

FYS 2150 – Modul 3

Polarisasjon

Revidert Mars 2020, Nina Edin
Fysisk institutt, Universitetet i Oslo

Vi skal i denne øvelsen studere lineært og sirkulært polarisert lys og bruke tre forskjellige måter å polarisere lys: polarisasjonsfiltre, refleksjon og brytning.

1. BAKGRUNN

Polarisasjon er en egenskap ved transversale bølger. For elektromagnetiske bølger defineres polariseringsretningen som retningen av det elektriske feltet, som er vinkelrett på det magnetiske feltet og utbredelsesretningen. Vi snakker om lineær polarisering hvis det elektriske feltet hele tiden svinger i samme plan. Hvis retningen til E-feltet endres med konstant vinkelhastighet i planet normalt på utbredeshastigheten er lyset sirkulært polarisert (se video i Canvas, også linket i fjernlab).

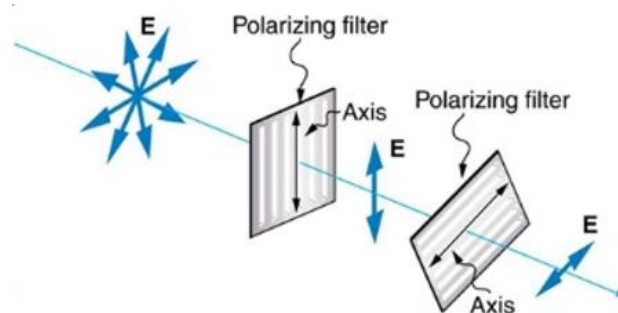
Upolarisert lys er satt sammen av bølger med tilfeldige retninger på det elektriske feltet. Polarisasjon består i prinsippet av at man fjerner komponenter av lyset med andre E-feltretninger enn polarisasjonsretningen. I denne øvelsen skal vi bruke polarisasjonsfiltre, refleksjon fra et prisme og brytning i krystaller til polarisasjon.

Teorien for polarisasjon finner du i læreboka av A. I. Vistnes: Physics of Oscillations and Waves, kapittel 10.3 og 10.4 (tilgjengelig på emnesiden til FYS2130 eller på <http://folk.uio.no/arntvi/SBFbok.html>).

A. Polarisasjonsfiltre og Malus' lov

Et polarisasjonsfilter lager planpolarisert lys og er utstyrt med en viser som angir transmisjonsretningen for den elektriske vektoren i lyset. Filteret kan roteres i holderen. Når filteret benyttes til å frembringe polarisert lys, kalles det en polarisator. Når det benyttes til å analysere lys, kalles det en analysator. For å forstå hvordan polarisasjonsfilteret kan absorbere lys med den elektriske feltvektoren vinkelrett på transmisjonsretningen, kan det være nyttig å tenke på det mikrobølgefilteret Heinrich Hertz oppfant i 1888. Dette filteret bestod av en

rekke tynne parallelle metalltråder utspent over en rektangulær ramme. Den elektriske vektorens komponent langs trådene induserer en strøm i metallet og vil derfor dempes. Filterets transmisjonsretning er vinkelrett på trådene.



Figur 1: Lyset blir først polarisert av filter 1. Når det deretter kommer til filter 2 vil kun en andel av lyset passere gjennom filtret avhengig av vinkelen mellom de to filteres polarisasjonsretninger.

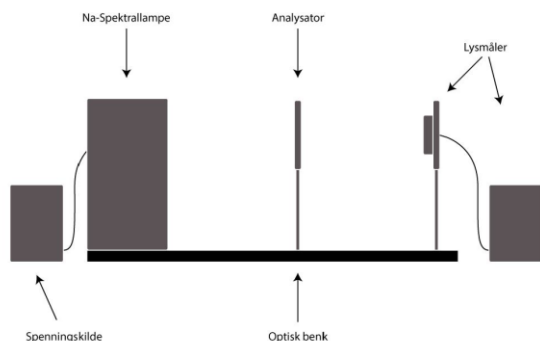
(fra: <https://courses.lumenlearning.com/physics/chapter/27-8-polarization/>)

Hvis vi setter opp to polarisasjonsfiltre etter hverandre (figur 1), vil lyset først polariseres av filter 1. Kun en del av lyset vil passere gjennom filter 2 avhengig av vinkelen mellom de to filteres polarisasjonsretninger. Intensiteten til lyset som går gjennom filter 2 er gitt ved **Malus' lov**:

$$I = I_0 \cos^2(\theta_2 - \theta_1) \quad (1)$$

Hvor I_0 er intensiteten til lyset etter at det har passert filter 1. Argumentet for cosinusfunksjonen er forskjellen i dreievinkel mellom filter 1 og 2.

