

Anders Huseby

Observasjon i kvantefysikk:

Ein studie av elevforståingar

Masteroppgåve i Fysikk og matematikk - sivilingeniør/
masterprogram

Veileder: Berit Bungum

Desember 2018

Anders Huseby

Observasjon i kvantefysikk:

Ein studie av elevforståingar

Masteroppgåve i Fysikk og matematikk - sivilingeniør/
masterprogram
Veileder: Berit Bungum
Desember 2018

Noregs teknisk-naturvitskaplege universitet
Fakultet for naturvitenskap
Institutt for fysikk

Føreord

Eg vil takke Berit Bungum for uvurderleg rettleiing i arbeidet med denne oppgåva.

Takk til mor og far for god kveik, og til søster og bror for gode tips.

Trondheim desember 2018

Anders Huseby

Samandrag

Denne oppgåva er gjort i samband med forskings- og utviklingsprosjektet ReleKvant, som tek for seg elevar si forståing av moderne fysikk, og utviklar nettbaserte læringsressursar innan temaet som er tilpassa kompetansemål for programfaget Fysikk 2 i den vidaregåande skule.

Oppgåva sett ut for å undersøkje korleis elevar forstår *observasjon* i kvantefysikk. Det er eit tema som i liten grad er fokusert på av læreplanar og undervisningsmateriell, og resultata viser at observasjon i kvantefysikk er eit tema kor elevane har vanskar. Elevar sine førestillingane av omgrepet kjem ofte frå ein kvardagsleg kontekst, og kan prege korleis dei forstår viktige eksperiment og fenomen i kvantefysikk. Det vert foreslått eit rammeverk for systematisering av elevforståingar knytt til observasjon i kvantefysikk.

Oppgåva presenterer òg eit undervisningsopplegg med forslag til korleis temaet kan verte undervist for elevar. Det empiriske grunnlaget for oppgåva er basert på opptak av elevdialogar, fokusgruppeintervju og utprøving av undervisningsopplegg.

Abstract

This thesis is done in collaboration with project ReleQuant, which is a design-based research program. ReleQuant is aiming to investigate students understanding of modern physics and develop web-based learning resources for use in secondary school physics classes.

The goal of this thesis is to examine the students' understanding of *observation* in quantum physics. The results from this study shows that this is a topic where students have considerable challenges. Students are often influenced by an everyday understanding of the concept of observation, and therefore thinks of it as synonymous with *to watch*. This leads to difficulties in explaining how the act of observing can affect outcomes in experiments in quantum physics.

A framework to help categorize students' understanding of observation in quantum physics is proposed in this thesis. This may be a tool for both teachers and researchers to help become aware of possible understandings of the topic. Additionally, a lesson plan has been proposed that aims to give students solid understanding of observation in quantum physics.

Innholdsoversyn

1	Innleiing.....	1
2	Teori.....	3
2.1	Grunnleggjande kvantefysikk	3
2.1.1	Behov for ein ny fysikk.....	3
2.1.2	Dobbeltpalteeksperimentet.....	5
2.1.3	Bølgjefunksjon og Born sin sannsynsinterpretasjon.....	8
2.1.4	Observasjon av elektron.....	10
2.1.5	Heisenbergs uskarpleiksrelasjon og observasjon.....	12
2.1.6	Superposisjon og kollaps av bølgjefunksjonen.....	14
2.1.7	Tolking av kvantefysikk	17
2.1.8	Københavntolkinga.....	17
2.1.9	Schrödingers katt og realisme mot anti-realisme.....	19
2.1.10	Kva er ei måling?	20
2.2	Kvantefysikk i skulen.....	21
3	Bakgrunn: ReleKvant-prosjektet og undervisningsressursar	25
3.1	ReleKvant-prosjektet.....	25
3.2	Undervisningsmateriell	25
4	Tidlegare resultat frå studien	29
5	Metode.....	35
5.1	Fokusgruppeintervju.....	35
5.2	Analysemetode	37
5.3	Utprøving av undervisningsopplegg	38
6	Resultat og drøfting	39
6.1	Første fokusgruppe – vidaregåande skule A	39

6.2	Fokusgruppe 2– vidaregåande skule A	45
7	Undervisningsopplegg	51
7.1	Læringsmål og oppbygning.....	51
7.2	Erfaringar frå utprøving på vidaregåande skule B.	57
7.3	Avsluttande kommentarar.	61
8	Diskusjon.....	63
8.1	Korleis forstår elevar i Fysikk 2 observasjon i kvantefysikk?	63
8.1.1	Førestillingar kring omgrepet observasjon	63
8.1.2	Populærkultur: Kvantefysikk som vanskeleg og uforståeleg.....	67
8.1.3	Dr. Quantum: Kvantefysikk som eit mysterium	69
8.1.4	Ei systematisering av elevforståingar	71
8.2	Korleis kan undervisning og undervisningsressursar bidra til å betre elvar si forståing? 75	
9	Konklusjon.....	79
10	Litteraturliste.....	81
11	Vedlegg.....	85

1 INNLEIING

Kvantefysikk er eit utfordrande tema for elevar. Partiklar sin bølgenatur, Heisenbergs uskarpleiksrelasjon og samanfiltra foton er nokre av dei tema som den norske læreplanen, Kunnskapsløftet, legg opp til at elevar i Fysikk 2 skal kunne syne ei kvalitativ forståing av (Utdanningsdirektoratet, 2006). Kvantefysikk er utfordrande fordi det fundamentalt bryt med kva elevane har lært i klassisk fysikk, og korleis ein skal tolke teorien er enda uavklart (Bungum, Bøe & Henriksen, 2018).

Denne oppgåva er knytt til forskings- og utviklingsprosjektet ReleKvant, og er ei vidare utvikling av ei mindre oppgåva som eg tidlegare gjorde i samband med ReleKvant (Huseby, 2016). Her fann eg at elevar hadde utfordringar med omgrepet *observasjon* i kvantefysikk. Denne masteroppgåva vil kaste meir ljøs over dette temaet, som i liten grad er omtala i læreplanar og undervisningsmateriell.

Ein kvar teori som tek føre seg å beskrive verkelegheita og ønskjer å føreseie utfall av eksperiment, vil nødvendigvis måtte støtte seg til observasjon gjennom målingar. I den klassiske fysikken er ein sjølvstøtt oppteken av å redusere feilkjelder og gjere nøyaktige målingar, men på sitt mest fundamentale nivå har observasjon likevel berre ein ganske triviell funksjon som ei avlesing av eksisterande storleikar. I kvantefysikken derimot er stoda annleis, då målingar har ei mykje meir aktiv rolle her. Denne skilnaden vil nødvendigvis føre med seg nokre utfordringar for elevar som skal byrje å lære seg kvanteteori.

Denne oppgåva omfattar ei undersøking av elevforståingar kring observasjon i kvantefysikk med dei følgjande to forskingsspørsmål:

- (i) *Korleis forstår elevar i Fysikk 2 observasjon i kvantefysikk?*
- (ii) *Korleis kan undervisning og undervisningsressursar bidra til å betre elevar si forståing?*

Forskingsspørsmål (i) vil verte belyst ved å analysere elevdialogar og fokusgruppeintervju. Basert på desse resultatane har eg utvikla eit undervisningsopplegg, med fokus på observasjon i kvantefysikk. Dette dannar grunnlaget for å svare på forskingsspørsmål (ii).

Oppgåva byrjar med ein teoridel innehaldande fysikkfagleg og fagdidaktisk teori i kapittel 2. ReleKvant-prosjektet med tilknytta undervisningsressursar, og resultat frå tidlegare oppgåve kor elevdialogar vart analysert vert presenterte i høvesvis kapittel 3 og 4. Kapittel 5 skildrar metodar som vart nytta for å svare på forskingsspørsmåla i oppgåva, og vert følgt av resultat frå fokusgruppeintervju og undervisningsopplegg i kapitla 6 og 7. Oppgåva vert avslutta med ein diskusjon kring elevar si forståing av observasjon i kvantefysikk, og korleis undervisning og undervisningsressursar kan bidra til å betre elvar si forståing kring temaet.

2 TEORI

I dette kapittelet vil nokon viktige teoretiske aspekt ved kvantefysikk verte presenterte, etterfølgt av ein presentasjon av didaktisk forskning knytt til undervisning av kvantefysikk. Kapittelet tek i hovudsak føre seg ei kvalitativ framstilling, i samsvar med kompetansemåla i kvantefysikk i Fysikk 2 i den vidaregåande skulen som òg er av kvalitativ karakter. Delar av den fysikkfaglege presentasjonen er teke frå prosjektoppgåva som eg skreiv i forkant av arbeidet med denne masteroppgåva.

2.1 GRUNNLEGGJANDE KVANTEFYSIKK

2.1.1 Behov for ein ny fysikk

På slutten av 1800-talet var mange fysikarar sjølvtrygge på at dei største og viktigaste oppdagingane innanfor fysikken var gjorde, og at det berre stod igjen små detaljar før fysikken gav ei fullgod beskriving av verda. Den klassiske fysikken hadde vore ein av berebjelkane i den industrielle revolusjon, og den var og er brukande til å beskrive enormt mange ulike system (Tegmark & Wheeler, 2001). Denne sjølvtryggleiken kan oppsummerast i dette sitatet frå den engelske fysikaren og matematikaren James Clerk Maxwell i 1871:

...in a few years, all the great physical constants will have been approximately estimated, and [...] the only occupation which will then be left to the men of science will be to carry these measurements to another place of decimals

(sjå til dømes Tegmark & Wheeler, 2001)

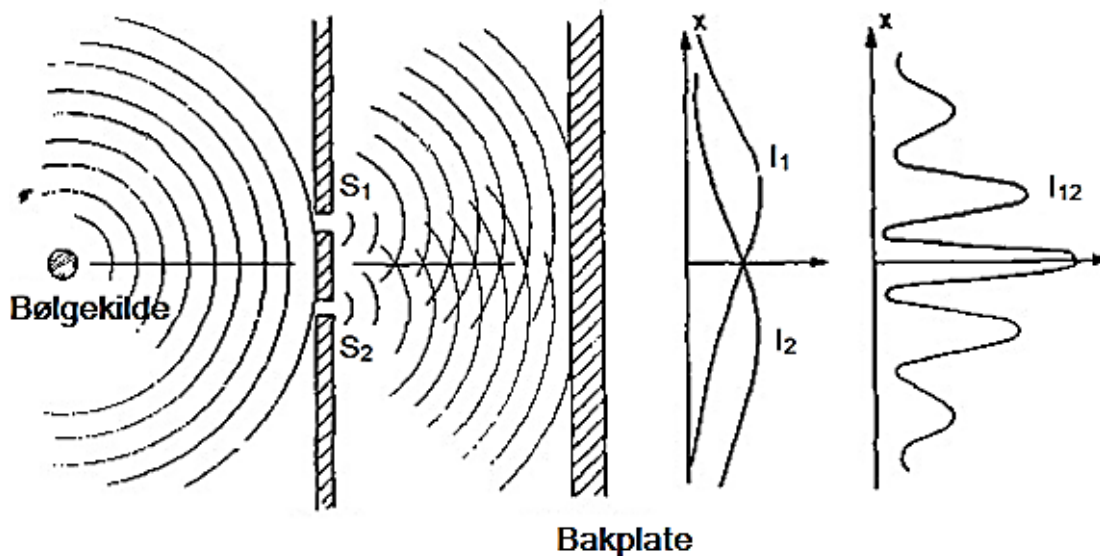
Det skulle vise seg at nokre av desse små detaljane som gjenstod, blant anna strålingsemittans for svarte lekamar, der dei klassiske berekningane gav helt andre resultat enn kva som vart observert i eksperimenta, ville krevje ein heilt ny fysikk (Hemmer, 2000).

Eit svart lekam er eit ideelt objekt som absorberer all innfallande stråling. I likskap med alle andre lekamar vil òg den svarte lekamen emittere elektromagnetisk stråling, der frekvens og intensitet er avhengig av lekamen sin temperatur. Klassiske berekingar gjev berre samsvar for lange bølgjelengder. Ved kortare bølgjelengder, slik som ultrafiolett ljøs, divergerer den klassiske kurva. Eit resultat som er fysisk umogeleg, då dette medfører ein uendeleg energistraum. Dette er opphavet til det som vert kalla ultrafiolettkatastrofen (Hemmer, 2000).

I år 1900 publiserte den tyske fysikaren Max Planck ein formel som stemte overeins med målingane, men formelen baserte seg på ein hypotese så absurd at han sjølv distanserte seg frå den i fleire år (Tegmark & Wheeler, 2001), nemleg at strålingsenergien ved ein gitt frekvens ν var kvantisert, på det vis at den berre kunne ha dei diskrete verdiane $E = 0, h\nu, 2h\nu, 3h\nu, \dots$ der h er Plancks konstant (Hemmer, 2000). Denne hypotesa viste seg å vere særst nyttig for å forklare ei rekkje fenomen, blant anna fotoelektrisk effekt kor ljøs som fell inn mot ei metallplate kan slå laus elektron. Sidan ljøs vart sett på som eit bølgefænomen så skulle ein tru at det var intensiteten til ljøset som var utslagsgjevande for om det var nok energi til at elektron kunne verte slått laus, men det viste seg heller at det var frekvensen som var avgjerande. Blant anna så er det slik at under ein gitt frekvens ν_0 vil ingen elektron verte slått laus, same kor høg intensiteten til ljøset er (Hemmer, 2000). Dette fekk Albert Einstein til å postulera at elektromagnetisk stråling består av foton, diskrete kvant med energi avhengig av frekvensen $E = h\nu$, i sitt arbeid om den fotoelektriske effekt.

Vidare evidens for partikkelnaturen til elektromagnetisk stråling vart lagt frem av Arthur Compton som viste at endring i frekvens og retning til stråling sendt gjennom ein folie kunne forklarast som samanstyrt mellom partiklar. Louis de Broglie viste at rørslemengde p og bøljelengde λ til eit foton heng saman via relasjonen $\lambda = \frac{h}{p}$, der h er Plancks konstant. De Broglie postulerte at elektron som tradisjonelt hadde vorte sett på som partiklar òg hadde bøljeeigenskapar, noko som seinare vart verifisert då ein såg at elektron danna diffraksjonsmønster, eit bølgefænomen, i møte med krystallar. Dette er i dag er ein etablert metode for å bestemme strukturen til molekyl. Involvert i arbeidet, var blant George P. Thomson som saman med Clinton Davisson fekk nobelprisen i fysikk for oppdaginga av bøljeeigenskapane til elektron. Ironisk nok hadde far til George. P. Thomson, Joseph J. Thomson, 31 år tidlegare fått nobelprisen for å vise at elektron var partiklar (Baggott, 2004).

