

Demonstrasjoner i optikk

Bruk av nyere teknologi for å synliggjøre
optikk ved hjelp av demonstrasjoner

Øystein Utsogn

Lektorutdanning med master i realfag

Innlevert: Mai 2012

Hovedveileder: Morten Kildemo, IFY

Medveileder: Jon Andreas Støvneng, IFY
Berit Bungum, IFY

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for fysikk

Sammendrag

Denne oppgaven prøver å svare på hvordan nyere teknologi kan brukes til å forbedre læringsutbyttet for studentene i optikk. Dette er en oppgave som både tar for seg teorien bak og gjennomføringen av tre demonstrasjoner og en innføring i dataprogrammet LightTools. De tre demonstrasjonene tar for seg tre tema innen optikk; spektroskopi, polarisering og Fourieroptikk.

De fire oppleggene som er lagd har alle blitt gjennomført i emnet TFY4195 Optikk ved NTNU som et tilskudd til laboratorieøvingene og regneøvingene. Studentene som har deltatt har i etterkant vurdert sine egne erfaringer fra oppleggene, og disse erfaringene er brukt til å diskutere hvordan oppleggene har fungert. De tre veilederne som gjennomførte demonstrasjonene har også kommet med sine kommentarer, og har også blitt benyttet for å få enda en synsvinkel i forhold til gjennomføringen. Det hele er også sett på i forhold til didaktisk teori, og både arbeidet med veiledningsdokumenter og diskusjonen av gjennomføringen i etterkant er preget av hva som er gjort tidligere av demonstrasjoner og forskning på området. Fysikkteorien i oppgaven er brukt til å lage et bakteppe for de fire oppleggene, og dekker alt det som oppleggene omhandler. Denne teorien går dypere enn det som benyttes i gjennomføringen av planene.

Kommentarer fra studenter og veiledere etter oppleggene tyder på at demonstrasjonene har fungert både til å fremme læring og skape interesse. Studentene virker fornøyde med oppleggene og svarer at de har stor tro på demonstrasjoner som læringsprosess i optikk. LightTools-øvingen hadde større motforestillinger, og resultatene viser at en slik øving krever mer bearbeiding for at dette opplegget skal bli like suksessfylt som de tre demonstrasjonene. Generelt ser det ut til at små grupper og stor studentaktivitet er to viktige faktorer for å skape interesse og fremme læring. Det er også viktig å være tydelig på målene med demonstrasjonen og hva man ønsker å oppnå og vise studentene.

Abstract

This master thesis is discussing how new technology can be used to enhance student learning in Optics. The report covers the theory, guidance and execution of three demonstrations and a student introduction to LightTools, a computer software for simulations in optics. The three demonstrations covers three different topics within optics; spectroscopy, polarization and Fourier optics.

The four plans have all been executed for the students taking the subject Optics at NTNU. These plans were made as a supplement for the already existing tutorials and laboratory assignments. The students participating in the demonstrations were asked to submit their comments and these comments were used to validate the demonstrations developed in this thesis. Every demonstration had different supervisors, and their comments have also been used to discuss the progress and execution of the plans. Educational theory has also been used, to have a theoretical approach both for the development and implementation of the demonstrations, and for the discussion. The optic theory presented in this report is meant as a background for the demonstrations. It is also going deeper into the theory then what is needed for the completion of the demonstrations.

The comments after the demonstrations have been positive, and it seems like demonstrations are a good way to promote learning and generate interest. Three demonstration guides are made, that are available for later use, and also some comments are added for further improvement. The student introduction to LightTools was not that successful, and more work would be needed to make this assignment worthwhile for the students. In general it seems like small groups and student activity are important factors to have successful demonstrations, and a good plan with clear goals is important.

Forord

Denne masteroppgaven avslutter en femårig utdannelse ved Lektorutdanning i realfag. Oppgaven er en hybrid, med en fysikkfaglig og en fagdidaktisk innfallsvinkel. Dette ble valgt både for å utnytte mine egenskaper og fordi jeg selv synes det er moro og viktig med både god faglig kunnskap og evne til å formidle det når jeg snart skal ut i verden som lektor. Skriveprosessen har gått over to semestre, høsten 2011 og våren 2012, og jeg har samtidig tatt fag ved siden av for å bygge opp under mine egne teorikunnskaper. Alt av gjennomføringer er gjort i det andre semesteret, altså våren 2012.

Hele arbeidet med oppgaven, demonstrasjonene og LightTools har vært en eneste stor læringsprosess for meg. Jeg har flere ganger stagnert, slitt med å komme med gode ideer og hatt problemer med å komme videre. Det har alltid løsnet til slutt, og de siste månedene har alt arbeidet virkelig båret frukter. Utallige timer er brukt med utstyret, med både morsomme stunder når ting endelig fungerer og frustrerende dager når alt ser ut til å gå i vasken. Nå er endelig teorien bak utstyret klart for meg, og jeg føler meg trygg på det jeg har skrevet om. Nå skulle jeg gjerne hatt enda flere timer på å leke med og utforske det utstyret som er brukt i denne oppgaven. Læringsprosessen har til tider gått sakte, men det er også noe som har virket typisk for fagfeltet. Det krever noen timer med stanging mot en artikkel for å skjønne at de bruker en annen retningskonvensjon enn annen litteratur, eller at litteraturen har kommet frem til riktig svar med utregninger som helt klart ikke kan være riktige.

Med litt hjelp både herfra og derfra har dette allikevel løst seg, og de som skal takkes er tre unge fysikere og tre enda yngre fysikere. De tre unge fysikerne er mine veiledere, Morten Kildemo, Berit Bungum og Jon Andreas Støvneng, som har vært behjelpelige med ideer, forslag og kritikk, og det har vært åpne dører for å komme innom for god veiledning. I tillegg har to stipendiater og avdelingsingeniøren ved optikk hjulpet meg med både gode ideer, klargjøring og forståelse av utstyret og gjennomføring av selve demonstrasjonene. Lars Martin Sandvik Aas, Pål Gunnar Ellingsen og Daniel Skåre fortjener alle tre en stor takk. Dere har alle tre bidratt til at demonstrasjonene har blitt så gode som de har blitt. Helt til slutt vil jeg gi en ekstra takk til Morten Kildemo, som ga meg muligheten og kom opp med ideen til denne oppgaven.

Innhold

1	Innledning	1
1.1	Introduksjon	1
1.2	Metode for evaluering	3
2	Teori	4
2.1	Polarisering	4
2.1.1	Stokes-formalisme	5
2.1.2	Jones-formalisme	11
2.1.3	Retningskonvensjoner	14
2.2	Flytende krystaller	17
2.3	Fourieroptikk	21
2.3.1	Diffraksjon	21
2.3.2	Fresneldiffraksjon	23
2.3.3	Fraunhoferdiffraksjon	24
2.3.4	Fouriertransform med linse	25
2.3.5	Filtrering i Fourierplanet	26
2.3.6	Matematisk innblikk	26
2.4	Spektroskopi	29
2.5	LightTools	33
2.6	Demonstrasjoner fra et didaktisk perspektiv	34
2.6.1	Optikk - teknologi eller naturvitenskap?	34
2.6.2	Hvorfor eksperimentelt arbeid i fysikkundervisningen?	35
2.6.3	Demonstrasjoner	36
3	Demonstrasjoner	40
3.1	Utstyr	40
3.1.1	Liquid Crystal Variable Retarder	40
3.1.2	Spatial Light Modulator	41
3.1.3	USB-spektrometer	42
3.2	Spektroskopidemonstrasjon	44
3.2.1	Utstyr	44
3.2.2	Oppsett	44
3.2.3	Mål	44
3.2.4	Gjennomføring	45
3.3	Polarisasjonsdemonstrasjon	48
3.3.1	Utstyr	48
3.3.2	Oppsett	48
3.3.3	Mål	48
3.3.4	Gjennomføring	49

3.4	Demonstrasjon med SLM og Fourieroptikk	51
3.4.1	Utstyr	51
3.4.2	Oppsett	51
3.4.3	Mål	51
3.4.4	Gjennomføring	52
3.5	LightTools	54
3.5.1	Utstyr	54
3.5.2	Mål	54
3.5.3	Gjennomføring	54
4	Resultater med diskusjon	56
4.1	Introduksjon	56
4.2	Studentsitater	57
4.3	Diagrammer	58
4.4	Spektrometerets glansdag	66
4.5	Polarisering til nye høyder	68
4.6	Et synlig Fourierplan	71
4.7	Et program til besvær	74
5	Avslutning	77
5.1	Anbefalinger	77
5.2	Konklusjon	78
6	Vedlegg	82
6.1	Fourierteoremer	82
6.2	Spørsmål og svar	84
6.2.1	Spørsmål stilt til veiledere	84
6.2.2	Spørsmål stilt til studentene	84
6.2.3	Øvingsoppgave for LightTools	86
6.2.4	Svar fra studentene om demonstrasjonene	87
6.2.5	Studentkommentarer om LightTools	89

1 Innledning

1.1 Introduksjon

I denne oppgaven er det satt fokus på hvordan ny teknologi i optikk kan brukes i demonstrasjoner. Teorien bak de forskjellige instrumentene og demonstrasjonene er lagt frem, som et bakteppe for utviklingen av demonstrasjonene. Det hele er også sett på med et didaktisk blikk, og både demonstrasjonens veiledere og deltakere har bidratt med å gjøre denne oppgaven til det den er. Tanken med oppgaven var å utnytte nytt utstyr som var kjøpt inn nylig. I tillegg til utstyret ble også to lisenser kjøpt inn, begge ment for både studenter og personale. Det ene programmet, LightTools, ble inkludert i utviklingsprosessen av opplegg for optikkfaget ved NTNU, mens det andre programmet, Code V, ble ikke tatt med. Alt opplegget er gjennomført i TFY4195 Optikk, et tredjeårsemne for studenter ved NTNU, som av og til følges av internasjonale mastergradsstudenter. Anbefalte forkunnskaper til faget er TFY4160 Bølgefysikk eller lignende kunnskap. De som tar faget kommer fra flere forskjellige studieretninger, men de fleste er tredjeårs fysikkstudenter.

En oppgave som denne ser ut til å være en av få av sitt slag. En vanlig masteroppgave innen realfag tar enten for seg det didaktiske eller det fysikkteoretiske. Denne oppgaven har en fot i begge leire, og gir dermed et unikt perspektiv på læring ved bruk av nye metoder i høyere utdanning. Det finnes mye litteratur innen fysikkdidaktikk rundt eksperimentelt arbeid, som i [1], men lite som har fokuset sitt på høyere utdanning. Tilsvarende finnes det flere forslag til demonstrasjoner i litteraturen, som i [2], men dette er sjeldent begrunnet fra et didaktisk ståsted. I denne oppgaven blir dermed to verdener koblet sammen, og erfaringer og teori fra begge sider blir brukt for å skape det fulle bildet og gjøre demonstrasjonene og dataøvingen så bra som mulig.

Demonstrasjoner er en av flere metoder som kan brukes for å gjennomføre eksperimentelt arbeid. Det kan også se ut til å være en populær læringsform, og kommentarer fra de ansvarlige for optikkklubben, samt teorien [1], bygger opp under dette. Tanken med oppgaven var å videreutvikle de gode erfaringene, og bygge på det som allerede var gjort for å lage demonstrasjoner som også kan brukes senere. LightTools ble også inkludert i faget, noe som aldri var gjort tidligere, og det var ingen med tidligere erfaring med programmet. Samlet sett prøver denne oppgaven å svare på følgende spørsmål:

Hvordan kan bruk av nyere teknologi forbedre læringsutbyttet for studentene i optikk?

Dette kan videre deles opp i:

- Hvordan bruke demonstrasjoner til å vise nyere teknologi i optikk?
- Hvordan kan en optisk programvare brukes til å hjelpe studentene med å visualisere og bedre forstå optikk?

Første del av oppgaven, kapittel 2, tar for seg teorien rundt utstyret, og ser også på teorien bak det som skal gjennomføres i demonstrasjonene. Det starter med en introduksjon til polarisering i delkapittel 2.1, som er bakteppet for polarisasjonsdemonstrasjonen. Her trekkes det frem flere mulige måter å beskrive polarisert lys på, og retningskonvensjoner, noe som varierer mye innen polarisasjonsteori, blir også presentert. I delkapittel 2.2 forklares det hvordan flytende krystaller kan brukes til å modulere lys. Dette er viktig for å forklare SLM-en og LCVR-en, som brukes i to av demonstrasjonene, og denne nye teknologien introduseres i denne delen. Neste teoridel, delkapittel 2.3, går inn i Fourieroptikken og forklarer det som skjer i demonstrasjonen med SLM og Fourieroptikk. Så kommer delkapittel 2.4 om spektroskopi, som er bakgrunnen til spektroskopidemonstrasjonen. Delkapittel 2.5 er dedikert til programvaren LightTools, og tar for seg hvordan programmet fungerer og noe av optikken programmet benytter. Den siste delen i teorikapittelet, delkapittel 2.6, handler om didaktisk teori. Her trekkes det frem spesielle sider ved optikken, hvorfor man i det hele tatt driver med eksperimentelt arbeid i undervisning og til slutt hvordan demonstrasjoner burde gjennomføres fra en didaktikers synspunkt.

Etter teorikapittelet følger kapittel 3 med veiledningsdokumenter til de tre demonstrasjonene og LightTools-øvingen. Her blir utstyr presentert med enkle skisser for hvordan det skal settes opp. Mål for oppleggene er også spesifisert, i tillegg til at leseren ledes gjennom det som er planlagt og hvordan de skal gjennomføres. I kapittel 4 følger de viktigste resultatene fra spørreundersøkelsene etter demonstrasjonene. De resterende svarene er med som vedlegg. Dette kapittelet inneholder også diskusjon rundt det som er gjennomført. Dette gjøres for ett og ett opplegg, før det avsluttes i kapittel 5. Her trekkes det ut noen anbefalinger for andre som skal gjennomføre opplegget senere og til de som skulle ønske å gjøre noe lignende i andre fag.

Før oppgaven fortsetter kommer en kort metodedel. Dette er en vanlig og viktig bit av en didaktisk oppgave, men for mindre vektlegging i denne oppgaven siden fokuset er mer rettet mot selve utviklingen av oppleggene.

1.2 Metode for evaluering

Det er brukt tre forskjellige spørreskjema til studentene og et spørreskjema til labveilederne. Alle spørsmålene er lagt ved oppgaven. Studentenes spørreskjema ble gjennomført via læringsplattformen Itslearning, og hvert spørreskjema var knyttet til en demonstrasjon. Alle spørsmålene hadde mulighet for å ytteligere kommentere det man svarte. Spørsmålene ble gjort tilgjengelige for studentene kort tid etter at de første gruppene hadde gjennomført demonstrasjonene. Labveilederne svarte direkte på mail, etter å ha gjennomført sin veiledning.

2 Teori

2.1 Polarisering

Lys er elektromagnetiske bølger. For å beskrive slike bølger som beveger seg i ulike medier trenger man fire parametre, \vec{E} , \vec{D} , \vec{H} og \vec{B} [3], hvor alle fire er vektorer. \vec{E} er det elektriske feltet, \vec{D} er den elektriske forskyvningsvektoren, \vec{H} er det magnetiske feltet og \vec{B} er den magnetiske flukstettheten. Disse fire er koblet sammen ved Maxwells ligninger. I et hvert punkt på en elektromagnetisk bølge vil det elektriske feltet, det magnetiske feltet og energitransportens retning stå innbyrdes vinkelrett på hverandre. For å beskrive retningen til en elektromagnetisk bølge trenger man dermed bare å ta med \vec{E} , andre retninger man trenger kan finnes fra det [4]. Retningen til E -feltet har fått sitt eget navn, nemlig polariseringen til bølgen. Dette valget er gjort fordi E -feltet påvirker materialets elektroner mye kraftigere enn H -feltet [3]. Allikevel bruker man i visse tilfeller det magnetiske feltet som referanse, ved å kalle x -polarisert lys for elektrisk transversalpolarisert (TE) og y -polarisert lys for magnetisk transversalpolarisert (TM). Flere andre måter å beskrive dette på finnes, og det er også mange forskjellige konvensjoner for retninger og fortegn. Valgene gjort i denne oppgaven trekkes frem i siste del om polarisering, delkapittel 2.1.3.

Mennesker har vanskelig for å skille mellom polarisert og upolarisert lys. Noen dyr har derimot mulighet til å se slike forskjeller, og blant annet bier bruker polarisering som et hjelpemiddel ved navigering [3]. Selv om mennesket ikke direkte kan observere polarisering, kan vi se og måle mange av effektene ved polarisering. Polaroider solbriller er et typisk hverdagsseksempel, hvor brillene er lagd slik at de skal stoppe lyset som reflekteres fra vannrette flater [5] ¹. Polarisering brukes også i forskjellige medisinske apparater [7], og det spiller en viktig rolle når lys reflekteres og transmitteres i materie [6]. Andre deler av industrien bruker også polarisering, og en stor del av dette handler om å bruke polarisert lys til noe som kalles ”*photoelastic stress analysis*” [3]. Denne metoden går ut på at man lager en modell av mekaniske deler for å finne svake punkter og knutepunkter hvor det blir veldig høy spenning. Modellen lages i en gjennomsiktig type plastikk som forandrer optiske egenskaper når den blir utsatt for mekanisk spenning. Modellen blir lagt mellom kryssede polarisatorer. Uspente områder forblir mørke, mens områder med spenning vil forandre polariseringen til lys slik at lyset kommer gjennom. Dette bygger på en av de enkleste og første sammenhengene man møter på når man kommer til polarisering, nemlig Malus’ lov. Denne loven

¹Her utnyttet at ved vinkel lik Brewsters vinkel, θ_B , er det kun horisontalt polarisert lys som reflekteres, og denne effekten er også tydelig i vinklene rundt Brewsters vinkel [6].

gir en sammenheng mellom hvor mye intensitet som kommer gjennom en polarisator, altså en gjennstand som forandrer retningen til E-feltet, i forhold til det som maksimalt kan komme gjennom. Selve uttrykket ser slik ut:

$$I = I_0 \cos^2 \phi. \quad (1)$$

Her er I den tidsmidlede intensiteten² som transmitteres gjennom polarisatoren, I_0 er den maksimale intensiteten, og ϕ er vinkelen mellom polariseringen til det innkommende lyset og retningen til polarisatoren. Loven brukes mest i forbindelse med lineært polarisert lys, som i tilfellet med fotoelastisk spenning og når det kommer til polaroide solbriller.

Fullstendig upolarisert lys kan ses på som en blanding av alle mulige polarisasjonsretninger. I utgangspunktet er nesten alt lys slik, og som nevnt over kan man gjøre forskjellige ting for å polarisere lyset eller utnytte at lyset allerede har fått en tydelig polarisasjon. Også spredning av lys, for eksempel i atmosfæren, gir polarisert lys. I følge Rayleighs klassiske spredningslov blir alle upolariserte stråler polarisert når de spres [3].

Med så mange forskjellige bruksområder og så mange med interesse for polarisering er det nyttig med en måte å beskrive både polarisert og upolarisert lys. Det vil også være naturlig å etterspørre måter å beskrive polarisatorer og andre apparater som kan brukes for å påvirke polarisering. Matriser og vektorer er da mye brukt, og her skal to slike formalismer trekkes frem. Den ene bruker Jones-vektorer og Jones-matriser, den andre bruker Stokes-vektorer og Mueller-matriser.

Før disse to formalismene introduseres kan det være greit å nevne at i starten av denne oppgaven er hovedfokuset på planbølger, eller bølger der den paraksiale tilnærmingen brukes. Med slike transversale bølger kan man beskrive bølgene med samme polarisasjonsellipse over alt. Planbølgen blir dermed beskrevet av en enkel polarisasjonsellipse, og lyset er elliptisk polarisert. Hva denne ellipsen er blir beskrevet senere i oppgaven. Når det kommer til diffraksjon vil ikke planbølgeantagelsen lenger holde, så i avsnittene om Fourieroptikk og SLM må lyset ses på som kulebølger.

2.1.1 Stokes-formalisme

For å beskrive et generelt strålingsfelt trenger vi fire parametre; intensitet, polarisasjonsgrad, polarisasjonsplan og elliptisitet i alle punkt og i alle retninger [3]. Det å inkludere alle disse på en gang kan være vanskelig i et symmetrisk system. Stokes-formalismen er den muligheten som blir omtalt som *most convenient* [3], og kom i 1852. En klar fordel med Stokes-formalismen

² $I = |\langle \vec{S} \rangle|$, $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$, hvor S er Poyntings vektor.

er at den er koblet til et målingsskjema. Her brukes ideelle polarisatorer (som sender gjennom alt med samme polarisasjonsretning, sperrer alt annet), og målinger av den utgående intensiteten blir gjort ved forskjellige valg av polarisatorer. Total intensitet blir også målt, men det gjøres uten noen polarisatorer. Fire målinger blir gjort for å bestemme de fire Stokes-parametrene, med unntak av målingen som gjøres av den totale intensiteten. Tre målinger gjøres med lineære polarisatorer, ved 0° , 45° og 90° . Koordinatsystemet er hele tiden låst i forhold til propageringsretningen. Siste måling som gjøres er med en sirkulær polarisator. Ved å bruke disse fire målingene kan man bestemme Stokes-parametrene S_0 , S_1 , S_2 og S_3 .

For å vise hvordan disse henger sammen med det elektriske feltet, og for å få introdusert litt av den vanlige notasjonen i forhold til elektromagnetiske felt og polarisering, gjennomfører vi her et eksempel. Dette eksempelet følger delvis den velkjente fysikeren Chandrasekhars arbeid fra 1960 som gjennomføres i ”*Polarized Light in Liquid Crystals and Polymers*” [3], men det blir her gjort visse justeringer for å følge oppgavens retningskonvensjoner (se delkapittel 2.1.3). Vi antar at vi har en transversal bølge og et isotropt materiale, og vi antar at propageringsretningen er kjent og er langs z -aksen ($\hat{k} = \hat{z}$, med k som bølgevektoren og \hat{z} betyr at det er enhetsvektorer). Det elektriske feltet har dermed to komponenter som kan skrives som (følger Hauge et al. [8] sine konvensjoner, se delkapittel 2.1.3)

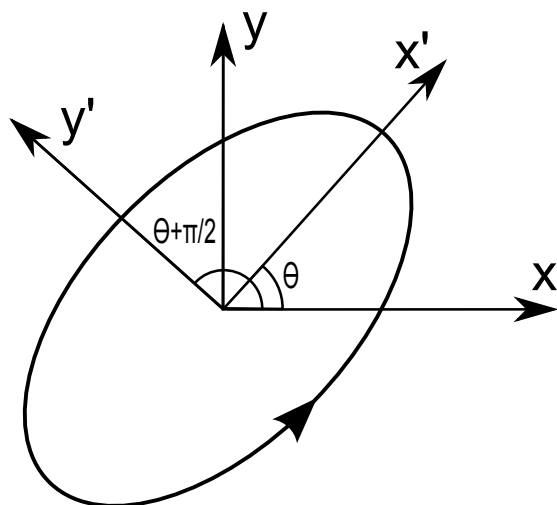
$$E_x = E_{x0} \cos(\omega t + \delta_x) \text{ og } E_y = E_{y0} \cos(\omega t + \delta_y), \quad (2)$$

hvor E_x og E_y er løsninger til bølgeligningen for det elektriske feltet når propageringsretningen er i z -retning. Bølgeligningen kan utledes direkte fra Maxwells ligninger og har følgende form i et lineært, ikke-dispersivt, homogent og isotropt medium [6]:

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0. \quad (3)$$

De to funksjonene er komponentene til E -feltet i x - og y -retning, som begge står vinkelrett på propageringsretningen \hat{z} og hvor vi ser på tilfellet at $z=0$. Her er ω vinkelfrekvensen, E_{x0} og E_{y0} er amplituder som er konstante, og δ_x og δ_y er konstante faser. For å komme videre herfra vil det være nyttig å beskrive bølgen uten de to fasene. To bedre vinkler å bruke for å beskrive feltet som varierer vil være rotasjonsvinkelen θ og vinkelen ϵ som beskriver elliptisiteten. Her er θ definert som vinkelen mellom x -aksen og den store halvaksen på polarisasjonsellipsen når man beveger seg mot klokka, se figur 1.

Vinkelen ϵ , se figur 2, kalles eksentrisiteten. Fortegnet til ϵ kan brukes til



Figur 1: Polarisasjonsellipse som viser vinkelen θ .

å bestemme retningen på polarisasjonen [8]. Ved positiv ϵ er det et høyrehåndssystem, altså den instantane E -feltvektoren roterer med klokka for en som ser inn i kilden. Vinkelen blir definert som vinkelen mellom store og lille halvakse i polarisasjonsellipsen, se figur 2. I tillegg er vinkelen begrenset til å ligge mellom 0° og 45° . Ved 45° og -45° vil det være sirkulærpolarisert lys, henholdsvis høyrehånds- og venstrehåndsrettet. 0° gir lineærpolarisert lys, hvor θ vil bestemme retningen. Alle andre vinkler vil gi elliptisk polarisert lys.