Oppgave 1. Upolarisert lys

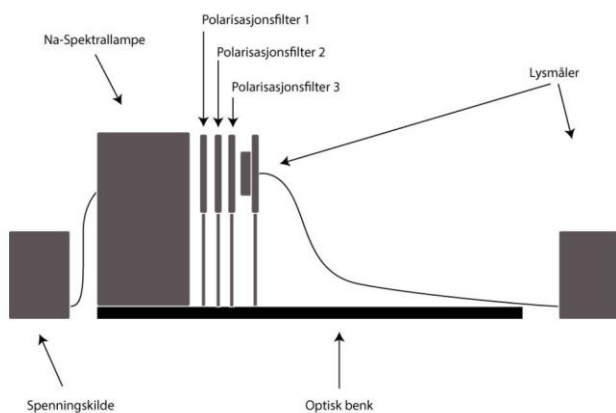


Figur 5: Forsøksoppstilling til oppgave 1 (tegning av Jonas Asperud)

De fleste lyskilder sender ut upolarisert lys. Undersøk lyset fra en spektrallampe med en analysator og en lysmåler. Den observerte sammenhengen mellom analysatorvinkel og illuminans (belysningsstyrke) i lux angis i en tabell.

- Kommentér tabellen

Oppgave 2. Malus' lov



Figur 6: Forsøksoppstilling til oppgave 2 del 2 med 3 polarisasjonsfiltere (tegning av Jonas Asperud)

To polarisasjonsfiltere og en lysmåler plasseres så tett inntil en spektrallampe som mulig. Mål illuminansen E for følgende verdier av vinkelen mellom transmisjonsretningene til polarisatoren og analysatoren:

$$0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, \dots, 90^\circ.$$

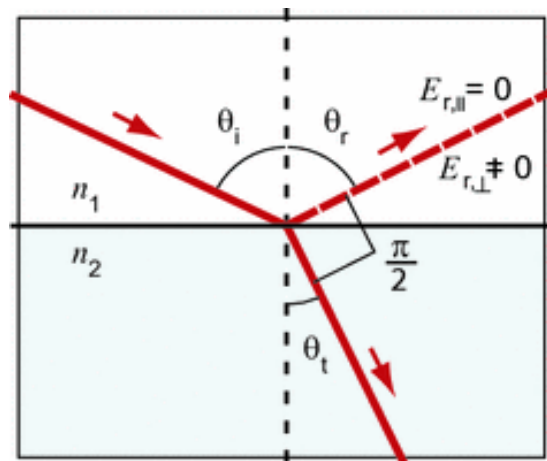
- Plott $E(\theta) - E(90^\circ)$ som funksjon av $\cos^2\theta$ og lag en lineærtilpasning. Kommenter tilpasningen. Hvordan stemmer målingene av $E(\theta)$ med de teoretiske verdier?

La de to første polarisasjonsfiltere stå i samme posisjon og sett inn et tredje fortsatt med lysmåler plassert så tett inntil en spektrallampe som mulig. Det første filteret innstilles på 0° , det tredje på 90° og det andre på en vinkel θ forskjellig fra 0° og 90° .

- Hvordan vil illuminansen som registreres av lysmåleren variere med θ ? Sammenlign målinger med teoretiske verdier ved å plote begge i samme plott (E mot $(\theta_3 - \theta_2)$).

B. Refleksjon som polarisering

I "Physics of Oscillations and Waves", kapittel 10.3.5 kan dere lese om Fresnel's ligninger, som beskriver refleksjon og transmisjon av lys når det brytes på en overflate mellom to medier med forskjellig refraktiv index. Brewsters vinkel er den spesielle verdien av innfallsvinkelen ved refleksjon av lys der kun lys som er fullstendig polarisert vinkelrett på innfallsplanet (kallet s-polarisert) reflekteres, mens lys som er fullstendig polarisert parallelt med innfallsplanet (kallet p-polarisert) vil ha null refleksjon, bare transmisjon. I Brewsters vinkel er det reflekterte lys maksimalt polarisert.