2.1.2 Dobbeltspalteeksperimentet



Figur 1: Dobbeltspalteeksperimentet med klassiske bølger. Teksten på bilete er omsett til norsk (Feynman, Leighton et al. 2006).

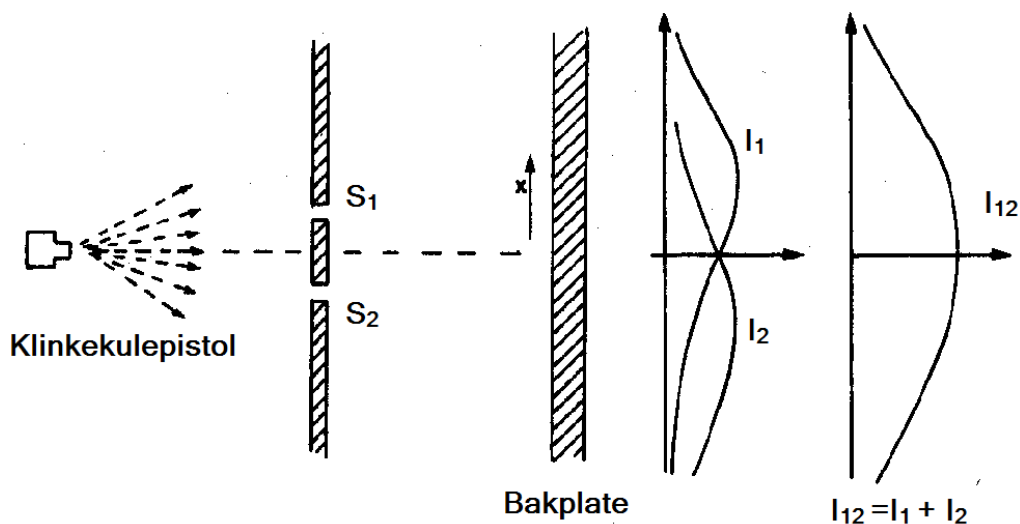
Ein kan seie at desse arbeida, blant fleire på tidleg 1900-talet, var starten på kvantefysikken. For vidare å illustrere kvantefysikken sin eigenart er det nyttig å vise til eksperimenter, og då er det spesielt dobbeltspalteeksperimentet som er ein klassikar. Eksperimentet der monokromatisk ljøs vert sendt gjennom ei dobbelspalte og dannar eit interferensmønster vart først gjennomført av Thomas Young på byrjinga av 1800-talet, og vart den gong brukt som eit argument for ljøset sin bølgenatur (Hemmer, 2000). Som nemnt i førre kapittel er det i dag kjent at ljøs består av foton, men det er heilt umogeleg å forklara dobbeltspalteeksperimentet om ein berre ser på foton som partiklar i klassisk forstand. Det same vil vere tilfellet for elektron, som i tråd med De Broglie si hypotese oppfører seg på same måte som foton.

Vidare i oppgåva skal me sjå på dobbeltspalteeksperimentet med elektron, men før ein gjer forsøk med elektron er det nyttig å sjå korleis klassiske partiklar og bølger oppfører seg i eksperimentet, illustrert ved klinkekuler og vassbølger.

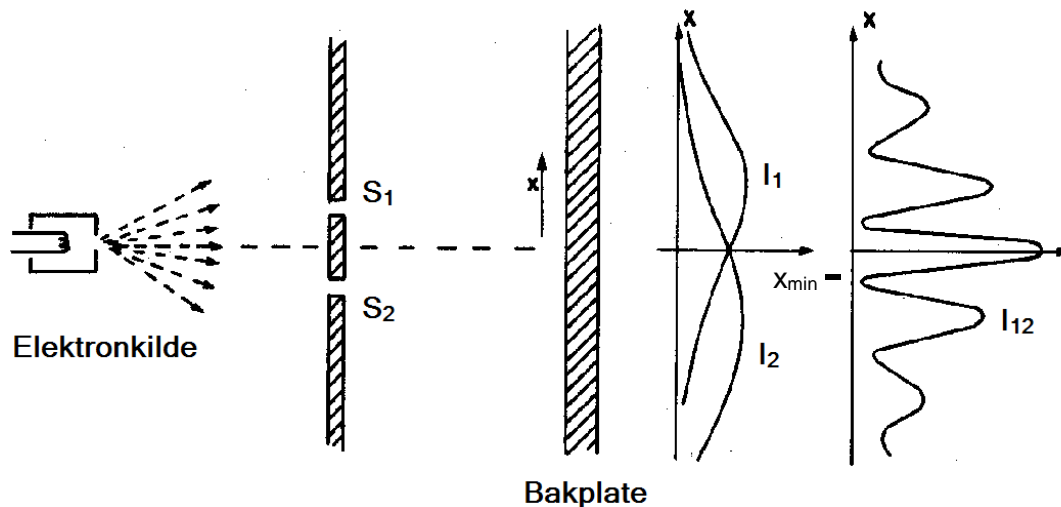
I tilfellet med vassbølger er ei bølgekjelde plassert langt vekk frå spaltene slik at bølgjene er plane og treffer normalt på spaltene. Ved å berre holde den eine spalta S_1 open vil spalteopninga fungera som ei ny kjelde som sender ut sirkulære bølger. Intensiteten heng saman med amplituden, og ved sjå kor mykje vatnet gynger opp og ned forskjellige stader på bakplata kan ein

lage ei intensitetsfordeling I_1 . Ei tilsvarande fordeling I_2 vil vere gjeldande om ein gjer det same med S_2 . Om ein let begge spaltene stå opne vil bølgiene interferera med kvarandre slik at eit interferensmønster I_{12} kjem fram. Det vil seie at der bøljetoppar frå dei to bølgiene møtes vil ein få konstruktiv interferens og høg intensitet, og der bøljetoppar frå den eine bølga treff bølgedalar frå den andre, vil ein få destruktiv interferens, og låg intensitet. Intensitetsfordelinga I_{12} er difor ikkje lik summen av I_1 og I_2 .

Om ein byter ut bølgekjelda med ein pistol som skyt klinkekuler mot spaltene vil ein få eit anna resultat for intensitetsfordelinga. Intensiteten er definert til å vere talet på klinkekuler som treff eit gitt punkt på bakplata per tidseining. For å unngå forstyrringar er skottakta så låg at kulene kjem ei og ei, og difor ikkje kan kollidere med kvarandre. Klinkekulene er òg veldig solide slik at dei ikkje kan knusast på vegen og treffe bakplata i mange bitar. Intensiteten av treff er høgast på bakplata like bak spaltene og er fallande til lenger bort frå spaltene ein beveger seg. Intensitetsfordelinga I_{12} er summen av alle kulene som fór gjennom spalta S_1 , pluss dei som fór gjennom spalta S_2 . Dette er einstyndande med intensiteten av $I_1 + I_2$, og er eit resultat utan interferens. At det ikkje er noko interferens er som forventa, i motsetnad til bølger er klinkekuler lokaliserte i rommet, og let seg difor ikkje påverke av om den andre spalta er open eller lukka (Shankar, 1994).



Figur 2: Dobbeltspalteeksperimentet med klassiske partiklar (Feynman, Leighton et al. 2006).



Figur 3: Dobbeltspalteeksperimentet med elektron (Feynman, Leighton et al. 2006).

Så langt har resultatene vore innanfor det ein forventar i den klassiske fysikken. Om ein nå gjer det same eksperimentet på mikroskopisk nivå og bytar ut kulekuler med elektron, vil andre effektar komme til syne. På same måte som med kulekulene vert eit og eit elektron skote mot spaltene slik at ein kan sjå vekk frå mogelegheitene av at elektrona kan påverke kvarandre. Ved å halde den eine spalta open og den andre lukka liknar intensitetsfordelingane I_1 og I_2 på tilfellet med kulekulene.

Ein anna likskap er at elektrona treff bakplata som diskrete og lokaliserte partiklar. Framleis ser dette ljost ut med tanke på elektron som partiklar i klassisk forstand. Eit elektron som ein lokalisert partikkel gjer det enkelt å følgje same argumentet som med kulekuler, om at kvart enkelt elektron må ha gått igjennom den eine eller den andre spalta før det treff bakplata, og at den totale intensitetsfordelinga difor må vere summen av intensitetsfordelingane frå dei to spaltene, $I_1 + I_2$. Ved å opne begge spaltene ser ein likevel at resultatet ikkje er som forventa, det dannar seg heller eit interferensmønster liknande resultatet frå forsøket med vassbølger.

Ved å sjå nærare på eit punkt x_{\min} som svarar til eit minimum i interferensfordelingane kan ein illustrere kor urimeleg dette resultatet verkar. Når begge spaltene er opne landar det færre elektron i dette punktet enn for dei tilfella kor berre S_1 eller S_2 var opne. I ljøs av elektron som klassiske partiklar er det uforståeleg at det å opne ei ekstra spalte vil redusere talet på elektron som treff punktet x_{\min} (Shankar, 1994). Viss elektrona følgjer veldefinerte banar gjennom den eine eller andre spalta så må talet på elektron som treff eit gitt punkt vere lik talet som passerte gjennom den

eine spalta summert med talet som passerte gjennom den andre. Sidan dette ikkje er tilfellet kan ein ikkje anta at elektron oppfører seg som lokaliserte partiklar (Feynman, Leighton & Sands, 2006).

2.1.3 Bølgjefunksjon og Born sin sannsynsinterpretasjon

Dobbelspalteeksperimentet som beskrive over viser at det er fundamentale skilnadar mellom elektron og klassiske kulekuler. Elektronen viser partikeleigenskapar ved at dei treff bakplata lokalisert til punkt, samstundes som dei fordeler seg på ein slik måte at det vert danna eit interferensmønster. For å kunne beskrive resultatane frå dobbelspalteeksperimentet og andre eksperiment i kvantefysikk, må ein altså kombinere dei uforlikelege klassiske konseptane bølgjer og partiklar. Dette vert ofte omtala som bølgje-partikkel-dualitet, og heng saman med det som Niels Bohr kalla komplementaritet (Baggott, 2004), noko som vert tema seinare i denne teoridelen.

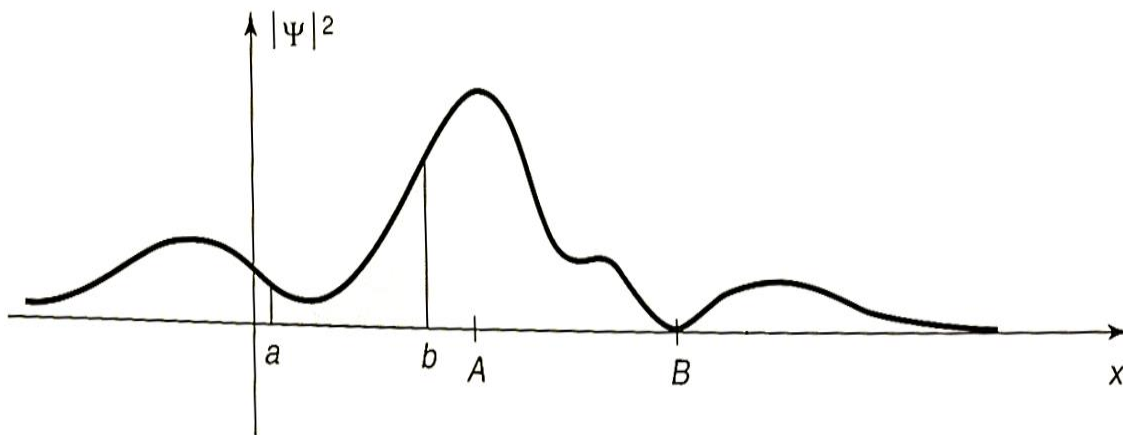
I den klassiske fysikken så har ein partikkel til ei kvar tid ei bestemt rørslemengde p og ein bestemt posisjon x som endrar seg deterministisk i forhold til Newtons lover. Determinisme gjer at om rørslemengda og posisjonen er kjend vil ein kunne rekne på kor ein partikkel kom frå og kor den er på veg. Dette betyr i effekt at ein kan sjå inn i framtida og fortida, og gjer mellom anna at det er kjend at Halley sin komet neste gong kjem til å passera jorda den 28. juni 2061, 76 år sidan førre gang (Store Norske Leksikon, 2009b). I kvantefysikken nyttar ein ikkje posisjon og moment for å beskrive ein partikkel, men heller ein bølgjefunksjon ψ . Bølgjefunksjonen oppfyller Schrödingerlikninga, som kan sjåast på som ein kvantefysisk analogi til Newtons lover:

$$H(t) |\psi(t)\rangle = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(t)\rangle$$

Der H er hamiltonoperatoren, i er den imaginære eininga, \hbar er den reduserte planckkonstanten og t er tid. Likninga, som ber Erwin Schrödinger sitt namn, er på forma til ein bølgjelikning. Det vil seie ein differensiallikning som elles i fysikken vert nytta til å beskrive korleis bølgjer beveger seg. Schrödinger meinte difor at kvantefysikk i si grunnform var ein bølgjeteori, og at bølgjefunksjonen ψ skildra ein underliggjande fysisk realitet. Dette medførte fleire problem, mellom anna fordi funksjonen er kompleks, altså basert på imaginære tall. Max Born foreslo i 1926 sannsynsinterpretasjonen av bølgjefunksjonen som løyste mange av vanskanane som Schrödinger sitt syn skapte (Baggott, 2004). Sannsynsinterpretasjonen inneber å sjå på bølgjefunksjonen som eit matematisk konstrukt som i seg sjølv ikkje har noko fysisk betyding,

men der kvadratet av absoluttverdien $|\psi|^2$ er knytt til sannsynet for at eit kvantesystem oppheld seg i ein gitt *tilstand*. Med *tilstand* meinast alle målbare fysiske storleikar som høyrar til eit gitt system (Store norske leksikon, 2009a). Til dømes vil det for ein partikkel inkludera posisjon, moment og spinn. Om ein ønskjer å finne posisjon til elektronet, vil $|\psi(x, t)|^2$ gje sannsynet for å finne elektronet i punktet x ved tid t , og integralet $\int_a^b |\psi(x, t)|^2 dx$ gjev sannsynet for at partikkelen oppheld seg mellom a og b ved tid t .