For å få inn disse to vinklene brukes følgende omskrivninger (hentet og omskrevet til oppgavens konvensjoner fra Scharf [3]):

$$E_{x0} = E_0 \sqrt{\cos^2 \epsilon \cos^2 \theta + \sin^2 \epsilon \sin^2 \theta}, \quad (4)$$

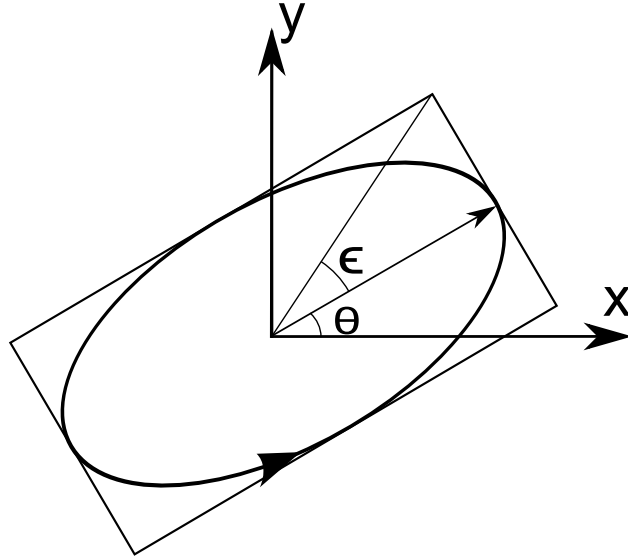
$$E_{y0} = E_0 \sqrt{\cos^2 \epsilon \sin^2 \theta + \sin^2 \epsilon \cos^2 \theta}. \quad (5)$$

Dette gir de to bølgene et felles konstantledd. For å bli kvitt fasene brukes følgende sammenheng:

$$\tan \delta_x = \tan \epsilon \tan \theta, \quad (6)$$

$$\tan \delta_y = \frac{\tan \epsilon}{\tan \theta}. \quad (7)$$

Settes dette sammen med ligning (2), ender man, etter en del trigonometriske omskrivninger, opp med



Figur 2: Polarisasjonsellipse som viser ϵ

$$\begin{aligned} E_x(t) &= E_0(\cos \epsilon \cos \theta \sin \omega t + \sin \epsilon \sin \theta \cos \omega t), \\ E_y(t) &= E_0(\cos \epsilon \sin \theta \sin \omega t - \sin \epsilon \cos \theta \cos \omega t). \end{aligned} \quad (8)$$

Her er δ -avhengigheten byttet ut med de to mer håndgripelige vinklene, som både kan finnes igjen ved å se på en polarisasjonsellipse og ved å se på Poincaré-sfæren i figur 3. En annen fordel med dette valget er at den totale intensiteten kun blir E_0^2 :

$$\begin{aligned} I &= E_{x0}^2 + E_{y0}^2, \\ &= E_0^2(\cos^2 \epsilon \cos^2 \theta + \sin^2 \epsilon \sin^2 \theta + \cos^2 \epsilon \sin^2 \theta + \sin^2 \epsilon \cos^2 \theta), \\ &= E_0^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Definisjonen for Stokes-parametrene er, ved bruk av notasjonen fra ligning (2), hentet fra Hauge et al. [8]:

$$S_0 \equiv \langle E_x E_x^* \rangle + \langle E_y E_y^* \rangle = E_{x0}^2 + E_{y0}^2, \quad (10)$$

$$S_1 \equiv \langle E_x E_x^* \rangle - \langle E_y E_y^* \rangle = E_{x0}^2 - E_{y0}^2, \quad (11)$$

$$S_2 \equiv 2 \operatorname{Re}\{\langle E_x^* E_y \rangle\} = 2E_{x0}E_{y0} \cos(\delta_y - \delta_x), \quad (12)$$

$$S_3 \equiv 2 \operatorname{Im}\{\langle E_x^* E_y \rangle\} = 2E_{x0}E_{y0} \sin(\delta_y - \delta_x). \quad (13)$$

Dette er parametrene som beskriver en elliptisk polarisert lysstråle. E^* betyr her at man tar den komplekskonjugerte av den komplekse verdien. Igjen vil det være naturlig å innføre vinklene ϵ og θ . Etter enda noen trigonometriske omskrivninger får man følgende uttrykk for de fire parametrene:

$$S_0 = E_0^2 = I, \quad (14)$$

$$S_1 = S_0 \cos 2\epsilon \cos 2\theta, \quad (15)$$

$$S_2 = S_0 \cos 2\epsilon \sin 2\theta, \quad (16)$$

$$S_3 = S_0 \sin 2\epsilon. \quad (17)$$

De fire Stokes-parametrene settes så sammen til en vektor som vil beskrive fullstendig polarisert lys. Dette er greit å ha i mange tilfeller, men noe som ofte også kan være vel så viktig er en måte å beskrive delvis polarisert lys. Da bruker vi en annen egenskap ved Stokes-parametrene ved totalt polarisert lys, nemlig at

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2. \quad (18)$$

Ut i fra denne ligningen ser vi at dette kan beskrives som en kule, med S_0 som radius til kula og de tre andre parametrene som akser, som vist i figur 3. Alle mulige polarisasjonstilstander for monokromatiske planbølger vil tilsvare et punkt på overflaten til sfæren. Samtidig vil vinklene θ og ϵ kunne finnes igjen på sfæren ved å benytte (15), (16) og (17):

$$\tan 2\theta = \frac{S_2}{S_1}, \quad (19)$$

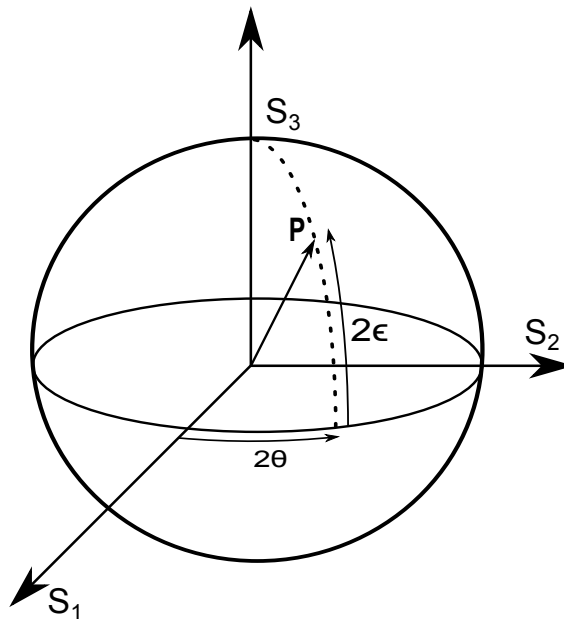
$$\sin 2\epsilon = \frac{S_3}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}. \quad (20)$$

Hvis man har delvis polarisert lys vil ikke lenger ligning (18) gjelde. Da innfører man gjerne en ny parameter, kalt polarisasjonsgraden p :

$$p = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (21)$$

Verdien av p er 1 for fullstendig polarisert lys og 0 for lys som er fullstendig upolarisert. Delvis polarisert lys vil dermed ha p -verdier mellom 0 og 1.

Delvis polarisert lys kan også illustreres ved bruk av Poincaré-sfæren. En delvis polarisert stråle vil kunne beskrives ved et punkt på innsiden av sfæren og vil ha koordinater $(S_1/S_0, S_2/S_0, S_3/S_0)$. Totalt upolarisert lys vil også



Figur 3: Poincaré-sfære med radius S_0 og punktet P avmerket

kunne beskrives ved hjelp av sfæren, og det vil være et punkt i midten. Altså vil et punkt som er nærmere overflaten være mer polarisert enn et punkt som ligger i nærheten av sentrum. En annen måte å se på upolarisert lys på vil være å se på det som en sum av Stokesvektorer som midles. Jo mer tilfeldige og ulokaliserte disse strålene er, desto mer upolarisert er lyset. Med stråler i alle retninger vil det midles til origo av sfæren, og man har dermed en ekstra metode for å illustrere totalt upolarisert lys.

Poincaré-sfæren er lett å lese av for å finne hovedtrekkene til lysets polarisasjon. Punkter på den nordlige halvkule tilsvarer rotasjon mot høyre, på sørlige halvkule er den mot venstre. Polene tilsvarer sirkulært polarisert lys, mens punkter langs ekvator er lineærpolarisert. Alt som ligger mellom er dermed mer eller mindre elliptisk polarisert. Dette gjør at en slik fremstilling også er veldig nyttig for å følge forandring i polarisasjon for en lysstråle.

I optikk er det også viktig å kunne beskrive legemer som lyset skal gjennom, og dette må kunne kombineres med hvordan lyset beskrives. Stokesformalismen, som benytter seg av en kolonnevektor med fire verdier, bruker Mueller-matriser for å beskrive legemer. Dette er 4×4 -matriser som består av reelle verdier, men har visse restriksjoner på hvordan de kan se ut for å beskrive et fysikalsk system.

2.1.2 Jones-formalisme

Hvis man kun jobber med totalt polarisert lys, og er interessert i å finne det elektromagnetiske feltet, finnes det enklere og mindre avanserte metoder for å beskrive polarisering enn Stokes-formalismen. Dette er ved bruk av Jones-vektorer og Jones-matriser. I motsetning til Stokes-formalismen er nå vektorer og matriser halvert i størrelse, altså trengs kun 2×2 -matriser og kolonnevektorer med to verdier. Det eneste vi nå er interessert i å se på er forholdet mellom fasene i x - og y -retning og forholdet mellom de to amplitudene, og antar fortsatt at bølgen propagerer i z -retning. Ved å bruke tilsvarende felt som i ligning (2), men med små omskrivninger og delvis følge Pedrotti [4]:

$$\vec{E} = E_x \hat{x} + E_y \hat{y}. \quad (22)$$

Ved å skrive om ligning (22) ved å bruke komplekse feltkomponenter får man følgende komplekse E -felt, \tilde{E} :

$$\tilde{E} = E_{x0} e^{i(-kz + \omega t + \delta_x)} \hat{x} + E_{y0} e^{i(-kz + \omega t + \delta_y)} \hat{y}. \quad (23)$$

Denne komplekse feltvektoren er en løsning av Helmholtz' ligning [6],

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0, \quad (24)$$

som er en variant av bølgeligningen i ligning (3). Helmholtz' ligning inneholder bølgetallet, som defineres som $k = \omega/c$, hvor c er lysets hastighet.

I det komplekse E -feltet kan $\exp(i(-kz + \omega t))$ trekkes ut som en felles faktor, og man står igjen med den komplekse amplituden:

$$\tilde{E}_0 = E_{0x} e^{i\delta_x} \hat{x} + E_{0y} e^{i\delta_y} \hat{y}. \quad (25)$$

Polariseringen bestemmes kun fra denne delen av det komplekse E -feltet, siden polariseringen bestemmes av forholdet mellom amplitudene og fasen til de to komponentene. Dermed skrives det hele på matriseform, og vi innfører Jones-vektoren:

$$\vec{J} \equiv \tilde{E}_0 = \begin{bmatrix} \tilde{E}_{x0} \\ \tilde{E}_{y0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{x0} e^{i\delta_x} \\ E_{y0} e^{i\delta_y} \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Det er vanlig å skrive om denne vektoren litt [3, 4, 6, 7] ved å innføre differansen mellom fasene, $\delta = \delta_y - \delta_x$. Forskjellige verdier av δ vil gi forskjellige polarisasjonsellipser og rotasjonsretning, mens de to amplitudene bestemmer hvor elliptisk polarisasjonen er. Overfor har vi sett helt bort fra at den

komplekse amplituden kan være bølgelengdeavhengig. Da vil det generelle uttrykket se slik ut:

$$\vec{J}(\omega) = \begin{bmatrix} E_{x0}(\omega)e^{i\delta_x(\omega)} \\ E_{y0}(\omega)e^{i\delta_y(\omega)} \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Som i Stokes-formalismen brukes en matrise til å beskrive polariserende legemer. De består av fire verdier og en generell Jones-matrise ser ut som følger:

$$\vec{M} = \begin{bmatrix} \tilde{a} & \tilde{b} \\ \tilde{c} & \tilde{d} \end{bmatrix}. \quad (28)$$

Her er alle komponentene komplekse størrelser. I hovedsak snakker vi om tre forskjellige typer matriser, og dermed tre hovedeffekter som et optisk legeme kan ha på en lysstråle. Det er snakk om lineære polarisatorer, faseretardatorer og rotatorer [4]. Lineære polarisatorer slipper bare gjennom lys med en spesiell polarisasjonsretning, slik at det lyset som kommer gjennom er lineært polarisert. En faseretardator, også kalt bølgeplate, forandrer δ slik at det for eksempel kan gå fra lineært til sirkulært polarisert lys. En rotator vil forandre på θ , vinkelen mellom x -aksen og polariseringsretningen som beskrevet tidligere, med en vinkel β . Som matriser vil de tre forskjellige typene kunne se slik ut [6]:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \text{lineært polarisert i } x\text{-retning}. \quad (29)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\Gamma} \end{bmatrix}, \quad \text{generell faseretardator, } \Gamma = \varepsilon_y - \varepsilon_x. \quad (30)$$

$$\begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}, \quad \text{rotator, hvor } \theta \rightarrow \theta + \beta. \quad (31)$$

For en faseretardator vil fortegnet i eksponentialfunksjonen bestemme hvilken komponent som blir forsinket i forhold til den andre. Med negativt fortegn er det y -aksen som forsinkes og med positivt fortegn er det x -aksen som forsinkes. Dette kan vises ved å se på det generelle tilfellet med polarisert lys gjennom en faseretardator:

$$\begin{aligned} \vec{J}_{ut} &= \vec{M}_{ret} \cdot \vec{J}_{inn}, \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{\pm i\Gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y e^{i\delta} \end{bmatrix}, \\ &= \begin{bmatrix} A_x \\ A_y e^{i(\delta \pm \Gamma)} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (32)$$

Da ser man at fasen er det eneste som endres, og fortegnet bestemmer om y -komponenten forskyves fremover eller bakover. En klar fordel ved å bruke slike vektor- og matrisefremstillinger er at det er veldig enkelt å ta hensyn til flere objekter etter hverandre. Med mange elementer kan man bare sette dem opp i motsatt rekkefølge, hvor selve lyskilden, altså Jones-vektoren, står sist. Det vil da også være mulig å lage en egen systemmatrise, som kan inneholde en eller flere av effektene som er nevnt over.

Et mer konkret eksempel kan også hjelpe med å klargjøre Jones-formalismen. I dette eksempelet skal vi gå fra upolarisert lys til sirkulært polarisert lys. Upolarisert lys sendes først gjennom en lineærpolarisator med en vinkel på 45 grader i forhold til x -aksen og så gjennom en kvartbølgeplate. Kvartbølgeplaten har sin trege akse langs x -aksen. Siden Jones-formalismen ikke har noen god måte å beskrive upolarisert lys, bruker vi heller Jones-vektoren som følger etter den lineære polarisatoren som kilde. Vektorer og matriser er hentet fra litteratur på området ([4] og [6]), men modifisert for å følge oppgavens retningskonvensjoner, og vi har fjernet alle felles konstanter siden de ikke er av interesse for selve formen:

$$\begin{aligned}
 \vec{J} &= \vec{M}_{qp} \cdot \vec{J}_{45^\circ}, \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\pi/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \\
 &= \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{33}$$

Ved å sammenligne dette svaret med tabulerte litteraturdata [4] ser vi at dette er sirkulært polarisert lys, og i tillegg at rotasjonen går mot høyre. At det er en beskrivelse av en sirkel kan også vises ved å gjøre trigonometriske omregninger på uttrykket eller ved å bruke ferdig parametriserte uttrykk for polarisasjonsellipsen, for eksempel fra *Fundamentals of Photonics* [6].

Enda en spennende ting å nevne i forhold til dette eksempelet er at dette er samme type polarisert lys som brukes i 3D-briller som brukes på kino i dag (vanskelig å finne kilde på dette, så det er testet selv på laboratoriet for å sjekke). Et spesialkamera med to linser filmer to bilder til enhver tid, og ved å bruke 3D-briller sendes et slikt bilde til hvert øye. Måten dette er satt sammen på gjør at for hjernen vår virker dette som om vi har dybde. Teknologien utnytter dermed hvordan hjernen oppfatter og utnytter kroppens to øyne. Samtidig benytter den sirkulær polarisering for å kunne skille mellom de to bildene. Valget av sirkulært polarisert lys kommer av at dette ikke påvirkes

av at man vrir på hodet eller sitter på ytterkanten av salen, noe som ville vært et problem ved bruk av lineært polarisert lys.

Jones-vektorer gir også et enkelt verktøy for å finne den tidsmidlede intensiteten i et system bestående av polarisasjonsobjekter. Har man regnet ut utgangsvektoren for systemet kan intensiteten finnes på følgende måte:

$$\vec{J}_{ut} = \begin{bmatrix} \tilde{A}_x \\ \tilde{A}_y \end{bmatrix} \Rightarrow \langle I \rangle = \tilde{A}_x \tilde{A}_x^* + \tilde{A}_y \tilde{A}_y^*. \quad (34)$$

Jones-vektorer kan forenkles ytterligere, ved å kun stå igjen med et komplekst tall som beskriver polariseringen til en elektromagnetisk bølge. Her vil muligheten til å finne intensiteten og absolutte amplituder falle bort fordi det kun benyttes relative størrelser. Det komplekse tallet er definert som følger ([8] og [9]):

$$\chi \equiv \frac{\tilde{E}_y}{\tilde{E}_x} = \frac{E_{y0}}{E_{x0}} e^{i(\delta_y - \delta_x)}. \quad (35)$$

Det kan også være nyttig å skrive ligning (35) som en trigonometrisk sammenheng, med $\tan \alpha = \frac{E_{y0}}{E_{x0}}$ og δ som tidligere:

$$\chi = \tan \alpha e^{i\delta}. \quad (36)$$

Den komplekse amplituden kan også kobles til θ og ϵ , fra figur 2. Sammenhengene ser da slik ut, hentet fra Optics of Liquid Crystal Displays [9]:

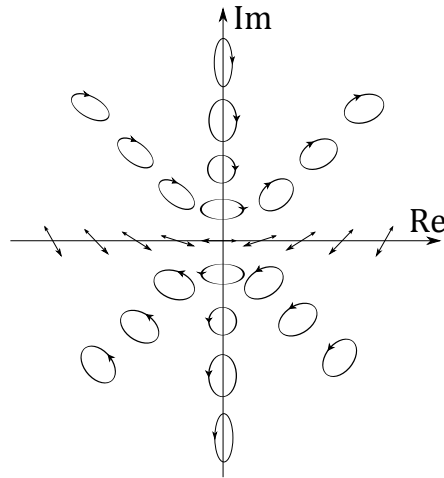
$$\tan 2\theta = \frac{2 \operatorname{Re}\{\chi\}}{1 - |\chi|^2} = \tan 2\alpha \cos \delta, \quad (37)$$

$$\sin 2\epsilon = -\frac{2 \operatorname{Im}\{\chi\}}{1 + |\chi|^2} = -\sin 2\alpha \sin \delta. \quad (38)$$

I tillegg kan denne fremstillingsmåten også vises grafisk, og man får en to-dimensjonal fremstilling som ligner på den tredimensjonale Poincaré-sfæren i figur 3. Denne fremstillingen er vist i figur 4.

2.1.3 Retningskonvensjoner

For å beskrive elliptisk polarisert lys trenger man blant annet å beskrive retningen E -feltvektoren roterer. Hva som er høyrehåndspolarisering og hva som er venstrehåndspolarisering vil være et rent definisjonsspørsmål. Litteraturen og feltene som benytter polarisasjonsellipser bruker begge muligheter, og det er også andre variabler hvor fortegnskonvensjonen varierer. I denne oppgaven følges en artikkel av Hauge, Muller og Smith [8].



Figur 4: *Kompleks fremstilling av polarisasjonstilstander, fritt etter [9]. Imaginær del av χ langs y -aksen, reell del av χ langs x -aksen.*

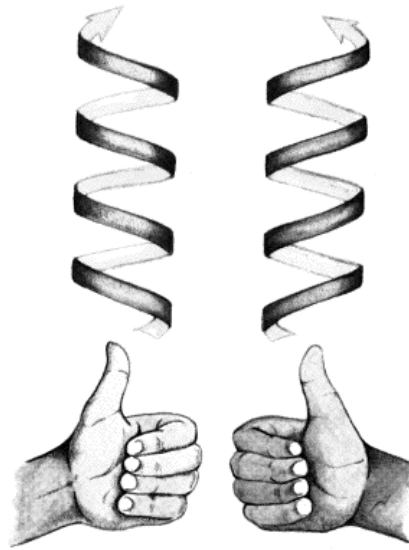
I starten av artikkelen trekkes det frem at begge retningsvalg har sine forklaringer. En viktig faktor blir spørsmålet - hvor står observatøren i forhold til kilden. Står man bak kilden og ser med lysets propageringsretning vil det være naturlig å velge høyrerettet rotasjon som rotasjon med klokka. Ved å se direkte inn i kilden, fra objektets eller detektorens synsvinkel, vil dette se ut som rotasjon mot klokka, og et valg av venstrerotasjon blir da mer naturlig.

I artikkelen [8] velges det siste alternativet, altså at observatøren ser fra objektet eller detektorens synsvinkel og mot propageringsretningen. Hovedgrunnen til at dette velges er at det sammenfaller med litteraturen, og i artikkelen går de så langt som å si at denne retningskonvensjonen nesten universelt blir fulgt innen optikk [8]. Definisjonen på høyrehåndspolarisering ser da slik ut; eksentrisiteten (ϵ) og den fjerde Stokesparameteren (S_3) er definert som positive når det instantane E -feltet kan beskrives av en høyrehåndsheliks (se figur 5) i rommet og er i tillegg representert som et punkt på den øvre halvdel av Poincaré-sfæren. I tillegg velges positivt fortegn for fasen (δ) og tidsavhengigheten (ωt), mens den romlige avhengigheten (kz) får negativt fortegn.

Totalt gir disse valgene følgende uttrykk, som stemmer for høyrehåndspolarisering [8]:

- Høyrehåndsheliks
- Elektriske feltvektorer som roterer med klokka
- $\sin(\delta_y - \delta_x) > 0$

- $\text{Im}\{\chi\} > 0$
- $\sin 2\epsilon > 0$
- $S_3 > 0$
- Punktet er på den nordlige halvkule av Poincaré-sfæren



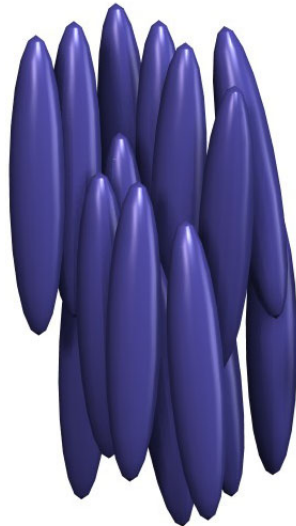
Figur 5: Venstre- og høyrehåndsheliks, hentet fra [10].

Retningsvalg er ikke det eneste som varierer fra bok til bok innen polarisering. Også navn på parametrene varierer stort fra forfatter til forfatter. Ser man for eksempel på eksentrisiteten til polarisasjonsellipsen vil man finne mange navn. I denne oppgaven kalles den ϵ (etter [8]), mens andre brukte symboler er blant annet β [3], χ [6] og θ [9]. Dette gjør det vanskelig å hoppe midt inn i en optikkbok, og man må hele tiden vite hvilke definisjoner som er gjort i starten av en artikkel eller bok.

2.2 Flytende krystaller

Flytende krystaller er væsker hvor det er en viss form for orden i hvordan molekylene plasserer seg. Dette gir en anisotropi i de mekaniske, elektriske, magnetiske og optiske egenskapene [11]. På grunn av disse egenskapene brukes flytende krystaller til en rekke formål, blant annet digitale klokker og PC- og tv-skjermer [12]. Prinsippet i slike apparater er ganske enkelt. En spenning endres for å endre hvor mye lys de flytende krystallene slipper gjennom. Det er tre hovedgrupper innen flytende krystaller; nematisk, smektisk og kolesterisk [12]. Her kommer det til å bli lagt fokus på den første av disse fasene, nemlig den nematiske fasen, og den vil brukes til å forklare hvordan flytende krystaller brukes i skjermer og optiske instrumenter som SLM og LCVR.

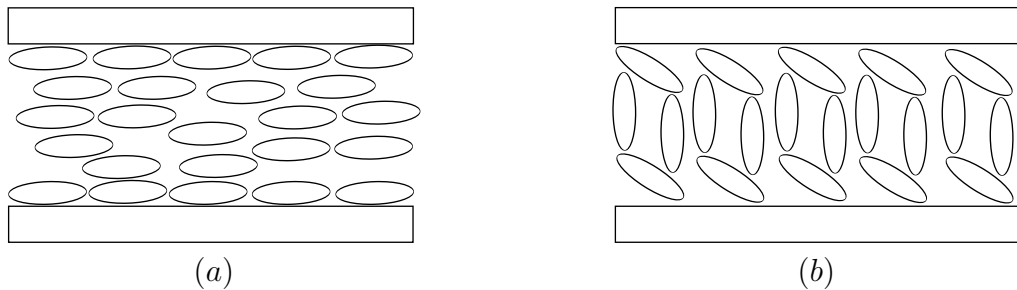
Den nematiske fasen er den enkleste av fasene [3]. Krystallene har systematisk orientering, men plasseringen er helt tilfeldig. Hoveddelen av de flytende krystallene i denne fasen har en stavform, som vist i figur 6. Stavene har parallelle langsider, mens sentrum av stavene er tilfeldig plassert i forhold til hverandre. Retningen på disse stavene kan styres, og dette gjøres enten ved å bruke behandlede glassflater eller ved bruk av elektrisk felt. Dette leder til anisotropi i systemet, og denne retningsbestemtheten, kombinert med stavformen, som kan styres ved å sette opp et elektrisk felt, gjør at de er ideelle for mange forskjellige formål hvor man vil styre mengden lys som skal passere.



Figur 6: Nematisk flytende krystall, hentet fra <http://en.wikipedia.org>.

Det fysiske prinsippet man utnytter ved bruk av flytende krystaller er

dobbeltbrytning. Dette vil si at stoffet har forskjellig brytningsindeks langs aksene parallelt med stavene og aksene vertikalt på stavene. En forandring i retningen til stavene vil dermed forandre brytningsindeksen som lyset opplever, og det vil dermed også påvirke polariseringen til det utgående lyset. Et vanlig oppsett vil bestå av flytende krystaller klemt mellom to glassplater som har en bestemt foretrukket retning. Utenfor her ligger to elektroder som gjør det mulig å sette opp et elektrisk felt, slik at retningen kan endres i større eller mindre grad. For en LCVR vil dette se ut omtrent som i figur 7. Her ser vi at begge platene er behandlet slik at parallell retning er å foretrekke. Dette gjør at molekylene nærmest kantene fortsatt være påvirket av retningen til glasset, selv med maksimal spenning.



Figur 7: Enkel modell av LCVR med nematisk flytende krystaller, (a) uten spenning og maks retardasjon, (b) med maks spenning og minimal retardasjon.

Det finnes også flere apparater som benytter seg av behandlede flater i forskjellige retninger. Da kaller man det vridde nematiske flytende krystaller [12]. Disse brukes blant annet i LCD-skjermer og i flere typer SLM-er. Retningen på den første og andre platen er da orientert 90^{circ} i forhold til hverandre. For eksempelet over, en LCVR, ble kun retardansen forandret når man forandrer spenningen. Med vridde krystaller vil det allerede være en effekt, altså en vridning allerede før man setter på spenning. Jones-formalismen kan brukes her for å beskrive dette ved hjelp av matriser [12]. Systemmatrisen for systemet vil settes sammen av to Jones-matriser, en som roterer og en som retarderer.

$$\vec{M}_{sys} = \vec{M}_{rot}(-\alpha d) \cdot \vec{M}_{ret}(\gamma d). \quad (39)$$

Her er α og γ begge forandring i vinkel per meter, mens d er tykkelsen til cellen. De to matrisene ser dermed slik ut, ved å bruke teorien om polarisering og Jones-formalismen:

$$\vec{M}_{rot}(-\alpha d) = \begin{bmatrix} \cos \alpha d & -\sin \alpha d \\ \sin \alpha d & \cos \alpha d \end{bmatrix}, \quad (40)$$

$$\vec{M}_{ret}(\gamma d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\gamma d} \end{bmatrix}. \quad (41)$$

I dette tilfellet er det antatt at $\gamma \gg \alpha$. Dette fører til at polariseringsretningen følger retningen til den lange akse til de flytende krystallene (se [6] side 234 for bevis). I en SLM vil det også være mulig å forandre spenningen individuelt for hver enkelt piksel. Den fungerer altså som en LCVR for hver enkelt piksel, og Holoeye tilbyr oppløsninger fra 800×600 opp til 1920×1200 [13]. Dette vil si at de har fra en halv million og opp til flere millioner piksler som individuelt kan stilles fra en datamaskin. Denne egenskapen gjør SLM-en til et fleksibelt og nyttig hjelpemiddel i forskning og laboratoriearbeid. I tillegg finnes det to hovedtyper, en som transmitterer lys og en som reflekterer lys.

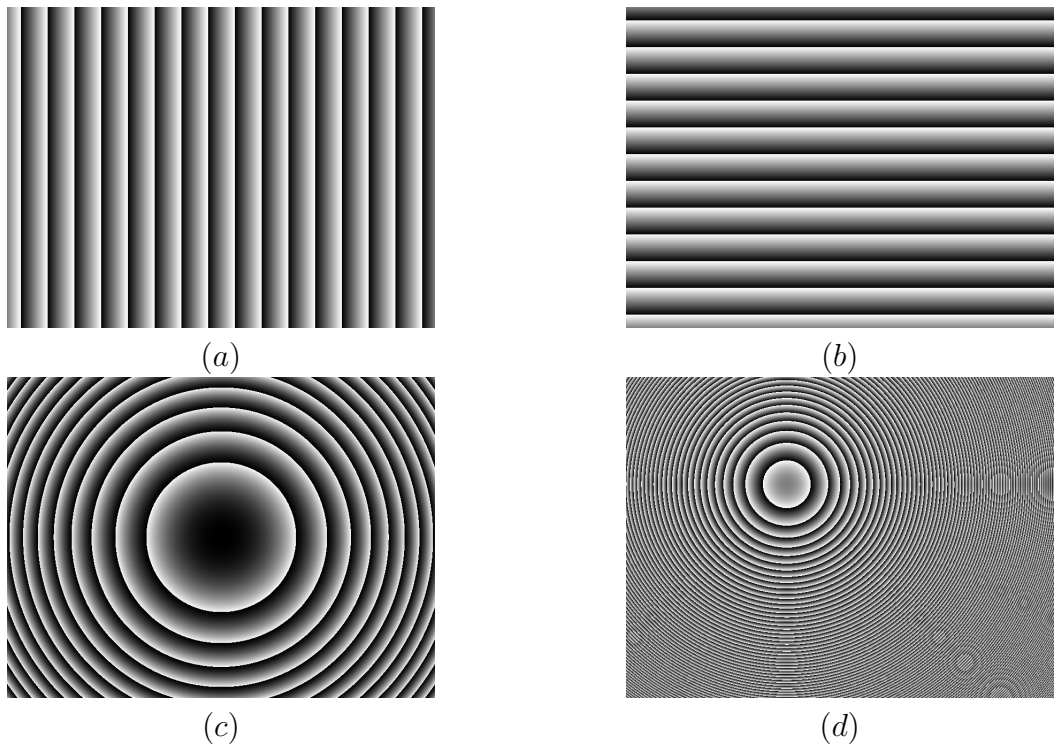
For å beskrive en SLM matematisk ved forskjellige spenninger vil det ikke lenger være så interessant å bruke Jones-matriser for hver enkelt piksel. Dette vil kunne gi mye arbeid, hvis ikke pikslene danner et bilde med små forandringer og mange gjentakelser. Det vil også fort kunne bli vanskelig å tolke svarene på en effektiv måte. Dermed bruker man heller funksjoner som beskriver mønstrene man sender til SLM-en. Dette gjøres stort sett i Fourierplanet, slik at Fourieroptikkens matematiske verktøy kan benyttes. For å gjennomføre noe slik på en enkel måte kan man bruke et såkalt 4f-oppsett. I et slik oppsett brukes to linser med lik fokallengde. SLM, første linse, Fourierplan, andre linse og bildeplan er alle separert med en fokallengdes avstand [2].

