

Avbildning med optikk

Oline A. Ranum

Universitetet i Oslo - Institutt for fysikk

olinear@student.matnat.uio.no

(Dated: June 1, 2018)

Det følgende eksperimentet anverder geometrisk optikk for å studere lysbrytning med linser og kvantemekaniske effekter i avbildninger. Eksperimentets første del er en kvalitativ gjennomgang av avbildninger gjennom linser. Linseformelen brukes for å estimere brennvidden fire ganger og gir estimatene $f = 211\text{mm}$, 197mm , 203mm , 200mm for en linse med nominell brennvidde på 200mm . Ved bruk av geometriske konsepter og et sfærometer estimeres $f = 198\text{mm}$. Eksperimentets andre del studerer fokus posisjonert i uendeligheten og fant at lyset følger predikasjonene fra den geometriske optikken svært godt. Det var fremtredende begrensninger ved observasjonsevnen som påvirket resultatene. Det tredje eksperimentet studerte bruken av lupen, og det ble observert at øyet fungerte som en linse som transformerte de parallelle lysstrålene tilbake til et bilde. Det fjerde delforsøket fant at de øvrige observasjonene suksessfullt kunne benyttes til å bygge et teleskop. Det siste forsøket studerte kvantemekanisk støy i digitale kameraer, og fant at den kvantemekaniske støyen økte når lysstyrken ble justert opp.

INTRODUKSJON

Eksperimentene undergått i denne artikkelen søker å beskrive lysets atferd i relasjon til den geometriske optikken og gi innsikt i avbildning med optiske instrumenter. En innsikt i hvordan lyset translaterer på tvers av grenseflater og medier gjør det mulig å forstå et sentralt aspekt av hvordan mennesket observerer verden omkring seg. Hadde det ikke vært for at menneskets øye bøyde lyset til et klart bilde på netthinnen ville vår evne til å beskrive virkeligheten trolig vært langt mer begrenset. Av den grunn kan innsikt i lysbrytning og observasjon fortelle oss noe om hvordan vi tolker og forstår verden. Avbildninger blir slik en fundamental del av vår hverdag, og en uvurdelig komponent i fysikkens rammeverk.

Artikkelen presenterer først sentral teori som underbygger eksperimentets metodikk. Seksjonen omfatter en introduksjon til geometrisk optikk og idealisert linse-teori, samt bruk av sfærometere for måling av lensens krumning. Det forklares så hvordan linser kan anvendes som lupen for å observere objekter nærmere enn hva som er mulig med det blotte øyet, og hvordan de optiske instrumentene kan anvendes for å konstruere teleskop. Det angis så teoretisk belegg for deteksjon av lys og kvantemekaniske effekter i avbildninger med digitalkamera. Deretter følger en gjennomgang av eksperimentell metode. Eksperimentets første del omfatter et kvalitativt studie av hvordan en linse avbilder objekter. Det andre delforsøket videreutvikler denne forståelsen ved å se på avbildninger når fokus er uendelig langt borte, før det tredje delforsøket belyser hvordan man kan gjenvinne fokus ved å benytte en lupe.

Det fjerde delforsøket kombinerer innsikten fra de foregående eksperimentene for å konstruere et teleskop. Til slutt betraktes hvordan et moderne kamera utnytter avbildning, og hvordan intensiteten av lyset danner kvantemekaniske effekter i avbildningen. Deretter presenteres resultatene av forsøket og en diskusjon av dataen i henhold til teoretiske predikasjoner og sentrale usikkerheter. Mot artikkelens avsluttende segment konkluderes så med eksperimentets viktigste funn.

På samme måte som øyet tegner et bilde av verden på netthinnen, kan linser anvendes for å tegne bilder på lyssensorer i digitale kamera. Slik får optikken både en uerstattelig rolle i informasjonssamfunnet og sentral posisjon for alt høyerestående liv. Med utviklingen av teleskoper og mikroskoper har det blitt mulig å observere alt fra fjerne himmellegemer til mikroskopiske fenomen. En mulighet som er uvurdelig for å teste våre teoretiske rammeverk. Optikken danner muligheter for å observere fenomener som er utilgjengelige for det blotte øyet. Dermed blir optikken en bidragsyter til å skyve grensene for vårt verdensbilde og på et mer dyptgripende nivå observere virkeligheten slik den utfolder seg. Vi håper dette eksperimentet vil være belysende ovenfor lysets atferd i møte med materien, og for å forstå hvordan optikkens rammer muliggjør observasjoner på tvers av begrensningene i et menneskets blikk.

TEORI

I. Geometrisk optikk

Geometrisk optikk er en nyttig tilnærming for praktisk design av optiske systemer og instrumenter, der lys modelleres som stråler. Det vil si fenomener som kan forklares ved hjelp av lysets rettlinjede gang, brytning og refleksjon. Per definisjon vil lysstrålene forplante seg i rettlinjede veier når de går gjennom homogene materialer, og avbøyes i grenseflaten mellom to medium med ulik brytningsindeks. Til tross for at strålemodellen er en svært grov forenkling av bølgemodellen er den likevel nyttig og benyttes mye i praksis. Deriblant gir beskrivelsen av lys som stråler et teoretisk grunnlag for bruken av speil, linser og prismer ved konstruksjon av optiske instrumenter.

Den geometriske optikken forenkles ofte ved bruken av paraksial tilnærming. Matematisk indikerer dette at adferden tilnærmes som lineær. Tynn linse-modell er en tilnærming for linser der tykkelsen neglisjeres og det antas at linsen er et plan som bryter lyset på samme måte som linsen. Alle avstander måles da ut fra midtplanet til linsen. I en slik modell vil linsen danne et bilde ved å bryte lyset fra et objektpunkt slik at strålene samles i et bildepunkt, slik som illustrert i figur 1. Linsen vil gjøre dette for alle punktene i objektplanet, og slik utspenne et bilde i bildeplanet.

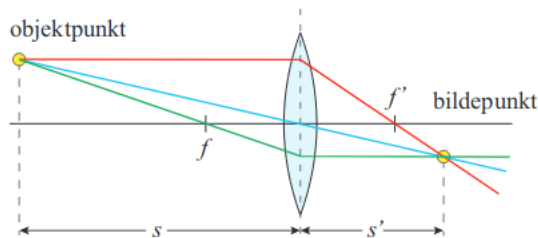


FIG. 1. Illustrasjon av linse med objektpunkt og bildepunkt. Objektpunktet avbildes i bildepunktet på motsatt side av en konvex linse, der tre hjelpelinjer brukes for å illustrere lysbrytningen og for å finne plasseringen til bildepunktet.

II. Linser

En linse er et gjennomsiktig, klart legeme som kan brukes til optisk avbildning. Ofte vil linser være laget av glass med en brytningsindeks høyere enn luft som begrenses av to krumme flater. Den rette linjen som går gjennom linseflatenes midtpunkter kalles optisk akse. Dersom linsen er tykkest langs denne aksen kalles linsen konvex, og dersom den er tynnast langs aksen er linsen konkav.

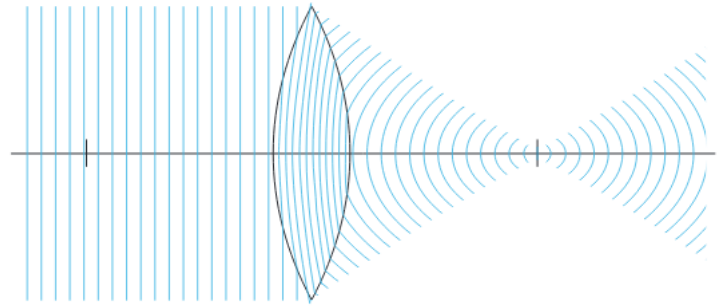


FIG. 2. Tilnærmet parallelle bølgefronter (lys fra en fjern kilde) som passerer gjennom en konvex linse. Lysbunten vil skrumpe inn til et minimum i fokus før den utvider seg. Bølgefrontene inne i linsen ligger tettere enn i luften da lyshastigheten i glass er lavere enn i luft.

Når lys går gjennom en linse vil lyset brytes i linsens overflate både på vei inn og ut. Figur 2 viser bølgefronter som passerer gjennom en linse som illustrerer krumningen av frontene gjennom linsen. Ettersom lyshastigheten er lavere i glass enn i luft vil hastighetene til bølgefrontene avta. I en konkav linse vil bølgefrontene nær senteret av linsen bevege seg lenger i mediet og bli mer forsinket enn de som ligger nærmere kanten av linsen. På bakgrunn av linsens sfæriske utformning følger det at bølgefrontene vil ta form som deler av et kuleskall etter at de har passert linsen. Bølgefrontene vil forplante seg inn mot et tilnærmet punkt kalt et fokus. Videre fra fokus spres lyset som en kulebølge utover igjen på motsatt side.