Sjølv om ein kjenner den eksakte bølgefunksjonen til eit system, er det likevel ikkje mogleg å kome med noko anna enn sannsyn, for kva utfallet til ei måling vil vere. Sannsyn vert òg brukt i fleire område innanfor klassisk fysikk, for eksempel statistisk fysikk kor det store talet partiklar og vekselverknadar dei imellom gjer det nesten umogeleg med analyser på ei annan måte. Det er likevel ein fundamental skilnad, då sannsyn i kvantefysikk ikkje reflekterer ei ukunne for ein underliggande fysisk realitet, slik det vil kunne gjere i klassisk fysikk, men at det er naturen i seg sjølv som er basert på sannsyn. Dette gjer at sjølv om Schrödinger-likninga beskriv deterministiske utviklingar av bølgefunksjonen, så er resultat av målingar bunde opp til sannsynsfordelinga gitt av $|\psi|^2$ og difor ikkje deterministiske.

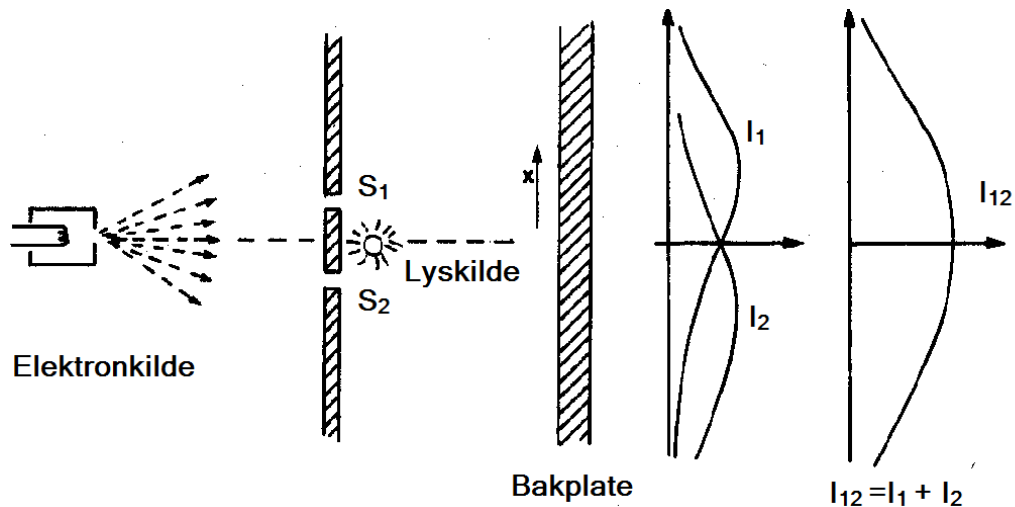


Figur 4: $|\psi(x)|^2$ der ψ er ein tilfeldig bølgefunksjon. Det er høgt sannsyn for å finne partikkelen rundt punktet A, og lite sannsyn å finne han rundt punktet B. (Griffiths, 2005)

Tilbake til dobbeltspalteeksperimentet vil kvart elektron vere beskrive av ein bølgefunksjon ψ . På bakplata (Figur 3) vil $|\psi(x)|^2$ danne eit interferensmønster. Dette gjer seg utslag i at elektron vil ha høgare sannsyn for å treffe i område med konstruktiv interferens (Hemmer, 2000). Viss bølgefunksjonen hadde vore ei klassisk bølge ville kvart elektron gitt eit svakt bilete av interferensmønsteret på bakplata. I staden sett kvart elektron eit punkt på bakplata og interferensmønsteret vil difor først verte synleg etter at mange elektron, alle saman beskrivne av ein identisk bølgefunksjon Ψ , har treft bakplata. Dette resultatet kan knytast opp til klassisk elektromagnetisk teori med ein intens straum av elektron eller foton mot dobbelspaltene. På grunn av det høge partikkeltalet så vil det sjå ut som ein kontinuerleg straum av energi kor intensitetsfordelinga med ein gong vil ta same form som sannsynsfordelinga, og ein er tilbake til klassisk elektromagnetisk teori, og eksperimentet Young utførte som eit bevis for ljuset sin bølgenatur. Så lenge ikkje stråla med foton eller elektron er ekstremt svak så vil altså sannsynsaspektet verte gøymt i mengda (Shankar, 1994).

2.1.4 Observasjon av elektron

Ved å sette opp ei ljuskjelde bak spaltene i dobbeltspalteeksperimentet, ønsker ein å sjå kva spalte kvart elektron går igjennom. Tanken er at ljuskjelda sender ut foton som i møte med eit elektron vil verte spreidd og resultere i eit lysglimt (Feynman et al., 2006). Ved å sjå eit lite lysglimt ved den eine eller andre spalta og deretter sjå på bakplata kor elektronet har sett eit merke, kan ein sjå kva spalte kvart enkelt elektron gjekk gjennom og kor det trefte. Etter kvart vert det klart at den totale fordelinga på bakplata I_{12} er den same som summen av elektronerna som fór gjennom dei eine spalta pluss den andre, $I_{12} = I_1 + I_2$. Dette gir det same resultatet som for dei klassiske klinkekulene, og interferensmønsteret som var til stades før ljuskjelda vart plassert er nå vekk. Ljuskjelda, som ein er avhengig av for å observera elektronerna, ser altså ut til å påverke elektronerna.



Figur 5: Dobbeltspalteeksperimentet med elektron og ljuskjelde (Feynman, Leighton et al. 2006).

Ei mogleg løysing på problemet kan vere å skru ned intensiteten på ljuskjelda, men dette vil berre redusere talet på foton, ikkje energien til kvart enkelt. Då vil nokre elektron kome seg forbi ljuskjelda utan å verte spreidde, og desse uoppdaga elektrona viser ei fordeling med interferens.

Ved heller å redusere frekvensen på ljuset, vert energien til kvart enkelt foton redusert ($E \propto \nu$), og som følgje av den minska frekvensen vil bølgjelengda til ljuset auke ($\nu \propto \lambda$). Ved gradvis å senke frekvensen og difor energien til kvart enkelt foton, vil ein gå frå ei fordeling utan interferens, og for deretter ved eit gitt punkt å kome tilbake til ei fordeling med interferens. Med eit slikt resultat skulle ein kanskje tru at oppgåva nå hadde fått ei løysing, sidan målinga ved spaltene ikkje påverkar interferensmønsteret, men det har oppstått et nytt problem. Den minste avstanden kor det er mogleg å skilje mellom to ulike punkt vert kalla for oppløysing, og heng saman med bølgjelengda (Store norske leksikon, 2015). Ved å auke frekvensen, og dermed bølgjelengda, vil oppløysinga verte dårlegare. Resultatet av dette er at lysglimta vert så store og diffuse at det ikkje lenger er mogleg å seie om elektronet kjem frå den eine eller andre spalta. Det skal vise seg at det er umogleg å ha kjennskap til kva spalte elektronet fór gjennom utan å øydeleggje interferensmønsteret. Ei måling som er sterk nok til å få ut noko informasjon av systemet, vil nødvendigvis påverke eit anna aspekt ved det same systemet (Susskind & Friedman, 2014).

2.1.5 Heisenbergs uskarpleiksrelasjon og observasjon

Eksperimentet ovanfor er i utgangspunktet ikkje særleg forskjellig frå tankeeksperimentet som Heisenberg i 1927 kom med for å illustrere uskarpleiksrelasjonen som har fått namnet hans. Eit mikroskop med ei ofseleg høg oppløysing, som difor nyttar energifulle foton med særst kort bølglengd, skal brukast til å måle posisjon og rørslemengde til eit elektron.

Et sentralt punkt er at for å kunne vite noko om eit system, må ein på ein eller anna måte interagere med det. Ein kan ikkje håpe å registrere eit eksperimentelt resultat utan ein interaksjon mellom det målte systemet og måleapparatet (Whitaker, 2006). Difor må eit kvart eksperiment bestå av systemet som skal studerast, eit måleapparat av noko slag, og eit samband mellom dei. I tankeeksperimentet til Heisenberg vil det respektivt vere elektronet som studieobjekt, mikroskopet som måleapparat og energifulle foton som sambandet dei imellom.

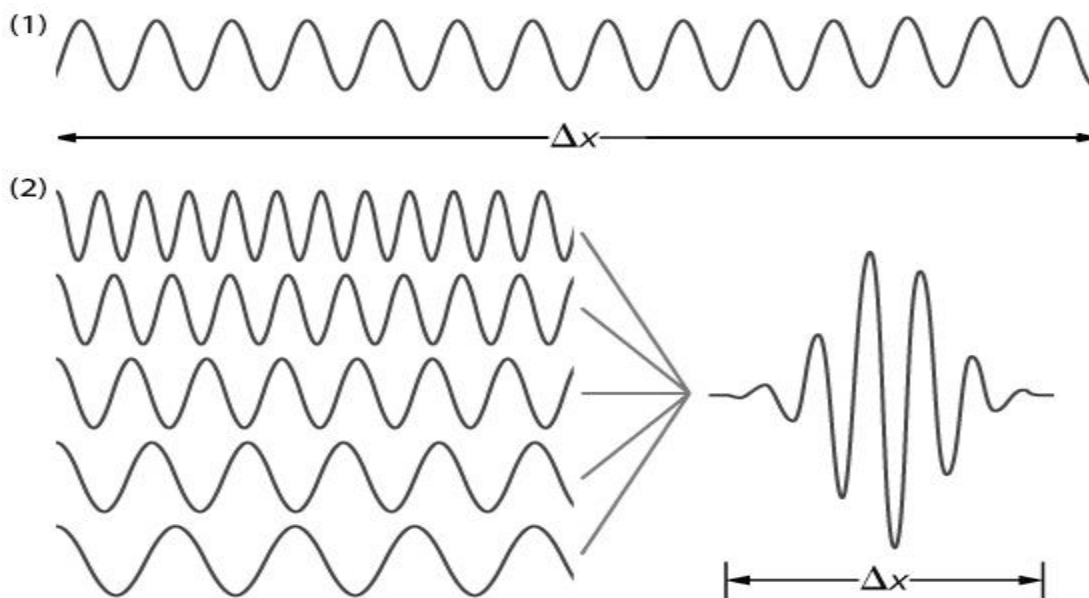
Ei kvantefysisk verd involverer diskontinuitet. Denne ideen måtte Max Planck ty til får å forklara strålingsemittans for svarte lekamar. Fysiske storleikar, slik som energi, kan ikkje ha heile spekteret av moglege verdiar, men berre ha gitte diskre verdiar. I ei klassisk verd er alt kontinuerleg, òg interaksjonane mellom system og måleapparat. Interaksjonen kan gå føre seg gjennom gravitasjon, elektromagnetiske felt eller anna, der det sentrale er at interaksjonen er kontinuerleg over tid. Ønsker ein å vite tilstanden til eit system ved ei gitt tid, må ein interagere med systemet med eit måleapparat. Ein kan spørje seg om ein påverknad som følgje av denne interaksjonen vil vere eit hinder for å få nøyaktig informasjon om systemet? I ei klassisk og kontinuerleg verd er ikkje dette noko problem, då ein kan nytte kontinuiteten i interaksjonen for å rekne tilbake på kor stor påverknaden var og såleis kome til eit nøyaktig resultat.

Går ein til det kvantemekaniske tilfellet må ein ta omsyn til diskontinuitet. Felte som i ei klassisk verd var idealisert til å vere kontinuerlege består nå av diskre pakkar med energi, foton. To objekt som interagerer elektromagnetisk vil difor utveksle energi og rørslemengde, ikkje kontinuerleg via eit klassisk elektromagnetisk felt, men på ein vilkårleg og uviss måte ved overgangar av foton mellom dei. I mikroskopet til Heisenberg-eksperimentet vil interaksjonen mellom elektronet og fotona i mikroskopet vere av eit slikt slag, og forsøk på å måle posisjonen til elektronet vil difor påverke rørslemengda til elektronet på ein uviss måte. Heisenberg konkluderte med at posisjon og rørslemengde aldri vil kunne målast eksakt samstundes, og fann at produktet av usikkerheit i posisjon og rørslemengde hadde ei nedre grense lik $\Delta p \cdot \Delta x = \hbar/2$. Størrelsar som ikkje kan

målast samstundes kallast komplementære, og energi og tid er eit anna kjend døme på eit slikt komplementært par (Whitaker, 2006).

Tolking av uskarpleiksrelasjonen som ei forstyrning som følgje av ei måling er å finne i mange lærebøker, mellom anna i ei skildring av dobbeltspalteeksperimentet frå *The Feynman Lectures on Physics* (Feynman et al., 2006) som er nytta i dette teorikapittelet. Bohr nytta òg lenge ei slik forstyrings-tolking av uskarpleiksrelasjon, men måtte til slutt forlate tolkinga som følgje av stadig meir raffinerte tankeeksperiment frå Albert Einstein.

Bohr argumenterte for at bølge-partikkel-dualiteten i seg sjølv gjorde det umogleg å kjenne dei komplementære størrelsane samstundes. Rørslemengda p og bølglengda λ til eit foton heng saman på denne måten: $\lambda = \frac{h}{p}$, ifølgje De Broglie sin teori om materiebølgjer. Dette gjer at dersom ein har ei nøyaktig definert rørslemengde vil òg bølglengda vere gitt. Matematisk kan ikkje ei enkelt bølge lokaliserast, men ved å leggje saman bølgjer med forskjellige bølglengder i superposisjon kan ein lage ein bøljepakke som får ein stadig meir definert posisjon jo fleire bølgjer som vert nytta. Jo meir definert posisjonen til bøljepakka er, dess større vert usikkerheit til bølglengda λ , og då følgjer det at usikkerheita i rørslemengda òg vert større.



Figur 6: Bøljepakke (2) bestående av fleire bølglengder har ein meir definert posisjon enn bølge (1) (cnx.org, 2017).

I følge Bohr så er altså uskarpleiksrelasjonen ein direkte følge av dei komplementære klassiske konseptane bølge og partikkel som ein må nytte for å skildre kvantefysiske objekt. Heisenberg sitt originale arbeid med forstyrrende målingar er mindre generelt og går heller ikkje heilt opp matematisk når det kjem til det som vert kalla svake målingar (Rozema et al., 2012). I seinare tid har det likevel vorte vist eit universalt gyldig samband mellom presisjon og forstyrring av målingar (Ozawa, 2003; Rozema et al., 2012).