En SLMs pikseloppbygging og programmeringsmuligheter gjør at den erstatter mange andre optiske elementer, som for eksempel linser. Den kan brukes til alt fra enkle demonstrasjoner og labforsøk [2] til avansert fotonikk på nanoskala [14]. Ved å sende forskjellige bilder til SLMen kan både amplitude og fase moduleres. Dette kan brukes til å kontrollere feltets posisjon i planet, og fokus kan også flyttes nærmere eller lengre fra kilden. Et mønster som kan brukes for å flytte fokus er en Fresnel-soneplate [3, 12], som har en transmisjonsfunksjon som kan se slik ut [12]:

$$t(r) = \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \text{sgn}(\cos \gamma r^2) \right] \text{circ} \left(\frac{r}{R} \right). \quad (42)$$

Her er det γ som endres når mønsteret forandres. Transmisjonsfunksjonen kan settes inn i uttrykket for diffraksjonsintegralet, ligning (43), som deretter kan benyttes i Fresnelintegralet, ligning (49). Dette mønsteret vil introdusere

en kvadratisk fase, akkurat som ved bruk av en reell positiv linse, som i delkapittel 2.3.4. Et slikt mønster vil se ut som i figur 8c. Ved å lage et periodisk sagtannmønster, som i figur 8a og 8b, vil det også være mulig å flytte bildet i bildeplanet. Retningen på mønsteret vil bestemme hvilken retning bildet flytter seg, mens frekvensen vil bestemme hvor mye. Horisontale striper flytter bildet oppover eller nedover, vertikale striper flytter bildet til den ene eller andre siden. Høyere frekvens gir større forskyvning fra den optiske akse. Det er også mulig å kombinere disse effektene, slik at man kan flytte bildeplanet i alle tre koordinatene på en gang. Dette er vist i figur 8d.



Figur 8: Fire forskjellige mønster, lagd med programvaren *OptiXplorer*. (a) og (b) flytter bildet i xy -planet, (c) flytter bildet langs z -aksen og (d) er en kombinasjon av alle tre på en gang.

2.3 Fourieroptikk

Fourieranalyse og fourierrekker er en matematisk omskrivning av funksjoner. Mannen bak, Jean-Baptiste Joseph Fourier, demonstrerte for omtrent 200 år siden at en periodisk funksjon kan skrives som en sum av sinusfunksjoner [6]. Dette matematiske hjelpemiddelet har blitt meget viktig, og transformasjoner av denne typen benyttes i stor grad når det arbeides med elektriske signaler, lys eller lyd. De var også viktig i forenklingen av arbeidet Fourier selv gjorde på varmeledning [15]. Sammenhengen mellom elektronikk og optikk trekkes også her, fordi begge i stor grad bygger på den samme matematikken, altså Fouriers oppdagelser. Hovedgrunnen til at det er så mange likhetstrekk er at de begge har to basisegenskaper til felles, linearitet og invarians [12]. Flere optiske elementer har også analoge elektroniske elementer. Dermed kan frekvensanalyse av f.eks. en lydforsterker være overførbart og anvendelig også for et avbildningssystem.

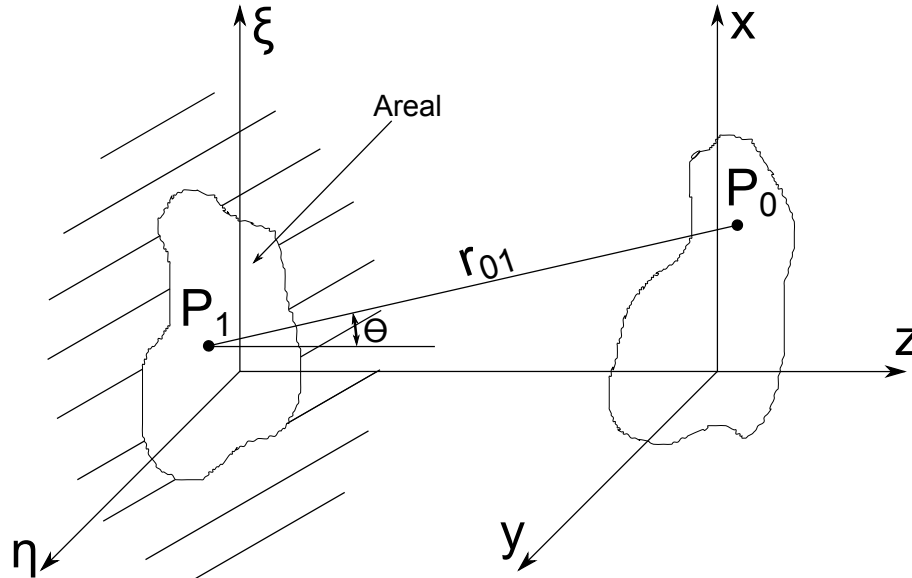
Fourieroptikk handler om å bruke fourieranalysen på lyssignaler. Først ser man at enhver lysbølge kan betraktes som en superposisjon av planbølger. Dette er veldig nyttig, siden planbølger er greie å beskrive matematisk. I tillegg kommer prinsippet med linearitet inn. Vet man hvordan en planbølge blir påvirket av det optiske systemet, vil man også kunne finne dette for en superposisjon av planbølger. Med denne summen av planbølger kan man transformere fra tid-rommet til frekvens-rommet. Dette gjøres både for å forenkle utregningene og for å kunne modifisere selve signalet.

I senere tid har dette blitt veldig viktig, og stadig mer informasjon flyttes ved hjelp av lys. To hovedtyper av systemer vil være mulige, romlig koherente eller inkoherente systemer. I koherente systemer fraktes informasjonen i amplituden til det optiske signalet, mens i et inkoherent system er det intensiteten som er informasjonsbærer [12]. Et kraftig verktøy for å gjennomføre dette er en SLM, beskrevet i delkapittel 2.2. For å få kontroll på dette og se hvordan det egentlig henger sammen er det greit å starte helt fra begynnelsen, nemlig med generell diffraksjon fra et generelt optisk element.

2.3.1 Diffraksjon

Diffraksjon er prosessen som gjør at lys spres ut på grunn av randeffekter. Hadde vi sett på lys som stråler, ville et diffraksjonsmønster vært en eksakt skygge av diffraksjonsapperturen. Siden lys har bølgenatur er ikke dette tilfelle, og diffraksjonsmønsteret kan avvike mye eller lite fra fasongen til aperturen ut i fra hvor store avstander det er snakk om. Denne avstanden er viktig når Fourieroptikken skal bygges opp, og antagelsene som brukes vil avhenge av avstanden mellom de to planene i systemet og størrelsen på

aperturen.



Figur 9: *Diffraksjonsgeometrien, hvor $\cos \theta = z/r_{01}$.*

I et generelt diffraksjonstilfelle kan det se ut som i figur 9. Her ligger diffraksjonsaperturen i (ξ, η) -planet, mens vi observerer i (x, y) -planet. Den enkleste modellen for et slikt diffraksjonssystem vil være at det innkommende lyset vil fortsette uforandret i alle punkt innenfor aperturen [6]. Da vil sammenhengen mellom signalet rett før og rett etter diffraksjonsaperturen se slik ut:

$$U(x, y, 0) = t(x, y) \cdot U_0(x, y, 0). \quad (43)$$

Her er U_0 feltet uten diffraksjonsaperturen, og $t(x, y)$ er en transmisjonsfunksjon, som med den enkleste formen for diffraksjonsteori vil se slik ut:

$$t(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{på innsiden,} \\ 0 & \text{utenfor.} \end{cases} \quad (44)$$

Denne antagelsen kan brukes videre, og ligning (43) kan benyttes i mer generelle tilfeller for å finne feltet rett etter objektet som skaper diffraksjon. De antagelsene som man da må bruke er at det er tynne diffraksjonsobjekter, og med den paraksiale antagelsen kan en kompleks transmisjonsfunksjon erstatte ligning (44). Ved i tillegg å anta at transmisjonsfunksjonen er uavhengig av polariseringen til det innkommende lyset, kommer vi til det som kalles Kirchhoff-tilnærmelsen [16]. En transmisjonsfunksjon som blir nyttig senere er den som gjelder for en tynn linse med fokallengde f [16]:

$$t(x, y) = e^{-\frac{ik}{f}(x^2+y^2)}. \quad (45)$$

Dette blir altså måten å finne startbetingelsene på, fordi det kun finnes eksakte løsninger for noen få spesialtilfeller [16]. Neste skritt blir da å finne en måte å beskrive feltet bortenfor diffraksjonsobjektet, altså for $z > 0$. Ved å anta at bølgelengden er mye mindre enn avstanden mellom objektplanet og billedplanet, og ved å bruke Helmholtz' ligning kombinert med Greens teorem får vi følgende sammenheng, også kalt Huygens-Fresnel-prinsippet [12]:

$$U(x, y, z) = \frac{z}{i\lambda} \iint_{\text{Areal}} U(\xi, \eta) \frac{e^{ikr_{01}}}{r_{01}^2} d\xi d\eta, \quad (46)$$

hvor r_{01} er avstanden mellom objekt- og billedplanet,

$$r_{01} = \sqrt{z^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}. \quad (47)$$

Antagelsene som benyttes her er kun at avstanden er mye større enn bølgelengden, samt skalar teori ³. Nedenfor vil vi se på to ytterligere antagelser, Fresneltilnærmelsen og Fraunhhofertilnærmelsen.

2.3.2 Fresneldiffraksjon

For å få integraler som er lettere å jobbe med introduseres en tilnærming for avstanden r_{01} . Først trekkes z ut av roten, før denne ekspanderes til laveste orden. Det nye uttrykket for avstanden blir da

$$r_{01} \approx z \left[1 + 1/2 \left(\frac{x - \xi}{z} \right)^2 + 1/2 \left(\frac{y - \eta}{z} \right)^2 \right]. \quad (48)$$

Spørsmålet nå blir om vi egentlig trenger alle leddene i denne antagelsen, eller om vi kunne klart oss med $r_{01} \approx z$. Ser vi på ligning (46), vil dette være en grei antagelse for r_{01}^2 -leddet, for her vil de ekstra leddene ikke spille noen betydningsfull rolle. I eksponenten gir derimot små forandringer store utslag, fordi k vil være et veldig stort tall. Resultatet blir

$$U(x, y, z) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \iint_{-\infty}^{\infty} U(\xi, \eta) e^{i\frac{k}{2z}((x-\xi)^2+(y-\eta)^2)} d\xi d\eta. \quad (49)$$

Dette uttrykket kan skrives om til en annen form, som også brukes:

³Skalar teori innebærer at propageringsmediet er lineært, isotropt, homogent og ikke-dispersivt [12].

$$U(x, y, z) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} e^{i\frac{k}{2z}(x^2+y^2)} \iint_{-\infty}^{\infty} [U(\xi, \eta) e^{i\frac{k}{2z}(\xi^2+\eta^2)}] e^{-i\frac{2\pi}{\lambda z}(x\xi+y\eta)} d\xi d\eta. \quad (50)$$

Dette kan gjenkjennes som en Fouriertransform av produktet mellom det komplekse feltet rett etter diffraksjonsapparaturen, $U(\xi, \eta)$ og en kvadratisk fasefunksjon. Dermed er også denne formen nyttig, fordi Fouriertransformer er ofte lettere å jobbe med enn store integraler. Dette er også første tegn på hvorfor denne delen av optikk kalles Fourieroptikk.

De to uttrykkene som nå er funnet, ligning (49) og (50), kalles begge Fresnels diffraksjonsintegral [12]. Når antagelsen er gjeldende, altså at roten kan ekspanderes til første orden, sier man at observatøren er i området hvor det er Fresnel diffraksjon. Dette området kalles også nærfeltet til aperturen. De to ligningene er mye brukt til å beregne felt, for eksempel i digital holografi [16].

Antagelsen når vi ekspanderer roten forutsetter at vi kan se bort fra ledd av høyere orden. For å komme med et estimat på når dette er en god antagelse ser man på det neste leddet, altså andreordensleddet, og ser hvor stor faseforskjell det gir. Kravet som settes er at ved å se bort fra dette leddet påvirkes faserne mye mindre enn 1 radian. Dette kan ordnes hvis [12]

$$z^3 \gg \frac{\pi}{4\lambda} [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]_{maks}^2. \quad (51)$$

Med et sirkulært diffraksjonsobjekt på 1 cm, et observasjonsområde på 1 cm og en bølgelengde på 500 nm vil dette gi $z \gg 25$ cm. Dette er grensen for at høyere ordens ledd ikke skal påvirke eksponentialfunksjonen for mye. Kravet om forandring her er ikke så viktig, fordi det er påvirkningen av hele integralet som er viktig. Hvis de høyere ordenene ikke påvirker selve integralet, vil det være mulig å ha god presisjon også nærmere enn grensen over tilsier. Når hovedbidragene til integralet kommer fra punkt hvor $\xi \approx x$ og $\eta \approx y$, vil de høyere ordens leddene bli helt uinteressante [12]. Ser man på tilnærminger for å oppfylle Fresnel diffraksjon i Fourierrommet, vil man oppdage noe lignende, nemlig at man må ha små vinkler. Dette er grunnen til at man ofte sier at Fresnel antagelsen tilsvarer den paraksiale antagelsen [12].

2.3.3 Fraunhoferdiffraksjon

En ekstra antagelse for avstanden kan gjøres i tillegg til Fresnel antagelsen. Denne antagelsen har som mål å ikke bare få et uttrykk som er en Fouriertransform, men også at dette uttrykket kun er en Fouriertransform av feltet selv. Det man ønsker er dermed å bli kvitt den kvadratiske faserne i ligning

(50). For å kunne bli kvitt denne faktoren gjør man følgende antagelse, som kalles Fraunhoferantagelsen [12]:

$$z \gg \frac{k(\xi^2 + \eta^2)_{maks}}{2}. \quad (52)$$

Maksverdien av de kvadrerte aperturkomponentene, og dermed verdien av komponentene over hele aperturen, vil være mye mindre enn z . Når denne antagelsen stemmer, vil det være et lite tall i eksponenten i fasefaktoren fra ligning (50), og denne faktoren kan dermed antas å være lik 1. Dermed kan funksjonen til feltet i dette området hvor antagelsen gjelder finnes ved å gjennomføre en Fouriertransform av aperturets egen funksjon. Dette området kalles fjernfeltet, og her har man Fraunhoferdiffraksjon. Det forenklede uttrykket av ligning (50) ser slik ut, med antagelsen fra ligning (52):

$$U(x, y, z) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} e^{i\frac{k}{2z}(x^2+y^2)} \iint_{-\infty}^{\infty} U(\xi, \eta) e^{-i\frac{2\pi}{\lambda z}(x\xi+y\eta)} d\xi d\eta. \quad (53)$$

De romlige frekvensene i dette uttrykket vil være:

$$\begin{aligned} f_x &= \frac{x}{\lambda z}, \\ f_y &= \frac{y}{\lambda z}. \end{aligned} \quad (54)$$

For å se når Fraunhoferantagelsen vil være gjeldende brukes samme eksempel som for Fresnelantagelsen, altså et sirkulært diffraksjonsobjekt på 1 cm og en bølgelengde på 500 nm. Dette fører til at $z \gg 300$ m. En annen, mindre stringent antagelse som også kan brukes er antenedesignerens formel, som sier at [12]

$$z > \frac{2D^2}{\lambda}. \quad (55)$$

I dette tilfellet har man blitt kvitt den strenge ulikheten, men avstanden er fortsatt veldig stor. Med tallene over vil kravet nå være at $z > 400$ m. Selv om dette virker som veldig store avstander blir kravene i Fraunhoferantagelsen møtt i flere viktige problemer [12]. Det er også mulig å observere fjernfeltet mye nærmere, enten ved å bruke sfæriske, konvergerende bølger eller ved å sette inn en positiv linse i systemet.

2.3.4 Fouriertransform med linse

En bølge kan beskrives som en sum av planbølger med forskjellige retninger. Linsen som puttes inn i dette systemet vil da gjøre planbølgene om til

kulebølger som fokuseres i fokalpunktet til linsa. Her vil hver retning for planbølgekomponentene tilsvare et punkt i fokalplanet. Dette brukes til å fokusere diffraksjonsmønsteret, slik at det ikke lenger trenger å forekomme i fjernfeltet, og man kan i tillegg komme unna den kvadratiske fasefunksjonen i Fresnelintegralet.

Linsen vil føre til et ekstra ledd i uttrykket for $U(x, y)$. Dette leddet vil være med på å presse bort den kvadratiske fasen fra Fresnelintegralet, og ser ut som i ligning (45). Ved å legge inn en positiv linse og ved å sette observasjonsplanet i fokalplanet vil Fresnelintegralet fra ligning (50) bli kuttet ned til Frounhoferintegralet i $z = f$. Uttrykket blir dermed igjen en direkte Fouriertransform av signalet selv, uten at man trenger store avstander for at antagelsene skal holde.

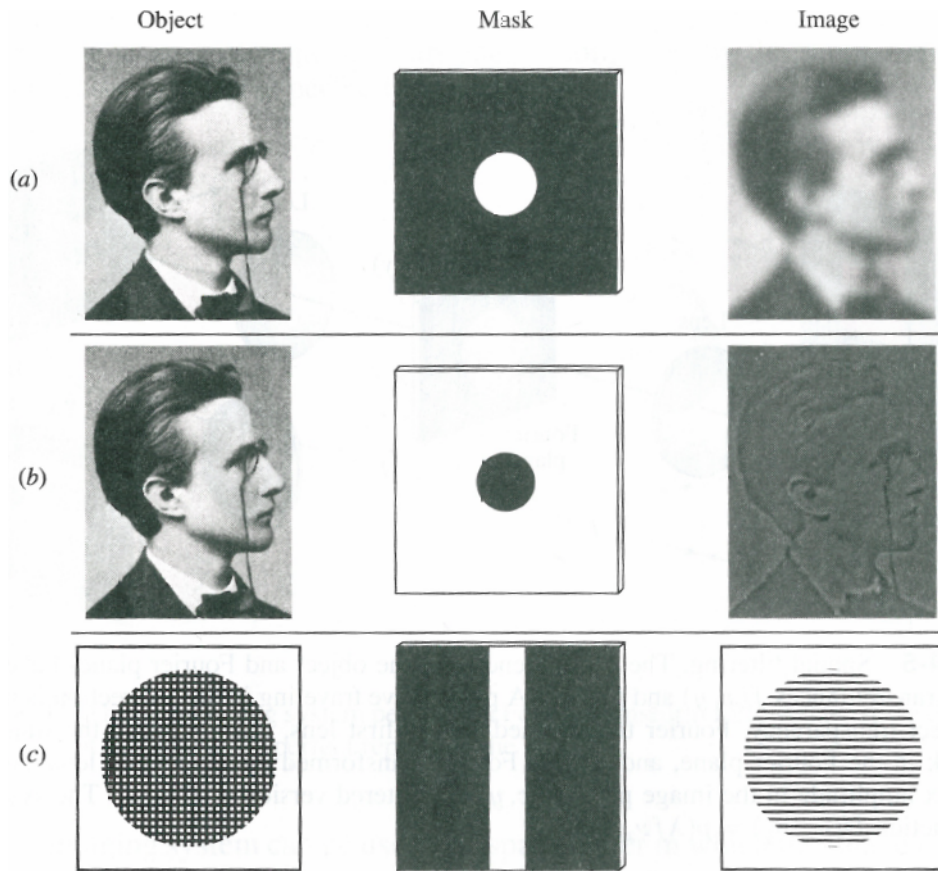
2.3.5 Filtrering i Fourierplanet

Et bruksområde for Fourieroptikk er å bruke det til filtrering. I stedet for å filtrere bort de romlige koordinatene er det romfrekvensene, f_x og f_y i ligning (54), som fjernes. Hvert punkt i Fourierplanet tilsvarer en romlig frekvens, med lavest frekvens i sentrum og høyere frekvens utover. Dermed kan f.eks. et pinnhull brukes til å lage et lavpassfilter, hvor bare lave romfrekvenser passerer. Da vil et bilde smøres utover og bli uklart. Dette gir en mulighet til å se på kun de områdene hvor det er store variasjoner uten å bry seg med detaljene. Er man mer interessert i å se på de områdene hvor det skjer brå overganger trenger man et høypassfilter. Det lages ved å ha en transparent flate med en svart sirkel i midten [6]. Det er også mulig å filtrere ut frekvensene i en spesiell retning eller lage filter som bare slipper gjennom frekvenser i et bestemt område. Bruker man for eksempel et vertikalt filter vil de horisontale frekvensene blokkeres. Størrelsen vil også være med på å begrense hvilke frekvenser som slippes gjennom [6]. Eksempler fra *Fundamentals of Photonics* [6] kan ses i figur 10.

2.3.6 Matematisk innblikk

Fourieranalyse er et kraftig matematisk verktøy og kan brukes nesten i alle tilfeller. For å sitere Bracewell i boka *Introduction to Fourier Optics* [12]; ”*physical possibility is a valid sufficient condition for the existence of a transform*”. Det står dermed ikke på om det finnes en transform, problemet er vel heller å finne transformen.

Det første som er greit å få med er hvordan de generelle uttrykkene ser ut, altså hvordan man Fouriertransformerer en vanlig funksjon fra det vanlige rommet inn i Fourierrommet. For en funksjon $g(x, y)$ vil det se slik ut [12]:



Figur 10: Eksempler på objekter, filter og filtrerte bilder, kopiert fra [6].

$$\mathcal{F}(g) = \iint_{-\infty}^{\infty} g(x, y) e^{-2\pi i(f_x x + f_y y)} dx dy = G(f_x, f_y). \quad (56)$$

I denne oppgaven vil store bokstaver på funksjoner tilsvare at de er Fourier-transformert. Det er også valgt å følge [12] og bruke romlige frekvenser (f), hvor andre bøker bruker romlige vinkelfrekvenser (k). Forskjellen ligger kun i en 2π -divisor i forskjell per dimensjon.

For å komme tilbake til $g(\omega)$ fra den nye funksjonen, $G(f_x, f_y)$, kan man gjøre en matematisk nesten identisk operasjon. Dette kalles en invers Fourier-transform og er definert slik:

$$\mathcal{F}^{-1}(G) = \iint_{-\infty}^{\infty} G(f_x, f_y) e^{2\pi i(f_x x + f_y y)} df_x df_y = g(x, y). \quad (57)$$

Disse definisjonene fører til en rekke matematiske teoremer, som også kan

forklares fra et fysisk perspektiv. I denne oppgaven følges Goodmans forklaringer, hvor også teoremene er bevist [12]. Teoremene kan ses i kapittel 6.1.

Disse teoremene er ikke kun av teoretisk interesse, men har også stor nytteverdi for å forenkle og utføre Fourieranalyse av optiske systemer. Ved bruk av disse teoremene kan enorme mengder med arbeid spares, og problemer som ikke ser løsbare ut kan plutselig virke relativt trivielle. Videre er det også viktig å gjøre så mange forenklinger som mulig, for å kunne gjennomføre integralene. Et vanlig hjelpemiddel er da å lete etter symmetrier. I optiske systemer er det ofte en sirkulær symmetri [12]. Dette kan forenkle utregningene og gir følgende integral:

$$\mathcal{F}[g(r, \theta)] = G_o(\rho, \phi) = \int_0^\infty r g_R(r) dr \int_0^{2\pi} e^{-2\pi i r \rho \cos(\theta - \phi)} d\theta. \quad (58)$$

2.4 Spektroskopi

Spektroskopi er et felt innen naturvitenskapen som brukes i observasjon av alt fra stjerner til atomer. Det handler om å se på intensitet som funksjon av bølgelengde og ut fra dette for eksempel karakterisere stjerner eller se hvilke atomer et stoff består av. Newton var mannen som startet denne grenen innen vitenskapen. Han hadde en sirkulær åpning i vinduet sitt våren 1666 hvor han slapp inn sollys. Dette gikk gjennom et glassprisme. Ut i fra datidens lover for lys og diffraksjon burde dette ha lagd et sirkulært mønster på veggen bak prismet. Det Newton observerte var i stedet et avlangt mønster med flere farger. Dette mønsteret kalte Newton for et spektrum og kom frem til at hvitt sollys var en blanding av alle fargene i regnbuen. Omtrent 150 år senere kom Fraunhofer med et nytt verktøy for å utvide og forbedre spektroskopien. Han introduserte diffraksjonsgitteret i 1821. Først brukte han tynne vaiere, for så å gå videre til glassplater med tynne linjer skrappt inn [17].

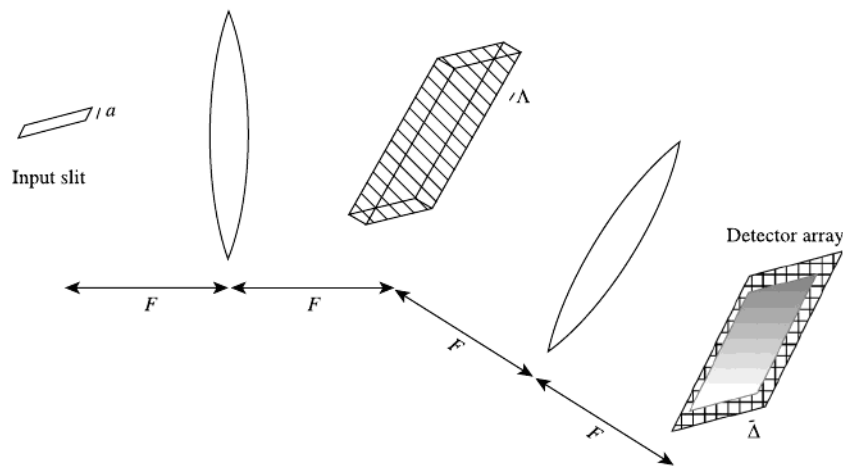
Spektralinformasjon kan isoleres fra et lyssignal ved tre forskjellige mekanismer [18]:

- **Romlig dispersjon:** dispersive elementer, som gitter og prizmer, brukes til å spre lyset avhengig av bølgelengde. Denne moduleringen skjer i bildeplanet.
- **Interferometri:** her skjer moduleringen i faserommet, altså i Fourierplanet. Et eksempel her er bruk av en Fabry-Perot⁴ kombinert med en Fourierlinse eller bruk av et Michelsoninterferometer.
- **Resonans:** bruker mikroskopiske optiske og elektroniske egenskaper i stedet for makroskopisk optisk design. Spektralt avhengige egenskaper vil komme ved resonans lagd av optiske hulrom, nanostrukturer eller ved prosesser i kvantemekaniske materialer. Vanligst i dag er tynnfilmfiltere, organiske fargestoff, metallnanopartikler og kvanteprikker.

Hovedforskjellene mellom disse tre mekanismene ligger dermed enten i størrelsesskalaen eller i geometrien til oppsettet. Resonans er helt nede på nanoskala, de to andre er på makroskopisk nivå. Romlig dispersjon benytter optiske objekter i bildeplanet, mens interferometri gjør sine moduleringer i Fourierplanet.

Et eksempel på et enkelt spektrometer er vist i figur 11. Her brukes et transmisjonsdiffraksjonsgitter til å spre lyset. Linsene i systemet er med for å fokusere lyset både på gitteret og på detektoren. Detektoren i dette tilfellet

⁴Et Fabry-Perot er en kombinasjon av speil som er nesten perfekt reflekterende, og som brukes til å skille ut forskjellige bølgelengder.



