

# Elevers oppfatning om lys og bølge/partikkel-dualismen

**Mathias Gjerland**

Master i realfag

Innlevert: juni 2015

Hovedveileder: Berit Bungum, PLU

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Program for lærerutdanning



## Forord

Jeg vil rette en stor takk til min veileder i arbeidet med denne masteroppgaven. Uten Berit Bungums veiledning hadde jeg aldri kommet i mål med dette prosjektet.

Videre ønsker jeg og takke min mor og far som har vist interesse for min skolegang gjennom hele livet.

Helt til slutt rettes en takk til Henning Vinjusveen og Øyvind Lund. Begge disse personene har vært viktig støttespillere under hele denne masterperioden og ellers i livet.

Trondheim, mai/2015

Mathias Gjerland

## Sammendrag

Relevant er et forsknings- og utviklingsprosjekt som tar for seg elevenes forståelse av moderne fysikk, innenfor kompetansemålene i Fysikk 2. Relevant skal samtidig fungere som en nettbasert læringsressurs for fysikklærere i den videregående skole.

Denne oppgaven tar mål av seg å undersøke elevenes kunnskapsutvikling innenfor de kvantefysiske temaene lys og bølge-partikkel-dualismen. Elevenes utvikling blir fulgt underveis i deres arbeid med Relevant-moduler. Tidligere forskning har vist at lys og bølge-partikkel-dualismen er begreper som byr på store, konseptuelle utfordringer for elevene. Det empiriske grunnlaget for denne undersøkelsen er skriftlige og muntlige elevbesvarelser, og påfølgende intervju med elever som har jobbet med Relevant's læringsmoduler innenfor kvantefysikk.

Resultatene fra dette prosjektet forteller at elevene oppnår en god, forståelse av partiklenes bølgenatur knyttet til eksperimentelle resultater, men at elevene samtidig ikke makter å sette fotonets dualisme i sammenheng med den klassiske bølgebeskrivelsen av lys.



## **Abstract**

Project ReleQuant is design-based research program. The focus of the program is to map students understanding within modern physics regarding the learning goals in upper secondary school Physics classes. Teachers are also able to utilize ReleQuant as a learning resource in their lecturing.

The goal of this thesis is to examine the students' knowledge regarding quantum physics, where the topics are light and wave/particle dualism. The students' development is measured as they progress through the modules of the project. Early research has indicated that light and wave/particle dualism contains terms and ideas that challenge the students. The empiric basis for the method used in this thesis is both written and oral statements from the participant in the project.

The results from the study indicates that the students achieve a good understanding regarding the nature of the particles as they are observed in experiments, however they do not succeed to put the dualism of the photon in context with the classical description of light.

<b>1. Innledning .....</b>	<b>5</b>
<b>2 Lys og bølge-partikkel-dualismen: En reise fra klassisk elektromagnetisme til kvantefysikk .....</b>	<b>8</b>
2.1 Introduksjon .....	8
2.2 Lys som elektromagnetiske bølger – klassisk elektromagnetisme.....	9
2.3 Kvantefysikk – lys består av diskrete partikler .....	16
2.4 Oppsummering.....	42
<b>3 Kvantefysikk i undervisningssammenheng: Perspektiver og tidligere forskning .....</b>	<b>44</b>
3.1 Introduksjon .....	44
3.2 Norske fysikkelever – en sterk elevgruppe .....	46
3.3 Moderne og klassisk fysikk i skolen.....	47
3.4 Kvantefysikk – manglende konsensus blant fysikere.....	57
3.5 Individuell konstruktivisme og sosiokulturelle syn på læring.....	58
3.6 Elevenes oppfatninger om lys og bølge-partikkel-dualismen.....	60
<b>4 ReleKvant.....</b>	<b>66</b>
4.1 Introduksjon .....	66
4.2 ReleKvantprosjektets visjon og teoretiske bakgrunn .....	66
4.3 ReleKvant i bruk .....	68
<b>5 Metode .....</b>	<b>70</b>
5.1 Introduksjon .....	70
5.2 Forskningsdesign .....	70
5.3 Datainnsamlingen .....	72
5.4 Fra datamateriale til resultater.....	77
5.5 Studien satt i videre sammenheng .....	80
5.6 Ethiske aspekter.....	83
<b>6 Resultater og analyse.....</b>	<b>85</b>
6.1 Introduksjon .....	85
6.2 Elevenes svar på åpningsspørsmålet om lys.....	86
6.3 Muntlig diskusjon i par.....	92
6.4 Er lys både bølge og partikkel? .....	98
6.5 Skriftlig svar på oppgave om fotoner.....	101
6.6 Elevenes refleksjoner om dobbeltspalteforsøket .....	106
6.7 Elevene skal forklare hva det vil si at partikler har bølgeegenskaper .....	108
6.8 Gruppeintervjuene.....	109
<b>7 Diskusjon .....</b>	<b>118</b>
7.1 Introduksjon .....	118
7.2 Elevenes kunnskaper før ReleKvant.....	118
7.3 Elevene starter med læringsmodulene.....	120
7.4 Alle partikler har bølgeegenskaper .....	127
7.5 Elevenes forståelse ved prosjektets slutt.....	128
7.6 Forslag til forbedringer .....	130
<b>8. Konklusjon .....</b>	<b>132</b>
<b>9 Litteraturliste .....</b>	<b>134</b>

## 1. Innledning

I kvantefysikk opplever elevene at den klassiske, elektromagnetiske bølgemodellen for lys faller fullstendig igjennom når denne modellen skal benyttes til å forklare det eksperimentelle resultatet fra Einsteins forsøk om fotoelektrisk effekt. Dette er bare et av mange forunderlige forsøk og fenomener elevene vil bli eksponert for i undervisningen som tar for seg moderne fysikk i videregående skole.

Læreplanen i Fysikk 2 dikterer at elevene, kvalitativt, skal gjøre rede for hvordan partiklenes bølgenatur representerer et brudd med den klassiske forståelsen av partikler (Utdanningsdirektoratet, 2015), et læreplanmål som uopnåelig hvis ikke elevene først får en faglig innføring av hva det vil si at partikler har bølgeegenskaper. Men, hvordan skal fysikkundervisningen gå frem for å gi elevene denne innføringen?

Har fysikkelever i den videregående skole de faglige forutsetningene for å oppnå en forståelse av partiklenes dualistiske natur, og hvor dyp, faglig forståelse skal det forventes at elevene oppnår på dette feltet? Det enkle svaret på det sistnevnte spørsmålet er at elevene skal oppnå en forståelse av bølge-partikkel-dualismen som er i tråd med deres faglige forutsetninger, men med et lettfattat svar følger nye, vanskelig spørsmål: Hva innebærer denne forståelsen og hvordan kan den undersøkes?

Til forskjell fra klassisk fysikk, er det gjort lite forskning på elevers faglige erkjennelse av moderne fysikk (Bungum et al., 2015), til tross for at viktigheten av å forstå moderne fysikk er økende i dagens samfunn, og ikke lenger er eksklusivt fysikere og fysikkstudenter (Steinberg & Oberem, 2000).

ReleKvant er et forskningsbasert læringsprosjekt som er utviklet nettopp for å fremme elevenes forståelse av moderne fysikk og fungere som nettbasert ressursmaterieell for lærere i den videregående skole (ReleKvant, 2014). Dette

prosjektet gir en unik mulighet til å studere elevens utvikling av kunnskap innenfor moderne fysikk.

I denne oppgaven vil jeg belyse hvordan elevenes forståelse av lys og bølge-partikkel-dualismen utvikles gjennom deres arbeid med ReleKvants læringsmoduler. Med denne overordnede problemstillingen har jeg formulert to forskningsspørsmål:

- Hva kjennetegner elevenes forståelse av lys og bølge-partikkel-dualismen?
- Hva bidrar til elevens læringsprosess i deres arbeid med ReleKvant-moduler?

I forhold til det første forskningsspørsmålet vil disse kjennetegnene bli beskrevet i ulike stadier, der denne kronologien er i samsvar med ReleKvants presentasjon av fagstoffet.

Under arbeidet med denne masteroppgaven har jeg fått tilgang til ReleKvants datamateriale fra prosjektets utprøving våren 2014 og høsten 2015. Dette datamaterialet består av skriftlige elevbesvarelser og lydopptak fra pardiskusjoner. Dette utgjorde en del av undervisningsopplegget for elevene. Jeg hadde ikke mulighet til å følge individer i arbeidet, så min definisjon av elevenes forståelse innbefatter elevene som en gruppe.

Videre har jeg skaffet meg data som beskriver elevenes dybdeforståelse av lys og bølge-partikkel-dualismen. Disse dataene ble samlet gjennom fire gruppeintervjuer, som ble utført med elever som hadde arbeidet med ReleKvants undervisningsmoduler i kvantefysikk.

Denne oppgaven starter med en fysikkfaglig beskrivelse av det fagstoffet som er aktuelt i forhold til min problemstilling. Siden det fysikkfaglige grunnlaget er vesentlig for å kunne undersøke og diskutere elevens forståelse, gir kapittel 2 en oversikt over fysikkens beskrivelse av lys og bølge-partikkel-dualismen.

I kapittel 3 følger fysikkdidaktiske teorier og undersøkelser som belyser elevenes oppfatninger knyttet til kvantefysikk og de mange fallgruvene denne fysikkdisiplinen representerer for både lærere, elever og studenter.

ReleKvantprosjektet vil bli presentert i kapittel 4, mens metodedelen utgjør denne masteroppgavens femte kapittelet.

I kapittel 6 vil jeg presentere resultatene fra både læringsmodulene og intervjuene, før jeg forankrer disse resultatene i didaktisk teori og tidligere undersøkelser i kapittel 7. I dette kapittelet vil jeg også komme med mine anbefalinger til undervisningsmodulene. Helt til slutt, i kapittel 8, følger en konklusjon.

## 2 Lys og bølge-partikkel-dualismen: En reise fra klassisk elektromagnetisme til kvantefysikk

### 2.1 Introduksjon

Er lys bølger eller partikler? Hvordan kan det ha seg at fotoner har bevegelsesmengde til tross for at de er masseløse? Kan den klassiske forståelsen av partikler benyttes når en skal forklare lysets eksperimentelle oppførsel? Hva menes med at partikler både har bølge- og partikkel-egenskaper? Hvordan kan elektroner produsere interferens-mønster i et dobbeltspalteforsøk og hvordan går kvantefysikken frem for å predikere et slikt eksperimentelt resultat?

Dette er spørsmålene elevene skal ta stilling til under deres arbeid med ReleKvantprosjektets læringsmoduler. I dette kapitlet følger en fysikkfaglig bakgrunnsbeskrivelse av spørsmålene stilt innledningsvis. Jeg starter med klassisk elektromagnetisme, der lys blir beskrevet som et utelukkende bølgefenomen, før jeg beveger meg inn i kvantefysikkens verden.

Denne nye, fysiske teorien, kvantefysikken, har innebygde egenskaper ved seg som ikke har noen analogier til klassisk fysikk. Jeg skal i første rekke, med hensyn til mine forskningsspørsmål, ta for meg kvantefysikkens beskrivelse av lys og bølge-partikkel-dualisme, men jeg ønsker også å nevne andre elementer fra denne teorien der jeg finner dette naturlig for å sikre at dette kapitlet får et helhetlig preg.

Målet med disse underkapitlene er ikke å gi en kronologisk, historisk fremstilling av stoffet, men heller forsøke å gi en bedre forståelse av hvordan fysikerne tenkte på 1800-tallet og hvorfor de måtte justere sin forståelse av både lys og partikler generelt etter at kvantefysikken gjorde sin entré i naturvitenskapen, der matematikk vil bli benyttet med den hensikt å gi en enda dypere innsikt i fysikernes tankesett.

I dette kapitlet vil jeg ikke gå direkte inn på de forskjellige *tolkningene* av kvantemekanikken (københavnstolkningen, skjult variabel-teorien osv.). Den eneste tolkningen dette kapitlet baserer seg på, innenfor kvantemekanikken, er *Borns statistiske interpretasjon av bølgefunksjonen*. Jeg vil komme tilbake til dette senere når den kvantemekaniske bølgefunksjonen for elektronet skal undersøkes.

## 2.2 Lys som elektromagnetiske bølger – klassisk elektromagnetisme

Dette delkapitlet tar for seg Youngs dobbeltspalteforsøk utført med lys. Deretter følger en utledning av den klassiske bølge ligningen for bølger på en streng, før jeg avslutningsvis skal benytte Maxwells ligninger tilhørende klassisk elektromagnetisme til å vise at både magnetiske og elektriske felter gir opphav til bølger som beveger seg *nøyaktig* med lysets hastighet i vakuum.

### 2.2.1 Youngs dobbeltspalteforsøk - lys som bølgefenomen

På starten av 1800-tallet utførte engelskmannen Thomas Young det kjente dobbeltspalteforsøket som viste at lys oppfører seg som bølger (Hemmer, 2005). Dette eksperimentet gikk i korte trekk ut på at monokromatisk (ensfarget) lys ble sendt mot en dobbeltspalte og deretter fanget opp på en skjerm som var plassert bak dobbeltspalten. Dette forsøket viste at det ble dannet et interferensmønster på skjermen, helt analogt med det mønsteret som dannes når fysiske bølger interfererer gjennom en dobbeltspalte. Vannbølger er et godt eksempel på slike fysiske bølger, der interferensmønsteret er proporsjonalt med amplituden  $A$  til bølgen,  $I \propto |A|^2$ . Fysikerne var derfor på god vei mot å akseptere bølge teorien for lys, en teori som skulle bli tatt enda mer på alvor da Maxwell hadde fullført den matematiske beskrivelsen av elektromagnetismen.

Fra Maxwells ligninger kan man utlede bølge ligningen for elektriske og magnetiske felter. Det viser seg at disse bølgene, i vakuum, har en hastighet som er identisk med lyshastigheten. Dette vil bli vist, men på veien følger en

utledning av den klassiske bølgeligningen for bølger på en streng i én romlig dimensjon.

Grunnen til at denne utledningen gjennomføres er at man da får sjansen til å utlede bølgeligningen fra et intuitivt, fysisk system man har visuell erfaring med, samtidig som det matematiske resultatet en ender opp med er universelt gyldig for en rekke andre fysiske fenomener (Kreyszig, 2006), der beskrivelsen av elektromagnetiske bølger er et aktuelt eksempel i denne sammenheng. Når vi senere skal løse Maxwells ligninger i vakuum får en sjansen til å "gå andre veien": En får knyttet et abstrakt, fysisk fenomen opp mot et etablert, matematisk resultat.

### 2.2.2 Utledning av bølgeligningen

Betrakt en veldig lang streng som blir utsatt for en spenning,  $T$ . La nå denne strengen være strukket et lite stykke fra likevekt, slik at netto transversell kraft på strengen mellom posisjon  $z$  og  $z + \Delta z$  ( se figur 2.1) er gitt ved

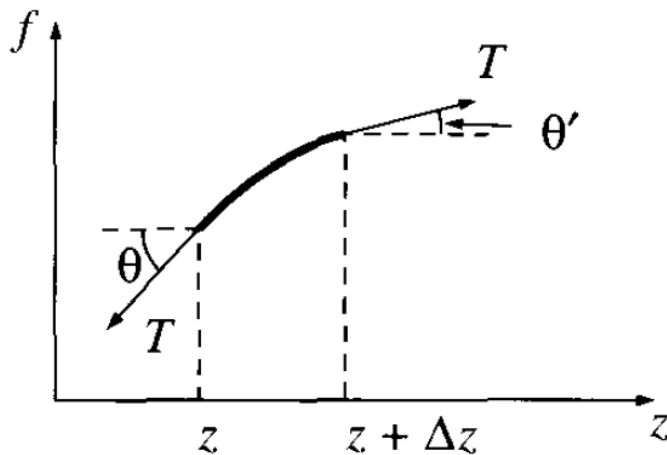
$$\Delta F = T \sin \theta' - T \sin \theta, \quad (2.1)$$

hvor  $\theta'$  er vinkelen mellom strengen  $z$ -retningen ved punktet  $z + \Delta z$  og  $\theta$  er den korresponderende vinkelen ved punktet  $z$ .

Kravet om at strengen skulle være svært lang fører til at vinklene er svært små. En kan derfor benytte seg av Taylorutvikling av de trigonometriske funksjonene

$$\sin \theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \mathcal{O}(\theta^5) \quad (2.2)$$





Figur 2.1: Størrelsen på vinklene er kraftig overdrevet i forhold til det fysiske systemet som betraktes. Figuren er hentet fra Griffiths (1999), s. 365.

og

$$\cos \theta = 1 - \frac{\theta^2}{2} + O(\theta^4). \quad (2.3)$$

Videre har en, til første orden, at

$$\tan \theta = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = \frac{\theta - \frac{\theta^3}{3!} + \dots}{1 - \frac{\theta^2}{2} + \dots} = \theta + O(\theta^2), \quad (2.4)$$

slik at en kan erstatte sinusfunksjonen med tangensfunksjonen, så lenge en setter krav om at  $\theta$  og  $\theta' \ll 1$ , hvilket medfører at en kan holde seg til første orden i  $\theta$  og  $\theta'$ . Dette kravet er oppfylt fysisk ved at strengen betraktes å være veldig lang, kombinert med det at selve strekket i strengen (forstyrrelsen fra strengens likevektsposisjon) er relativt beskjedent.

En ender da opp med følgende, approksimative ligning for  $\Delta F$ :

$$\Delta F \cong T(\tan \theta' - \tan \theta). \quad (2.5)$$

Her vil  $\tan \theta'$  og  $\tan \theta$  representere stigningstallet til tangentene i punktene  $z + \Delta z$  og  $z$ , slik at en kan bytte ut tangensfunksjonene med partiellderiverte i disse punktene, hvilket medfører at uttrykket blir omformet til

$$\Delta F = T \left( \left. \frac{\partial f}{\partial z} \right|_{z+\Delta z} - \left. \frac{\partial f}{\partial z} \right|_z \right) \cong T \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \Delta z. \quad (2.6)$$

Det neste på programmet blir nå å benytte Newtons 2. lov på strengen i intervallet  $z$  til  $z + \Delta z$ . Dette gir

$$\Delta F = \mu(\Delta z) \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}, \quad (2.7)$$

der jeg har innført  $\mu$  som er strengens masse per lengdeenhet.

En ender da opp med

$$\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = \frac{\mu}{T} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}. \quad (2.8)$$

Den fysiske tolkningen av leddet foran den partielle tidsderiverte i ligning (2.8) er at  $\sqrt{T/\mu}$  er hastigheten til strengen i forplantningsretningen og det kan vises at dette gjelder generelt for klassiske bølgebevegelser (Griffiths, 1999). Vi får da til slutt den klassiske bølgeligningen

$$\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}. \quad (2.9)$$

Det kan vises (ved direkte innsetting og påfølgende derivering) at alle funksjoner som er på formen  $f(z, t) = g(z \pm vt)$  er løsninger av den klassiske bølgeligningen (Griffiths, 1999), og siden bølgeligningen er en lineær differensialligning gjelder superposisjonsprinsippet (se for eksempel Boas, 2005; Kreyszig, 2006), slik at den mest generelle løsningen er

$$f(z, t) = g(x - vt) + h(x + vt). \quad (2.10)$$

Det er nettopp denne kombinasjonen av for eksempel sinusbølgefunksjoner, som skaper konstruktiv og destruktiv interferens, et kjent fenomen fra klassisk bølgefysikk, der vann- og lydbølger er fysiske eksempler.

Med bølgeligningen (2.9) vel i havn blir veien videre å koble denne ligningen til klassisk elektromagnetisme, der vi nå skal løse Maxwells ligninger i vakuum.

### 2.2.3 Maxwells ligninger - lys kan beskrives som elektromagnetiske bølger

Maxwells fire ligninger er gitt ved

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (2.11)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2.12)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2.13)$$

og

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}. \quad (2.14)$$

Disse fire ligningen samler, sammen med lorentzkraften,

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (2.15)$$

hele det teoretiske innholdet i klassisk elektromagnetisme. Det Maxwells ligninger forteller er at lys er beskrevet som elektromagnetiske bølger innenfor det synlige delen av det elektromagnetiske spekteret.

Hvis elektromagnetiske bølger skal representere lys *må* en av egenskapene til disse bølgene være at de forplanter seg nøyaktig med lysets hastighet i vakuum. Planen er nå å vise at så er tilfelle ved å utlede bølgeligningen for det elektriske og magnetiske feltet fra Maxwells ligninger i fritt rom.

I fritt rom (vakuum), en region der ladningstettheten  $\rho$  og den elektriske strømtettheten  $\mathbf{J}$  er lik null, vil Maxwells ligninger redusere seg til:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0, \quad (2.16)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2.17)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2.18)$$

og

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}. \quad (2.19)$$

Første steg i utledningen vil være å operere med  $\nabla \times$  på ligning (2.18):

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} = \nabla \times \left( -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right), \quad (2.20)$$

der vektoridentiteten  $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$  er benyttet.

Videre kan en bruke at curl-operatoren og den partielle tidsderiverte kommuterer, samtidig som en bruker at  $\nabla \cdot \mathbf{E}$  er lik null for ladningsfrie regioner, ifølge (2.16). En får da:

$$-\nabla^2 \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{B}). \quad (2.21)$$

En benytter så ligning (2.19) til å erstatte høyresiden av ligningen over, slik at en til slutt ender opp med

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}, \quad (2.22)$$

som er bølgeligningen for elektriske felt,  $\mathbf{E}$ .

Hvis vi nå opererer med  $\nabla \times$  på ligning (2.19) og følger samme prosedyre som over får en til slutt

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2}, \quad (2.23)$$

som er bølgeligningen for det magnetiske feltet,  $\mathbf{B}$ .

Disse to ligningene har identisk form som bølgeligningen vi utledet for bølger på en streng, bortsett fra at bølgeligningene for  $\mathbf{E}$ - og  $\mathbf{B}$ -feltet er generalisert til tre dimensjoner ved utskiftningen  $\frac{\partial}{\partial z} \rightarrow \nabla$ . Fra diskusjonen om den fysiske tolkningen av uttrykket foran den doble tidsderiverte på høyre side av (2.9), kan en sette  $\mu_0 \varepsilon_0 = 1/v^2$ , eller  $v = \sqrt{1/\mu_0 \varepsilon_0}$ .

Tomromspermittiviteten  $\varepsilon_0$  og den magnetiske tomromspermittiviteten  $\mu_0$  har følgende eksakte numeriske verdier i SI-systemet (Angell & Lian, 2009):

$$\varepsilon_0 = 10^7 \cdot (4\pi \cdot 299792458^2)^{-1} \text{ og } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}.$$

Det kan kontrolleres at vi får riktige enheter når vi setter inn tallverdier og enheter inn i uttrykket for  $v$ . En får da at  $v = \sqrt{1/\mu_0 \varepsilon_0} = 299792458 \text{ m/s}$ , som er den nøyaktige lyshastigheten i vakuum.

Det virkelige store med dette er ikke de trivielle algebraiske operasjonene for å finne et uttrykk for farten,  $v$ . Det fantastiske er at tomromspermittiviteten,  $\varepsilon_0$ , og den magnetiske tomromspermittiviteten,  $\mu_0$ , først dukket opp i den fysiske teorien om elektrisitet og magnetisme som konstanter i Coulombs lov og Biot-Savarts lov. Coulombs lov beregner størrelsen og retningen til kraften mellom to

ladninger separert av en avstand  $r$ , mens Biot-Savart blir benyttet til å bestemme størrelse og retning til det magnetiske feltet som blir generert fra en jevn strøm  $I$ . Disse konstantene ble altså målt og bestemt i eksperimenter som ikke hadde noe verdens ting med lys å gjøre, men allikevel viser det seg at kombinasjonen av disse konstantene i bølgeligningen for elektromagnetiske felt gir en verdi som er identisk med lysets hastighet.

Maxwell publiserte sine ligninger i 1865 (Jackson, 1999), over et halvt århundre etter at Thomas Young hadde gjennomført sitt dobbeltspalteforsøk som viste at lyset interfererte som en bølge. Nå fantes det både eksperimentelle og teoretiske kjensgjerninger som støttet den elektromagnetiske bølgeteorien for lys, men kvantefysikken, som kom på starten av 1900-tallet, ville det annerledes.

### 2.3 Kvantefysikk – lys består av diskrete partikler

Kvantefysikken, som ble utviklet på starten av 1900-tallet som en løsning på ultrafiolettkatastrofen (Hemmer, 2005), endret fysikernes tanker om hva lys er. Her skal vi se at det var spesielt to eksperimenter som var uforenlig med den klassiske tolkningen av lyset som et fullstendig bølgefenomen. Kvantefysikken frarøvet med andre ord fysikerne muligheten til å gi et enkelt svar på hva lys egentlig er for noe. Dette har også, som vi skal se i et annet hovedkapittel, direkte innvirkning på fysikkdidaktiske spørsmål som er knyttet til det å undervise i kvantefysikk.

I dette delkapittelet følger en beskrivelse av kvantefysikkens fødsel, etterfulgt av en diskusjon rundt de eksperimentene som motbeviste at lyset kunne sees på som et utelukkende bølgefenomen. Videre vil jeg ta for meg fotonet og se på dets oppførsel i dobbeltspalteeksperimentet, før jeg vil presentere de Broglies hypotese og knytte denne hypotesen opp mot bølge-partikkel-dualismen for elektronet. Avslutningsvis vil jeg ta for meg den kvantemekaniske bølgefunksjonen og forklare hvorfor det eksperimentelle resultatet fra dobbeltspalteforsøket utført med elektroner "tvinger" frem denne bølgefunksjonen.

### 2.3.1 Ultrafiolett katastrofen – starten på kvantefysikken

Ultrafiolett katastrofen, som oppsto på starten av 1900-tallet, regnes av mange som starten på kvantefysikken. Denne hendelsen fikk sitt navn fordi den klassiske strålingsloven feilet fullstendig med å predikere korrekte, eksperimentelle verdier for den spektral emittansen  $I(\nu, T)$ , for stråling med kortere bølgelengder enn for synlig lys, som vil si for bølgelengder i den ultrafiolette delen av det elektromagnetiske spekteret.

Alle legemer sender ut elektromagnetisk stråling, der denne strålingens intensitet og frekvensfordeling avhenger av legemets temperatur. Den spektrale emittansen er definert ved at utsendt energistrøm av stråling for et svart legeme med en viss temperatur  $T$ , i intervallet  $(\nu, \nu + d\nu)$ , er gitt ved  $I(\nu, T)d\nu$ . Hvis en samler plottene fra de *eksperimentelle verdiene* av  $I(\nu, T)$  for et svart legeme<sup>1</sup> i termisk likevekt i et  $(\nu, I(\nu, T))$ -koordinatsystem, vil en få det vi i dag kaller for en Planck-fordeling. Hvis en foretar seg en regresjon av disse fordelingene vil Planck-fordelingene gi en Planck-kurve. Det essensielle er at denne kurven har et absolutt toppunkt for en viss frekvens  $\nu$ . Den klassiske strålingsloven klarte ikke å produsere denne kurven, da den divergerte for korte bølgelengder  $\lambda = c/\nu$ .

Hvis en bruker klassisk fysikk på å beregne den spektrale emittansen ender man opp med følgende resultat:

$$I(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT, \quad (2.24)$$

der  $\nu$  er frekvensen,  $c$  er lysfarten,  $k$  er Boltzmanns konstant og  $T$  er temperaturen. Kombinasjonen  $kT$  følger fra klassisk statistisk mekanikk som gir at en harmonisk oscillator i likevekt har mildere energi tilsvarende dette beløpet.

---

<sup>1</sup> Et hulrom med et lite hull i veggen er et eksempel på et svart legeme, da hullet absorberer all innfallende stråling. Ingen fysiske legemer er perfekte sorte legemer, men det fungerer som en verdifull, teoretisk konstruksjon.

Det er to fundamentale problemer med dette resultatet. For det første, som diskutert over, er ikke plottet av  $I(\nu, T)$  som funksjon av frekvensen  $\nu$ , ikke på noen måte i samsvar med den eksperimentelle kurven, og skal man beregne den totale energistrømmen, som er gitt ved

$$J(T) = \int_0^{\infty} I(\nu, T) d\nu, \quad (2.25)$$

ender man opp med at integralet divergerer, som vil si at den totale energistrømmen er uendelig.

Tegmark og Wheeler (2001) skriver at disse to problemene førte til en krisestemning blant fysikerne. Klassisk mekanikk, termisk fysikk og elektrodynamikk hadde vært essensielle i den industrielle revolusjonen, og datidens vitenskapsmenn var av den oppfatning at det virket som de grunnleggende ligningene tilhørende disse teoriene kunne beskrive så godt som alle fysiske systemer. Derfor var problemene med den klassiske strålingsloven intet godt nytt for datidens fysikere, som hadde stor tiltro til det vi i dag kaller klassisk fysikk, der Newtons mekanikk og Maxwells ligninger i elektromagnetisme er aktuelle eksempler i denne sammenheng (Tegmark & Wheeler, 2001).

Hemmer (2005) skriver at Max Planck søndag 7.oktober 1900 fant fram til en ny strålingslov som passet med målingen av strålingsenergien. Denne var gitt ved

$$I(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}, \quad (2.26)$$

der  $h$  var en ny konstant som senere skulle bli kalt Plancks konstant, en konstant som skulle bli svært sentral i kvantefysikken.



Det er viktig å kommentere at verdien av Plancks konstant kom inn i bildet og ble satt til å være  $6.6 \cdot 10^{-34}$  Js nettopp fordi den skulle passe med de eksperimentelle dataene. Et annet viktig poeng er at det klassiske uttrykket for  $I(\nu, T)$  stemte bra med de eksperimentelle verdiene for lange bølgelengder, som vil si for lave frekvenser ved hjelp av relasjonen  $\lambda = c/\nu$ . Det er derfor en nødvendighet at den nye strålingsloven måtte være identisk med den klassiske strålingsloven for lange bølgelengder.

Dette er fordi, som Shankar (1994) beskriver, at fysikken er en dynamisk vitenskap. Til enhver tid må de fysiske teoriene endres for å tilfredsstille nye eksperimentelle resultater, men en essensiell egenskap ved disse nye, fysiske teoriene er at de må *fortsette* å beskrive tidligere fenomener, som er innenfor gyldighetsdomenet til den tidligere fysikken, på en korrekt måte. Et eksempel på dette er Einsteins spesielle relativitetsteori, som sammenfaller med Newtons mekanikk når hastigheten til et objekt er godt under lyshastigheten. Det samme kravet må settes til kvantefysikken, som på sin side også er en generalisering av den klassiske fysikken. Kvantefysikken må gi de samme, korrekte prediksjonene av de fysiske eksperimentene som tidligere er forklart med den klassiske fysikken, i tillegg til å kunne predikere nye eksperimentelle resultater der den klassiske fysikken ikke lenger strekker til (Shankar, 1994).

Da den klassiske strålingsloven fungerte utmerket for lange bølgelengder, så må den kvantemekaniske strålingsloven (2.26) sammenfalle med den klassiske strålingsloven (2.24) for lange bølgelengder  $\lambda$ .

Shankars (1994) krav om at en ny fysisk teori må kunne reprodusere den gamle teoriens korrekte, eksperimentelle prediksjoner når en befinner seg innenfor den gamle teoriens gyldighetsområde, kan undersøkes for Plancks strålingslov ved at man setter  $hc/\lambda = h\nu \ll kT$  (for lange bølgelengder  $\lambda$ ), slik at en kan rekkeutvikle eksponentialfunksjonen  $e^{h\nu/kT}$  i (2.26) til første orden. Da vil en ende opp med

$$\lim_{h\nu/kT \rightarrow 0} I(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{\left(1 + \frac{h\nu}{kT} + \dots\right) - 1} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT, \quad (2.27)$$

som er den klassiske strålingsformelen, (2.24).

Det var nettopp dette som var opphavet (og navnet) til ultrafiolett katastrofen og starten på kvantefysikken. Det klassiske resultatet for  $I(\nu, T)$  gjorde jobben for lange bølgelengder  $\lambda$  men feilet fullstendig med å predikere eksperimentelle resultater der bølgelengden var innenfor det ultrafiolette spekteret ( $\lambda < 400\text{nm}$ ). Det var derfor nødvendig med en ny strålingsformel, en strålingsformel som inneholdt en antagelse om energien som var fullstendig ukjent kost innenfor den klassiske fysikken.

Planck fant ut at han kunne *forklare* sin nye empiriske strålingsformel, (2.26), ved å foreta følgende antagelse: Energien for strålingen med frekvens  $\nu$  er *kvantisert* i enheter  $h\nu$ , hvilket betyr at energien bare kunne ta de diskrete verdiene

$$E = 0, h\nu, 2h\nu, 3h\nu, \dots \quad (2.28)$$

Kvantisering av energi<sup>2</sup> var en helt ny idé som ikke hadde noen analogi i klassisk fysikk. Det var dette som ble starten på kvantefysikken og, som vi skal se, vil ideen om kvantisering utfordre den klassiske beskrivelsen av lys som et fullstendig bølgefenomen.

Vi skal nå se nærmere på to eksperimenter som utfordret den elektromagnetiske bølge-teorien for lys, der Plancks antagelse om energikvantisering igjen viste seg å være korrekt da de eksperimentelle resultatene skulle forklares.

