 – viimane murdev pind. Nüüd määratakse fookusekaugused **peatasandite** kaudu. Peatasandeid saab leida, kui suunata

optilisele süsteemile peateljega paralleelsed kiired. Piki optilist peatelge leviv kiir A_1A_2 läbib süsteemi levikusuunda muutmata. Kiire B_1C_1 levikusuund muutub ja süsteemist väljudes läbib ta optilise peatelje punktis F_2 , mis on süsteemi tagumiseks fookuseks. Pikendame kiiri B_1C_1 ja D_2F_2 . Pikendused lõikuvad punktis K_2 . Optilise peateljega ristiolevat tasandit, kus paikneb punkt K_2 , nimetatakse optilise süsteemi **tagumiseks peatasandiks** H_2 . On ilmne, et mistahes vasakult paremale leviva peateljega paralleelse kiire ja tema tagumist fookust läbiva kaaskiire pikenduste lõikepunkt on samuti tagumisel peatasandil. Suunates nüüd süsteemile paremalt vasakule leviva paralleelse kiirtekimbu, saab leida ka **eesmise peatasandi** H_1 . Peatasandite **ristisuurendus** on $+1$. Peatasandite lõikepunkte optilise peateljega nimetatakse **peapunktideks**. **Optilise süsteemi fookusekaugused** on vahemaad fookuste ja neile vastavate peatasandite vahel. Tasub rõhutada, et üldiselt ei pruugi peatasandid asuda esimese ja viimase murdva pinna vahel ja peatasand H_2 võib paikneda peatasandist H_1 vasemal. Langeva kiire M_1N_1 , mis peatelje suhtes kaldu, kaaskiireks on väljuv kiir M_2N_2 , mis moodustab peateljega samasuguse nurga nagu langev kiir. Pikendades kiiri M_1N_1 ja M_2N_2 kuni lõikumiseni peateljega, saame optilise süsteemi sõlmpunktid P_1 ja P_2 . Sõlmpunkte läbivate kiirte **nurksuurendus** on $+1$. Sõlmpunkte läbivaid ja peateljega ristiolevaid tasandeid nimetatakse **sõlmtasanditeks**. Kuus tasandit (fokaaltasandid, peatasandid, sõlmtasandid) ning kuus punkti (fookused, peapunktid, sõlmpunktid) ongi optilise süsteemi kardinaalsed elemendid. Nende teadmine lubab leida kujutise mistahes juhul.

Õhukene lääts on optilise süsteemi erijuht, kus nii peapunktid kui ka sõlmpunktid langevad läätses keskpunktiga kokku. Õhukese läätses puhul võib jätta arvestamata peatelje suhtes kaldu langeva ning läätses keskpunkti läbiva kiire paralleelnihke.

2.3. Optilise süsteemi kujutise leidmine

Optilise süsteemi puhul jäävad kehtima kujutise leidmise võtted, mida kasutati ka õhukese läätses puhul. Erinevus seisneb vaid selles, et nüüd loetakse fookusekaugusi ning samuti eseme ja tema kujutise kaugusi peatasanditest nii nagu on kujutatud joonisel 4.



Joonis 4. Optilise süsteemiga tekitatava kujutise konstrueerimine.

Endiselt tuleb arvestada märkide reegleid ka läätses valemis

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

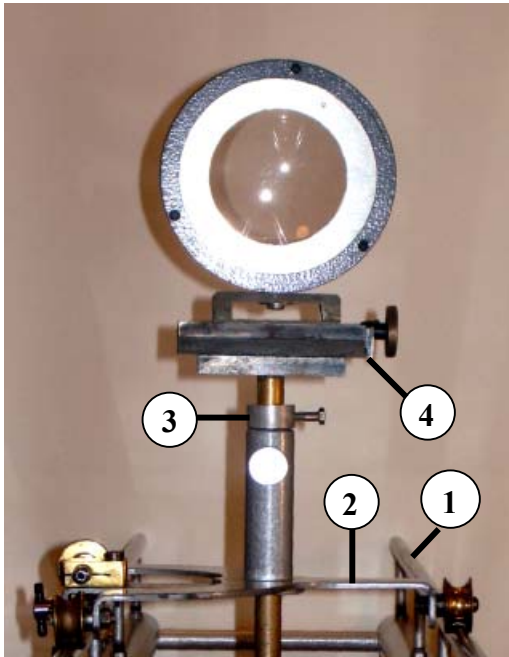
3. Mõõtmismetoodika ja mõõtmised

3.1. Katsevahendid

Optikapink, ratsurid, õhuke koondav lääts, õhuke hajutav lääts, mitmelääteline süsteem, objektskaala valgustiga, ekraanid, pikksilm, He/Ne laser, mõõtevarras, nihik