Figur 11: Et dispersivt $4F$ -spektrometer med diffraksjonsgitter som har periode Λ .

kan for eksempel være en CCD-brikke. For å justere dette systemet og få ønskede forhold kan a , F eller Λ , som vist i figur 11, endres. Skal fysikken bak hvordan diffraksjonsgitteret fungerer beskrives, trenger man en bølgebeskrivelse av lys, og det vil ikke lenger være nok å se på det som stråler. Et nytt prinsipp som da må tas i bruk er Huygens' prinsipp, som sier at alle punkter på en bølgefront kan ses på som kilder til nye bølgepakker som sprer seg ut i alle retninger med en fart tilsvarende farten som bølgen propagerer med [19]. Lyset som kommer ut av spaltene i gitteret vil påvirkes av både diffraksjon og interferens [4]. Ved å se på amplituden til det utgående E -feltet kan det utledes en enkel sammenheng mellom gitterperiode (Λ), bølgelengde (λ) og diffraksjonsvinkel (θ). Denne utledningen kan for eksempel finnes i Introduction to Optics [4], og resultatet er gitterdiffraksjonslikningen:

$$m\lambda = \Lambda \sin \theta, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (59)$$

Parameteren m kalles diffraksjonsordenen. Man ønsker gjerne vil å fjerne de høyere ordenene og sitte igjen med kun de lave diffraksjonsordenene [18]. Dette vil gjøre det lettere å optimere de andre størrelsene som kan varieres i et slikt spektrometer. Hvis det ikke er normalt innfall, vil ligning (59) forandres til [4]

$$m\lambda = \Lambda(\sin \theta_i + \sin \theta_m). \quad (60)$$

Her er θ_i innfallsvinkelen og θ_m er diffraksjonsvinkelen. Dette kan vises ved å se på veilengden lyset går, og bruke trigonometri til å finne sammenhengen mellom disse avstandene, vinklene og perioden til gitteret. Uttrykket for

intensiteten ut av et slikt gittersystem vil ha to faktorer i tillegg til den innkommende intensiteten, I_0 . Fra Pedrotti har man følgende sammenheng, hvor det igjen antas normalt innfall, N er antall spalter, β er proporsjonal med bredden til spaltene i gitteret og α er proporsjonal med avstanden mellom spaltene:

$$I = I_0 \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \left(\frac{\sin N\alpha}{\sin \alpha} \right)^2. \quad (61)$$

Den første faktoren skyldes diffraksjon og den andre interferens. I et gitter er det vanligvis smalere spalter enn avstanden mellom spaltene. Dette fører til at diffraksjonsfaktoren vil begrense interferenssignalet, slik at det avtar når man beveger seg bort fra sentrum.

Noe som kan skape problemer når man driver med spektroskopi er at to forskjellige bølgelengder kan ende opp på samme sted. Fra ligning (59) ser man at for eksempel doubling av m og halvering av λ fortsatt gir samme høyreside. Den spektrale regionen man har uten overlapping kalles *free spectral range*, som kan oversettes til fri spektrallengde. For å definere og lage et uttrykk for denne lengden starter man med den korteste (λ_1) og lengste (λ_2) mulige bølgelengden som kan måles. De vil grense til hver sin orden, med forskjell på en, slik:

$$m\lambda_2 = (m + 1)\lambda_1. \quad (62)$$

Den frie spektrallengden er definert som avstanden mellom disse to bølgelengdene, og kan dermed skrives som:

$$\lambda_{fsr} = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{\lambda_1}{m}. \quad (63)$$

Vi ser at høye ordener vil føre til en lavere fri spektrallengde, og dermed gjøre at man har et mindre område med gode data.

En annen viktig parameter i spektroskopi er oppløsning. I motsetning til den frie spektrallengden som avhenger av den maksimale bølgelengdeforskjellen vil oppløsningen avhenge av hvor liten avstand det er mellom bølgelengder som akkurat kan skilles fra hverandre. Oppløsningsevnen blir da definert som:

$$R \equiv \frac{\lambda}{\Delta\lambda}. \quad (64)$$

Dette kan omskrives ved å se på grensetilfellet med to intensitetstopper som er veldig nær hverandre, men akkurat mulig å skille fra hverandre. Antar man normalt innfall, kan man fra ligning (59) se at [4]

$$\Lambda \sin \theta = m(\lambda + \Delta\lambda) = \lambda \left(m + \frac{1}{N} \right). \quad (65)$$

Sammenligner man nå ligning (65) med ligning (64), ser man at oppløsnings-
evnen kun avhenger av hvilken diffraksjonsorden man ser (m) og antall spal-
ter (N):

$$R = mN \quad (66)$$

Siden man vil ha så stor oppløsningsevne som mulig, ser vi her at det vil være
ønskelig med høyere orden. Dette blir noe man må vurdere fra situasjon til
situasjon. Vil man måle et spekter over et stort bølgelengdeområde, må m
være lav. Er man kun interessert i et lite område, men vil kunne måle små
forskjeller, vil det derimot være nyttig med en større m . Et spektrometer
må altså finjusteres i forhold til formålet det skal brukes til, og man må
vite på forhånd hva man er interessert i måle, for ikke å gå glipp av viktig
informasjon.

2.5 LightTools

LightTools er et program fra *Optical Research Associates* for modellering og simulering av optiske systemer . Programmet kan brukes til å lage prototyper av optiske systemer for mange forskjellige bruksområder. Det har en lav brukerterskel, og bruker et brukergrensesnitt som er inspirert av Microsoft. Har man brukt programmer i Office-pakken tidligere, vil mange av menyene, tabellene, vinduene og andre grensesnittvalg virke kjente.

LightTools har store muligheter for å endre optiske parametre og har også en egen optimeringsmodul for å oppnå ønsket lysfordeling. Denne er en av flere moduler som bygger opp programmet. Hovedmodulen kalles "*Core Module*", hvor alle de generelle funksjonene for redigering av de optiske elementene ligger. Den andre modulen som også er standard for alle brukere av LightTools er en belyningsmodul. Her benyttes Monte Carlo-teknikker for å simulere kilder og mottakere og predikere intensitet, radians og irradians. I tillegg til disse to standardmodulene er det en optimeringsmodulen, som nevnt over, en avansert fysikkmodul med større muligheter for å endre parametere, en SolidWorks-modul for å benytte SolidWorks-modeller i LightTools, en modul for å importere og eksportere CAD-filer med LightTools, samt "*Image Path Module*" som brukes til analyse av linser og som også har muligheten til å samarbeide med Code V, et annet program fra *Optical Research Associates*. I tillegg består LightTools av flere biblioteker med blant annet linser, materialer, lyskilder, LED og speil. For å utvide de innebygde verktøyene er det også muligheter for videre spesifiseringer ved bruk av Visual Basic.

En av fordelene ved bruk av programvare til simuleringer og modeller er at en del antagelser man vanligvis benytter nå kan gjøres mer eksakt. I LightTools brukes blant annet generell brytning og refleksjon, altså man slipper å tenke på at det er paraksiale stråler og tynne linser, noe som er mye brukte antagelser i grunnleggende optikk. I strålesporing er også den paraksiale antagelsen utelatt, og det brukes eksakt geometrisk optikk. I tillegg følger lysstrålene i LightTools Fermats prinsipp, altså at strålen velger den veien som tar kortest tid.

2.6 Demonstrasjoner fra et didaktisk perspektiv

Denne masteroppgaven tar utgangspunkt i optikkteorien som er beskrevet over for å utvikle demonstrasjoner i faget optikk. For å få det fulle bildet i forhold til problemstillingen er det også nødvendig å trekke frem noen didaktiske momenter. Her vil det både ses på sammenhengen mellom teknologi og naturvitenskap, hvorfor man skal drive med eksperimentelt arbeid i fysikkundervisningen og hvordan demonstrasjoner burde gjennomføres med tanke på læring og studentutbytte. Det som trekkes frem bygger i stor grad på et sosiokulturelt læringsyn, og ser på læring som en sosial prosess og en måte å opparbeide seg fysikkulturens tenkemåter og atferdsmønstre (se f.eks. Woolfolk [20]).

2.6.1 Optikk - teknologi eller naturvitenskap?

Optikkens historie er lang, både i vår vestlige verden og i andre fjerne strøk. Optikken har beveget seg helt fra kinesernes bronsespeil, som ble sett på som magiske, for nesten 4000 år siden [21] og grekernes tanker om synsstråler ut fra øynene [5], til dagens enorme romteleskoper, lasere og fiberoptikk. Mye har skjedd innen optikk, og både teknologiaspektet og det naturvitenskapelige har vært til stede stort sett hele veien. Allikevel kan det virke som dette er et felt hvor fenomenene først er oppdaget, da gjerne ved en feil eller tilfældighet, for så at man har prøvd å forstå hvorfor fenomenet forekommer. Når det kommer til historien om bronsespeilene fra Kina prøvde de ikke en gang å forklare hvorfor, men ga det heller en mystisk og magisk karakter.

Optikk ser ut til å ha karakteristiske trekk både fra teknologi og naturvitenskap. Vitenskapens folk har til enhver tid vært interessert i hvorfor forskjellige optiske fenomener forekommer, mens teknologiens brukere er mer interessert i hvordan dette kan utnyttes og reproduseres. Gjennom de siste hundre årene har det blitt en stadig nærmere forbindelse mellom teknologi og naturvitenskap [22]. Tidligere var naturvitenskapen og kunnskapen man fikk ut av eksperimenter og forskning et mål i seg selv. I dag handler det hele mye mer om å skape noe eller finne noe som kan bidra til produktivitet og verdiskapning. Kunnskapen en fysiker i dag strever etter er i stor grad for å bidra til å løse et av teknologiens mange problemer, og Ziman kaller dette ”*industrial science*” [23]. Dette forholdet går også andre veien. Uten ny teknologi ville mange forskningsgrupper stagnere, også innen optikk. Ny teknologi har blitt essensielt for å komme videre innen forskning, i tillegg til å effektivisere hverdagen for folk flest. Veldig få disipliner klarer seg uten avanserte dataprogrammer, programmeringsmuligheter for modellering og avanserte instrumenter for å se de små delene verden er bygd opp av, og

en tur på butikken ville ikke vært det samme uten både lasere, magnetstriper og datamaskiner.

I forbindelse med moderne optikk kan det virke som det er dannet en ny enhet, en slags sømløs vev mellom teknologi og naturvitenskap. Dette er trenden for store deler av naturvitenskapen, og det er stadig oftere fristende å si at teknologi og fysikk er to sider av samme sak [22]. Allikevel finnes det fortsatt tydelige forskjeller, spesielt i forhold til mål. Teknologien er interessert i å løse problemer med ny kunnskap, naturvitenskapen har selve kunnskapen som målet. En annen tydelig forskjell er at naturvitenskapen har som ideal å være verdifri mot teknologiens verdiladede retningslinjer. Dermed kan det være viktig, både for student og underviser, å vite hvor informasjon kommer fra og hvem informasjonen er skrevet for.

2.6.2 Hvorfor eksperimentelt arbeid i fysikkundervisningen?

Fysikk er utvilsomt både et teoretisk og eksperimentelt fag [1]. Den teoretiske delen blir av mange sett på som det viktigste i faget, mens det eksperimentelle kun blir et slags krydder for å piffe opp undervisningen. Dette gjør at man ikke får frem viktigheten av eksperimentelt arbeid, og man kan også fort tenke at det bare er et tidssluk uten noe reelt utbytte. Det vi da trenger er noen argumenter for å drive med eksperimentelt arbeid.

I boken Fysikkdidaktikk [1] blir tre argumenter fremhevet for eksperimentelt arbeid. Disse punktene er basert på forskning på området og spesielt arbeidene til Wellington (1998) og Lunetta og Hofstein (1991) [1]. Det første punktet de trekker frem er ferdighets- og kompetanseargumentet. Dette handler blant annet om å kunne bruke utstyr og instrumenter. Studentene burde ha kunnskap til å bruke dem og dataene man får ut på en god måte. Det andre punktet som trekkes frem er det kognitive argumentet. Her dreier det seg om å bruke eksperimenter til å hjelpe studenters forståelse. Det skal også bidra til å vise betydningen av vitenskapelige metoder, hypotesetesting og naturvitenskapens egenart. Det affektive argumentet er det siste som trekkes frem. Her handler det om holdninger, motivasjon og at det kan skape entusiasme hos studentene.

En som trekker argumentet for eksperimentelt arbeid enda lenger er Verner Schilling, som har skrevet en doktoravhandling om temaet i 2006 [24]. Han går så langt som å si at teoriundervisning kun er for å bygge opp til det endelige målet, nemlig å gjennomføre eksperimentelt arbeid. Dette er nok omtrent helt motsatt av det mange tenker, og kan være med å utfordre tankegangen rundt eksperimentelt arbeid. Han trekker blant annet frem at det eksperimentelle arbeidet ofte kan være så avansert at det kan være nyttig med egen undervisning rettet direkte mot det å gjennomføre

laboratorieoppgaver. Han trekker også frem i sin konklusjon at det er viktig å tenke over hvilken teori som er nødvendig for å forstå spørsmål knyttet til et eksperiment, og en veileder eller underviser bør alltid overveie hvordan denne teorien legges frem for studenter, elever eller andre tilskuere [24]. Forfatterne av Fysikkdidaktikk [1] sier at dette muligens er satt litt på spissen, men at de tror på en vekselvirkning mellom teoretisk og eksperimentelt arbeid og at de begge er avhengig av den andre for å gi størst mulig innsikt.

I fysikken kan det eksperimentelle arbeidet spille mange forskjellige roller [1]. Det kan være for å bli kjent med nytt utstyr og teste ut dette. Eksperimentet kan være en innføring i et nytt emne, enten i form av demonstrasjon eller studentstyrt aktivitet. Det kan også være for å illustrere noe man allerede har lært om eller bruke det som en fasit slik at eksperimentet selv svarer på spørsmål som blir stilt. Slik kan det også brukes både til testing, repetisjon og som et middel for differensiering. I tillegg kan det også være at man gjennomfører eksperimenter for å trene på å forske og gjennomføre eksperimenter. Det som blir viktig for den som planlegger blir dermed å sette seg mål og vurdere vellykkethet i forhold til disse målene [22].

For mange, spesielt karriereivrige studenter, vil sannsynligvis nytten av eksperimentelt arbeid bestemmes av om det er eksamensrelevant. I en travel studenthverdag prioriteres de aspektene av studiehverdagen som kan fremme eksamenskarakteren, mens det som ikke er direkte relevant til eksamen blir tenkt på som mindre viktig. Dette er også en tendens hvis man ser utenfor høyere utdanning og ser på grunnskolens naturfag. Resultater fra den verdensomspennende testen PISA viser at mer laboratoriearbeid og eksperimenter ikke nødvendigvis gir høyere resultater på tester i naturfag [22]. Sjøberg [22] stiller da følgende spørsmål, for å sette det hele på spissen:

Skal naturfaget kvitte seg med de arbeidsformene som nettopp er kjennetegnet på naturvitenskapelig arbeid? Og som vi vet at elevene faktisk setter pris på, og som kan gi dem gode opplevelser som de vil huske? (s.176)

2.6.3 Demonstrasjoner

Demonstrasjoner er en av flere former for eksperimentelt arbeid. I en undersøkelse, referert i boken Fysikkdidaktikk [1], sier omtrent 50% av både elevene og lærerne at dette gjøres svært ofte for å forklare begreper og fenomener. Her er det også stilt spørsmål om hvor mye elevene ønsker forskjellige undervisningsmetoder, og her svarer omtrent 80% at de ønsker demonstrasjoner svært ofte. Dette kan dermed tyde på at demonstrasjoner er noe både de fleste elever og lærere synes er viktig i fysikkfaget. Hvorfor de synes det skal

settes av mye tid til demonstrasjoner kan ha flere årsaker, noe tilsvarende argumentene for eksperimentelt arbeid fra tidligere, og det vil også variere fra elev og student til en lærer eller veileder. Noen av argumentene, sammensatt fra generelle argumenter for eksperimentelt arbeid [1] og egne erfaringer, kan være:

- Synliggjøre fysiske fenomener gjennom opplevelser
- Bli kjent med aktuell teknologi og få et innblikk i den raske teknologiske utviklingen
- Introdusere nye tema og skape en felles erfaringsplattform
- Gi teorien et ansikt
- Vise historisk viktige eksperimenter

Flere av disse argumentene kan knyttes til den sosiokulturelle lærings-teorien. Det å skape en felles erfaringsplattform vil ikke være mulig uten å bruke den sosiale interaksjonen som virkemiddel for å nå målene. Felles aktiviteter står også i sentrum for denne læringsteorien [20], noe som gjør at demonstrasjoner burde være en naturlig metode for å fremme læring.

Innen fysikkfaget, både på universiteter og på skoler, er demonstrasjoner en naturlig del av undervisningen. Det er en allmenn for-mening om at slike demonstrasjoner skal hjelpe studenter til å lære fysikk og i tillegg øke studentenes interesse. Allikevel viser flere forsknings-resultater at slike demonstrasjoner fort kan være nytteløse og bidra lite til studentenes læring og interesse ([25] og [26]). Det kan være flere grunner til at demonstrasjoner ikke gir den ønskede virkningen. I en australsk skole fikk en lærer, som var kjent for sine gode demonstrasjoner og som hadde et godt rykte, besøk av forskere som skulle se på hvorfor studenter får lite ut av lærerstyrte demonstrasjoner [25]. Forskerne fulgte klassen gjennom en periode på seks uker, både med intervjuer, filming av klasserommet og tester i etterkant. Studentene som ble valgt ut til intervjuer ble valgt på grunnlag av observasjon en uke i forkant, og testene som ble gjort i etterkant var så å si like som demonstrasjonene som læreren gjennomførte for hele klassen.

Forskerne oppdaget at selv om dette var en lærer som både gjennomførte mange demonstrasjoner og hadde en stor interesse for både demonstrasjoner og fysikkfaget så var det få elever som fikk et tydelig utbytte. Kun et fåtall av studentene kunne svare riktig på spørsmålene til en oppgave som var nesten identisk med en av demonstrasjonene til læreren. Forskerne kom da frem til seks dimensjoner som kan forhindre studentenes utbytte ved demon-strasjoner. Den første var det å kunne skille signal fra støy, altså å kunne

vite hva man ser etter. I denne perioden så forskerne flere situasjoner hvor det ikke var klart for studentene hva de faktisk skulle se etter. Var den lille bevegelsen bare en feil eller var det en faktisk effekt? Skulle ballen gjøre noe spesielt når den ble kastet frem og tilbake? Det å utvikle en kompetanse for å skille signaler fra støy, resultat fra feilkilder, er også viktig for det daglige arbeidet for både realister og ingeniører, og er dermed noe som burde ha fokus også i demonstrasjoner. Etter dette følger et par punkter om forkunnskaper. Uten samme referanserammer, og med forskjellige forestillinger på vei inn i en slik demonstrasjonssituasjon, vil det også være forskjellige ting man tar med seg videre. Dermed må den som gjennomfører demonstrasjonene være klar over både mulige misoppfatninger i forhold til andre områder innen fagfeltet og hvordan demonstrasjonen oppfattes av studentene.

Studentene i denne undersøkelsen slet med å få inn nye begreper som demonstrasjonene innførte. De brukte heller allerede kjent kunnskap som handlet om lignende fenomener til å forklare det de så, selv om dette ikke var direkte overførbart og ikke fysisk riktig. En fysiker vil kunne gjøre hopp fra en gren av teorien til en annen uten å tenke nøyer over det, mens studentene fort faller av ved slike variasjoner. Fysikeren vil også kunne bytte mellom representasjonsformer, for eksempel fra tall til vektorer til piler eller fra grafer til funksjoner, uten å tenke mye på det eller si hvordan dette gjøres. Her må man ta med studentene på overgangene slik at de ser broene mellom de ulike formene, og at demonstrasjon og teori ikke blir to adskilte verdener.

Det blir også vanskelig å lære noe av en demonstrasjon uten å trekke den inn i en større sammenheng. Kobles den ikke opp mot det som gjøres ellers i faget, vil den muligens bare bli sett på som en form for underholdning og dermed ikke bidra til læring. Den siste dimensjonen de trekker frem er mangelen på muligheter til å teste den naturvitenskapelige samtalen. Dette kan bidra til å få frem misoppfatninger og legge opp til økt engasjement hos studentene. Forskergruppen trekker dermed frem i sine anbefalinger at det sosiale perspektivet her vil være det essensielle for å komme videre og gjøre dette mer lærerikt. Det må skapes et miljø hvor kunnskap kan diskuteres og forhandles frem i fellesskap, og misoppfatninger kan da brytes ned sammen.

En annen gruppe med forskere fra Harvard University gjorde tilsvarende studier i 2002 [26]. De sammenlignet fire forskjellige muligheter, enten helt uten demonstrasjoner, demonstrasjoner ved at studentene kun observerer, demonstrasjoner ved at studentene skal sette opp hypoteser, og demonstrasjoner hvor studentene både setter opp hypoteser og diskuterer både hypoteser og resultat. Demonstrasjonene ble gjennomført i øvingstimer for et introduksjonskurs i fysikk for kommende medisinstudenter. Gruppene ble rotert, slik at alle skulle oppleve hver mulighet omtrent like mange ganger. For å måle hva studentene hadde fått ut av demonstrasjonene ble en test gjen-

nomført, hvor fysiske situasjoner som var identiske med demonstrasjonene ble presentert. Forskjellen mellom ingen demonstrasjon og de som kun observerte var ubetydelig. De som hadde fått muligheten til hypoteser og diskusjon gjorde det klart bedre. Dette var spesielt tydelig når det var snakk om å forklare hva som skjedde, ikke bare si hva som kom til å skje. En ting til de oppdaget fra sin studie var at det å inkludere diskusjon hadde en veldig liten ekstra effekt, selv om man brukte mye mer tid på demonstrasjonene. Forskerne konkluderte dermed med at det å kunne gi studentene litt tid til å forutsi hva som kommer til å skje og sette opp en hypotese bruker lite ekstra tid og gir en klar forbedring når det kommer til forståelse.

Sammenlignes studiene til Roth et al. [25] med studiene til Crouch et al. [26], er det en tydelig fellesfaktor de trekker frem for å lykkes. En god demonstrasjon må inkludere studentene. De må få muligheter til å sette opp egne hypoteser, stille spørsmål til det som foregår og om mulig også diskutere resultatene. Begge studiene har tydelige data som viser at lite aktivitet for studentene under en demonstrasjon gjør at man like godt kunne greid seg uten demonstrasjonen. Dette stemmer også i forhold til sosiokulturell lærings-teori. Studentene må bidra i den sosiale prosessen, altså demonstrasjonen, for å få det læringsutbyttet som er ønsket.

3 Demonstrasjoner

I dette kapitlet vises selve produktet av masteroppgaven, tre veiledningsdokumenter til demonstrasjonene og en veiledning til LightTools-øvingen. Veiledningen er lagd med tanke på den som skal gjennomføre opplegget, og er ikke tenkt for studentene. Før veiledningsdokumentene introduseres kommer en kort introduksjon til utstyret som hadde hovedfokus i demonstrasjonene.

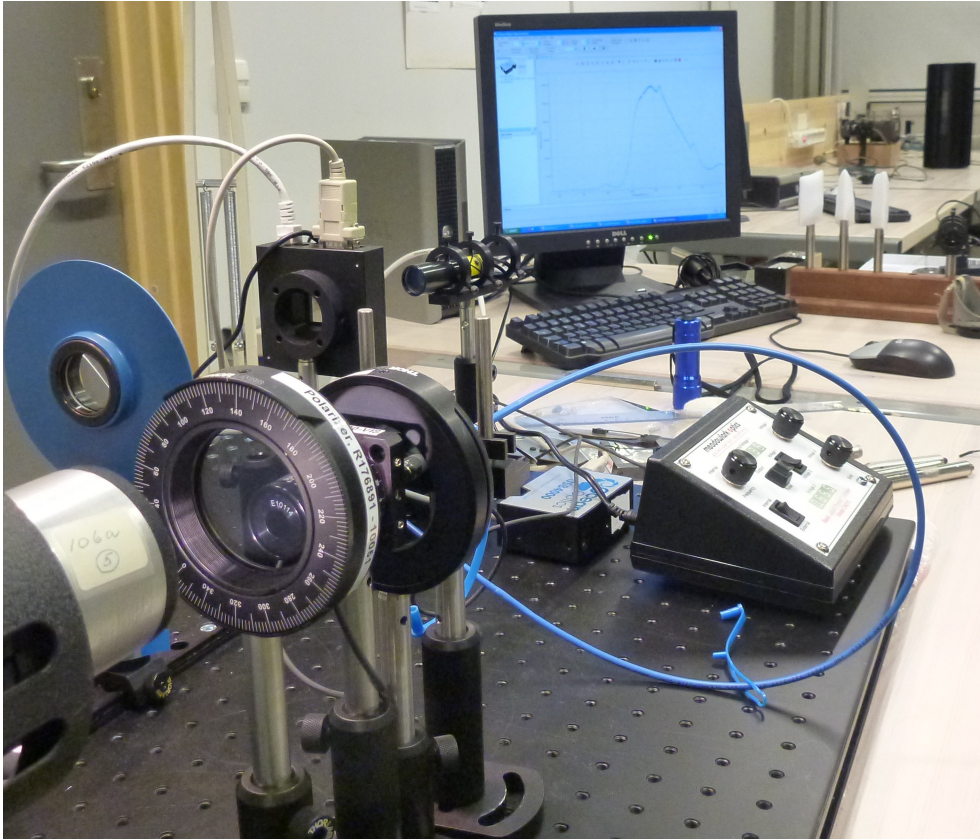
3.1 Utstyr

I arbeidet med denne oppgaven har det blitt brukt utstyr som er kjøpt inn av optikkgruppen ved Institutt for fysikk, NTNU, med et budsjett på 200 000 kr. Dette utstyret var tenkt som en fornying og modernisering av laboratoriemulighetene ved kursene i optikk, men de allerede eksisterende gode oppsettene skulle ikke forkastes. I hovedsak var dette snakk om kurset TFY4195 Optikk som har blitt undervist av Morten Kildemo de siste årene. Her følger en kort beskrivelse av de tre instrumentene som har hovedvekt i denne oppgaven.

3.1.1 Liquid Crystal Variable Retarder

På norsk kan *Liquid Crystal Variable Retarder* (LCVR) beskrives som flytende krystaller som drives av en justerbar spenning, og som dermed gir en variabel forsinkelse av lyset. En LCVR er altså et apparat som forsinkes, også kalt retarderer, fasen til den ene av to ortogonale feltkomponenter til lyset og dermed forandres polariseringen til lyset. For å til denne forsinkelsen brukes lag med såkalte nematiske flytende krystaller, som legges mellom behandlede plater for å skape en retningsbestemthet og dermed anisotropi. De nematiske flytende krystallene har stavlignende form, og anisotropien gjør at de har forskjellig brytningsindeks i forskjellige retninger. Vi har det som kalles dobbeltbrytning (*birefringence*). En spenning kan varieres over dette laget med flytende krystaller, og da vil retningen til krystallene forandre seg. Dermed vil endret spenning endre forsinkelsen og forskjellige varianter av polarisering kan oppnås [12].

Instrumentet som er brukt i denne oppgaven er en LVR-100-modell fra Meadowlark Optics [27]. Bølgelengdeområdet dette instrumentet dekker er fra 450 til 700 nm, altså det synlige lyset. Denne variable retarderen er igjen koblet til et kontrollapparat, Basic Liquid Crystal Controller modell D4010. Kontrollapparatet kan gi ut en spenning opp til 20 V og har en oppløsning i millivoltområdet. Spenningen sendes som firkantpulser med en frekvens på 2 kHz [27].