### 2.3.2 Den fotoelektriske effekt (1905) – lys består av diskrete partikler

---

<sup>2</sup> En oppnår også det klassiske resultatet i Plancks strålingsformel hvis en lar energikvantet gå mot null, i.e.  $h \rightarrow 0$ . Dette er også en nødvendighet fordi kvantefysikk er en generalisering av klassisk fysikk og i klassisk fysikk blir energien sett på som en kontinuerlig størrelse.

Lys som blir sendt ut mot en metalloverflate har evnen til å slå løs elektroner. Dette er fotoelektriske effekt, og tilhørende denne effekten var det tre punkter som den klassiske bølgeteorien for lys ikke maktet å forklare (Brandsen & Joachain, 2000):

(i) I følge klassisk bølgeteori ville fotoelektrisk effekt oppstå uavhengig av frekvensen,  $\nu$ , til den innkommende strålingen, så lenge strålingsintensiteten var stor nok til å gi tilstrekkelig energi for å slå løs elektronene. Dette kan man forstå hvis man betrakter uttrykket for gjennomsnittsenergien og -intensiteten til en elektromagnetisk, monokromatisk planbølge. Ved hjelp av disse uttrykkene kan en se hvilke størrelser som inngår i de klassiske intensitets- og energiuttrykkene, slik at man da kan se hva bølgeteorien for lys predikerte for dette eksperimentet.

Intensiteten er definert som gjennomsnittlig effekt per arealenhet som transporteres av en elektromagnetisk bølge, og uttrykket er gitt ved

$$I \equiv \langle S \rangle = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2, \quad (2.29)$$

der  $c$  er lyshastigheten,  $\epsilon_0$  er tomromspermittiviteten og  $E_0$  er amplituden til det elektriske feltet.  $\langle S \rangle$  er gjennomsnittsverdien av Poynting-vektoren, definert ved  $\mathbf{S} = (\mathbf{B} \times \mathbf{E}) / \mu_0$  (energi per tids- og arealenhet som transporteres av det elektriske og magnetiske feltet).

Hvis en nå ser på uttrykket for gjennomsnittsenergien per volumenhet til den elektromagnetiske bølgen, som er gitt ved

$$\langle u \rangle = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_0^2, \quad (2.30)$$

ser en at  $I \propto \langle u \rangle$ , der begge uttrykk er *uavhengig* av frekvensen  $\nu$ . Klassisk bølgeteori utelukker altså at denne effekten er frekvensavhengig, men dette var *ikke* i samsvar med det eksperimentelle resultatet (Polkinghorne, 2002).

Eksperimentet viste at det fantes en grensefrekvens  $\nu_0$ , som bestemte om elektronene ble løsrevet fra metallet. Hvis frekvensen på det innkommende lyset var mindre enn grensefrekvensen ble ingen elektroner løsrevet fra metallet, uansett styrken på lysintensiteten eller hvor lenge metallet ble bestrålt<sup>3</sup>. Eksperimentet viste altså at effekten var *intensitetsuavhengig*, stikk i strid med bølgeteoriens prediksjoner.

(ii) I følge bølgeteorien for lys ville den kinetiske energien til foto-elektronene (elektronene som blir løsrevet) være proporsjonal med intensiteten og, som følge av  $I \propto \langle u \rangle$ , energitettheten til bølgen. Den elektromagnetiske bølgeteorien predikerte derfor  $E_{kin}$  skulle være frekvensuavhengig.

Dette stemte ikke med det eksperimentelle resultatet, som viste at foto-elektronenes kinetiske energi var lineært proporsjonalt med frekvensen  $\nu$  og uavhengig av intensiteten. Basert på denne lineære frekvensavhengigheten kom Einstein fram til følgende ligning, som senere skulle få navnet Einsteins ligning, som ga en perfekt beskrivelse av de eksperimentelle resultatene:

$$E_{kin} = h\nu - W, \quad (2.31)$$

der  $E_{kin}$  er foto-elektronets kinetiske energi,  $h$  er Plancks konstant og  $W$  er frigjøringsarbeidet, hvilket vil si den energimengden det koster å løsribe elektronene fra metallet.

For det første er det nå en smal sak å finne et uttrykk for grensefrekvensen,  $\nu_0$ . En setter da  $E_{kin}$  lik null og løser med hensyn på frekvensen (kalt  $\nu_0$  når  $E_{kin} = 0$ ), slik at en får

$$\nu_0 = \frac{W}{h}. \quad (2.32)$$

---

<sup>3</sup> I dag stemmer ikke intensitetsuavhengighetsutsagnet helt. Hvis man bruker lys med enormt høy intensitet vil man til slutt få løsrevet elektroner fra metalloverflaten til tross for at  $\nu < \nu_0$ , men slike intensitetsverdier var (heldigvis) umulig å oppdrive med datidens laboratorieutstyr.

Dette stemte fortreffelig med eksperimentene: Foto-elektronene kinetiske energi varierer lineært med frekvensen, med en grensefrekvens gitt ved (2.32).

For det andre er det viktig å merke seg hvordan Plancks konstant, i kombinasjonen  $h\nu$ , igjen kom inn i bildet. Einstein forklarte nettopp den fotoelektriske effekten ved å postulere, som Planck, at lyset besto av diskrete kvanta, senere kalt fotoner, med energi  $E = h\nu$ . Hvis man økte intensiteten til lyset ville derfor dette kun føre til et større antall fotoner med lik energi (samme frekvens), og man ville derfor ikke få løsrevet elektronene i metallet så lenge  $\nu < \nu_0$  (med forbehold om det som ble formidlet i fotnote 3).

(iii) I følge den klassiske bølgeteorien for lys ville det være forbundet en tidsforsinkelse med elektronutslagningen. Dette skyldes at en bølge vil spre sin energimengde uniformt over bølgefronten, slik at det vil ta tid å samle nok energi innenfor et område av atomisk størrelsesorden til å løsrive elektronet fra atomet. Dette stemte ikke med de eksperimentelle resultatene, som viste at elektronene ble løsrevet tilnærmet uten noen form for tidsforsinkelse. Denne observasjonen talte derfor den elektromagnetiske bølgeteorien for lyset imot og favoriserte Einsteins antagelser om at lyset besto av en strøm av diskrete partikler, fotoner, med energi  $E = h\nu$ , der hele fotonenes energibeløp ble brukt til å løsrive elektronet, og, såfremt  $\nu > \nu_0$ , gi det kinetisk energi.

Selv om Einsteins ligning for den fotoelektrisk effekt stemte fortreffelig med eksperimentelle resultater ble den, av mange fysikere, allikevel ikke tatt på alvor. Vi må nesten bevege oss to tiår frem i tid før de fleste av fysikerne tok hypotesen om *partikkelnaturen* til elektromagnetisk stråling på alvor. Dette kom etter at Arthur H. Compton gjennomførte sitt berømte eksperiment, der han påviste det som senere skulle få navnet Compton-effekten.

### **2.3.3 Compton-effekten (1923) - enda et argument for fotonbegrepet**

Compton oppdaget at når stråling i et gitt frekvensintervall (i røntgenområdet) ble sendt gjennom en folie så vil noe av strålingen forandre frekvens. Denne

forandringen i frekvens har sammenheng med retningen til den spredte strålingen, og Compton fant ut at for å forklare denne forandringen måtte han tolke eksperimentet som et støt mellom *partikler*, det være seg mellom fotonet fra strålingen og elektronet i folien, der de eksperimentelle dataene viste en forandring i bølgelengden (ved hjelp av  $\lambda = c/\nu$ ) er gitt ved

$$\lambda' = \lambda + \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta), \quad (2.33)$$

der  $\lambda'$  er bølgelengden etter støtet,  $m$  er elektronmassen og  $\theta$  er spredningsvinkelen til fotonet.

Det essensielle her er hvordan Compton kom frem til uttrykket for forandringen i bølgelengden,  $\lambda'$  (2.33). Han postulerte, som Planck og Einstein, at den elektromagnetiske strålingen hadde en partikkelnatur og bestod av fotoner med energi gitt ved den nå kjente relasjonen  $E = h\nu$ , slik at han kunne se på strålingens (fotonet) møte med folien (elektronet) som et støt mellom to *partikler*. På den måten brukte Compton impuls- og energibevarelse til å utlede uttrykket for  $\lambda'$ .

I følge Hemmer (2005) var det Comptoneffekten som til slutt overbeviste de fleste fysikere om at fotonbegrepet måtte tas på alvor, men vi må ikke glemme at i, for eksempel, interferens- og diffraksjonseksperimenter vises *bølgeoppførselen* til elektromagnetiske stråling. Vi blir derfor ledet til den smått kaotiske konklusjonen at lyset, og elektromagnetisk stråling generelt, viser både bølge- og partikkelegenskaper, der egenskapene avhenger av det eksperimentet som utføres.

Både den fotoelektriske effekt og Comptoneffekten favoriserer ideen om at elektromagnetisk stråling består av diskrete partikler, fotoner, men hva slags partikler er egentlig fotonene?

### 2.3.4 Fotonet – en partikkel som ikke kan beskrives med klassisk mekanikk

Fotonbegrepet ble brukt av Einstein i 1905 da han skulle forklare fotoelektriske effekt. Fotonet er masseløst og beveger seg med lyshastigheten,  $c$ . Selv om fotonet er masseløst har det bevegelsesmengde forskjellig fra null. Vi benytter oss av spesiell relativitetsteori for å finne denne bevegelsesmengden  $p$  og dens sammenheng med fotonets energi  $E$ . Det er to hovedgrunner for at vi utfører denne utledning. For det første viser utledningen at en må forlate den klassiske mekanikken for å finne bevegelsesmengden til denne masseløse partikkelen ( $p_{\text{klassisk}} = mv$ ) og for det andre vil sammenhengen vi finner mellom fotonets energi og bevegelsesmengde gi oss en elegant overgang til en svært sentrale hypotesen innen kvantefysikk og bølge-partikkel-dualismen, *de Broglies hypotese*.

I følge Einsteins spesielle relativitetsteori er bevegelsesmengden gitt ved

$$p_{\text{rel}} = \gamma mv, \quad (2.34)$$

der  $\gamma$  er Lorentzfaktoren gitt ved  $\gamma = 1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$ ,  $m$  er partikkelens masse og  $v$  er farten. La oss nå skrive ut det fulle uttrykket for den relativistiske bevegelsesmengden. Da vil en ende opp med

$$p_{\text{rel}} = \frac{mv}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (2.35)$$

Det skjer noe svært dramatisk i brøken på høyre side av (2.35) når en trekker inn at fotonet beveger seg med lyshastigheten: En får null i nevneren. På en grov måte kan en slutte at naturens grep for å få oss ut av denne matematiske knipen er å tilegne fotonet null masse, noe som er i perfekt overensstemmelse med eksperimenter – fotonet er masseløst og det beveger seg med lyshastigheten. Vi fortsetter jakten på fotonets bevegelsesmengde ved å introdusere det relativistiske uttrykket for energi.

Det relativistiske uttrykket for energi er gitt ved Einsteins berømte ligning

$$E = \gamma mc^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}, \quad (2.36)$$

der samme symbolbruk gjelder.

Ved å kombinere (2.35) og (2.36) (eliminering av farten  $v$ ) ender en opp med følgende uttrykk som viser sammenhengen mellom den relativistiske energien og bevegelsesmengden (der jeg har byttet ut  $p_{rel}$  med  $p$  for enklere notasjon):

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}. \quad (2.37)$$

For fotonet har en at  $E = h\nu$  samtidig som denne partikkelen er masseløs. Når en setter disse opplysningene inn i (2.37) får en

$$E = h\nu = pc, \quad (2.38)$$

som løst med hensyn på bevegelsesmengden  $p$  gir til slutt

$$p = \frac{h\nu}{c}, \quad (2.39)$$

som viser at fotonet har bevegelsesmengde forskjellig fra null, samtidig som (2.38) forteller at forholdet mellom fotonets energi og bevegelsesmengde er gitt ved  $E = pc$ . Denne sammenhengen mellom fotonets energi og bevegelsesmengde skal senere benyttes i en elegant utledning av de Broglies formel.

### 2.3.5 Dobbeltpalteforsøk – fotonet viser bølge-partikkel-dualisme

Helt i starten av dette kapittelet betraktet vi Youngs dobbeltpalteforsøk, som favoriserte *bølgetolkningen* av lyset. En viktig størrelse i denne sammenhengen



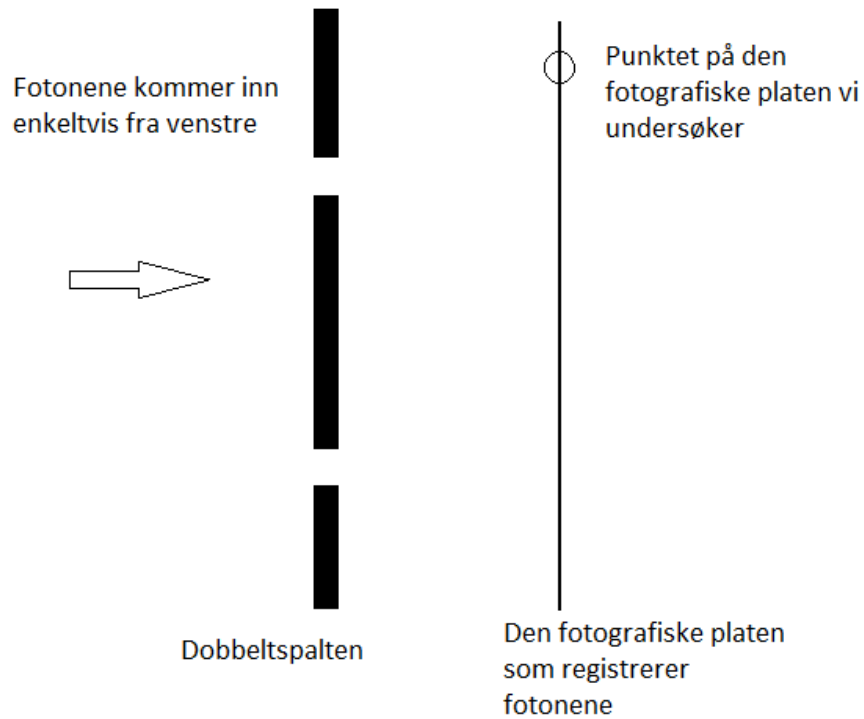
er intensiteten til en bølge. I dette forsøket vil økende intensitet bety en økende grad av belysning. En bølge passerer gjennom to åpninger og interferer, slik at en vil kunne lese av et interferensmønster på den fotografiske platen som er plassert bak dobbeltpalten. Det er ikke i og for seg noe mystikk knyttet til dette, men hva skjer når en skrur ned intensiteten til lyskilden?

Hvis lyset viser seg å være en bølge må en forvente at interferensmønsteret vil bli svakere og svakere jo mer en justerer ned intensiteten, samtidig som det vil ta noe tid før platen blir nok eksponert for belysning til at en kan se mønsteret. Men, en forventer i tillegg at hele platen vil bli dekket av dette interferensmønsteret, analogt med en vannbølge som treffer en sandstrand: Lavere intensitet vil bety at vannbølgen kryper kortere opp mot stranden, men bølgen vil fortsatt væte hele strandkanten. Dobbeltpalteeksperimentet utført med lavintensitetslys forteller derimot en helt annen historie.

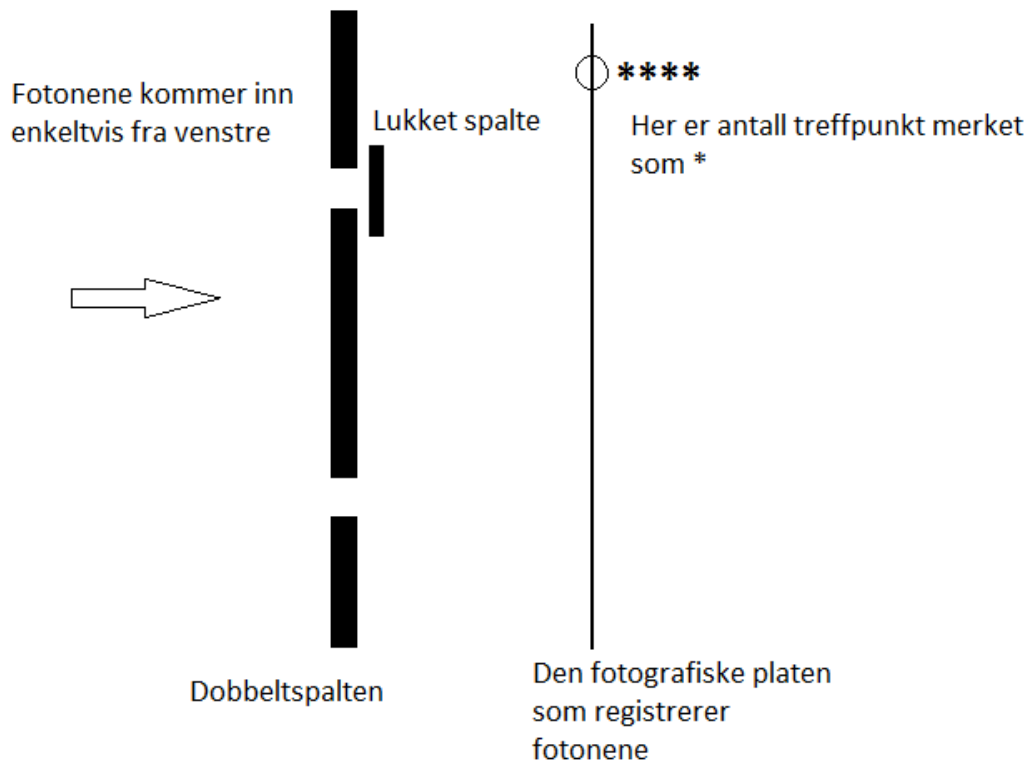
Vi setter inn en ny fotografisk plate og venter. Ingenting skjer på en stund, men plutselig blir platen truffet. Etter hvert vil platen bli truffet på ny og, etter en viss tid, vil platen eksempelvis inneholde et titalls trefninger som er spredt utover flaten.

Det spesielle er at hvert eneste treffpunkt er lokalisert og bevitner derfor om at platen ble truffet partikler, ikke bølger. Videre viser det seg at hvis en beholder frekvensen på lyskilden eksperimentet ut, og beregner energien og bevegelsesmengden til treffpunktene har hver av disse treffpunktene identiske verdier, verdier som kan kalkuleres ved hjelp av (2.38) og (2.39). Vi kan derfor slutte at platen ble truffet av fotoner, noe som forteller oss at lyset består av diskrete kvanta av disse *partiklene*, men hvordan kan det samtidig ha seg at det var nettopp Youngs dobbeltpalteforsøk som favoriserte lysets *bølgeegenskaper*? For å svare på dette kan en betrakte følgende ekstremtilfelle av eksperimentet, der jeg skal skissere dobbeltpalten og den fotografiske platen sett ovenfra. Med ekstremtilfellet menes at vi skal sende lavintensitetslys mot dobbeltpalten, der intensiteten er så lav at fotonene kommer *enkeltvis* inn mot spaltene.

Eksperimentet deles inn i tre situasjoner der vi i alle situasjoner skal konsentrere oss om et fiksert punkt på den fotografiske platen. Figur 2.2 viser en skisse av oppsettet. Det vil følge en skisse til hver av de eksperimentelle situasjonene.



**Figur 2.2: Bilde av det eksperimentelle oppsettet, der spaltene er kraftig forstørret i forhold til virkeligheten.**

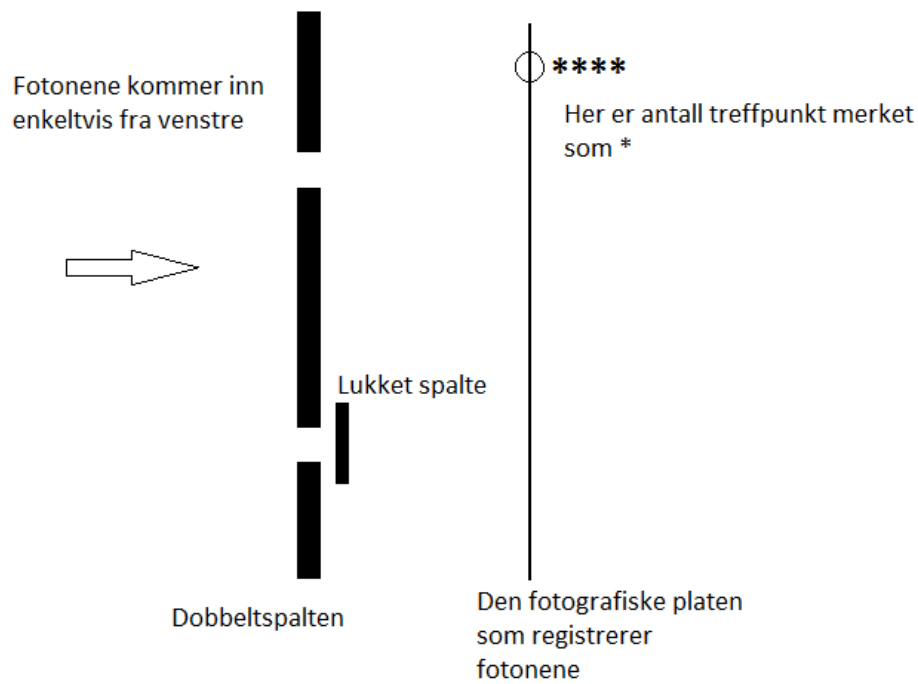


**Figur 2.3: Vi lukket den øvre spalten og fire fotoner traff punktet vi undersøker.**

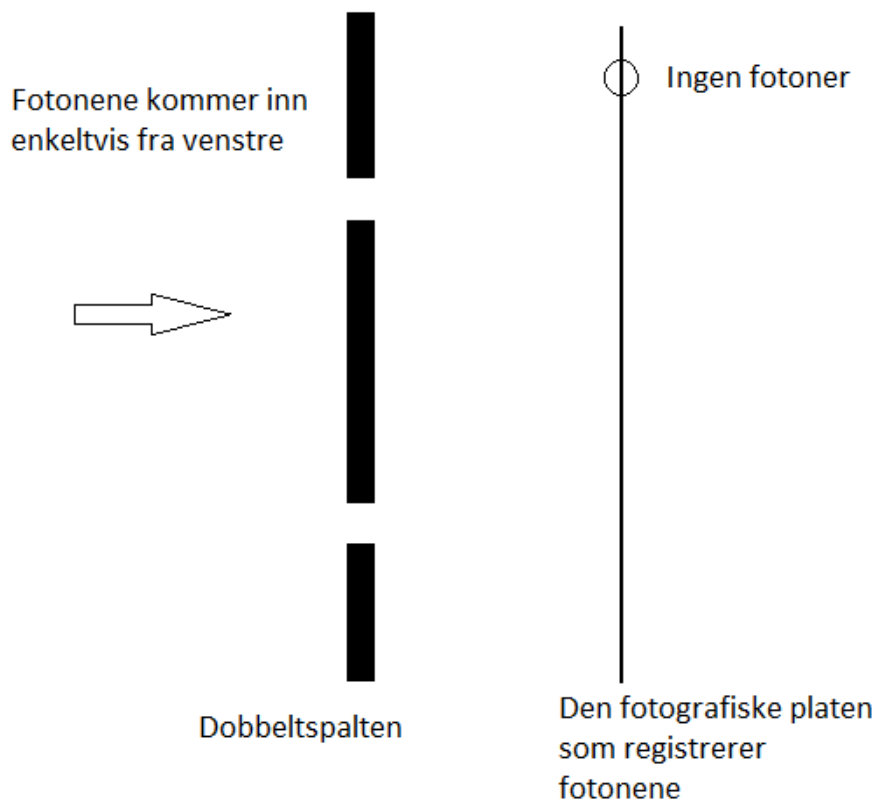
*Situasjon (i):* Vi lukker den øvre spalten og venter en liten stund. På denne tiden vil (eksempelvis) 4 fotoner ha truffet det punktet vi undersøker, som er vist i figur 2.3.

*Situasjon (ii):* Vi lukker nå den nedre spalten, mens vi lar den øvre stå åpen og lar tiden gå. Her oppdager vi (eksempelvis) at det er fire fotoner som treffer punktet vi undersøker, slik figur 2.4 viser.

*Situasjon (iii):* I den tredje og siste situasjonen lar vi begge spalter stå åpne. Hvis fotonet oppfører seg som en "ordinær" partikkel må vi da vente at antall treffpunkter i punktet vi har valgt å undersøke må bli summen av de to forrigegående situasjonene, men dette er *ikke* i samsvar med det eksperimentelle resultatet. Eksperimentet viser derimot at vi ender opp med *null* fotoner, som vist i figur 2.5.



**Figur 2.4: Vi lukket den nedre spalten og fire fotoner traff punket vi undersøker.**



**Figur 2.5: Vi lar begge spalter stå åpne og resultater strider mot all sunn, klassisk fornuft: Vi ender opp med at ingen fotoner traff det punktet vi undersøker.**

Er det det egentlig radikalt å påstå at lys består av partikler? Svaret på dette er både ja og nei.

Hvis noen forteller at lyset ikke er en bølge, men at det består av diskrete partikler, så er ikke dette et stort problem i seg selv. Hvis en tar for seg vannbølger, som definitivt danner et interferensmønster i et dobbeltspalteforsøk, så kan en argumentere for at vannet egentlig ikke er kontinuerlig, da det består av vannmolekyler. Det er først når en tar for seg vannets egenskaper på makroskopisk nivå, en størrelsesskala som er mye større enn den atomære, så oppfattes vannet som kontinuerlig, og det er innenfor denne makroskopiske størrelsesordenen at vannet blir oppfattet som bølger, og derfor danner et interferensmønster i dobbeltspalteforsøk. Det store problemet er derfor ikke at vi har talt Maxwell og klassisk elektromagnetisme imot og påstått, som Einstein, at lyset består av diskrete partikler.

Hovedproblemet er *partiklene* lyset består av, som vist i situasjon (iii). Hvis fotonene hadde vært "ordinære" partikler, så hadde de fulgt veldefinerte baner fra lyskilden og inn gjennom en av spaltene, før de hadde endt opp på den fotografiske platen, der det totale antallet hadde vært summen av situasjon (i) og (ii). Dette er i tråd med oppførselen til den klassiske forståelsen av partikler: En partikkel hadde ikke "brydd seg" om eksempelvis den nedre spalten var lukket eller åpen, idet den passerte gjennom den øvre spalten. En partikkelbevegelse, diktert av klassiske bevegelseslover, ville fulgt en veldefinert bane fra partikkelkanonløpet, gått gjennom en av spaltene (hvis den hadde truffet) og truffet skjermen på den andre siden av dobbeltspalten.

For en bølge derimot, som brer seg over hele rommet er det av betydning om en eller begge spalter er åpne. Hvis begge spalter var åpne kunne vi fått en destruktiv interferens i det punktet vi undersøkte, noe vi opplevde i situasjon (iii). Konklusjonen er derfor, basert på dette ekstremtilfellet av dobbeltspalteeksperimentet utført med lavintensitetslys, at disse lyskvantene, fotonene, er *partikler* (energien og bevegelsesmengden er lokalisert i hvert

treffpunkt), men at det trengs en *bølge* for å beskrive dem. Det er denne bølgen som sørger for at kvantefysikken kan predikere eksperimentelle resultater der lys (fotoner) viser sin bølgenatur, i tillegg til å kunne predikere resultater fra forsøk der lys viser sin partikkelnatur.

Den bølgen er ingen fysisk bølge, da den ikke bærer på noen energi (Griffiths, 1999). Denne bølgen er heller ikke en bølge som beskriver en strøm av fotoner. Hvert foton har sin egen bølge og denne bølgen eksisterer kun matematisk – det er en matematisk konstruksjon som vil kunne predikere hva som vil skje i eksperimenter og der denne prediksjonen er av statistisk art: Hvis en kjenner fotonenes bevegelsesmengde (eksempelvis lyskildens frekvens vha. (2.39)) kan denne bølgen benyttes til å predikere interferensmønsteret fotonene skaper, og da *sannsynligheten* for hvor fotonene har størst sannsynlighet for å treffe den fotografiske platen. Denne sannsynligheten er størst der interferensmønsteret har sitt toppunkt, hvilket vil si der bølgen opplever konstruktiv interferens, samtidig som det er null sannsynlighet for at fotonet vil befinne seg i de lokasjonene der bølgen opplever destruktiv interferens, som var det punktet vi undersøkte i situasjon (iii). Utfører vi dette eksperimentet med lavintensitetslys vil vi, etter at millioner av fotoner har passert dobbeltspalten, ende opp med et interferensmønster som ligner det interferensmønsteret som blir skapt av, eksempelvis, vannbølger i samme eksperiment.

Det er altså denne matematiske bølgen, tilhørende hvert foton, som sørger for at disse partiklene også har bølgeegenskaper i tillegg til at de innehar partikkelegenskapene som ble diskuterte i et tidligere avsnitt. La oss sette dette i sammenheng med dobbeltspalteforsøket: Hvorfor favoriserte nettopp dette forsøket lysets bølgeegenskaper?

Hvis en lar tiden gå når en sender fotonene enkeltvis inn mot spalten vil en, som nevnt over, ende opp med et ferdigplottet histogram som har tilnærmet identisk form som det interferensmønsteret Young oppdaget i 1803. Essensen i historien er at hvis man sender en strøm av fotoner mot dobbeltspalten, hvilket vil si lys med “normal intensitet”, vil dette histogrammet plottes så fort at det

menneskelige øyet ikke klarer å oppfatte selve plottesequensen. Derfor er det ikke rart at dette er en av grunnene til at Young og andre fysikere forsto lyset utelukkende som et bølgefenomen for to hundre år siden – en trenger lavintensitetslys for å ”oppdage” lysets partikkelnatur.

For å oppsummere kan en, hvis en skal bestemme seg for om fotonet er en partikkel eller en bølge, forsøke å konkludere med følgende: Fotonet er en partikkel, men dets fremtid er beskrevet av en bølge, der denne bølgen er en teoretisk, matematisk konstruksjon som er tilknyttet hvert eneste foton (Shankar, 1994).

Vi har nå sett at fotonene har noen merkelige egenskaper. Men, hva med de gode, gamle elektronene? Har disse også en innebygd, matematisk bølgeegenskap på lik linje med fotonene? Scenen er nå satt for de Broglies hypotese.

### **2.3.6 Louis de Broglies hypotese – alle partikler har bølgeegenskaper**

Jeg vil nå vise de Broglies formel ved å benytte et resultatet fra utledningen i kapittel 2.3.4, der ligning (2.38) fortalte at sammenhengen mellom fotonets energi og bevegelsesmengde var gitt ved  $E = pc$ . En starter med å skrive ned sammenhengen mellom frekvens og bølgelengde for en elektromagnetisk bølge,  $\lambda = c/\nu$ , og resten følger på elegant vis:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{h\nu} = \frac{hc}{E} = \frac{hc}{pc},$$

der jeg i siste steg har benyttet (2.38), og helt til slutt får en da

$$\lambda = \frac{h}{p}, \tag{2.40}$$

som kalles de Broglies relasjon, en relasjon som ble postulert av den franske fysikeren Louis de Broglie i 1923 (Hemmer, 2005).

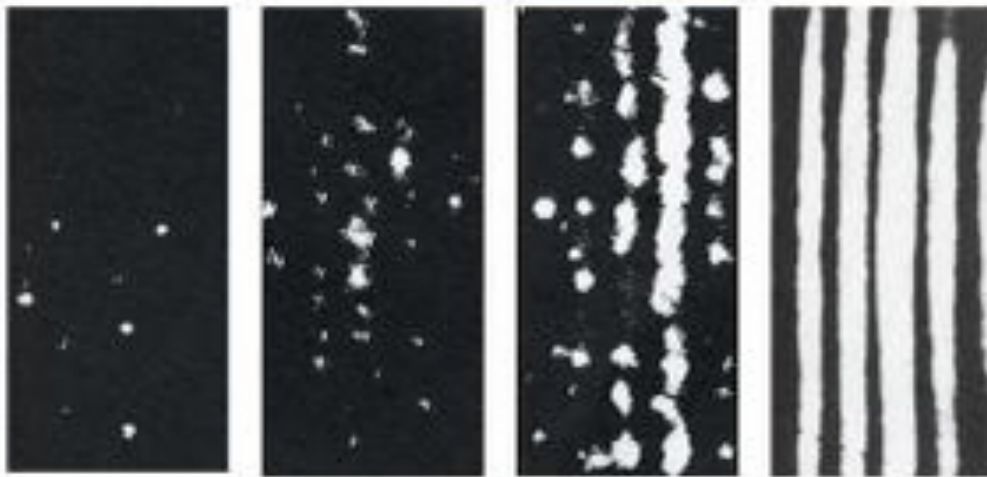
I ligning (2.40) kalles  $\lambda$  *de Broglie-bølgelengden*,  $h$  er Plancks konstant og  $p$  er bevegelsesmengden. Denne relasjonen har fått navnet *de Broglies relasjon* fordi det var han som postulerte at denne relasjonen var universelt gyldig, alle partikler inkludert, (ikke bare for fotoner) hvilket betyr at denne relasjonen eksempelvis også er gjeldende for elektroner.

I følge Hemmer (2005) ble denne hypotesen eksperimentelt bekreftet av Clinton Joseph Davisson og Lester Halbert Germer i 1927 og, like etter, utførte George Paget Thomson et eksperiment der han spredte elektroner gjennom tynne filmer av gull. Her ble det dannet et interferensmønster på lik linje med det interferensmønsteret som oppstår når en utfører liknende eksperiment med røntgenstråling (fotoner). Da en beregnet bølgelengden til interferensmønsteret viste det seg at denne var i perfekt overenstemmelse med de Broglies hypotese.