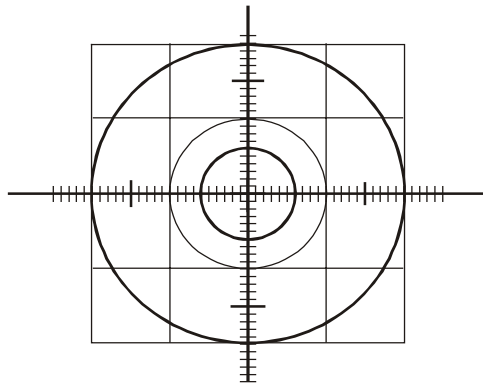
3.2. Katsevahendite kirjeldus

Optikapingil on juhtvardad 1, piki mida on võimalik liigutada ratsureid 2 (joonis 5).



Joonis 5. Ratsur ja läätsehoidja. Selgitused on tekstis.

Ratsurite asendid määratakse optikapingi millimeeterskaala abil. Optikadetailide kõrgus juhtvarraste suhtes on reguleeritav muutes rõngaste 3 asendit läätsehoidjate varrastel. Horisontaalsuunas nihutamiseks on detailihoidjal nihutusmehhanism 4.



Joonis 6. Objektskaala. Ruudustiku telgedel on jaotised millimeetrites. Kahe suurema rõnga diameetrid on 40 ja 20 millimeetrit.

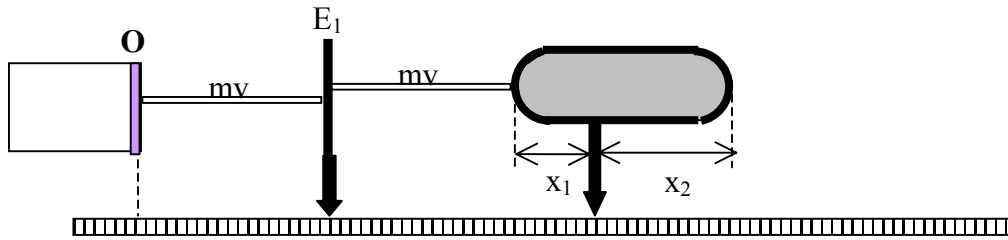
Uuritavaks “esemeks” on optikapingi külge jäigalt kinnitatud objektskaala (joonis 6), mida valgustatakse valgusdiodidega (keskmise lainepikkus – 520 nm). Kuna valgusdiodid kiirgavad suhteliselt kitsas lainepikkuste vahemikus (≈ 40 nm), siis võib lugeda, et lainepikkusest tingitud efektide (so kromaatilise aberratsiooni) roll on tühine.

Optilise süsteemi tsentreerimiseks kasutatava He/Ne laseri kallet horisontaalsihi suhtes saab muuta kahe reguleerimiskruviga.

3.2. Katsevahendite seadistamine

Esmalt tuleb leida vastavus katseseadme detailide asukoha ja optikapingi skaala näitude vahel. Selleks kasutatakse mõõtevarrast mv ja ümmarguse avaga ekraani E_1 (joonis 7). Leidmaks eseme (objekti) O asukohta, asetame mõõtevarda ühe otsaga vastu objektskaalat ja nihutame ratsuris paikneva ekraani E_1 vastu mõõtevarda teist otsa. Fikseerime ratsuri asukohale vastava näidu. Seejärel pöörame ekraani 180° võrra ja kordame mõõtmist.

Saadud kahe lugemi keskväärtus ja teadaolev mõõtevarda pikkus lubab leida eseme O asukohale vastava skaalanäidu.



Joonis 7. Optiliste detailide asukoha ja optikapingi skaala näitude vahelise seose määramine

Fikseerime nüüd ekraani E_1 hoidva ratsuri asukoha ja kordame eelkirjeldatud protseduuri mõlema läätse ja ka mitmeläätse süsteemi jaoks. Nüüd tuleb mõõtmiste puhul pöörata 180° võrra läätsi. Kahe mõõtmise keskmine iseloomustab nende läätsede keskpunkte. Mitmeläätse süsteemi puhul aga on võimalik määrata esimese ja viimase murdva pinna koordinaadid x_1 ja x_2 ratsuri näidu suhtes.