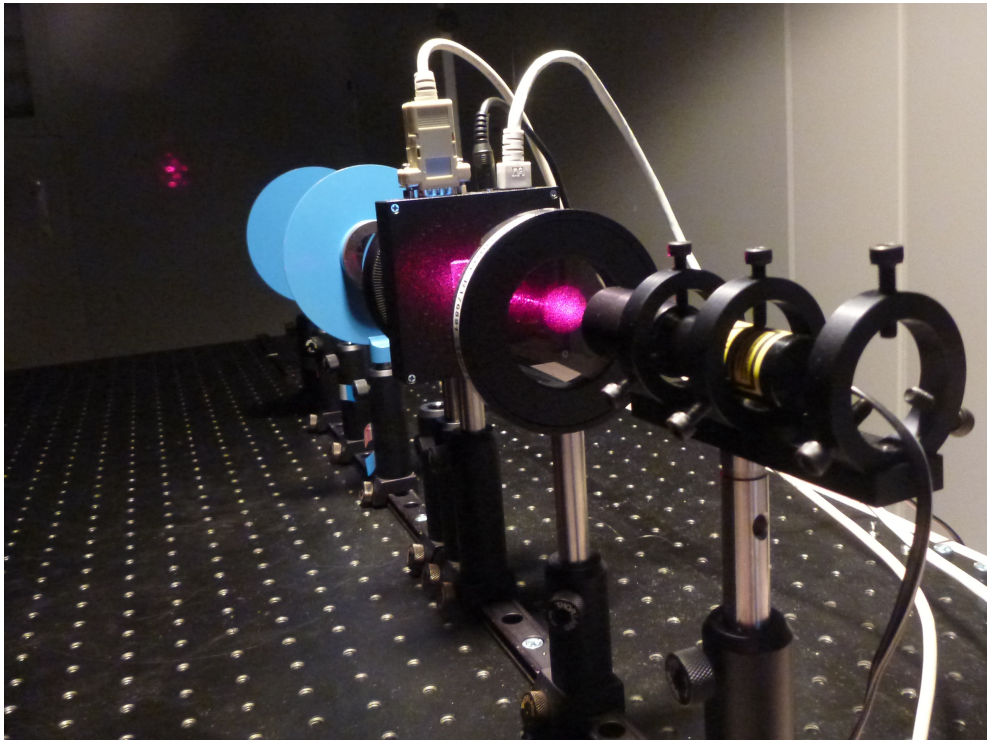
Figur 12: En LCVR satt mellom to polarisatorer, en glødelampe og kontrollapparatet til LCVR-en vises i forgrunnen av bildet. I bakgrunnen ser man en datamaskin og en skjerm som viser spekteret til det utgående lyset. Dette er målt med USB-spektrometeret.

3.1.2 Spatial Light Modulator

En *Spatial Light Modulator* (SLM) benytter elektriske signaler for å endre optiske egenskaper. Dette kan for eksempel være å gjøre et ukoherent bilde koherent. SLM-en kan også sette opp et romlig filter som kan endres i sanntid [12]. En SLM kan altså endre både fase og amplitude for en lysstråle. Flere metoder kan benyttes for å lage slike instrumenter, og Goodman nevner fem av de viktigste variantene i sin bok [12]. Her vil kun metoden med bruk av flytende krystaller være av interesse, siden det er en slik som benyttes under demonstrasjonene. Selve oppbygningen ligner på en LCVR, men har flere lag som gir den flere muligheter når det kommer til å endre lysstråler. For å realisere dette benyttes et nett av piksler som består av flytende krystaller som kan justeres individuelt. En SLM er, i følge produsenten, lagd for å lage

prototyper og bedrive forskning på områder som maskinsyn, digital holografi eller teknisk optikk [13].

Instrumentet som er brukt i denne oppgaven er en LC2002 Spatial Light Modulator fra Holoeye [13]. Selve boksen er satt sammen av et mikrodisplay av flytende krystaller med 832×624 piksler. Denne skjermen er dekket av elektronikk som drives via en datamaskin gjennom VGA-inngangen på grafikkkortet.

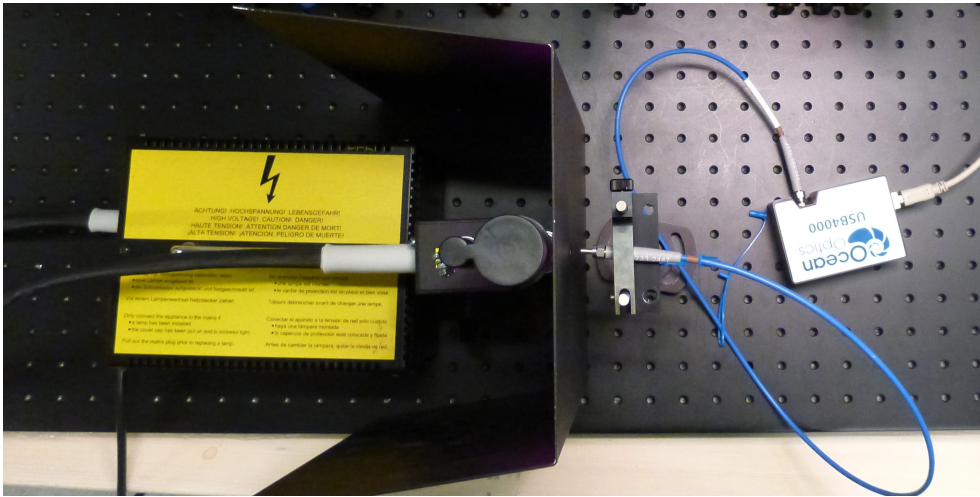


Figur 13: Fra høyre i bildet er det en rød laser, en polarisator, en SLM, en polarisator og to linser. Helt til venstre og bak i bildet ser man avbildningen av Fourierplanet på veggen.

3.1.3 USB-spektrometer

Et spektrometer er et måleinstrument som brukes til å se på intensitet som funksjon av bølgelengde eller andre spektrale parametre. USB, som er en del av navnet på selve instrumentet, er kun en betegnelse for hvordan signalet sendes fra boksen med spektrometeret til datamaskinen. Dette foregår altså via en USB-ledning. For å samle inn lys brukes en optisk fiber. Inne i selve boksen er det et gitter som sprer lyset. Det spredde lyset samles så opp på en CCD-brikke, som har flere lysdetektorer plassert ved siden av hverandre.

Instrumentet som er brukt i denne oppgaven er en USB4000-UV-VIS fra Ocean Optics [28]. Dette spektrometeret er konfigurert for å måle bølgelengder fra 200 til 850 nm. Instrumentet brukes sammen med en datamaskin med SpectraSuite Spectroscopy Software, en programvare fra Ocean Optics.



Figur 14: På venstre side i bildet er det en hydrogenlampe, dekket av en skjerm for å konsentrere lyset mot proben og hindre at lyset det sprer seg. Til høyre er en fiberprobe koblet til et USB-spektrometer.

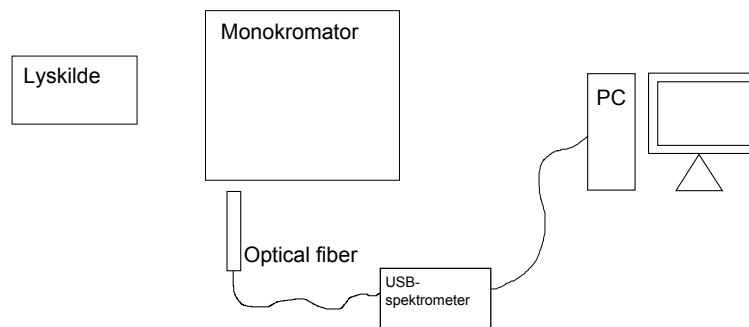
3.2 Spektroskopidemonstrasjon

3.2.1 Utstyr

- Forskjellige lyskilder (glødelampe, lysstoffrør, hvit LED, farget LED, H₂-lampe...)
- USB-spektrometer tilkoblet datamaskin
- Gammeldags monokromator med store spalter
- Positive linser
- Forskjellige typer filter man har for hånden, for eksempel fargefilter eller solbriller

3.2.2 Oppsett

Startoppsett vil se ut som i figur 15. I tillegg vil det kanskje være aktuelt å legge til en linse for å fokusere lyset på den optiske fiberen og en for å fokusere lys på inngangsspalten til monokromatoren. For de andre lyskildene settes alt direkte opp etter hverandre, og den optiske fiberen nærme nok til at bakgrunnslys ikke dominerer over lyskilden.



Figur 15: Startoppsett med monokromator.

3.2.3 Mål

- Vite hvordan et spektrometer fungerer
- Kunne gjenkjenne karakteristiske spekter fra diverse lyskilder
- Ha sett effekten av absorberende materialer på spekteret

3.2.4 Gjennomføring

Dette er en demonstrasjon som egner seg for grupper på 3-6 studenter, helst ikke flere. Det brukes i underkant av 30 min på hele demonstrasjonen. Demonstrasjonen starter med en introduksjon av tema, historien bak og hvorfor spektroskopi har noe med optikk å gjøre. Det første man må få frem er hva spektroskopi er, nemlig å måle bølgelengdeavhengig intensitet. Her kan man også høre med studentene om de har noen kjennskap eller erfaring med spektroskopi fra tidligere. Videre trekkes det historiske perspektivet inn, hvordan Newton startet det hele med prizmer i 1666, og hvordan Fraunhofer gjorde det hele mer fleksibelt ved hjelp av gittere i 1821. Siden den gang har det vært en stor utvikling, blant annet ved bruk av CCD til å fange opp lyset fra et gitter eller prisme og ved å bruke optiske fiber for å transportere lyset. Denne nye teknologien bygger på flere optiske konsepter, og en forståelse av optikk vil være essensielt for å forstå fullt ut hva som skjer i et spektrometer.

Det første oppsettet som vises er som i figur 15, hvor en glødelampe brukes som lyskilde. En positiv linse kan brukes for å fokusere det hvite lyset på inngangen til monokromatoren. Dette er strengt tatt ikke nødvendig, men gir et tydeligere resultat. Monokromatoren er et gammelt apparat, med fordelene at man kan se alt som skjer underveis fordi toppen kan fjernes. Et gitter brukes her til å spre lyset, og ved å endre orienteringen til gitteret vil man variere bølgelengden ut fra monokromatoren. Først kan det være greit å se på lyset som kommer ut av utgangsspalten og forklare hva man ser samtidig som man dreier på bølgelengdevelgeren. Så kan det samme gjøres når man åpner boksen. Da kan også et hvitt papir puttes foran åpningen eller andre steder inne i monokromatoren, og man kan observere at hele spekteret synes. Man kan også følge strålebanen for å se hvordan speilene i monokromatoren brukes til å lede lyset. Her er det viktig å bruke god nok tid, slik at alle studentene får observert hvordan gitteret sprer lyset og hvordan deler av spekteret velges ut med utgangsspalten.

Så må det trekkes frem at dette faktisk ikke er et spektrometer, fordi intensiteten ikke måles. En mulig detektor ville vært øyet, men øyet er veldig dårlig til å se små intensitetsforskjeller. Forklar kort hvordan dette kan gjøres ved å legge til en enkel lysintensitetsmåler, og ta målinger mens man endrer gitteret steg for steg. Spør så studentene om de har noen forslag til hvordan et slikt oppsett kan forbedres for å tegne et mer nøyaktig spekter (tynnere spalter, nytt gitter, ny kalibrering av bølgelengdevelgeren eller eventuelt andre).

Neste steg er å introdusere den nyere teknologien på området, nemlig et USB-spektrometer. Fortell hvordan dette fungerer, samtidig som spektrometeret sammenlignes med oppsettet for monokromatoren. I spektrometeret

er det en CCD-array-detektor i stedet for utgangsspalten og detektoren som trengs ved å bruke en monokromator. Da slipper man å rotere gitteret, og hver piksel på CCD-en vil måle intensiteten for en bølgelengde. For å lede lyset inn i inngangsspalten brukes en optisk fiber. Fordelen med å bruke en optisk fiber er at man alltid vil få samme inngangsvinkel på spalten, noe som ikke er like lett å realisere med det første oppsettet. Sammenlign dette med monokromatoren og se hva som skjer med spekteret (målt ved utgangsspalten til monokromatoren med spektrometeret) når man endrer inngangsvinkelen. Forklar kort prinsippet for en CCD-detektor og en optisk fiber. Dette er pensum i kurset, men studentene har muligens ikke hatt dette på forelesning når demonstrasjonen gjennomføres. Dermed trenger ikke dette å være veldig utfyllende.

Start så med først å fjerne monokromatoren og måle spekteret til glødelampen med USB-spektrometeret direkte. Hør med studentene om noen har sett en lignende form tidligere. Her kan man hinte til sola. Hvis ingen sier det, kan det nevnes at dette minner om strålingen fra et sort legeme. Gå videre med forskjellige lyskilder og se på spekteret. Her må integreringstiden av og til forandres for å få et tydelig signal. Etter et par eksempler kan man la studentene komme med forslag til hvordan spekteret til lyskildene ser ut. Diskuter også hva hvitt lys er og forskjellige måter dette lages på (LED, glødelampe, lysstoffrør).

Forslag til rekkefølge, med momenter som kan kommenteres i parentes:

1. Glødelampe (sort legeme)
2. Lysstoffrør i taket (eksitasjon og fosforiserende materiale)
3. LED-mobil (en LED-lampe og fosforiserende materiale. Hvitt LED-lys kan også lages med tre LED-lamper)
4. LED-indikator på skjerm/pc (smalere spekter, bare en farge, men bredere enn laser)
5. H₂-lampe (eksitasjon, energinivåer og plasma)
6. Eventuelt flere man har for hånden (sparer laser til laboratorieforsøk)

Til slutt, hvis det foregående ikke har tatt for mye tid, går man tilbake til glødelampen. Så settes forskjellige filter man har for hånden mellom lyskilden og den optiske fiberen. Her kan man teste solbriller, vanlige briller med antireflektive filter (AR-filter), fargefilter, en hånd eller andre ting man har liggende. Her vil det være naturlig å vise spekteret direkte og hvordan det

forandres ved å observere med det blotte øye. Det kan også vises absorpsjonsgrafer for lettere å se hva som skjer, som en av mulighetene med et datastyrt spektrometer.

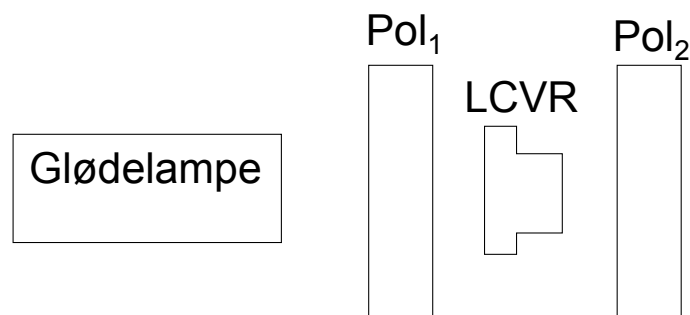
3.3 Polarisasjonsdemonstrasjon

3.3.1 Utstyr

- Glødelampe
- 2 lineære, roterbare polarisatorer
- LCVR
- USB-spektrometer tilkoblet datamaskin
- 3D-briller
- Middels stort speil

3.3.2 Oppsett

Startoppsettet er med kun de to lineære polarisatorene og glødelampe, men plass til LCVR bør allerede være klart på samme skinne slik at det blir som i figur 16. Avstander mellom de forskjellige apparaturene trenger ikke være veldig stor, men kan være greit med en stor nok avstand slik at man kan se på lyset mellom de forskjellige apparatene. Den optiske fiberen til USB-spektrometeret må justeres slik at den samler inn lyset fra den lille åpningen på LCVR-en. Når 3D-brillene skal vises, settes speilet opp slik at flest mulig kan se samtidig.



Figur 16: Oppsett for å se effekten til den variable retardatoren (LCVR).

3.3.3 Mål

- Kjennskap til hvordan LCVR fungerer og hvordan flytende krystaller kan brukes til å modulere lys
- Kontroll på polarisering, både eksperimentelt og matematisk

- Kjennskap til flere områder i hverdag og arbeidsliv hvor polarisering er viktig

3.3.4 Gjennomføring

Dette er en demonstrasjon som egner seg for grupper på 3-6 studenter, helst ikke flere. Det brukes i underkant av 30 min på hele demonstrasjonen. Demonstrasjonen startes med et spørsmål til studentene om hva de allerede vet om polarisering. Veilederen supplerer med definisjonen om at det er retningen til E-feltet for lys hvis dette ikke kommer frem. Man kan også eventuelt bygge videre på andre momenter som studentene kommer med. Gå videre med å høre om de er kjent med hvordan man kan blokkere lys ved å bruke to kryssede polarisatorer. Dette burde mange ha mulighet til å vite, siden det er pensum i bølgefysikk som mange allerede har hatt.

Man setter så på lampen og hører om studentene husker hva spektrometeret måler (intensitet langs y -aksen og bølgelengde langs x -aksen). La så en av studentene vri på de to polarisatorene, for å se effekten av retningen. Finn vinkler hvor det blir total utslokning og maksimalt signal. Diskuter felles eventuelle unormaliteter i spekteret, som at polarisatorene ikke klarer å sperre alt lys ved lange bølgelengder selv om de er krysset og eventuelle effekter for korte bølgelengder man går glipp av siden glødelampen fungerer dårlig i dette bølgelengdeområdet.

Gi så studentene muligheten til å komme med forslag til hva polarisering kan brukes til, både i hverdagen, naturen og arbeidslivet. Her vil det også være aktuelt å trekke frem momenter som kan ha vært nevnt i starten av demonstrasjonen. Noen av tingene som kan nevnes, med et par punkter som kan legges til, er:

- Fotoelastiske målinger (kryssede polarisatorer og fotoelastiske modeller. Billig, men effektivt, mye brukt)
- Solbriller (Brewsters vinkel og lineære polarisatorer)
- Bier (navigasjon etter polarisering)
- Medisin (ekstra informasjon og forenklinger)
- 3D-film (to bilder samtidig, adskilt ved polarisering)

Så kommer hovedpunktet i denne demonstrasjonen inn, nemlig en LCVR. Denne forklares ved å tegne figurer (se figur 7), trekke frem dobbeltbrytning, hvordan spenning brukes til å forandre retardasjonen og de flytende krystallenes stavform og anisotropi. Så settes LCVR-en inn mellom de to

polarisatorene. Nå må de to polarisatorene stå krysset, men også stå 45° i forhold til LCVR-en. La en av studentene få stille inn vinklene så dette blir riktig. Hele systemet kan sammenlignes med fotoelastiske målinger, som er nevnt tidligere. Sett så opp Jones-matrisen for systemet, og ta med de viktigste overgangene frem til intensiteten. Det kan være greit å vise hvordan man generelt går fra en Jones-vektor til intensitet. Utregningen skal ende opp med en sinus-funksjon som avhenger av den halve retardansen, og ekstremalverdier kan settes opp. Disse vil man også være på jakt etter når spenningen på LCVR-en nå skal varieres. En god startverdi for spenningen er rundt 6 V. La en av studentene få justere den nedover. Pass på at alle ser skjermen og kan følge med på hvordan topper og bunner flytter seg. La studentene stille spenningen helt til null, og eventuelt oppover hvis noen ønsker å se hva som skjer da.

Til slutt vises hvordan LCVR-en kan bytte mellom to spenninger. Sett den til å gå mellom to verdier som gir forskjellig farge. Studentene kan da se at den bytter mellom disse to fargene hvis frekvensen settes lav nok (f.eks. 0,5 Hz). Fortell videre at dette er en enkel modell av hvordan f.eks. en tv-skjerm varierer det som vises ved å variere spenning. Dette skal vises tydeligere i neste demonstrasjon, ved å vise en SLM.

Siste punkt på agendaen er å la studentene få teste 3D-briller. De skal ta på et par 3D-briller og se på seg selv i speilet med et øye lukket. Pass på at alle får prøve. Så skal de både forklare hva de ser og hvorfor de tror det er sånn. Her kan det gjerne trekkes frem hvorfor det ikke kan brukes lineære polarisatorer ved 3D-film (vinkling av hodet vil ødelegge bildet), at det stort sett brukes sirkulærpolarisering for å realisere 3D-briller og hvordan man kan lage egne 2D-briller (bruke to høyre/venstre-glass). Studentene kan også prøve å se på hverandre og prøve å forklare hvorfor det nå ikke blir helt svart (ikke helt identiske briller).

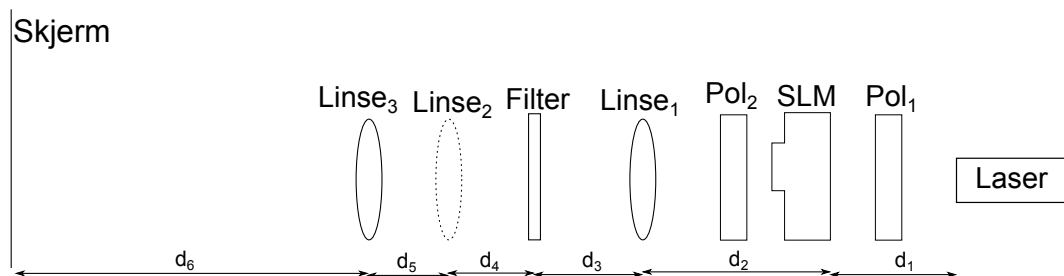
3.4 Demonstrasjon med SLM og Fourieroptikk

3.4.1 Utstyr

- 2 positive linser ($f=10$ cm)
- Laser med stråleforbreder (middels sterk, klasse 3)
- 2 lineære, roterbare polarisatorer
- Romlige filter (pinnhull, tråd, spalte el.l.)

3.4.2 Oppsett

Dette oppsettet må opplinjeres på forhånd med holdere på plasseringene angitt i figur 17. Avstandene som kan brukes for to linser med fokallengde på 10cm er: $d_1 = 12,5$ cm, $d_2 = 20,7$ cm, $d_3 = 11,0$ cm, $d_4 = 10,3$ cm, $d_5 = 9,4$ cm, $d_6 \approx 3,5$ m. Plasseringen til de to polarisatorene har liten betydning, så lenge de står mellom riktige apparater, som i figur 17. Andre linser kan også brukes, men da vil ikke målene her kunne brukes. Den andre linsen kan flyttes mellom plassering 2 og 3. I plassering 2 ser man Fourierplanet på skjermen, plassering 3 gir bildeplanet på skjermen. En hvit vegg fungerer godt som skjerm, så lenge man har et mørkt rom.



Figur 17: Oppsett med SLM og plasseringer for de andre komponentene.

3.4.3 Mål

- Se hvordan ny teknologi kan brukes til å styre amplitude og fase til et lysfelt
- Kjennskap til SLM
- Erfare hvordan Fouriertransformen ser ut og hvordan den kan brukes til å modulere bilder

3.4.4 Gjennomføring

Denne demonstrasjonen kan gjennomføres med 10-12 studenter samtidig, men kan også gjøres i mindre grupper hvis det passer seg. Det brukes i underkant av 30min på hele demonstrasjonen. Innledningsvis skal ikke filteret være med, og linsene skal stå i posisjon 1 og 3 (se figur 17). Et vanlig svart/hvitt-bilde skal være på skjermen, og det skal helst ha klare kontraster og detaljerte områder, for å se at det er skarpt og for å bruke det til filtrering senere i demonstrasjonen. Pass på at alle studentene står rundt strålen, både med hensyn til sikkerhet, at de ikke skal bli for passive og at de ser skjermen tydelig.

Start med å introdusere hva det skal handle om i denne demonstrasjonen; diffraksjon, Fourieroptikk og bruk av en SLM. Hør med studentene hva de kan om diffraksjon fra tidligere. Her kan det kobles til Bragg-diffraksjon, som mange har lært om i Faste stoffers fysikk, et emne som går parallelt med Optikk. Så forklares hvordan SLM-en kan sammenlignes med LCVR-en fra forrige demonstrasjon. Den største forskjellen er at her kan man styre flere hundretusen piksler og gi dem forskjellig faseskift. For å slippe unna bølgelengdeavhengigheten i SLM-en, som man også så i LCVR-en, brukes en monokromatisk laser. Forklar så poenget med de to polarisatorene, og vis effekten av å stille på de to hver for seg. Den første polarisatoren sikrer polarisert lys inn i SLM-en. Den andre polarisatoren gjør at det man ser på skjermen kun er amplitudeavhengig. Polarisatorene senker også effekten, for å gjøre oppsettet mindre farlig. Dette gjøres ved å endre retningen på de to i forhold til laserens egen polarisasjonsretning. Til slutt kan man høre om studentene vet hva poenget med linsene er, i forhold til at det er en forstørrelse av skjermbildet på veggen. Dette er et avbildningsoppsett og kan også sammenlignes med en prosjektør. Her kan man også sammenligne det med tidligere laboratorieoppgaver og forelesninger om avbildning.

Etter kort å ha forklart selve oppsettet og alle komponentene kommer teorien inn igjen. Veilederen spør studentene hva de vil finne i fokuspunktet til linsa. Her skal Fourierplanet ligge, og studentene kan gjerne få prøve å finne dette på egenhånd mellom de to linsene. Dette vil være Fouriertransformen til bildet på skjermen. Flytt så den andre linsen fra posisjon 3 til posisjon 2. Da ser man det samme mønsteret man kunne finne mellom linsene på veggen. Spør først om noen kan tenke seg hvorfor det er et gittermønster på veggen, hvor det igjen kan kobles til hva de har sett i Faste stoffers fysikk. Her er altså Fourierplanet forstørret på veggen, slik at det kan observeres lettere. Vis da forskjellige mønster og hvordan de påvirker Fourierplanet. Her kan sagtannmønster i forskjellige retninger være en god start. Vis så en Fresnel sonelinse, noen tydelige geometriske mønster og lag eventuelt andre bilder

med SLM-ens egen programvare, OptiXplore. Til slutt kan det også vises et bilde som ser helt kornete ut på skjermen. Dette vil, med litt fantasi, kunne skimtes på veggen, og man vil kunne bestemme hva det er for noe. Her kan eksempelbildene fra OptiXplore brukes, eller egne varianter. I hele denne seansen kan studentene brukes som observatører, og de kan få i oppgave å forklare hva de ser.

I siste del av denne demonstrasjonen skal en av fordelene ved Fourier-optikk vises, nemlig filtrering i Fourierplanet. Oppsettet settes tilbake til startposisjonen, og et pinnhull settes inn som vist i figur 17. Igjen tar man frem svart/hvitt-bildet på skjermen og viser hvordan forskjellig størrelse på pinnhullet fører til forandring i bildet. La studentene selv prøve å finne sammenhengen mellom størrelse på pinnhullet og det som skjer med bildet (fjerner høye frekvenser). Man kan også flytte pinnhullet slik at det sperrer midtpunktet, og dermed filtrerer man ut de lave frekvensene. Andre romlige filtre man har kan også testes, for eksempel tynne spalter, tråder eller andre ting man finner som kan blokkere deler av Fourierplanet.

3.5 LightTools

3.5.1 Utstyr

Dette er en kombinasjon av en demonstrasjon og at studentene skal jobbe på egenhånd. Det som trengs er en datamaskin med programvaren og mulighet til å vise frem det man gjør på et lerret. Datamaskiner må også være tilgjengelig for studentene, slik at de kan teste ut programmet på egenhånd.

3.5.2 Mål

- Gjøre seg kjent med LightTools
- Få et verktøy til lett å kunne teste optisk teori
- Se hvordan optisk programvare kan brukes til å lage prototyper og få et innblikk i hvordan det kan brukes i forskning

3.5.3 Gjennomføring

LightTools er en optisk programvare som studentene skal få et lite innblikk i. For å gjøre dette holdes først en introduksjonsforelesning, med demonstrasjoner av hva programmet kan gjøre. Etter det får studentene i oppgave å teste ut programmet på egenhånd. Selve introduksjonsforelesningen kan gjøres på forskjellige måter. En mulighet er å legge det som en kort bit av vanlig forelesning spredt utover starten av semesteret. Da vil studentene få stadig nye innblikk i hvordan programmet fungerer, samtidig som det brukes til å illustrere det som gjennomgås i forelesning. En annen mulighet er å sette av en egen forelesning kun til LightTools. Da vil det være naturlig å fortelle om hva LightTools kan brukes til, vise noen av standardfunksjonene og vise noen eksempler som illustrerer optiske konsepter de allerede har gjennomgått. Her kan for eksempel vises:

- Forskjellen på tykk og tynn linse (når er tynn linse en god antagelse?)
- Se på den paraksiale antagelsen (hvor stor vinkel kan man egentlig ha?)
- Refleksjon, brytning og transmisjon i vann (hvordan vil lyset bevege seg, og hvor mye i hver retning?)
- Hvordan lage enkle prototyper (for eksempel av lamper eller forskningsoppsett)

Studentene bør også få mulighet til å komme med egne innspill, slik at de demonstrerte filene ikke bare blir en lysbildevisning, men dynamiske figurer som både kan flyttes og endres. Økten avsluttes med å presentere oppgavene som skal gjennomføres av studentene. Her vil det igjen være et tids- og ressurs spørsmål i forhold til om man har tid til egne øvingstimer på datalab, for dette vil kreve opplæring av studentassistenter og mer arbeid for veileder.

Oppgaveforslag:

1. Lag din egen lampe eller annen lyskilde. Den skal brukes til et spesifikt belysningsformål, som du selv velger. Forklar dine valg i modellen.
2. Velg en av oppgavene fra den første laboratorieøvingen om avbildning og simuler den med LightTools.