Den franske fysikerens hypotese forteller at alle partikler har innebygde bølgeegenskaper. I den sammenheng virker det nå fristende å avlegge dobbeltspalteforsøket et siste besøk, men denne gangen skal fotonene fra lyskilden byttes ut med elektroner. Vi går rett til det tilfellet der elektronene blir sendt enkeltvis mot dobbeltspalten. I eksperimentet til Fabrikant, Biberman og Sushkin ble det eksempelvis sendt ett elektron pr. minutt mot dobbeltspalten (Hemmer, 2005) og resultatet var imot all intuisjon om hvordan en partikkel som elektronet hadde ventet å oppføre seg ut ifra klassisk fysikk, men i tråd det de Broglie postulerte: Etter at noen få elektroner hadde truffet skjermen dannet tilsynelatende ikke treffpunktene noe mønster (se figur 2.6) men, etter hvert som flere elektroner passerte dobbeltspalten, endte en opp med samme interferensmønster som i de forrigegående dobbeltspalteeksperimentene som var utført med elektromagnetisk stråling (fotoner). Eksperimentet viste derfor at elektronene hadde samme statistiske natur ved seg som fotonene.

Selv om de Broglies hypotese forteller oss at "dette var som ventet", så er det allikevel utrolig å tenke seg at elektroner, som en definitivt tenker på som





**Figur 2.6: Dobbeltspalteeksperimentet med elektroner. Det første bildet til venstre viser skjermen når bare noen få elektroner har truffet skjermen. Helt til slutt viser bildet lengst til høyre at elektrontreffpunktene har, etter en viss tid, dannet et interferensmønster. Bildet fra forsøket er hentet fra Adams og Allday (2000).**

partikler, innehar denne bølge-partikkel-dualismen ved seg. En konsekvens av at elektronene viser denne oppførselen i dobbeltspalteeksperimentet er at de er nødt til å bli behandlet kvantemekanisk. De stiller derfor i samme klasse som fotonene ved at de begge er partikler, hvis egenskaper *ikke* kan beskrives med klassisk fysikk. Et sitat fra Feynman (1965) beskriver sammenhengen mellom disse to *kvantepartiklenes* bølge-partikkel-dualisme på en fantastisk måte: "There is one simplification at least. Electrons behave in this respect exactly the same way as photons; they are both screwy, but in exactly in the same way" (Feynman, 1965, s. 128).

### **2.3.7 Den kvantemekaniske bølgefunksjonen – dobbeltspalteeksperimentet utført med elektroner**

Louis de Broglies hypotese forteller at diskusjonen om fotonets bølgeegenskaper er universelt gyldig også for andre partikler. Dette betyr, for å igjen bruke elektronet som eksempel, at det er en bølge assosiert med hvert elektron, noe resultatet fra dobbeltspalteforsøket utført med elektroner viste.

Elektronets bølge er en matematisk funksjon som i kvantemekanikken har fått navnet bølgefunksjonen og betegnes ved  $\Psi(\mathbf{r}, t)$  (se for eksempel Brandsen & Joachain, 2000). Dobbeltspalteforsøket utført med elektroner viste at disse partiklene ikke fulgte en klassisk partikkelbane, men at deres ferd var, på lik linje med fotonene, beskrevet av en bølgefunksjon. En kan da si at det eksperimentelle resultatet tilhørende dobbeltpalteeksperimentet "tvinger" oss til å introdusere denne bølgefunksjonen, som følge av at elektronene, når flere av dem hadde truffet platen, dannet et interferensmønster. Men, hvordan kan denne bølgen tolkes fysisk? Den følgende diskusjonen er delvis basert på Brandsen og Joachain (2000) og Feynman, Leighton og Sands (1964).

Det eneste informasjonen vi har fra dobbeltpalteeksperimentet er at elektrontreffpunktene, etter at flere av dem hadde truffet platen bak spalten, dannet et interferensmønster (figur 2.6). Dette betyr at det er knyttet en statistisk natur til hver av de individuelle elektronenes eksperimentelle oppførsel, siden elektronene ble sendt enkeltvis mot dobbeltpalten. Det kan derfor sluttet at det er knyttet en sannsynlighet  $P$  til hvor elektronet vil treffe et gitt punkt på platen bak dobbeltpalten, der sannsynlighet i denne konteksten er forstått som antall elektrontreffpunkt (i det gitte punktet) dividert på det totale antallet elektroner som har blitt sendt mot dobbeltpalten: Intensiteten av treffpunkt, som oppsto på platen, er proporsjonal med sannsynligheten  $P$ .

I Youngs dobbeltpalteeksperiment med lys bevitnet vi at lysintensiteten i et gitt punkt var gitt ved  $I \propto |A|^2$ , der  $A$  var bølgens amplitude. Forklaringen tilhørende dette eksperimentet var at den elektromagnetiske bølgen møtte dobbeltpalten, slik at det ble dannet to sirkulære bølger som ble spredd ut fra de to spaltene. Disse to bølgene interfererte og det ble dannet et interferensmønster på den fotografiske platen. Den klassiske bølge teorien for lys kan ikke benyttes i kvantemekanikk, da den ikke tar høyde for lysets partikkelnatur, som vi så i seksjon 2.3.5.

Det essensielle er at den klassiske bølge teorien gir et verdifullt hint på veien, da den beskriver at et interferensmønster er forårsaket av bølger. Veien å gå er

derfor å introdusere den kvantemekaniske bølgefunksjonen, eller tilstandsfunksjonen, som er gitt ved  $\Psi(x, y, z, t)$  og la den spille rollen som sannsynlighetsamplitude. Det forventes derfor at sannsynligheten  $P(x, y, z, t)$  for å finne elektronet med tilhørende koordinater  $(x, y, z)$  i et volum  $V$ , ved en tid  $t$ , er proporsjonal med  $|\Psi(x, y, z, t)|^2$ :

$$P(x, y, z) \propto |\Psi(x, y, z, t)|^2. \quad (2.41)$$

Hvis en nå vender tilbake til dobbeltspalteforsøket med elektroner, der spaltene navngis 1 og 2, kan en definere følgende:

La  $\Psi_1$  være bølgefunksjonen ved et gitt punkt på platen bak dobbeltspalten, som korresponderer til bølgene som spres fra spalte 1, samtidig som  $\Psi_2$  er bølgefunksjonen ved det samme punktet, som korresponderer til bølgene fra spalte 2. Når begge spalter er åpne må en summere de to bølgene:

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2, \quad (2.42)$$

slik at den korresponderende sannsynlighetsfordelingen er gitt ved

$$P \propto |\Psi_1 + \Psi_2|^2. \quad (2.43)$$

(2.43) danner det ønskede interferensmønsteret fra dobbeltspalteeksperimentet. Denne sannsynlighetsfordelingen oppnås *ikke* hvis en adderer  $P_1 \propto |\Psi_1|^2$  og  $P_2 \propto |\Psi_2|^2$ :

$$P \propto P_1 + P_2, \quad (2.44)$$

fordi dette ville ikke inkludere interferensleddet i sannsynlighetsfordelingen. Uten dette leddet hadde ikke situasjon (iii) i seksjon 2.3.5, der ingen fotoner traff det punktet vi undersøkte da begge spalter var åpne, oppstått. (2.44) viser den *klassiske* prediksjonen av et slikt eksperiment med partikler – den totale sannsynligheten for at partiklene treffer et visst punkt på platen, er summen av

sannsynlighetene for de to enkelttilfellene: Spalte 1 åpen/lukket og spalte 2 lukket/åpen (situasjon (i) og (ii) i seksjon 2.3.5).

### 2.3.8 Den kvantemekaniske bølgefunksjonen – hvordan skiller den seg fra en klassisk bølgefunksjon?

I denne seksjonen ønsker jeg å ta diskusjonen rundt bølgefunksjonen noe videre, der jeg kun vil konsentrere meg om å undersøke bølgefunksjonen til et elektron med veldefinert bevegelsesmengde. Hensikten er å vise at denne bølgefunksjonen ikke kan bestemmes fra klassisk bølgeteori.

I denne masteroppgaven følges Borns statistiske interpretasjon av bølgefunksjonen, som i en dimensjon medfører at  $|\Psi(x, t)|^2$  er forstått som sannsynlighetstettheten for å finne partikkelen i punktet  $x$ , ved en tid  $t$ . Hvilket vil si at

$$\int_a^b |\Psi(x, t)|^2 dx = \left\{ \begin{array}{l} \text{Sannsynligheten for å finne} \\ \text{partikkelen mellom } a \text{ og } b, \\ \text{ved en tid, } t \end{array} \right\}. \quad (2.45)$$

Denne statistiske tolkningen av bølgefunksjonen gir ikke mening hvis en ikke i tillegg krever at

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(x, t)|^2 dx = 1, \quad (2.46)$$

siden partikkelen er nødt til å befinne seg et eller annet sted langs  $x$ -aksen. Oppgaven blir derfor å finne en form på bølgefunksjonen  $\psi(x)$  som vil beskrive et fritt elektron med veldefinert bevegelsesmengde. Jeg har her sløylfet tidsavhengigheten for enklere notasjon. Det første jeg tar for meg er ideen om å finne denne bølgefunksjonen fra klassisk bølgeteori.

En vet at hvis elektronet har en veldefinert bevegelsesmengde  $p$ <sup>4</sup> følger det, fra de Broglies formel (2.40), at dets bølgefunksjon har en bølgelengde  $\lambda$ , der sammenhengen mellom disse størrelsene er gitt ved  $\lambda = h/p$ .

Et forslag er da, fra klassisk bølgeteori, å tilskrive det innkommende elektronet en bølgefunksjon på formen  $\cos kx$ , der  $k = 2\pi/\lambda$  er bølgetallet. Hvis en da kobler inn (2.40) vil denne funksjonen få følgende form (der tidsavhengigheten er utelatt):

$$\psi(x) = A \cos \frac{2\pi x}{\lambda} = A \cos \frac{2\pi p x}{h}, \quad (2.47)$$

der  $A$  er bølgens amplitude.

Ved å innføre Plancks reduserte konstant,  $\hbar = h/2\pi$ , vil (2.47) kunne omskrives til

$$\psi(x) = A \cos \frac{p x}{\hbar}. \quad (2.48)$$

Bølgefunksjonen (2.48) har korrekt bølgelengde for en gitt bevegelsesmengde, hvilket vil si at hvis en sender elektroner med bevegelsesmengde  $p$  mot dobbeltspaltene, vil denne bølgefunksjonen, når den interferer etter at den har passert dobbeltspalten, gi det ønskede interferensmønsteret. Det viser seg at (2.48) allikevel ikke er den kvantemekaniske bølgefunksjonen vi leter etter. Dette blir bekreftet når en drar inn Borns statistiske tolkning av bølgefunksjonen i kombinasjon med Heisenbergs uskarphetsrelasjon.

---

<sup>4</sup> I dette eksempelet kjenner vi bevegelsesmengden helt og holdent, hvilket betyr at vi ikke kjenner posisjonen til elektronet. Dette kommer av Heisenbergs uskarphetsrelasjon: Skarp bevegelsesmengde medfører en total uskarphet i partikkelens posisjon.

I følge denne tolkningen er  $|\psi|^2$  forstått som sannsynlighetstettheten for å lokalisere partikkelen langs  $x$ -aksen. Dette medfører at en innkommende partikkel med veldefinert bevegelsesmengde<sup>5</sup> vil befinne seg et eller annet sted langs den horisontale aksen. Det essensielle er at denne sannsynligheten er *lik* langs hele  $x$ -aksen. Her ser en at den såkalte kvantemekaniske bølgefunksjon (2.48) ikke makter å beskrive det vi er ute etter da,  $|\psi|^2 = |A|^2 \cos^2\left(\frac{px}{\hbar}\right)$ , oscillerer med  $x$ .

I følge Borns sannsynlighetstolkning vil da  $|A|^2 \cos^2\left(\frac{px}{\hbar}\right)$  inneholde punkter langs  $x$ -aksen der det er *null* sannsynlighet for å lokalisere partikkelen. Dette oppstår i koordinatene  $x = \left(n + \frac{1}{2}\right) \pi \hbar / p$ , og er ikke forenlig med Heisenbergs uskarphetsrelasjon.

Det en må kreve er at *absoluttkvadratet* av bølgefunksjonen  $|\psi|^2 = \psi^* \cdot \psi$ , for en innkommende partikkel med veldefinert bevegelsesmengde, må gi en flat (konstant) sannsynlighetstetthet.

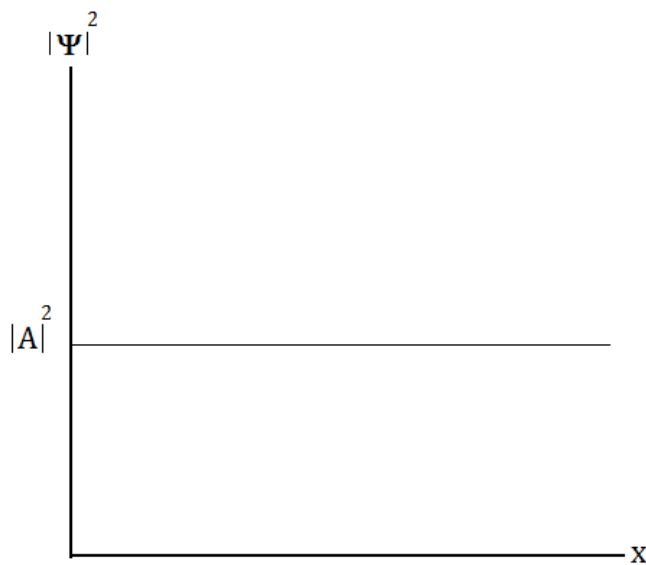
Men, hvordan kan bølgefunksjonen til elektronet ha en *bølgelengde*, som er krevd for å få frem partikkelens bølgeegenskaper i dobbeltspalteeksperimentet, samtidig som denne funksjonens absoluttverdi (sannsynlighetstettheten) ikke skal variere langs  $x$ -aksen? Redningen er å kreve at bølgefunksjonen tilhørende elektronet må være kompleks. En mulig form på denne bølgefunksjonen er

$$\psi(x) = Ae^{\frac{2\pi ix}{\lambda}} = Ae^{\frac{ipx}{\hbar}}, \quad (2.49)$$

der denne bølgefunksjonens reelle og imaginære deler oscillerer med en bølgelengde  $\lambda$ . En oppnår da en konstant sannsynlighetstetthet langs posisjonskoordinaten takket være matematikken, som dikterer at

---

<sup>5</sup> Det eneste vi vet er at sannsynligheten er lik langs hele  $x$ -aksen. Dette kommer av Heisenbergs uskarphetsrelasjon, som ikke tillater at sannsynligheten endres langs den horisontale aksen når vi kjenner bevegelsesmengden til partikkelen.



**Figur 2.7:** Vi ser at absoluttkvadratet av bølgefunksjonen for et fritt elektron med veldefinert bevegelsesmengde ikke oscillerer langs  $x$ -aksen. Dette skyldes at Borns sannsynlighetstolkning av bølgefunksjonen postulerer at denne størrelsen er forstått som sannsynlighetstettheten for å lokalisere elektronet og, for en partikkel med veldefinert bevegelsesmengde, forteller uskarphetsrelasjonen at partikkelen da har fullstendig uskarphet i posisjonen. Dette medfører at ingen punkter langs  $x$ -aksen er spesielt "foretrukket" av partikkelen.

$$|\psi|^2 = \psi^* \cdot \psi = A^* e^{-i\frac{px}{\hbar}} \cdot A e^{+i\frac{px}{\hbar}} = |A|^2. \quad (2.50)$$

Absoluttkvadratet av den endimensjonale bølgefunksjonen er vist i figur 2.7, som viser at sannsynlighetstettheten ikke oscillerer.

Konklusjonen er derfor at den kvantemekaniske bølgefunksjonen til et elektron med veldefinert bevegelsesmengde er nødt til å være kompleks av natur for å sørge for at sannsynlighetstettheten for å lokalisere elektronet er konstant langs hele  $x$ -aksen, der denne bølgefunksjonen er gitt ved (2.49).

Ved å implementere Borns statistiske interpretasjon av bølgefunksjonen, i kombinasjon med normeringskravet, (2.46), viser det seg at (2.49) er en idealisert beskrivelse av en fri partikkel med veldefinert bevegelsesmengde fordi:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi|^2 dx = |A|^2 \int_{-\infty}^{+\infty} dx, \quad (2.51)$$

som viser at det bestemte integralet ikke eksisterer. Planbølgen (2.49) strekker seg utover hele rommet, hvilket vanskeliggjør dens beskrivelse som en partikkel. Dette kunne en se ved å betrakte figur 2.7 – partikkelen kunne være hvor som helst langs  $x$ -aksen. Jeg går ikke videre inn på hvordan denne frie partikkelen, med veldefinert bevegelsesmengde, skal behandles videre.

For å oppsummere, så viser eksempelet i seksjon 2.3.7 at den fysiske tolkningen av den kvantemekaniske bølgefunksjonen er at den gir en *statistisk prediksjon* av dobbeltspalteeksperimentet utført med elektroner. Videre ble det vist, i denne seksjonen, at den kvantemekaniske bølgefunksjonen (for elektroner med veldefinert bevegelsesmengde) skilte seg fra en ordinær bølgefunksjon ved at den var kompleks av natur, som følge av Heisenbergs uskarphetsrelasjon og Borns statistiske interpretasjon av bølgefunksjonen. Dette er også en påminnelse om at den kvantemekaniske bølgefunksjonen ikke representerer en fysisk bølge, men at det er en abstrakt konstruksjon som krever en statistisk tolkning.

## 2.4 Oppsummering

Vi har i dette kapitlet sett på hvordan fysikken gir ulike svar på hva lys egentlig er for noe. Det startet med klassisk elektromagnetisme som beskrev lyset som et fullstendig bølgefænomen i form av elektromagnetiske bølger, en beskrivelse som kvantefysikken ikke var helt fortrolig med. Fotoelektriske effekt og resultatene fra andre eksperimenter kunne forklares hvis en påstod at lyset, og elektromagnetisk stråling generelt, bestod av diskrete energikvant som vi i dag kaller fotoner. Men, samtidig viste andre eksperimenter at lyset er et bølgefænomen, noe Youngs dobbeltspalteforsøk er et eksempel på. Vi undersøkte derfor fotonene nærmere.

Fotonene oppfyller partikkelkravene fordi energien og bevegelsesmengden er fullstendig lokalisert i hver av treffpunktene fotonene produserte i møtet med



den fotografiske platen. Energien kjenner vi som  $E = h\nu$ , mens sammenhengen mellom bevegelsesmengden og energien til fotonet ble utledet i kapittel 2.3.4 og er gitt som  $p = E/c$ . Denne sammenhengen ble benyttet til å finne de Broglies relasjon,  $p = h/\lambda$ , som forteller at det er assosiert en bølgelengde til fotonet, men også til alle andre partikler, der elektronet ble benyttet som eksempel.

Kvantefysikken forteller derfor at partiklene har en bølgenatur. Denne bølgepartikkel-dualiteten er også, i følge de fleste av dagens fysikere, nødvendig for beskrivelsen av lyset.

Det finnes fysikere i dag som ikke er fornøyd med denne dualistiske beskrivelsen av lyset, da denne beskrivelsen inneholder for mange motsetninger. Hvorfor naturen opererer på denne måten er også et mysterium den dag i dag: For selv om kvantefysikken er en veldefinert, matematisk modell med *enorm* eksperimentell suksess så har den sine begrensinger i forhold til det å besvare denne type spørsmål.

## 3 Kvantefysikk i undervisningssammenheng: Perspektiver og tidligere forskning

### 3.1 Introduksjon

I forrige kapittel foretok vi oss en fysikkfaglig tidsreise som strekte seg fra klassisk elektromagnetisme til utviklingen av kvantemekanikken, med den hensikt å få en oversikt over hvordan den vitenskapelige beskrivelsen av lyset har måttet tåle endring med tiden, etter hvert som nye fysiske teorier ble utviklet. Innen elektromagnetisme var beskrivelsen av lyset elegant og logisk: Eksperimentelt viste interferensforsøk at lyset hadde bølgeegenskaper, mens bølgeligningen utledet fra Maxwells ligninger ga det teoretiske grunnlaget for påståelsen om at disse bølgene propagerte med lysets hastighet i vakuum.

Videre bevitnet vi at elektromagnetismens tilsynelatende problemfrie forståelse av lyset kom til kort da kvantefysikken gjorde sin entre i naturvitenskapen, og, selv om kvantefysikkens dualistiske beskrivelse av elektromagnetisk stråling er den beskrivelsen som foretrekkes av de fleste av dagens fysikere, ble det avslutningsvis i forrige kapittel påpekt at debatten om lysets doble natur fortsatt pågår den dag i dag.

Spørsmål knyttet til den vitenskapelige beskrivelsen av lys vil være sentrale også i dette kapittelet, som vil ta for seg de (fagdidaktiske) utfordringene kvantefysikken byr på, for elever, studenter og lærere. Det er uten tvil av stor interesse å undersøke hva slags innvirkning det har på både elever og studenter at en så høyt respektert og tradisjonsrik naturvitenskap som fysikk ikke kan tilby en enkel og samstemt beskrivelse av noe så fundamentalt som lyset.

I dette kapittelet skal vi se på fysikkdidaktisk forskning om undervisning og elevenes forståelse i kvantefysikk, der de didaktiske teoriene vil være hentet fra forskning på elever i den videregående skole og fysikkstudenter på universitetsnivå. Målsettingen er å få en grov oversikt over hva fysikkdidaktisk forskning har å meddele om aktuelle utfordringer for elever som møter

kvantefysikk i undervisningssammenheng. Selv om kapitlet i første rekke vil ta for seg elevenes oppfatning av kvantefysikken som en helhet, vil det, med hensyn til oppgavens fokusområde, allikevel legges ekstra vekt på elevenes tanker og forståelse av lys og bølge-partikkel-dualismen.

Det finnes én hovedgrunn til at forskning knyttet til universitetsstudenter tas med i dette kapitlet, til tross for at ReleKvantprosjektet er designet for norske tredjeklasseelever i den videregående skole med fordypning i fysikk.

Inkluderingen skyldes at det er utført relativt lite didaktisk forskning rettet mot videregåendeelevers møte med kvantefysikken, slik at den tilgjengelige teorien må suppleres med forskning gjort på universitetsstudenter som tar grunnkurs i kvantemekanikk. Dette kommer som en konsekvens av at mange land har valgt å la denne delen av fysikken utgjøre en vesentlig mindre del av pensum i videregående skole, enn det som er tilfellet i Norge (Henriksen et al., 2014).

Det viser seg at denne inkluderingen av universitetsstudenter ikke er så problematisk. Dette skyldes at didaktisk forskning viser at de to ulike elevmassene, elever i videregående skole og studenter som følger høyere utdanning, ikke skiller seg så meget fra hverandre når det kommer til det å tilegne seg grunnleggende begrepsforståelse i kvantefysikk. Vi kommer tilbake til dette i mer detalj senere i dette kapitlet.

Da ReleKvant er designet for norske elever i den videregående skole starter det første delkapitlet med en kort beskrivelse av fysikkfaget i norsk skole og dets elever. På den måten fås en grov indikator på hva vi kan forvente oss av det faglige nivået til de elevene som deltar i ReleKvant.

### 3.2 Norske fysikkelever – en sterk elevgruppe

Omtrent 1/4 er tallet "Fysikk-didaktikk" (Angell, et al., 2011) opererer med når det kommer til antall elever på studieforbereende som velger faget Fysikk 1<sup>6</sup>. Tallet er noe lavere, 7-8%, når det gjelder Fysikk 2. Selv om antallet elever som tar fysikk på videregående holder seg på et stabilt nivå, hadde man helst sett at antallet økte, da en slik økning kan føre til at det blir flere studenter som velger fysikk og fysikkfaglige ingeniørstudier etter endt videregående opplæring. Det samlede tallet på antall elever som velger å ta høyere utdanning innenfor de nevnte studieretningene er i Norge i dag på 1975-nivå.

Et viktig element i en undersøkelse nevnt i boka er at de elevene som ønsket å gå videre fra 2FY (Fysikk 1) til 3FY (Fysikk 2) var de som var mest fornøyde med faget og undervisningen. Trenden er at de norske elevene er fornøyde med den tradisjonelle måten det undervises på i fysikkfaget, hvilket betyr tavleundervisning som utføres av en autoritativ lærer. I en slik undervisningsform er det også satt av tilstrekkelig tid til individuell oppgaveløsning, mens faglige diskusjoner i plenum ikke blir viet så mye plass. Den elevgruppen som ønsket å velge full fordypning i fysikk (Fysikk 2) var også den gruppen med best karakterer i faget. Jeg ønsker å sitere forfatterens avsluttende kommentar til denne undersøkelsen (Angell et al., 2011, s.124): "Dette er selvsagt ikke overraskende, men indikerer at dagens skolefysikk er tilpasset en liten, men eksklusiv gruppe elever."

Forfatterne viser til tall fra Utdanningsdirektoratet når boken gjør oss oppmerksomme på at de fleste av elevene som har valgt full fordypning i fysikk jevnt over presterer godt i de fagene som tilbys ved studieforbereende linje på videregående. Dette er en indikasjon på at fysikkelevne utgjør en sterk elevgruppe i det norske skolesystemet.

I 1995 var norske fysikkelever i verdenstoppen, ifølge TIMSS-undersøkelsen. I 2008 leverte elevene betydelig dårligere resultater, og man må da stille seg

---

<sup>6</sup> Fysikk 1 er det første fysikkfaget elevene kan velge i den videregående skole.

spørsmålet om dagens undervisning er god eller effektiv nok. Individuell oppgaveløsning er en sentral del av det å lære seg fysikk, men et overdrevent individuelt fokus kan hindre at elevene får fordype seg i flere av fysikkfagets aspekter. Oppgavetrening alene er ikke en garanti for å lære og forstå fysikk: Kvalitative aspekter ved fysikkfaget bør også bli vektlagt i undervisningen (Angell et al., 2011).

### 3.3 Moderne og klassisk fysikk i skolen

De elevene som velger fordypning i fysikk på videregående vil få undervisning i både klassisk og moderne fysikk. Her vil elevene oppleve at det er stor forskjell på de to fysikkepokene og det er særlig kvantefysikken som skiller seg mest fra den klassiske fysikken elevene lærer i skolen. Kvantefysikkens mangel på krystallklare og stringente faktabeskrivelser av naturlige fenomener er stikk i strid med det klassiske fysikkpensumet, der oppgaver og resonnementer vanligvis avsluttes med et likhetstegn og “to streker under svaret”, en egenart ved fysikkfaget som de aller fleste av elevene i den videregående skole er høyest komfortable med (Angell et al., 2011).

#### 3.3.1 Elektromagnetisme og kvantefysikk – ulike kompetansemål

I Fysikk 2, som er et valgbart programfag for elever som følger studiespesialiserende studieprogram, består pensumet innenfor klassisk fysikk av Newtons mekanikk og klassisk elektromagnetisme. I følge fagets læreplan (Utdanningsdirektoratet, 2015) skal elevene både kunne løse kvalitative og kvantitative problemer i klassisk fysikk, der de kvantitative beregningene innebærer algebraisk manipulering av formler, geometriske betraktninger og vektorregning i rommet. Læreplanmålene tilhørende den moderne fysikken (relativitetsteori og kvantefysikk) er noe annerledes, der læreplanen legger opp til begrepsforståelse og kvalitative utredninger, til forskjell fra de rene regneoppgavene en eksempelvis finner innenfor Newtons mekanikk. Det er to hovedutfordringer knyttet til det å behandle kvantefysikk kvalitativt. For det første er norske fysikkelever, den lille, men eksklusive elevgruppen som

beskrevet i forrige delkapittel, svært fornøyd med de tradisjonelle undervisningsmetodene i faget. Disse elevene liker å regne oppgaver og motta forelesningsbasert undervisning, men er ikke så komfortable med å drøfte fagstoff kvalitativt, noe nettopp læreplanmålene innenfor kvantefysikk legger opp til.

Den andre utfordringen angår fagets undervisere, for hvordan skal fysikklærere formidle en kontraintuitiv, fysisk teori med et tilhørende matematisk apparat som inneholder elementer langt utenfor skolematematikken, på en *kvalitativ måte* til et publikum bestående elever i den videregående skole?

Utdanningsdirektoratets (2015) kompetansemål innen moderne fysikk tar noe av brodden av dette spørsmålets aktualitet, da kompetansemålene innenfor moderne fysikk har, som vi ble gjort kjent med noen avsnitt tilbake, et kvalitativt fokus med stor vekt på begrepsforståelse snarere enn at elevene skal utføre kvantitative beregninger, men samspillet mellom matematikk- og fysikkfaget er såpass sentralt at en ikke kan tillate seg å forlate det fullstendig.

Kvantemekanikkens matematiske apparat er hentet fra lineær-algebraen, der abstrakte vektorer og lineære transformasjoner utgjør det teoretiske fundamentet i den kvantitative beskrivelsen av teorien (Griffiths, 2005). Denne type matematikk er ikke pensum i videregående skole (Utdanningsdirektoratet, 2015), noe som kan være en av grunnene til at kompetansemålene innenfor moderne fysikker av kvalitativ karakter. Dette skyldes blant annet at fysikkfaget i norsk skole har, som andre fag, et allmenndannende fokus og faget skal i prinsippet være tilgjengelig for alle elever som har valgt den studiespesialiserende retningen på videregående. Hvis læreplanen i kvantefysikk i Fysikk 2 hadde hatt et overveiende kvantitativt preg ville denne tilgjengeligheten forsvunnet (Olsen, 2002).

Hovedforskjellen mellom læreplanens behandling av klassisk og moderne fysikk er altså at det kun kreves at elevene skal sitte igjen med en kvalitativ kunnskap innenfor kvantefysikk etter endt undervisning, men dette er, som tatt opp

tidligere i denne seksjonen, utfordrende for både lærere og elever, noe som illustreres ved følgende sitat fra Angell et al. (2011):

Kunnskapsløftets læreplan for Fysikk 2 i den videregående skole har altså gitt lærere og elever en stor utfordring ved å innføre målet om kvalitativ forståelse av sentrale begreper og fenomener i kvantefysikk. Det er ikke lenger et læreplanmål at elevene skal kunne anvende kvantefysikkens ligninger til å utføre beregninger.

(Angell et al., 2011, s. 317)

Hovedbudskapet i sitatet er at Kunnskapsløftet krever at elevene skal forsøke å sette seg inn i kvantefysiske begreper, noe som er vesentlig mer krevende enn å instrumentelt regne seg frem til tallverdier ved å manipulere lineære sammenhenger, der regneoppgaver med tematikk innenfor fotoelektrisk effekt og de Broglies formel er eksempler på slike trivielle, matematiske problemstillinger, samtidig som de to temaene byr på konseptuelle utfordringer fysisk: Det å finne bølgelengden til et elektron når dets bevegelsesmengde er gitt byr ikke på store algebraiske utfordringer. Det er først når elevene skal knytte fysisk tolkning til denne "elektronbølgelengden" at problemene begynner å melde seg. Det er nettopp her kompetansemålene innenfor Fysikk 2 (Kunnskapsløftet) og 3FY (Reform 94) viser seg svært forskjellige. Ved å trekke frem to aktuelle kompetansemål fra henholdsvis Fysikk 2 og 3FY, innenfor samme tematikk, blir det lettere å bemerke seg disse forskjellene.

Det at elevene skal kunne knytte fysisk tolkning til eksempelvis fotoelektrisk effekt og partiklenes bølgenatur kommer klart fram i følgende kompetansemål tilhørende læreplanen i Fysikk 2:

Mål for opplæringen er at eleven skal kunne

- gjøre rede for Einsteins forklaring av fotoelektrisk effekt, og kvalitativt gjøre rede for hvordan resultater fra forsøk med fotoelektrisk effekt, comptonspredning og partiklers bølgenatur representerer et brudd med klassisk fysikk

(Utdanningsdirektoratet, 2015).

Dette er et svært omfattende kompetansemål som alene dekker *mer* enn denne masteroppgavens fokusområde. Kompetansemålet skiller seg fra den forrige læreplanen i fysikk (3FY), som la mer vekt på algebraiske utregninger enn fysiske tolkning og kvalitative utredninger:

Elevene skal

6b) kunne gjøre beregninger med Einsteins fotoelektriske ligning og kjenne til praktisk bruk av fotoelektrisk effekt

(Kunnskapsdepartementet, 1994, referert i Utdanningsdirektoratet, 2015).

Begge læreplanmålene er hentet fra moderne fysikk, men vi ser at det er en betydelig forskjell i hva som kreves av elevene i forhold til det å inneha en oversikt over kvantefysikkens brudd med den klassiske fysikken, en oversikt den gjeldende læreplanen forventer at elevene skal ha opparbeidet seg før sluttvurderingen i faget. I 3FY ble det vektlagt at elevene skulle regne på oppgaver om fotoelektrisk effekt, og, selv om elevene skulle kjenne til Einsteins forklaring av eksperimentet, var det ikke et krav om at eksperimentet om fotoelektrisk effekt skulle settes inn i en videre sammenheng.