En vanlig modell for lys som går gjennom en linse kalles tynn-linse tilnærming. En slik tilnærming har den fordelen at det gjør den kvalitative forståelsen av linsen praktisk håndterlig og mulig å regne på. Generelt antas den geometriske optikken å modellere linsen svært nøyaktig, og danner utgangspunktet for en idealisert analytisk teori for linser.

III. Idelisert teori for linser

Snells brytningslov postulerer at lysstråler som passerer en overgang mellom to medier vil avbøyes. Slik forstås at lys som beveger seg fra luft gjennom glasset i linsen vil bryte i grenseflaten. Matematisk formuleres Snells brytningslov som

$$n_i \sin \theta_i = n_j \sin \theta_j \quad (1)$$

der n_i og n_j er brytningsindeksene til de to mediene og θ_i og θ_j er henholdsvis inngående og utgående vinkel. I figur 3 illustreres hvordan lysstråler parallelle med den optiske aksen brytes slik at de samles i et fokus i linsens brennvidde f .

Dersom lyset treffer linsen i en vinkel i forhold til akse vil avbildningen forskyves lengre ned langs akse, som belyst i figur 4. Forskyvelsen h til siden vil være gitt av

$$h = f \tan \theta_i \quad (2)$$

Linsen gjør med andre ord en transformasjon fra forplantningsretningen for innkommende lys til posisjon i et fokalplan for det utgående lyset.

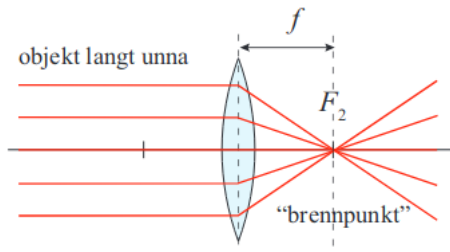


FIG. 3. Lys modellert som stråler går gjennom en linse parallelt med optisk akse. Lyset avbøyes og samles i brennpunktet på andre siden av linsen på optisk akse.

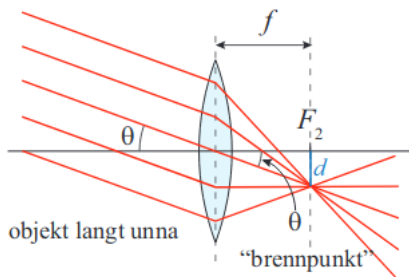


FIG. 4. Lys som går gjennom linsen med en vinkel relativt til optisk akse. Lyset avbøyes og samles i et brennpunkt noe forskjøvet relativt til optisk akse.

Generelt vil avbildning gjennom linser være diktert av tre lovmessigheter. For det første så vil stråler som passerer gjennom sentrum av linsen komme ut i samme retning som de kom inn uten avbøyning. For det andre vil en stråle som går inn parallelt med optisk akse gå gjennom fokalpunktet på andre siden. Den siste loven dikterer at stråler som går gjennom fokalpunktet før linsen vil gå parallelt ut av linsen igjen. Ideene er illustrert i figur 5 og gjelder uavhengig av lysets forplantningsretning langs en stråle. Denne figuren vil videre anvendes for å finne matematiske lovmessigheter i tynn-linse tilnærmelsen.

I figur 5 observeres en lyskilde i punkt P_2 i en avstand p fra linsen, som samles i et punkt Q_2 på andre siden av linsen. Alle stråler som utgår fra P_2 vil samles i dette punktet. Da trekantene AOF_2 og Q_1Q_2O er formlike gir simpel geometri at

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{f}{q - f}$$

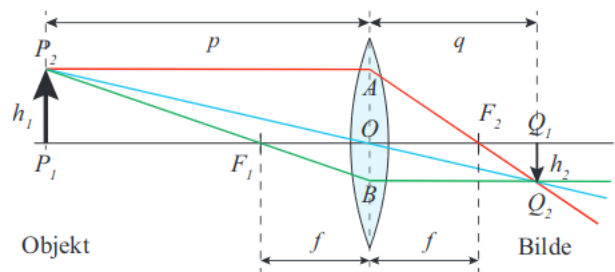


FIG. 5. Figuren belyser de tre primære måtene lys avbøyes på når lyset passerer linsen og hvordan avbildningen av et enkelt punkt opererer.

Formlikhet i trekant P_1P_2O og Q_1Q_2O gir at

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{p}{q}$$

det følger at

$$\frac{f}{q - f} = \frac{p}{q}$$

Denne matematiske relasjonen beskriver sammenhengen mellom objektavstanden p , bildeavstanden q og lensens brennvidde f omtales som linseformen eller avbildningsformelen. Ved noe omskrivning finner man følgende relasjon

$$\frac{1}{q} + \frac{1}{p} = \frac{1}{f} \quad (3)$$

Ved enkel omskrivning vil fokallengden følgelig være gitt ved

$$f = \frac{pq}{p + q} \quad (4)$$

Lyset fra alle punkter i objektplanet vil samles i et tilsvarende punkt på den andre siden av linsen. Vi ser altså at linsen kan danne et bilde av objektet. Det fremgår av figur 5 at bildet kun vil ha samme størrelse som det faktiske objektet når $p = q$. I alle andre tilfeller vil bildet være skalert med en forstørrelsesfaktor M

$$M = -\frac{q}{p} \quad (5)$$

Her fremgår det at bildeavstanden vil gå mot uendelig når $q \approx f$. Brenvidden kan også estimeres for en gitt linse ved å ta utgangspunkt i krumningen av lensens glassoverflate i den såkalte linsemakerformelen. Fo bikonvekse linser vil linsemakerformelen kunne forenkles til

$$f = \frac{R}{2(n - 1)} \quad (6)$$

der n er brytningsindeksen og R er vidden til linsen langs senteraksen. Fokallengden f er det primære parameteret for å karakterisere en linses egenskaper. Jo kortere fokallengde, desto sterkere brytes lyset, og en lang fokallengde vil korrespondere til en slakere brytning.

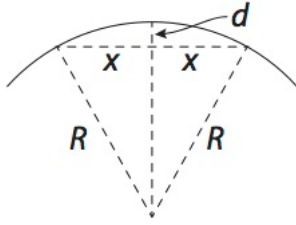


FIG. 6. Den indre geometrien benyttet for å beregne krumningsradien med et sfærometer

IV. Sfærometere

Et sfærometer er et instrument som benyttes til å finne krumningsradien til en sfærisk overflate, der de måler hvor mye en krum flate stikker opp innenfor en kjent omkrets på linseflaten. Sfærometeret brukes til å undersøke differansen d ved å plassere sfærometerets grunnring mot den kuleformede overflaten. Målepinnen i midten av ringen vil da måle høyden av den delen av flaten som er innenfor ringen ved hjelp av et måleuro. Den indre geometrien er belyst i figur 6, og ved å ta utgangspunkt i enkel geometri fremgår det ved pytagoras at

$$x^2 + (R - x)^2 = R^2 \quad (7)$$

Ved å løse ut dette uttrykket for R finner man krumningsradien gitt ved

$$R = \frac{x^2 + d^2}{2d} \quad (8)$$

Sfærometeret måler avstanden d for en del av kuleoverflaten med radius R , hvor d er avstanden fra kuleoverflaten til sfærometerringen med diameter $2x$.

V. Lupe

En lupe er et optisk instrument hvis fokus ligger uendelig langt borte, og kan i sitt enkleste format produseres av en konveks linse med et objekt i sitt brennplan. I lys av den geometriske optikken vil lyset fra en kilde i brennplanet brytes slik at strålene går parallelt med hverandre bak linsen. Gitt at to lyspunktkilder med en relativ avstand d i brennplanet sender lys gjennom en linse, vil strålene bak lupen gå parallelt med hverandre. Likevel vil strålene fra den ene kilden ha en vinkel relativt til strålene fra den andre kilden som illustrert i figur 7, som gjør at lysbundtene fra de to kildene separeres og får to ulike bildepunkt. I figur 7 illustreres hvordan et menneskeøye, som i praksis er en linse, vil bryte de parallelle strålene tilbake til et bilde av objektet på netthinnen. Det fremgår at øyet vil oppfatte avstanden mellom dem som relativt stor når lyset først har gått gjennom linsen. Videre kan øyet holdes svært nære linsen, selv innenfor