4 Resultater med diskusjon

I dette kapittel trekkes det fram resultater fra studentene, observasjoner av labveilederne underveis og hva som faktisk ble gjennomført, og alt blir diskutert innemellom resultatene og kommentarene fra gjennomføringen. Diskusjonen er lagt sammen med resultatene slik at teksten skal få en bedre flyt, og at det skal bli lettere å sammenligne det som faktisk skjedde med hva man ønsker skal skje i en demonstrasjon.

Starten av kapittelet vil ta for seg bakgrunnen til resultatene og svarene fra studentene. I andre del av kapittelet trekkes det som er gjort frem, med en demonstrasjon av gangen. For hver demonstrasjon diskuteres det som er gjennomført, samtidig som studentenes meninger trekkes inn og hva veilederne har kommentert underveis og i etterkant. De tre demonstrasjonene ble holdt av tre forskjellige veiledere, hvor to av dem var fagets labveiledere og den siste var forfatteren selv. Demonstrasjonene vil også kobles opp mot teorien, både i forhold til hva som blir gjennomgått av optikk og i forhold til hvordan gjennomføringen og planleggingen gikk i forhold til den didaktiske teorien. Målene som ble satt for hver demonstrasjon vil også bli vurdert opp mot svarene fra studentene og hva veilederne mener. LightTools-øvingen vil også diskuteres, med tanke på både studentenes utbytte og hva som kunne vært gjort annerledes hvis man kunne prøvd på nytt. Flere anbefalinger og tanker til videre arbeid kommer i siste kapittel, kapittel 5.

4.1 Introduksjon

Etter alle de tre demonstrasjonene har det vært lagd små spørreundersøkelser på fagets nettside. Det ble også oppfordret til at studentene skulle komme med kommentarer når de skulle levere LightTools-øvingen. Et utdrag av resultatene vises her. Dette utdraget viser hvordan studentene har vurdert både seg selv og demonstrasjonene. I tillegg ble det etter hver demonstrasjon lagt ved et par spørsmål rundt teorien fra demonstrasjonen, med et kommentarfelt studentene kunne bruke. Disse spørsmålene ligger med som vedlegg. Totalt var det 50 studenter som gjennomførte alle laboratorieoppgavene og 50 studenter som leverte LightTools-øvingen. Spørreundersøkelsene ble besvart av 25, 17 og 12 studenter, for henholdsvis spektroskopidemonstrasjonen, polarisasjonsdemonstrasjonen og demonstrasjonen med SLM og Fourier-optikk. I tillegg til spørreundersøkelsene har flere studenter kommet med direkte kommentarer, både muntlig og skriftlig, til LightTools-øvingen. De to labveilederne har også bidratt med å svare på spørsmål (se vedlegg), og har også kommet med kommentarer til både gjennomføring og opplegg underveis.

Figurene 18 til 33 viser svarene på de viktigste spørsmålene for denne oppgaven fra spørreundersøkelsen. Figurene har spørsmålet som er stilt til studentene over diagrammet, og en kort oppsummering av resultatet og hvilken demonstrasjon det hører til under.

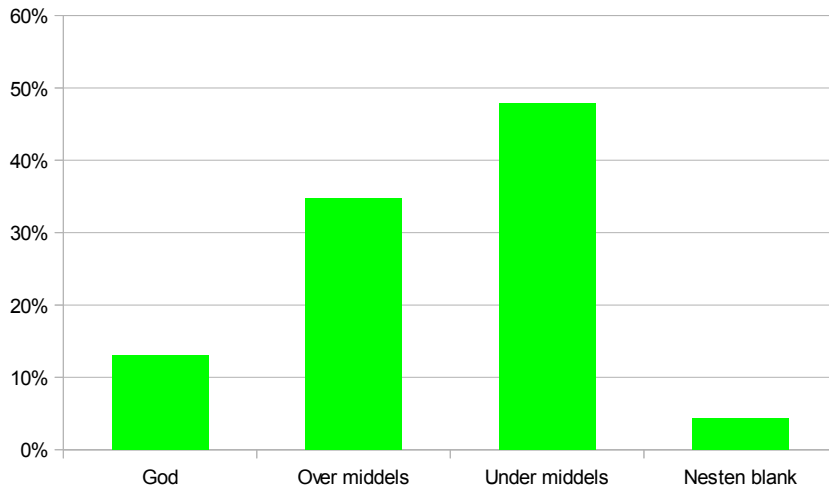
4.2 Studentsitater

Studentene hadde flere tilgjengelige kommentarfelt i de tre spørreundersøkelsene. Disse feltene ga følgende sitater:

- *spennende med læring på andre måter enn tavleundervisning*
- *Lærer bedre og forstår mer gjennom å se sammenhengene (i forhold til at eksperimentell fysikk er viktigst)*
- *Ting gir mening når man får høre det (I forhold til teoribakgrunn)*
- *Greit å se "teori i praksis", og litt om hva det faktisk brukes til*
- *Nothing special to comment. Simply a very friendly demonstration, even for me I don't like too much optics :D*
- *lærerikt og gøy! praktisk tilnærming er gøy*
- *Lab tar mye tid, men man kan samtidig lære endel*
- *Har ikke vært i forelesninger eller øvingstimer. Synes foreleser ikke er interessant*
- *Har nesten ikke gjort øvingar...*
- *Optikk var ikke det faget som ble prioritert av meg dette semesteret*

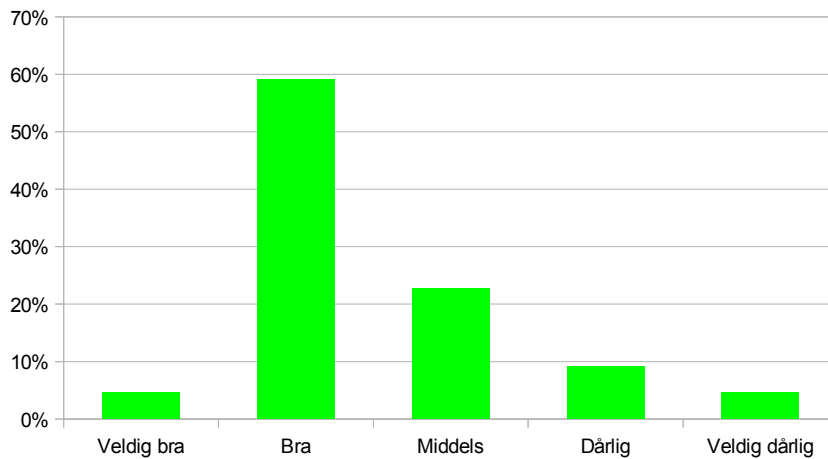
4.3 Diagrammer

Min teoribakgrunn i forhold til demonstrasjonen:



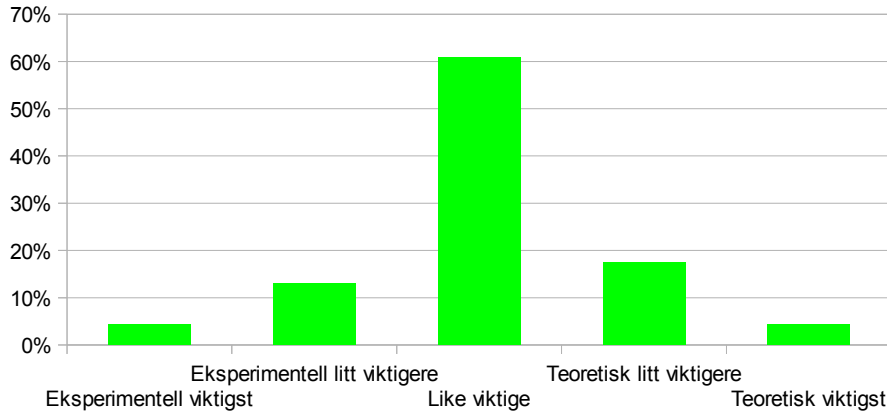
Figur 18: Studentene ligger rundt middels på dette spørsmålet fra spektroskopidemonstrasjonen. Det er få som svarer at de har veldig god eller veldig dårlig kontroll.

Mitt utbytte av demonstrasjonen var:



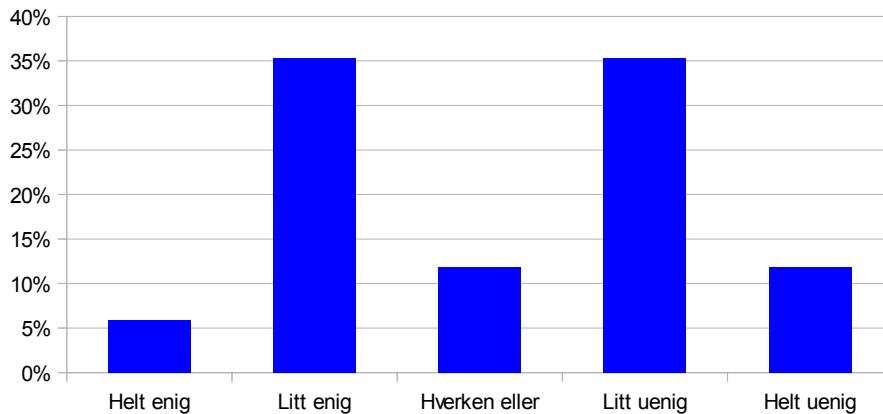
Figur 19: Dette diagrammet viser tydelig at studentene selv mente de fikk et bra utbytte. Et klart flertall har svart positivt, selv om få har brukt kategorien veldig bra. Dette spørsmålet er hentet fra spektroskopidemonstrasjonen.

Mitt syn på forholdet mellom teoretisk og eksperimentell fysikk i fysikkstudiet:



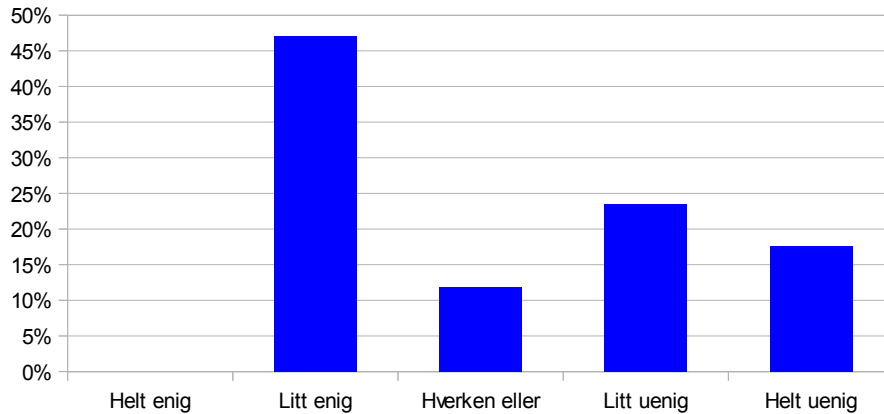
Figur 20: Her vises det ingen klar tendens mot den ene eller andre siden. Det kan se ut som studentene er ganske enige om at eksperimentell og teoretisk fysikk er omtrent like viktige. Dette spørsmålet ble stilt etter spektroskopidemonstrasjonen.

Jeg var hovedsakelig pasivt deltakende under demonstrasjonen



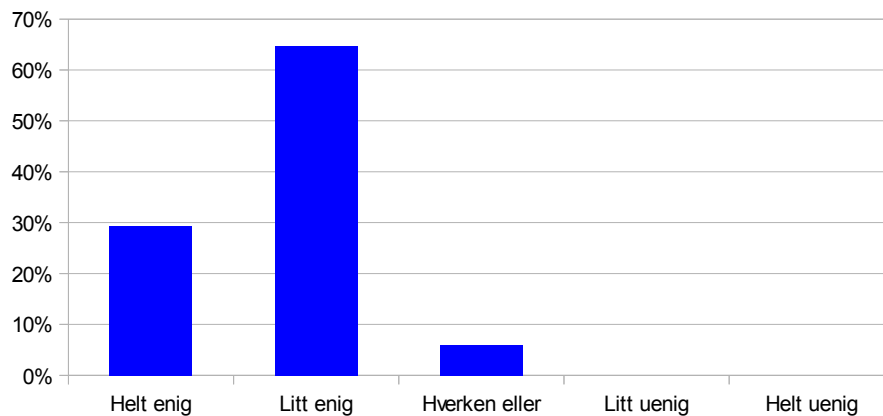
Figur 21: I dette diagrammet har studentene delt seg, med omtrent halvparten positive og halvparten negative. Her er det tydeligvis en stor forskjell mellom hvordan studentene har deltatt på demonstrasjonen. Dette spørsmålet er hentet fra polarisasjonsdemonstrasjonen.

Jeg utelot å svare på spørsmål under demonstrasjonen, selv om jeg kunne svaret

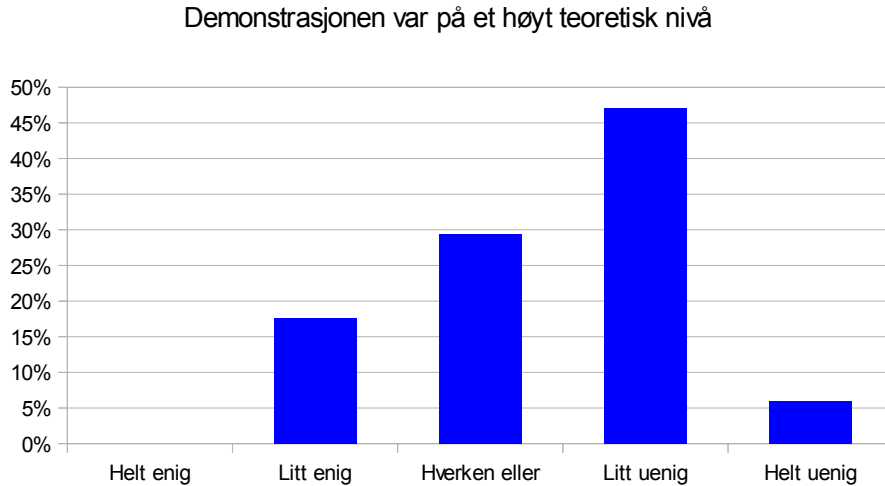


Figur 22: Her ser man at omtrent halvparten av studentene holder tilbake svar, selv om de kan svaret. Studentene er omtrent delt i to, noe som sammenfaller med resultatene i figur 21. Disse svarene kommer fra polarisasjonsdemonstrasjonen.

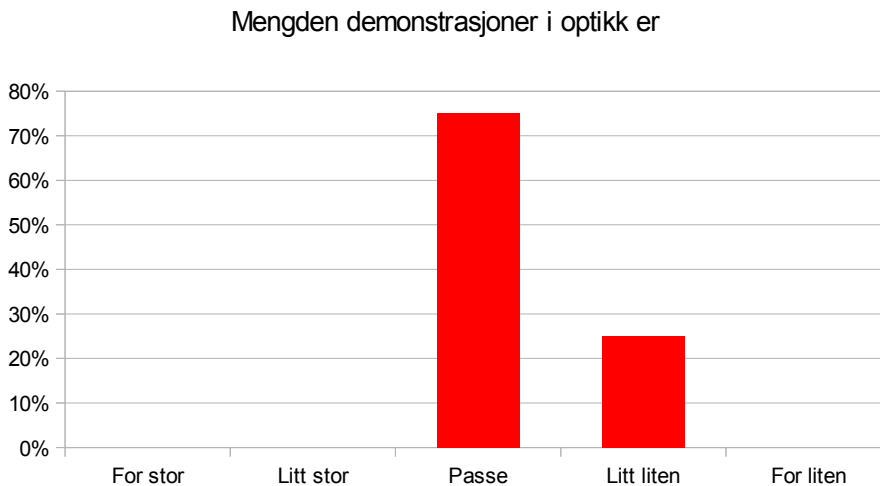
Demonstrasjonen viste hvordan ny teknologi bruker polarisert lys



Figur 23: Diagrammet viser at studentene var enige i at denne demonstrasjonen viste hvordan ny teknologi bruker polarisert lys. Studentene har svart nesten utelukkende positivt på dette spørsmålet fra polarisasjonsdemonstrasjonen.



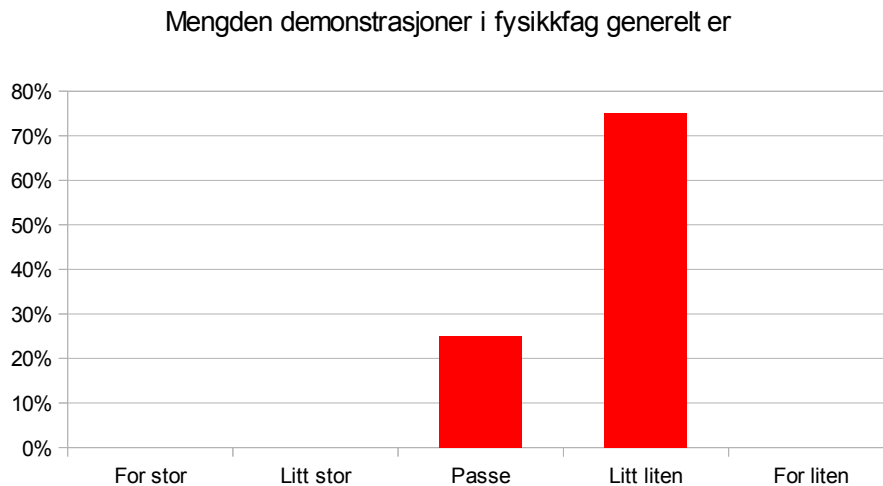
Figur 24: Studentenes vurdering av demonstrasjonens nivå ligger litt på den negative siden, noe som tyder på at de ikke mener det var et høyt nivå på polarisasjonsdemonstrasjonen hvor dette spørsmålet ble stilt.



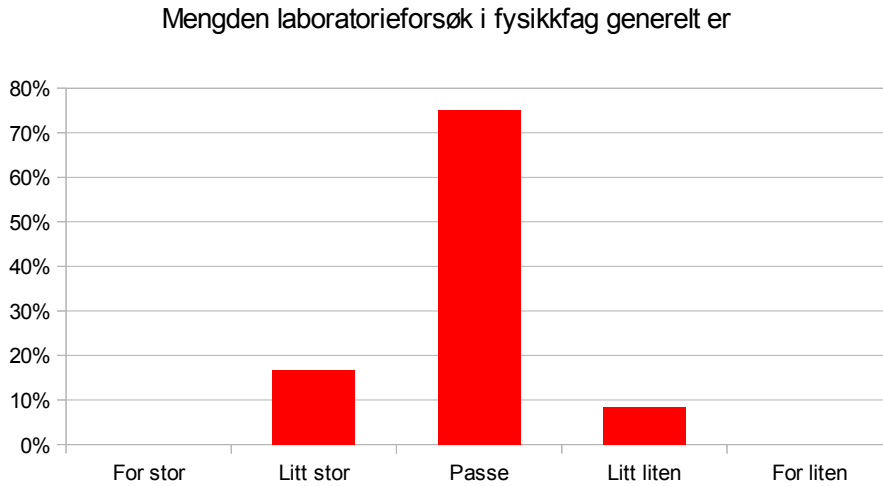
Figur 25: Studentene virker fornøyde med mengden demonstrasjoner i optikk, og ingen synes det er for mye. Dette spørsmålet ble stilt etter den tredje demonstrasjonen, som handlet om Fourieroptikk.



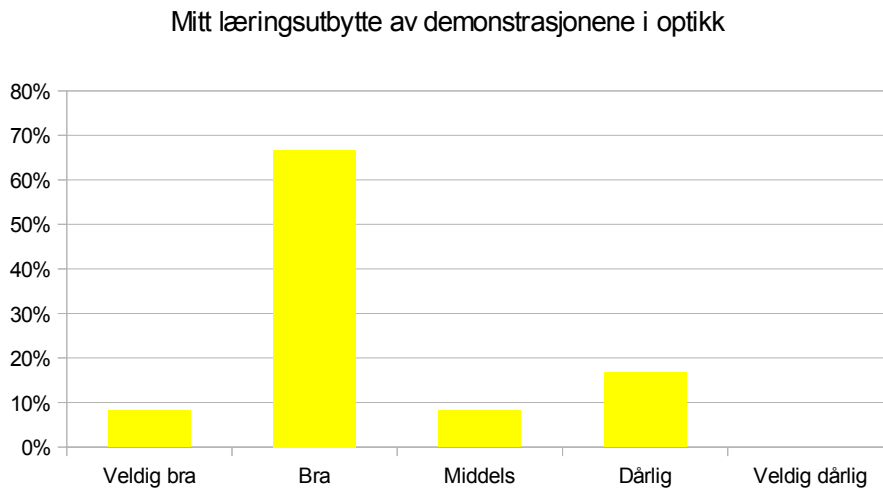
Figur 26: Mengden laboratorieforsøk i optikk ser ut til å passe studentene, og kun noen få mener at mengden er litt for stor. Dette spørsmålet er fra demonstrasjonen med SLM og Fourieroptikk.



Figur 27: Ut i fra dette diagrammet kan det se ut som studentene gjerne skulle hatt mer demonstrasjoner i fysikkfagene. Dette spørsmålet er fra demonstrasjonen med SLM og Fourieroptikk.

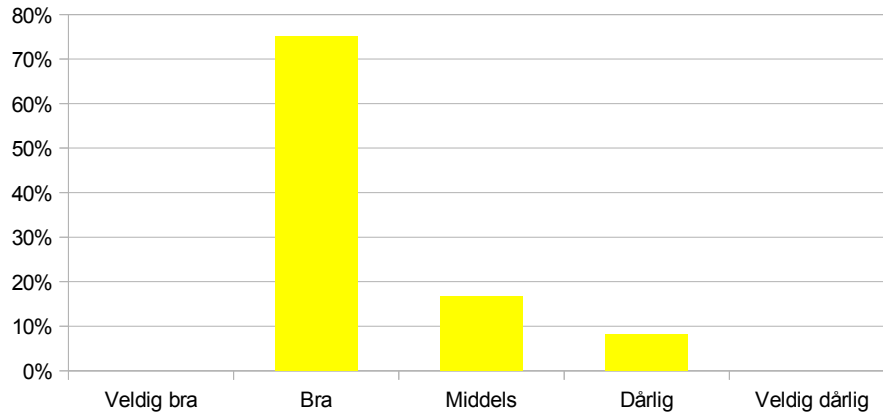


Figur 28: Studentene ser ut til å være ganske enige om at mengden laboratorieforsøk i fysikkfag er passelig. Dette svarte de på etter demonstrasjonen med SLM og Fourieroptikk.



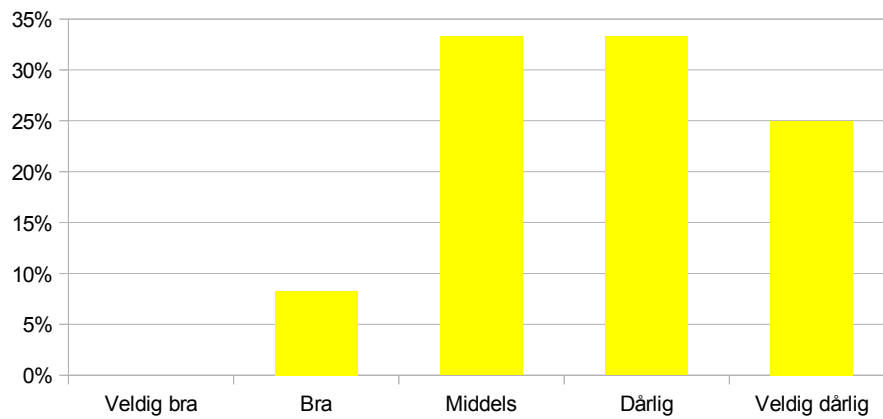
Figur 29: Flertallet ser ut til å ha hatt et bra læringsutbytte av demonstrasjonene, men dette spørsmålet har ikke utelukkende positive svar. Dette spørsmålet er hentet fra demonstrasjonen med SLM og Fourieroptikk.

Mitt læringsutbytte av laboratorieforsøkene i optikk

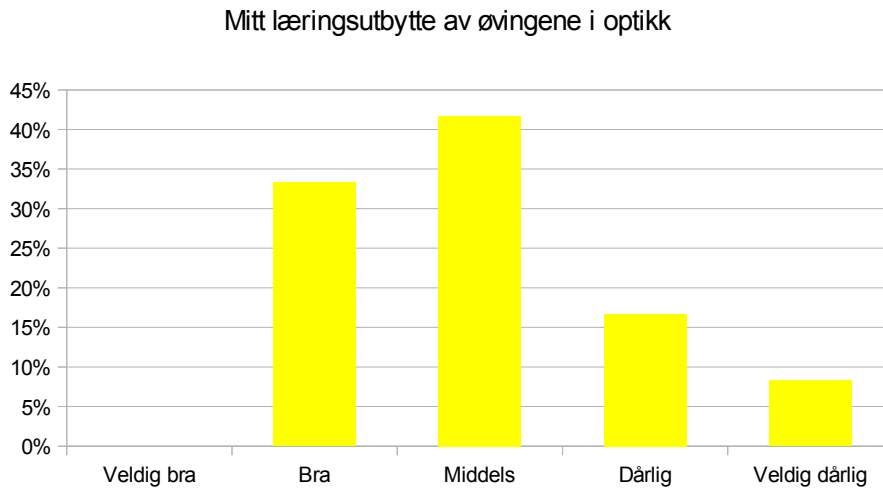


Figur 30: Som i figur 29 er studentene enig om et bra læringsutbytte, denne gangen fra laboratorieforsøk. Dette spørsmålet ble stilt etter den siste demonstrasjonen, som handlet om Fourieroptikk.

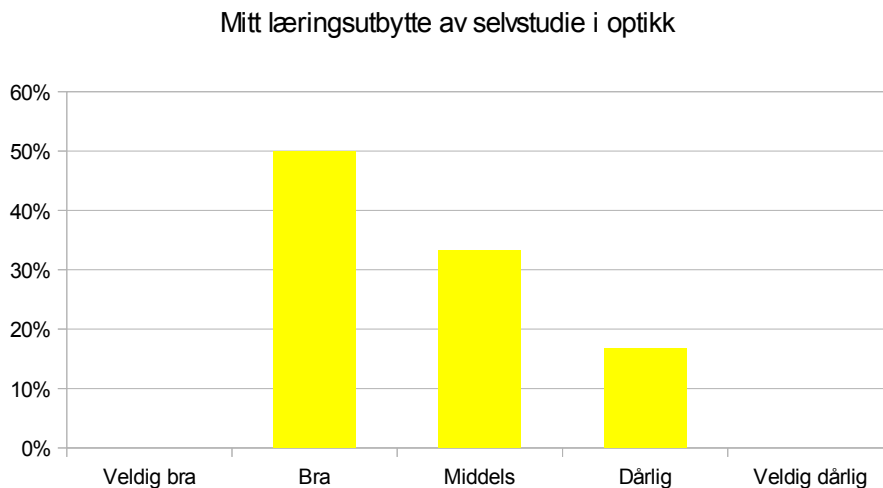
Mitt læringsutbytte av forelesningene i optikk



Figur 31: Med tanke på forelesninger ser studentene ut til å være mer uenige, men det generelle bildet ser ut til at de er negative. Flere studenter har svart negativt i forhold til læringsutbytte fra forelesninger enn på noen av de andre læringsformene. Dette spørsmålet er hentet fra demonstrasjonen med SLM og Fourieroptikk.



Figur 32: Studentene er ikke helt enige i hva de synes om øvingene. Det kan se ut som studentene har delt seg opp i tre nesten like deler, en på den positive siden, en på midten og en på den negative siden. Dette spørsmålet er hentet fra demonstrasjonen med SLM og Fourieroptikk.



Figur 33: Studentenes mening i forhold til sitt eget læringsutbytte av selvstudie ser ut til å være positivt. Omtrent halvparten mener de har hatt et bra læringsutbytte, mens resten fordeler seg mellom middels og dårlig læringsutbytte. Svarene på dette spørsmålet ble hentet inn etter demonstrasjonen med SLM og Fourieroptikk.