### **3.3.2 Fysikkstudenter – liten kvalitativ forståelse innenfor kvantefysikk**

Forskning innen fysikkdidaktikk har vist at til tross for at universitetsstudenter i fysikk har en mer solid matematisk og fysikkfaglig bakgrunn enn de elevene som møter kvantefysikk på videregående, vil ikke denne matematiske tryggheten og bredden innen klassiske fysikkemner nødvendigvis hjelpe den førstnevnte gruppen til å gi dem bedre konseptuell forståelse av kvantefysiske fenomener og begreper (se for eksempel Griffiths, 2005; Ayene, Kriek & Damtie, 2011).

Et konkret eksempel finnes i artikkelen til Singh, Belloni og Christian (2006), som tar for seg studenters forståelse i kvantemekanikk på universitetsnivå. Her presenterer artikkelforfatterne et empirisk datamateriale som viser at de fleste elevene svarer rett på oppgaver som inneholder tunge, kvantitative beregninger,



men ikke lykkes i like stor grad å knytte dette opp mot god, kvalitativ forståelse og korrekt fysisk tolkning. Dette er, i følge artikkelforfatterne, svært lite gunstig for studentene, da god kvalitativ forståelse i faget bidrar til at studentene kan erstatte det maskinelle regnearbeidet med elegante, tidseffektive løsningsmetoder når de løser kvantitative oppgaver innenfor kvantefysikk. De mekaniske regneprosedyrene, som det maskinelle regnearbeidet representerer, vil på sin side ikke gi stort bidrag til å øke den fysikkfaglige forståelsen (Singh et al., 2006; Olsen, 2002).

Videre viser forskning at fysikkstudenter ikke har forstått de fundamentale forskjellene som eksisterer mellom klassisk fysikk og kvantefysikk når de skal starte på introduksjonskurs i kvantefysikk på universitetsnivå (se for eksempel Müller & Wiesner, 2001; Fischler & Lichfeldt, 1992). Her får undervisningsopplegg studentene har blitt eksponert for før de ankom universitetet noe av skylden for at så er tilfelle.

Videre viser undersøkelser at den undervisningen fysikkstudentene mottar på universitetsnivå heller ikke har et stort nok fokus på det å vise til forskjellene som eksisterer mellom klassisk fysikk og kvantefysikk (Özcan, 2010). I følge Özcan (2010) kan en type undervisning som vektlegger disse forskjellene fra starten av også gjøre det lettere å motivere studentene for matematikken som følger med et kurs i kvantemekanikk på universitetsnivå, da elevene som har dette skillet klarere foran seg bedre vil forstå og akseptere at den matematikken som benyttes i kvantefysikk skiller seg fra den matematikken som blir benyttet i klassisk fysikk: Det matematiske apparatet til kvantefysikken må være abstrakt av natur, da mikroverdenen ikke er observerbar på samme måte som den makroskopiske – vi kan ikke se atomer med det blotte øyet.

Selv om det matematiske apparatet tilhørende kvantefysikken ikke kommer virkelig i fokus før en tar fysikk videre på universitetsnivå, så er trenden klar: Fysikkstudenter sliter med å forklare det konseptuelle, kvalitative skillet mellom klassisk og moderne fysikk, selv etter at de har fullført et introduksjonskurs i kvantemekanikk der de også har blitt eksponert for *kvantitative* beregningsmetoder (Özcan, 2010).

Fysikkdidaktisk forskning kan altså tyde på at det ikke er en klar sammenheng mellom god kvalitativ og kvantitativ forståelse i klassisk fysikk og tilsvarende faglige erkjennelser innen moderne fysikk. I noen ekstreme tilfeller fungerer begrepsapparatet studentene har tilegnet seg i klassisk fysikk som en buffer for å tilegne seg ny kunnskap i kvantefysikk. Dette illustreres av følgende sitat fra Ayene et al. (2011), som hevder:

(...) students who are educated according to the scientific norms found in classical physics and key concepts, such as determinism, causality, etc., can be easily influenced. Having accepted the key concepts of classical physics, they find it difficult to adjust to quantum mechanics concepts such as wave-particle duality, uncertainty, probability, etc..

(Ayene et al., 2011, s.1)

Samtidig er artikkelforfatterne bak sitatet over krystallklare på at fysikkstudenter må ha en relativt solid basis i klassisk fysikk for å lære moderne fysikk men det finnes altså tilfeller der innlært, klassisk tankegang<sup>7</sup>, kan blir et hinder for studentene på veien mot bedre forståelse innen moderne fysikk. Dette kan skyldes måten det blir undervist i kvantefysikk på, som vi var inne på et par avsnitt tilbake. Vi vil ta for oss denne undervisningen i mer detalj i neste delkapittel.

Norske fysikkelever har sitt første møte med kvantefysiske begreper som bølge-partikkel-dualisme og de Broglie-bølgelengde det siste året i videregående skole, og man skal derfor ikke forvente at elevene med én gang skal få kontroll over begrepsapparatet tilhørende kvantefysikken og forstå hvorfor disse begrepene

---

<sup>7</sup>Galilei vs. Einsteins transformasjon av hastigheter og kontinuerlig vs. kvantisert energi er begge prinsipper fra henholdsvis relativitetsteori og kvantemekanikk som bryter med klassisk tankegang. En kan ikke lenger trivielt addere relative hastigheter når disse hastighetene er kompatible med lyshastigheten i vakuum, samtidig som den kvantemekaniske harmoniske oscillator opererer med diskrete energinivå, til forskjell fra den klassiske oscillatoren der den potensielle energien er gitt ved funksjonen  $U = 1/2kx^2$ , en funksjon som er kontinuerlig for alle verdier av  $x$ .

er i direkte konflikt med det de har lært i klassisk fysikk. På en annen side stiller denne elevgruppen med relativt gode kort i forhold til det å lære seg moderne fysikk: De har ikke rukket å bli alt for fastlåst i et tankemønster fra klassisk fysikk, samtidig som de kan nok begreper fra den klassiske fysikken til å forstå hvordan interferensmønstre dannes, *klassisk*. Men, det er nettopp denne begrepsutvekslingen mellom klassisk og moderne fysikk didaktikere retter en alvorlig pekefinger mot (se for eksempel Ayene et al., 2011; Ireson, 2000). Er det eksempelvis riktig at den *klassiske* forståelsen av interferens mellom *fysiske* bølger benyttes i en kvantefysisk setting? Disse tankene er svært sentrale når det kommer til undervisning i moderne fysikk.

### **3.3.3 Undervisning i kvantefysikk – bruk av semi-klassiske modeller i opplæringen?**

I litteraturen finner man forskning som advarer mot undervisningsopplegg i kvantefysikk som tar med komponenter fra klassisk fysikk (Se for eksempel Fischler & Lichtfeldt, 1992; Ireson, 2000). Tanken er at halvklassiske modeller vil gi elevene enda flere misoppfatninger når det kommer til det å lære seg begreper innen kvantefysikk, da elevene forsøker direkte å overføre begreper fra klassisk fysikk til kvantefysikk, en overføring som rett og slett ikke gir mening (Angell et al., 2011). Et eksempel på en halvklassisk teori kan være Bohrs atommodell. Denne modellen viser tydelig at atomet har en positivt ladet kjerne med negativt ladede elektroner kretsende rundt. Problemet er at modellen plasserer elektronene i bestemte skall med fiksert avstand til protonkjernen. Dette harmonerer ikke med kvantemekanikkens beskrivelse som forteller at elektronets posisjon relativt til atomkjernen ikke er fullstendig gitt, men er bestemt ved den kvantemekaniske bølgefunksjonen. Derfor gir det ikke direkte mening å snakke om de forskjellige "elektronbanenes" avstand til atomkjernen - en kan bare gi et estimat på hvor det er størst sannsynlighet at elektronet vil befinne seg (Branden & Joachain, 2000).

Ireson (2000) kommer med en mulig løsning på hvordan undervisningen i

kvantefysikk ikke skal bli "forurenset" av klassisk tankegang. Han foreslår å døpe om fotoner, elektroner og andre partikler som må behandles kvantemekanisk til "kvante-objekter". Ved å utføre et slikt navnebytte er det, i følge ham, mulig at elevene eksempelvis unngår å sammenlikne fotoner med klassiske partikler. Disse "lyspartiklene" vil bli forstått som kvante-objekter, da de viser en kvantefysisk oppførsel i eksperimenter (for eksempel i dobbeltspalteeksperimentet), en oppførsel som ikke kan forklares med klassisk fysikk. Ergo er fotonene kvanteobjekter, hvor eksempelvis de Broglies formel kan benyttes "naturlig" for disse objektene.

Videre forklarer artikkelforfatteren at *kvante-objekt-tilnærmingen* også byr på fordeler når dobbeltspalteforsøket med elektroner skal tolkes. I dobbeltspalteforsøket danner elektronene, når de ikke blir observert, et interferensmønster. Disse partiklene viser derfor samme statistiske oppførsel som fotonene og, da disse partiklene i denne tilnærmingen blir sett på som kvante-objekter, må dette også gjelde elektronene: Siden elektronene er kvanteobjekter vil det derfor gi mening å snakke om elektronets bølgenatur og andre kvantemekaniske egenskaper ved disse partiklene.

En kan fundere på hvorfor er det så mange fallgruver knyttet til undervisning i nettopp kvantefysikk. En mulig undervisningsstrategi kan være å gi elevene innsyn i hvordan fysikk som vitenskapsdisiplin utvikler seg og lage et undersøkende undervisningsopplegg som avspeiler, på et passende faglig nivå, fysikernes arbeidsmetoder. Fysikkfagets utvikling baserer seg på hypotetisk-deduktiv-modellbygging (Angell, et al. 2011): En (teoretisk) fysikers oppgave er å komme frem til matematiske modeller som kan predikere utfallet av eksperimentelle resultater utført av en eksperimentalfysiker. Hvis teorien ikke er i samsvar med de eksperimentelle dataene må teoretikeren justere modellen hun eller han allerede har for hånden, eller utarbeide en fullstendig ny modell. Det er nettopp det siste punktet, det at det må utarbeides en fullstendig ny modell for å forklare de eksperimentelle resultatene, som gjør det krevende å lage gode *undervisningsopplegg* i kvantefysikk.

Et eksempel fra klassisk fysikk er oppgaver om skrått kast der fysikkelevne arbeider med å modellere kast uten luftmotstand. Elevene får vite at de tilhørende bevegelsesligningene modellerer et kast med en relativt tung og liten ball (kulestøt) på en tilfredsstillende måte, men at disse ligningene må justeres hvis man skal beskrive banen til en stor og lett ball der luftmotstanden virker tydelig inn (Jerstand, Sletbak, Grimenes & Renstrøm, 2008).

Kasteoppgaver med luftmotstand kan by på regnetekniske utfordringer, men konseptuelt er de ikke så alt for forskjellige fra de oppgavene der en neglisjerer denne effekten. Dette er ikke tilfellet når elevene skal bevege seg fra klassisk fysikk og inn i kvanteverden. Hvis elevene eksempelvis bytter ut den makroskopiske ballen med et elektron gjelder helt andre "bevegelsesligninger". Selv om man har all tilgjengelig informasjon om elektronet (dets bølgefunksjon) kan en allikevel bare gi et statistisk estimat på hvor det i det hele tatt befinner seg. Det blir derfor meningsløst å lage en *deterministisk* modell på hvor elektronet "vil lande", hvilket er praksisen i en klassisk kasteoppgave både med og uten luftmotstand.

Selv om kasteoppgaven med elektroner var satt på spissen, så illustrerer eksempelet at elevene må forkaste de klassiske modellene fullstendig når de skal arbeide med kvantefysiske problemstillinger. Fischler & Lichtfeldt (1992) skriver at jo lenger elevene har arbeidet med en modell og vært vitne til modellens tidligere suksesshistorier med å beskrive fysiske sammenhenger, desto vanskeligere blir det for dem å kvitte seg med (den styrkede) modellen. Elevene vil forsøke å "snu seg tilbake" til de trygge, klassiske begrepene og forklaringsmåtene når de skal lære seg kvantefysikk, og dette vil føre til forstyrrelser i læringsprosessen samtidig som potensialet for å plukke opp misoppfatninger øker.

Videre viser undersøkelser at elever og studenter forsøker å forklare kvantefysiske begreper med begreper tilhørende det klassiske apparatet. I undersøkelsen gjort av Ayene et al. (2011) ser en eksempler på studenter som ser på Heisenbergs uskarphetsrelasjon med klassiske brilleglass, hvilket vil si at

de eksempelvis så på denne uskarpheten som en direkte konsekvens av tekniske begrensninger ved apparaturene og andre ytre faktorer:

(...)students described uncertainty as a measurement error due to an external effect such as thermal agitation, noise, vibration, the surrounding contacts, etc. Furthermore, they described uncertainty as a lack of resolution, and technology or equipment not being good enough.

(Ayene et al., 2011, s.9)

I denne undersøkelsen var det kun 12% av studentene som så på uskarphetsrelasjonen som en iboende egenskap hos partiklene.

Den samme studien viser at bølge-partikkel-dualismen er et begrep som også skaper problemer for studentene. Her ble klassiske bølgeegenskaper som interferens og diffraksjon, begreper som ikke hører hjemme i den klassiske beskrivelsen av en partikkel, ukritisk benyttet for å forklare elektronets bølgeegenskaper uten å henvise til kvantemekanisk tolkning av bølgefunksjonen. Slik ukritisk sammensmeltning av klassisk og moderne fysikk blir kritisert av fysikkdiraktikere (se f.eks. Ireson, 2000 og Fischler & Lichtfeldt, 1992) og er en direkte konsekvens av måten det undervises i kvantefysikk på: Istedenfor å tidlig forklare elevene forskjellen mellom klassisk og moderne fysikk holdes denne skjult, med den kostnad at begrepsapparatet tilhørende de to teoriene blandes (Angell et al. 2011).

#### **3.3.4 Semi-klassiske modeller i undervisningen – finnes det argumenter for?**

Vi har sett eksempler på at fysikkdiraktikere ytrer ønsker om at halvklassiske modeller ikke skal benyttes i kvantefysikkundervisningen, men hvorfor er inkluderingen av disse modellene fortsatt den foretrukne praksisen? Fischler og Lichtfeldt (1992) nevner to argumenter som ofte går igjen for å forsvare, i dette tilfellet, Bohr-modellens plass i klasserommet:

- Modellen er enkel å forstå og den kan forklare mange observasjoner.
- Modellen var svært viktig på veien mot kvantemekanikken, og det er historisk viktig at elevene blir presentert for denne modellen på et tidlig tidspunkt.

Avslutningsvis er det interessant å sette de to formidlingsmotpolene opp mot hverandre: Skal elevene få lene seg på det kjente og kjære fra klassisk fysikk når de skal lære seg moderne fysikk, med de kostnader som tidligere beskrevet, eller skal læreren starte undervisningen med blanke ark, legge lærdommen fra klassisk fysikk på is og starte første time med å fortelle hvor fundamentalt forskjellige de to fysikkdisiplinene er?

Forskningen på undervisningsmetoder i kvantefysikk har økt betraktelig de siste årene. Dette henger sammen med at kvantemekanikk ikke lenger kun er forbeholdt fysikere, men angår også studenter og yrkesgrupper som jobber innenfor teknologiutvikling, kjemi og biologi (Steinberg & Oberem, 2000). Selv om forskningen på undervisningsmetoder i kvantefysikk har økt, så er det per dags dato ikke mulig å gi et entydig svar på spørsmålet stilt ovenfor. Grunnen til at det er krevende å undervise i kvantefysikk kan skyldes at det er en manglende *konsensus* blant fysikere om hvordan kvantemekanikken skal tolkes. Dette er temaet i den kommende seksjonen.

### 3.4 Kvantefysikk –manglende konsensus blant fysikere

Cheong og Song (2013) meddeler at det er spesielt krevende og undervise i kvantefysikk, da det fortsatt er manglende konsensus blant fysikere om hvordan en skal *tolke* kvantemekanikken. Hvis en eksempelvis tar for seg bølge-partikkel-dualismen fører denne manglende konsensusen (de ulike tolkningene) til at det oppstår flere forskjellige måter en kan forstå dette konseptet på. Her er det essensielt, i følge dem, at elevene får en innføring i dualisme som er i tråd med deres fysikkfaglige forutsetninger. I første rekke betyr dette at elevenes første møte med, eksempelvis lysets dualisme, bør være forankret i eksperimentelle kjensgjerninger, uten at elevene skal bli eksponert for mer avanserte

kvantemekaniske konsepter, som eksempelvis kan innbefatte tolkningen av bølgefunksjonen og prinsippet om superposisjon.

Dette første møtet med dualismen, som i artikkelen blir kalt *the first level meaning of duality*, innbefatter at elevene skal kjenne til de eksperimentelle resultatene vedrørende dobbeltspalteeksperimentet, fotoelektrisk effekt og comptoneffekten der disse eksperimentene skal tolkes i lys av Einsteins ligning og de Broglies fomel,  $E = h\nu$  og  $p = h/\lambda$ . En slik tolkning inkluderer ikke kjennskap til teoretiske, kvantemekaniske konsepter som bølgefunksjonen, sannsynlighetstolkning og superposisjon. Ved å unngå at elevene blir eksponert for dette teorirammeverket vil ikke elevene behøve å ta stilling til tolkningen av kvantefysikkens formalisme. Et elevsvar som eksempelvis meddeler at "lys har både partikkel- og bølgeegenskaper" vil være et bevis på at denne eleven har oppnådd en tilfredsstillende forståelse av dualismen, relativt til det nivået av forståelse som forventes innenfor *the first level meaning of duality* (Cheong & Song, 2013).

Ved å introdusere elevene for bølgefunksjonen, schrödingerligningen, Borns sannsynlighetstolkning og uskarphetsrelasjonen, som *verktøy* til å *predikere* eksempelvis elektronenes oppførsel under dobbeltspalteforsøket, vil dette medføre at elevene beveger seg opp på neste nivå når det gjelder forståelsen av dualisme. På dette nivået er det en viss konsensus fordi disse *verktøyene* fungerer utmerket til å *predikere* utfallene av de nevnte eksperimentene (Cheong & Song, 2013). Det neste nivået, som innbefatter en *faglig tolkning* av den kvantemekaniske dualismen, er utenfor denne masteroppgavens fokusområde.

### 3.5 Individuell konstruktivisme og sosiokulturelle syn på læring

I dette delkapittelet følger en kort innføring i individuell konstruktivisme og hvordan dette læringssynet kan knyttes opp mot elevenes læring i kvantefysikk. I denne seksjonen vil jeg også ta for meg sosiokulturelle syn på læring, et læringssyn som ReleKvantprosjektet er forankret i (Henriksen et al., 2014).



Innen *konstruktivisme* som læringssyn skiller man gjerne mellom *individuell* og *sosialkonstruktivisme*. Begge disse perspektivene har hatt en sentral plass innenfor realfagdidaktikk (Angell, et al., 2011), men jeg vil her kun ta for meg individuell konstruktivisme.

Innenfor individuell konstruktivisme beskrives individets kunnskap gjennom *kognitive skjema*. Disse skjemaene er en del av det Piaget (1896-1980) beskriver som *kognitive strukturer*. Det er når disse strukturene ekspanderes eller modifiseres at det foregår en læringsprosess (Angell et al., 2011).

Når eleven møter nye sanseinntrykk gjennom eksempelvis samtaler, observasjoner og lesing kan elevens kognitive skjemaer forsterkes. Dette kalles i læringsteorien for *assimilasjon* og er en betegnelse på at de kognitive skjemaene forsterkes ved at de ytre sanseinntrykkene er i samsvar med de skjemaene (kunnskapen) eleven allerede besitter. Dette kan, i grove trekk, kobles til eksempelet om skrått kast med og uten luftmotstand som vi beskjeftiget oss med tidligere i dette kapittelet: Eleven forsterker sine kunnskaper om skrått kast ved å inkludere luftmotstand, uten at den nye kunnskapen er i direkte *konflikt* med den eleven allerede besitter.

Det er nettopp når de nye inntrykkene ikke er i samsvar med de eksisterende kognitive skjemaene at en har en *kognitiv konflikt* og det er denne situasjonen som er mest interessant å ta for seg når elevene skal lære kvantefysikk. Angell et al. (2011) skriver at konflikten mellom det individet kan fra før og nye inntrykk kan ta to ulike retninger:

1. Den nye kunnskapen avises
2. De kognitive skjemaene endres

Det er naturligvis ønskelig å konstruere et undervisningsopplegg innenfor kvantefysikk som resulterer i at elevens kognitive skjemaer endres. Men, man må altså ha i bakhodet at elevene rett og slett kan avvise den nye kunnskapen!

Innen sosiokulturelle syn på læring er oppfatningen at den sosiale konteksten er

bærer av selve kunnskapen. Innenfor dette synet på læring har begrepet *situering* en sentralt plass. Et situert syn på læring legges det vekt på selve konteksten kunnskapen anvendes og skapes i – selve konteksten er en sentral komponent av selve kunnskapen.

I senere tid har læring i et praksisfelleskap blitt mer fremtredende i fagdidaktikken. Dette innebærer at hovedfokuset er å plassere kunnskapen i et felleskap, slik at kunnskapen ikke kun ses på som en egenskap ved individene. Individenes rolle i dette praksisfellesskapet er at de selv er deltakere i kunnskapskulturen (Angell et al., 2011).

Dette praksisfellesskapet kan overføres til realfagsklasserommet. Her vil læreren få en annen rolle enn han eller hun gjør i det konstruktivistiske læringsynet. Selv om læreren kan betraktes som modell også i et praksisfelleskap, så består ikke lærerens oppgave i å kun overføre kunnskap til enkeltindivider ved at han eller hun har alle svarene for hånden. I dette fellesskapet skal læreren, i samarbeid med elevene, eksempelvis planlegge forsøk og prosjektoppgaver i faget. Læreren har derfor muligheten til å invitere elevene inn i det faglige fellesskapet, der målsettingen er at elevene skal lære seg ulike problemløsningsstrategier innenfor fysikkfaget, samtidig som elevene eksempelvis skal lære å kombinere kunnskap fra fysikkfaglig teori til å forklare eksperimentelle resultater. På den måten får fysikkelevne muligheten til å delta i fysikkens arbeidsmåter, og de kan da betegnes som deltakere i fysikkens praksisfellesskap (Angell et al., 2011).

Sosiokulturelle syn på læring vektlegger også, i tillegg til det sosiale fellesskapet, at fagets språk skal brukes aktivt i læringsprosessen (Henriksen et al., 2014). Dette er, som vi skal se i kapittel 4, en viktig del av ReleKvants læringsstrategier.

### 3.6 Elevenes oppfatninger om lys og bølge-partikkel-dualismen

Før en i det hele tatt kan starte arbeidet med å utarbeide et undervisningsopplegg i kvantefysikk, må en undersøke elevenes tanker og

oppfatninger innenfor dette temaet av fysikken. Denne holdningen illustreres ved følgende sitat fra Monk (1994):

Teachers and tutors need to spend a good deal more time asking what students think. Teachers and tutors need to spend a good deal less time relating their own well-formed thoughts. It is not the teacher who should be rehearsing the problem, it is the student.

(Monk, 1994, s.209)

Selv om Monks (1994) tanker ikke direkte går på undervisning innenfor kvantefysikk, men heller på matematikkundervisning for fysikkstudenter, er artikkelforfatterens tanker lett generaliserbare til fysikkundervisning.

Ayene et al. (2011) har i sin studie kartlagt en rekke elevbesvarelser innenfor bølge-partikkel-dualismen, der metodologien bestod i semi-strukturert dybdeintervju av fysikkstudenter på lavere grads nivå. Her kommer det frem at 80% av studentene falt innenfor de to kategoriene "klassisk beskrivelse" og "blandet beskrivelse" da de skulle gi sin beskrivelse av lys og bølge-partikkel-dualismen. Den siste delen av studentene, 16%, havnet innenfor en kategori som ble tildelt navnet "kvasi-kvante-beskrivelse"<sup>8</sup>.

I den førstnevnte av de tre kategoriene ble eksempelvis partikler beskrevet som harde, lokaliserte og kompakte objekter med masse - noen studenter visualiserte partikler som biljardballer som bærer på energi og bevegelsesmengde. Videre ble bølger og partikler sett på som gjensidig ekskluderende "objekter" og lys ble sett på som et utelukkende bølgefennomen. Studentgruppen innenfor den klassiske kategorien ytret også at dobbeltspalteforsøk utført med fotoner ga et totalt ulikt resultat hvis det samme forsøket ble gjennomført med elektroner.

Da intervjuer spurte en av de "klassiske-tenkende" studentene om hun eller han kunne, på enklest mulig måte, beskrive bølge- og partikkelegenskapene til

---

<sup>8</sup> De resterende 4% kunne ikke plasseres i noen av de nevnte kategoriene.

elektroner, protoner og fotoner endte studenten opp med å beskrive egenskapene hver for seg:

Yes um . . . um . . . to me particles are small material objects even all objects and may be a ball an electron etc. that are characterized by their one position and second motion or momentum (momentum is mass times velocity). They have also energy. And these things could show to say particle. In wavelike . . . wave is a disturbance that propagate or diffuse from place to place. It has frequencies and wavelength.

(Ayene et al., 2011, s.7)

Sitatet forteller at studenten har en fullstendig klassisk forståelse av partikler. Han eller hun karakteriserer dem som punktpartikler, samtidig som det klassiske uttrykket for bevegelsesmengde benyttes i forklaringen. Videre forsøker intervjuobjektet å komme inn på partiklenes bølgeegenskaper, men trekker forklaringen og ender til slutt opp med å beskrive en bølge slik den beskrives i klassisk fysikk, uten å meddele at denne bølgen ikke har noe fysisk innhold.

Studenter innenfor den andre kategorien, "blandet beskrivelse", knyttet klassiske bølgeegenskaper til makroskopiske objekter, mens de så på fotonet som en klassisk partikkel. Det ble ytret at elektromagnetisk stråling består av fotoner med energi  $h\nu$  og at denne strålingen hadde (klassisk) bevegelsesmengde gitt ved  $mv$ . Fotoner ble også oppfattet som massive, perfekte lokaliserte partikler en kunne tilegne posisjonskoordinater.

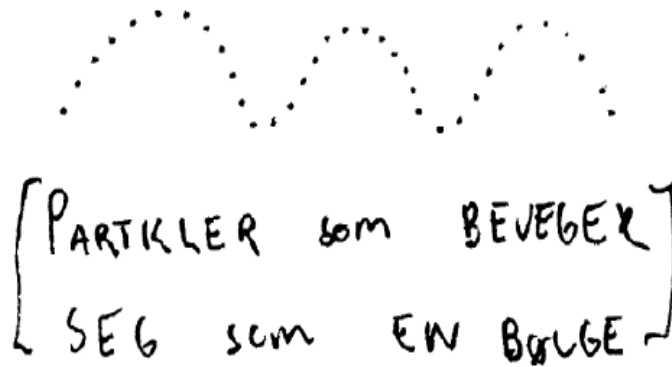
Disse studentene hadde også sin egen tolkning av dobbeltspalteeksperimentet. De mente at hvert eneste foton og elektron som passert gjennom dobbeltspalten dannet et "eget interferensmønster" på skjermen (Ayene et al., 2011).

Studentene innenfor den sistnevnte kategorien, "kvasi-kvante-beskrivelsen", lykkes i stor grad å tolke bølge-partikkel-dualismen i lys av kvantemekanikken. Disse studentene var også inne på det at bølge-partikkel-dualismen ikke kun var forbeholdt mikroskopiske objekter, ved at de benyttet de Broglies hypotese til å forklare hvorfor bølgeegenskapene til makroskopiske objekter ikke var merkbar for det blotte øyet. Dette viser at studentene fra denne kategorien ikke kun viste overflatekunnskap, noe som er vanlig innenfor naturvitenskap: De fleste studenter og elever kan hoste opp fysikkens matematiske formler, men har større vanskeligheter med å formulere formlenes konseptuelle innhold og knytte en dyp, fysikkfaglig forståelse til disse formlene (se for eksempel Steinberg, 2011).

Disse studentenes tolkning av dobbeltspalteforsøket for elektroner var også, stort sett, i lys av kvantemekanikken, da de benyttet seg av resultatet av dette eksperimentet til å forklare at elektroner både viste partikkel- og bølgeegenskaper. Utfordringene her var at elevene forstod det slik at elektronene bevegde seg i veldefinerte baner, på lik linje med klassiske partikler (Ayene et al., 2011).

I en annen undersøkelse, utført med norske fysikkelever i den videregående skole, går mye av det samme tankegodset igjen. Her kommer det igjen fram at elevene blander inn klassisk forståelse av partikler og bølger når de skal beskrive bølge-partikkel-dualismen, men det var særlig en elevbesvarelse som skilte seg ut (Olsen, 2002).

En elev skrev at elektroner har bevegelsesmengde, masse og at det kan bevege seg som en bølge. Hun eller han illustrerte dette med en tegning (figur 3.1) som viser at denne eleven forstår elektronets "bølgeegenskaper" som om det fysisk følger en klassisk bølgebane - denne "bølgebevegelsen" var elevens måte å forene de to modellene på (Olsen, 2002). Denne oppfatningen, at partikler



**Figur 3.1: Elevens forståelse av hva det vil si at "partikler kan være bølger". Bildet er hentet fra Olsen (2010, s.570)**

beveger seg som en bølge, går også igjen parallellt studier av elever i den videregående skole. I en undersøkelse utført i Tyskland skrev 17% av elevene at fotonet bevegde seg som en bølge. Denne feiltolkningen av fotonets "bølgeegenskaper" ble også ytret muntlig under intervjuer fra den samme undersøkelsen (Müller & Wiesner, 2002).

Vi har sett at bølge-partikkel-dualismen og dets tilknytning til lys og dobbeltspalteforsøket er et kvantemekanisk begrep som skaper stor hodebry for både studenter og elever. En kan jo da avslutningsvis stille spørsmålet om denne delen av kvantefysikken skal inngå i det videregående pensumet? Her finnes det røster som er svært kritisk til å la dette begrepet inngå i en introduksjon til kvantefysikken, noe følgende sitat fra Olsen (2002) viser:

What is more interesting though is that these writers and others don't seem to agree on how quantum physics should be taught. What they do agree on is that we should not introduce quantum physics by any reference to wave-particle duality.

(Olsen, 2002, s. 572)

Sitatet påpeker med andre ord at norsk skole og Kunnskapsløftet tar store mål av seg når de velger å ta med dette i læreplanen i Fysikk 2. Dette vil også inkludere ReleKvantprosjektet, som på sin side er utviklet i tråd med

læreplanmålene fra moderne fysikk der bølge-partikkel-dualismen er en del av pensum.

## 4 ReleKvant

### 4.1 Introduksjon

I dette kapittelet vil det bli gitt en presentasjon av ReleKvantprosjektet, med informasjon om hvilke teoretisk fundament prosjektet er forankret i og hvilke modaliteter ReleKvant benytter seg av i sin presentasjon av kvantefysikken. Avslutningsvis vil jeg gi en beskrivelse av hvordan brukergrensesnittet i dette læringsprosjektet er lagt opp.

### 4.2 ReleKvantprosjektets visjon og teoretiske bakgrunn

ReleKvantprosjektets mål er å fremme kunnskapen om hvordan kvantefysikk og relativitetsteori kan bli undervist på måter som oppleves som meningsfulle og motiverende for elever, samtidig som undervisningen vektlegger at elevene skal tilegne seg dyp, konseptuell forståelse innenfor den moderne fysikken, i tråd med læreplanen for Fysikk 2 (Bungum, Henriksen, Angell, Tellefsen & Bøe, 2015; ReleKvant, 2014). Dette prosjektets metodologi er basert på educational design research (EDR), hvor målet er å utvikle internettbaserte læringsressurser som kan applikeres direkte i klasserommet, parallelt med at det foretas kunnskapsbasert forskning på elevenes faglige utvikling underveis i prosjektet (Henriksen et al., 2014). Prosjektets medlemmer er lektorer ansatte i den videregående skole, samt fysikere og fysikkdidaktikere fra Universitetet i Oslo (UiO) og Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Per i dag er det fire videregående skoler som er tilknyttet prosjektet (ReleKvant, 2014), der det inngår flere runder med prosjektutprøvinger på disse skolene. Prosjektets første runde med utprøvinger ble gjennomført våren 2014 (Henriksen et al., 2014).

ReleKvant baserer seg på læreplanen i Fysikk 2 og prosjektets mål er å utvikle og designe undervisningsmateriell som skal bygge på sosiokulturell læring, ved at det legges til rette for at elevene skal benytte seg av skriftlig og muntlig språk i samarbeid med medelever: Prosjektets læringsressurser legger vekt på at elevene skal samarbeide i par og at de skal diskutere fysikk med *egne* ord. I



tillegg skal ReleKvants læringsressurser gi elevene muligheten til å utforske digitale animasjoner og simuleringer av fysiske fenomener i læringsprosessen (Henriksen et al., 2014).

Da ReleKvants pedagogiske fundament er bygget på sosiokulturell læringsteori medfører dette at elevene skal lære fysikk ved å benytte fysikkens språk og alle fysikkens ulike *modaliteter* i læringsprosessen. Elevene skal også lære fysikkfaglige konsepter gjennom deltakelse i sosial praksis (Vygotsky, 1978, sitert i Henriksen et al., 2014).