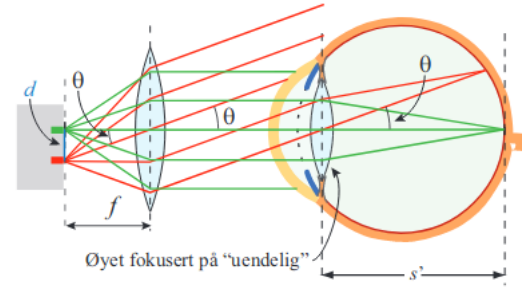


FIG. 7. Lys som går gjennom en lupe for så å observeres av et øye. Distansen d mellom punktkildene fremstår som forstørret

linsens brennpunkt, og fortsatt kunne fokusere strålene til punkter på netthinnen. Dette skyldes at strålene som nå utgår fra linsen er parallelle, og slik vil brytes av øyet inn i fokuspunktet i netthinnen. Slik vil øyet i praksis kunne fokusere på "uendeligheten", og det spiller liten rolle for fokuseringen om øyet er nært linsa da strålene fortsetter å være parallelle bakover. I fravær av linsen vil øyet betrakte avstanden som betydelig mindre, som illustrert i figur 8. Øyet må være i en tilstrekkelig distanse fra objektet for å kunne fokusere bildet på netthinnen. Det vil si i en distanse tilstrekkelig stor til at lysstrålene som treffer øyet kan betraktes som tilnærmet parallelle. Kun slik vil lyset kunne bøyes av å tegne et skarpt bilde på netthinnen. Den minste avstanden er avhengig av øyet som ser, men i optikken anvendes ofte en standardverdi $s_{min} = 25\text{cm}$ for denne minsteavstanden. Denne avstanden kalles nærpunktet. Ved bruk av en lupe kan objektet flyttes nærmere øyet vårt og fortsatt angi et klart fokus enn hva som er mulig ved bruk av kun det blotte øyet. Den effektive avstanden svarer da til lupens brennvidde.

Luper assosieres ofte med en forstørrelse som kan måles ved de reelle bildene som dannes på netthinnen. Det er likevel ikke lett å foreta slike målinger, og man benytter derfor heller en vinkelforstørrelse. Denne er målbar og svarer til virkelige forskjeller i størrelser på netthinnen. Vinkelen θ for lupen tilnærmes med d/f og i fravær av en lupe med d/s_{min} . Vinkelforstørrelsen til lupen vil være raten mellom de to tilfellene, og kan uttrykkes ved

$$M = \frac{d/f}{d/s_{min}} = \frac{s_{min}}{f} \quad (9)$$

Fra konvensjon angis lupen med en forstørrelse $5X$. Denne størrelsen beregnes med utgangspunkt i standardverdien for s_{min} ved $s_{min}/f = F$ X . Der F er tallet foran angivelsen X .

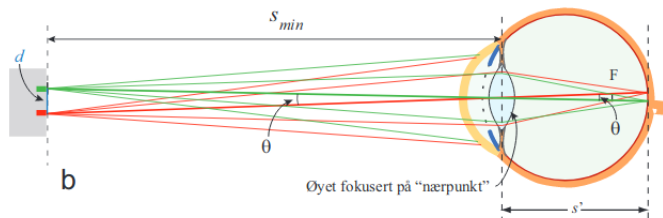


FIG. 8. To punktlýskilder som observeres direkte av et øye.

VI. Teleskopkonstruksjon

Et teleskop anvender en lupe sammen med en linse. Linsen som plasseres nærmest objektet langs lysveien kalles et *objektiv*, og linsen som vil stå nærmest øyet kalles et *okular*. Objektivet vil lage en lokal avbildning av objektet ved å utforme en effekt av å flytte objektet mye nærmere en observatør enn det objektet i virkeligheten er. Okularet vil derimot brukes som en lupe for å betrakte den lokale avbildningen. Figur 9 angir prinsippskisse for et slikt teleskop. Objektivet vil gi et reelt bilde opp-ned litt lenger vekk fra linsen enn brennplanet. Desto nærmere objektet er, desto lengre unna brennpunktet til objektivet fremgår avbildningen. Okularet plasseres dernest slik at bildet fra objektivet faller i okularets brennplan. Da vil alle lysstråler fra et valgt punkt i objektet, etter at det har gått gjennom okularet, komme ut parallelt. Dernest vil øyet kunne fokusere på uendelig og danne et reelt bilde på netthinnen som beskrevet under teorien for lupen.

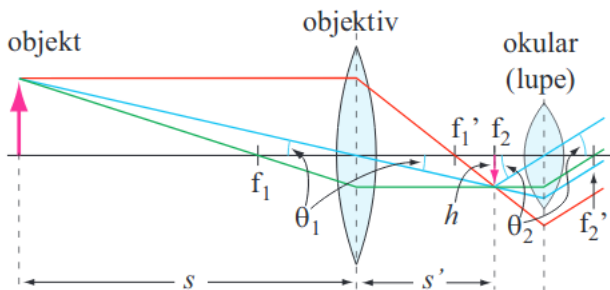


FIG. 9. I teleskoper er objektet langt borte sammenliknet med brennvidden. Objektivet vil lage et reelt, forminsket lokalt bilde noe bakenfor brennvidden. Deretter betraktes det lokale bildet med en lupe. Den totale forstørrelsen måles som vinkelforstørrelse til objektet sett gjennom kikkerten sammenliknet med uten kikkert. Bildet i denne type teleskop fremgår som snudd på hodet.

VII. Lys og deteksjon av lys

Fra kvantemekanikken vet vi at eksitasjonen av elektroner i atomer er kvantisert. I moderne kameraer utnyttes kvantifiseringen til å ta bilder. Generelt sett vil et

kamera benytte en linse for å måle lyset som kommer fra ulike punkter på et motiv. Etter at lyset har gått gjennom kameralinsen vil det treffe en lyssensor posisjonert i lensens bildeplan. Lyset vil eksitere elektronene i sensoren som deretter samles opp under en gitt eksponeringstid under bildetakingen. Sensoren vil så avgi et elektrisk signal som er en "pakke" av de eksiterte elektronene.

Hver lyssensor vil utgjøre en pixel i bildet, der det digitale bildet inneholder et tall for lysstyrken i hver piksel. Da elektronet kan antas å være udelelig vil responsen fra en følsom detektor alltid være kvantisert. Et slik instrument vil følgelig kunne være sensitivt ovenfor kvantemekaniske effekter, der kvantifiseringen kan forårsake en type støy i bildet. Korningen som oppstår i bildet kan forklares på to måter. Den vanligste modellerer lys som en strøm av fotoner, der antall fotoner som treffer et pixel per integrasjonstid er årsaken til kvantiseringen. I et slikt tilfelle kan det oppstå fotonstøy fra andre lyskilder.

VIII. Statistikk for diskrete hendelser

Ved eksakte målinger over rene tellinger der en telling varierer fra den ene til den neste burde måleresultater angis med en middelvei $\bar{bar{D}}$ og en usikkerhet angitt i form av et standardavvik (σ). Variansen er kvadratet av standardavviket og anvendes for å gjøre beregninger med usikre måleverdier og regneregler for feilforplantning. Det er kjent at i det enkle tilfellet der en tar sum eller differans av to stokastiske variabler så vil variablen til resultatet være summen av variansen til hver av de to variablene.

En stokastisk prosess er en prosess som styres etter sannsynlighetslover, og består ofte av hendelser som skjer på tilfeldige tidspunkter, men slik at sannsynligheten per tidsenhet er konstant. Slike hendelser som inntreffer uavhengig av hverandre beskrives av den diskret *Poisson-fordelingen*. I grensen der antallet hendelser er stort vil Poisson-fordelingen like Gaussfordelingen, men med den egenskapen at usikkerheten er bestemt av middelveien. Gitt at forventningsverdien for antall hendelser er N så er standardavviket \sqrt{N} og variansen lik middelveien N .

IX. Lokalisering av kvanteeffekter i digitalkamera

Den følgende teoreien bygger på fotonbildet for deteksjon av lys. Dersom det antas at en ideell lyssensor i et digitalt kamera mottar N_f fotoner vil det elektriske signalet være $N_e = N_f$ elektroner. Kameraet gir en netto forsterkningsfaktor G på signalet slik at den digitale verdien som lagres i pikselen er $\bar{D} = G\bar{N}_f$. Et konstant lysnivå vil medføre at sannsynligheten per tidsenhet for å motta et foton er konstant, men fotonene som treffer sensoren ankommer til tilfeldige tider. Det følger at målinger av samme lysnivå vil gi litt forskjellige verdier. Fra seksjonen om statistikk for diskret hendelser vet man så at mottatt antall fotoner innenfor en bestemt tid er en stokastisk variabel som følger Poisson-statistikk. Dersom det tas et bilde av en jevnt belyst vegg der forventningsverdien er den samme i alle pikselene, vil det være en betydelig variasjon i pikselverdiene. Denne variasjonen skyldes kvante-effekter som manifesterer seg som støy i bildene.