Figur 2: Når vinkelen mellom reflektert og transmittert stråle er 90 grader, blir det ikke noe elektrisk felt parallelt med innfallsplanet i den reflekterte strålen. (Vistnes: Physics of Oscillations and Waves, Figur 10.6)

I følge Snells lov er $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$, med innfallsvinkelen θ_i og brytningsvinkelen θ_t . Brewsters vinkel θ_B er bestemt av at $\theta_i + \theta_t = \frac{\pi}{2}$.

Da vil $\sin \theta_t = \sin(\frac{\pi}{2} - \theta_B) = \cos \theta_B$ og Snells lov kan skrives $n_1 \sin \theta_B = n_2 \cos \theta_B$

Brewsters vinkel kan da finnes fra

$$\tan \theta_B = \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

Oppgave 3. Refleksjon av polarisert lys

Vi benytter et modifisert spektrometer, som illustrert i figur 7. Prismebordet er utstyrt med en spesiell mekanisme som sørger for at bordets dreievinkel er halvparten av lysintensitetsmålerens. Lysintensiteten og vinkelen avleses av to PASCO sensorer, som er koblet til en PC med programmet CAPSTONE installert. Ved riktig orientering av prismet vil lys fra laseren reflekteres fra en av prismets sideflater slik at det kan observeres av lysintensitetsmåleren for vilkårlig valg av innfallsvinkel. Et polarisasjonsfilter er montert mellom laseren og prismet.

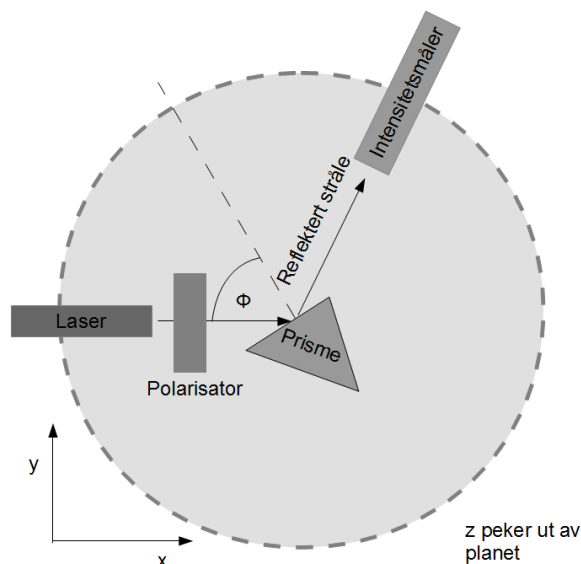
1. Innstill polarisatorens transmisjonsretning slik at lyset fra laseren blir polarisert vinkelrett på innfallsplanet (s-polarisert). I følge Fresnels likninger for refleksjon av polarisert lys, skal den reflekterte strålens intensitet øke jevnt når innfallsvinkelen ϕ varierer fra 0° . Start programmet og beveg lysmåleren fra minst mulige vinkel til ca 180° . Intensitetsmåleren skal være stilt slik at gain = 1.

- Plott intensiteten (i %) mot ϕ
2. Innstill polarisatorens transmisjonsretning slik at lyset fra laseren blir polarisert parallelt med innfallsplanet (p-polarisert). I følge Fresnels likninger skal den reflekterte strålens intensitet forsvinne når innfallsvinkelen ϕ er lik den såkalte polarisasjonsvinkelen ϕ_P som er gitt ved $\tan \phi_P = n$, der n er brytningsindeksen til prismeglasset. Dette er Brewsters lov. Forsøk å bestemme n ved å finne den vinkelen ϕ som gir lavest lysintensitet. For å få et godt definert bunnpunktet stilles gain = 10 på intensitetsmåleren, hvor signalet forsterkes.

- Plott intensiteten (i %) mot ϕ
- Hva blir Brewstervinklen?
- Finn brytningsindeksen til prismet?

3. Finn transmisjonsretningen til polaroidbriller. Legg en bit polariseringsfilter på en lyskilde, med kjent polarisasjonsretning. Brillene roteres over oppsettet for å undersøke hvilken retning som gir minimums intensitet.