Fysikken inneholder en rekke representasjonsformer. Fysikkdidaktikerne definerer dette som *multimodalitet*, som kan løst oversettes med *former for tekst*. Fysikkens språk er nødt til å ha ulike modaliter, da ulike representasjonsformer ofte må til for å beskrive og forklare fysiske fenomener. I de fleste kvantitative sammenhenger passer det best å benytte ligninger, tabeller og grafer i beskrivelsen, mens tekst, animasjoner og figurer (bilder) er å foretrekke når det fysikkfaglige budskapet er kvalitativt. Didaktikerne generaliserer dette utsagnet ved å innføre begrepet *modal affordans*, som er definert som potensialet til modaliteten for å få frem ønsket budskap (Angell et al., 2011).

ReleKvantprosjektet, hvis innhold for det meste er kvalitativt i tråd med læreplanen innenfor moderne fysikk, benytter derfor ofte tekst, digitale animasjoner og figurer i sin fremstilling av det fysikkfaglige stoffet. Dette fører til at ReleKvants læringsressurser oppnår høy modal affordans. Forskning har også vist at bruk av digital visualiseringsprogramvare kan ha positiv effekt på læringen, samtidig som denne bruken kan hjelpe til med å forebygge konseptuelle misoppfatninger innenfor kvantefysikk, men det er samtidig nødvendig at denne bruken er forankret i forskningsbaserte undervisningsmetoder (Singh et al., 2006). ReleKvant er et eksempel på et slikt læringsprosjekt: Her benyttes digitale animasjoner og visualiseringsprogramvare i undervisningen, samtidig som denne bruken er forankret i forskningsbaserte undervisningsmetoder i kvantefysikk (Henriksen et al., 2014).

ReleKvantprosjektets undervisningsverktøy består av læringsmoduler, der disse modulene er utviklet på bakgrunn av fysikkdidaktisk teori og empiriske undersøkelser (Bungum et al., 2015). Elevene får undervisning i kvantefysikk ved å arbeide seg gjennom disse læringsmodulene, der de blir eksponert for digitale simuleringer, tekst- og diskusjonsoppgaver og mini-quizzer som tester elevenes kvantitative og kvalitative kunnskaper innenfor kvantefysikk. I tillegg er det lagt ut tilleggsstoff fra eksterne nettsider for de av elevene som ønsker seg ekstra faglig fordypning. Eksempelvis er det, tilhørende modulen *fotoelektrisk effekt*, lagt ut lenke til Einsteins originalartikkel fra 1905 (oversatt på engelsk) i PDF-format som elevene kan undersøke mens de jobber med fotoelektrisk effekt.

### 4.3 ReleKvant i bruk

Det har vært utviklet tre versjoner av ReleKvantprosjektet. I denne oppgaven har jeg foretatt klasseromsobservasjoner og intervjuet elever som har jobbet med de to siste versjonene (2 og 3), men jeg vil i denne seksjonen kun gi en beskrivelse av den tredje og siste versjonen av prosjektet, da det er den som per i dag er den utgaven som vil bli benyttet i fremtidige utprøvinger (Viten, 2015). En detaljert beskrivelse av de elevoppgavene (fra de to siste versjonene) som var aktuelle for mitt forskningsspørsmål er gitt i denne oppgavens resultatkapittel.

Det finnes seks moduler som tar for seg de forskjellige temaene innenfor kvantefysikken. Hver av disse modulene inneholder en multimodal fremstilling av fagstoffet. Figur 5.1 viser et skjermbilde fra modulen *Uskarphet*, som er den nest siste modulen elevene skal arbeide med. Her vil elevene få muligheten til å jobbe seg gjennom fagstoffet tilhørende dette temaet ved å benytte menyen til venstre (figur 5.2). Alle elevbesvarelser vil bli lagret i prosjektets digitale *arbeidsbok*. Denne blir fylt ut etter hvert som elevene arbeider med stoffet. Når elevene er ferdige med alle arbeidsoppgavene blir denne arbeidsboken sendt inn til faglærer. Det er denne arbeidsboken, i tillegg til lydopptak av elevdiskusjonene, jeg har fått tilgang til og som utgjør mitt datamateriale fra ReleKvantprosjektet.

**Table of Contents**

- Slide Title
- Uskarphet
- Dr. Quantum og dobbeltspalteforsøket
- Se elektroner oppføre seg som bølger
- Diskusjonsoppgave: Er elektroner bølger?
- Forsøket påvirker observasjonene**
- Fysikk-filosofi
- Heisenbergs uskarphetsrelasjoner
- Lytteoppgave
- DeBroglies formel
- Hvor er en bølge?
- Uskarphet: Bevegelsesmengde og posis...
- Gjør uskarphetsrelasjonen det vanskel...
- Uskarphet: Energi og tid
- Kvantefluktuasjoner
- Oppsummering: Spør en forsker
- Oppsummering: Skriveoppgave
- Oppsummering: Plenum

**Forsøket påvirker observasjonene**

Vi har sett at både lys og elektroner kan oppføre seg som bølger i noen forsøk og som partikler i andre. Måten vi observerer partikler på, påvirker hvilke kvantefysiske egenskaper vi ser hos dem.

Partikler?

Begge deler?

Ingen av delene?

Bølger?

**Figur 5.1** Skjerm bilde fra modulen Uskarphet, hentet fra Viten (2015)

Selv om prosjektet legger opp til at elevene skal få jobbe individuelt og i par, så er det fortsatt faglærerens jobb å organisere fysikktimene og eksempelvis bestemme når plenumsdiskusjonene skal tas. Elevene får forberede seg til denne plenumsdiskusjonen ved at de diskuterer i par. Fellesdiskusjonene gir også læreren muligheten til å ta tak i mulige faglige misoppfatninger underveis og forsikre seg om at elevene har forstått det essensielle innholdet i den aktuelle modulen elevene har arbeidet med.

En slik nettbasert læringsressurs, som tar for seg den moderne fysikken ved å bruke multimodal fremstilling av stoffet, er ønsket av lærere (Bungum et al., 2015). Når Rele-Kvant er ferdig utprøvd, så er målsettingen at prosjektet skal bli et naturlig innslag i fysikkundervisningen på norske skoler. Det vil også bli utviklet lærerveiledninger til prosjektet i fremtiden.

- Uskarphet
- Dr. Quantum og dobbeltspalteforsøket
- Se elektroner oppføre seg som bølger
- Diskusjonsoppgave: Er elektroner bølger?
- Forsøket påvirker observasjonene**
- Fysikk-filosofi
- Heisenbergs uskarphetsrelasjoner
- Lytteoppgave
- DeBroglies formel
- Hvor er en bølge?
- Uskarphet: Bevegelsesmengde og posis...
- Gjør uskarphetsrelasjonen det vanskel...
- Uskarphet: Energi og tid
- Kvantefluktuasjoner
- Oppsummering: Spør en forsker
- Oppsummering: Skriveoppgave

**Figur 5.2:** Forstørret utgave av menyen tilhørende modulen Uskarphet, hentet fra Viten (2015)

## 5 Metode

### 5.1 Introduksjon

I dette kapittelet vil jeg gi en beskrivelse av hvilke type studie denne oppgaven representerer. Deretter tar jeg for meg datainnsamlingen fra henholdsvis ReleKvant og de semi-strukturerte fokusgruppeintervjuene. Denne innsamlingen etterfølges av en beskrivelse av hvordan jeg har arbeidet med dette data-materialet og hvilke valg som ble tatt i forhold til presentasjonen av disse dataene. Videre vil jeg sette denne undersøkelsen inn i en større sammenheng, før jeg avslutningsvis vil ta for meg de etiske aspektene som er tilknyttet en slikt studie.

### 5.2 Forskningsdesign

Min overordnede problemstilling gikk ut på å belyse hvordan elevenes forståelse av lys og bølge-partikkel-dualismen ble utviklet gjennom deres arbeid med ReleKvants læringsmoduler. Dette ble så formulert i to konkrete forskningsspørsmål. For å besvare disse forskningsspørsmålene har jeg foretatt det som i litteraturen kalles for en kvalitativ case-studie. Jacobsen (2005) skriver at fellesnevneren for en slik studie er at studieobjektet er avgrenset i tid og rom. Videre meddeles det at case-studier er gode når en ønsker å gå i dybden på et enkelt tilfelle.

Jacobsens (2005) beskrivelser av case-studiet harmonerer bra med min studie: Studie-objektet i min undersøkelse var fysikkelever i den videregående skole, som hadde arbeidet med undervisningsmodulene i ReleKvant, et arbeid som fant sted i klasserommet og ble utført i Fysikk2-timene, over en periode på to uker. I tillegg ble enkelte av elevene intervjuet etter at de hadde sluttført prosjektet. Datamaterialet fra ReleKvantprosjektet ga meg muligheten til å undersøke elevenes oppfatninger av lys og bølge-partikkel-dualismen, samtidig som jeg fikk innsyn i hvordan de utviklet sine kunnskaper innenfor disse fysikkfaglige temaene. Denne kunnskapsutviklingen fikk jeg tilgang til ved at jeg fulgte

besvarelsene disse elevene avga, innenfor lys og bølge-partikkel-dualismen, fra prosjektets startstrek og frem til mål.

Datamaterialet jeg har brukt i denne oppgaven besto av følgende tre kilder:

- Skriftlige svar fra viten
- Telefonopptak av elevdialoger
- Intervju

De semi-strukturerte fokusgruppeintervjuene sørget for at jeg fikk muligheten til å foreta en dybdeundersøkelse av elevenes forståelse av lys og bølge-partikkel-dualismen. Disse intervjuene utfyller også klassenes svar på skriftlige og muntlige spørsmål. Jacobsen (2005) skriver at en slik metodetriangulering kan bidra til å øke gyldigheten og troverdigheten til datamaterialet. Det er allikevel viktig å føye til at mitt datamateriale inneholder data fra ulike elevsettinger. Det er eksempelvis mulig at elevene som stilte til intervju ikke var like bekvem i intervjusettingen, som de var da de jobbet med ReleKvantmodulene. Dette kan ha ført til at elevene ikke fikk vist like god kunnskap under intervjuet, som viste under arbeidet med læringsmodulene.

Jeg vil påstå at min forskning inneholder både induktive og deduktive elementer. Dette begrunner jeg med følgende: Undersøkelsen er deduktiv fordi at jeg har benyttet fysikkfaglig og didaktiske teori og tidligere undersøkelser til å vurdere elevsvarene (datamaterialet fra ReleKvantprosjektet). Det fysikkfaglige dikterer om elevene har misforstått den kvantefysiske tolkningen av partiklenes bølgeegenskaper ved at de eksempelvis påpeker at elektroner representerer fysiske bølger, mens den didaktiske teorien kommer inn i bildet hvis en skal drøfte hvilke årsaker som ligger til grunn for at denne type misforståelser oppstår. I min oppgave ble fysikkdidaktisk forskning benyttet som en indikator for å beskrive undervisningskvaliteten på ReleKvants læringsmoduler.

I tillegg har jeg hentet elementer fra tidligere forskning, gjort på elever og studenters forståelse og oppfatninger innenfor kvantefysikk, og benyttet disse elementene til å konstruere egne kategorier for å plassere elevbesvarelser. Det

som gjør at denne undersøkelsen også får merkelappen induktiv, er at jeg har videreutviklet disse kategoriene fra egne data. Disse kategoriene vil bli presentert i neste delkapittel.

## 5.3 Datainnsamlingen

### 5.3.1 Datamaterialet fra ReleKvant-modulene

ReleKvant er et omfattende prosjekt, både hvis en ser prosjektets størrelse i lys av antall akademiske personell som står bak design, forskning og utvikling av ReleKvants undervisningsmateriell og antall samarbeidsskoler som inviteres til å benytte dette materialet i fysikkundervisningen. Mer subjektivt kan ReleKvants størrelse også måles i antall oppgaver prosjektet tilbyr til elevene innenfor den tematikken som angår mine forskningsspørsmål. Det er de to sistnevnte størrelsesmålene som har hatt relevans for mengden aktuelt datamateriale jeg har hatt mulighet til å hente fra prosjektet. Jeg har fått data fra fire videregående skoler, fordelt på fem klasser (117 elever). Min egen oppfatning er at prosjektet har gitt meg tilgangen på et rikt datamaterialet, en mengde datamateriale jeg mest sannsynlig ikke hadde hatt ressurser eller tid til å anskaffe på egenhånd.

Datamaterialet er produsert av elevene og har blitt til ved at de har jobbet med prosjektets moduler. Disse modulene besto av oppgaver som krevde skriftlige og muntlige besvarelser. Svarene ble skrevet direkte inn på Viten (2015) sine nettsider, mens de muntlige besvarelsene, pardiskusjonene, ble tatt opp med elevenes private mobiltelefoner og sendt til faglærer. Faglæreren har så sendt disse opptakene videre til det vitenskapelige personalet som er tilknyttet ReleKvant.

Det var ikke alle modulene i ReleKvant som inneholdt oppgaver som var aktuelle for mitt forskningsspørsmål. Dette kan forstås ved å kommentere at disse modulene tar mål av seg å behandle samtlige læreplanmål innenfor kvantefysikk i Fysikk 2. De aktuelle oppgavene tilhørende prosjektet, som gikk på lys og bølge-

partikkel-dualismen, har fått en detaljert beskrivelse i denne oppgavens resultatdel.

Jeg har ikke hatt noen innvirkning på ReleKvants innhold, hvilket betyr at prosjektet har lagt føringer for denne delen av datainnsamlingen. Jeg vil allikevel påstå at jeg var i trygge hender da jeg ”overlot datainnsamlingsansvaret” til ReleKvant: ReleKvant er en forskningsbasert undervisningsressurs som utvikles av norske fysikdidaktikere og forskere, hvilket betyr den faglige og didaktiske kvaliteten på prosjektet forutsettes god, i tillegg til at ReleKvant er utviklet i tråd med læreplanen. Ved å følge prosjektet er jeg derfor sikret at ReleKvant gir elevene undervisning innenfor læreplanens rammer, noe som gjør at datamaterialet tilhørende modulene (elevbesvarelsene) kan kobles opp mot måloppnåelsen tilhørende læreplanmålene i Fysikk 2. Det er nettopp denne måloppnåelsen som, i følge Utdanningsdirektoratet (2015), dikterer det faglige nivået til elevene.

Mitt personlige bidrag til det totale datamaterialet har vært i form av de fire semi-strukturerte fokusgruppeintervjuene en medstudent og jeg gjennomførte etter at elevene hadde slutført arbeidet med prosjektets moduler. Vi har også observert deler av undervisningen i tre av skolene hvor intervjuobjektene og datamaterialet (elevsvarene) ble hentet fra. Observasjon ble nettopp valgt fordi vi ikke skulle interferere med elevenes arbeid med modulene og dermed påvirke datamaterialet. Hensikten med observasjonen var å gjøre oss til kjenne klassen, slik at intervjusituasjonen skulle bli litt tryggere for de av elevene som skulle stille til intervju etter prosjektets slutt. Min fysiske tilstedeværelse i klasserommet ga meg også evnen til å sette datainnsamlingsprosessen i en kontekst – jeg fikk et mer helhetlig bilde av situasjonen, fikk se lærerens rolle under undervisningsperioden og muligheten til å observere hvordan elevene arbeidet med ReleKvant.

### **5.3.2 Intervjuene**

Det ble gjennomført fire semi-strukturerte gruppeintervjuer med elever fra fire

forskjellige klasser, men der intervjuobjektene tilhørende hvert distinkte intervju var fra samme klasse. Det var fire elever som utgjorde intervjuobjektene, der disse elevene hadde arbeidet i par med prosjektets diskusjonsoppgaver.

Det var klassenes faglærere som fikk i oppdrag å plukke ut to elevpar fra sine egne klasser. *Føringene* som ble lagt på faglæreren var at han eller hun ikke skulle velge ut de elevene som nødvendigvis var de sterkeste eller svakeste i faget. Viktigere var det at disse elevene var taleføre og hadde egne oppfatninger om fysikkfaget. Hovedgrunnen til at læreren ble gitt denne føringen var for å hindre at det oppsto et scenario der de faglig sterke elevene kunne ha kommet til å dominere intervjuet og sørget for en skjev ytringsfordeling. Dette scenarioet oppsto ikke i noen av de fire intervjuene som ble gjennomført. Hvert intervju varte i tre kvarter og alle de deltakende elevene ble informert om at intervjuene ville bli anonymisert, at deres ytringer ikke ville ha noen påvirkning på deres karakter i faget og at de hadde, både før og under intervjuet, sin fulle rett til å trekke seg fra samtalen.

Vi (min medstudent og jeg) var enige om at vi skulle benytte oss av semi-strukturert intervju i våre undersøkelser. I følge Jacobsen (2005) er et semi-strukturert intervju en type intervju som er tematisk organisert, uten at alle spørsmålene tilhørende de forskjellige temaene nødvendigvis vil ha lik ordlyd når intervjuet utføres med nye intervjuobjekter.

Vi utarbeidet en intervjuguide med forhåndsbestemt tematikk, men spørsmålene tilhørende denne guiden ble allikevel tilpasset en muntlig setting, hvilket vil si at det ikke forekom ofte at intervju spørsmålene ble presentert for elevene ved direkte avlesning. Dette var for å sørge for at spørsmålene fikk et hverdagslig språk, uten at tekniske og akademiske begreper ble benyttet. Det at en ikke skal benytte seg av tekniske eller akademiske begreper er svært viktig å ha i bakhodet når en utfører intervjuet (Jacobsen, 2005). Det er selvfølgelig ikke mulig å diskutere kvantefysikk uten å dra inn de fysikkfaglige, tekniske begrepene i samtalen, men det er også mulig å begrense og tenke igjennom



bruken av disse begrepene, slik at elevene ikke vil oppfatte intervjuet som en ren, muntlig kunnskapstest.

I følge Jacobsen (2005) bør en alltid starte et intervju med enkle og generelle spørsmål. Dette tok vi til etterretning i våre gruppeintervjuer ved at vi startet hvert intervju med spørsmål som gikk på hvordan elevene hadde trivdes med å arbeide med prosjektet, hvordan det var å lære seg fysikk på denne måten og om prosjektets faglige innhold hadde gitt dem noen aha-opplevelser. Målet var å få til en så myk overgang som overhodet mulig til de fysikkfaglige spørsmålene.

Intervju er en kraftfull metode med et stort potensial for å innhente informasjon om et tema. Fordelen med denne metoden er at den er fleksibel og åpner for bruk av flere sansekanaler, samtidig som intervjuet gir informantene muligheten til å gå dypt inn i det temaet som skal diskuteres (Cohen, Manion & Morrison, 2007). Selv om intervjuet er en kraftfull metode så er det også en utfordrende måte å bedrive informasjonsinnhenting på, som krever mye erfaring og kunnskaper hos intervjueren.

Personlig har jeg ikke mye intervjuerfaring. Jeg forsøkte derfor å utjevne denne manglende erfaringen ved å støtte meg på følgende intervjuråd fra Cohen et al. (2007) under intervjuprosessen:

- Virk interessert
- Ikke ha et avslørende kroppsspråk
- Vær alltid klar til å repetere spørsmål hvis respondenten ønsker dette
- Gi respondenten nok tid til å besvare spørsmålet (ikke avbryt respondenten)
- Gjør det klart for intervjuobjektet at du har oppfattet deres svar korrekt ved å gjenta svaret til respondenten med dine egne ord

I mine øyne er punkt nummer to, som går på kroppsspråket under intervjuprosessen, det viktigste punktet på denne listen av intervjuråd. Elevene skulle i dette intervjuet diskutere et abstrakt og innfløkt tema innen fysikk, hvilket vil si at det forekom at svarene noen av intervjuobjektene produserte

inneholdt faglige misforståelser. Dette måtte ikke påvirke mitt kroppsspråk overhode. Dette handler først og fremst om respekt for elevene som mennesker, som frivillig har sagt ja til å delta på intervjuene og da gjør en viktig innsats for min masteroppgave og resten av ReleKvantprosjektet.

Selv om respekten for elevene uten tvil er den største grunnen for å være klar over kroppsspråket under intervjuet, viser punkt to seg viktig også i en akademisk setting. Meningen med intervjuene var nettopp å undersøke om noen av elevene fortsatt bar på misoppfatninger innenfor bølge-partikkel-dualismen etter at de var ferdig med å jobbe med prosjektet. Hvis mitt kroppsspråk hadde avslørt hvilke svar som var "ufornuftige" kunne dette ha ført til at jeg påvirket informantene til å svare "korrekt", eller at de hadde unnlatt å svare hvis de var usikre, og jeg ville derfor ha negative konsekvenser for datamaterialets validitet. Tanken om at meg som intervjuer påvirker informantene har i litteraturen fått navnet *intervjueffekten* (se for eksempel Jacobsen, 2007). Det er ren utopi å gå rundt med tanken om at denne effekten ikke gjorde seg gjeldende i løpet av mine (våre) elevintervjuer, men min innstilling var hele tiden å gjøre denne effekten så minimal som overhodet mulig. Min oppfatning er at bevissthet rundt eget kroppsspråk under intervjuene spiller en viktig rolle i å minimalisere nettopp denne effekten, samtidig som denne bevisstheten må være på plass for å ivareta den menneskelige respekten for elevene.

Intervjuene vi gjennomførte hadde mange likhetstrekk med det som i forskningslitteraturen blir omtalt som fokusgruppeintervju. Cohen et al. (2007) definerer et fokusgruppeintervju som et intervju foretatt med en gruppe, der forskeren legger føringer for hvilke temaer som skal diskuteres. Styrkene ved å velge en slik intervjuform er at en får hentet inn mye data på kort tid, samtidig som gruppedynamikken kan sørge for at det oppstår diskusjoner mellom informantene. Disse diskusjonene kan føre til at informantene utdyper enda mer om temaet som diskuteres, enn det som hadde vært tilfellet med et en-til-en intervju, men denne interaksjonen mellom informantene kan også føre til at tematisk avsporing. Det er viktig at intervjueren klarer å finne den optimale balansen mellom det å holde intervjuet innenfor temaet som skal diskuteres,

men samtidig la informantene få interagere med hverandre å diskutere seg imellom. En direkte svakhet ved et slik intervju er at enkelte informanter kan dominere gruppen, samtidig som en god gjennomføring og analyse av dets data krever mye av intervjueren (Cohen et al., 2007).

Jeg velger å ikke betegne vårt intervju som et rent fokusgruppeintervju, da vi av og til stilte spørsmål som elevene skulle svare på individuelt (vi lot elevene "ta runden"). Dette ble utført fordi vi ønsket at alle elevene skulle få ytret sin mening, uten at de måtte "sloss" om ordet, samtidig som vi ønsket å se på deres individuelle forståelse av fysikkfaglige begreper. Selv om vi var ute etter dyptgående, faglige diskusjoner mellom elevene, var allikevel hovedtanken bak utvelgelsen av fokusgruppeintervjuet at elevene skulle føle seg tryggere i intervjusituasjonen. Det kan tenkes at elevene hadde følt på ubehaget hvis de individuelt skulle ha blitt intervjuet av to relativt fremmede universitetsstudenter, der tematikken var høyest ikke-triviell.

I arbeidet med å utforme intervjuguiden tok jeg utgangspunkt i elevbesvarelsene fra ReleKvant-modulene. Jeg satt meg også inn i forskningsartikler (kapittel 3) for å få oversikt over hvilke oppfatninger og refleksjoner tidligere forskning har vist at elevene har i forhold til lys og bølge-partikkel-dualismen i kvantefysikk. Intervjuene var min sjanse til å virkelig undersøke elevenes forståelse og oppfatning innenfor disse temaene, etter at de var ferdig med kvantefysikkundervisningen.

## 5.4 Fra datamateriale til resultater

### 5.4.1 Datamaterialet fra ReleKvantprosjektet

Siden datamengden fra ReleKvant var relativt omfattende ble NVivo benyttet som programvare i arbeidet med dette datamaterialet. NVivo er et lisensbasert program for å sortere ustrukturerte, kvalitative data.

Jeg benyttet dette programmet i kodingen av de skriftlige elevsvarene, både på åpningsspørsmålet om lys (se figur 5.1) og et senere spørsmål som gikk på elevenes forståelser av fotonbegrepet, der kodingen besto i å sortere elevsvarene tilhørende de to spørsmålene i kategorier. Jeg benyttet meg av, som nevnt tidligere, deduktiv og induktiv metode i arbeidet med disse kategoriene, da jeg selv har utviklet kategoriene, men påbegynte ikke dette arbeidet med et plettfritt sinn: Disse kategoriene er basert på tidligere didaktisk forskning og fysikkdidaktiske undersøkelser som har tatt for seg elevenes forståelse av lys og bølge-partikkel-dualismen. Mitt arbeid gikk ut på å tilpasse kategoriene fra denne tidligere forskningen, til elevene i min undersøkelse. En slik tilpasning var nødvendig, da elevene jeg arbeidet med hadde andre faglige forutsetninger enn de elevene og studentene som ble beskrevet i tidligere forskningsartikler. Detaljene for denne tilpasningen, kategoriene og spørsmålene tilhørende ReleKvant, som var aktuelle for min oppgave, er lagt til neste kapittel.

Når det gjelder diskusjonsoppgavene tilhørende ReleKvant valgte jeg å gjøre noen grep for å gjøre dialogen mer lesbar, uten at det skulle påvirke det fysikkfaglige innholdet. Dette innebar blant annet at (ekstremt) muntlige uttrykk ble erstattet med dekkende skiftelige ord. I tillegg ble de ytringene i dialogen som inneholdt mye nøling og pauser forkortet, samtidig som gjentakende ord ble fjernet. Et eksempel fra den første diskusjonen, *hva er fotoner*, illustrerer disse endringene.

Name	Sources	References
<input type="radio"/> Lys er EM-bølger (viser kun bølgenatur)	2	7
<input type="radio"/> Lys er partikler (viser kun partikkelnatur)	2	12
<input type="radio"/> Lyset viser både bølge- og partikkel-egenskaper	2	37
<input type="radio"/> Nevner ikke bølge eller partikkel	2	4
<input type="radio"/> Ukritisk dualisme	2	36

**Figur 5.1: Skjermbildet fra NVivo som viser kategorinavnene og hvor mange elevsvar som faller innenfor hver kategori på åpningsspørsmålet om lys. "Sources" gir informasjon om hvor mange dokumenter som det har blitt kodet fra. I mitt tilfelle var det to dokumenter, henholdsvis fra utprøvingene av ReleKvant høsten 2014 og våren 2015.**

Eksempel fra originaltranskriberingen:

nei, nei det spør vi dere om. Eeehm, ja. Ehh, også er det også sånn atte, ..  
ehhh ....

Dette har blitt endret til:

Nei, det spør vi dere [ReleKvant] om. Hm, ja i tillegg er det også slik at....

I tillegg har enkle grammatiske feil blitt rettet, noe som innebærer at ytringen:

*Fotoner er jo da et veldig små udelelige partikler,* har blitt endret til: *Fotoner er jo da veldig små, udelelige partikler.*

I tillegg til at dette grepet forhåpentligvis bidrar til å øke lesbarheten i resultatkapittelet, så var det også et sosialt aspekt som lå til grunn for at jeg valgte å utføre disse endringene. Vårt muntlige språk inneholder svært mange pauser, grammatiske feil i forhold til ordstilling og setningsbygning, som tar seg svært dårlig ut når dette blir transkribert. Endringene ble derfor utført for at elevenes muntlige uttalelser ikke skulle sette dem i et unødvendig dårlig lys. Jeg hadde også disse tankene i bakhodet da jeg transkribere intervjuene.

#### **5.4.2 Datamaterialet fra intervjuene**

Det ble gjennomført fire fokusgruppeintervjuer, hver av de med en lengde på tre kvarter. Vi tok opp samtalen med private mobiltelefoner, noe som fungerte bra. Videre besto jobben i å transkribere alle intervjuene, der vi, min medstudent og jeg, foretok transkriberingen individuelt. Den utfordrende jobben var å plukke ut materiale fra alle intervjuene, uten at resultatpresentasjonen (neste kapittel) skulle ende opp med å bli for omfattende. Dette var enormt utfordrende og krevde en god del planlegging, men jeg føler jeg lykkes med å presentere de diskusjonene fra intervjuet som var best skikket til å besvare mitt forskningsspørsmål.

Jeg har valgt å unngå bruken av pseudonymer i presentasjonen av intervjuene, da jeg ikke så det som et poeng og skille mellom kjønn, men at det heller var et

poeng å sortere elevene etter hvilket år de gjennomførte prosjektet, hvilket forteller hvilken versjon av ReleKvant elevene hadde arbeidet med. Elevene ble derfor tildelt initialene E1, E2..., E16, der de åtte første elevene representerte versjon 2 av ReleKvant og de åtte siste hadde benyttet seg av versjon 3. I neste kapittel vil de utvalgte utdragene fra intervjuene presenteres.

Valget om å fullstendig overlate presentasjonen av de skriftlige oppgavene, med tilhørende kategorier og utdrag fra intervjuene, til det neste kapittelet er praktisk rettet: Med et såpass omfattende datamateriale ville det blitt mye "frem og tilbake" for leseren hvis dette kapittelet hadde tatt mål av seg å nevne samtlige av de aktuelle elevspørsmålene og pardiskusjonene ReleKvant-modulene tilbød elevene. Jeg bestemte meg tidlig for at presentasjonen av disse skulle overlates til denne oppgavens resultatkapittel.

## 5.5 Studien satt i videre sammenheng

### 5.5.1 Utvelgelsen av resultater fra datamaterialet

Jacobsen (2005) meddeler at faren ved å bedrive deduktiv forskning er at forskeren kun leter etter informasjon han eller hun ønsker. Jeg forsøkte å være bevisst på denne faren i arbeidet med denne oppgaven, hvilket betyr at jeg har prøvd å få frem ulike sider ved datamaterialet. Dette innebærer at jeg har vært påpasselig med å ikke kun velge ut elevbesvarelser som harmonerer med det tidligere fysikkdidaktiske undersøkelser har vist vedrørende elevers oppfatninger innenfor lys og bølge-partikkel-dualismen. I tillegg har denne påpasseligheten også ført til en bevissthet rundt utvelgelsen av elevdialoger. Dette betyr at jeg ikke kun har presentert dialoger der elevene oser av kunnskap, men at det også er gjort plass til dialoger der elevene viser tydelig at de arbeider med et vanskelig og innfløkt tema innen fysikk.

Jeg forsøkte å ha Jacobsens (2005) advarsel i bakhodet også da jeg intervjuet elevene, men dette var betydelig vanskeligere. Da jeg gikk gjennom transkriberingen av intervjuene så hendte det seg dessverre at jeg stilte elevene

ledende spørsmål. Allikevel er oppfatningen at min bevissthet rundt faren ved det å bedrive deduktiv forskning førte til en redusering av antall ledende spørsmål under intervjuene.

### 5.5.2 Representerer datamaterialet den jevne fysikkelev i Norge?

Min subjektive påvirkning på utvelgelsen av resultater ovenfor var en form for påvirkning jeg til en viss grad kunne kontrollere, men selve datamaterialet fra ReleKvantprosjektet kan også ha blitt utsatt for påvirkning som kan ha svekket dette datamaterialets *eksterne gyldighet*.

Cohen et al. (2007) skriver at mennesker som vet at de er en del av et forskningsprosjekt gjerne vil vise seg fra sin beste side, da de vet at deres prestasjoner vil bli vurdert og målt. Denne effekten har blitt tildelt navnet *Hawthorneffekten*. Dette kan ha påvirket den eksterne gyldigheten til elevbesvarelsene tilhørende ReleKvantprosjektet: Elevene som har deltatt på prosjektet har jobbet mer grundig med kvantefysikken enn den jevne fysikkelev som følger "vanlig undervisning", da de vet at de er en del av et forskningsprosjekt. Min tolkning er allikevel den eksterne gyldigheten til elevbesvarelsene tilhørende ReleKvant er forholdsvis god. Dette begrunner jeg med følgende:

- Forskning har vist at den gjennomsnittlige norske Fysikk2-elev er en sterk elevgruppe som har skole som en av sine viktigste prioriteter (Angell et al., 2011). Derfor vil disse elevene forsøke å prestere godt, uavhengig om de er en del av et forskningsprosjekt eller ikke.
- Ved at elevene fikk mindre tradisjonelle undervisning da de ble med på dette prosjektet, kan det tenkes at de trengte tid på å tilpasse seg denne måten å lære fysikk på. (Dette kom frem i intervjuer.) Dette kan ha utjevnet det faktum at prosjektets elever kan ha "overprestert", i forhold til andre Fysikk2-elever, under denne perioden.

Når det gjelder intervjuene blir det vanskeligere å diskutere om disse elevene representerer den jevne fysikkelev. Det som styrker disse intervjuenes

overførbarhet er føringen faglærer fikk da hun eller han skulle plukke ut elever til samtale: Elevene skulle ikke være av de sterkeste/svakeste i faget, noe som gjør at disse elevene kan representere den jevne fysikkelev på en forholdsvis god måte. Men, en må selvfølgelig tenke på lærerens påvirkning i denne utvelgesprosessen. Jeg hadde ingen mulighet til å kontrollere at faglæreren fulgte disse føringene da han eller hun plukket ut fire elever til intervju. Intervjueffekten, som ble nevnt i seksjon 5.3.2, kan også føre til at det blir misvisende å sammenlikne disse elevene med en vilkårlig valgt Fysikk2-elev i den norske skolen.