For å lete etter kvante-effekter i et digitalt bilde kan man benytte den øvrige forståelsen. Det antas at kameraet tar bilde av en grå flate med konstant lysnivå. Dermed vil forventningsverdien til de digitale verdiene være gitt ved

$$\bar{D} = G\bar{N}_f \quad (10)$$

Standardavviket (SD) er ideelt sett

$$SD(D) = G\sqrt{\bar{N}_f} \quad (11)$$

Variansen til dataen er gitt ved

$$Var(D) = (SD(D))^2 = G^2\bar{N}_f$$

I praksis vil elektronikken i kameraet gi et uavhengig støybidrag σ_N i tellingen av elektroner fordi det er vanskelig å normalt sett er G ukjent, men i rådataformater til moderne kameraer kan man benytte at $G \approx 1$ måle så små signaler. Det følger at den totale variansen blir

$$Var(D) = G^2(\bar{N}_f + \sigma_N^2) \approx G^2\bar{N}_f \quad (12)$$

Det fremgår at variansen vil være proporsjonal med middelverdien, gitt at kameraet er tilstrekkelig følsomt. Når en slik oppførsel observeres er det klart at støyen i bilde skyldes den kvantiserte vekselvirkningen mellom lys og materie i bildesensoren. Dersom kameraets egen støy er sterkes, vil støyen som observeres derimot være konstant og uavhengig av lysnivået. Når kvante-støyen dominerer vil støyen øke hvis lysstyrken øyer. Det er likevel lettere å ta bilder når det er mer lys. Dersom man betrakter forholdet mellom signal og støy, som beskriver hvor tydelig man kan måle lysmengden, vil man ha

$$\frac{\text{signal}}{\text{støy}} = \frac{\bar{N}_f}{\sqrt{\bar{N}_f}} = \sqrt{\bar{N}_f}$$

der \bar{N}_f er fotoelektron signalet og $\sqrt{\bar{N}_f}$ er standardavviket i signalet. Det vil si at på grunn av de statistiske egenskapene vil både signal og støy øke slik at signalet blir tydeligere når man har sterkere lys.

Når det tas bilde der alle pikslene er belyst med samme lysnivå estimeres \bar{D} og variansen $Var(D)$ direkte fra pikselverdiene. Likevel kan det fort skje at lysnivået varierer på tvers av bildet, og da vil den tilfeldige variasjonen overestimeres ved bruk av den vanlige måten å estimere varians. Av den grunn kan man estimere støyen fra differansen mellom nabopiksler som mottar samme lysnivå. Dersom man betrakter to nabopiksler som gir ut verdiene D_1 og D_2 , begge med varians $Var(D)$, kan man regne ut estimatet for $Var(D_1 - D_2)$ og finne $Var(D)$ på følgende vis

$$Var(D_1 - D_2) = Var(D_1) + Var(D_2) = 2Var(D)$$

$$Var(D) = \frac{1}{2}Var(D_1 - D_2) \quad (13)$$

Gitt at kvante-støyen dominerer er det mulig å estimere antallet eksiterte elektroner. Da må først kameraets forsterkningsfaktor estimeres fra

$$G = \sqrt{\frac{Var(D)}{\bar{N}_f + \sigma_N^2}} \approx \sqrt{\frac{Var(D)}{\bar{N}_f}} = \sqrt{\frac{Var(D)}{\bar{D}/G}}$$

Ved simpel regning følger

$$G = \frac{Var(D)}{\bar{D}} \quad (14)$$

Fotonelektrontallet er da gitt fra verdien av D/G i hver piksel.

X. Usikkerheter i sammensatte størrelser

Når målte størrelser inngår som variable i en funksjon vil usikkerheten ved den sammensatte størrelsen tilsvare funksjonene angitt i tabell I. Det vil si relasjonene mellom usikkerhetene Δ i de målte parameterene og det endelige estimatet, der A og B er de målte parameterene og Z er den sammensatte størrelsen.

Relasjon Z , A , B	Assosiert usikkerhet
$Z = A \pm B$	$(\Delta Z)^2 = \Delta A^2 \pm \Delta B^2$
$Z = \frac{A}{B}$, $Z = AB$	$\frac{\Delta Z^2}{Z^2} = \frac{\Delta A^2}{A^2} + \frac{\Delta B^2}{B^2}$

TABLE I. Oversikt over usikkerhetsberegninger i sammensatte størrelser

EKSPERIMENTELT

Avbildning med linse

Det første deleksperimentet undersøker kvalitativt avbildningsrelasjonene når lyset fra et objekt går gjennom en linse og treffer en skjerm. Det vil si at det gjøres betraktninger mellom objekt- og bildeavstand i linseformelen, og hvordan distanser mellom de optiske elementene påvirker forstørrelsen av objektet. På bakgrunn av den kvalitative intensjonen vil alle usikkerheter i dette deleksperimentet unnlates forutenom i en enkelt måling. Usikkerhetsestimatene vil da baseres på siktingsusikkerheten som antas å være større enn usikkerheten i metermålet. Denne estimeres til å være $\pm 1.0\text{cm}$ under rytterene, $\pm 0.5\text{cm}$ ved linjalen og beregnes som en sammensatt størrelse i henhold til tabell I for fokallengdeestimerer og forstørrelser.

I dette og de følgende eksperimentene benyttes en optisk benk med metermål. I venstre ende av benken plasseres en lampe med en skyggeskjærm slik at skyggeskjærmen står midt over metermålets nullpunkt. Det benyttes en tilnærmet rettvinklet plastboks for å sentrere lampen midt over nullpunktet etter øyemål. Det ble så plassert en tynn, gjennomsiktig mattskive i en posisjon $x_{\text{matt}} = 146.5\text{cm}$ langs med benken. Mellom lampen og mattskjærmen ble det så plassert en konveks linse med brennvidde 200mm , hvis høyde ble justert slik at linsens og lampens senterakse sammenfalt.

Linsen ble flyttet frem og tilbake langs benken for å lokalisere to posisjoner der skyggemønsteret ble avbildet skarpt på den matte skjermen. Rytteren til linsen har en sentermarkering som benyttes til å lese av hvor langs metermålet linsen er posisjonert. Denne posisjonen benyttes til å bestemme objektavstanden og bildeavstanden, som illustrert i figur 1. Deretter benyttes linseformelen i likning 4 til å estimere omtrentlig brennvidde for linsen.

Deretter estimeres forstørrelsen i henhold til likning 5, ved bruk av målt bilde- og objektavstand. Det tas mål av ytterdiameter til skyggemønsteret, og diameteren av den indre mørke sirkelen i skyggemasken med en linjal. Deretter estimeres forstørrelsen som raten mellom diameterene ved avbildningsdiameter over skyggeskjermens diameter. Ratene sammenliknes med estimatene fra likning 5. Den samme prosessen gjentas for en objekt-skjerm avstand satt til 90cm .

Deretter benyttes et sfærometer på linsen med brennvidde på 200mm for å estimere krumningsradiusen til glassoverflaten i henhold til formel 8. Sfærometerets ring er i henhold til databladet angitt å være 24.0mm , det vil si $x = 12.0\text{mm}$. Før målingen tas etablerer et sammenlikningsgrunnlag ved å lese av sfærometeret mot en plan flate. Det er differansen mellom avlesningen fra denne plane flaten og målene av sfæren som svarer til størrelsen d . Deretter estimeres brennvidden ut fra 6. Det er angitt at linsen er en bikonveks linse laget av 'BK7' glass, og som i henhold til databladet har en brytningsindeks $n = 1.520$. Ettersom linsemakerformelen alt

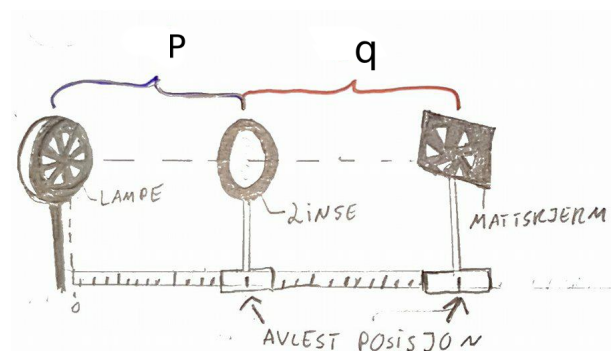


FIG. 10. Eksperimentelt oppsett for øvelse A.

er en tilnærming oppfattes det som nødvendig å inkludere usikkerhetsoverslag. Deretter vurderes om målingene gjort i denne deloppgaven er konsistente med hverandre og forventet nominell verdi $f = 200\text{mm}$. Alle parametere og det eksperimentelle oppsettet er skissert i figur 10.