- Begrunn produsentens valg av transmisjonsretning



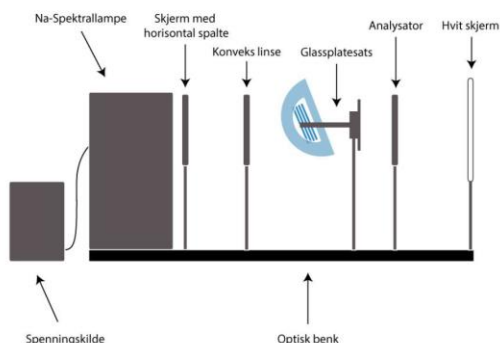
Figur 7: Oppsettet brukt i oppgave 3: modifisert spektrometer. I stedet for å måle det spredte lyset, måler vi heller den reflekterte strålen.

Oppgave 4. Polarisasjon med glassplater

Følgende komponenter plasseres på den optiske benken:

- en spektrallampe
- en skjerm med horisontal spalte
- en konveks linse
- en glassplatesats
- en analysator

- en hvit skjerm eller mattskive



Figur 8: Forsøksoppstilling til oppgave 4 (tegning av Jonas Asperud).

I oppgave 3 målte vi på den reflekterte delen av lyset. Nå skal vi måle på den transmitterte delen. Avstanden mellom komponentene velges slik at spalten avbildes skarpt på den hvite skjermen.

1. La platesatsen stå vertikalt.
 - Undersøk om illuminansen på den hvite skjermen varierer når analysatoren roteres.
2. Velg platesatsens orientering slik at lysets innfallsvinkel blir lik $\arctan n$, der n er brytningsindeksen til glasset i platene.
 - Undersøk om illuminansen på den hvite skjermen varierer når analysatoren roteres.
 - Hva er årsaken til at lyset som går gjennom platesatsen blir delvis polarisert?

C. Lineær og sirkulær polarisasjon

Vi ser først på en plan lineær polarisert elektromagnetisk bølge som beveger seg i z -retning. Polarisingen ligger i et plan mellom xz -planet og yz -planet. Vi kan da si at $E_x(t)$ og $E_y(t)$ varierer i takt, eller “i fase”. Matematisk kan vi beskrive bølgen, hvor $\omega = 2\pi\nu$ er vinkelfrekvensen og $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ er vinkel-bølgetallet, slik:

$$\vec{E} = E_x \cos(kz - \omega t)\vec{i} + E_y \cos(kz - \omega t)\vec{j}. \quad (3)$$

Dersom vi kan faseforskyve $E_x(t)$ med $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$ i forhold til $E_y(t)$, og amplitudene er like store, vil vi få sirkulær polarisering som følger en skrulinje som på en vanlig skrue. Vi sier da at vi har en høyredreid sirkulær polarisering hvis polariseringsskrulinjen følger fingrene på høyre hånda når vi griper om aksene som angir bølgens bevegelsesretning med tommelen i denne retningen. Dersom vi derimot faseforskyver $E_x(t)$ med $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$ i forhold til $E_y(t)$, er polariseringen venstredreid sirkulær. Matematisk kan vi beskrive en venstredreid sirkulært polarisert bølge slik:

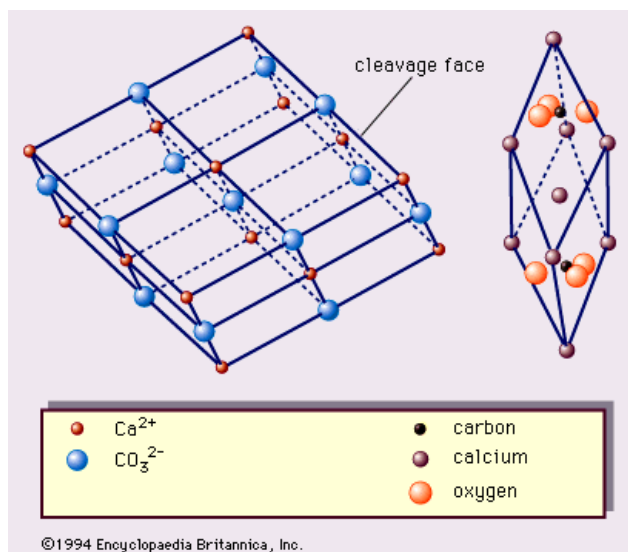
$$\vec{E} = E_x \cos(kz - \omega t)\vec{i} + E_y \sin(kz - \omega t)\vec{j} \quad (4)$$

hvor $E_x = E_y$.