4.4 Spektrometerets glansdag

Den første demonstrasjonen handlet om spektroskopi og lyskilder. Målet med denne demonstrasjonen var å lære hvordan et spektrometer fungerer, hvordan spekteret til forskjellige lyskilder ser ut og ha sett effekten av absorberende materialer. Alle tre punkter ble dekket av selve demonstrasjonen, men spørsmålet blir om studentene satt igjen med den kunnskapen som var forventet etter demonstrasjonen. Ser man på svarene fra spørreundersøkelsene som går direkte på teorien ser det ganske positivt ut. Et av spørsmålene gikk ut på å plassere riktig lyskildenavn til riktig spørsmål. De aller fleste har klart dette, selv om noen kommenterte at det var vanskelig å lese bølgelengdene fordi grafene ble små (se figur 34 i vedlegget). Allikevel er tendensen her tydelig nok til at det kan argumenteres for at studentene etter demonstrasjonen har mulighet til å gjenkjenne forskjellige spektrum. Et annet spørsmål man da kan stille seg er om de ville klart dette også før demonstrasjonen, og om det egentlig var demonstrasjonen som gjorde at de kunne se forskjell på hvitt lys fra en glødelampe, et lysstoffrør eller en LED-lampe. Ut i fra kommentarer fra studentene på selve gjennomføringen kunne det virke som flere tenkte at det var frekvenser langs x -aksen. Dette ble oppklart, og hadde dette problemet fortsatt vært til stede ville muligens flere blandet den røde laseren og den grønne LED-lampa.

Studentene skulle også vite hvordan et spektrometer fungerer etter å ha deltatt på demonstrasjonen. For å teste dette fikk studentene et spørsmål hvor de skulle krysse av alle ord de mente hadde noe med spektroskopi å gjøre. Her svarte alle bølgelengde og intensitet, noe som tyder på at de vet hva som måles. Rundt halvparten krysset også av på de andre tre ordene som var relatert til spektroskopi, nemlig gitter, prisme og monokromator. Dette tyder på at de fleste har fått med seg hva spektroskopi handler om, og veldig få gikk i fellene som var lagt ut. Selv om de ikke direkte fikk vist at de forstår hvordan et spektrometer fungerer, så indikerer svarene at studentene i det minste kjenner til konseptene rundt spektroskopi og et spektrometer.

Hovedtanken med denne demonstrasjonen var å vise studentene hvordan spektroskopi ble gjort tidligere, ved en monokromator, og så vise hvor mye mer fleksibelt det blir med nyere teknologi, hvor det her ble brukt et USB-spektrometer. Dette skulle dermed være med på å vise hvordan teknologien spiller en viktig rolle i optikkfaget, og at teknologiens utvikling også fører til naturvitenskapens fremgang. Innsiden av monokromatoren og innsiden av USB-spektrometeret er i prinsippet veldig like, så det at man kan åpne monokromatoren gjør det hele veldig visuelt og håndgripelig. Det var også flere forskjellige typer lyskilder til stede, slik at mange forskjellige spekter kunne observeres.

I pensum i optikk-faget inngår både gitter, lysbrytning, litt om detektorer og utregning av intensitet, i tillegg til at de skal lære litt om spektroskopi. Denne demonstrasjonen tok dermed opp flere momenter fra pensum, både fra forelesningene og stoff studentene skulle ha lest på egenhånd.

Veilederen for denne demonstrasjonen hadde et håp om at demonstrasjonen skulle skape en større interesse for faget hos studentene. Dette siste punktet, interessen hos studentene, er vanskelig å måle kvantitativt og ble heller ikke etterspurt fra studentene. Fra veilederens synspunkt kunne det likevel ses tegn hos studentene som kunne tyde på en økende interesse. Noe som derimot ble etterspurt var utbyttet studentene hadde av demonstrasjonen (se figur 19). Her er det et tydelig flertall som mener de har fått et bra utbytte. Dette kan også ses i sammenheng med bakgrunnskunnskapene (se figur 18), hvor de fleste betraktet sin teoribakgrunn som omtrent midt på treet før demonstrasjonen. De fleste kom dermed inn til demonstrasjonen med litt bakgrunnskunnskap. Det gjør det lettere å bygge videre på denne kunnskapen og dermed at studentene får et godt læringsutbytte ved å delta på demonstrasjonen. Det er kun en student som har svart at han har hatt et veldig bra utbytte av demonstrasjonen. Dette kan tyde på at selv om det har gått bra, finnes det fortsatt store muligheter for å gjøre det enda bedre, slik at studentene sitter igjen med mer kunnskap og flere gode erfaringer etter demonstrasjonen.

Et annet ønske fra den første veilederen var å gjennomføre demonstrasjonene for mindre grupper. Gruppen ble dermed delt i to, slik at det aldri ble mer enn seks personer på en demonstrasjon. Dette var i håp om lettere å engasjere studentene, noe som, i følge teorien, skal forbedre studentenes læringsutbytte. Forskerne går så langt som å si at demonstrasjoner uten engasjement og aktivitet hos studentene like godt kan kuttes ut. Dermed blir det viktig å tenke på et slikt perspektiv både i forkant og etterkant av gjennomføringen. Den første demonstrasjonen bar litt preg av den gamle, tradisjonelle måten å holde demonstrasjoner, hvor veilederen står for prattingen stort sett hele veien og studentene blir et passivt publikum. Studentaktivitet ble dermed et viktig moment for ekstra fokus under den andre demonstrasjonen, om polarisering, og vil diskuteres videre når den trekkes frem.

En siste ting man prøvde å avdekke etter første demonstrasjon var hvordan studentene stilte seg i forhold til eksperimentell fysikk. Dette var både for å få et overblikk over studentgruppas interesser og for å se om eventuelt ekstreme verdier her kan være årsaken til andre merkelige svar som senere kunne dukke opp. Studentene ble dermed stilt spørsmålet om hvilket syn de hadde på forholdet mellom teoretisk og eksperimentell fysikk (se figur 20). Ut i fra resultatene kommer det ikke frem noen tydelig tendens mot noen

side, selv om optikk gjerne blir sett på som et eksperimentelt fag. Dette kan komme av at mange ikke velger faget selv, men må ta faget på grunn av studieretningen de går. Dermed er studentene en mer blandet gruppe enn hvis det ikke hadde vært obligatorisk. Svarene på dette spørsmålet blir dermed heller ikke vektlagt når andre spørsmål trekkes frem senere, fordi svarene ikke vurderes som ekstreme nok til at de må tas hensyn til.

Spektrometeret fikk virkelig vist seg under denne demonstrasjonen, og studentene fikk også muligheten til å bli bedre kjent med instrumentet i både neste laboratorieøving og neste demonstrasjon.

4.5 Polarisering til nye høyder

Den andre demonstrasjonen tok for seg polarisering, og skulle vise hvordan polarisering brukes både i hverdagen og arbeidslivet. Studentene skulle også få en bedre kjennskap til hvordan flytende krystaller brukes til å modulere lys, og polarisering ble studert både eksperimentelt og matematisk. For at studentene skulle få mest mulig ut av denne demonstrasjonen ble den lagt etter forelesningene om polarisering, slik at de hadde et lite grunnlag allerede. Allikevel startet demonstrasjonen fra bunn, uten å forvente store bakgrunnskunnskaper, slik at alle studentene skulle ha muligheten til å henge med selv om de ikke fulgte forelesningene i faget. Dette var også for å invitere studentene tidlig til å kunne komme med innspill, siden dette var noe flere av dem hadde hørt om før. Tanken var at studentene skulle få en god og ufarlig mulighet til å komme på banen tidlig, slik at det skulle bli lettere å få forslag og kommentarer lenger ut i demonstrasjonen. Studentene ble gjennom hele demonstrasjonen stilt spørsmål, hvor det både var riktige svar og hvor det kunne være flere mulige svar. Kombinasjonen av disse spørsmålene ga et bilde av at studentene kunne litt om polarisering, men at de også lærte noe nytt om polarisering i løpet av demonstrasjonen, og at de fikk noe å tenke videre på.

Hovedfokuset i demonstrasjonen var hvordan polarisering kan brukes til å blokkere lys. Mange var kjent med kryssede polarisatorer fra tidligere fag, så dette ble bygd videre på. Intensiteten til to variable polarisatorer ble målt, mens en av studentene endret vinkelen på de to. Her dukket det opp en liten ekstra kuriositet. Ved lange bølgelengder ble ikke lyset blokkert, selv om polarisatorene var perfekt krysset. Dette var ikke opprinnelig med i planen for demonstrasjonen, men en slik mulighet for diskusjon kunne ikke kastes bort. Dermed fikk studentene spørsmålet om hva dette kunne komme av. Her ble alle alternativer tatt opp til betraktning og ble enten forkastet fordi fysikken bak argumentene ikke stemte (for korte bølgelengder?), testet ut hvis det var mulig (kunne det være bakgrunnslys?) eller vurdert som mulige årsaker til at

lyset ikke ble blokkert (materialet som påvirker? Kan det komme av varme?). Et slikt fenomen kan være med på å synliggjøre hvordan optikk ikke er en fasit-vitenskap, men at man stort sett jobber med flere antagelser som ikke alltid holder mål. Det er også en god måte å sette i gang studentene, for de må selv komme med mulige løsninger, siden veileder ikke nødvendigvis har noen fasit. I denne demonstrasjonen ble det starten på flere gode argumentasjoner og diskusjoner, og mange kom med innspill og forslag.

Demonstrasjonen skulle også vise hvordan ny teknologi bruker polarisert lys, ved å se på en LCVR. Tanken var å sammenligne denne med skjermene man omgir seg med overalt i hverdagen. Det var også tenkt for å vise hvordan teknologi og teori går hånd i hånd i optikken. Ser man på svarene fra figur 23, har studentene svart nesten utelukkende positivt i forhold til om demonstrasjonen viste hvordan ny teknologi bruker polarisert lys. Dette kan tyde på at budskapet kom frem, og at de etter demonstrasjonen har et litt videre begrep om hva polarisasjon brukes til i verden rundt dem. Studentene svarte også at de var delvis uenig i at demonstrasjonen var på et høyt teoretisk nivå (se figur 24). For å øke dette nivået kunne for eksempel Stokes-parametre og Poincaré-sfæren vært introdusert, eller et mer fullstendig bilde av hvordan LCVR-en fungerer. Dette ville muligens tatt fokuset bort fra det eksperimentelle, og var en av grunnene til at det ikke ble tatt med. I optikk er dette også utenfor pensum for studentene, noe som gjør det mindre aktuelt å sette av tid under demonstrasjonen til å gjennomgå det.

I siste delen av demonstrasjonen fikk også studentene i oppgave å selv forklare det de opplevde. Blokkering av lys ved 3D-briller koblet ny og aktuell teknologi til et enkelt optisk prinsipp. Her stod også studentengasjement og aktivitet i fokus, så det ble viktig at alle fikk prøve brillene og se seg i speilet. Mange studenter hadde en antagelse om at 3D-briller hadde noe med polarisering å gjøre, men flere hadde en feilaktig antagelse om at siden lys ble blokkert ved å se i speilet så måtte det være lineære polarisatorer. Dette var et forslag som kom opp i nesten alle demonstrasjonene, og ble fulgt opp av et spørsmål fra veilederen; hva ville skje dersom man vridde på hodet, og de lineære polarisasjonsfiltrene ble skråstilt? Dette gjorde at de fleste forkastet denne muligheten, men de fleste måtte få enda flere hint for å komme frem til at det var snakk om bruk av sirkulærpolarisert lys. Studentene ble også ført videre i diskusjonen ved at de skulle komme opp med en måte å lage 2D-briller. Under hele brilleseansen var studentene aktive, og det var lett å få i gang samtalen. Dette kan nok både skyldes hvordan selve demonstrasjonen er bygd opp og at oppgaven traff studentene og at de syntes det var interessant.

Et av hovedfokusene i denne demonstrasjonen var studentaktivitet. Tanken var å la studentene utføre deler av demonstrasjonen selv, komme med bakgrunnsteorien og forklare det som skjedde underveis. Det ble dermed lagt

opp til mange spørsmål underveis, både fra veilederen og fra studentene selv. Studentene fikk også være med på å stille polarisatorene, justere spenningen på LCVR-en og teste 3D-briller på egenhånd. Det eneste studentene ikke fikk spesielt store muligheter til å bidra på var den matematiske fremstillingen. Dette var et valg som ble gjort ut i fra flere årsaker. For det første ville det ta mye tid å la studentene selv få komme frem til hvordan matrisene skulle settes opp og regnes ut. Studentene hadde heller ikke veldig mye erfaring med bruk av Jones-matriser, og for mange var denne formalismen helt fersk. I mange tilfeller er det også vanskelig å få studenter til å bidra med slike oppgaver, siden det fort skinner gjennom at de ikke mestrer oppgaven og dermed velger de å ikke prøve. Dermed falt valget på at veilederen gjorde en rask gjennomgang av hvordan matematikken ser ut, med lite vekt på selve utregningene. Dette sparte mye tid, og gjorde at det eksperimentelle fortsatt beholdt hovedfokuset i demonstrasjonen.

Som i den første demonstrasjonen ble gruppene her også delt i to, for å ha demonstrasjonen for færre studenter samtidig. Dette var også med på å bygge opp under hovedfokuset, nemlig studentaktivitet. Gruppene varierte da fra to studenter og opp til seks. Forskjellen mellom to og seks studenter var tydelig, og med mindre gruppe ble det enda viktigere at hver enkelt student bidro. De hadde rett og slett ingen å gjemme seg bak. Dette fører til at man kan vurdere om det kanskje hadde vært enda bedre å dele gruppene enda mer opp. Demonstrasjonen kunne vært holdt tre ganger, og ingen grupper ville vært flere enn fire studenter. Problemet som da oppstår er det store tidsspørsmålet. Hvis veilederen for demonstrasjonen også er veileder for laben, noe som var tilfelle under to av demonstrasjonene, vil det bli omtrent halvannen time uten gode muligheter for labveiledning. Dette kan virke frustrerende for studentene, siden de må bruke store deler av tiden på å vente. Har man derimot en egen veileder til demonstrasjonene, vil dette være en god mulighet og et mulig forbedringspunkt for de to første demonstrasjonene. Om det er en reell mulighet er vanskelig å si, siden det hele bygger på at det må settes av ressurser til to labveiledere på alle laboratorieøvingene. En av studentene kommenterte dette godt, ved å si "*Lab tar mye tid, men man kan samtidig lære endel*".

Studentene ble stilt spørsmål i etterkant av demonstrasjonen for å vurdere sin egen aktivitet (se figur 21 og figur 22). Her viste det seg at halvparten av de som har svart var delvis enig i at de i hovedsak var passivt deltakende. Dette kan være en konsekvens av for store grupper. I en gruppe på seks personer er det lett å gjemme seg bort, og dermed komme seg gjennom uten å delta aktivt. Fra veilederens synspunkt kan det virke som alle er aktive, selv om det bare er 3-4 som bidrar. Teorien rundt demonstrasjoner sier at en god demonstrasjon må inkludere studentene, men man ønsker ikke å inkludere

alle for enhver pris. Da kan demonstrasjonene få en lignende atmosfære som en muntlig høring, og mange studenter vil kunne føle seg utilpass. Det må dermed skapes trygge rammer, slik at det ikke skal være farlig å ta ordet og enten komme med spørsmål, kommentere det som gjennomføres eller be om tydeligere forklaringer. Uansett vil nok ikke alle være aktivt deltakende, når det faktisk ikke er noe krav om det, men å ha et mål om at flest mulig aktivt deltar burde være et minstekrav for veilederen og noe veilederen har fokus på underveis.

Det andre spørsmålet som ble stilt, som gikk på om studentene holdt tilbake svar under demonstrasjonen, har samme tendens. Omtrent halvparten er litt enig i at de kunne svare, men unnlot å svare. Dette kan tyde på at også de passivt deltakende satt inne med en del bakgrunnskunnskap, men at de ikke fikk vist det. Igjen ville mindre grupper kunne bidratt til at dette diagrammet ville sett annerledes ut, og at flere studenter fikk vist hva de kunne. Det kan også stilles spørsmål til om denne tendensen er kulturelt avhengig, og at studentene går inn i en slik demonstrasjon med en tanke om at de kun skal se på. På universitetsnivå foregår mye av undervisningen på denne måten, nemlig at studentene sitter passivt og en veileder eller foreleser forteller. Dermed kan man lure på om dette også kan påvirke studentenes innstilling i forhold til en demonstrasjonssituasjon. Kan det hende at de er påvirket av at de vanligvis ikke trenger å delta aktivt for å skape progresjon, og at de ofte ikke en gang har mulighet til å delta aktivt? Det kan også være spor av en jante-kultur som vises, hvor studentene føler de ikke har noe å bidra med, og at de er redde for å vise at de kan noe og er flinke. En slik potensiell holdning hos studentene vil stikke kjepper i hjulene for den sosiale læringsprosessen, og veilederen må skape en forventning blant studentene slik at demonstrasjonen ikke preges av disse holdningene.

4.6 Et synlig Fourierplan

Den tredje demonstrasjonen tok for seg en SLM og skulle gi Fouriertransformen et ansikt. Studentene skulle her få et innblikk i Fourieroptikken, uten å vektlegge matematikken. Teorien ble det heller ikke satt så stort fokus på, det viktigste skulle være observasjonene ved forskjellige oppsett og erfaringen av hvordan lys kan moduleres og filtreres. Dette var også den eneste demonstrasjonen hvor laboratorieøvingen i etterkant var rundt samme tema som demonstrasjonen. Dermed ble mye av teorien lagt til laboratoriearbeidet, slik at studentene kunne jobbe med det på egenhånd i sitt eget tempo og med sitt eget oppsett. Demonstrasjonen skulle dermed også trigge interessen for temaet, og delvis fylle rollen som en introduksjon til laboratorieøvingen. Teorien trekker frem dette som en av flere mulige roller som er vanlig i eksper-

imentelt arbeid.

Med målene i denne demonstrasjonen, som stort sett gikk på det visuelle, blir det vanskelig å si noe konkret om studentenes måloppnåelse. Det er vanskelig å si hva studentene har erfart og observert, uten å gå inn med intervju. Dermed blir det mer naturlig å se på hvordan demonstrasjonen la opp til at studentene skulle få erfare og observere best mulig. Demonstrasjonen ble holdt for hele studentgruppa på en gang, og det var rundt tolv studenter på en gang som deltok på demonstrasjonene. En hvit vegg ble brukt som skjerm, slik at studentene lett kunne komme til bildet og studere det flere samtidig. Her ble det viktig å engasjere studentene, slik at de tok turen bort til veggen for å se nærmere på bildet. Det ble dermed tatt grep for å få alle studentene til å stå rundt lysstrålen, slik at det skulle være lett å rotere på og komme nærmere bildet. Dette skulle bidra til at flest mulig studenter fikk muligheten til å se de forskjellige hendelsene som ble vist frem. Spesielt når det kom til filtrering ble dette viktig, siden det er vanskelig å se forskjellene uten å være veldig tett inntil bildet. Det kan dermed argumenteres for at det også her burde vært mindre grupper på hver demonstrasjon. Da ville det blitt lettere å komme til skjermen og lettere å observere det som foregikk.

En grunn til at det ble gjennomført for hele gruppa på en gang var at demonstrasjonsoppsettet ikke var i samme rom som laboratorieforsøket, og det ble sett på som mest fornuftig å gjennomføre demonstrasjon og laboratorieforsøk separat. En annen årsak til at det ble gjennomført for alle på en gang var at det som skulle observeres var såpass stort at flere lett kunne se på en gang. Dermed ville nok ikke så små grupper som i de tidligere demonstrasjonene vært nødvendig, men kanskje grupper på rundt åtte personer ville vært et bedre antall. Det ville gjort det vanskeligere for studentene å gjemme seg bort, og bare "sove" gjennom demonstrasjonen.

Som i de to andre demonstrasjonene var det også her lagt opp til at studentene både skulle kommentere og svare på veilederens spørsmål underveis i demonstrasjonen. I de to første demonstrasjonene hadde det vært småproblemer med å få svar ut av studentene, men i denne siste demonstrasjonen virket det ekstra tungt å få studentene til å svare. Av og til kunne nok dette skyldes at studentene ikke kunne svare, fordi et par av gjennomføringene ble gjort før diffraksjon var gjennomgått i forelesning. Andre ganger var det helt tydelig at studentene kviet seg for å svare. Selv enkle ja og nei-spørsmål, som å si om de så pikseleringen i bildet på veggen, var vanskelig å få et svar på. Kanskje kan dette igjen skyldes kulturen på studiet, hvor man helst ikke vil skille seg ut, og i hvert fall ikke svare feil eller tro at man kan noe. En annen faktor som kan ha spillt inn er lysforholdene. Alt lys ble skrudd av under demonstrasjonen, for å ha optimale forhold til å observere. Dette gjorde det muligens lettere for studentene å gjemme seg bort og ikke føle

seg forpliktet til å svare. Kanskje ville det vært lettere å få svar underveis i demonstrasjonen hvis veilederen hadde startet med noen korte spørsmål mens lyset fremdeles var på. Dette kunne også vært relativt enkle spørsmål, slik at flest mulig ville ha potensiale til å svare. Å vinne studentene tidlig, slik at de er aktive underveis, vil både gjøre det lettere for veilederen og, i følge teorien, bedre studentenes eget utbytte av demonstrasjonen.

Siden dette var siste demonstrasjonen, var det også interessant med litt mer generelle spørsmål i forhold til demonstrasjoner og andre læringsformer som er vanlige å benytte i fysikkundervisning. Optikk ble også delvis satt opp mot de andre fysikkfagene studentene har hatt. Her ser det ut som de studentene som har svart er ganske enig i at mengden med både demonstrasjoner og laboratorieforsøk i optikk er ganske passende (se figur 25 og figur 26). Studentene ser også ut til å være relativt fornøyd med mengden laboratorieforsøk i fysikkfag generelt (se figur 28). Den store forskjellen ser man på mengden demonstrasjoner, hvor studentene i stor grad mener at det er litt for lite demonstrasjoner i fysikkfag generelt. Dette bygges også opp av en av veiledernes kommentarer:

Som student selv kunne jeg gjerne ha tenkt meg flere demonstrasjoner, siden de gir et innblikk i hvordan det faktisk er å forske på det gitte fagfeltet.

Hvis man dermed vil følge studentenes ønsker, kan det være en tanke å følge optikks eksempel. Kanskje kan flere fag introdusere demonstrasjoner som en liten del av laboratorieforsøkene. Da vil det bli lettere å promotere eksperimentell fysikk og synnliggjøre mulighetene studentene har innen et slikt fagfelt.

Det siste spørsmålet var ment for å kunne vurdere studentenes læringsutbytte fra demonstrasjonene i forhold til andre deler av læringsprosessen. Det ble delt opp i fem forskjellige læringsarenaer; demonstrasjoner (figur 29), laboratorieforsøk (figur 30), forelesninger (figur 31), øvinger (figur 32) og selvstudium (figur 33). Dette var den siste spørreundersøkelsen som ble lagt ut, og var også den med færrest svar. Allikevel kan svarene gi en indikasjon på hva studentene mener. De to delene som kommer best ut er laboratorieforsøk og demonstrasjoner, som begge har et flertall av studenter som mener de har hatt et bra læringsutbytte. Dette underbygges også av noen av kommentarene fra studentene, hvor flere sier at de lærer bra med slike metoder. Forelesninger, og til dels øvinger, har et negativt preg hos studentene. Dette kan ha flere årsaker, og en klar forskjell mellom forelesninger og øvinger i forhold til demonstrasjoner og laboratorieforsøk er at de sistnevnte er obligatoriske, mens de første er noe man i optikk selv kan velge om man vil delta på. Ut i fra kommentarer fra studentene kan det virke som

mange ikke prioriterer optikk, og dermed deltar de ikke på ikke-obligatoriske aktiviteter. Deltar man ikke på forelesninger, vil man også, av helt naturlige årsaker, få et minimalt læringsutbytte fra forelesningene. Dette kan kanskje også være en konsekvens av optikkens natur. Optikk er et eksperimentelt fag, og kanskje er laboratoriet den beste læringsarenaen for faget.

Studentene skulle også vurdere sitt læringsutbytte fra selvstudium. Her ligger svarene spredt rundt middels, med overvekt på den positive siden. Dette er noe også alle må gjennom, og for mange er nok dette måten de til slutt lærer seg et fag. For mange er nok dette også noe som først slår inn når eksamensperioden starter, og det blir god tid til å jobbe på egenhånd med fagene. Hadde spørsmålet blitt stilt rett før eller etter eksamen, ville kanskje figuren sett helt annerledes ut.

4.7 Et program til besvær

I tillegg til de tre demonstrasjonene ble studentene introdusert for LightTools og skulle gjennomføre en obligatorisk øving med programmet. Dette var for å vise studentene at det finnes muligheter for å simulere optikken, og gi dem et verktøy til å visualisere optikken de fikk høre om i forelesning. I etterkant kan det se ut som det var et litt for ambisiøst forsøk, hvor mye ikke gikk helt som det skulle. Bare det å få lisensserveren for programmet opp var tidkrevende nok, så det tok lang tid før programmet i det hele tatt ble tilgjengelig. I tillegg måtte det settes av tid til en forelesning eller øvingstime for studentene. Grunnet lite tid og ingen studentassistenter med erfaring med LightTools ble valget å gjennomføre en forelesning om LightTools for studentene. Den generelle meningen fra studentene i etterkant kan tyde på at en felles dataøving ville vært et bedre valg, eller kanskje en dataøving burde vært gjort i tillegg til en forelesning. Flere av studentene slet med å komme i gang med programmet og hadde problemer med alt fra å åpne programmet til at det krasjet når strålebaner skulle beregnes. Alle disse spørsmålene ble besvart etter beste evne over mail, men var absolutt ingen ideell løsning for å gi studentene et best mulig inntrykk av LightTools.

Tanken bak opplegget med LightTools var å vise studentene et av de vanligste bindeleddene mellom den teoretiske og den eksperimentelle verden, nemlig datamaskinen. Med programvare eller ved selv å skrive programmer kan teoriens bakteppe kombineres med teknologiens muligheter og begrensninger, og gi brukeren en lett tilgang til resultater av interesse. Datamaskiner ser ut til å ta stadig mer plass i fysikkutdanningen, og kunnskap innen IKT og numerikk ser ut til å være en mye etterspurt kunnskap i arbeidsmarkedet.

Målet med denne øvingen var at studentene skulle gjøre seg kjent med LightTools, se hvordan optisk programvare kan brukes i forskning og til proto-

typer og få et verktøy til å lett teste optisk teori visuelt. De fleste studentene har nok nå fått et innblikk i hva LightTools handler om, og en liten anelse om hva det kan brukes til, men det er nok få som ser på det som et nyttig verktøy for å teste optisk teori. Denne påstanden kan rettferdiggjøres ut i fra hva studentene har svart på øvingen og hva de har kommentert ved siden av. Alle studentene har vært inne i LightTools og testet ut noen av de mange forskjellige mulighetene som ligger i programmet, men med veldig forskjellig hell. Noen av løsningene er veldig gode, med trinnvise forklaringer på hvordan studenten har tenkt for å løse problemet. Andre har satt seg fast og kun kommet frem til et ufullstendig resultat. Ytterst få utnyttet den åpne oppgavestillingen til å utforske programmets muligheter, men valgte heller en enkel løsning for å få godkjent øvingen.

Det kan dermed virke som programmet krevde mer tid for å forstås enn det som først var tenkt, noe som også flere studenter har kommentert. Kanskje kunne dette vært delvis løst hvis studentene også hadde fått en øvings-tid hvor LightTools sto på programmet. Skulle det ha vært gjennomført, måtte først studentassistenter fått opplæring i programmet, slik at flere enn kun forfatteren selv ville vært tilgjengelig for hjelp. En annen mulighet for å redusere tidsbruken ville vært å delvis forandre på opplegget, og lage en steg-for-steg-øving. Her ville studentene ha blitt geleidet gjennom programmet, og gjennom denne øvingen ville de blitt introdusert for de funksjonene som kunne være nyttige og interessante. Etter en slik øving kunne det blitt fulgt opp med en mer åpen øving, mer lignende den som nå ble gjennomført, hvor studentene ville få bruk for det de allerede har gjennomgått i den første øvingen. Dette ville gjort det mulig for studentene å få en bedre erfaring med LightTools, og gjøre det til et verktøy de kunne ha brukt til å se på optiske problemer. Dette ville også gjort LightTools til en større bit av faget, men som en av studentene så fint skrev det:

Jeg synes også at dersom studenter skal lære seg programmet bør det involveres i større grad i faget enn det er nå, mne dette må i så fall gå på bekostning av noe annet, da faget er mer enn stort nok allerede!

Det hele er altså et spørsmål om å gi og ta. Hvis LightTools tar mer tid, vil studentene kunne få et bedret læringsutbytte, men det vil også kunne gå utover andre deler av faget. Skal LightTools først få en større rolle, vil det også være naturlig å inkludere det oftere i forelesninger. Dette vil føre til at også foreleseren må bruke mer tid på å sette seg inn i programmet, og vil også kunne ta bort fokus fra fagets nåværende innhold.