Lysbunter og fokus uendelig langt borte

Det andre delforsøket tar for seg strålebunter fra to punktformige lyskilder endrer seg i størrelse når de passerer gjennom en linse ved ulike objektavstnader. I den ene enden av den optiske benken settes det nå opp en boks med to nær punktformige lyskilder, der den ene kilden sender ut grønt lys og den andre rødt lys. Lyskilden er satt ved en posisjon $x = 50\text{mm}$. I rytteren nærmest punktlyskildene settes det opp en linse med 100mm brennvidde. Høyden på linsen justeres etter øyemål slik at de to lysende punktene har samme høyde som senteret av linsen. Linsen plasseres så 75mm fra lyskilden og den grønne lysdioden skrues på. Deretter settes mattskjærmen opp rett bak linsen, før skjærmen flyttes lengre vekk fra linsen for å observere hvordan størrelsen til lysbunden som har gått gjennom linsen endrer seg.

Deretter økes avstanden mellom lyskilden og linsen, og det undersøkes på ny for hver valgte posisjon av linsen om lysbunten endrer seg når skjærmen skyves vekk fra linsen. Det undersøkes hvilken avstand som korresponderer til at diameteren til lysbunten ikke endrer seg når skjærmen forflyttes. Når denne distansen er bestemt settes avstanden mellom punktlyskilden og linsen til å være omtrent dobbelt så stor som denne, og det gjøres på ny observasjoner av lysbunten.

Lupe

Linsen med brennvidde 100mm settes nå i en distanse tilsvarende den som i forrige eksperiment svarte til at lysbunten ikke endret størrelse. Deretter skrues den andre lyskilden på, og det observeres hvordan den grønne og den røde lysbunten forholder seg til hverandre for ulike

avstander mellom linse og skjerm. Deretter plasseres et øye i en distanse der lysskivene overlappet på skjermen, og lyskilden observeres gjennom linsen. Det gjøres observasjoner av forstørrelsen av punktlyskildene. Øyet føres fra en posisjon meget nære linsen til lenger og lengre bort fra linsen langs skinnen. Det observeres hvordan forstørrelsen og utsnittet av hva vi ser endres når avstanden mellom linsen og øyet øker.

Linsen erstattes så med en linse med 50mm brennvidde. Avstanden justeres mellom punktluskilden og linsen inntil lysbuntene på andre siden av linsen har konstant diameter når skjermen har ulik avstand fra linsen. Det gjøres observasjoner av hvordan vinkelen mellom den grønne og den røde lysbuntene endrer seg ved reduksjon av linsens fokallengde fra 100mm til 50 mm. Deretter forsøkes på ny å plassere øyet i et område der lysskivene overlapper, og det gjøres observasjoner av lyskilden på samme måte som for 100mm linsen.

Teleskop

I denne deloppgaven bygges et teleskop ved å bruke to linser og en optisk benk. I den høyre enden av den optiske benken settes lampen med skyggemasken. Deretter settes en linse med 200mm fokallengde i en rytter 139cm til venstre for lampen, og en mattskive til høyre for denne linsen. Det sikres at linsens senterakse sammenfaller med lampens senterakse på øyemål. Mattskiven flyttes frem og tilbake til et fokusert bilde av lampen reflekteres. Deretter settes en linse med 50mm fokallengde i en rytter til høyre for mattskiven og i samme høyde som den første linsen. Denne linsen brukes som en lupe og det observeres fra venstre side for å forstørre bilde observert på baksiden av mattskiven. Oppsettet justeres til bildet er skarpt fokusert. Deretter fjernes mattskiven, og det justeres ytterligere for fokuseringen ved å flytte på linsen lengst til venstre. Rytterne skrues godt fast og teleskopet tas med ut for å observere omgivelsene. Ulike fokus ved ulike distanser frembringes ved å flytte på linsene. ’

Kamera og fotoner

Det siste delforsøket benytter en bildesensor med elektronikk for overføring av bildet til PC og et kameraobjektiv for å ta bilder av lampen med skyggeskjerm. Bildesensoren settes i en rytter lengst til høyre på den optiske benken. Deretter settes en linse med 100mm fokallengde i samme høyde som bildesensoren til høyre for sensoren. Lampen med skyggemønsteret settes i høyere ende av skinnen. Bildesensoren kobles så til en PC, og programmet minisee benyttes for å ta film av lampen gjennom linsen. Initielt er bildet uskarpt, og ”auto exposure” funksjonen aktiveres. Linsen justeres slik at et bilde av skyggemønsteret blir fokusert på bildesensoren, det forsøkes å trenge frem et skarpt bilde.

Linsen byttes ut med en mattskive, det observeres så

hvordan linseåpningen endrer seg når blenderinnstillingen justeres. Deretter skrues kameraobjektivet inn foran bildesensoren. Blenderåpningen skrues på og det observeres hvordan lysstyrken i bildet endres på skjermen. Den største blenderåpningen velges. Taklyset skrues av, og innstillingene justeres som følger. ”White Balance ” settes til 64 for alle tre verdier. Gamma settes til 1, saturation til 100 og Gain til 1. Verdiene for lukkertiden ”Time” justeres for å observere hvordan innstillingen påvirker bildet. Verdien der bildet er blitt helt hvitt i midten av det sirkelformede bildet lokaliseres. Deretter justeres posisjonen til lyskilden slik at den sirkelformede delen blir omtrent midt i bildet. Verdien for ”Time” settes så 20% høyere enn den som såvidt gjorde at den sentrale skiven ble hvit. Et Det tas et bilde med full blenderåpning. Bildet kjøres så gjennom et skript for å finne gjennomsnittsverdi og varians til differansen mellom nabopiksler. Deretter tas det opp en sekvens av 10 bilder med forskjellig lysnivå ved å justere blenderåpningen. Blenderåpningen endres skrittvis mot mindre lys mens det tas opp nye bilder som kjøres gjennom det samme scriptet. Det sikres at det tas minst fire punkter som spenner ut middelveidintervallet fra ca 50 til 200. Deretter analyseres i hvilke bilder det er mulig å observere støy, og hvordan den visuelle støyen avhenger av lysnivået. Middelveidier og varians brukes til å beregne differansen mellom nabopikslene for alle bildene, og det fremstilles en graf av variansen i en piksel, $\text{Var}(D)$, som funksjon av middelveidene. Resultatene analyseres for å observere tegn til kvantemekaniske effekter og variasjonen mellom høyeste og laveste lysnivå. Det produseres deretter en ny graf som angir forholdet mellom signal/støy som funksjon av middelveiden.

RESULTATER

Avbildning med linse

Det observeres at linsen avbilder skyggeskjermen skarpt ved to posisjoner x_1 og x_2 , som ga henholdsvis minst og størst forstørrelse. De to posisjonene svarer til objektavstanden p og er angitt sammen med bildeavstand q og brennviddeestimat f i tabell II. I samme tabell er også den målte diameteren til avbildningen d , samt beregnet forstørrelse M og målt diameterrate r angitt. Det negative fortegnet ved M indikerer at avbildningen er opp-ned.

	p [cm]	q [cm]	f [cm]	d [cm]	M	rate
x_1	123.0	23.5	21.1	1.0	-0.2	0.2
x_2	25.5 ± 0.5	121.0 ± 0.5	19.7 ± 0.4	25.5 ± 0.5	-4.7 ± 0.2	5.0 ± 0.5

TABLE II. Oversikt over estimert objekt- og bildeavstand samt estimert brennvidde. Nominell brennvidde var angitt $f = 200$ mm. Videre angitt er diameteren d for avbildningen, sammen med beregnet forstørrelse og raten i henhold til diameteren på skyggeskjermen

Diameteren til stjerneformasjonen på skyggemønsteret måles direkte til 5.1 ± 0.5 cm. Usikkerhetsestimatene ble gjort for målingene assosiert med objektavstanden x_2 .

For en objekt-skjerm avstand på 90cm er verdier for p, q og f angitt i tabell III. x_3 og x_4 svarer til henholdsvis posisjonen som gir et forminsket og forstørret bilde. Her er også avbildningsdiameter, beregnet forstørrelse og diameterraten angitt. Det observeres at det tilsynelatende ikke er mulig å lokalisere noe klart bilde i de andre posisjoner enn de to lokaliserte.

	p [mm]	q [mm]	f [mm]	d [mm]	M	rate
x_3	310	590	203	26	-0.52	0.51
x_4	600	300	200	95	-2.0	1.86

TABLE III. Oversikt over estimert objekt- og bildeavstand samt estimert brennvidde. Nominell brennvidde var angitt $f = 200$ mm. Oversikt over målt diameter av skyggeskjerm og av reflektert bilde, samt forstørrelse i henhold til bilde- og objektavstand.