Optilise süsteemi telg peab olema paralleelne optikapingi juhtvarrastega. Seda on võimalik saavutada laserikiire ja ekraani E_1 abil. Suuname ratsuris oleva laseri kiire nii, et ta läbiks ekraani E_1 keskpunkti ja satuks enam-vähem objektskaala keskpunkti. Nihutame ekraani piki optikapinki ja jälgime valguslaiku ekraanil. Kui valguslaigu asend ekraanil ei muutu, siis võib lugeda, et laserikiir on paralleelne juhtvarrastega. Vastasel juhul tuleb reguleerida laseri kallet ja/või kõrgust optikapingi varraste suhtes. Kui laserikiir on paralleelne optikapingi juhtvarrastega võtame ta süsteemi optiliseks teljeks ja timmime kõik uuritavad detailid paigale laserikiire järgi. Kriteeriumiks, mille järgi saab otsustada, kas uuritava detaili optiline peatelg langeb kokku laseri kiirega, on laserikiire peegeldused detaili pindadelt. Kui peegelduv kiir satub tagasi laseri väljundavasse, siis võib lugeda, et detaili telg on paigas.

3.3. Koondava läätse fookuskauguse leidmine.

Paljudest koondava läätse fookuskauguse määramismeetoditest kasutame kahte. Mõlema meetodi puhul on aluseks valem (1).

Esimene meetod. Esitades valemi (1) kujul

$$\frac{1}{|a_2|} = \frac{1}{|a_1|} + \frac{1}{|f|} \quad (2)$$

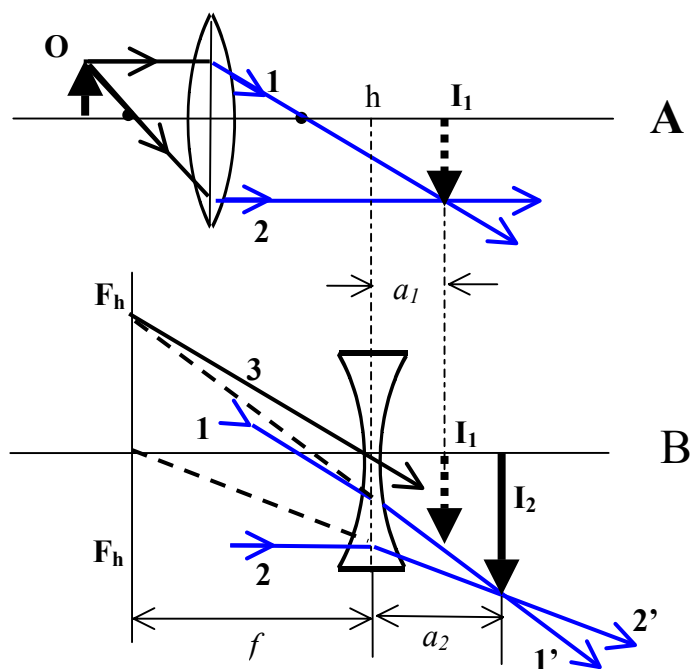
näeme, et kujutise kauguse pöördväärtus on lineaarne funktsioon eseme kauguse pöördväärtusest. Leiame mingil eseme ja läätsevahelisel kaugusel a_1 vaatekraani asendi, mille puhul kujutis on terav ja fikseerime vaatekraani asendile vastava näidu. Vaatekraani asendi mõõtemääramatus on valdavalt tingitud subjektiivselt faktorist ja seetõttu tuleb terava kujutisele vastavat ekraani asendit määrata korduvalt. Teades läätse asendit, saab nüüd määrata kauguse a_2 . Mõõtmised tuleks teha vähemalt 5-6 eseme ja läätse vahelisel kaugusel. a_1 muutmise sammu valikul tuleb arvestada, et seoses (2) on argumendiks a_1 pöördväärtus.

Valemi (2) graafik on sirge, mille algordinaadiks on fookusekauguse pöördväärtus. Tuleb leida nii fookusekaugus kui ka tema mõõtemääramatus.

Teine meetod. Valemist (1) johtub, et eesmisses fookuses oleva eseme kujutis tekib lõpmatuses. Määramaks sel meetodil fookusekaugust, tuleb pikksilm esmalt teravustada lõpmatusse ja seejärel suunata pikksilm läätsele. Terav kujutis tekib nüüd juhul, kui ese on läätse fokaaltasandis. Ka nüüd tuleb teha kordusmõõtmisi. Kontrollimaks, kas pikksilm on teravustatud lõpmatusse õigesti, tuleb kordusmõõtmised teha erinevates pikksilma asendites.