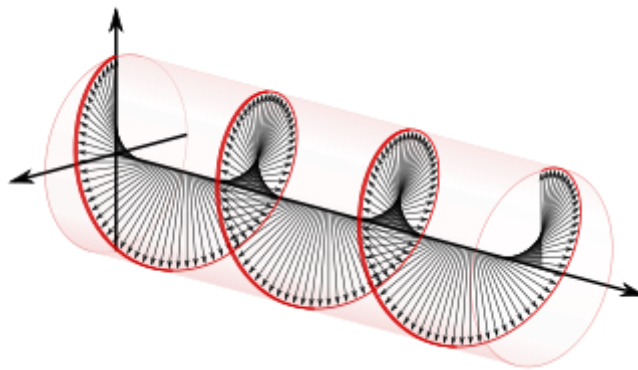
Uansett om uskarpleiksrelasjon til Heisenberg tolkast som forstyrrende målingar eller komplementaritet, spelar målingar ei fundamental rolle i kvantefysikk, noko som vil verte beskrive i neste avsnitt som handlar om kollaps av bølgefunksjonen.

2.1.6 Superposisjon og kollaps av bølgefunksjonen

Før me kjem til kollaps av bølgefunksjonen må me sjå litt nærare på prinsippet om superposisjon.

For å lage ein bølgepakke, slik som Figur 6 er eit døme på, vert ein eigenskap til bølger utnytta, nemleg at dei kan leggest saman i superposisjon. Det betyr at to bølger *A* og *B* kan leggest saman til å danna ei ny bølge *C*, kor amplituden til *C* svarar til summen av amplitudane som kvar bølge ville ha produsert individuelt.

På same vis som to eller fleire bølger kan leggest saman i klassisk fysikk kan òg to eller fleire ulike tilstandar leggest saman i kvantefysikk. Eit illustrativt døme på dette er polarisert ljus. Ljus kan vere lineært polarisert, vertikalt eller horisontalt, eller sirkulært polarisert (Figur 7). Sirkulær polarisasjon betyr for elektromagnetisk stråling at det elektriske feltet roterer perpendikulært på rørsleretninga, medan lineært polarisert betyr at det elektriske feltet berre svingar i ei bestemt retning.



Figur 7: Sirkulert polarisert lys (Wikipedia contributors, 2018)

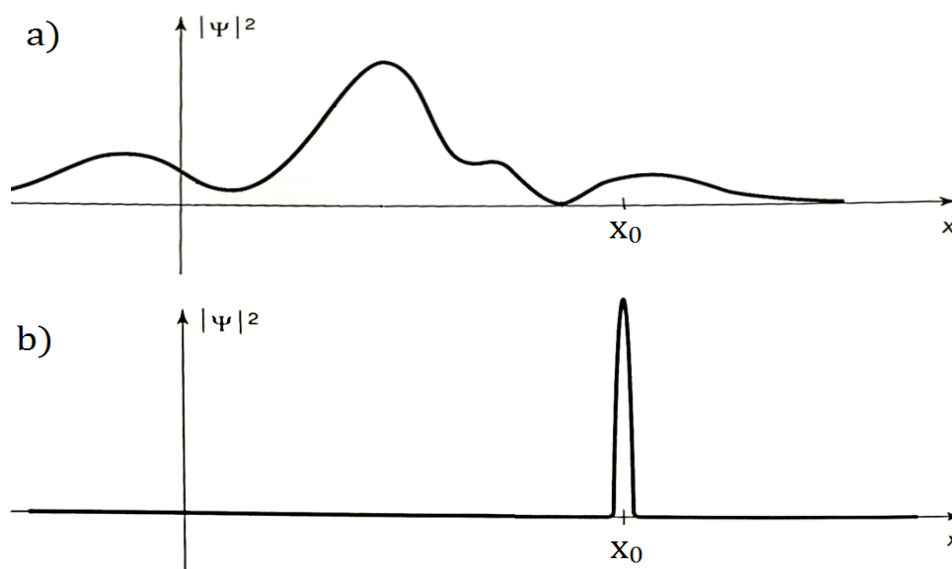
Ein kalsittkrystall kan nyttast som eit slags polariseringsfilter då den har brytingsindeks som er ulik i dei forskjellige aksane i krystallplanet. Dette gjer at vertikalt og horisontalt polarisert lys møter forskjellig brytingsindeks, og lys bestående av begge deler vil verte skilt inn i to stråler avhengig av polarisasjonsretning. Skin sirkulært polarisert lys inn mot krystallen vil ein få ei stråle med horisontalt polarisert lys og ei stråle med vertikalt polarisert lys med same intensitet (Baggott, 2004). Sirkulært polarisert lys er altså ei blanding av like delar vertikalt og horisontalt polarisert lys, i tillegg til ein fasefaktor. Kva om ein reduserer intensiteten og sender inn sirkulært polarisert lys slik at eitt og eitt foton passerer gjennom krystallen? Fotona er identisk preparert, noko som vil seie at dei alle har same tilstand før eksperimentet. Fotona må enten ende opp i den vertikale eller den horisontale kanalen, og det viser seg etter fleire forsøk at det er 50:50 sjanse for dei to moglegeheitene (Baggott, 2004). Korleis kan så identisk preparerte foton gje to forskjellige resultat? Før dei treff krystallen kan fotona beskrivast som å vere i ein lineær superposisjon av dei to målbare tilstandane vertikal $|v\rangle$ og horisontal $|h\rangle$. Matematisk kjem dette av at Schödingerlikninga er ei lineær likning, noko som betyr at ein lineær kombinasjon av moglege løysingar òg vil vere ei gyldig løysing. I døme beskrive ovanfor vil dette bety at sidan $|v\rangle$ og $|h\rangle$ begge er løysingar vil òg $|v\rangle + |h\rangle$ vere ei løysing, og difor ein mogleg tilstand for systemet.

Sjølv om ein lineær superposisjon er ein gyldig tilstand hjå systemet, så er denne ikkje eit mogleg måleresultat. Interaksjonen med kalsittkrystallen, som svarar til ei måling, vil tvinge fotona til å innta enten vertikal eller horisontal polarisasjon. Dei kan ikkje dele seg i to og deretter gå i begge kanalane, då foton er udelelege elementærpartiklar, og eit delt foton ville i så fall berre hatt halve massen, og difor halvert energi og frekvens, gitt av likninga $mc^2 = E = h\nu$. Valet som fotonet vert tvunge til å gjere vil ha ein dramatisk effekt på bølgefunksjonen, som i same augneblikk

diskontinuerleg kollapsar slik at sannsynsfordelinga $|\Psi|^2$ viser 100 % sannsyn for at fotonet er i den polarisasjonsretninga som det vart målt til. Kollapsen av bølgefunksjonen er eit postulat, og let seg ikkje beskrive matematisk av Schrödingerlikninga.

Eit tilsvarande kollaps vil skje om ein gjer ei posisjonsmåling kor eit elektron vert funne i eit punkt x_0 , noko som er illustrert i figur 8. I forkant av posisjonsmålinga har ein frå bølgefunksjonen funne sannsynet for kor elektronet kan opphalde seg. Når ei måling som finn elektronet i eit punkt x_0 vert gjennomført, er det ikkje lenger nokon sjanse for at det oppheld seg nokon annan stad, og bølgefunksjonen kollapsar om punktet x_0 kor elektronet vart funne.

Tilbake til dobbeltspalteeksperimentet gjer vi nå ei måling, og finn elektronet ved ei av spaltene, i eit punkt x_0 . Ein kan spørje seg kor elektronet oppheldt seg rett før målinga vart gjennomført. Eit opplagt svar er at det var i punktet x_0 samstundes med at målinga vart gjort, og det var difor at elektronet vart funne der. Det verkar kanskje naturleg at det må vere slik, men eit slikt syn inneber indirekte at kvantefysikken er ein ufullstendig teori (Griffiths, 2005). Viss elektronet verkeleg var i x_0 i forkant av målinga så betyr det at posisjonen hans aldri var ubestemmeleg, men berre ukjend for oss. I så fall må det bety at kvantefysikken ikkje fortel heile historia. Sidan posisjonen ikkje var ubestemmeleg må det finnast noko i form av ein skjult variabel, som om ein hadde hatt kjennskap til, ville gjort det mogeleg å føreseie posisjonen allereie før målinga vart gjort. Dette er bakgrunnen for ein av dei mest kjente debattane i fysikken si historie mellom Einstein og Bohr om tolkinga av kvantefysikken (Baggott, 2004).



Figur 8: a) $|\Psi(x)|^2$ før måling. b) $|\Psi(x)|^2$ etter måling. (Griffiths, 2005).

2.1.7 Tolking av kvantefysikk

Kvantefysikk kan i likskap med andre fysiske teoriar sjåast på som å ha to aspekt: ein matematisk modell og ei fysisk tolking. Den matematiske modellen referer til likningane og postulata som har vore grunnlaget for suksessen til kvantefysikken, ved at den let fysikarar rekne på tilhøve som ikkje er mogelege med den klassiske fysikken. Den fysiske tolkinga, som gjeld korleis den matematiske modellen kan vert forstått i den verkelege verda, er det langt meir diskusjon om, sjølv hundre år etter starten (Cheong & Song, 2014). Det kan finnast fleire måtar å tolke ein matematisk formalisme på, og det er tilfelle med kvantefysikk. I ei spørjeundersøking blant 33 deltakarar i samband med ein konferanse om kvantefysikk svarte 42 % at dei støtta København-tolkinga (sjå neste punkt). Om ein inkluderer andre tolkingar som har sitt utspring i København-tolkinga får ein 72% (Schlosshauer, Kofler, Zeilinger, History & Physics, 2013). Den andre hovuddelen er Everet sin mange-verd-teori som det ikkje har vorte fokusert på i denne oppgåva. Hovudfokuset i dette teorikapitlet er difor København-tolkinga som er den dominerande tolkinga innanfor kvantefysikken, og den vil verte sett i samanheng med ein skjult-variabel-teori. Skjult-variabel-teori er ein teori som på fleire vis representerer ein motsetnad til København-tolkinga, med sine forsøk på å forklare dei underlege resultata i kvantefysikken som mangel på kunnskap om nokre underliggjande mekanismar. Viss desse ukjende mekanismane, eller variablane, var kjend kunne kvantemekaniske system verte deterministisk modellert på som i den klassisk fysikken.

I 1964 beviste John Steward Bell, med det som vert kalla Bells ulikheit, at lokale skulte variablar ikkje er ein mogeleg teori for å forklare alle fenomena i kvantefysikk (Whitaker, 2006), og teorien, i alle fall i sin enklaste form, er ikkje relevant for fysikarar i dag. Likevel kan teorien vere nyttig i eit didaktisk perspektiv der den kan nyttast som ein kontrast til København-tolkinga.

2.1.8 København-tolkinga

Niels Bohr saman med Werner Heisenberg og Wolfgang Pauli utvikla det som er vorte kjend som København-tolkinga i kvanteteori. Tolkinga er tufta på uskarpleiksrelasjonen til Heisenberg, Bohr sin sannsynsinterpretasjon og komplementaritet (Baggott, 2004). Sentralt i København-tolkinga ligg interaksjonen mellom måleinstrument og studieobjekt. Ei måling inneber at eit system må vere i kontakt med eit måleapparat, og i København-tolkinga har denne interaksjonen ein helt spesiell rolle. Eit system i forkant av ei måling er i ein fullstendig ubestemd tilstand, beskrive av

bølgjefunksjonen. Det er først i interaksjon med eit måleapparat at systemet får ein bestemt tilstand, til dømes ein bestemt posisjon, som vil vere ei gyldig løysing av Schrödingerlikninga.

Kollapsen av bølgjefunksjonen som følgje av ei måling representerer difor mykje meir enn ei endring av kunnskapen vår, ved at den målte storleiken går frå å vere ubestemd til bestemd. Med andre ord kan ein seie at målinga produserer eit resultat, ved at den tvinger systemet til å innta ein bestemt tilstand (Baggott, 2004). Dette inneber at ein ikkje kan seie at ein kvantepartikkel har nokre ibuande eigenskapar som er der før ei måling, altså uavhengig av eit måleinstrument. Om elektron vert studert, vert altså deira eigenskapar som spinn, hastigheit og posisjon først ein realitet i interaksjonen med eit passende måleinstrument designa for å få fram den aktuelle eigenskapen. Slik vert målingar sjølv hjarta i Kjøbenhavntolkinga. Dette er ein uvand måte å tenkje på målingar, og i klassisk fysikk heilt bisarr. Baggott (2004) kjem med dette dømet for å illustrera kor uvand ei slik tankemåte er: Sjølv om du ikkje kjenner lengda på skrivepulten før du har målt den, og lengda difor er ukjend, antek du ikkje av den grunn at lengda er ein *ubestemt* størrelse, som først tek ein verdi, altså vert bestemt når den målast.

At ein ikkje kan seie at eit kvantesystem har nokre ibuande eigenskapar før ei måling er synonymt med at Born sin sannsynsinterpretasjon av bølgjefunksjonen ikkje representerer ei ukunne for ein underliggande fysisk realitet. Med andre ord før ei måling eksisterer det berre sannsyn for potensielle mogelege resultat. Dette inneber at kvantefysikk ikkje er deterministisk. Same eksperiment på identisk preparerte system treng ikkje gi like resultat, men om ein gjer mange eksperiment vil fordelinga av resultata vere lik sannsynsfordelinga til bølgjefunksjonen for det aktuelle systemet. Ideen om at universet ikkje er deterministisk vart av mange fysikarar ikkje godt mottatt, og eit symbol på denne motstanden er eit avsnitt frå eit brev Einstein skreiv til Born i 1926:

«Quantum mechanics is very impressive. But an inner voice tells me that it is not yet the real thing. The theory produces a good deal but hardly brings us closer to the secret of the Old One. I am at all events convinced that He does not play dice»

(Baggott, 2004, s. 34)

2.1.9 Schrödingers katt og realisme mot anti-realisme.

Einstein og Schrödinger, som begge hadde vore viktige bidragsytarar til det som vart grunnlaget for kvantefysikken, likte dårleg ideane om at den røynelege verda på sitt mest fundamentale nivå ikkje var deterministisk, og fysiske storleikar som udefinerte utan i samband med eit måleapparat, som Københavntolkinga tok til orde for.

Det nå vidgjetne tankeeksperimentet Schrödingers katt, har sine røter i brevkorrespondansen mellom Einstein og Schrödinger, og var meint som ein kritikk til Københavntolkinga. Tankeeksperimentet går ut på at ein katt vert låst inne i ein boks saman med ei radioaktiv kjelde som har 50% sjanse for å desintegrere i løpet av ein time, og da sender ut stråling. Ein mekanisme som involverer ein geigerteljar, ein hammar og ei flaske med giftgass gjer at katten sitt liv eller død avhenger av om den radioaktive kjelda sender ut stråling eller ikkje. Kjelda vil etter kvart vere i ein superposisjon mellom utsendt stråling og ikkje utsendt stråling, noko som indikerer at katten òg må vere i ein superposisjon av død og levande. Dette verkar absurd, noko som nettopp var budskapet til Schrödinger.