Fra sfærometeret avleses en høyde $d = 0.35$ mm, som svarer til en krumningsradie på

$$R = \frac{12.0\text{mm}^2 + 0.35\text{mm}^2}{2 \times 0.35\text{mm}} = 206\text{mm} \quad (15)$$

Fra denne krumningsradien estimeres brennvidden

$$f = \frac{206\text{mm}}{2(1.52 - 1)} = 198\text{mm} \quad (16)$$

Det observeres at måleuret er stabilt ved å gjennomføre målingen flere ganger og eksponere den for eksternt trykk.

Lysbunter og fokus uendelig langt borte

Når linsen plasseres i en distanse 7.5cm fra lyskilden med skjermen rett bak observeres en grønn lysbunt på skjermen. Når skjermen så flyttes lengre unna linsen ser det på øyemål ut som om diameteren til lysbuntten ikke endrer seg. Det observeres videre at lysbuntten beveger seg nedover langs skjermen med økt distanse fra linsen. Fargen på lysbuntten observeres å være tilsynelatende konstant.

Når distansen mellom lyskilde og linse så økes, og mattskjermen deretter beveges lengre bort fra linsen observeres markante skift av lysbuntens diameter. Trenden er gjennomgående at diameteren til lysbuntten først konvergerer, når et minimum og så divergerer for tilsynelatende alle økende distanser.

Det observeres at diameteren til lysbuntten er konstant når linsen står i en posisjon $x = 150\text{mm}$. Etter som lampen står 50mm ut fra nullpunkt ser vi at dette korresponderer direkte til linsens brennvidde. Når avstanden mellom punktlyskilde og linse er dobbelt så stor som brennvidden til linsen så fremgår den samme effekten med konvergerende diameter, minima og så diver-

gens. Minima nås ved en posisjon $x \approx 440\text{mm}$, det vil si omtrentlig to ganger linsens brennvidde bak linsen.

Lupe

Når linsen er satt 100mm unna punktlyskildene i en posisjon $x = 150\text{mm}$ er lysbuntens diameter konstant. Det observeres at når skjermen skyves lengre unna linsen beveger de to lysbuntene seg på bort fra hverandre og på skrå nedover. Det vil si at vinkelen mellom dem øker. Når skjermen er tilstrekkelig nære linsen overlapper lysbuntene hverandre og superponerer fargene i overlappingsregionen. Avbildningen på skjermen er omvendt av lysbuntens posisjon relativt til hverandre. Når skjermen erstattes med observasjoner av et øye, og man ser gjennom linsen i en distanse der lysbuntene tidligere overlappet hverandre på skjermen, dannes et tilnærmet klart bilde av objektet. Bildet fremstår forstørret, og preges av uklarheter. Begge lyskilder er likevel synlig i denne distansen. Når øyet flyttes lengre unna linsen blir utsnittet som kan observeres mindre og tilsynelatende mer uklart. Videre observeres at forstørrelsen av bildet øker.

Når linsen er erstattet med en 50mm linse observeres at diameteren til de lysbuntene på skjermen er konstante når objekt-linse avsttanden er 50mm. Det observeres at vinkelen mellom grønn og rød lysbunt tilsynelatende er større relativt til vinkelen utspendt ved bruk av 100mm linsen. Når øyet plasseres i et område der lysskivene konvergerer observeres igjen at glasset har en forstørrende effekt, som også er sterkere enn den for 100mm linsen. Bildet blir også raskere uklart.

Teleskop

Linsen med brennvidde 200mm observeres å operere som et objektiv i en posisjon 111 cm, mens linsen med brennvidde 50mm opererer som en lupe eller et okular i en posisjon på 142 cm. Ved observasjoner av lampen gjennom okularet observeres et opp-ned forstørret bilde av skyggemasken. Teleskopet ble så tatt med ut. Når bildet observeres av øyet gjennom okularet observeres en forstørrelse av et utsnitt av hva teleskopet er rettet inn mot. Bildet observeres å være snudd opp ned. Initielt var det kun mulig å observere klare bilder av objekter mindre enn en meter unna linsen. Ved å endre posisjonen til objektivet og okularet ble det observert skarpe bilder av horisonten når linsen stod i en posisjon på ca 120 cm. Konstruksjonen av teleskopet var suksessfull. Det blir klart at 50mm linsen opererer suksessfullt som et okular, og 200mm linsen som objektivet.

ID	\bar{D}	Var(D)	G	\bar{N}_f
L09	246	2.4	0.005	49638
L10	235	6.1	0.01	19802
L11	239	13.9	0.03	8280
L12	236	9.8	0.02	11453
L13	136	4.5		
L14	82	3.0		
L15	65	2.2		
L16	55	1.3		
L17	246	2.5	0.005	47655
L18	242	12.2	0.03	9602
L19	26	1.3		

TABLE IV. Tabell for verdier assosiert med hvert enkelt bilde samt estimer av G-faktoren og antallet eksiterte elektroner \bar{N}_f

Kamera og fotoner

Det observeres at når blenerinsstillingen justeres så endrer lysstyrken seg. Når blenderen skrur fra null og oppover går bildet fra å være helt mørkt til helt hvitt, der en hvit sirkelskive har en divergerende diameter. Den initiale lukkertiden settes til $T_1 = 1970$ ms, før en ny lukkertid tilnærmet 20% høyere enn T_1 settes til $T_2 = 2356$ ms. Et typisk bilde er eksemplifisert i figur 11.



FIG. 11. Typisk bilde for telling av fotoner, bildet svarer til L10.

Når scriptet kjøres for et gitt bilde returneres \bar{D} og $Var(\bar{D})$ som gjennomsnittet per pixel. Variansen er plottet som en funksjon av middelveiden i figur 12. Det observeres ingen klar lineær relasjon mellom datapunktene. For de laveste middelveidene er det en tydeligere lineær tendens, mens desto høyere middelveiden blir jo høyere ser støyen ut til å bli. Dette antyder at kvantemekaniske effekter preger dominerer for de høyere middelveidene. Figur 13 er et plot av forholdet signal/støy som funksjon av middelveidi.

I tabell IV angis alle beregningene av middelveidi og varians fra bildene, samt faktoren G og midlere antall fotoner for de høyeste lysnivåene.

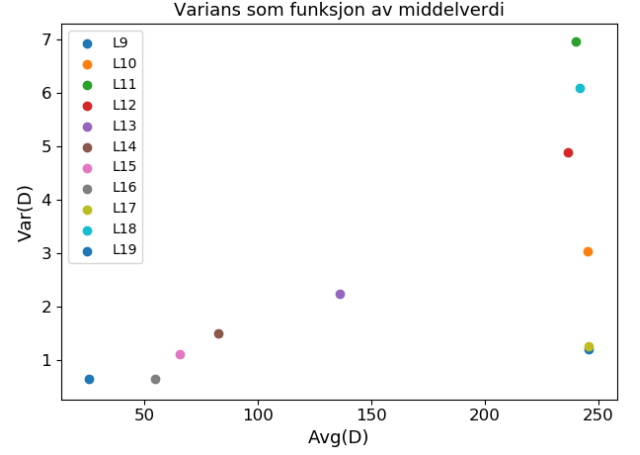


FIG. 12. Variansen plottet som funksjon av gjennomsnittsverdien D per bilde. Indekseringen viser til bildets ID der korresponderende verdier er angitt i egen tabell.

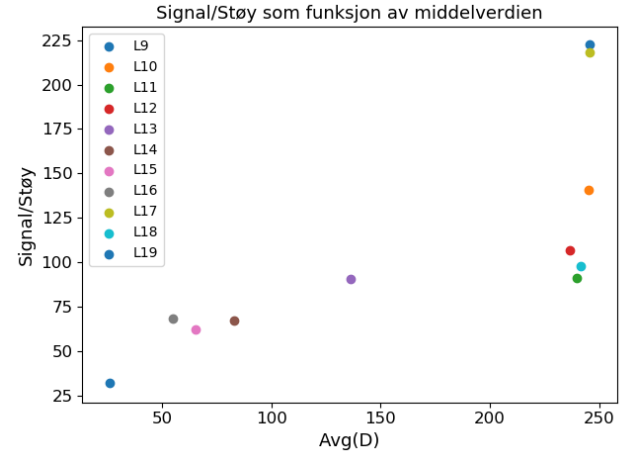


FIG. 13. Forholdet signal/støy plottet som funksjon av gjennomsnittsverdien D . Indekseringen viser til bildets ID der korresponderende verdier er angitt i egen tabell.