3.4. Hajutava läätse fookuskauguse leidmine.

Hajutavat läätse poolt tekitatud kujutis on näiv st ekraanil kujutist ei teki (kontrollida!). Määramaks hajutava läätse fookusekaugust, võib kasutada koondavast ja hajutavast läätsest koosnevat optilist süsteemi.



Joonis 8 .Kujutise konstrueerimine koondavast ja hajutavast läätsest koosnevas süsteemis.

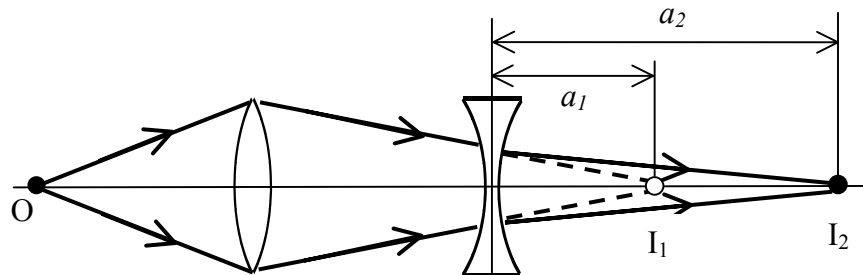
Joonisel 8 on toodud koondavast ja hajutavast läätsest koosneva süsteemi kujutise konstrueerimine, mis on selguse mõttes esitatud kaheosalisena. Kiirte pikendused on kujutatud kriipsjoontena.

Joonisel 8A tekitab koondav lääts esemest O tõelise pööratud kujutise I_1 ; kujutise leidmiseks kasutatakse põhikiiri 1 ja 2.

Punkti h paigutatakse hajutav lääts, mille fookuskaugus on f . Murdumise tõttu hajutavas läätses kiirte 1 ja 2 käik muutub.

Joonisel 8B on kiirte 1 ja 2 asend sama, mis joonisel 8A; $F_h F_h$ on hajutava läätse tagumine fokaaltasand. Koondava läätse poolt tekitatud kujutis on nüüd hajutava läätse jaoks esemeks ja tema kaugus läätsest on a_1 . Kiire 2 kaaskiire $2'$ leidmiseks lähtume fookuse definitsioonist (vt joonis 1B): optilise peateljega paralleelne kiir murdub hajutavas läätses nii, et tema pikendus läbib (näivat) fookust. Kiire 1 kaaskiir $1'$ leitakse kiirega 1 paralleelse

põhikiire 3 abil (vt joonis 2B). Kuna 1 ja 3 on paralleelsed, siis nende kaaskiirte pikendused lõikuvad fokaaltasandiga samas punktis. Kiirte 1' ja 2' lõikepunkt määrab tõelise kujutise I_2 asendi, mis on hajutavast läätsest kaugusel a_2 . Kui a_1 ja a_2 on teada, siis on võimalik määrata ka hajutava läätse fookusekaugus.



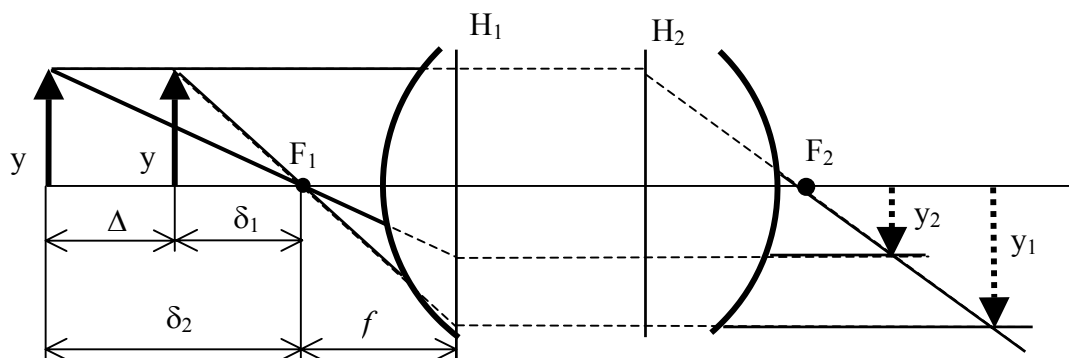
Joonis 9. Hajutava läätse fookusekauguse määramine

Mõõtmise algul on optikapingil vaid koondav lääts ja tuleb leida vaatekraani asend, mille puhul kujutis I_1 on terav (joonis 9). Nüüd paigutatakse koondava läätse taha hajutav lääts: terav kujutis I_2 tekib nüüd kaugemal. Kui on teada hajutava läätse asend ning kujutistele I_1 ja I_2 vastavad vaatekraani asendid, on leitavad nii a_1 kui ka a_2 . Teeme mõõtmised 5-6. nõgusläätses (igas asendis tuleb teha ka kordusmõõtmisi). Kasutades nüüd seost (2), on võimalik leida hajutava läätse fookusekaugus ja selle mõõtemääramatus.