En annen mulighet ville være å bruke en annen programvare, med færre valgmuligheter, men lettere å bruke for å simulere mye av det studentene

driver med i optikkfaget. OptGeo er et slikt program, som er et fransk gratis-program for å simulere forskjellige optiske apparaturer i to dimensjoner. Fordelen med et slikt program er at det er lettere å lage de enkle oppsettene, se på strålebaner og enkelt forandre posisjoner og parametre. Ulempen er at det ikke lenger viser like mange muligheter for videre forskning og bruk til prototyper. Programmet mister også muligheten til å se på oppsettene i tre dimensjoner, for å få det hele til å se mer virkelighetsnært ut. En annen ulempe ved dette programmet er at det originalt er lagd på fransk, og da det ble brukt tidligere i optikkfaget var kun deler av programmet oversatt. Nå er større deler av programmet oversatt, slik at det også skal være mulig å bruke for en som ikke kan et ord fransk. Selv om dette programmet lettere kan stille opp forskjellige oppsett, vil også dette programmet ha en brukerterskel. Den er nok ikke like høy som for LightTools, men for dette programmet finnes det mindre hjelp fra internett og eksempelfiler (med mindre man kan fransk).

En tredje mulighet ville være at også LightTools ble gjennomført i form av en demonstrasjon. Denne ville da blitt lagt opp som de andre demonstrasjonene, og gjennomført for små grupper før en av laboratorieøvingene. Da ville mulighetene for å engasjere studentene i forhold til programmet være større enn i en forelesningssituasjon, og det ville også være lettere for veilederen å gjennomføre eksempler som studentene selv kommer med. En klar fordel med et slikt opplegg er at det ikke vil ta bort forelesningstid, og vil heller ikke føre til merarbeid for studentene. Den klare ulempen er at studentene ikke får det samme innsynet i LightTools, og vil muligens ha enda større problemer med å bruke det på egenhånd for å visualisere optikk.

5 Avslutning

I denne oppgaven er det presentert teori for å kunne utvikle tre demonstrasjoner og en øving i dataprogrammet LightTools. Nyere teknologi har hatt fokus i oppleggene som er utviklet, og fire veiledningsdokumenter er laget slik at oppleggene kan gjennomføres igjen av andre. I denne avslutningen trekkes det først frem anbefalinger i forhold til gjennomføring av demonstrasjonene, andre muligheter som kan realiseres og hva som er tenkt videre. Helt til slutt trekkes noen konklusjoner, ut i fra det som er diskutert og det som er anbefalt.

5.1 Anbefalinger

Både studenter og veiledere virker enige om at demonstrasjoner er et nyttig tilskudd i optikkfaget. Det kan også virke som demonstrasjoner er noe flere kurs burde vurdere, enten etter en lignende modell som optikk eller finne sin egen måte å gjennomføre det på. Det viktigste spørsmålet i forhold til hva som anbefales er dermed ikke om det skal være demonstrasjoner eller ikke, men heller innhold, tidsbruk og ressursbruk.

Innholdet i de tre demonstrasjonene har tatt utgangspunkt i nytt utstyr som er innkjøpt, og har kombinert dette utstyret med allerede tilgjengelig utstyr. Skal store forandringer gjøres når det kommer til utstyr, kan det fort føre til store utgifter, fordi optikkutstyr er relativt dyrt. Hvis det blir behov for forandringer, så anbefales det å gjøre disse innenfor det utstyret som allerede finnes, og heller kombinere utstyr på nye måter.

Temamessig virker det som de nåværende demonstrasjonene passer veldig godt. De to første demonstrasjonene viser optikk som ikke er del av laboratorieøvingene, mens den siste viser en mer avansert variant av et oppsett studentene selv skal gjennomføre. Noe som kunne vært av interesse å vise i tillegg, og som studentene driver en del med i faget, er beregning av strålebaner. Det kunne vært en demonstrasjon med flere forskjellige optiske elementer, som prizmer, gitter, linser, stråledelere eller fargefilter, og man kunne ha sett på hvordan lyset beveger seg gjennom de forskjellige elementene. Dette måtte ha blitt gjort på en måte slik at studentene til enhver tid har mulighet til å se strålebanen, og gjerne både med monokromatiske og akromatiske kilder. Her kunne også LightTools naturlig blitt inkludert, slik at strålebanene også kunne blitt simulert med programmet. Muligheten for å finne på andre ting er også der, som å koble inn LightTools i flere demonstrasjoner, lage sin egen 3D-kino eller kanskje lage flere historisk baserte demonstrasjoner. Det er altså ikke mangel på muligheter der ute, men de tre demonstrasjonene som er lagd her er en god start, og vil også fungere fint

uten at man trenger å gjøre store endringer.

Tidsbruken i demonstrasjonene har vært på omtrent en halvtime per gjennomføring for alle tre. Dette tar bort litt tid fra laboratorietiden, men allikevel blir flere studenter ferdige med hele laboratorieøvingen før tiden. Dermed ser det ikke ut til at lengden på demonstrasjonene er noe problem. Problemet kommer hvis man skal dele gruppene opp enda mer. Da vil det bli flere studenter som må vente på tur, og en irritasjon kan fort spre seg og lage sur stemning. Det anbefales dermed ikke å dele opp gruppene i mer enn to med mindre man er to labveiledere. Med to labveiledere kan gjerne alle tre demonstrasjonene deles opp og tas for færre studenter enn det som nå har blitt gjennomført. Det vil gjøre det lettere å inkludere og engasjere hver enkelt student, og forhåpentligvis gi dem en enda bedre demonstrasjonsopplevelse.

Med tanke på labveilederne så kreves det en viss bakgrunnskunnskap innen optikk for å lede demonstrasjonene. Det vil også være ønskelig i forhold til laboratorieøvingene som også skal veiledes. Dermed anbefales det at begge veilederne har gode kunnskaper innen optikk, og gjerne mer enn at de kun har gjennomført kurset tidligere. Dette vil gjøre det lettere å lage spennende demonstrasjoner, hvor man på stående fot kan ta de fleste spørsmål, komme med spennende tilleggsinformasjon og være med på digresjoner uten å være redd for å havne på tynn is faglig.

Fra et didaktisk perspektiv anbefales det også at veilederne er klare for å inkludere studentene. Studentaktivitet burde stå i fokus under demonstrasjonene, både for studentenes og veilederens skyld. Studentene vil få et bedre læringsutbytte ved å være aktive, mens veilederne ikke vil gå så fort lei. Samme demonstrasjon gang på gang kan fort bli kjedelig hvis den ikke er preget av studentenes forslag, kommentarer og meninger. Veilederen burde til enhver tid være klar til å hoppe på spennende avstikkere, samtidig som han eller hun fortsatt har kontroll på at målene i demonstrasjonen blir dekket og at tiden ikke løper fra en.

5.2 Konklusjon

Generelt ser det ut som demonstrasjoner er noe man burde satse videre på. Det er en god måte å vise frem ny teknologi, og bidrar til å fremme både interesse og læring hos studentene. Demonstrasjonene fungerer også som en naturlig del av en laboratorieøving, og gjør ikke at tiden blir knapp til resten av laboratorieøvingen. Fysikk og teknologi er noe som stadig tettere sammen, og demonstrasjon som metode for å vise sammenhengen virker veldig lovende.

To veiledere burde først prioriteres, men også ressurser burde være tilgjengelig for eventuelt å videreutvikle eller lage nye demonstrasjoner. Demon-

strasjoner ser ut til å være noe studentene liker, og i tillegg noe de mener de har et godt læringsutbytte fra. Dermed er det absolutt noe som anbefales. En god mulighet kan være å gjennomføre lignende masteroppgaver som denne, og bruke ressursene dette fører med seg for å sette i gang demonstrasjoner også i andre fysikkfag.

Det kan se ut som nyere teknologi ikke nødvendigvis er eneste løsning for å bedre læringsutbyttet i optikk. Både den gamle monokromatoren og glødelampen er mer eller mindre utdaterte, men kan likevel vise mange spennende og lærerike aspekter ved optikken når de kombineres med det nyere utstyret. Det er dermed like viktig å ha de gode ideene for å skape god læring. Både ny og gammel teknologi er nytteløst uten at det settes sammen med bevisste mål og baktanker. Allikevel kan det nye utstyret gi noen klare fordeler, som at det kan kobles opp mot aktuell forskning og lettere sammenlignes med spennende ting fra hverdagen. Nyere teknologi kan også bidra til økt interesse og læring, som vist i de tre demonstrasjonene, men kan også slå helt feil og gi studentene et dårlig læringsutbytte, som vist i LightTools-øvingen. Oppdatering av det gamle utstyret kan ha mye for seg, men ikke uten at man også tar med de gode ideene videre. Nyere utstyr er ikke alltid bedre enn det gode gamle, men det burde ikke stoppe en fra å ta sjansen på den nye teknologien. Kombinasjoner av gammelt og nytt kan være virkningsfullt, og mer utstyr gir flere muligheter. Nyere teknologi har dermed gode muligheter til å bidra til et økt læringsutbytte for studentene i optikk.

Referanser

- [1] C. Angell, B. Bungum, E. K. Henriksen, S. D. Kolstø, J. Persson, og R. Renstrøm. *Fysikkdidaktikk*. Høyskoleforlaget, Kristiansand, 2011.
- [2] HOLOEYE. *OptiXplorer - Laboratory Tutorials, Hardware Operating Instructions, Software Operating Instructions*. HOLOEYE Photonics AG, Tyskland, 2007.
- [3] T. Scharf. *Polarized light in liquid crystals and polymers*. Wiley-Interscience, 2007.
- [4] F.L. Pedrotti, L.M. Pedrotti, og L.S. Pedrotti. *Introduction to optics*. Pearson Prentice-Hall, 2007.
- [5] A. Valberg. *Lys Syn Farge*. Tapir Forlag, 1998.
- [6] B.E.A. Saleh og M.C. Teich. *Fundamentals of photonics*. Wiley series in pure and applied optics. Wiley-Interscience, second edition edition, 2007.
- [7] L.V. Wang og H. Wu. *Biomedical optics: principles and imaging*. Wiley-Interscience, 2007.
- [8] P.S Hauge, R.H. Muller, og C.G. Smith. Conventions and formulas for using the mueller-stokes calculus in ellipsometry. *Surface Science*, 96: 81–107, 1980.
- [9] P. Yeh og C. Gu. *Optics of liquid crystal displays*. Wiley series in pure and applied optics. Wiley, 1999.
- [10] Curtin University, 2004. URL <http://biomedapps.curtin.edu.au/biochem/tutorials/prottute/helixfigures.htm>.
- [11] S.V. Pasechnik, V.G. Chigrinov, og D.V. Shmeliova. *Liquid Crystals: Viscous and Elastic Properties in Theory and Applications*. John Wiley & Sons, 2009.
- [12] J. W. Goodman. *Introduction to Fourier optics*. McGraw-Hill physical and quantum electronics series. Roberts & Co., 2005.
- [13] HOLOEYE, 2012. URL http://www.holoeye.com/spatial_light_modulator_lc_2002.html.
- [14] K. Dholakia og T. Čižmár. Shaping the future of manipulation. *Nature Photonics*, 5:335–342, 2011.

- [15] P.C. Hemmer. *Termisk fysikk*. Tapir Akademisk Forlag, 2002.
- [16] H. M. Pedersen. Ch. 6: Diffraction and fourier optics. *Kompendium for TFY4195 Optikk*, 2010.
- [17] K. R. Naqvi. A quick survey of spectroscopy. *Forelesningsnotater i FY3006 (Målesensorer/transdusere)*, 2011.
- [18] D. J. Brady. *Optical Imaging and Spectroscopy*. Wiley, 2009.
- [19] H.D. Young, R.A. Freedman, L. Ford, F.W. Sears, og M.W. Zemansky. *University physics*. Sears and Zemansky's University Physics. Pearson Education, Limited, 2007.
- [20] A. Woolfolk. *Pedagogisk Psykologi*. Tapir Akademisk Forlag, 2. utgave edition, 2004.
- [21] G. Saines og M. G. Tomilin. Pages from the history of optics - magic mirrors of the orient. *Journal of Optical Technology*, 66:8, 1999.
- [22] S. Sjøberg. *Naturfag som allmenndannelse: en kritisk fagdidaktikk*. Gyldendal akademisk, 3. utg. edition, 2009.
- [23] J. Ziman. *An introduction to science studies - The philosophical and social aspects of science and technology*. Cambridge University Press, 2001.
- [24] V. Schilling. *Mentale modeller og eksperimentelt arbejde i fysikundervisningen*. PhD thesis, Syddansk Universitet, 2006.
- [25] W. M. Roth, C. J. McRobbie, K. B. Lucas, og S. Boutonné. Why may students fail to learn from demonstrations? a social practice perspective on learning in physics. *Journal of Research in Science Teaching*, 34:26, 1997.
- [26] C. Crouch, A. P. Fagen, J. P. Callan, og E. Mazur. Classroom demonstrations: Learning tools or entertainment? *American Journal of Physics*, 72(6):4, 2004.
- [27] Meadowlark Optics, 2012. URL [http://www.meadowlark.com/store/catalog/2009_2010_LiquidCrystals\(3\).pdf](http://www.meadowlark.com/store/catalog/2009_2010_LiquidCrystals(3).pdf).
- [28] Ocean Optics, 2012. URL <http://www.oceanoptics.com/products/usb4000uvvis.asp>.

6 Vedlegg

6.1 Fourierteoremer

1. Lineæritet :

$$\mathcal{F}[ag(x, y) + bh(x, y)] = a \cdot \mathcal{F}(g) + b \cdot \mathcal{F}(h)$$

Dette vil si at man kan dele opp problemene og dermed forenkle regning

2. Similaritet :

$$\mathcal{F}[g(ax, by)] = \frac{1}{|ab|} \cdot G\left(\frac{f_x}{a}, \frac{f_y}{b}\right)$$

Her ser vi at strekning i et rom fører til sammentrekning i det andre

3. Forskyvning :

$$\mathcal{F}[g(x - a, y - b)] = G(f_x, f_y) \cdot e^{-2\pi i(f_x a + f_y b)}$$

Altså fører en forskyvning i rommet til en et lineært faseskift i frekvensrommet

4. Rayleigh :

$$\iint_{-\infty}^{\infty} |g(x, y)|^2 dx dy = \iint_{-\infty}^{\infty} |G(f_x, f_y)|^2 df_x df_y$$

Venstre integral kan her ses på som energien i bølgefronten, noe som gjør at $|G(f_x, f_y)|$ kan tolkes som en energitetthet i frekvensrommet

5. Konvolusjon :

$$\mathcal{F}[g \otimes h] = G(f_x, f_y)H(f_x, f_y)$$

En typisk forenkling fra det ene rommet til det andre, altså at konvolusjon tilsvarer vanlig multiplikasjon i frekvensrommet

6. Autokorrelasjon :

$$\mathcal{F}\left[\iint_{-\infty}^{\infty} g(\xi, \eta)g^*(\xi - x, \eta - y)d\xi d\eta\right] = |G(f_x, f_y)|^2$$

Dette teoremet kan også ses på som et spesialtilfelle av konvolusjons-teoremet, hvor man gjennomfører konvolusjon med funksjonen og dens komplekskonjugerte

7. **Fourierintegral :**

$$\mathcal{F}\mathcal{F}^{-1}[g(x, y)] = \mathcal{F}^{-1}\mathcal{F}[g(x, y)] = g(x, y)$$

Her må g være kontinuerlig for at dette skal stemme, og vi ser at transform av transform leder tilbake til der man startet opp. Dette er en veldig viktig egenskap når dette verktøyet skal brukes.

6.2 Spørsmål og svar

6.2.1 Spørsmål stilt til veiledere

- Hva ser du på som hovedutbytte for studentene av en slik demonstrasjon? Både ideelt (hva du håper) og reelt (hva du tror faktisk skjer).
- Hvordan ser du på forholdet mellom teoretisk og eksperimentell fysikk i fysikkmiljøet på NTNU? Hva blir prioritert?
- Hvilket teoretisk nivå følte dere at demonstrasjonene lå på, i forhold til både forelesningene og laboratorieoppgavene?
- Har dere ellers noen kommentarer eller tanker rundt bruk av demonstrasjoner i fysikkundervisning? Alle svar tas i mot med takk!

6.2.2 Spørsmål stilt til studentene

Spektroskopidemonstrasjonen:

- Her skal dere sette sammen lyskilde med tilhørende spekter. Dra boksen med riktig navn til riktig spekter (fem grafer og fem lyskildenavn ved siden av).
- Kryss av de ordene som har noe med spektroskopi å gjøre (Gitter, fokallengde, intensitet, bølgelengde, induksjon, prisme, bevegelsesmengde, monokromator).
- Min teoribakgrunn i forhold til demonstrasjonen: (God, over middels, under middels, nesten blank).
- Mitt utbytte av demonstrasjonen var: (Veldig bra, bra, middels, dårlig, veldig dårlig).
- Mitt syn på forholdet mellom teoretisk og eksperimentell fysikk i fysikkstudiet: (Eksperimentell viktigst, eksperimentell litt viktigere, like viktige, teoretisk litt viktigere, teoretisk viktigst).

Polarisasjonsdemonstrasjonen:

- Hvilke sammensetninger av lineære polarisatorer gir total utsløking (altså blokkerer alt lys)? (45 og 135, 60 og 140, 50 og 320, 50 og 140).
- I denne demonstrasjonen ble et optisk element kalt LCVR brukt. Hva står forkortelsen for? (Liquid Crystal Variance Response, Loaded Chryogenic Virtual Responder, Liquid Crystal Variable Retarder, Liquid Crystal Virtual Reproducer).

- Her ønsker jeg dine meninger i forhold til din opplevelse under demonstrasjonen
 - Jeg var hovedsakelig pasivt deltakende under demonstrasjonen (Helt enig, litt enig, hverken eller, litt uenig, helt uenig).
 - Jeg utelot å svare på spørsmål under demonstrasjonen, selv om jeg kunne svaret (Helt enig, litt enig, hverken eller, litt uenig, helt uenig).
 - Demonstrasjonen viste hvordan ny teknologi bruker polarisert lys (Helt enig, litt enig, hverken eller, litt uenig, helt uenig).
 - Demonstrasjonen var på et høyt teoretisk nivå (Helt enig, litt enig, hverken eller, litt uenig, helt uenig).

Demonstrasjonen med SLM og Fourieroptikk:

- Ved bruk av en linse kan man visualisere en av følgende transformeringer, hvilken? (Laplacetransform, Fouriertransform, Fraunhofertransform, Hilberttransform, Fresneltransform).
- Hvilket område passer med diffraksjonstypen?
 - Nærfeltet (Fraunhoferdiffraksjon, Fresnel diffraksjon).
 - Fjernfeltet (Fraunhoferdiffraksjon, Fresnel diffraksjon).
- Svar det som passer best for deg
 - Mengden demonstrasjoner i optikk er (For stor, litt stor, passe, litt liten, for liten).
 - Mengden laboratorieforsøk i optikk er (For stor, litt stor, passe, litt liten, for liten).
 - Mengden demonstrasjoner i fysikkfag generelt er (For stor, litt stor, passe, litt liten, for liten).
 - Mengden laboratorieforsøk i fysikkfag generelt er (For stor, litt stor, passe, litt liten, for liten).
- Mitt læringsutbytte av:
 - demonstrasjonene i optikk (Veldig bra, bra, middels, dårlig, veldig dårlig).
 - laboratorieforsøkene i optikk (Veldig bra, bra, middels, dårlig, veldig dårlig).

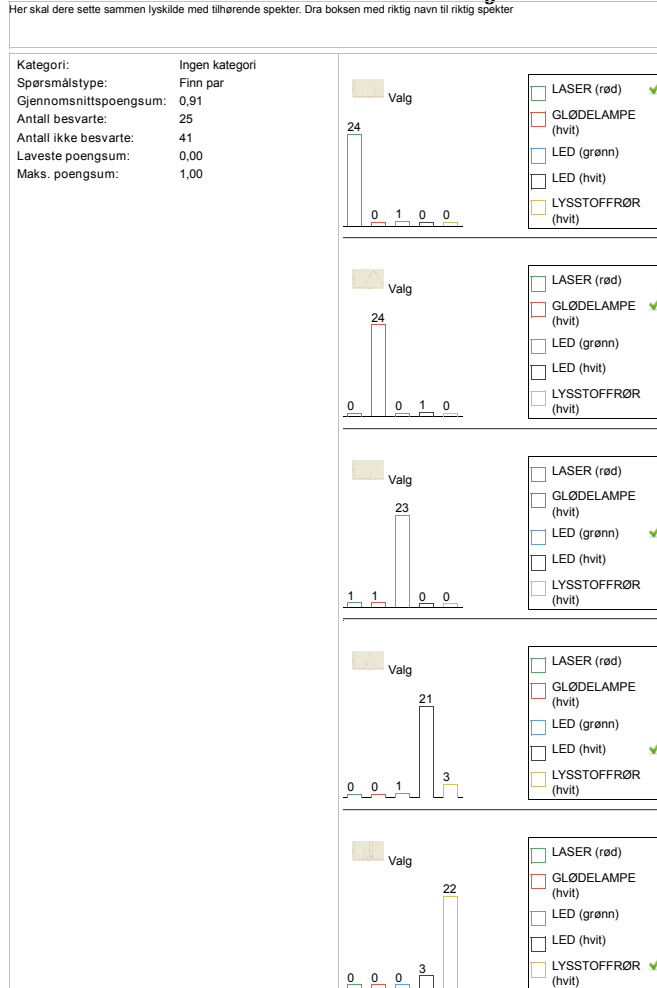
- forelesningene i optikk (Veldig bra, bra, middels, dårlig, veldig dårlig).
- øvingene i optikk (Veldig bra, bra, middels, dårlig, veldig dårlig).
- selvstudie i optikk (Veldig bra, bra, middels, dårlig, veldig dårlig).

6.2.3 Øvingsoppgave for LightTools

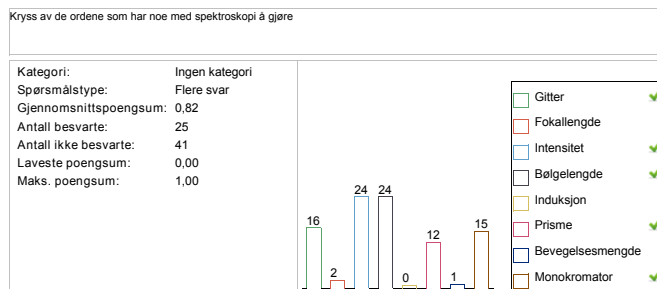
1. Make your own lamp or other light-source. It should be used for a specific illumination purpose of your choice. Explain your choices in the model.
2. Choose one of the first exercises from lab 1 and simulate it with LightTools.
3. (Extra) Use LightTools to model astronomical radiation, e.g. the black body radiation from the sun and the earth

Bring your answers to lab 4 (some screenshots and some comments where necessary)

6.2.4 Svar fra studentene om demonstrasjonene



Figur 34: Svar fra spektroskopidemonstrasjonen, hvor studentene ble spurt om å sette riktig spekter til lyskildenavn.



Figur 35: Her har studentene krysset av på de ordene som er koblet til spektroskopi, og denne kommer, naturlig nok, fra spektroskopidemonstrasjonen.

45 og 135	88,20%
60 og 140	0,00%
50 og 320	47,10%
50 og 140	76,50%
Ikke besvart	5,90%

Tabell 1: *Hvilke sammensetninger av lineære polarisatorer gir total utsløkn-
ing (altså blokkerer alt lys)? (Fra spektroskopidemonstrasjonen)*

Liquid Crystal Variance Response	0,00%
Loaded Chryogenic Virtual Responder	0,00%
Liquid Crystal Variable Retarder	88,20%
Liquid Crystal Virtual Reproducer	11,80%

Tabell 2: *I denne demonstrasjonen ble et optisk element kalt LCVR brukt.
Hva står forkortelsen for? (Fra spektroskopidemonstrasjonen)*

Laplacetransform	0,00%
Fouriertransform	100,00%
Fraunhofertransform	0,00%
Hilberttransform	0,00%
Fresneltransform	0,00%

Tabell 3: *Ved bruk av en linse kan man visualisere en av følgende trans-
former, hvilken? (Fra demonstrasjonen med SLM og Fourieroptikk.)*

	Fraunhoferdiffraksjon	Fresneldiffraksjon	Ikke besvart
Nærfeltet	8,3%	83,3%	8,3%
Fjernfeltet	83,3%	8,3%	8,3%

Tabell 4: *Hvilket område passer med diffraksjonstypen? (Fra demonstrasjo-
nen med SLM og Fourieroptikk.)*

6.2.5 Studentkommentarer om LightTools

Prinsippene i programmet er gode, men vi skulle gjerne hatt oppskrift/framgangsmåte for å lage enkle oppsett/apparaturer. Det burde vært litt enklere å sette opp modeller av linser og se hvordan strålene gikk. Dette kunne vært veldig nyttig bare for å få en følelse av hvordan strålegangen blir med forskjellige fokallengder og avstander mellom linser. Slik programmet er, følte ikke vi at dette var så lett som det burde vært.

Det er sikkert en flott programvare når man blir litt bedre kjent med den, men for vår del har vi ikke hatt særlig utbytte av den. Det blei mer knot og styr enn faglig utbytte.

Istedenfor øving som alle skal gjøre hver for seg, kunne man kanskje hatt et par timer på datalab med veileder.

Presentasjonen av programmet burde inneholdt litt enklere og mer relevante simuleringer. For eksempel strålegang som vi pleier å regne på.

Dette ser ut som et kult program, med mange muligheter! Etterhvert var det artig å prøve seg frem for å finne ut av ting, men i starten virket det litt uoversiktlig og lite intuitivt. (Jeg har lite erfaring med lignende programmer). Så selv om bidragene mine sikkert er veldig simple, kan jeg likevel si det ligger en grei mengde tid bak arbeidet :p

Positivt.

- Program med mange muligheter, både til å illustrere grunnleggende ting i optikkfaget og til å modellere mer komplekse system.

Negativt:

- Tar tid å sette seg inn i.
- Ikke spesielt bra manualer.
- Lite bruker generert innhold på nettet. (googling hjelper lite)

Det jeg opplevde som negativt var som du ser ikke programmet og dettes muligheter, men heller innsatsen som krevder for å sette seg inn i det. I tillegg har jeg, og jeg antar mange andre, behandlet oppgaven som noe som måtte gjennomføres for å få gå opp til eksamen, og ikke som introduksjon av et program som kan hjelpe vår forståelse av faget.

Forslag:

- Inntrodusere Lighttools tidligere i semesteret. Det er lett å vise enkle prinsipp slik som øving 1 med det, samtidig som de som synes programmet er bra har nytte av det gjennom hele semesteret. Nå på slutten er det få som gjør mer enn nødvendig.
- Lage en egen, enkel manual eller en øving med steg for steg instruksjon.

På denne måten vil studentene lære det mest grunnleggende og se resultater i løpet av relativt kort tid. Dette vil forhåpentligvis motivere til å utforske programmet videre. I den øvingen vi fikk begynte vi med noe som krever endel innsikt i programmet og det førte til endel banning. Hadde øvingen startet med steg for steg beskrivelse av hvordan man lager noe lignende av det vi lagde i del to så hadde øvingen vært mer motiverende.

Her er Lightroom-besvarelsen. Enjoy! Kult program, som egentlig burde blitt brukt meir, må jo være ypperlig å bruke for å illustrere i undervisning, eller som øvingar.. Men i forhold til øvingar så e d kanskje for strevsomt å sette seg inn i d for et halvt semester...? Men om foreleser hadde brukt d.. d e jo utrolig mykje eksempelbasert undervisning, spesielt tegninga som ska illustrere. Ofte kanskje egentlig til meir forvirring enn oppklaring..! Så eg e for!

Programmet var morsomt å jobbe med, men jeg har ikke gjort oppgave 3, grunnet stor frustrasjon under ray tracing i oppgave 2, der programmet stadig vekk kræsjet. Jeg tror Light Tools kan være et fint program å ha med i optikkfaget, men dersom det skal brukes videre bør studentene få en grundigere opplæring, med øvingstimer for dem som ønsker det. Jeg synes også at dersom studenter skal lære seg programmet bør det involveres i større grad i faget enn det er nå, mne dette må i så fall gå på bekostning av noe annet, da faget er mer enn stort nok allerede!