Statistisk sentralbyrå (2011) har i sin rapport undersøkt jenteandelen innenfor Fysikk2 i perioden 2006-2009. Her viser tallene at jentene utgjorde i underkant av 30% av Fysikk2-elevene under hele denne perioden (Statistisk sentralbyrå 2011, s. 13). Denne kjønnsfordelingen gjorde seg også gjeldende i intervjuene: I tre av intervjuene var det tre gutter og ei jente som utgjorde informantene, mens det fjerde intervjuet kunne skilte med en lik kjønnsfordeling. Selv om disse intervjusammensetningene gir et minimalt bidrag til å styrke denne forskningens eksterne gyldighet, så gjenspeiler disse sammensetningen at Fysikk2 fortsatt er et fag med dominerende andel gutter. Jeg har imidlertid valgt å ikke skille mellom kjønnene i denne oppgaven, da dette ikke var relevant for mine forskningsspørsmål.

Hovedgrunnen til at jeg ikke kan påstå at denne undersøkelsen er statistisk representativ er at antall deltagende elever som har levert besvarelser til de utprøvingene jeg var med på (høsten 2014 og våren 2015) utgjør en for liten del av det totale antallet Fysikk2-elever i Norge. Klassene som deltok i ReleKvant var heller ikke geografisk spredt, da samtlige av elevene var hentet fra UiOs samarbeidsskoler.

Basert på argumentene gitt i denne seksjonen vil jeg vil heller si at min studie har en *overføringsverdi*, siden det trolig finnes mange tilsvarende fysikkelever i Norge.



## 5.6 Ethiske aspekter

Jacobsen (2005) beskriver samfunnsvitenskapelige undersøkelser som et "innbrudd" i menneskers liv for å konkretisere viktigheten av etikkens rolle i slike undersøkelser. For det første må en se på de etiske aspektene mellom forsker og de eller den som undersøkes. Dette innebærer, i første rekke, at de som deltar i forskningen må ha gitt informert samtykke til denne deltakelsen (Jacobsen, 2005).

ReleKvantprosjektet hadde ansvaret for at deres samarbeid med prosjektskolene hadde den nødvendige NSD-godkjenningen til å bedrive forskning på elevene som gikk på disse skolene. Vi (min medstudent og jeg) fikk, ved deltakelse i ReleKvant, også klar beskjed om at denne godkjenningen var i orden og at den også dekket våre arbeider innenfor dette prosjektets rammer. Datamaterialet fra ReleKvant skulle anonymiseres og elevene ble informert om at deres holdninger til prosjektet ikke skulle ha konsekvenser for den faglige sluttvurderingen de vil få i faget. Under intervjuene ble det også, som tidligere nevnt, ført krav om at de utvalgte elevene skulle gi informert samtykke om deltakelse, samtidig som de hadde retten til å trekke seg fra samtalen når de måtte ønske.

Ethiske dilemmaer kan også oppstå mellom oppdragsgiver og forsker. Det er særdeles viktig at ikke forskningsresultater skal være påvirket av oppdragsgiverens interesser, som betyr at oppdragsgiverens interesser ikke kan veie tyngre enn kravet om sannferdig fremstilling (Jacobsen, 2005). I mitt masterprosjekt var oppdragsgiveren ReleKvantprosjektet. Jeg vil karakterisere dette forholdet som svært profesjonelt og det holder å nevne at *ingen* av forskerne tilhørende ReleKvantprosjektet har forsøkt å påvirke mitt arbeid med denne oppgaven.

Avslutningsvis må det poengteres at jeg måtte være klar over at det kunne oppstå personlige, etiske konflikter mellom elevene og meg selv da jeg arbeidet med å behandle datamaterialet og omsette dette i resultater. Jeg gikk selvsagt med et ønske, som lektorstudent og fremtidig fysikklærer, at flest mulig av

elevene hadde oppnådd best mulig forståelse i kvantefysikk og at de opplevde å få et godt læringsutbytte av prosjektet. Det var derfor til tider en påkjenning å "dømme" elevbesvarelser som inneholdt en del faglige mangler, da jeg visste at de aller fleste elevene gjorde en helhjertet innsats under dette prosjektet. Innenfor dette arbeidet viste Jacobsens (2005) tanker om sannferdig fremstilling av resultatene særdeles viktige, og min oppfatning er at jeg lyktes med å gi en rettferdig presentasjon og analyse av resultatene.

## 6 Resultater og analyse

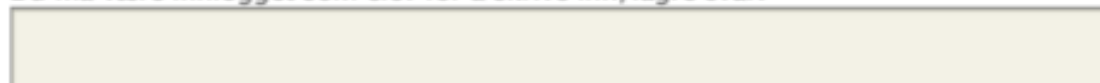
### 6.1 Introduksjon

Resultatene i dette kapitlet vil bli presentert i kronologisk rekkefølge, hvilket vil si at jeg vil ta for meg elevsvarene i den rekkefølgen oppgavene originalt var plassert i ReleKvant. Gruppeintervjuet, som ble utført etter at elevene var ferdige med å jobbe seg gjennom læringsmodulene, er plassert mot slutten av dette kapitlet.

ReleKvant har som målsetting at elevene får utviklet sine kvalitative kunnskaper i kvantefysikk i tråd med læreplanen i Fysikk 2. Prosjektet ønsker å oppnå denne målsettingen ved å tilby elevene et bredt spekter av ulike modaliteter, både hva gjelder arbeidsoppgavene som tilbys elevene og fremstillingen av fagstoffet. Elevenes arbeidsoppgaver besto av skriftlige oppgaver og pardiskusjoner. I de skriftlige oppgavene skulle elevene føre svaret direkte inn i tekstbokser på ReleKvants nettsider (Viten, 2015) (se figur 6.1), mens det skulle gjøres opptak av pardiskusjonene, der disse elevdialogene skulle sendes videre til faglærer.

**Hva menes med at partikler har bølgeegenskaper?**

Du må være innlogget som elev for å skrive inn/lagre svar.

A screenshot of a web application showing a text input field. The field is empty and has a light beige background. The text above the field is in a sans-serif font, and the text below it is in a smaller, lighter font.

**Figur 6.1: Skjerm bilde fra et av ReleKvants skriftlige oppgaver**

Resultatene i dette kapitlet er hentet fra to versjoner av ReleKvant, henholdsvis versjon 2 og 3 fra høsten 2014 og våren 2015. For å beholde kronologien vil versjonsendringene bli kommentert etter hvert som resultatene blir presentert.

ReleKvantprosjektet starter med følgende åpningsspørsmål: *Hva er lys?* Selv om denne skriftlige oppgaven blir introdusert for elevene *før* de blir eksponert for fagstoffet tilhørende ReleKvant så viser resultatene en klar trend:

Prosjektets deltagere, norske Fysikk 2-elever, kvier seg ikke for å ta i bruk kvantefysiske begreper når de skal beskrive lyset.

## 6.2 Elevenes svar på åpningsspørsmålet om lys

Jeg har laget egne kategorier for å sortere de ulike besvarelsene tilhørende åpningsspørsmålet om lys. Disse kategoriene baserer seg på undersøkelsene utført av Ayene et al. (2011) og Olsen (2010), men kategoriene er ikke identiske med deres arbeider, som skyldes følgende:

- Kategoriene i Olsens (2010) undersøkelse ble utviklet for å sortere elevsvar *etter* at elevene var ferdig med undervisningen i kvantefysikk, en undervisningssituasjon som er motsatt av det elevsvarene i ReleKvantprosjektet representerer – dette åpningsspørsmålet blir introdusert for elevene *før* de har startet med kvantefysikk-undervisningen.
- Kategoriene til Ayene et al. (2011) er basert studenter på universitet som har *fullført* et introduksjonskurs i kvantemekanikk og er derfor for tekniske til at disse kategoriene kan benyttes direkte på elevgruppen tilhørende ReleKvantprosjektet.

Jeg har allikevel valgt å basere mine kategorier relativt tett på Olsen (2010) og Ayene et al. (2011) sine undersøkelser, da forskning (kapittel 3) har vist at mange elever og studenter fortsatt bærer på konseptuelle misoppfatninger innenfor kvantefysikk, også etter endt undervisning.

Før jeg starter er det igjen verd å ha i bakhodet at disse elevbesvarelsene ble avlagt i startfasen av ReleKvant. Tar man dette i betraktning så har prosjektets deltagere mye fornuftig å meddele innenfor et svært komplekst tema innenfor fysikk.

### 6.2.1 "Lys er elektromagnetiske bølger"

De elevene som havnet innenfor denne kategorien beskrev lys som et fullstendig bølgefenomen, hvilket vil si at partikkelnaturen ble fullstendig utelatt. Det var 7% av elevene hvis svar befant seg innenfor denne (elektromagnetiske) bølgebeskrivelsen av lyset. Nedenfor følger to eksempler:

Synlig lys er elektromagnetiske bølger med bølgelengde mellom 400-700 nm. Beveger seg i  $3 \cdot 10^8$  m/s og er på mange måter ganske kult.

Lys er elektromagnetisk stråling, med en bølgelengde 400-700 nm. Lys er bølger som ikke trenger noe å bevege seg i. Lys går i lyshastighet som er i  $3 \cdot 10^8$  m/s.

En kan se av begge eksemplene at disse beskrivelsene av lyset er i overenstemmelse med klassisk elektromagnetisme. Besvarelsene nevner det korrekte bølgelengdeintervallet for synlig lys og den numeriske verdien av lyshastigheten (i vakuum), men lysets bølgeegenskaper knyttes ikke til eksperimentelle resultater.

### 6.2.2 "Lys er partikler"

Felles for disse elevsvarene er at lyset blir beskrevet eksklusivt som partikler. Ingen av elevene innenfor denne kategorien nevner at dette er i konflikt med den klassiske bølgebeskrivelsen av lyset ved å henvise til Youngs dobbeltspalteforsøk eller andre egenskaper ved synlig lys som kan hinte om dets bølgenatur. De to første eksemplene illustrerer dette:

Lys er energi, med en hastighet på  $3 \cdot 10^8$  m/s. Lys består av fotoner, men har ingen masse.

Lys er en strøm av udelelige partikler kalt fotoner.

I det første eksempelet ser vi at lyshastigheten igjen blir nevnt, samtidig som denne eleven er klar på at lyset består av fotoner. Han eller hun meddeler også at

fotonet ikke har masse uten å problematisere dette videre, selv om det brukes et "men" foran ytringen. Kan det tenkes at dette er grunnen til at denne eleven ikke ønsker å kalle fotonene for partikler?

I den andre besvarelsen innenfor denne kategorien går prosjektdeltageren motsatt vei. Han eller hun har ingen problemer med å karakterisere partiklene som fotoner, men unnlater å nevne disse partiklenes egenskaper, henholdsvis det at de er masseløse og beveger seg med lysfarten.

Felles for de to besvarelsene ovenfor er at de begge unnlater å ta med at lyset historisk ble sett på som et bølgefænomen. Det er litt merkelig, da (den elektromagnetiske) bølgeteorien for lys er pensum i Fysikk 1. Det var i underkant av 13% av besvarelsene som favoriserte denne "partikkelteorien" for lyset.

I det siste eksempelet innenfor partikkelkategorien nevner eleven at det samtidig eksisterer en bølgeteori for lyset signert Maxwell, men han eller hun gjør ikke noe forsøk på å sette disse teoriene opp mot hverandre:

Lys er fotoner. De har en fart, men ikke en masse. Dette er litt rart, men vi kan også se på dem som energi. Fordi de ikke har masse defineres ikke deres energi av hvor mange du sender, men i hvor stor frekvens du sender dem. Dette var det Einstein som var først ute med å hevde. Nemlig at:  $E=hf$ . Da mange støttet Maxwells teorier om at bølger var lys ble dette sterkt kritisert, men de ble senere nødt til å godta det da de så at det stemte. (...).

Her har eleven stiftet bekjentskap med Einsteins kvantehypotese for lyset. Hun eller han nevner også at energien til lyset er frekvensavhengig, i tillegg til å nevne at fotonene er masseløse. Denne eleven har også fått med seg den historiske biten med at Einstein ble kritisert for sin hypotese. Han eller hun påpeker også at noe er "rart" at disse masseløse partiklene har energi og at denne er gitt ved  $E = hf$ , men han eller hun forsøker ikke å forklare denne

sammenhengen ved å dra inn elementer fra fotoelektrisk effekt. Siden eleven ikke nevner Youngs dobbeltspalteforsøk eller fotoelektrisk effekt direkte blir det vanskelig å tolke besvarelsen, men for meg kan det kan virke som at denne eleven mener at lysets bølgenatur "hører historien til", hvilket vil si at eksempelvis resultatet fra dobbeltspalteforsøket ikke lenger er gyldig, siden Einstein mente at lys var partikler – det eksperimentelle resultatet fra forsøket om fotoelektrisk effekt er "mer verdt" enn resultatet fra dobbeltspalteforsøket. Det er mulig denne tolkningen er noe dramatisk, men for meg så virker det som eleven forsøker å formilde denne tanken.

### 6.2.3 "Ukritisk dualisme"

Fellesnevneren for disse besvarelsene, som har en svarandel på nesten 40%, er at elevene viser et ukritisk syn på dualisme. Dette kan eksempelvis bety at de oversetter de kvantemekaniske bølgeegenskapene direkte til klassisk bølgebevegelse. I denne kategorien nevner også elevene begreper som er motsigende i klassisk fysikk i samme åndedrag. Et eksempel er at partikler og bølgelengde benyttes om hverandre for å beskrive et fenomen, uten å redegjøre for denne begrepsblandingen ved å henvise til tolkning av kvantemekanikken. Dette illustreres best ved å betrakte noen utvalgte elevsvar med påfølgende kommentarer:

Lys er fotoner som blir skutt ut fra atomer når de lades med energi, dette skjer med at elektronene rundt atom-kjernen blir tilsatt energi, hopper utover i skallene, og når de hopper tilbake på plass blir denne ekstra energien sendt ut i form av ett foton. Hvis dette fotonet har bølgelengde mellom  $10^{-6}\text{m}$  og  $10^{-7}\text{m}$  er det innenfor vårt farge spekter og vi kan se det. Lys er altså bølger.

I starten av denne besvarelsen blir det påpekt at lys er fotoner, mens det avslutningsvis blir konkludert med at lys er bølger. Denne eleven har tydeligvis blitt eksponert for Bohr-modellen, da han eller hun bruker denne modellen til å forklare hvordan fotoner oppstår og hva slags tilknytning disse partiklene har til

energibegrepet. Fotonet blir (ukritisk) tildelt en bølgelengde, og det er dette som leder eleven til å konkludere med at lys er bølger.

Lys er fotoner som blir kalt lyskvanter. De beveger seg i bølger, og fargen på lyset blir bestemt etter hvor stor bølgelengden er, hvor stor lambda er. Jo mer energi som blir overført til lyset, jo kortere blir bølgelengden (...).

Denne besvarelsen er full av gode poeng. Her nevner eleven at lys er fotoner samtidig som det påpekes at energien til lyset er omvendt proporsjonal med bølgelengden. Her er det trolig at eleven kjenner til relasjonen  $E = hf = hc/\lambda$ , uten at denne blir nevnt eksplisitt. Kan det tenkes at den noe kronglete forklaringen på at energien er invers proporsjonal med bølgelengden er et hint om at eleven ikke har så stor trening i å uttrykke seg skriftlig i faget?

Det er oppfatningen om at fotonene beveger seg i bølger som gjør at denne besvarelsen får merkelappen "ukritisk dualisme" – her oversettes bølgeegenskaper direkte med det å bevege seg i bølger. Dette er et bilde som går igjen i flere av besvarelsene innenfor denne kategorien.

#### **6.2.4 "Lys viser både bølge- og partikkelegenskaper"**

Denne kategorien er, i likhet med den forrige, relativt bred. Det ene ytterpunktet er representert ved elevsvar på én setning som nøyer seg med å meddele at lys består av fotoner, der disse partiklene sies å ha både bølge- og partikkelegenskaper.

Besvarelser tilhørende det andre ytterpunktet er rike på detaljer og refleksjoner. Her nevnes eksperimentelle kjensgjerninger som støtter de ulike egenskapene ved lyset. Videre er dette plassert i en historisk setting i tillegg til at elevene nevner hovedresultatene fra eksperimentene og bruker dette til å argumentere for henholdsvis partikkel- og bølge teorien for lyset. Det var i underkant av 40% av elevsvarene som havnet innenfor denne kategorien. Et eksempel på et slikt svar er :



Lys er fotoner med både partikkel- og bølgeegenskaper.

Denne besvarelsen er kort og konsis og eleven unngår slurvete språkbruk ved å i stedet meddele at fotoner har både partikkel- og bølgeegenskaper, i motsetning til det å eksempelvis skrive at fotoner både er bølger og partikler. Elevens svar er meget fornuftig i den forstand, men det er vanskelig å konkludere om dette er prosjektdeltagerens egentlige mening, eller om det er memorert fra en lærebok i fysikk. Denne problemstillingen kommer vi tilbake til når vi skal ta for oss resultatene fra gruppeintervjuene som ble utført etter at elevene var ferdige med prosjektet. Eksempler på elevsvar i det andre ytterpunktet er følgende:

Lys beskrives ved hjelp av to teorier: bølgeteorien og kvanteteorien. I bølgeteorien beskrives lys som bølger som beveger seg med lyshastigheten gjennom rommet. Derimot har forsøk (fotoelektrisk effekt) vist at lys også må bestå av små partikler - fotoner. Dette er kvanteteorien, hvor lys beskrives som energipakker, kalt fotoner. Forsøket som blant annet beviste dette var et forsøk gjort med fotoelektrisk effekt. Når lys sendes mot en metallplate, vil elektroner sparkes løs. Man skulle tro at antallet elektroner som sparkes løs, er avhengig av amplituden på lysbølgene. Derimot så man at det var avhengig av frekvensen på lyset. Da kunne man tenke seg at lys var fotoner, hvor fotonene fikk høyere energi med høyere frekvens ( $E=h \cdot f$ ).

Lys er et fenomen som kan beskrives gjennom bølger eller kvanteteorien. Grunnen til at man kan beskrive lys gjennom bølger er fordi man sendte lys gjennom to spalter i samme fase og det oppsto et interferens mønster. Lys kan også beskrives som små, udelelige energi pakker, altså fotoner. (...).

Disse to besvarelsene viser at elevene er orientert om hvilke eksperimenter som får frem lysets dualistiske natur, ved at de nevner fotoelektrisk effekt og dobbeltspalteforsøket og bruker de tilhørende resultatene fra disse forsøkene til

å argumentere for lysets partikkel- og bølgeegenskaper. Det er allikevel, som forventet, noen mangler ved besvarelsene. Det virker som disse elevene mener at kvantefysikken kun kan beskrive forsøk der lyset viser partikkelegenskaper, og at man må *forlate* kvantefysikken og bevege seg *tilbake* til Maxwells bølge teori når man skal beskrive lysets bølgenatur. Hvis man setter det litt på spissen: Elevsvarene forteller at kvanteteorien ikke tar mål av seg å forklare Youngs dobbeltspalteforsøk, men fungerer utmerket til å forklare fotoelektrisk effekt. Dette bryter med prinsippet om at kvantefysikken skal være en generalisering av klassisk fysikk. Dette kommer spesielt godt frem i starten av begge eksempelbesvarelser hvor det blir meddelt at lys kan beskrives ved hjelp av to teorier, ved bølge teorien *eller* kvanteteorien.

Svarene elevene avla på introduksjonsspørsmålet om lys viste at mange av elevene er komfortable med til å utrykke seg skriftlig i fysikk, men hvordan står det til med deres muntlig kompetanse? Denne kompetansen ble vektlagt øyeblikkelig etter åpningsspørsmålet, da i form av en muntlig diskusjonsoppgave. Her skulle elevene gå sammen i par og diskutere det de hadde skrevet på åpningsoppgaven. Dessverre var det en del elever som lot være å gjøre opptak av denne samtalen, men jeg skal allikevel plukke ut noen utvalgte elevdialoger og kommentere disse underveis.

### 6.3 Muntlig diskusjon i par

Skjerm bilde med påfølgende oppgavetekst er gitt i figur 6.2. Det er verdt å kommentere at elevene også møtte denne dialogoppgaven før de var presentert for fagstoffet i ReleKvant. Interessant er det også å meddele at elevene i denne oppgaven blir det direkte oppfordret til å involvere fotoner i diskusjonen.

I den første dialogen vi skal ta for oss starter elevpart med å (ukritisk) hoppe frem og tilbake mellom bølger og partikler i beskrivelsen av lyset:

-Du, hva er egentlig fotoner og lys?

-Ja, lys er jo da...

-Det er en elektromagnetiske bølge, er det ikke? Som da sendes ut fra et glødende legeme.

-Ja.

-Ja?

-Lys er rett og slett en strøm av fotoner da.

-Ja, det kan man si.

-Fotoner er jo da en...

-Også har vi jo...

-Fotoner er jo da veldig små udelelige partikler.



**Figur 6.2: Skjerm bilde tilhørende den første diskusjonsoppgaven fra ReleKvantprosjektet**

Dialogen starter altså med at elevene er samstemte om at lys er elektromagnetiske bølger, men plutselig hersker det enighet om at lys kan forstås som en strøm av fotoner. Videre i dialogen dras det elektromagnetiske

spekteret inn og elevene nevner det omtrentlige bølgelengdeintervallet for synlig lys, i tillegg til radiobølger etc.:

-Ja, ikke sant. Også er det jo også sånn at det er ikke alt lys vi mennesker kan se når vi bruker våre respektive øyne. Og dere kan da se det har da en bølgelengde mellom 400 til 800 nanometer, er det riktig?

-Ja det stemmer, det er det spekteret vi kan se.

-Ja, ikke sant. Også er det også masse utenfor dette da som er da for eksempel gammastråling og radiobølger og sånne ting, ikke sant. Hm.... Ja, har vi noe mer å si da egentlig?

-Da har vi oppsummert ganske greit.

-Vær så god, takk for oss

-Eller du, vent litt.

-Vi er ikke ferdige ennå (latter).

-Lys har jo også da en konstant fart og denne er jo da på, ja, hvor mye er den på da?

-3,0...

-3,0 ganger ti opphøyd i åttende.

-Åttende meter per sekund og dette er jo da, dette gjelder da alle lys også.

En ser at elevparet også nevner lysfarten og oppgir dens numeriske verdi, men det virkelig spennende skjer på slutten av dialogen. Her dras lysets bølgenatur inn og elevene blir nokså usikre:

-Men..., opptrer egentlig lys som bølger?

-Hm, jeg... det gjør det det jo? Det gjør det.

-For det er en differensmønster er det ikke det da?

-Jo det gjør jo det hvis du har to ulike lys.... Herregud.

-Jeg vet ikke. .... Det er ikke lett å si

Nei, det spør vi dere [ReleKvantprosjektet] om. Hm, ja også er det slik at....

-Ja.

-Lys opptrer altså som bølger.

Den rådende oppfatningen hos disse to elevene ser derfor ut til å være at lys består av en strøm av fotoner, men opptrer som bølger. Elevene velger å ikke problematisere dette videre.

I den neste eksempeldialogen hopper igjen elevene over fra elektromagnetiske bølger til fotoner, med den forskjellen at det kan virkes som disse elevene mener at fotonet er et *synonym* til elektromagnetiske bølger:

-Hva tenker du er lys?

-Hm, lys er elektromagnetiske bølger.

-Ja.

-Hm, man kan også kalle de for fotoner?

-Fotoner ja, ja hva tenker du om fotoner?

-Hm, hvordan skal jeg si..., slik de forklarer på barneskolen da så, nei ungdomsskolen så er det energipakker eller hva jeg skal kalle det.

Fotonet blir forstått som energipakker, samtidig som det også, nokså ukritisk, blir tildelt bølgelengde og frekvens. Videre nevner også dette elevparet lysfarten med tilhørende numerisk verdi og det omtrentlige spekteret for synlig lys.

-Ja

-Det er på en måte ...(sier noe uklart, mumler) som har en viss energi. Hm, høy frekvens og den har mye energi, så.. jo mindre bølgelengde jo høyere energi.

-Ja.

-Og, hm, lys er vel på spekteret med bølgelengder mellom 400 og 800 nanometer, er det ikke sånn?

-Ja, noe sånt. Og lys beveger seg i tre ganger ti i åttende meter per sekund.

-Ja.

-Og er ganske kult.

-Ja, lys er en hastighet og den er konstant.

-Ja.

-Hm, ja.

-Så det er lys.

En mulig tolkning av elevenes uttalelser er at de mener at lys er elektromagnetiske bølger, der disse bølgene "kan kalles fotoner". Når fotonene blir direkte forstått som elektromagnetiske bølger vil det heller ikke oppstå et paradoks når en tildeler disse partiklene bølgeegenskaper i form av frekvens og bølgelengde.

En del av elevene leste dessverre rett av fra sine besvarelser for hverandre, uten at de det ble foretatt en videre diskusjon. Disse "dialogene" ble derfor ikke fullt så interessante å undersøke nærmere og tas derfor ikke med i denne seksjonen. Det skal allikevel nevnes at mange av elevene hadde lange og utfyllende samtaler uten at det foregikk avlesning, noe vi så eksempler på fra de to dialogene over. Avslutningsvis gjøres det plass til inkluderingen av to interessante utdrag fra noen av de resterende dialogene. Disse dialogene er interessante fordi hver av dialogene utdyper en svært forskjellig forståelse av fotonet. I det første utdraget vi skal ta for oss er elevene enige om at fotonet "går i bølger":

-Jeg har skrevet at lys er fotoner (...). Hva har du svart?

-Ja, hm, lys er fotoner som er pakke med energi hm, fotoner har ingen masse..., mens lys går i bølger og bølgelengdene påvirker egenskapene til lyset.

-Ja, der fikk du med en bølgelengde, det er bra.

-Ja.

-Men, da er vi jo egentlig ganske enige da.

Elevene nevner ikke elektromagnetiske bølger i denne dialogen, samtidig som de ikke går videre inn på hvilke egenskaper bølgelengden til "fotonets bølgebevegelse" er med på å påvirke.

I det andre og siste dialogutdraget vi skal se på viser elevene svært god forståelse og refleksjonsevne innenfor lys og bølge-partikkel-dualismen. Her har trolig den ene eleven satt seg godt inn i dobbeltspalteforsøket både for lys og elektroner. Resultatet fra dette forsøket brukes aktivt i samtalen.

-(...). Men, hva er fotoner da?

-Fotoner er en måte å pakke ned energi som oppfører seg som både bølger og partikler fordi den får et interferensmønster hvis man, hm, tar det gjennom to spalteåpninger.

-Ja, sånn.

-Så da kan det ikke være partikler for det ville bare laget to sånne streker.

Her bruker elevene dobbeltspalteforsøket utført med lys til å forklare at fotoner oppfører seg som bølger. Det spennende er at den ene eleven da konkluderer med at fotonet *ikke* kan være partikler, men hva blir så ytret om elektronet?

-Er, er elektroner bølger?

-Nei.

-Fordi hvis du skyter to elektroner mot en spalteåpning, ville det dannet et interferensmønster da?

-Ja.

(begge ler)

-Ja, er ikke elektroner da bølger? (spør retorisk med latter i stemmen)

(begge ler)

-Hm...

-Ja det er sant da.

-Ok, så elektroner er bølger.

-Ja, ikke spør meg, jeg vet ikke.

-Du sa det nettopp.

-Jeg tror det er begge deler, er det ikke det da?

-Jo, det blir vel noe i den duren. Men hvis man skyter klinkekuler, da, klinkekuler er ikke bølger?

-Nei, det er ikke bølger.

(...).

Det er et imponerende faglig nivå på denne elevdialogen. I løpet av dette lille utdraget har elevene argumentert for at fotoner og elektroner viser bølgeegenskaper, der denne argumentasjonen er støttet oppunder av de eksperimentelle resultatene fra dobbeltspalteforsøket. Elevene viser også evnen å sette denne bølgeegenskapen inn i en makroskopisk setting ved at de er klar på at klinkekuler slettes ikke kan "være bølger".

#### 6.4 Er lys både bølge og partikkel?

Datamaterialet som følger i denne seksjonen er eksklusivt versjon 3 av ReleKvant. Skifte av versjon mellom høst (versjon 2) og vår (versjon 3) har ikke hatt noen påvirkning på åpningsspørsmålet om lys eller den etterfølgende diskusjonen om lys og fotoner (seksjon 6.2 og 6.3), da begge aktivitetene ble presentert for elevene før de fikk anledning til å sette seg inn i fagstoffet tilhørende ReleKvant.

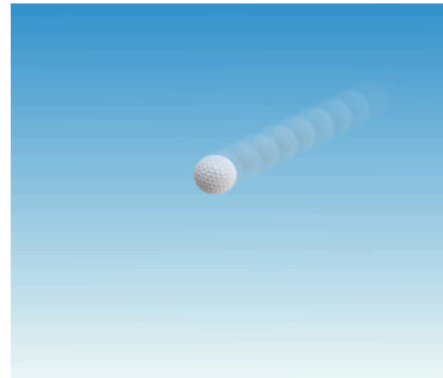
Den første endringen ble iverksatt som en mer eller mindre direkte følge av at mange av elevbesvarelsene fra tidligere versjoner av prosjektet (versjon 1 og 2), som gikk på lys og bølge-partikkel-dualisme, hadde én ting til felles: Elevene oppfattet ikke det å beskrive partikler med bølgeterminologi som et paradoks. For å få elevene til å grundigere tenke gjennom de fysiske forskjellene mellom bølger og partikler ble en diskusjonsoppgave om temaet utarbeidet til versjon 3 av ReleKvant (se figur 7).



### Både bølge og partikkel?



En bølge er en bevegelse som forplanter seg. En bølge har alltid utstrekning; den kan ikke være bare på et punkt.



En partikkel er et legeme som er avgrenset til et lite område i rommet.

### Diskusjon 2

Diskuter med en annen elev: Går det an å tenke seg at lys er både bølge og partikkel?



**Figur 6.3: Skjermbilde fra diskusjonsoppgaven, eksklusiv for versjon 3 av ReleKvant**

Dessverre forekom det på ny at en del av elevene ikke tok opp samtalen, men noen opptak ble sendt inn og jeg skal nå ta for meg ett av dem. Diskusjons-spørsmålet var som følger: *Går det an å tenke seg at lys er både bølge og partikkel?* I denne utvalgte dialogen viser begge elevene en imponerende evne til å reflektere over lys og bølge-partikkel-dualismen.

Dialogen starter med at den ene eleven nevner lysets bølge- og partikkelnatur, i tillegg til at han eller hun nevner at lys ikke har masse, men bølgelengde og frekvens. Den andre eleven reagerer øyeblikkelig på dette utsagnet:

- Jeg skrev at lys kan (...) bølgenatur og partikkelnatur og lys har ikke masse, men bølgelengde og frekvens.
- Bølgelengde og frekvens? Men hvis de oppfører seg som fotoner som er partiklene så er det vel ikke bølgelengde og frekvens som partikler?
- Nei.
- Nei. Da ville det bare være bølgenatur, da.

Den andre eleven utdyper at bølgelengde og frekvens er begreper som bryter med fotonets partikkelnatur. Videre mener han eller hun at hvis en beskriver fotonet på denne måten, så retter man kun fokus på fotonets bølgenatur. Det er da den første eleven påstår at fotonet kan opptre som begge deler, selv om det er paradoksalt:

- Ja, de har vel ikke bølgenatur heller hvis man ser på det som fotoner. Det er det som problemet da, er det ikke? At det kan oppføre seg fint som begge deler. Og begge deler er gyldig, mens begge deler også motsier seg selv liksom, det er paradoksalt.
- Det kan være begge deler.
- Ja.
- Men jeg vet ikke om det liksom har funnet ut om det er det samme, lys på samme tid på en måte. Det...

Videre i dialogen blir det ytret at (synlig) lys enten er elektromagnetiske bølger tilhørende det synlige delen av det elektromagnetiske spekteret, eller at det kan forstås som fotoner med kvantisert energi:

- Jeg skrev at det er energi jeg, i form av enten elektromagnetiske bølger i et lysspekter. Lys er jo bare det synlige spekteret. Og/eller fotoner med en viss kvantifisert [kvantisert] energi, for det kommer jo alltid så-så mye, eller så-så mye som matcher til en frekvens/bølgelengde. Det var det jeg skrev. Men, jeg vet ikke...
- Jeg tror det er ganske....
- Men jeg vet ikke hvor riktig det er fordi, som sagt, det er... det eneste jeg har hørt om det er at det er fryktelig paradoksalt hele greia. At lys ikke... Men som du skrev, selv om (...) at fotoner er en partikkel, men den partikkelen har ikke masse.
- (...)

En mulig tolkning er at den ene eleven forsøker å forene de to modellene (bølge og partikkel) ved å påpeke at fotonene kommer med en viss frekvens for å

”matche” bølgelengden til lyset. Denne tanken sår eleven selv tvil om og konkluderer med at bølge-partikkel-dualismen for lys er et særdeles paradoksalt begrep.

### 6.5 Skriftlig svar på oppgave om fotoner

Den neste oppgaven elevene skulle svare på hadde igjen fotoner som tema, og ble presentert for elevene da de var i ferd med å avslutte modulen om fotoelektrisk effekt. I denne delen av prosjektet blir lysets partikkelegenskaper presentert for elevene og spørsmålet gikk derfor direkte på fotonbegrepet. Spørsmålet lød som følger: *Hva vet du nå om fotoner?* Det må nevnes at elevene fikk hint om å bruke følgende begreper i denne oppgaven: Masse, energi, pardanning, annihilering, bevegelsesmengde, comptonspredning, bølger og partikler.

Jeg har konstruert to kategorier for å plassere disse elevsvarene. Disse kategoriene korresponderer med to av kategoriene i seksjon 6.2, som ble utarbeidet da elevene skulle svare på åpningsspørsmålet om lys (se tabell 6.1).