Københavntolkinga står for instrumentalisme, som er ei form for anti-realisme. Det inneber at teoriar aldri kan seie noko om ein underliggjande fysisk realitet, men berre kome med logiske slutningar knytte til eksperimentelle resultat og observasjonar, som så kan verte nytta til å føresei resultat i vidare eksperiment. Det kjem tydeleg fram i dette sitatet frå Bohr:

«There is no quantum world. There is only the abstract quantum physical description. It is wrong to think that the task of physics is to find out how nature is. Physics concerns what we can say about nature.»

(sjå til dømes Baggott, 2004, s. 109)

Einstein var realist, likte dårleg dette synet som han kalla for «*Kopenhagener Geist*» - Københavnspøkelset. Tanken om ei observasjonsuavhengig verkelegheit der gitte lover styrte hadde lenge vært ei underliggjande tru i vitskapen, og hadde ikkje vorte utfordra før kvantefysikk (Baggott, 2004). Ei interesse for, ikkje berre å føreseie naturfenomen, men òg å forstå verkelegheita hadde vore ei viktig drivkraft for vitskapen, og Einstein trudde at slik syn òg ville gi ein fruktbar utvikling av kvantefysikk i framtida (Whitaker, 2006).

Einstein meinte at Bohr tok feil når han hevda at kvantefysikk som teori var ei komplett beskriving av den mikroskopiske verda. Særskild mangelen på determinisme gjorde at Einstein trudde at kvantefysikk kom til å verte erstatta av ein meir fundamental teori deterministisk ville kunne føresei resultatet frå eksperiment. Dette rammeverket til skjult-variabel-teori som er diskutert tidlegare.

Instrumentalisme saman med synet om at kvantefysikk er ein komplett teori, gjer at det å snakke om ein underliggande fysisk realitet kor fysiske eigenskapar til kvantesystem eksisterer i fråvær av målingar, vil vere meiningslaust. Vi har ingen anna måte å skaffe kunnskap om den fysiske verda på enn gjennom eksperiment og observasjon. Difor vil vi aldri kunne sjå naturen i sjølv, men berre gjennom våre måtar å spørje på. Heisenberg sa det slik:

«... This emphasizes a subjective element in the description of atomic events, since the measuring device has been constructed by the observer, and we have to remember that what we observe is not nature in itself, but nature exposed to our method of questioning.»

(sjå til dømes Baggott, 2004, s. 107)

København-tolkinga set eit effektivt tak på kunnskap om dei eventuelle spontane indre prosessane på atomært nivå, då dei vil vere utilgjengelege i deira naturlege form. Det å snakke om fysiske eigenskapar til kvantesystem i fråvær av målingar er i følge København-tolkinga meiningslaust, då ein per definisjon aldri vil kunne få noko informasjon om ein slik situasjon, og diskusjonen vert difor metafysisk.

2.1.10 Kva er ei måling?

I ljøs av at målingar har ei så sentrale rolle i kvantefysikk, er det føremålstenleg å gå inn på kva ei måling eigentleg er. Det lett å verte opphengd i at målingar må skje i laboratoriet med høgt idealiserte måleapparat. Det går òg an å argumentere for at det ikkje finnes eit klart skilje mellom kvantesystem og måleapparatet. Sjølv makroskopiske måleapparat vil nødvendigvis vere bygd opp av kvantesystem, og kor skal grensa da verte trekt mellom kvantesystem og måleapparat? Slike problem har mellom anna ført til at seriøse teoretikarar, slik som John von Neumann, i første halvdel av 1900-tallet har vore inne tankar om bevisstheit har noko å gjere med kollapsen av bølgefunksjon (Whitaker, 2006). Oppfatninga har ikkje nokon støtte i det vitenskaplege miljøet i

dag. Eg vil avslutte dette fysikkfaglege kapitelet med ein kommentar frå fysikaren John Stewart Bell som summerer opp problemstillingane nemnt ovanfor:

«What exactly qualifies some physical systems to play the role of ‘measurer’? Was the wavefunction of the world waiting to jump for thousands of millions of years until a single-celled living creature appeared? Or did it have to wait a little longer, for some better qualified system ... with a Ph.D.? If the theory is to apply to anything but highly idealized laboratory operations, are we not obliged to admit that more or less ‘measurement-like’ processes are going on more or less all the time, more or less everywhere? Do we not have [quantum] jumping [i.e., collapse] then all the time? »

(sjå til dømes Norsen, 2017, s. 63)

2.2 KVANTEFYSIKK I SKULEN

Matematikken er grunnlaget for kvantefysikk sin suksess som teori, då den kan beskrive eit breitt spekter av situasjonar kor klassisk fysikk ikkje strekk til, til dømes emittert stråling frå svarte lekam, som nemnt tidlegare i teoridelen. Sidan matematikken er så tydeleg og gir gode svar, har mange fysikarar ei tilnærming der fokuset er på den tekniske delen av kvantefysikken, heller enn å bruke tid på filosofiske spørsmål. Denne tilnærminga vil uunngåeleg påverke korleis kvantefysikk vert undervist (Bungum et al., 2018). I ein slik kontekst vil utfordringane som elevane møter i kvantefysikk hovudsakleg vere reknetekniske, og ikkje konseptuelle.

Det matematiske apparatet som krevst for å løyse kvantitative oppgåver i kvantemekanikk er først introdusert på universitetsnivå. Som ein konsekvens av dette krev ikkje kompetansemåla i Fysikk 2 at elevane skal gjere kvantitative berekningar, men heller at elevane skal vere i stand til å gi kvalitative forklaringar på sentrale konsept i kvantefysikken og drøfte filosofiske aspekt. Måla er som følgjer:

- *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.*

- *gjøre rede for Heisenbergs uskarphetsrelasjonar, beskrive fenomenet sammenfiltrede fotoner og gjøre rede for erkjennelsesmessige konsekvenser av dem.*

(Utdanningsdirektoratet, 2006).¹

Angell et al. (2011) skriv om kompetansemåla:

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

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

Det kan vere ei utfordring å presentere kvantefysikk utan å kunne støtte seg til den tilhøyrande matematikken. Likevel viser forskning som har vorte gjort med fysikkstudentar på universitetsnivå at sjølv desse studentane, med solid matematisk og fysikkfagleg bakgrunn, ofte har ei svak konseptuell forståing innanfor kvantefysikk (Singh, Belloni & Christian, 2006). Å kunne gjere kvantitative berekningar er altså aleine ingen garanti for god kvalitativ forståing.

Ifølgje Hadzidaki, Kalkanis og Stavrou (2000) vil ei meiningsfull forståing av kvantefysikk innebere ei erkjenning av korleis kvantefysiske fenomen bryt med sentrale prinsipp i klassisk fysikk. Undervisning i kvantefysikk bør difor sikte mot å gjere denne skilnaden tydeleg for elevane (Hadzidaki et al., 2000; Özcan, 2010). Likevel er det vist at studentar på universitetsnivå har vanskar med å identifisera skilnadane mellom kvantefysikk og klassisk fysikk (Özcan, 2010). Forståinga kan ofte verte prega av at klassiske og kvantefysiske omgrep blandast. Halvklassiske modellar nytta i undervisning har vorte utpeikt som noko av årsaka til at elevar slit med å beskrive kvantefysiske omgrep, då bruk av klassiske analogiar ofte ikkje mogleggjer at elevar får ei forståing av forskjellen mellom kvantefysikk og klassisk fysikk (Angell et al., 2011).

Innanfor bølge-partikkel dualitet har ein til dømes elevar som blander saman dei to konseptane med å førestille seg partiklar som går i bølgebevegelse (Olsen, 2002), eller som ukritisk nyttar bølge-partikkel-dualiteten til å beskrive eksperimentelle forhold utan å ta inn over seg dei erkjenningsmessige konsekvensane (Gjerland, 2015).

¹ Kompetansemåla står på bokmål då dei ikkje er tilgjengeleg på nynorsk på Utdanningsdirektoratet sine nettsider.

Gjennom eit liv vil eit kvart menneskje bygge opp førestillingar om korleis verda fungerer basert på erfaringar og logiske slutningar. Som ein del av prosessen med å lære fysikk vil elevar måtte ta til seg nye idear som av og til bryt med eksisterande førestillingar. Forsking har vist at eksisterande førestillingar er motstandsdyktige i høve til undervisning. Grunnen til dette er at førestillingane frå eleven si side vert sett på som fornuftige, då dei byggjer på tidlegare erfaringar og gjerne vert delt av fleire medelevar. Førestillingane til elevane har vist seg å ha ein stor innverknad på læring, noko som heng saman med at læring er eit samspel mellom eksisterande førestillingar og nye inntrykk. Dette er knyta til Piaget og konstruktivisme (Angell et al., 2011). Difor er det viktig at lærar kjenner elevane sine førestillingar, og tek dette som utgangspunkt i undervisninga. Omgrep og førestillingar før undervisning i emne kjem ofte frå kvardagsspråk, erfaringar i kvardagen eller tidlegare undervisning. (Angell et al., 2011).

Populærvitskaplege magasin og tv-program er ei viktig kjelde til førestillingar om kvantefysikk (Angell et al., 2011). Det er ein fascinasjon for kvantefysikk innanfor populærkultur noko som dei andre retningane innan fysikk ikkje kan skilte med, kanskje med unntak av relativitetsteori og kosmologi. Dette har ført til ei rekke populærvitskaplege attgjevingar av kvantefysikk, men kor i mange tilfelle vitskapleg nøyaktigheit har vorte ofra til fordel for tilgjengelegheit og underhaldning (Barad, 2007).

Trass i kvantefysikken sin popularitet kjem det fram i ei undersøking i samband med ReleKvant-prosjektet (sjå neste kapittel), at lærarar saknar gode undervisningsressursar i kvantefysikk som er tilpassa nivået i den vidaregåande skulen (Bungum, Henriksen, Angell, Tellefsen & Bøe, 2015). Lærarane i denne undersøkinga uttrykker òg at dei syntest kvantefysikk var utfordrande å undervise, då dei kjende seg mindre kompetente i emnet, enn i dei andre delane av fysikkfaget.

På grunn av at kvantefysikk bryt med det klassiske verdsbilde kan det vere krevjande å få ei god kvalitativ forståing, og diskusjon kan difor eigne seg godt i kvantefysikkundervisning (Hadzidaki, 2008). I ein studie fokusert på små gruppediskusjonar vart det vist at diskusjonane har eit godt potensiale for å bidra til ei betre kvalitativ forståing (Bungum et al., 2018). Gjennom diskusjonane fekk elevane utveksla idear og formulert nye spørsmål, i tillegg til å setje ord på sine konseptuelle vanskar.

Ein nyleg Delphi-studie frå Krijtenburg-Lewerissa, Pol, Brinkman og van Joolingen (2018) undersøkte kva tema innanfor kvantefysikk som burde inngå i undervisning på eit nivå tilsvarande

den vidaregåande skulen. *Bølgje-partikkel-dualitet, partikkeleigenskapar til ljøs og dobbelspalteeksperimentet* er dei temaa som dei fleste av studien sine ekspertar meiner er essensielle for å oppnå ei god forståing i kvantefysikk. *Bølgjefunksjon* og *sannsyn* bør òg inngå i undervisning, kategorisert som «*indispensable*» - naudsynt - av 9 av dei 11 ekspertane, og som «*desirable*» - ønskjeleg - av dei to resterande. Målingar vert konkret nemnt av fleire av ekspertane, men er ikkje med i den endeleg lista som er sitert ovanfor. Likevel kan det ut frå eit fagleg perspektiv seiast at observasjon, som denne oppgåva omhandlar, gjer seg gjeldande i alle temaa nemnt ovanfor.

3 BAKGRUNN: RELEKVANT-PROSJEKTET OG UNDERVISINGSRESSURSAR

I dette kapitlet går eg inn på ReleKvant-prosjektet som er bakgrunnen for denne oppgåva. Eg vil òg sjå nærare på delar av undervisningsmateriellet som er knytt til prosjektet, og særskild den delen som elevane jobba med i samband med datainnsamlinga til denne oppgåva.

3.1 RELEKVANT-PROSJEKTET

ReleKvant-prosjektet er eit forskings- og utviklingsprosjekt som utviklar nettbaserte læringsressursar for kvantefysikk og relativitetsteori for Fysikk 2 i den vidaregåande skule. Prosjektet har som mål å auke kunnskapen om korleis desse fagområda kan verte undervist, slik at elevar opplever det som meningsfullt og motiverande, samstundes som elevane tileignar seg ei god forståing av dei utfordrande konseptane innanfor moderne fysikk (Bungum et al., 2015). Namnet ReleKvant spelar nettopp på ønskje om å vere relevant, både for elevar og lærarar innafør relativitetsteori og kvantefysikk.

Læringsressursane som er utvikla gjennom prosjektet er tilgjengeleg på viten.no², og er meint å verte nytta som ein del av den ordinære fysikkundervisninga med lærar til stades. Dei byggjer på eit sosiokulturelt syn på læring, og det vert lagt vekt på at elevane skal kunne uttrykkje seg både skriftleg og munnleg i læringsprosessen.

3.2 UNDERVISNINGSMATERIELL

Undervisningsmateriellet om kvantefysikk er delt inn i fem modular som tek for seg forskjellige tema innanfor kvantefysikk. Kvar modul har ei varigheit på mellom ein og to skuletimar. Modulane nyttar tekst, bilete, videoar og animasjonar for å kommunisere fagstoffet, og legg opp til elevaktivitetar gjennom diskusjonsoppgåver og refleksjon om sentrale konsept. Sentralt for denne oppgåva står modul 4 – *Partikler som bølger*. Det var denne modulen elevane jobba med i samband med lydopptak av elevsamtalar i kapittel 4, og i forkant av fokusgruppeintervjua som dannar datagrunnlaget for kapittel 6.