Juhul, kui koondava läätse poolt tekitatud kujutis I_1 langeb kokku hajutava läätse eesmise fokaaltasandiga, siis peale murdumist väljub hajutavast läätsest paralleelne kiirtekimp. Kui nüüd see kiirtekimp langeb lõpmatusse teravustatud pikksilmale, näeme seal eseme O teravat kujutist. Seega saab lõpmatusse teravustatud pikksilma kasutada samuti fookusekauguse määramiseks. Teeme seda analoogiliselt koondava läätse juhuga.

3.5. Mitmeläätselise süsteemi kardinaalelementide leidmine.

Kardinaalelemente määramise meetodit kirjeldab joonis 10.



Joonis 10. Mitmeläätselise süsteemi fookusekauguse määramine

Olgu algul ese, mille joonmõõde on y , eesmisest fookusest F_1 kaugusel δ_1 . Läätse süsteem tekitab esemest kujutise, mille joonmõõde on y_1 . Ristisuurenduse M definitsioonist ja kolmnurkade sarnasusest saame

$$M_1 = \frac{y_1}{y} = \frac{f}{\delta_1} \quad (3)$$

NB! MÄRKIDE REEGLITEST JÄRELDUB, ET LÕIKUDE PIKKUSED VÕIVAD OLLA NII POSITIIVSED KUI KA NEGATIIVSED.

Nihutades eset eesmisest fookusest F_1 uuele kaugusele δ_2 , ristisuurendus muutub

$$M_2 = \frac{y_2}{y} = \frac{f}{\delta_2} \quad (4)$$

Kombineerides seoseid (3) ja (4), avaldame fookusekauguse

$$f = \frac{\Delta}{\frac{1}{M_1} - \frac{1}{M_2}} \quad (5),$$

kus $\Delta = \delta_2 - \delta_1$.

Fookuskauguse leidmiseks valemist (5) on vaja määrata suurendused süsteemi kahes asendis ja nende asendite vaheline kaugus. Kujutise suurusi vaatekraanil mõõdame nihikuga. Täpsuse suurendamiseks tuleb valida selline Δ , et M_1 ja M_2 erineksid märgatavalt. Mõõtemääramatuse hindamiseks tuleb iga süsteemi asendi puhul teha kordusteravustamisi. Süsteemi peapindade asukoha leidmiseks ei piisa fookuskauguste teadmisest, on vaja teada ka fookuste asukohti. Nende määramiseks kasutatakse jällegi lõpmatusse teravustatud pikksilma nii nagu õhukeste läätse puhul. Mitmeläätiselise süsteemi puhul ei pruugi fookused paikneda samal kaugusel äärmistest murdvatest pindadest. Seega tuleb peale ühe fookuse asukoha määramist süsteemi pöörata 180° võrra ja korrata mõõtmisi. Otsitavad peapinnad asetsevad leitud fookustest fookuskauguse võrra süsteemi pool. Peapinnad võivad asuda nii sees- kui väljaspool süsteemi.

Arvutuste põhjal koostame (vastavas mastaabis) antud optilise süsteemi kardinaalsete elementide asendite skeemi. Joonisele tuleb kanda ka läätse süsteemi äärmised murdvad pinnad.

Töö vormistus peab sisaldama mõõtmistulemuste analüüsi.

Küsimused

1. Kus asuvad õhukese läätse peatasandid?
2. Kuidas on omavahel seotud läätsepindade kõverusraadiused ja läätse fookuskaugus?
3. Olgu tekitada läätse teisele poolel erinev keskkond (näit õhk ja vesi). Kuidas muutub fookuskaugus, kujutise asukoht, suurus?
4. Kus asub peatasand positiivsest ja negatiivsest läätsest koostatud läätse süsteemil, kui fookuskaugust määratakse pikksilmaga?
5. Koosnegu läätse süsteem absoluutväärtuselt võrdse optilise tugevusega koondavast ja hajutavast läätsest. Kuidas sõltub sellise süsteemi optiline tugevus läätse omavahelisest kaugusest?
6. Kuidas teha kindlaks ilma abivahenditeta, kas on tegemist koondava või hajutava läätsega?
7. Selgitada mõisteid “kiirte käik” ja “kujutise konstrueerimine”.