DISKUSJON

Avbildning med linse

De øvrige resultatene sammenlignes med de teoretiske forutsetningene ved å analysere atferden av lyset når man beveger linsen mellom et fastholdt objekt og en avbildningsskjerm. I henhold til de antatte tre lovmessighetene for lysstrålen vil fokuspunktet for avbildningen oppføre seg som illustrert i figur 14. Fra skissen fremgår det at

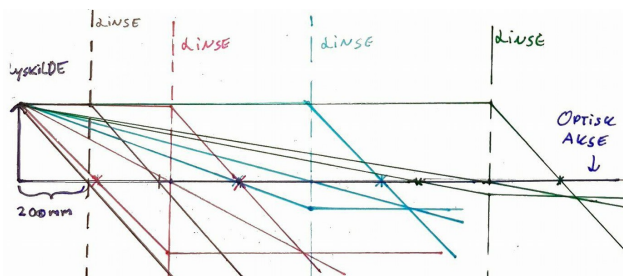


FIG. 14. Lysbrytning og fokuspunkter i henhold til distanse mellom linse og lyskilde.

det kan forventes å finne to klare fokuspunkt. Når distansen er nøyaktig lik brennvidden vil bildet være i uendeligheten og det vil ikke være mulig å frembringe noe skarpt bilde. Etterhvert som distansen blir litt større så vil bildet få et observerbart fokuspunkt et stykke bort ifra linsen. Det er trolig dette vi ser for posisjonen x_2 . Etterhvert som distansen øker ytterligere så vil til slutt bildepunktet sammenfalle med brennviddepunktet. Når linsen da blir dyttet såpass langt bort at fokuspunktet treffer mattskjermen burde man kunne observere et klart bilde på skjermen, dette er trolig observasjonen gjort i x_1 .

At bildet blir forstørret i x_2 og forminskert i x_1 kan forstås med utgangspunkt i Snells lov. Loven dikterer at desto mindre innfallsvinkelen må være, jo større må den utgående vinkelen være. Når objektet er plassert relativt nære linsen som i posisjon x_2 vil utgående vinkel være relativt stor i forhold til innfallsvinkelen. Dette burde svare til et forstørret bilde av objektet, som også er observert i øvrige resultater. Når avstanden mellom linse og objekt derimot er relativt stor så vil lyset teoretisk inngå tilnærmet parallelt med optisk akse og man burde forvente en forminskelse da utgående vinkel burde være korresponderende liten.

Når den målte diameterraten og forstørrelsesraten M sammenliknes er det i noen grad avvik mellom resultatene. Dette er ikke overraskende med tanke på fraværet av presisjon målingene ble gjort under. Likevel er resultatene belysende ovenfor et vist samsvar, ettersom estimatene tenderer mot hverandre og var samsvarende innenfor usikkerhetene av hverandre estimert for x_2 . Trolig er usikkerhetene assosiert med M større enn de med den faktiske billedraten, da diameterene i raten ble målt direkte versus målene over p og q der det var mer utfor-

drende å gjøre en presis avlesning. Det bemerkes at man ser et større avvik i resultatene for forstørrelsene relativt til forminskelsene. Dette kan blant annet skyldes at det er større usikkerheter assosiert med disse målene. Blant annet at diameteren strakk seg ut over mattskjermen, og måtte måles over et hvit ark med større areal.

Videre observeres avvik for estimatene av f i henhold til den nominelle verdien når f beregnes med linseformelen. Det observeres at disse avvikene er større når linsen er plassert lengre unna. En mulig tilfeldig feil kan stamme fra varierende grad av nøyaktighet ved måling av avbildningenes diameter.

Det er altså klare tendenser til at målingene gir gode resultater, men på bakgrunn av den noe unøyaktige tilnærmingen med å lokalisere posisjonen der bildet blir skarpt er det naturligvis assosierte usikkerheter. Det bemerkes ytterligere at den samme effekten observeres for begge objekt-skjerm avstander. Dette peker i retning av en viss generalitet i avbildningsprosessen, som underbygges av samsvaret med de teoretiske predikasjonene. Målingene i dette delforsøket må derfor kunne antas å være relativt konsistente på tvers av de assosierte usikkerhetene. Både estimatet av M med utgangspunkt i p og q ga tilnærmet korrekte svar for den faktiske forstørrelsen, og det samme gjaldt estimatet for brennvidden gjort med linseformelen.

Lysbunter og fokus uendelig langt borte

I delforsøkets første segment ble det observert en lysbunt med tilsynelatende konstant diameter som beveget seg på skrå nedover mattskjermen når distanse mellom linse og skjerm økte. I henhold til den teoretiske bakgrunnen kan det se ut som om systemet er i en situasjon liknende den illustrert i figur 4. Når strålene kommer inn fra en viss høyde i henhold til optisk akse fra en distanse tilnærmet lik brennvidden vil distansen mellom skjerm og linse avgjøre hvor lysbuntten treffer skjermen. Det vil si at resultatene slik samsvarer med den teoretiske modellen, da det kun blir et spørsmål om hvor skjermen treffer strålene. Det som derimot bryter med forventningene er at diameteren tilsynelatende er konstant til tross for at den relative posisjoneringen av linse og objekt er 25mm kortere enn brennvidden. Med økt distanse predikerer teorien at lysbuntens diameter er subjekt til en viss divergens. Det er mulig at divergensen ikke er tilstrekkelig stor for å kunne observeres på den undersøkte distansen. I henhold til teori ville divergensen blitt større dersom linsen flyttes nærmere objektet, og i et slikt tilfellet kanskje vært synlig. At lysbuntten flytter seg nedover fremfor oppover samsvarer også med teori og brytningen av lyset som kommer fra et objekt posisjonert over optisk akse.

Når linsen flyttes til distanser over 75mm og det observeres endringer i lysbuntens diameter observeres også et godt samsvar med teori, forutsatt at distansen mellom linse og objekt er større enn brennvidden. Situasjonen burde samsvare med den illustrert i figur 5, og de

eksperimentelle resultatene stemmer godt overens med forventede trender. Minima burda da samsvare med linsens brennvidde der bildeskjermen står posisjonert i fokus, det vil si 100mm bak linsen. At det observeres at diameteren til lysbundten er konstant når linsen er posisjonert 100mm fra lyskilden samsvarer svært godt med teori. Distansen svarer til den aktuelle brennvidden. Det som observeres er da at lysstrålene utgår parallelt fra linsen, og derfor treffer skjermen med samme distanse fra hverandre uavhengig av skjermens posisjon. Observasjonene sammenfaller slik svært godt med de teoretiske predikasjonene.

I forhold til det første deleksperimentet vil det aldri kunne fås noe klart bilde i situasjonen der det observeres at diameteren er konstant. Dette er fordi objektet nå står posisjonert i linsens brennpunkt, som svarer til at lysstrålene går parallelt ut av linsen på andre siden. Slik plasseres fokus til linsen i uendeligheten, det vil si at et klart bilde kun eksisterer hypotetisk hvis skjermen var plassert uendelig langt borte. Når avstanden mellom linse og objekt er dobbelt så stor som linsens brennvidde vil det igjen dannes et klart bilde i to ganger avstanden fra linsen. Dette samsvarer godt med resultatene fra første deleksperiment der objektet står en god distanse utenfor linsens brennvidde. Det ser i motsetning til det første deleksperimentet ut som om det er noen direkte forstørrelse eller forminskelse i henhold til punktkildens diameter. Dette er trolig et spesialtilfelle som opptrer når avstanden mellom linse og objekt er to ganger fokallengde.

For å kunne sende mest mulig lys til et punkt i en endelig avstand er det rimelig å anta at to ting er nødvendig. For det første må linsen plasseres relativt til lyskilden slik at mest mulig energi strømmen gjennom linsen. Det vil si slik at romvinkelen fra punktkilden til linsen må optimaliseres, uten at distansen blir mindre enn eller lik fokallengden. Da vil det ikke lenger være mulig å frembringe et klart bilde på skjermen. Når en slik distanse er funnet så må man videre stille inn for å finne fokuspunktet med skjermen, der man som observert i øvrige eksperiment fant at intensiteten var optimalisert. Det er en siste komponent som er verdt å betrakte. Desto nærmere linsen skjermen er plassert, desto større areal vil intensitetsminima fordele seg over. Man må derfor finne et forhold mellom biledavstand og objektavstand er i en slik relasjon at intensitetsminima har størst mulig energi per areal. Dette er mest sannsynlig en geometrisk problemstilling som kan løses matematisk, eller ved å prøve seg frem eksperimentelt. Dersom man heller søkte å sende mest mulig lys til et punkt langt unna må nødvendigvis distansen mellom linse og objekt nærme seg fokallengden ovenfra. Kun slik vil bildepunktet lande langt bak linsen. Det er også gunstig å sikre at maksimal mengde energi passerer gjennom linsen fra lyskilden, som sikres i henhold til optimalisering av romvinkelen. Trolig knyttes en slik optimalisering til å posisjonere objektet tilnærmet langs optisk akse.