Man kan altså endre fra lineær til sirkulær polarisering ved å faseforskyve $E_y(t)$ i forhold til $E_x(t)$ med $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$. Det tilsvarer å forsinke $E_y(t)$ i forhold til $E_x(t)$ så $\omega\Delta t = \frac{\pi}{2}$, som gir $\Delta t = \frac{\pi}{2\omega} = \frac{1}{4\nu} = \frac{T}{4}$, hvor T er periodetiden. Senere i øvelsen skal vi bruke en kalsittkrystall til å bryte lyset i 2 deler (se figur 4). Her skal vi bruke z -komponenten (dvs lengden lyset tilbakelegger, som bestemmes av hastigheten og dermed brytningsindeksen) til å faseforskyve. For å få sirkulær polarisering må da $k\Delta z = \frac{\pi}{2}$, som gir $\Delta z = \frac{\lambda}{4}$.

D. Kalsittkrystallens struktur

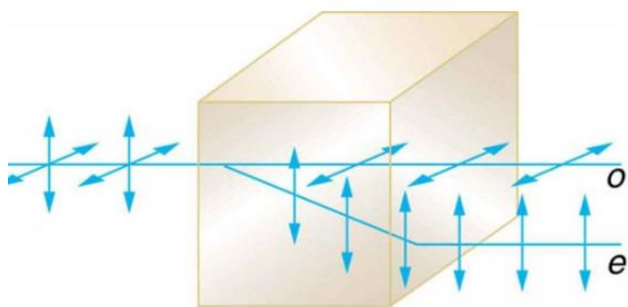
I laboratoriet finnes det en modell som viser kalsittkrystallens struktur (Figur 3). Kalsiumionene er representert ved aluminiumsfargede kuler. Karbonatomene og oksygenatomene er representert ved henholdsvis svarte og røde kuler. Vi legger merke til at de tre oksygenatomene i hver CO_3 -gruppe danner en likesidet trekant. Gruppens karbonatom ligger i skjæringspunktet for normalene fra hjørnene til de motstående sidene. Vi legger merke til at atomene i samtlige CO_3 -grupper, “de flate radikaler”, ligger i parallelle, ekvidistante plan. Retningen vinkelrett på disse planene kalles krystallens optiske akse.



Figur 3. Skjematiske fremstilling av kalsittkrystallens struktur.

A. Brytning og forsinkelsesplater

En av metodene til å polarisere lys er bryting i en krystall. I øvelsen skal vi bruke bryting i en kalsittkrystall. Kalsittkrystaller har den egenskap at de er *birefringente* (dobbeltbrytende), det vil si at brytningsindeksen (n) avhenger av lysets polarisasjon. Det resulterer i at lys blir splittet opp i to stråler med forskjellig lineær polarisasjon vinkelrett på hverandre og med forskjellig retning (se figur 4). Den ene har polarisasjon vinkelrett på den optiske akse til krystallen og kalles den ordinære stråle fordi den følger Snells lov. Den andre har polarisasjon parallelt med den optiske akse og kalles den ekstraordinære stråle fordi den ikke følger Snells lov. For kalsitt er $n_o = 1,6583$ og $n_e = 1,4864$.



Figur 4 Birefringente materialer, som kalsitt splitter upolarisert lys i to. Den ordinære stråle (o) oppfører seg

normalt, mens den ekstraordinære (e) ikke følger Snells lov.

Vi tenker oss nå at vi skjærer ut en tynn plate (forsinkelsesplate) med tykkelse d fra en kalsittkrystall slik at snittflatene er parallelle med krystallens optiske akse. Vi benytter en optisk benk med en natriumlampe som gir tilnærmet monokromatisk lys med bølgelengde $\lambda = 589 \text{ nm}$ i luft, en irisblender, en konveks linse, en polarisator og en hvit skjerm (se figur 9). Så setter vi inn kalsittplaten til høyre for polarisatoren. Platen stilles slik at dens optiske akse blir vertikal. Hvis nå polarisatorens transmisjonsretning stilles vertikalt (0°), vil en ekstraordinær bølge forplante seg gjennom krystallen. I denne er den elektriske vektoren parallell med den optiske akse, og lysets bølgelengde inne i krystallen er λ/n_e . Stilles polarisatoren på 90° , forplanter en ordinær bølge seg gjennom krystallen. Den elektriske vektoren står vinkelrett på den optiske akse og bølgelengden for lyset inne i krystallen er λ/n_o . Inne i krystallen har derfor den ekstraordinære bølgen større hastighet enn den ordinære. Hvis polarisatorvinkelen stilles på en verdi som er forskjellig fra 0° og 90° , vil to bølger forplante seg gjennom krystallen. La oss velge polarisatorvinkelen lik 45° og se bort fra at noe lys reflekteres fra krystallens forside. Da vil amplitudene til de to bølgene være omtrent like. Siden de to bølgene har forskjellige hastigheter, vil de være faseforskjøvet i forhold til hverandre når de kommer ut av krystallen. Den ordinære bølgen vil være forsinket i forhold til den ekstraordinære. Faseforskjellen er