² <https://filarkiv.viten.no/kvantefysikk/>

Modulen byrjar med eit elektronmikroskop, som er eit praktisk døme på korleis ein nyttar seg av elektron sine bølgeeigenskapar for å få fram bilete med høg oppløysing. Vidare vert dobbeltspalteeksperimentet presentert gjennom ein video med namnet «*Dr. Quantum Explains Double Slit Experiment*», og gjennom eit skuleeksperiment med eit teltronrør med karbongitter. I samband med dobbeltspalteeksperimentet er det òg ei diskusjonsoppgåve kor elevane diskuterer i grupper ved å spela roller som journalist og forskarar. Resten av modulen handlar mellom anna om De Broglie sin formel og Heisenbergs uskarpleiksrelasjon.

Eg vil fokusere særskild på videoen med Dr. Quantum. Denne oppgåva handlar om observasjon, noko som ikkje er eit eige tema i undervisningsmodulane. Den vegen elevane kjem inn på temaet observasjon er gjennom dobbeltspalteeksperimentet, og Dr. Quantum er den viktigaste undervisningsressursen for dette eksperimentet.



Dr. Quantum og dobbeltspalteforsøket



Oppgave 7

Fyll inn det du observerer i filmen "Dr. Quantum og dobbeltspalteforsøket" i tabellen under. Dr. Quantum kontrollerer variabler ved å gjøre forsøket på ulike måter. Han sender både klinkekuler, vannbølger og elektroner mot enten én eller to spalter. Fyll inn om du observerer interferensmønster eller ikke i de ulike tilfellene.

Figur 9: Skjermdump frå ReleKvant-modul 4 der videoen Dr. Quantum vert spelt av.

Videoen er ein animasjonsfilm som varar i litt over 5 minutt. Den illustrerer først dobbeltspalteeksperimentet med klinkekuler og vassbølgjer før ein går over til elektron. Valet om å samanlikne med klinkekuler og vassbølgjer er ikkje ulik framstillinga til Feynman et al. (2006), som delar av teorikapittelet er basert på. Figur 9 viser eit skjermdump frå modulen der videoen vert spelt av.

I videoen kjem det mellom anna fram at interferensmønsteret ikkje kan forklarast på ein klassisk måte med elektron som lokaliserte partiklar. At observasjon påverkar resultatet slik at interferensmønsteret forsvinn vert kommunisert tydeleg. Vidare i oppgåva vil eg referere til denne videoen som Dr. Quantum.

4 TIDLEGARE RESULTAT FRÅ STUDIEN

Som nemnd i innleiinga er valet av problemstilling for denne oppgåva influert av arbeid som eg tidlegare har gjort i samband ReleKvant (Huseby, 2016). Gjennom dette arbeidet kom det fram at samanhengen mellom observasjonar og implikasjonar i samband med eksperiment i kvantefysikk er eit område kor elevar har fleire utfordringar. Særleg vanskeleg var det for mange å forstå korleis ein observasjon kan ha innverknad på resultatet av eit eksperiment. Denne masteroppgåve byggjer i stor grad vidare på dette arbeidet og av omsyn til kontinuitet er det hensiktsmessig at lesaren får presentert dei resultatata som kjem til å verte referert vidare i oppgåva. Dette kapittelet er difor, med unntak av nokre omskrivingar, teke frå tidlegare arbeid.

Datamaterialet er henta frå versjon 4 av ReleKvant våren 2016, og baserer seg på 39 samtaler med totalt 87 elevar frå 7 forskjellige skular. Samtalane er i samband med diskusjonsoppgåva «*Er elektroner bølger?*» som ligg under modulen *Partikler som bølger* på ReleKvant si læringsplattform på viten.no.

I forkant av oppgåva har elevane sett videoen *Dr. Quantum explains the double slit eksperiment*, og korleis dobbeltspalteeksperimentet kan gjennomførast med eit teltronrøyr med karbongitter.

Diskusjon: Er elektroner bølger?

Gå sammen med en annen elev. Den ene skal være en forsker som akkurat har gjort eksperimentet over, altså fått interferensmønster ved å sende elektroner mot et gitter. Den andre skal være en vitenskapsjournalist som ringer forskeren for å lage en nyhetssak om eksperimentet og hva det betyr.

Tips til spørsmål journalisten kan stille:

- Betyr dette at elektroner ikke er partikler, men bølger?
- Må ikke elektronet være en partikkel, siden vi vet at det har masse? Kan bølger ha masse?
- Hvis du sender ett og ett elektron, hvilken spalte går elektronet gjennom da?
- Hva skjer hvis man prøver å finne ut hvilken spalte elektronet går igjennom?



Figur 10: Skjermdump frå diskusjonsoppgåva frå viten.no som datamaterialet er basert på.

Oppgåva inneber at ein elev spelar rollen som ein journalist, og intervjuar ein eller to andre elevar som spelar rollar som forskarar. Samtalane er tekne opp på eigne mobiltelefonar og sendt til Relevant kor dei er vorte transkribert av studentassistentar. Elevutsegner er på bokmål då det ligg tettast på elevanes talemål. Eleven som spelar journalist har ei liste med spørsmål han eller ho går igjennom. Elevar si forståing kring observasjon kjem i hovudsak fram gjennom dette spørsmålet frå journalisten:

«Hvordan kan vi vite hvilken spalte elektronet går gjennom?»

Så godt som alle elevsvara inneheld at resultata av eksperimentet vart påverka av observasjonar ved at elektron taper deira bølgeeigenskapar, og oppfører seg som klassiske partiklar. Dette viser at elevane har fått med seg hovudbodskapen om kva som hender under observasjon, men ut frå analysen kjem det fram at mange elevar har vanskar med å forstå kva ein meiner med observatøromgrepet. Misforståingar kring observatøromgrepet leiar òg til vanskar med å forklare korleis det å observere kan påverke resultata av eksperimentet. Gjennom induktiv analyse vart elevar sine ytringar kategorisert inn i to relativt breie kategoriar:

- Observasjon som måling.
- Observasjon som å sjå.

Den fyrste kategorien, *observasjon som måling*, inneber at elevane refererer til måleapparat og nyttar ord slik som å måle eller å registrera når det er snakk om å gjere observasjonar. Den andre kategorien, *observasjon som å sjå*, inneber at elevane viser ei oppfatning av at det er nokon som står og ser på eksperimentet, og at det er dette som meinast når ein snakkar om å observera.

For å gjere tydeleg for lesaren kva delar av elevane sine ytringar eg legg vekt på har eg streka under visse delar. Følgjande elevytringar illustrerer typiske eksempel på den fyrste kategorien, *observasjon som måling*:

«(...) den eneste måten vi kan finne ut det på er jo å sette en sensor foran og undersøke hvilken spalte den går gjennom. Men problemet er at da får vi ikke et interferensmønster og da oppfører elektronene seg som partikler, noe de ikke gjør når vi ikke har sensoren foran.»

«Vi prøvde også å måle hvilken spalte elektronene ville velge, men da så vi at elektronene kun valgte den ene. Så altså, når elektronene ble observert, så ble banen påvirket og de oppførte seg da som klinkekulene.»

Desse elevytringane refererer til ein sensor eller bruker ord som «å måle», som respons på spørsmål om korleis ein kan vite kva spalte elektronet går gjennom. Sjølv om elevane si bruk av omgrep ikkje er ein garanti for ei god forståing, kan det gje eit bilete av kva tankar elevane har om korleis ein praktisk må gå fram for å observera i eit eksperiment som dette, og tyder på ei forståing av at ein treng ein form for apparatur for i det heile tatt å kunne observere elektron.

Den andre kategorien inneheld flest elevytringar, og tek føre seg ytringar som peiker meir mot ei oppfatning om at det å observera er det same som å sjå. Denne oppfatninga kan medføre mange misforståingar. Ei ytring skildrande for denne kategorien er:

«(..)Når elektronet ble sendt gjennom to spalter så skulle det lage et interferensmønster, men når det var en observatør rett ved siden av for å se hvordan disse partiklene oppførte seg, så oppførte de seg som partikler, de lagde ikke interferensmønster, så det var som et stort mysterium»

Ytringa representerer eit tankesett som er definerande for denne kategorien, nemleg at det er ein observatør som «står og ser på» for å prøve å finna ut kva spalte elektronet går igjennom, og at dette påverkar elektrona. Elevutsegna gjev eit bilete av korleis eleven tenkjer seg ein skulle gått fram for å gjere observasjonane. Eleven verkar ikkje å ha reflektert over storleiken til eksperimentet, samt kva omstende det må gjennomførast under for å oppnå ein slik presisjon kor ein sender eit og eit elektron, eventuelt foton, mot spalteopningane. Eg tolkar dette heller som at eleven tenker på eksperimentet som eit normalt skuleeksperiment i eit ljost rom medan ein står rundt og ser på. Det kan argumenterast for at dette er eit tankeeksperiment og at det difor kan verte gjennomført på denne måten, men samstundes kan det indikera manglande forståing når det kjem til kor ømfintlege elektron og foton er. Viss ein tenkjer seg å gjere dette eksperimentet med eit og eit elektron eller eit foton så kan det ikkje gjerast i eit oppljost rom, då rommet med dette vil vere fullt av foton, og difor med mange potensielle forstyrringar. Tenkjesettet om at eksperimentet kan behandlast som eit vanleg skuleeksperiment verkar å vere representativt for dei fleste av elevsvara i kategorien. Mi tolking av svara innanfor denne kategorien, *observasjon som å sjå*, er at elevane

først og fremst tenkjer på ein observatør som eit menneskje, heller enn eit måleapparat. Dette meiner eg kjem tydeleg fram blant anna i denne ytringa:

«(...) ehm, det er sånn at, det er veldig rart fordi hvis du hadde en sånn, på en måte tilskuer eller noe annet til stedet da, så var det sånn at elektroner heller valgte en enkelt spalte det gikk gjennom også dannet det ikke et interferensmønster. (...)»

Både i denne ytringa, kor eleven bruker ordet *tilskuer* i staden for observatør, samt i den fyrste ytring kor det «står en observatør rett ved siden av», tolkar eg som at observatøren vert sett på som eit menneskje. Dette er ein naturleg samanheng då elevane sannsynlegvis har erfaring med observatørar som menneskjer, då det ofte er slik i ein kvardagsleg situasjon. Kanskje har elevane tidlegare hatt besøk av studentar som skulle observere i klassen, eller høyrte om valobservatørar som er personar som skal passa på at val går føre seg på ein rettvis måte. Ved å sjå på språket som elevane nyttar når dei snakkar om observatøren kjem det fram at verba «å sjå» og «å observera» vert brukt om lag like mykje og i mange tilfelle brukast dei om kvarandre. Det peiker mot at mange av elevane tenkjer på dei som synonym, eller om lag med same betyding. I kvardagslege situasjonar kan dette vere ei god tilnærming, då ein ofte bruker ordet «å observere» i meining av «å sjå ekstra nøye etter», eller «å sjå etter noko spesielt». Nedanfor er eit døme på korleis ein elev ser ut til å tenke på dette som synonym:

«Altså man kan jo alltid observere, men så fort man ser på vil ikke elektronene oppføre seg som bølger. (...)»

Dette kan verte sett i samband med førestillinga om ein menneskeleg observatør, då det i ein slik samanheng gjev meining at å observera er det same som å sjå. Elevane som har denne forståinga møter på eit problem når dei skal forklare korleis det «å sjå på» eksperimentet fører til at elektrona oppfører seg annleis. Ut frå datamaterialet tolkar eg det slik at mange av elevane trur at viss ein lukker auga, eller snur seg vekk vil elektrona gjere ein ting, og viss ein ser på dei igjen vil dei gjere noko anna. Dette oppfatast av mange som veldig merkeleg, og eit paradoks då det å sjå er ein «passiv» handling i fysisk forstand. Lys treff auga, og slik kan ein sjå. Elevane veit at det ikkje er slik som enkelte filosofar i antikkens Hellas meinte, nemleg at auga sender ut stråler, og at difor det å sjå på noko kunne tenkast å ha ein påverknad. At den passive handlinga «å sjå» skal kunne ha ein påverknad kjem fram litt pussig i fleire av samtalene. Eit døme er:

«(...) jeg skjønner ikke, elektroner er ikke levende, du ser på dem så gjør de noe annet?
Det gir ikke mening.»

I ei anna elevsamtale kjem òg elevane inn på temaet:

Elev 1 Det var litt sånn merkelig med elektronene, men, de sa jo at det at det var en observatør som på en måte registrerer det, så kanskje det ikke går an finne ut av det da, siden, i videoen sa at så lenge man observerer det så oppfører det seg annerledes

Elev 3 Ja

Elev 2 Men jeg skjønner det ikkje

Elev 3 Men det må jo gå an å finne det ut

Elev 2 Hvordan kan det oppføre seg annerledes ved å se på liksom. Blir ikke det veldig rart?

I samtalen mellom dei tre elevane referer dei til videoen med Dr. Quantum som er ein del av undervisningsmaterialet.

Det kjem fram både av elevsitat og samtalen ovanfor at elevane synest det er veldig rart at elektrona oppfører seg forskjellig når ein ser på. Det er ikkje ei uklok utsegn å nemne at elektrona ikkje er levende. Om ein antek at det «å sjå på» påverkar elektrona, samstundes som det «å sjå» er ein passiv handling, så ville det gitt meining å tenkje på elektrona som levande, på same vis som at menneskje oppfører seg ulikt når dei veit at dei vert observert. I det eg tolkar som ei jakt etter meining er det òg eit par elevar som nemner at kanskje avstanden kan spele ei rolle:

Elev 1 Tror du det kan være sånn at hvis man observerer fra lang avstand, går det da an å få samme resultat uten at resultatet endres?

Elev 2 Det, det vet jeg ikke, men det var et veldig godt spørsmål. Det kan godt tenkes (...) kvantefysikken er spennende, og komplisert.»

Hypotesen til eleven ser her ut til å vere at viss ein er langt vekk så merker kanskje ikkje elektrona at dei vert sett på. Dette er eit eksempel på korleis elevane innan kategorien, *observasjon som å sjå*, forvillar seg inn i ein situasjon som ikkje gjev meining ved å likestille «å observere» med det «å sjå». Konklusjonen til elevane vert ofte at kvantefysikk er rart.

Det visar seg her at mange elevar har vanskar med å forklare observasjon i ei kvantefysisk kontekst. Forståinga om at observasjon er synonymt med å sjå er spesielt vanleg. Resultata herifrå visar at det vil vere interessant å kome djupare inn på elevar si oppfatning av temaet observasjon i kvantefysikk. Resten av oppgåva byggjer på resultata presentert i dette kapitlet. og er vigd til beljose temaet ytleger, mellom anna med fokusgruppeintervju av fysikkelevar i Fysikk 2.