Lys	Fotoner
”Ukritisk dualisme”	”Upresis dualisme”
” Lys viser både bølge- og partikkelegenskaper ”	”Fotonet viser både bølge- og partikkel-egenskaper”

**Tabell 6.1: Det er korrespondanse mellom kategoriene for lys og fotoner.**

Sammenhengen mellom kategoriene for lys og fotoner er at de begge skal plassere elevsvarene etter måten elevene evner å tolke og beskrive bølge-partikkel-dualismen på. Vi vil her forvente faglige bedre svar siden elevene nå har fått arbeide med fagstoffet, noe de ikke hadde fått muligheten til da de skulle besvare åpningsspørsmålet om lys. Allikevel har kategorien ”Fotoner viser både bølge- og partikkelegenskaper” *ikke* blitt tildelt navnet ”Fotonet viser bølge-partikkel-dualisme”: Selv om jeg her forventer en bedre faglig kvalitet på elevsvarene, som følge av at elevene har blitt eksponert for fagstoffet tilhørende

Relevante, så har de enda ikke kommet langt nok i prosjektet til at de for alvor kan tolke denne dualismen i lys av kvantemekanikken. Når det gjelder elevsvarene tilhørende kategorien "upresis dualisme" og dens korresponderende kategori "ukritisk dualisme", vil elevsvarene tilhørende den førstnevnte kategorien også i gjennomsnitt ha en høyere faglig kvalitet over seg.

### 6.5.1 "Upresis dualisme"

De besvarelsene som havner innenfor denne kategorien bærer preg av en noe upresis språkbruk, hvilket eksempelvis vil si at elevene ikke henviser til eksperimentelle resultater når de argumenterer for fotonets bølge- og partikkelnatur. Et annet kjennetegn på elevsvar tilhørende denne kategorien er at innenfor denne dualismen blir fotonet sett på som en fysisk bølge og en (klassisk) partikkel man kan tilegne posisjonskoordinater – dualismen innebærer at fotonet skifter mellom å være en fysisk bølge og en punktpartikkel. Denne kategorien er, på mange måter, en strengere versjon av den gamle kategorien "ukritisk dualisme".

I eksempelet nedenfor viser eleven kunnskaper om comptonspredning, samtidig som han eller hun nevner at bevegelsesmengden er bevart i prosesser der elementærpartikler er involvert. Han eller hun nevner også at fotonet er masseløst:

Fotoner har ikke masse, har masse energi, bare et foton kan påvirke et elektron, når et elektron og et positron møtes, annihilerer de hverandre. I comptonspredning skjer det et støt mellom et foton og et elektron, med bevegelsesmengde bevart. Fotoner er bølger i klassisk fysikk, og er partikler i [kvante-] fysikk.

Det som gjør at denne besvarelsen havner innenfor kategorien "upresis dualisme" er elevenes tanker om at fotoner er bølger i klassisk fysikk og partikler i kvantefysikk. Denne ideen bryter med prinsippet om at kvantefysikk skal være en generalisering av den klassiske fysikken. Denne tolkningen, at fotoner er

bølger i klassisk fysikk og partikler i kvantefysikk, har mange likhetstrekk med to av elevbetsvarelsene som havnet innenfor den "mest riktige" kategorien "lys viser både bølge- og partikkel-egenskaper" (6.2.4), der det ble meddelt at klassisk elektromagnetisme beskriver lys som bølger, mens kvantefysikken beskriver lys som partikler. Plasseringen av denne elevbetsvarelsen er en bekreftelse på at de to kategoriene i dette kapittelet krever betsvarelses av høyere faglig kvalitet enn de korresponderende kategoriene fra åpningsspørsmålet om lys.

I eksempelet over plasserer også eleven fotonet innenfor klassisk fysikk<sup>9</sup>. Dette tyder på at han eller hun ikke har fått med seg at fotonet ikke kan beskrives med den klassiske fysikken. I denne klassiske beskrivelsen av fotonet blir denne partikkelen beskrevet som fysiske bølger. Dette kan vitne om at denne eleven ser på fotonet som et *synonym* til elektromagnetiske bølger. Eleven nevner heller ikke eksperimentelle resultater for å henholdsvis forklare at fotoner er bølger i en gren av fysikken, mens de er partikler i en annen.

Et annet eksempel på elevsvar med noen av disse elementene er:

Fotoner er partikler, til tross for at de også er elektromagnetiske bølger. Et elektron og et positron som kolliderer overfører dermed bevegelsesmengde og masse kan dermed også gå over til energi. Vi sitter igjen med to fotoner.

Denne eleven viser god kunnskap om vekselvirkninger mellom elementærpartikler, men også her blir fotonet oppfattet som fysiske bølger, samtidig som eleven ikke gjør noe forsøk å koble disse påstandene opp mot eksperimentelle resultater. Det var omtrent 25% av elevbetsvarelsene som fikk merkelappen *upresis dualisme*.

---

<sup>9</sup> Det er feil å plassere fotonet innenfor den klassiske fysikken når en unnlater å ta med dets statistiske tolkning i (eksempelvis) dobbeltspalteeksperimentet. Jeg kommer tilbake til dette i diskusjonsdelen.

### 6.5.2 "Fotonet viser både bølge- og partikkelegenskaper"

Elever som havner innenfor denne kategorien viser gode fagkunnskaper om fotonets bølge-partikkel-dualisme, relativt til Cheong og Songs (2013) forståelsesnivå, *the first level meaning of duality* (seksjon 3.4), som i korte trekk gikk ut på at elevene makter å argumentere for bølge-partikkel-dualismen ved å henvise til eksperimentelle resultater (for eksempel dobbeltspalteeksperimentet og fotoelektrisk effekt), samtidig som de har oversikt over de viktigste formlene. Denne formeloversikten innebærer (for fotoelektrisk effekt) at elevene kjenner til formelen for denne partikkelens energi, bevegelsesmengde og sammenhengen mellom disse størrelsene. Det var omtrent halvparten av besvarelsene som havnet innunder denne kategorien.

Hvis man skal ta seg til å pirke på noe ved disse besvarelsene, så kan en kommentere at elevene ikke alltid makter å benytte seg av fysikkfaglig terminologi i besvarelsen gjennom, i tillegg til at elevene mangler bakgrunnskunnskap om de aktuelle formlene. Den sistnevnte kommentaren, det at elevene mangler bakgrunnskunnskap om formlene, er ikke et krav fra læreplanens side, men min tolkning er at dette kan vise seg uheldig for forståelsen av fotonet. Jeg vil ta opp diskusjonen om hvorvidt elevene skal ha bakgrunnskunnskap om de sentrale formlene i kvantefysikk i denne oppgavens diskusjonsdel.

I det første eksempelet vi skal ta for oss ser vi at eleven har god kunnskap om formelapparatet tilhørende fotonet, men han eller hun makter ikke å forklare, på en presis måte, at formelen som viser sammenhengen mellom fotonets energi og bevegelsesmengde er hentet fra spesiell relativitetsteori.

Et foton er elementær partikkelen til lys. Energien oppgis ved  $E = hf$ . Fotonene har ingen masse, og derfor kan man ikke bruke vanlig ligning for å regne ut bevegelsesmengde, men heller  $p = E/c$ . Fotoner er partikler, men kan også oppføre seg som bølger. Dette ser vi av dobbeltspalteforsøket, ved at det dannes interferensmønster (...).

Her er eleven klar på at fotoner er partikler, samtidig som de også viser bølgeegenskaper og prosjektdeltakeren bruker sine kunnskaper om dobbeltspalteforsøket til å argumentere for denne bølgeoppførselen. Dialogen ble avsluttet av en lang og faglig god diskusjon omhandlende vekselvirkningene mellom elementærpartikler, men dette er ikke tatt med her. Eleven glemmer imidlertid å ta med forsøk som viser at fotonet viser partikkelegenskaper, selv om han eller hun nevner at fotoner er partikler.

I det neste sitatet som følger nevner eleven de viktigste eksperimentene som forklarer at fotonet har henholdsvis bølge- og partikkel-egenskaper. I denne besvarelsen nevnes det også at fotonet har bevegelsesmengde til tross for at det er masseløst, selv om eleven feilaktig mener at denne formelen ikke kan utledes fra spesiell relativitetsteori. I starten av denne besvarelsen gir eleven en detaljert beskrivelse av vekselvirkningen mellom elementærpartikler, men dette er utelatt i denne gjengivelsen.

(...). Man kan ikke finne bevegelsesmengden til fotoner ved å bruke klassisk eller relativistisk bevegelsesmengdelikninger, fordi fotonene er masseløse. Man må bruke  $E/c = h/\lambda$ . Comptonspredning beviser at fotoner har bevegelsesmengde. Fotoner kan ha bølgeegenskaper (interferensmønster) eller partikkelegenskaper (fotoelektrisk effekt og comptonspredning).

### 6.5.3 Kategoriløse elevsvar

Noen av besvarelsene hørte ikke hjemme i de to kategoriene. Fellesnevneren for disse elevsvarene er at fotonets bølge- og partikkelnatur ikke blir nevnt overhodet. Nedenfor følger to eksempler på slike besvarelser:

Fotoner er masseløse, og det er derfor de kan reise med lysets hastighet uten at de har uendelig energi.

Fotoner har energi. Fotoner har ikke masse. De har likevel bevegelsesmengde, av en rar årsak vi ikke forstår. Den er definert ved:  $p = E/c$  (...).

Selv om de to sistnevnte elevbesvarelsene nevner viktige egenskaper ved fotonet, så er ikke disse elevsvarene interessante i forhold til min problemstilling.

### 6.6 Elevenes refleksjoner om dobbeltspalteforsøket

I versjon 3 av ReleKvantprosjektet får elevene sjansen til å kommentere deres utbytte av filmen "Dr. Quantum explains double slit experiment" (Se figur 8) og nevne det de synes var det viktigste fysikkfaglige innholdet i denne filmen. Filmen tar for seg dobbeltspalteforsøket med klinkekuler, vannbølger og elektroner. Den starter med å vise forskjellen på hvordan vannbølger og makroskopiske objekter (klinkekulene) oppfører seg under et dobbeltspalteforsøk. Videre tar videoen elevene med inn i kvanteverdenen og gjennomfører dobbeltspalteeksperimentet med elektroner. Her får elevene se at elektroner danner et interferensmønster – elektronets bølgenatur presenteres for elevene. Mot slutten gjennomføres eksperimentet på ny, men denne gang blir elektronet observert idet det passerer gjennom dobbeltspalten. Resultatet blir da at interferensmønsteret blir ødelagt, som følge av at en foretar seg en måling av partikkelen i forsøket på å bestemme hvilken spalte elektronet går gjennom – partikkelen går over til "klassisk oppførsel". Videoen ble vist i begge versjoner av ReleKvant (2 og 3), men den skriftlige oppgaven tilhørende denne filmen er eksklusiv den siste versjonen av prosjektet.

Det var svært interessant lesing å gå gjennom elevbesvarelsene tilhørende denne skriveoppgaven. Nedenfor følger noen elevsitater:

I filmen så viser det seg at elektroner har partikkelegenskaper, men også [at de] har bølgeegenskaper.





### Oppgave 13

Hva synes du er det viktigste fysikkfaglige innholdet i denne filmen? Hvis det er noe du synes var overraskende, eller du lurer på noe, skriv gjerne litt om det.

Du må være innlogget som elev for å skrive inn svar.

**Figur 6.4: Oppgave til elevene etter film om dobbeltspalteforsøket**

Kommentaren over viser at denne eleven, med en kort og konsis besvarelse, har fått med seg et viktig fysikkfaglig poeng i filmen. I den neste besvarelsen kommenteres det også at filmen var morsom og pedagogisk, i tillegg til at slike mystiske saker innen moderne fysikk har en positiv effekt for læringsmotivasjonen i faget:

At elektroner oppførte seg som bølger i et interferensmønster. Morsom med barnestemme. Og enkelt forklart. Det var et veldig interessant tema som den tok opp, og masse mystiske ting som får opp lærelysten (...).

En kan se av elevsitatene ovenfor at dette var en film som engasjerte, i tillegg til at det er faglig forbedringer å spore blant besvarelsene. Særlig oppløftende er det at flere og flere prosjektdeltakere har eksempelvis begynt å skrive elektronets bølgeegenskaper, istedenfor å meddele at "elektronet er en bølge".

Den siste besvarelsen jeg har valgt å gjengi viser en elevs holdning til kvantefysikkens beskrivelse av lys. Niels Bohrs tolkning om at lys kan være ”begge dele” er ikke nok til å overbevise denne eleven:

Filmen viser at fysikerne fortsatt ikke har noen entydig modell på om lys er bølger eller partikler.

Denne elevbesvarelsen peker på et viktig poeng med kvantefysikken og dens manglende konsensus i forhold til tolkningen av den. I dag enes imidlertid fysikere og filosofer på et område: Det finnes rett og slett ikke én felles tolkning av kvantemekanikken, hvilket indirekte medfører at eleven har rett i sin ytring angående fysikkens mangel på en entydig modell av lyset.

### 6.7 Elevene skal forklare hva det vil si at partikler har bølgeegenskaper

Den skiftelige oppgaven som følger er den siste som ble gitt innenfor lys og bølge-partikkel-dualismen. Her skulle elevene først diskutere i par hva det vil si at partikler har bølgeegenskaper. Deretter skulle elevene formulere skiftelige svar på følgende spørsmål: *Hva menes med at partikler har bølgeegenskaper?* Denne skriftlige oppgaven var også eksklusiv for versjon 3 av ReleKvant.

Alle kortene var nå lagt på bordet for prosjektdeltakerne. Dette vil si at de før denne oppgaven hadde vært gjennom følgende temaer i kvantefysikk:

- De Broglies hypotese
- Dobbeltpalteforsøket utført med elektroner og fotoner
- Heisenbergs uskarphetsrelasjon
- Schrödingerligningen supplementert med en kvalitative diskusjon om den kvantemekaniske bølgefunksjonen som en sannsynlighetsbølge

Dessverre var det mange elever som ikke svarte på denne oppgaven, men jeg skal allikevel ta frem noen utvalgte besvarelser også i denne seksjonen. Her kan man se tydelig at elevene har blitt enda mer bevisst på den fysiske tolkningen av

partikkelens bølgeegenskaper:

Det er sannsynlighetsbølger (og ikke lysbølger) som er sannsynligheten for hvor du kan finne partikkelen.

Vi må bruke bølger for å beskrive hvordan partiklene kan bevege seg.

I elevsitatene gjengitt over viser begge elevene tydelig at partiklenes bølgeegenskaper verken er ekvivalent med en fysisk bølge, eller en klassisk bølgebevegelse. Det hadde vært ønskelig om den første eleven hadde utdypet dette sannsynlighetsutsagnet litt mer i detalj (eksempelvis ved å henvise til Borns sannsynlighetstolkning), men alt i alt viser disse besvarelsene at begge elever har oppnådd en god kvalitativ forståelse tilknyttet den fysiske tolkningen av partiklenes bølgenatur.

## 6.8 Gruppeintervjuene

I denne seksjonen følger utvalgte dialoger fra de fire semistrukturerte gruppeintervjuene, som ble utført etter at elevene hadde sluttført ReleKvant. Det ble gjennomført fire slike intervjuer, alle med fire elever, der intervjuerne var representert ved en medstudent og meg selv. Det ble gjennomført to intervjuer tilhørende hver versjon av prosjektet.

Initialene som ble benyttet i intervjuene er gitt ved MG (Mathias Gjerland), som er meg selv og E1, E2...E16 er forstått som elevene. De to første intervjuene (elevene jobbet med versjon 2 av ReleKvant) har elevtall fra 1 til 8, mens de to siste har elevtall 9 til 16 (elevene jobbet med versjon 3 av ReleKvant).

Elevtallene er vilkårlig valgt i starten av hvert intervju, men disse tallene er konsekvente, intervjuene gjennom.

### 6.8.1 Fotoner (lys) viser bølge-partikkel-dualisme, men hva med elektronene?

I det første utdraget som presenteres sier elevene seg enige i at de elektronet viser bølge-partikkel-dualisme, men formuleringene er noe upresise:

MG: Dere lærte jo at fotoner, hvilket vil si lyset, har bølge-partikkel-egenskaper. Men, hva med elektroner da? Har de også bølge-partikkel-egenskaper? Prøv og sett ord på det.

E4: Hm...

E2: Ja, vi så på den videoen at hvis du ser på forholdet mellom liksom bølgelengde og da, hva var det de kalte det igjen... bevegelsesmengde..., så da skjønner man at denne greia har en bølge og oppfører seg på mange måter, sånn kvantemessig, likt som fotoner da på en måte fordi det har bølge- og partikkel-egenskaper.

MG: Så elektroner må behandles kvantemekanisk?

(E2, E3 og E4): Ja!

E1: Det jeg hadde problemer med var å tenke meg geometrisk hvordan en ting kan være bølge og partikkel samtidig. Hvordan ville det se ut? Det virker så merkelig.

E2 nevner (som han husker fra filmen) at det finnes en relasjon som kobler partikkelens bevegelsesmengde med dets bølgelengde, uten at de Broglies relasjon nevnes eksplisitt. Han argumenterer derfor for at elektronet oppfører seg, på mange måter, likt som fotoner, da begge har bølge-partikkel-egenskaper. Tre av elevene sier seg enige i at elektronet må behandles kvantemekanisk. E1 kommenterer ikke dette utsagnet, men nevner at han sitter igjen med et forvirret fysisk bilde av bølge-partikkel-dualismen. Da et liknende spørsmål ble stilt i et annet intervju ble følgende ytret:

MG: Vi har vært inne på det at fotoner har bølge- og partikkelegenskaper. Men, hva med elektroner? Hva tenker dere om det? Hva er elektroner?

E11: Negativt ladede partikler

E12: Jeg tenker også at de er partikler.

Vi ser at E11 og E12 er enige om at elektronene er partikler, men elevene blir litt mer usikre når de får spørsmål om dets bølgelengde:

MG: Men, gir det mening å snakke om bølgelengden til et elektron?

E11: Tenkte du sånn i bane rundt?

E12: Ja, hvis de beveger seg i bølger så.... Må man vel gjøre det? Vi vet jo sånn at i motsetning til fotoner så vil elektroner ha masse og er en partikkel, på en måte. Så det er, men.... Det kommer an på da... Jeg er ikke helt sikker men... jeg vet ikke helt om elektroner beveger seg i bølger, men hvis de gjør det så er det vel naturlig å snakke om det?

MG: Bevege seg i bølger, hvordan ser du for deg det?

E12: De vibrerer.

E11: For eksempel, de beveger seg en retning, men samtidig går opp og ned.

Det interessante er at E12 nevner at elektroner er partikler, i *motsetning* til fotoner fordi elektronene har masse, men E12 er ikke sikker på at elektronene virkelig beveger seg i bølger. E11 og E12 setter ord på deres forståelse av hva det vil si at en partikkel beveger seg som en bølge. Denne oppfatningen, at en partikkels bølgeegenskaper betyr at den beveger seg i bølger, er en tolkning som går igjen hos mange av elevene.

### **6.8.2 Elevenes tolkning av en tidligere besvarelse på åpningsspørsmålet om lys**

Videre i intervjuet blir elevene konfrontert med en autentisk elevbesvarelse fra tidligere utprøvinger av ReleKvant (våren 2014):

MG: La oss nå gå tilbake til åpningsspørsmålet, *hva er lys?*. Her var det en elev som skrev følgende: "Lys kan sees på som bølger og partikler. Slik jeg har forstått det, er lys partikler med bølgeegenskaper. Altså beveger partiklene seg i bølgebevegelser." Hva tenker dere om det svaret?

E4: Når jeg ser for meg fotoner, så er det sånn jeg ser det for meg... Ja, det

er det.

E3: Mener du da en liten ball, en partikkel, som går sånn (lager en bølgebevegelse med hånden)?

E2: Det må være at en partikkel må bevege seg som en bølge...?

E4: Ja, det er helt logisk oppe i hodet mitt.

E3: Ja, det er enkelt å se for seg hvert fall, men... Men, jeg trodde at det var... at det er ... eller det er ikke en liten ball, men det er... det er ikke selve ballen som går opp og ned det er den som er bølgen... Sånn tenkte jeg da...

En ser at E4 er klar på at denne beskrivelsen av fotoner (lys) absolutt gir mening. E3 er litt mer skeptisk, men E2 henger seg på og sier seg enig med E4. E3 nevner så et viktig poeng og sier at det *er enkelt å se for seg*, men han tenker seg at det er selve ballen som er bølgen. Min tolkning er at E3 prøver å forklare at det er "ballen" som har bølgeegenskaper, ikke at denne "ballen" flyr opp og ned som en bølge. Diskusjonen fortsetter og nå kommer E1 og E2 med viktige poeng:

E1: For å være helt ærlig så må jeg si at begrepet fotoner oppi hodet mitt har ikke noen illustrasjon vedlagt... (Latter)

MG: Du kan trøste deg med at da Einstein var 70 år så skrev han at fortsatt ikke visste helt hva fotoner var.

E2: (Latter) Det er på en måte et begrepsnavn så henger det i en ramme uten noe bilde inni (Latter). For hvis jeg skal forestille meg noe som både oppfører seg som en bølge og en partikkel så klarer jeg det rett og slett ikke og tenke meg det. Men, det virker jo litt logisk måte å se det for seg?

E1 og E2 klarer ikke å se for seg denne dualismen geometrisk, noe som kan tyde på at de har fått med seg at bølge-partikkel-dualismen ikke kan visualiseres ved å benytte den intuitive forståelsen fra klassisk fysikken. En annen tolkning kan være at elevene nettopp prøver å koble inn den klassiske fysikken, men får det ikke til å stemme ved å forsøke og beskrive dualismen geometrisk. Men, E4 er fortsatt klar på at denne måten å se for seg fotonet, som en partikkel som fyker

opp og ned, gir mening:

MG: Hva sa du igjen med fotonet? Hvordan så du det for deg?

E4: Nei, jeg så for meg akkurat det som ble beskrevet jeg. En liten partikkel som driver og fyker opp og ned.

E2: En ball som flyr i en bølgebevegelse.

Her ser vi at E2 henger seg på denne beskrivelsen, men det er uklart om han sier seg enig med E4, eller om han bare forsøker å hjelpe E4 med å sette ord på denne bølgebevegelsen. Da samme spørsmål ble presentert i et annet intervju ble følgende kommentert:

E5: Bølgebevegelsen som i den bevegelsen? (Gestikulerer en bølgebevegelse).

E6: At en partikkel dupper opp og ned liksom?

MG: Hva tenker dere om det?

E8: Tenker du om fotoner eller?

E7: Kan du gjenta spørsmålet?

MG: (Gjentar elevbesvarelsen)

E6: Jeg er litt uenig i det for den måten han definerte lys som en partikkel, så hadde den et spesifikt punkt, altså at partikkelen er der den er, mens en bølge er det slik at den kan være hvor som helst. Det er derfor, man kan ikke si at den er en partikkel som beveger seg i en bølge, for da er det ikke en partikkel.

En ser at elevene er litt usikre og det er først E6 som kommer med et argument med en viss lengde. Min tolkning av E6 sitt utsagn er at partikkelen mister sin beskrivelse som partikkel ved at den "beveger seg som en bølge". Dette er fordi denne partikkelens posisjon blir da spredt utover rommet, noe som gjør at denne partikkelen, i følge E6 sine ytringer, kan være hvor som helst og får derfor egenskapene til en bølge. E8 og E7 henger seg nå på i diskusjonen:

E8: Så er det også vanskelig å si at det er en partikkel fordi fotonet har ikke masse, tror jeg, så da.... Eller, det er kanskje partikkelegenskaper heller enn at det er en partikkel, ja det er jo et foton.

E7: Han [eleven i besvarelsen] sa lys er partikler med bølgeegenskaper, det er vel heller motsatt. Lys er fotoner med partikkelegenskaper og bølgeegenskaper.

E5, E6 og E8: Jepp.

E8: Heller det! Fotonet er på en måte en egen greie liksom.

E7: Men, ikke samtidig.

MG: Så konklusjonen er...? Hvis dere hadde vært lærere og skulle sette riktig eller galt på det svaret, hva ville dere ha gjort da?

Alle: Hadde satt galt. Det inneholder noe, men ikke helt riktig.

E8 nevner at det ikke er snakk om at fotonet er en partikkel, men at det har partikkelegenskaper. E7 henger seg på denne tanken og konkluderer med at lys er fotoner med både partikkel- og bølgeegenskaper. Dette sier de andre elevene seg enige i. Videre ytrer E8 at fotonet er en "egen greie". Min tolkning er at denne eleven prøver å formidle at denne partikkelen må behandles kvantemekanisk, og da følger det at denne partikkelen har både bølge- og partikkelegenskaper. Avslutningsvis ser en at alle elevene er samstemte om at denne uttalelsen (elevbesvarelsen som ble lest opp) ikke er helt korrekt. Dette blir ikke utdypet noe nærmere av elevene.

### **6.8.3 Elevenes beskrivelse av lys**

Elevene fikk spørsmålet om hva hvilken beskrivelse av lyset som passer best. De fikk også beskjed om å begrunne denne påstanden. Her var det mange lange og gode uttalelser:

MG: Hvilken beskrivelse av lys synes dere passer best? Hvis dere kan begrunne det, så er det veldig fint.



E13: Jeg tenker at, hvis man sier... Det man tenker... Lys det er veldig vanskelig å si hva det er, man kan heller tenke på hvordan man best kan beskrive det, og da tenker jeg at man best kan beskrive det som begge deler, i forskjellige typer eksperimenter. Så, det er fortsatt vanskelig å si hva det faktisk er, det er kanskje begge deler, men når man skal beskrive så føler jeg det er det det handler mest om.

E13 viser her svært god refleksjonsevne. Min tolkning er at han påpeker at kvantefysikkens oppgave ikke er å finne ut hva lys *er*, men hvordan det kan beskrives i eksperimenter. Lysets eksperimentelle oppførsel er avhengig av det eksperimentet som utføres og derfor må lyset kunne opptre som begge deler, nettopp for å være i samsvar med de eksperimentelle resultatene.

Videre i samtalen ytrer E14 at lyset kanskje er bølger, da det alltid beveger seg. Her er det mulig at denne eleven kobler dette opp mot en klassisk bølge som brer seg ut i rommet, da denne bølgen ikke kan "stå stille":

E14: Jeg syns da kanskje bølger. Fordi jeg har aldri hørt at lyset står stille.

E13: Men, partikler kan jo det.

E14: Joda. Bølger bøyes nødvendigvis litt av tyngdekraften sånn som lys rundt solen....

MG: Så bølgebeskrivelsen av lyset er den beskrivelsen som passer deg best?

E14: Ja, jeg syns det.

Vi ser også at E14 viser kvalitative kunnskaper om generell relativitet når han meddeler at lyset kan bøyes. Det er mulig denne eleven hadde endret sin forklaring hvis han kjent til utledningen av sammenhengen mellom fotonets energi og bevegelsesmengden, som viser at fotonene ikke kan stå stille, men beveger seg med lyshastigheten. Det var nettopp ideen om at fotonet, som en tiltenkt, klassisk partikkel, kan stå stille som er elevens hovedargument for at lyset måtte være en bølge. E15 fortsetter der E13 slapp og gir god argumentasjon

for at lyset viser en dualisme. Dette er også E16 sin oppfatning av lyset, også hun gir en lang og god argumentasjon for at lyset kan opptre som begge deler:

E15: Jeg mener at man må se på det etter hvilket utfall man ønsker å se på. For meg så er det begge. Så hvis du ønsker deg et utfall, eller det egner seg best å bruke, eller se på lys som partikler så ser du det på som partikler, og hvis det egner seg best å se på lys som bølger, så ser du det på som bølger.

E16: Jeg synes det er et vanskelig spørsmål fordi, da vi så de videoene med de forskerne blant annet, så er han ene veldig flink til å være sånn lys er en partikkel fordi det befinner seg der et sted av gangen da, men han andre er veldig flink med bølger. Så jeg føler det er litt begge deler. Fordi på den ene siden så kan du ikke forklare lysets oppførsel som en bølge og på en annen måte så kan du ikke gjøre det som en partikkel. Og det er jo et veldig merkelig konsept at noe kan være to ting på en gang, men jeg føler at det er det mest logiske da, istedenfor å utelukke en.

Min tolkning av E15 sin beskrivelse av lyset er avhengig av eksperimentet som utføres. Det eleven omtaler som "hvilket utfall en ønsker", kan muligens oversettes med "den egenskapen ved lyset som kan forklare (akkurat) dette eksperimentelle resultatet".

E16 husker tilbake til videoen fra ReleKvantmodulen *Behov for ny fysikk* der to forskere argumenterer for sitt syn på lyset. Denne eleven meddeler at det er vanskelig å se dette for seg og at det er et merkelig konsept, men hun nevner også at dette [dualismen] må være mest logisk. Hun sier at i noen tilfeller kan man forklare lysets oppførsel som en bølge, og andre ganger oppfører deg seg som en partikkel. En mulig tolkning er at denne eleven mener at en trenger å tilegne lyset begge egenskaper for å forklare ulike eksperimentelle resultater.

#### **6.8.4: Korrelasjonen mellom kvantefysikk og klassisk fysikk**

Jeg ønsket å finne ut om elevene hadde fått med seg at kvantefysikken var en

generalisering av den klassiske fysikken. Samtidig ba jeg om en begrunnelse på hvorfor Newtons mekanikk fortsatt er aktuell i dag. Her var det mange fornuftige svar i de aller fleste av fokusgruppeintervjuene. Nedenfor følger utvalgte utdrag fra noen av intervjuene. (Spørsmålet endret ordlyd fra intervju til intervju, men det fysikkfaglige innholdet i spørsmålet var det samme):

MG: Hvordan kan Newtons mekanikk leve sammen med kvantemekanikk i dag? Hva er det egentlig den klassiske fysikken beskriver?

E3: Newton er kanskje litt mer tilnærming (...). Moderne fysikk viser at det er flere ting som kan skje, mens Newtons mekanikk er kanskje et forenklet bilde på virkeligheten da.

E2: (...) Newtons teorien fungerer på en måte... Innenfor den boksen han har lyst å aplikere dem i. Vi kan ikke ta dem med til det neste nivået men (...).

E9: Jeg føler at Newtons lover holder vann, så lenge du ikke ser på ting på et atomnivå.

Her ser en at elevene klarer å sette den klassiske fysikken i sammenheng med kvantefysikk. Elevene viste, under intervjuene, at de hadde god forståelse på dette området. Det samlede datamaterialet viste imidlertid at elevene ikke maktet å sette disse tankene i sammenheng med den kvantefysiske beskrivelsen av lys. Jeg kommer tilbake til dette i diskusjonskapittelet.

## 7 Diskusjon

### 7.1 Introduksjon

Denne masteroppgaven skulle ta for seg hvordan elevenes forståelse av lys og bølge-partikkel-dualismen utviklet seg gjennom deres arbeid med ReleKvants læringsmoduler. I dette kapittelet vil jeg diskutere resultatene fra ReleKvant-modulene og de påfølgende gruppeintervjuene, og forankre dette i fysikk-didaktisk teori og tidligere undersøkelser. Avslutningsvis vil jeg komme med mine anbefalinger til forbedring av undervisningsmodulene.

Siden det siste forskningsspørsmålet tok mål av seg å behandle elevenes forståelse som en prosess gjennom deres arbeid med ReleKvant, har jeg valgt å gjenta deler av datamaterialet for å illustrere de viktigste poengene.

### 7.2 Elevenes kunnskaper før ReleKvant

Åpningsspørsmålet om lys bevitner at norske fysikkelever er en faglig sterk elevgruppe i det norske skolesystemet (Angell et al., 2011) ved at mange, allerede på dette tidspunktet, kunne sies å nærme seg Cheong og Songs (2013) *first level meaning of duality*.

På dette spørsmålet havnet i underkant av 40% av elevsvarene innunder kategorien "lys viser både bølge- og partikkel-egenskaper". Selv om de fleste av elevsvarene på dette åpningsspørsmålet, naturlig nok, ikke inneholdt informasjon om de eksperimentene som støttet lysets dualistiske natur, så unngikk disse elevene en ukritisk sammensmelting av den klassiske forståelsen av bølger og partikler. Dette er imponerende når tidligere forskning har vist at elever i den videregående skole fortsatt bærer med seg den klassiske forståelsen av bølger og partikler etter endt undervisning i kvantefysikk (Olsen, 2002). Tallene blir enda mer oppløftende når en samtidig tar med at tidligere undersøkelser har vist at denne ukritiske sammensmeltningen også er gjeldende for universitetsstudenter (Ayene et al., 2011). Det var allikevel, i mine øyne, en

vesentlig misoppfatning tilhørende denne kategoriens elevsvar. Denne misoppfatningen gikk ut på at elevene ikke tok høyde for et særdeles viktige prinsipp, nemlig prinsippet at kvantefysikken skal være en generalisering av den klassiske fysikken. Dette illustreres best ved å betrakte følgende besvarelse fra resultatdelen (kap. 6.2.4):

Lys er et fenomen som kan beskrives gjennom bølger eller kvanteteorien. Grunnen til at man kan beskrive lys gjennom bølger er fordi man sendte lys gjennom to spalter i samme fase og det oppsto et interferens mønster. Lys kan også beskrives som små, udelelige energi pakker, altså fotoner. (...).