Lupe

Når objektet er posisjonert i linsens brennplan forventes det som i det foregående delforsøket at diameteren til lysbundtene burde være konstante. At de beveger seg på skrå nedover fra hverandre er også å forvente i henhold til teorien. Som illustrert i første halvdel av figur 8 vil to slike lyspunktkilder få to forskjellige brytninger når de passerer den konvekse linsen. Derfor vil de også støyen av de to kildenes lysstråler treffe skjermen ulikt. At de beveger seg på skrå og nedover fra hverandre må forståes med utgangspunkt i innfallsvinkelen til lyset på linsen. Når lyspunktene befinner seg parrallelt i en region over optisk akse vil linsen bøye lyset på skrå, nedover. Det vil slik observeres at lysbundtene beveger seg fra hverandre når skjermen flyttes lengre bort. Observasjonen er dog kun en konsekvens av at lysstrålene har reist en lengre vei på skrå nedover når skjermens distanse øker.

Når linsen erstattes med en linse hvis brennvidde er mindre, medfører dette at objektet må plasseres nærmere. Dette medfører videre at innfallsvinkelen av lyset på linsen blir mindre, og følgelig at utgående vinkel burde bli større. Det er derfor rimelig å anta teoretisk at vinkel mellom de to bundtenes lysstråler burde øke. Dette samsvarer godt med observasjonene. Det at den utgående vinkelen til lysstrålene blir større for 50mm linsen svarer godt med observasjonene om at den forstørrende effekten er kraftikere for denne linsen enn for linsen med brennvidde på 100mm. Det stemmer derfor trolig godt at den forstørrende effekten er direkte korrelert med innfallsvinkelen til lyset, diktert av lyskildens posisjon og format samt brennvidden til lupen.

Forstørrelsen som angis ved for eksempel 5X for en linse på 50mm angir lupens vinkelforstørrelse. Denne størrelsen forteller oss forholdet mellom tangens til vinkelen lyset har når det kommer inn mot øyet via en lupe, og vinkelen lyset har når det kommer direkte fra objektet i $d = 25\text{cm}$ avstand uten lupe. Størrelsen forteller oss med andre ord den forstørrende effektiviteten ved lueanvendelse. Denne forstørrelsen defineres noe annerledes enn forstørrelsen benyttet i det første deleksperimentet (se likning 5 og ??). I lueforstørrelsen observeres produktet av to optiske elementer, der øyet bøyer av parallelle stråler for å forme et bildet på netthinnen. Forstørrelsen er derfor avhengig av øyet, mens det i det første delforsøket var snakk om direkte forhold mellom objekt- og bildeavstander.

Teleskop

At teleskopet var suksessfullt var lite overaskende ettersom prosessen var rett frem. At ulike distanser mellom okular og objektiv gir skarphet av objekter i ulike distanser fra objektivet er heller ikke overraskende. Dette stammer fra at lyset fra objekter i ulike distanser vil avbøyes ulikt i linsen. For objekter langs med horisonten vil lyset bøyes tilnærmet rett inn mot objektivets brennpunkt. Det vil si i en distanse 20cm bak objektivet.

At det var mulig å observere mer nærtliggende objekter når okulalet var plassert i en avstand større enn brennvidden samsvarer godt med teorien. Ettersom det er rimelig å anta at bildepunktet til objektivet burde ligge noe utenfor brennvidden. Det var mer overaskende at det var mulig å fokusere på horisonten når okulalet var plassert innenfor brennvidden til objektivet. Bildet fremstod relativt klart, og man burde kanskje ha forventet at bildet var preget av mer støy når lyset går gjennom okulalet flr det har nådd bildepunktet til objektivet.

Kamera og fotoner

Da det er kjent at variansen vil være proporsjonal med gjennomsnittsverdien i fraværet av støy, fremgår det fra plottet at det åpenbart er støykomponenter som påvirker dataen. Det er også kjent fra teorien at dersom denne støykomponenten var et produkt av elektronikken i kameraet ville støybidraget vært en konstant og uavhengig av lysnivået. Derimot fremgår det av plot 12 at støybidraget flukturerer både over spennet av gjennomsnittsverdien og for tilnærmet den samme verdien i regionen om $\bar{D} \approx 250$. Dette er altså kraftige indikatorer på at kvante-støyen dominerer, da støyen øker når lysstyrken øker.

At de kvantemekaniske effektene ser ut til å øke ved de høyeste lysnivåene samsvarer godt med predikasjoner. Likning 11 angir at standardavviket, eller støyen, er proporsjonal med kvadratroten av variansen, som svarer til antallet fotoner. Det indikerer at når lysstyrken skrus opp så burde også støyen i bildet øke. På samme måte etablerer likningen at den kvantemekaniske støyen burde være relativt liten for lavere lysstyrker. Dette samsvarer også godt med de observerte resultatene, der den lineære tendensen som nevnt blir tydeligere for de lavere nivåene.

KONKLUSJON

Det første delforsøket var belysende for den kvalitative forståelsen av avbildninger gjennom linser. Resultatene indikerte godt samsvar mellom teoretiske predikasjoner, direkte målinger og den nominelle brennvidden til linsen. For en kvalitativ forståelse var delforsøket en suksess, til tross for avvikene som fulgte med fraværet av presisjon i målingene. Det ble ellers funnet to punkter langs den optiske benken der bildet ble avbildet klart. Et der distanse mellom linse og objekt var noe større enn brennvidden,

og et der distansen mellom linse og matts skjermen var noe større enn brennvidden. Førstnevnte ga en forstørrelse, og sistnevnte en forminskende effekt, alt i samsvar med teoretiske predikasjoner av Snells lov og geometrisk optikk.

I andre delforsøk observerte ble det igjen observert hvordan relative posisjoneringer av objekt, linse og avbildningsskjerm påvirket avbildningssituasjonen, med et fokus på bildepunkter i uendeligheten. Det ble observert at når lyspunktkilden stod i linsens fokalpunkt så var arealet av lysbuntten på skjermen konstant. Observasjonen sammenfalt svært godt med de teoretiske predikasjonene. Mer overraskende var det ikke mulig å observere noen ensartet divergens av lysbunttenes diameter når objektet var i en posisjon innenfor linsens brennvidde. Observasjonen skyldes trolig at divergensen var for liten til å bli observert med det blotte øyet.

I det tredje delforsøket ble det observert hvordan lupen kunne utnyttes til å observere et objekt nærmere enn hva som er mulig med det blotte øyet. Det ble også observert at en mindre brennvidde og følgelig linse-objekt avstand i lupen ga en kraftigere forstørrelse enn ved lavere brennvidder.

I det fjerde delforsøket ble det klart hvordan man kan bygge et teleskop ved bruk av to linser. Den ene linsen ble anvendt som et objektiv som dannet et lokalt bilde fanget opp av et okular. Ved å se gjennom okulalet kunne man se forstørrelser ved ulike distanser i henhold til brytningen av lyset og de relative distansene mellom objektiv og okular.

I det siste delforsøket ble det gjort betraktninger over de kvantemekaniske effekter i avbildninger ved et kamera. Det ble observert at de kvantemekaniske effektene ble sterkere for høyere lysstyrker, og at en lineær tendens var mer fremtredende for lavere middelværddier av lysstyrken.

I sin helhet har dette forsøket vært belysende for atferden til lys som passerer grenseflater mellom to medium og hvordan konvekse linser avbilder objekter. Det har blitt observert hvordan optiske instrumenter alene eller i systemer danner forstørrende og forminskende effekter, og at avbildning er avhengig av fokus diktert av linsens brennvidde. Generelt har den eksperimentelle atferden observert samsvart svært godt med teori. I de tilfellene der de teoretiske predikasjonene ikke ble observert er risikoen høy for at det var svakheter ved observasjonen presisjons og nøyaktighet og ikke systemet som ga misvisende resultater. Mer presise målinger er nødvendig for å undersøke eventuelle mangler.

BIBLIOGRAFI

- [1] G. L. Squires, Practical Physics, Cambridge University Press 2001, 4th edition.
 [2] A. Vistnes, Svigninger og Bølger, Tapir akademisk 2011, Trondheim.

APPENIX A

Utstysrliste	Modell	Serienummer
Optisk benk		
Lampe		
Lysfilter med stjerneformet skyggemønster		
Punktlyskilder i rød og grønn		
Hvit mattskjerm for projeksjon		
Bikonvekste linser med brennvidde 200mm, 100mm og 50mm		
Sfærometer	Spherometer 53-859 Go Edmund	20465
Bildesensor	CCTV Lens 6.0-15mm	
Skinnestativer		