5 METODE

Den empiriske delen av denne studien består av på data frå tre kjelder:

- 1) Lydopptak av elevdialogar frå ReleKvant.
- 2) To fokusgruppeintervju ved skule A.
- 3) Lydopptak frå utprøving av undervisningsopplegg ved skule B.

Resultat og analyse for punkt 1), elevdialogar frå ReleKvant, vart presentert i det føregåande kapittelet - *Tidlegare resultat frå studien*. Den litt utradisjonelle oppbygninga av oppgåva er grunngeve med desse resultatata i stor grad motiverte for den vidare undersøkinga som vart til denne oppgåva. Det gir lesaren ein kontekst og ein samanheng for oppgåva.

Vidare i dette kapittelet er det skildra korleis fokusgruppeintervju, analyseprosessen, og utprøving av undervisningsopplegg gjekk føre seg.

5.1 FOKUSGRUPPEINTERVJU

For å undersøke elvane sine oppfatningar vart det brukt fokusgruppeintervju. Eit fokusgruppeintervju er ifølgje Cohen, Manion og Morrison (2007) eit intervju med ei gruppe, kor intervjuaren legg rammer for på kva tema som skal diskuterast. Gruppedynamikk kan gjere at diskusjonar oppstår mellom informantar, og samspelet dei imellom kan medverke til at fleire sider ved deira oppfatningar kjem fram enn kva som ville vore tilfellet med enkeltintervju. Samstundes er det viktig for intervjuaren å styre intervjuet slik at det held seg innanfor teamet som skal diskuterast.

Fokusgruppeintervjua vart gjort på ein skule knytt til ReleKvant-prosjektet. Det betyr at læringsressursane frå ReleKvant hadde vorte nytta i undervisninga, og elevane hadde nyleg vore gjennom modul 4 – *Partikler som bølger*, kor tema er dobbeltspalteeksperimentet, materiebølgjer ved de Broglie sin formel, og Heisenberg sin uskarpleiksrelasjon. Skulen har to parallellklassar for Fysikk 2, og eg intervjuar ei gruppe frå kvar av dei to klassane. Kvar gruppe bestod av 5 elevar, og til utveljinga fekk eg hjelp av faglærarane. Eit av kriteriana var at elevane skulle ha lyst til å delta, då intervjuar skjedde i matpausen. I ettertid kan eg sjå at dette kunne fungere som eit slags filter då kanskje berre først og fremst dei mest interesserte elevar meldte seg. Dette kan påverke

overføringsverdien til resultatene, sida utvalet ikkje er velrepresentert for elevgruppa som heilskap. At elevane burde vere noko taleføre vart òg teke omsyn til av faglærarane ved utveljinga. Kjønnbalansen i dei to gruppene høvesvis 4 gutar og 1 jente, og 3 gutar og 2 jenter. Fokusgruppeintervju som format gjer at det alltid vil vere mogelegheiter for at enkelte deltakarar held seg passive, medan andre dominerer gruppa, noko som ikkje er ønska (Cohen et al., 2007). I dei to intervjuene eg gjorde snakka nokre av elevane sjølvstendig meir enn andre, men eg opplevde ikkje at nokon meldte seg ut og var passive.

Kvart intervju varte i mellom 30 og 40 minutt og i forkant av intervjuene hadde eg uforma ein intervjuguide som er vedlagt oppgåva (Vedlegg 1). Fokusgruppeintervju er ein form for semi-strukturert gruppeintervju der intervjuar har nokre spørsmål som er bestemte på førehand, men der det er rom for å følgje opp interessante ytringar. Dette gjer at ein har mogelegheiter for å avdekke og undersøke nye forhold undervegs i intervjuet, noko ein ikkje kunne ha gjort dersom alle antakingar var gjort på førehand (Berg, 2004). I arbeidet med intervjuguiden tok eg utgangspunkt i spørsmåla frå diskusjonsoppgåva frå ReleKvant si behandling av dobbeltspalteeksperimentet. Desse spørsmåla har vist seg gjennom resultatene i Kapittel 4 til å vere godt egna til å få fram elevane sine oppfatningar om observasjon. Då elevane tidlegare har møtt nokre av spørsmåla i arbeid med modulen i undervisninga, kan ein seie at intervjuene ber preg av *stimulated recall* (O'Brien, 1993). Elevane kan då hugse tilbake til kva dei diskuterte og korleis dei tenkte kring spørsmåla.

Kvalitativ forskning er følsam for konteksten den vert lagt i. Intervjuar vil alltid ha ein påverknad på informantane, og difor på resultatene. I følgje Tjora (2010) er det viktig at intervjuar legg opp til ein avslappa atmosfære, der informantane føler seg trygge. Eit intervju bør difor i innleiinga ha nokre enkle og generelle spørsmål slik at informantane kan verte vane med intervjusituasjonen (Jacobsen, 2005). For å oppnå dette la eg opp til ei oppvarming der elevane skulle forklare oppsettet til dobbeltspalteeksperimentet, og resultatene med klassiske partiklar og bølger. Det var rimeleg å anta at elevane var trygge på dette fagstoffet, då dei nettopp hadde arbeida med det.

For å dokumentere intervjuene fall valet på lydopptak, då problemstillinga til oppgåva ikkje krev datamateriale av ein slik karakter at ein måtte nytta video-opptak. I forkant av lydopptaka vart føremålet med intervjuet forklart, temaet introdusert og elevane fekk ei forsikring om at dei ville verte anonymiserte, og kunne trekke seg frå deltakinga utan vidare spørsmål.

Då dette er ein relativ liten studie med ikkje-sensitiv informasjon, og alle informantane er over 15 år, kunne dei sjølve samtykke til å verte med i prosjektet (NSD, 2018). Studien var heller ikkje meldepliktig då ein stemme aleine ikkje vert rekna som personidentifiserande om den ikkje vert kombinert med andre personopplysingar.

Intervjua vart transkribert frå lydfilene med det som Wibeck (2000) kallar transkripsjonsnivå 2. Det vil seie at samtalan vart skrivne slik dei var, men komma og punktum vart lagt til for å indikere pausar. Dette nivået vart valt fordi problemstillinga ikkje krev at til dømes talestyrke, bakgrunnslydar og avbrytingar vert noterte, slik som transkripsjonsnivå 1 inneber.

5.2 ANALYSEMETODE

Eg byrja analyseprosessen med å lese igjennom datamaterialet fleire gonger for å skape meg ein oversikt. I analysen som ligg til grunnlag for dei tidlegare resultata presentert i kapittel 4, utvikla eg dei to kategoriane *observasjon som å sjå*, og *observasjon som å måle*. Eg såg at desse fungerte godt for elevresponsane, og valde difor å nytte dei same kategoriane òg for datamaterialet frå fokusgruppeintervjua.

Å sjå etter mønstre og tema i datamaterialet er kalla induktiv analyse, og er ein motsetnad til ei deduktiv tilnærming der data vert analysert med eit førehandsdefinert rammeverk (sjå Nilssen, 2012). Dei to kategoriane er difor induktive i tilhøve til dei tidlegare resultata, men deduktive samband med resultata frå fokusgruppeintervjuet. Kategoriane som er ein sentral del av systematiseringa, er eit resultat av min faglege bakgrunn og subjektive tolking, og kan difor vere ei metodisk avgrensing i høve til forskarar med annan bakgrunn. Difor har eg lagt vekt på å presentere elevutsegn som belegg for mine tolkingar, slik at lesaren sjølv kan ta stilling til tolkinga som er gjort.

I arbeidet med analysen nytta eg programmet *Nvivo*, som er et verktøy som gjer det mogeleg å kategorisere og systematisere tekst. Sjølv om eg grupperte utsegner etter kategori i analyseprogrammet, valde eg ikkje å presentere etter kategori i fokusgruppeintervjuet. Elevane var finke å bruke kvarande i diskusjonen, og utsegnene til elevane bør difor helst sjåast i samanheng i den konteksten dei vart sagt. Difor er resultata frå dei to intervjua presentert kvar for seg, med ein kronologisk struktur.

5.3 UTPRØVING AV UNDERVISNINGSSOPPLEGG

Oppgåva har eit utviklingsperspektiv i den forstand at det er laga eit forslag til undervisningsopplegg som forsøker å adressere utfordringane som kjem fram gjennom analysen av resultatane. I kapittel 7 presenterer eg undervisningsopplegget med læringsmål og grunngjevingar. For å prøve ut undervisningsopplegget fekk eg kome og halde ein dobbelttime i ein Fysikk 2-klasse. I forkant hadde klassen berre fått ei kort innføring i kvantefysikk frå faglærar, og det var såleis eit relativt nytt tema for elevane. Skulen som klassa tilhøyrar vert markert som skule B for å signalisere at dette er ein anna skule enn skule A, kor fokusgruppeintervjua vart gjennomførte. Skulen var ikkje med i ReleKvant-prosjektet, og ReleKvant-ressursane hadde ikkje vorte nytta i undervisninga.

Fysikk 2-klassar er gjerne mindre enn vanlege skuleklassar, men den aktuelle klassa var spesielt liten med berre 4 elevar. Mykje av opplegget baserer seg på at elevane skal diskutere seg imellom, men storleiken til denne klassen gjorde at det berre vart ei diskusjonsgruppe. Det gav meg moglegheit til å høyre heile diskusjonen i staden for berre brotstykke av diskusjonar i forskjellige grupper slik det ville ha vore viss klassen var større og delt opp i fleire grupper. Samstundes vil ein klasse med berre 4 elever nødvendigvis gi ein litt anna dynamikk i klasserommet enn ein klasse med normal storleik. Dette kan mellom anna skje gjennom at lærar vert for dominerande og styrer diskusjonen til elevane. For å gjere situasjonen mest mogleg representativ, i høve til større klassar med fleire grupper, gjorde eg eit aktivt val om å la elevane i størst mogeleg grad diskutera sjølvstendig i dei delane av timen kor det var lagt opp til det. Sjølv om eg ikkje var aktiv i diskusjonane, så kan likevel det at eg heile tida var til stades som ei framand, ha gjort at elevane følte seg vurderte eller observert. Dette kan potensielt ha gjort at elevane var meir beskjedene i diskusjonen enn dei elles ville ha vore. Mi oppleving var likevel at elevane var talføre og diskuterte godt. Undervisningsøkta hadde eit omfang på ein dobbelttime, og det vart tatt lydopptak av diskusjonane etter samtykke frå elevane. I presentasjonen av resultat er elevane tildelt pseudonym som avspeglar kjønn.

6 RESULTAT OG DRØFTING

I resultatene presentert tidlegare i oppgåva kom det fram at mange elevar hadde vanskar med å forklare observasjonar i ei kvantefysisk kontekst. Føremålet med fokusgruppeintervjua var å gå djupare inn på temaet, nå med ei ny elevgruppe, for å sjå på deira oppfatning av temaet meir systematisk enn gjennom rollespeloppgåva som gav dei første resultatene (Kapittel 4).

Fokusgruppeintervjua vart gjorde i samband med ReleKvant-modulen med *Partikler som bølger* som elevane hadde jobba med i fysikktimen veka før. Modulen omhandla blant anna dobbelspalteeksperimentet. Såleis var elevane som deltok i fokusgruppa på same stadiet i ReleKvant-programmet som elevane bak resultatene presentert i kapittel 5.

At observasjon i kvantefysikk påverkar måleresultatene hadde alle elevane som vart intervjuet fått med seg, slik som òg var tilfelle i det førre datasettet. I dette delkapittelet ser me på kva tankar elevane har om korleis observasjonar kan ha innflytelse. Av dei tidlegare resultatene kunne ein sjå at det ikkje var trivielt å forklare dette, og resultatene peikte i retning av at elevane sine førestillingar kring observatøromgrepet kunne vere spesielt viktig for korleis dei forstod dobbelspalteeksperimentet. Elevsvara vart då kategorisert i to kategoriar, basert på om elevane viste til målingar når dei snakka om observasjon, eller om det var underforstått at observasjon var synonymt med det å berre sjå. Kategoriane var: *Observasjon som måling*, og *observasjon som å sjå*. Eg held fram med å vise til desse kategoriane for dei ytringane det passar for. Datamaterialet frå dei to intervjugruppene vert halde avskilt, men det vil verte trekt parallellar mellom dei der det er føremålstenleg. Den første intervjugruppa består av Anne, Kari, Nils, Ole og Fredrik og den andre gruppa av Trond, Kjell, Kåre, Vilde og Per.

6.1 FØRSTE FOKUSGRUPPE – VIDAREGÅANDE SKULE A

I første delen av intervjuet får elevane snakke gjennom dobbelspalteeksperimentet. Dei viser at dei kjenner oppsettet, korleis klassiske bølger og partiklar oppfører seg, og at elektron viser både eigenskapane til partiklar og til bølger, men endrar oppførsel under observasjon. Denne første delen av intervjuet, tenkt som ei oppvarming, er av ein forteljande karakter utan djupare refleksjonar, og det er difor ikkje føremålstenleg å ta denne delen med i analysen. Første intervjugruppe sine førestillingar kring observasjon kjem til syne gjennom spørsmål frå meg om kvifor resultatet i dobbelspalteeksperimentet vert endra:

- (1) Eg Hvorfor blir det forskjellig resultat under observasjon?
- (2) Anne Elektronene må på en måte føle at de blir observert og så oppføre seg annerledes.
- (3) Kari Er ganske merkelig
- (4) Nils Ja, det blir ikke interferensmønster når noen observerer, når noen ser på liksom. Det er nesten som de har bevissthet på en måte.
- (5) Fredrik Tror ikke de har bevissthet altså, men det er fasinerende at når man ser på det eller observerer det så får man et annet resultat. Det finnes sikker en forklaring, men jeg skjønner det ikke.

Anne resonnerer seg fram til at endringar i resultat må kome av at elektrona på ein måte må *føle* at dei vert observert. Sidan elektrona nå gjer noko anna enn før dei vart observert må det nettopp ha skjedd noko med dei. Spørsmålet er berre korleis. Det at elektrona føler at dei vert observert kan bety to ting, at noko er i kontakt med dei som på ein måte verkar på dei, eller at dei kan føler slik som dyr og menneskjer gjer, og at dette fører til at dei gjer noko anna.