Denne eleven var ikke alene om å meddele at lyset kan beskrives gjennom bølger *eller* kvantefysikk. Dette harmonerer ikke med prinsippet om at kvantefysikken skal være en generalisering av den klassiske fysikken, ved at kvantefysikken både skal gi korrekte, eksperimentelle prediksjoner av den klassiske, elektromagnetiske beskrivelsen av lys (bølgebeskrivelsen), samtidig som kvantefysikken skal forklare de eksperimentene der lyset viser sin partikkelnatur. Denne misforståelsen knyttet til den kvantefysiske beskrivelsen av lys fulgte de aller fleste av elevene gjennom hele undervisningsperioden.

I den andre store kategorien, "ukritisk dualisme", inneholdt elevsvarene oppfatninger som en finner igjen i fagdidaktisk litteratur. Trenden her var at lys var partikler som gikk i bølgebevegelse (Olsen, 2002), samtidig som mange besvarelser inneholdt elementer som bevitnet om en ukritisk sammensmelting av den klassiske forståelsen av bølger og partikler (Müller & Wiesner, 2001; Fischler & Lichfeldt, 1992). Det var omtrent like mange elever som havnet innenfor denne kategorien, som i den første. Dette er forholdsvis gode tall, med tanke på at dette spørsmålet ble stilt før elevene hadde påbegynt arbeid med modulene.

Et annet positivt element er at elevene maktet å bruke egne ord i beskrivelsen av lys. Dette var i tråd med ReleKvantprosjektets visjon om at elevene skulle få

anledning til å benytte seg av ulike modaliteter under ReleKvant (Henriksen et al., 2014), en læringsform som ikke har vært førsteprioritet innenfor tradisjonell fysikkundervisning. Men, til tross for at undersøkelser har vist at norske fysikkelever er fornøyd med fysikkens tradisjonelle undervisningsmetoder (Angell et al., 2011), så vitnet de utfyllende elevsvarene om at elevene ikke var fremmede for å også arbeide med fysikk med vekt på språk, slik som i ReleKvant.

De muntlige diskusjonsoppgavene underveis i prosjektet fikk elevene til å problematisere lysets dualisme. Her var trenden at elevene ble oppmerksomme på at den klassiske forståelsen av partikler rett og slett ikke ga mening, noe følgende utdrag fra resultatdelen viser (kap. 6.3):

- Lys er rett og slett en strøm av fotoner da.
- Ja, det kan man si.
- (...)
- Men..., opptrer egentlig lys som bølger?
- Hm, jeg... det gjør det det jo? Det gjør det.
- For det er en differensmønster er det ikke det da?
- Jo det gjør jo det hvis du har to ulike lys.... Herregud.
- Jeg vet ikke... Det er ikke lett å si.

Elevene, sammen, kommer her frem til at beskrivelsen av lys er svært problematisk når en bruker den klassiske forståelsen av partikler. Denne læringen skjer hos begge elever ved at de deltar i sosial praksis, hvilket vil si at læringen skjer innenfor det sosiokulturelle perspektivet på læring, og det er nettopp dette læringsperspektivet ReleKvantprosjektet er forankret i (Bungum et al., 2015).

### 7.3 Elevene starter med læringsmodulene

Tidligere undersøkelser (Ireson, 2000) har vist at en vanlig misoppfatning blant elever er at de ukritisk blander beskrivelsen av bølger og partikler. De ser det eksempelvis ikke som et paradoks at fotonet kan tildeles frekvens og bølge-

lengde, samtidig som det beskrives som en partikkel. ReleKvant tok høyde for dette ved å tidlig få elevene til å problematisere det at fotoner har bølgelengde og frekvens, til tross for at de er partikler.

Datamaterialet viser at ReleKvants innføring av partikkelteori, som stilte spørsmålet om lys både kunne være en bølge og partikkel, var særdeles viktig for utviklingen av elevenes forståelse. Elevene hadde ikke, på dette stadiet i undervisningen, muligheten til å knytte dette problemet til kvantefysisk tolkning, men det viktige var at denne diskusjonen fikk elevene til å tenke over hvor radikalt det er å påstå at fotoner har en bølgelengde.

Videre viser resultatene at elevene, under dialogen, ble gjort oppmerksomme på at tanken om lysets dualistiske natur ikke gir mye mening ut i fra den klassiske forståelsen av partikler. Det oppsto derfor en kognitiv konflikt. Elevenes eksisterende kognitive skjemaer, en kunnskapsbase de har opparbeidet seg gjennom den klassiske forståelsen av partikler, ble endret. Denne endringen av elevenes eksisterende, kognitive skjemaer er forstått som læring innenfor individuell konstruktivisme (Angell et al, 2011). Et utdrag fra kapittel 6.4 viser dette eksplisitt:

- Jeg skrev at lys kan (...) bølgenatur og partikkelnatur og lys har ikke masse, men bølgelengde og frekvens.
- Bølgelengde og frekvens? Men hvis de oppfører seg som fotoner som er partiklene så er det vel ikke bølgelengde og frekvens som partikler?
- Nei.
- Nei. Da ville det bare være bølgenatur, da.
- Ja, de har vel ikke bølgenatur heller hvis man ser på det som fotoner. Det er det som problemet da, er det ikke? At det kan oppføre seg fint som begge deler. Og begge deler er gyldig, mens begge deler også motsier seg selv liksom, det er paradoksalt.

Hvis ikke prosjektet hadde lagt opp til at elevene skulle diskutere, så kunne eksempelvis elevene fra dialogutdraget over, hver for seg, forlatt klasserommet med ideen om at fotoner kan sees på som partikler med tilhørende frekvens og

bølgelengde, *uten* at denne oppfatningen hadde blitt videre problematisert. ReleKvant, via dialogen, får elevene til å argumentere og problematisere den dualistiske beskrivelsen av lys, en problematisering som ikke hadde kommet til overflaten hvis ikke elevene hadde hatt muligheten til å diskutere dette paradokset.

Selv om elevene, på dette stadiet i prosjektet, ikke hadde nok kunnskaper til å koble denne dualismen mot eksperimentelle resultater, så er det vesentlige at de gikk fra å ha en problemfri, individuell "forståelse" av dualisme til å forstå at denne dualismen er paradoksal, noe som er et stort, fysikkfaglig steg å ta.

Elevene bidro med deres individuelle kunnskaper til denne dialogen, men jeg vil allikevel påstå at denne læringsprosessen også har et sosiokulturelt element ved seg. Det var nettopp det at elevene, sammen, utviklet kunnskapen om at den klassiske forståelsen av partikler ikke var tilstrekkelig for å beskrive lysets dualisme, som førte til at elevenes individuelle, kognitive skjemaer ble endret.

Elevsvarene innenfor de to kategoriene, "upresis dualisme" og "fotonet viser både bølge- og partikkel-egenskaper" vitnet om at elevene hadde arbeidet godt med modulen om fotoelektrisk effekt. Trenden var at elevsvarene innenfor disse kategoriene var vesentlige mer presise enn det som var tilfellet for de tilsvarende besvarelsene tilhørende åpningsspørsmålet om lys. Elevene startet nå med argumentere for lysets partikkelnatur, der denne argumentasjonen var forankret i eksperimentelle resultater. Elevene nærmet seg nå Cheong og Songs (2013) *first level meaning of duality*.

Datamaterialet viste imidlertid at det var et problem med elevenes kunnskapsutvikling. Dette problemet var at elevene på dette stadiet i prosjektet ikke maktet å sette fotonets bølgeegenskaper i en korrekt setting. Følgende utdrag fra en elevbesvarelse (6.5.1) eksemplifiserer dette:

(...) Fotoner er bølger i klassisk fysikk, og er partikler i [kvante-] fysikk.



Eleven så på fotonet som *bølger* i klassisk fysikk, noe denne eleven ikke var alene om å gjøre. Datamaterialet viste at svært mange av elevene ikke maktet å knytte fotonets oppførsel i dobbeltspalteeksperimentet til kvantefysikkens dualisme.

En mulig løsning på dette problemet kunne vært og fulgt Iresons (2000) didaktiske grep ved at ReleKvant hadde introdusert fotonet som et *kvante-objekt* for elevene. Noen forskere argumenterer for at dette øker sjansene for at elevene vil tenke på fotoner (og elektroner) som partikler, hvis egenskaper ikke kan beskrives med klassisk fysikk (Ireson, 2000).

På en annen side kunne Iresons (2000) grep ført til at eleven ikke hadde fått muligheten til å sette fotonet inn i en *riktig* klassisk setting. Med en riktig klassisk setting for fotonet menes at fotonets interferensmønster i dobbeltspalteeksperimentet, dets eksperimentelle bølgenatur, betraktes som et statistisk spesialtilfellet der millioner av fotoner inngår. Det er klart at fotonet ikke hører hjemme i klassisk fysikk sett fra den klassiske mekanikkens ståsted, men dets statistiske oppførsel gjør nettopp det, da det er nettopp den statistiske tolkningen som viser lysets bølgeegenskaper i en eksperimentell setting. Min tolkning er at Iresons grep kan føre til at elevene får vanskeligheter med å forstå at kvantefysikken makter å beskrive både lysets bølge- og partikkel-natur, ved at elevene ikke, under noen omstendigheter, kan plassere fotoner innenfor den klassisk fysikken: Fotonet er et kvanteobjekt, slik Ireson legger opp til, og denne partikkelklassen skal ikke nevnes i en klassisk setting.

På den måten mener jeg at *kvante-objekt-tilnærmingen* visker vekk muligheten til å forene den klassiske og moderne fysikken. Selv om fysikkdidaktisk forskning har vist at en ikke skal introdusere elevene for halvklassiske modeller når de skal lære seg kvantefysikk (Fischler & Lichtfeldt, 1992), så er det ikke motstridende at elevene skal inneha ferdighetene til å plassere kvantefysikken inn i en korrekt, klassisk setting. Denne ferdigheten er også et læreplanmål i Fysikk 2, under *den unge forskeren*, der det meddeles følgende:

Mål for opplæringen er at eleven skal kunne

- drøfte hvordan ulike fysiske teorier kan eksistere ved siden av hverandre, til tross for at de kan være motstridende

Utdanningsdirektoratet (2015)

Fischler og Lichtfeldts (1992) tanker om at undervisningen ikke skal overføre de klassiske forklaringsmodellene til kvantefysikk er særdeles viktig, da denne begrepsoverføringen rett og slett ikke gir mening (Angell et al., 2011). Dette tok ReleKvant til etterretning ved å tidlig presenterte elevene for ideen om at lysets dualisme ikke kunne forklares ved å benytte begrepsapparatet fra klassisk fysikk. Læringsmodulene viste også, under fotoelektriske effekt, at ideen om at lys var et fullstendig bølgefenomen måtte forkastes, da denne modellen ikke kunne forklare at fotoelektrisk effekt oppsto uavhengig av intensiteten til strålingen.

Men, en overføring *fra* kvantefysikk til klassisk fysikk gir absolutt mening, der denne ferdigheten må være på plass hos elevene hvis de eksempelvis skal forklare at kvantefysikken makter å predikere lysets dualistiske natur, ikke bare dets partikkelnatur. Elevenes oppfatning på dette stadiet i prosjektet var at fotoelektrisk effekt og comptonspredning forklarte at lys besto av partikler, noe som i seg selv er korrekt. Problemet var datamaterialet viste at elevene ikke maktet å koble dette til lysets dualistiske natur. Trenden var at elevene var fortrolig med at fotonet viste både bølge- og partikkel-egenskaper, men de klarte ikke å benytte seg av denne kunnskapen til å forklare at kvantefysikken også maktet å forklare dobbeltspalteforsøket utført med lys.

Min tolkning er at ReleKvant kunne vektlagt denne korrespondansen mellom klassisk fysikk og kvantefysikk på en bedre måte ved å opprette en modul som samlet all informasjonen elevene nå hadde om fotonet. Datamaterialet vitner om at ReleKvant går litt for fort frem, samtidig som modulene har et enerådende fokus på lysets partikkelnatur, uten at disse kunnskapene blir anvendt på tidligere eksperimenter utført med lys. Resultatet er at de aller fleste elevene, på dette stadiet av prosjektet, kun fokuserer på at kvantefysikken kan forklare eksperimenter som tar for seg lysets partikkelnatur. Dette medfører at en ender

opp med besvarelser som sier at lys er bølger i klassisk fysikk, mens de er partikler i kvantefysikk.

Et forslag kunne vært og hjulpet disse elevene med å omformulere sine besvarelser, slik at de kunne ha puttet fotonet inn i en riktig, klassisk setting. Et eksempel på en slik omformulering kan være følgende: "I klassisk fysikk viser dobbeltspalteforsøk at lyset har bølgeegenskaper, fordi den klassiske fysikken ikke tar høyde for at dette interferensmønsteret er et statistisk resultat av mange fotoners kollektive oppførsel."

Elevene er absolutt inne på noe vesentlig når de forsøker å knytte fotonet til lysets bølge-egenskaper, men da må denne tilknytningen ikke innbefatte at fotonet *er* en bølge, samtidig som fotonets klassiske natur må komme til inntrykk gjennom statistikk, ikke mekanikk. Trenden var altså at elevene slet med å finne fotonets rettmessige plass i forbindelse med denne partikkelens tilknytning til lys.

Noen av elevene unngikk å plassere fotonet innenfor den klassisk mekanikken, men de gikk også for langt – de påsto at fotonets matematiske beskrivelse ikke ga mening innenfor spesiell relativitetsteori. Denne misoppfatningen er et ukjent fenomen fra tidligere undersøkelser. Kan dette bety at denne misoppfatningen skyldes ReleKvants fremstilling av stoffet? I følge datamaterialet er at svaret på dette skyldspørsmålet et "nei", men med visse forbehold.

I modulen om fotoelektrisk effekt ble det nettopp gjort et nummer ut av at sammenhengen mellom fotonets bevegelsesmengde og energi måtte utledes fra spesiell relativitetsteori, som følge av at fotonet er masseløst, samtidig som det beveger seg med lysfarten. Denne informasjonen ble gitt til elevene gjennom en multimodal fremstilling (quiz, bilder og tekst), men selve utledningen ble ikke vist eksplisitt for elevene.

Min tolkning er at den manglende utledningen kan ha ført til at elevene kun har fått overflatekunnskap om fotonets matematiske beskrivelse, en type kunnskap

(“pugging av formler” uten å kunne tolke formlene fysisk) som viser seg vanlig i realfagene (Steinberg, 2011). Datamaterialet viser at en utledning kunne vært fornuftig for å sørge for at elevenes fikk bedre dybdekunnskap om fotonet. Elevene har nok ferdigheter i matematikk (se for eksempel Oldervoll et al., 2008) til å kombinere uttrykket for bevegelsesmengde og energi, (2.35) og (2.36), slik at de kan utlede fotonets energi og bevegelsesmengde i regi av spesiell relativitetsteori.

På en annen side gir ikke utledningen en garanti for at elevene hadde blitt kvitt misoppfatningen om at fotonet ikke kan plasseres innenfor spesiell relativitetsteori. Dette begrunner jeg med at tidligere undersøkelser har vist at matematikk alene ikke fungerer som en garanti for at elevene opparbeider seg en konseptuell forståelse innenfor moderne fysikk (Özcan, 2010; Singh et al., 2006).

Et annet problem som melder seg ved å gjøre den moderne fysikken for matematikktung, er at dette kan føre til at denne delen av faget blir mindre tilgjengelig for flertallet av elever i den videregående skole (Olsen, 2002). Mindre tilgjengelighet kan også føre til at faget forsømmer sin rolle som allmenndannende. Det er også viktig å ha i bakhodet at ikke alle elever som velger Fysikk 2 skal gå videre med fysikkstudier etter endt videregående opplæring, men det er allikevel viktig at også denne elevgruppen har fått sjansen til å ta del i undervisningen som tar for seg den moderne fysikken. Dette skyldes at den moderne fysikken har, med tiden, blitt sentral også i andre fagfelt (Steinberg & Oberem, 2000).

Elevenes manglende, kvantitative bakgrunnskunnskaper om sammenhengen mellom fotonets bevegelsesmengde og energi gjør heller ikke gjør elevenes forståelse av dualisme lidende. Dette viste elevsvarene innenfor kategorien ”fotonet viser både bølge- og partikkel-egenskaper. Mange av besvarelsene innenfor denne kategorien viste at elevene lå godt an for å nå Cheong og Songs (2013) *first level meaning of duality*, ved at elevene her argumenterte for fotonets dualisme ved å henviser til eksperimenter som får frem de ulike egenskapene ved fotonet. Det var litt over 40% av besvarelsene som havnet innenfor denne

kategorien, noe jeg betegner som en sterk prosentandel tatt i betraktning at denne kategorien var vesentlig strengere enn den tilsvarende kategorien som plasserte elevsvarene tilhørende åpningsspørsmålet om lys.

Denne suksessen kan skyldes at modulen om fotoelektrisk effekt eksponerte elevene for digitale simulasjoner i læringsprosessen. Tidligere forskning har vist at bruken av slike simulasjoner gir positiv læringseffekt (Singh et al., 2006), så lenge disse simulasjonene er forankret i forskningsbaserte undervisningsteorier, noe ReleKvantprosjektet absolutt har tatt høyde for under utviklingen av disse simulasjonsverktøyene (Bungum et al., 2015).

Det må allikevel kommenteres at det var over 25% av besvarelsene tilhørende fotonspørsmålet som ikke nevnte fotonets dualistiske natur overhode. Dette var forholdsvis høye tall, tatt i betraktning at elevene på dette stadiet i prosjektet hadde blitt presentert for lysets bølgenatur, fotoelektrisk effekt og comptonspredning.

#### 7.4 Alle partikler har bølgeegenskaper

Elevene hadde på dette stadiet i undervisningen vært gjennom fotoelektrisk effekt, comptonspredning og dobbeltspalteforsøket utført med elektroner, hvilket vil si at de i prinsippet var klar for å Cheong og Songs (2013) *first level meaning of duality*.

Datamaterialet viste at språkbruken til elevene, på dette stadiet i prosjektet, hadde blitt mye mer presis: Lys var ikke lenger bølger, men lys viste bølgeegenskaper. Enkelte av elevene viste til og med en enda dypere og mer detaljert forståelse. Disse elevene meddelte at fotonets bølge ikke var noen fysisk bølge, men at det heller måtte forstås som en matematisk, statistisk konstruksjon, noe følgende sitat fra samme seksjon viser:

Det er sannsynlighetsbølger (og ikke lysbølger) som er sannsynligheten for hvor du kan finne partikkelen.

Denne besvarelsen var bare en av mange elevsvar som viste at elevene hadde opparbeidet seg en rettmessig tolkning av bølgefunksjonen. Datamaterialet viste at det var spesielt to elementer fra ReleKvantmodulene som førte til at elevene opparbeidet seg denne presise, kvalitative forståelsen av den kvantemekaniske bølgefunksjonen.

Den første suksessfaktoren på veien mot denne forståelsen var videoen som forklarte dobbeltspalteeksperimentet utført med elektroner. Elevbesvarelsene som fulgte denne videoen viste at elevene maktet å sortere ut det viktige fysikkfaglige innholdet i filmen:

- Kvanteeffektene er ikke merkbare på makroskopisk nivå
- Det at elektronene dannet interferensmønster i dobbeltspalteforsøk bryter med den klassiske forståelsen av partikler – elektronet har en innebygd bølgenatur
- Hvis det utføres en måling på et kvantemekanisk system, går dette systemet tilbake til klassisk oppførsel – interferensmønsteret opphever

Oppsummeringsvideoen, som ga en kvalitativ innføring i Schrödingerligningen, utgjør det andre elementet. Her ble det påpekt at denne ligningen er en bevegelsesligning, som har form som en bølgeligning, der denne ligningen ble koblet til partiklenes oppførsel i dobbeltspalteeksperimentene. I tillegg ble det nevnt at kvantefysikken er en veldefinert, matematisk formalisme, som fortsatt evner å predikere nye eksperimentelle resultater med perfekt nøyaktighet. Det sistnevnte punktet viste seg svært viktig for elevene. Intervjuene viste at elevene synes det var bra å få en bekreftelse på at det de lærte faktisk hadde en praktisk verdi.

## 7.5 Elevenes forståelse ved prosjektets slutt

Da elevene var ferdige med ReleKvantmodulene hadde elevene fått nok faglig kunnskaper om bølge-partikkel-dualismen til at de, i prinsippet, kunne ha koblet

fotonets statistiske egenskaper mot dobbeltspalteforsøket utført med lys med "normal" intensitet, og da konkludert med at lysets bølgeegenskaper (interferensmønsteret) er et statistisk spesialtilfelle der millioner av fotoner inngår. Dette fordret at elevene forsto at kvantefysikken sammenfaller med klassisk fysikk under disse statistiske forholdene. Dette undersøkte jeg under intervjuene, og her viste det seg at elevene hadde mye fornuftig å meddele på dette området.

De aller fleste av elevene hadde her fått med seg at den klassiske fysikken er et forenklet (statistisk spesialtilfelle/makroskopisk spesialtilfelle) bilde på virkeligheten – en forståelse som er særdeles sentral hvis elevene skulle forklare at kvantefysikken makter å predikere lysets oppførsel, både under dobbeltspalteforsøket og under forsøket om fotoelektrisk effekt.

Elevene forklarte også, under intervjuene, at de hadde fått med seg at både fotoner og elektroner viser bølge-partikkel-dualisme. Dette kan bety at ReleKvant gjorde rett i å ikke ta høyde for Iresons (2000) forslag om å introdusere fotoner og elektroner som *quantum objects* i da de designet Modulene, noe jeg personlig stiller meg bak.

Samlet sett viste det totale datamaterialet, som utgjorde elevbesvarelser, lyddialoger og intervjuer, at elevene hadde nådd en forståelse som var innenfor Cheong og Songs (2013) *first level meaning of duality*, ved at disse dataene viste at elevene hadde utviklet følgende kunnskaper om bølge-partikkel-dualismen:

- Elektroner oppfører seg likt som fotonene i dobbeltspaltforsøk
- Elektroner og fotoner må behandles kvantemekanisk
- De eksperimentelle resultatene fra forsøk om Comptonspredning og fotoelektrisk effekt viser at lys består av partikler med energi  $E = h\nu$ , der resultatene fra disse forsøkene kan benyttes til å argumentere for lysets partikkelnatur.
- De Broglies formel forteller at alle partikler har bølgeegenskaper

Resultatene, fra intervjuer og elevbesvarelser, vitner om at elevenes faglige utvikling var størst mot slutten av prosjektet, da elektronenes bølgenatur ble presentert for elevene.

De samme resultatene viser også at ReleKvantmodulene hadde en riktig presentasjonsrekkefølgen av fagstoffet: Elevene ble invitert med på en reise innenfor bølge-partikkel-dualismen, som startet med at elevene fikk ytret det de kunne om lys fra Fysikk 1. Deretter ble de presentert for lysets partikkelnatur gjennom forsøkene om fotoelektrisk effekt og Comptonspredning, før elevene ble kjent med dobbeltspalteforsøket med elektroner. På den måten sørget ReleKvant for at elevene, ideelt sett, da var i faglig posisjon til å tilfredstille kravene til Cheong og Songs (2013) *first level meaning of duality*, som nevnt over.

## 7.6 Forslag til forbedringer

Selv om intervjuene viste at elevene maktet å sette kvantefysikken inn i en klassisk setting, så bør allikevel ReleKvant vise *tydeligere* det faktum at kvantefysikken er en generalisering av den klassiske fysikken. Etter mitt syn holder det ikke at dette viktige prinsippet kun ble kom til syne gjennom én setning i åpningsmodulen *Behov for ny fysikk*.

I tillegg bør modulene vektlegge at kvantefysikken evner å predikere forsøk som også tar for seg lysets bølgenatur. Trenden i datamaterialet viste at elevene har opparbeidet seg en god forståelse av dualismen, samtidig som at de fleste fortsatt fristes i for stor grad tilbake til elektromagnetisme når de skal forklare lysets bølgenatur. Mange av elevene kan, isolert sett, ytre at fotonene og elektronene har samme dualistiske natur, men min oppfatning er at elevene ikke makter å koble dette til lysets bølgenatur på stående fot. En oppsummerende modul, der fotonets bølgeegenskaper knyttes til den klassiske forståelsen av lys som et bølgefenomen, hadde vært særdeles ønskelig.

Det neste justeringsforslaget stiller seg i opposisjon til læreplanens krav om å kun vektlegge kvalitativ forståelse innenfor den moderne fysikken. Elevene blir



utstyrt med de Broglies formel,  $\lambda = h/p$ , mot slutten av læringsmodulene. Her finnes det derfor mange muligheter til å sette kvantefysikkens dualisme i sammenheng med den makroskopiske, klassiske verdenen. Ved å benytte de Broglies formel kan en, på elegant vis, vise hvorfor eksempelvis elektroner og fotoner vil ha en bølgelengde av betydning og derfor må behandles kvantemekanisk, mens makroskopiske fotballer ikke behøver denne behandlingen. Dette enkle grepet gjør samtidig Iresons (2000) ideer om å introdusere kvanteobjekter overflødig. Mitt poeng er ikke at eksempelvis de Broglies formel skal erstatte det forsknings-baserte, kvalitative undervisningsmaterialet prosjektet tilbyr innenfor lys og bølge-partikkel-dualismen, men prosjektet må ikke være redd for å la fysikkelevne benytte triviell matematikk som supplement til læringsprosessen. Dette krever samtidig at læreplanen legger opp til at en slik bruk av matematikk kan forsvares.

## 8. Konklusjon

Den overordnede problemstillingen i denne oppgaven var at jeg skulle belyse hvordan elevenes forståelse av lys og bølge-partikkel-dualismen ble utviklet gjennom deres arbeid med ReleKvants læringsmoduler. Med denne overordnede problemstillingen formulerte jeg to forskningsspørsmål:

ReleKvant

- Hva kjennetegner elevenes forståelse av lys og bølge-partikkel-dualismen?
- Hva bidrar til elevens læringsprosess i deres arbeid med ReleKvant-moduler?

Elevenes språkbruk ble gradvis mer presis i løpet av arbeidet med ReleKvant-modulene, i tillegg til at elevene ble oppmerksomme at det ikke gir mening, innenfor klassisk fysikk, å tildele partikler bølgelengde og frekvens. Jeg oppfatter dialogen elevene hadde parvis etter åpningsspørsmålet som svært sentral i denne prosessen. Datamaterialet viste at via denne dialogen ble flere av elevene gjort oppmerksomme på at deres klassiske forståelsen av bølger og partikler ikke ga mening når de skulle argumentere for lysets dualistiske natur.

Videre ble elevene presentert for de to forsøkene som favoriserte lysets partikkelegenskaper, før ringen ble sluttet ved introduksjon av elektronets bølgenatur og de Broglies formel. Det var særlig under modulen *uskarphet og partiklers bølgeegenskaper* at elevbesvarelsene økte betraktelig i kvalitet, ved at elevene kom opp på et faglig nivå der de var i stand til å forankre kunnskapen om bølgenes dualistiske natur i eksperimentelle resultater. Datamaterialet viser at denne kunnskapsøkningen skyldes denne modulens bruk av video som modalitet, i tillegg til at elevene fikk kommentere disse videoene og trekke ut det viktigste fysikkfaglige innholdet fra disse filmene.

Selv om elevene opparbeidet seg kunnskaper om fotonenes og elektronenes partikkelnatur, ble ikke disse kunnskapene benyttet til å sette kvantefysikken i

korrekt sammenheng med den klassiske fysikken. Resultatene fra denne undersøkelsen viser at elevene, etter fullført undervisning, sitter igjen med oppfatningen av at lys er bølger i klassisk fysikk, mens de er partikler i kvantefysikk.

## 9 Litteraturliste

- Adams S., Allday J. (2000). *Advanced Physics*. New York: Oxford University Press.
- Angell, C., Bungum, B., Henriksen, E. K., Kolstø, S. D., Persson, J., & Renstrøm, R. (2011). *Fysikkdidaktikk*. Kristiansand: Høyskoleforlaget.
- Angell, C., & Lian, B.E. (2009). *Fysiske størrelser og enheter – navn og symboler*. Oslo: Universitetsforlaget.
- Ayene, M., Kriek, J. & Damtie, B. (2011). Wave-particle duality and uncertainty principle: Phenomenographic categories of description of tertiary physics students' depictions. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research* 7.
- Boas, M. L. (2006). *Mathematical Methods in the Physical Sciences*. New York: Wiley.
- Bransden, B. H., Joachain C. J. (2000). *Quantum Mechanics*. Harlow: Pearson/Prentice Hall.
- Bungum, B., Henriksen E. K., Angell, C., Tellefsen, C. W., & Bøe, M. V. (2015). ReleQuant- Improving teaching and learning in quantum physics through educational design research. *NorDina*, 11(2), 153-168.
- Cheong, Y. W. & Song, J. (2013). Different levels of meaning of wave-particle duality in a suspensive perspective on the interpretation of quantum theory. *Science & Education*, 23(5), 1011-1030.
- Cohen, L., Manion, L. & Morrison, K. (2007). *Research methods in education*. London: Routledge.
- Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. (1964). *The Feynman Lectures on Physics*. Boston: Pearson/Addison-Wesley.
- Feynman, R. P. (1967). *The Character of Physical Law*. Cambridge: MIT Press.
- Fischler, H. & Lichtfeldt, M. (1992). Modern physics and students' conceptions. *International Journal of Science Education*, 14(2), 181-190.
- Griffiths, D. J. (1999). *Introduction to electrodynamics*. New Jersey: Pearson/Prentice Hall.
- Griffiths, D. J. (2005). *Introduction to quantum mechanics*. Upper Saddle River, N.J.: Pearson/Prentice Hall.
- Hemmer, P. C. (2005). *Kvantemekanikk*. Trondheim: Tapir Akademisk Forlag.

- Henriksen, E. K., Bungum, B., Angell, C., Tellefsen, C. W., Frågåt, T., & Bøe, M. V. (2014). Relativity, quantum physics and philosophy in the upper secondary curriculum: Challenges, opportunities and proposed approaches. *Physics Education*, 49(6), 678–684.
- Ireson, G. (2000). The quantum understanding of pre-university physics students. *Physics Education*, 35(1), 15-21.
- Jackson J. D. (1999). *Classical Electrodynamics*. New York: Wiley.
- Jacobsen, D. I. (2005). *Hvordan gjennomføre undersøkelser? – innføring i samfunnsvitenskapelig metode*. Kristiansand: Høyskoleforlaget.
- Jerstand, P., Sletbak, B., Grimenes, A. A., & Renstrøm, R. (2008). *Rom, stoff, tid: Fysikk 2: grunnbok: studiespesialiserende program*. Oslo: Cappelen Damm.
- Kreyszig, E. (2006). *Advanced engineering mathematics*. Hoboken, N.J.: Wiley.
- Monk, M. (1994). Mathematics in physics education: a case of more haste less speed. *Physics Education* 29, 209–211.
- Müller, R., & Wiesner, H. (2002). Teaching quantum mechanics on an introductory level. *American Journal of physics*, 70(3), 200-209.
- Oldervoll, T., Orskaug, O., Vaaje, A., Hanisch, F., & Hals, S. (2008). *Sinus R2: grunnbok i matematikk : studiespesialiserende program*. Oslo: Cappelen.
- Olsen, R. V. (2002). Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: a study in Norway. *International Journal of Science Education*, 24(6), 565–574.
- Polkinghorne J. (2002). *Quantum Theory: A Very Short Introduction*. New York: Oxford University press.
- ReleKvant (2014). Hentet 17.11.2014, fra [www.mn.uio.no/fysikk/forskning/prosjekter/relekvant/](http://www.mn.uio.no/fysikk/forskning/prosjekter/relekvant/).
- Shankar, R. (1994). *Principles of Quantum Mechanics*. New York: Plenum Press.
- Singh, C., Belloni, M., & Christian, W. (2006). Improving students understanding of quantum mechanics. *Physics Today*, 59(89), 43-49.
- Statistisk Sentralbyrå (2011). *Jenter og realfag i videregående opplæring. Seksjon for utdanningsstatistikk*. Oslo: Statistisk Sentralbyrå.
- Steinberg, R. N., & Oberem, G. E. (2000). Research-based Instructional Software in Modern Physics. *Journal of Computers in Mathematics and Science Teaching* 19(2), 115-136.

- Steinberg, R., N. (2011). *An Inquiry into Science Education, Where the Rubber Meets the Road*. Rotterdam: Sense Publishers.
- Styer, D. F., Balkin, M.S., Becker K. M., Burns M. R., Dudley C. E., Forth S. T., ... C.T., Wotherspoon. (2001). Nine formulations of quantum mechanics. *Am. J. Phys.* 70(3), 288-297.
- Tegmark, W., & Wheeler, J. A., (2001). 100 Years of the Quantum. *Scientific American*, februar, 68-75.
- Utdanningsdirektoratet (2015). Læreplan i fysikk - programfag i studiespesialiserende utdanningsprogram- kompetansemål. Hentet 13.02.2015, fra [www.udir.no/kl06/FYS1-01/Kompetansemaal/?arst=1858830315&kmsn=46633111](http://www.udir.no/kl06/FYS1-01/Kompetansemaal/?arst=1858830315&kmsn=46633111).
- Viten (2015). Undervisningsmoduler ReleKvant. Hentet 11.03.2015, fra <http://www.viten.no/vitenprogram/vis.html?tid=2068103>.
- Özcan, Ö. (2010). How do the Students Describe the Quantum Mechanics and Classical Mechanics?. *Latin-American Journal of Physics Education*, 4(1), 22-26.