$$\Delta\phi = \frac{2\pi d}{\lambda}(n_o - n_e) \quad (5)$$

Hvis tykkelsen d tilpasses slik at $\Delta\phi = \pi$, vil den elektriske vektoren i bølgen som kommer ut fra platen være rotert 90° i forhold til den elektriske vektoren i lyset som går inn i krystallen (når polarisatoren er innstilt på 45°). Dette kan kontrolleres ved hjelp av en analysator som plasseres til høyre for kalsittplaten. Tykkelsen d må være lik

$$\frac{\lambda}{2(n_o - n_e)} = 1,71 \mu\text{m}$$

Hvis krystallens tykkelse er halvparten av denne verdien, får vi en faseforskjell på $\pi/2$ mellom

strålene. Platen kalles i dette tilfelle for en $\lambda/4$ -plate, og lyset som kommer ut fra krystallen er sirkulært polarisert.

Oppgave 5. Dobbeltbrytning i kalsitt

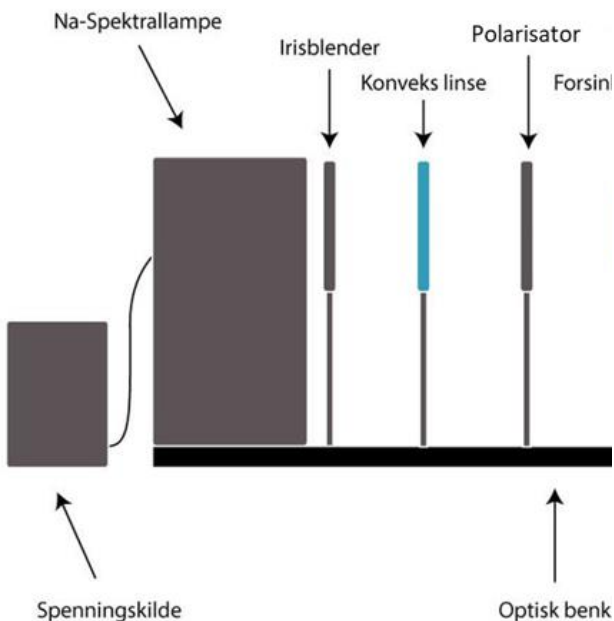
En kalsittkrystall som er skåret slik at den har to parallelle sider vinkelrett på den optiske akse, legges på en tekstsider. Betrakt teksten gjennom krystallen slik at siktelinjen er parallell med den optiske akse.

- Beskriv ditt inntrykk av bokstavene i teksten.

Strålen som danner de bokstaver som ligger stille er den ordinære, den som flyttes når vi dreier krystallen kalles ekstraordinær.

- Hvordan de to strålene er polarisert. Legg merke til at krystallens optiske akse er parallell med planet gjennom de to strålene som kommer ut av krystallen.

Oppgave 6. Sirkulært polarisert lys



Figur 9 oppsettet til eksperimentet i laboppgave 6 og 7.
(Tegning av Jonas Asperud)

Polarisatoren stilles på 0° . Analysatoren stilles på 90° . Mellom de to polarisasjonsfiltrene plasseres en $\lambda/4$ -plate (for $\lambda = 550 \text{ nm}$) som dreies til illuminansen på skjermen er minimal (se figur 9). Retningen på den optiske akse til forsinkelsesplaten er nå enten 0° eller 90° . Så stilles polarisatoren på 45° . Lyset som kommer ut fra $\lambda/4$ -platen er nå sirkulært polarisert. Drei analysatoren og observer illuminansen på skjermen.

Oppgave 7. Rotasjon av polarisasjonsretningen

Kombinasjon av to $\lambda/4$ -plater gir en $\lambda/2$ -plate. Retningene på $\lambda/4$ -platenes optiske akser er ikke avmerket, men ved å prøve deg frem kan du oppnå en rotasjon av \vec{E} på 90° .