Nils si ytring (4) kjem rett inn på ideen om bevisstheit hjå elektrona. Ein kan legge merke til at dette er sagt i ein kontekst av observasjon som nokon som ser på, og er difor tydeleg innanfor kategorien *observasjon som å sjå*. Bevisstheit som signaliserer noko form for liv, var òg gjennomgåande i kategorien å *observasjon som å sjå* i dei tidlegare resultata. Igjen er det observasjon som ein passive aktivitet, gjennom det å vere synonymt med å sjå, som gjer at Nils tillegg elektrona bevisstheit. I fråvær av ein fysisk påverknad er det einaste ein mental eller metafysisk påverknad som står att. På same måte som effekten av observasjon i sosiale eksperiment på menneskjer, kor det er kjend at observasjon utgjer ein stor påverknad på oppførselen til dei som vert observerte. Fredrik er skeptisk til modellen om bevisstheit, og det verkar òg som om Nils er inne på noko av det same. Det finst sikkert ei forklaring, seier Ole, men ei slik alternativ forklaring er vanskeleg å kome med, med ei forståing i botn om at observasjon som ein passiv prosess.

Både Fredrik og Nils brukar verba å observere og å sjå om kvarandre som om dei er synonym, noko som òg var ein gjengangar i dei tidlegare resultata. Utdraget nedanfor vert det tydeleg at Kari òg har ei oppfatning som høyrer til kategorien *observasjon som å sjå*:

- (6) Eg Hva er det som menes med at eksperimentet blir «observert»?
- (7) Kari Det er vel at ved observasjon så ser man på forsøket, man følger med. Uten observasjon så ser man ikke hva som skjer, bare resultatet.
- (8) Eg Hva mener du med å følge med på?
- (9) Kari Du ser forsøket live.
- (10) Eg Hva med et videokamera da?
- (11) Kari Nei, det blir det samme, hvis man filmer det så kan man se det senere. Du observerer via videokamera.

Observasjon er å følge med på eller å sjå på forsøket, ifølge Kari. Ved mitt spørsmål om å innføre eit videokamera så meiner ho at det ikkje endrar det faktum at eksperimentet vert observert, då opptaket alltid kan sjåast seinare. Eit videokamera kan i mange eksperiment sjåast på som eit måleinstrument, som registrerer resultat med videoopptak. Kamera er i likskap med augo våre passive mottakarar av informasjon, då dei ikkje sender ut noko felt for å observere, men berre treng ljøs som finn vegen inn mot lensene. Difor vert det ikkje enklare å forklare kvifor eit videokamera skulle kunne påverke eit måleresultat. Mi tolking er at Kari legg vekt på at observatøren er som eit menneskje. Observasjon er at menneskjer ser, og difor er òg eit videokamera å rekne som ein observasjon, då menneskjer kan sjå opptaket ettertid.

- (12) Eg Hvis man går ut av laben, ville det blitt annerledes?
- (13) Nils Er ikke det uten observasjon?
- (14) Anne Men man kan fortsatt ha måleutstyr da. Så da burde ikke det at jeg forlater rommet påvirke.
- (15) Ole Men måleutstyret som registrer da.
- (16) Fredrik Men hvordan observere dere det da? Er det med detektorer eller er det personer som filmer og sånt?
- (17) Anne Det må være noe måleutstyr, det er jo utrolig smått.

Nils verkar òg å forstå observasjon som at ein person står og ser på, noko som kan lesast ut frå ytring (4). Det er difor logisk at når denne personen forlèt rommet, og det ikkje lenger er nokon som ser på, så er det ingen observasjon. Anne og Ole er ueinige i forklaringa til Nils og viser til at måleutstyr framleis kan vere til stades. Dette tyder på at dei har ei breiare forståing av observasjon som òg omfattar bruk av måleutstyr. Det kjem tydeleg frem i ytring (17) frå Anna at det nødvendigvis må vere noko måleutstyr sidan det som skal observerast er så lite. Dette stemmer i praksis, og viser at Anne har ei forståing av kva storleikar som gjeld i dobbelspalte-eksperimentet. Sjølv sagt går det òg an å gjere eit tankeeksperiment, kor ein kan sjå for seg å krympe menneskjer ned til mikroskopisk nivå slik at det ville vore mogeleg å kunne sjå kva som skjedde. Det er difor ikkje så enkelt å seie at alle som nemner menneskje har feil, så lenge dei òg forstår at det må vere eit samband mellom augo til observatøren og studieobjektet. I Feynman si versjon av dobbelspalte-eksperimentet (Feynman et al., 2006), presentert i teorikapittelet, er det nettopp eit ljosglimt når foton frå ei ljospære vert spreitt i møte med elektron som gjer det mogeleg for observatøren å sjå elektronen. Tankeeksperiment vil verte vidare diskutert i drøftinga.

I ytring (15) påpeiker Ole at det ikkje er nok med måleutstyret i seg sjølv, det er òg viktig at utstyret registrerer, altså at det er skrudd på. Det er ikkje måleutstyret som eit objekt i seg sjølv som gjer at oppførselen til elektronen endrar seg, men heller noko som måleinstrumentet gjer når det vert brukt til måling. Ytringa til Ole peiker difor mot at det er ein interaksjon som oppstår ved ei måling. Dette er eit sentralt poeng for å forstå observasjon, og ein kan leggje merke til at Ole ikkje var ein av dei foreslo bevisstheit for å forklare endringa ved observasjon. Då observasjon etter dette synet ikkje er ein passiv prosess, treng ein heller ikkje å tillegge elektronen eigenskapar slik som bevisstheit, til vanleg reservert for levande vesen.

Ein kan seie at på dette punktet i intervjuet så er det to ulike syn på observasjon i gruppa. Ole og Anna fell innanfor kategorien observasjon som måling medan Kari og Nils representerer observasjon som å sjå. Fredrik i ytring (16) verkar å vere forvirra av Kari si oppfatninga av at nokon filmar og ser på eksperimentet på den eine sida, og måleinstrument eller detektorar på den andre sida. Intervjuet går vidare med eit spørsmål frå meg:

- (18) Eg Hvorfor er det forskjellig resultat med måleinstrument?
- (19) Anne Måleutstyret er jo kanskje grunnen til at elektronene gjør det annerledes. At det dytter eller påvirker elektronene en viss grad slik at de ikke kan danne interferensmønsteret.
- (20) Fredrik Men hvis måleinstrumentet ikke måler? Hvis det ikke er skrudd på, hva blir resultatet da? Blir det da interferens eller hva? Hvis det bare står det og ikke måler
- (21) Kari Hvordan måles det egentlig, er det med ladning?
- (22) Anne Når den gjør måling så må den vel sende ut noe laser eller stråling, et eller annet for å observere. For å fange det opp. Det er et eller annet som sendes ut og brytes når det passerer, så da kunne man kanskje tro at det er dette som kan påvirke det.
- (23) Nils Hvis en person bare står og ser på forsøket uten noen måleapparat, blir det da interferens? Hvis man snur ryggen til da, er det forskjell på bare det? Jeg vil jo ikke tro det, men det er mye som jeg ikke forstår, så det kan jo hende.
- (24) Ole Kanskje systemet motvirker den ytre påvirkningen som vi gjør når vi måler ting. Kanskje interferensmønsteret oppstår når vi bare ser på det.
- (25) Fredrik Så måleinstrument som ikke måler er med interferens og med måling er det uten?
- (26) Anne Ja, er logisk at det er det som påvirker.

Gjennom Anne si ytring (19) etablerast eksplisitt ein interaksjon mellom måleutstyr og elektrona som studieobjekt. Måleutstyret kan påverke gjennom å dytte elektrona og det er kanskje grunnen til at det ikkje vert danna noko interferensmønster? Vidare i ytring (22) spesifiserer Anne at interaksjonen kan gå føre seg gjennom at måleinstrumentet sender ut ein «*laser eller stråling*» som «*brytes når der passerer*». Ole viser i ytring (24) at han er med på tankegangen om at ei måling vil bety ein ytre påverknad på systemet som vert målt, men stiller samstundes spørsmål om at interferensmønsteret kanskje oppstår når ein berre ser på. Såleis inneheld ytringa til Ole både observasjon som ein passiv og ei aktiv handling. Ei måling vil vere ein aktiv observasjon då ho

involverer ein interaksjon mellom måleapparatet og systemet, medan det å sjå er ein passiv-observasjon, noko som gjer at Ole stiller opp ei hypotese om at det kanskje ikkje har nokon påverknad. Som nemnd tidlegare vil òg det å sjå innebere ein interaksjon med systemet under observasjon, gjennom til dømes reflektert ljøs frå ei ljospæra. Ole verkar ikkje å ha reflektert over at ein trengs eit slags samband mellom augo og systemet. Dette viser på korleis ei forståing av observasjon som måling kan gjere det enklare for elevane å kome fram til korleis observasjon kan ha ein innverknad då ei slik vinkling i større grad impliserer ein interaksjon, medan *observasjon som å sjå* kan vere meir forvirrande.

Hjå Nils, som framleis har fokus på det å sjå, kjem nettopp ei slik uvisse fram. Ytringa (23) om at det å snu ryggen til kanskje vil ha ein påverknad, liknar nokre av utsegnene frå dei tidlegare resultata der det òg var uvisse i samanheng med at når «*du ser på dem[elektrona] så gjør de noe annet?*».

Fredrik (20) undrar framleis på om måleinstrumentet som ikkje måler vil påverke eksperimentet. Sjølv om Fredrik tenkjer på observasjon som måling verkar han ikkje å vere klar over at interaksjonen forbunde med ei måling. Ei manglande bevisstheit kring interaksjonen gjer det like vanskelege for Fredrik å forklare korleis ei måling kan ha ein innverknad på resultatet som det er forklare korleis det å sjå kan ha ein innverknad. I løpet av samtalen ser ein at Fredrik ved hjelp av dei andre elevane får klarheit i at det er ein skilnad på om måleinstrumentet målar eller ikkje. Det er likevel usikkert på om han har forstått kvifor det er slik, eller berre har fått høyre svaret frå dei andre elevane.

Det siste utdraget frå den første intervjugruppa handlar spesifikt om observasjon i kvantefysikk i høve til klassisk fysikk:

- (27) Eg Kan dere si noe om observasjon i kvantefysikk i forhold til vanlig fysikk?
- (28) Fredrik I kvantefysikk er det påvirkning, tror ikke vi har det til vanlig.
- (29) Ole Vi kom vel frem til nå at det er en måling som påvirker i kvantefysikk.

- (30) Anne Det har vel kanskje med at det er så lite og så stort, og at derfor blir det en forskjell. Når det er veldig lite påvirker målingen, men til vanlig er ting så store at det ikkje har noe å si. For eksempel med en laser.
- (31) Nils Ja, det gir mer mening.

Fredrik og Ole uttrykker begge at det til forskjell frå klassisk fysikk vil vere ein påverknad i kvantefysikk. Anne som tidlegare har vist at ho forstår storleiksskalaen til eksperimentet (Ytring 17), lanserer ein teori om at det kanskje har noko med å gjere med storleiken til eksperimenta i klassisk fysikk kontra kvantefysikk. Anne har eit poeng; når ting vert veldig små vil den diskret naturen i interaksjonane gjere seg gjeldande, til dømes elektromagnetisk stråling som beståande av foton. I klassisk eksperiment er oppsetta så store at ein kan anta kontinuitet i interaksjonane, og intensiteten kan verte senka vilkårleg mykje.

6.2 FOKUSGRUPPE 2– VIDAREGÅANDE SKULE A

Vidare ser me på den andre intervjugruppa. På same vis med den første gruppa opna intervjuet med å snakka litt generelt om dobbeltspalteeksperimentet der elevane forklarte korleis det gjekk føre seg. Fokuset vart så retta spesifikt mot observasjon med spørsmål frå meg:

- (1) Eg Kan vi finne ut hvilken spalte det [elektronet] går igjennom?
- (2) Vilde Da må det være noe sensorer eller et eller annet som sjekker i selve spalten den går igjennom
- (3) Trond Ja, det var jo det siste delen av filmen. Da fant vi ut at når vi legger igjen i en observatør så må den bruke lys for å finne ut hvilken spalte det går igjennom. Og da påvirker det resultatet. Det er vanskelig å finne ut hvilken den går igjennom.
- (4) Vilde Det blir som en sensor da.
- (5) Kjell I det eksempelet ble det avgjort om de gikk gjennom den ene eller andre spalten, fordi sannsynligheten ble bestemt her

istedenfor der. Fordi du må på en måte bestemme en av de du kan ikke se at den går igjennom begge.

- (6) Kåre Når du har en observatør der så har du 2 streker og elektronet oppfører seg som en partikkel, og når du ikke har det oppfører elektronet seg som en bølge.

Vilde kjem i ytring (2) direkte inn på at det må vere ein sensor for å sjekke kva spalte elektronet går igjennom. Vidare kan ein òg sjå av ytring (3) til Trond at språkleg sett verkar det som om observatøren vert omtalt som en ting, framfor eit menneskje. Dette grunnjev eg ved å vise til ordbruk slik som «*vi legger igjen en observatør*» og «*må den bruke lys*». Trond peikar på det at observatøren må nytte ljøs for å finne ut av kva spalte som elektronet passerer gjennom. Dette retter merksemd mot at observatøren må gjere noko aktivt for å observera, som til dømes å sende ut ljøs. Trond tillegg denne aktive observatøren til siste delen av filmen (Dr. Quantum), noko som er ei feilkopling. Filmen inneheld ikkje ei slik forklaring, men eg har fått bekrefta av lærar til elevane, at dette vart eit tema i siste del av timen etter eit spørsmål frå ein elev om at observatøren kanskje nytta ljøs for å observera.

At den andre intervjugruppa kjem direkte inn på observatøren si aktive rolle i eksperimentet representerer ein skilnad mellom intervjugruppene, og dessutan eit skilje frå dei samtalane som vart presentert i kapittelet med *tidlegare resultat*. Som nemnd tidlegare vil denne kunnskapen om ein interaksjon mellom måleapparat og studieobjekt vere viktig for å forklara kvifor resultatet endrast, utan å ty til ei førestilling om bevisste elektron som kjenner blikket til observatøren.

Kjell si ytring (5) kan tolkast til å vere av eit særst høgt nivå. Ytringa er i samsvar med Born si sannsynsinterpretasjon og kollaps av bølgefunksjonen. Før ein gjer ei måling har elektronet ein fundamentalt udefinert posisjon, med sannsyn gitt av absoluttverdien til bølgefunksjonen $|\Psi(x)|^2$. Når ei måling vert gjort og ein finn elektronet ved ei av spaltene, går posisjonen frå ubestemt til bestemt. Dermed er det ikkje lenger er nokon mogelegheit for å finne elektronet andre stadar og kollapsar bølgefunksjonen. I Kjell sine ord vert sannsynet bestemt ved spaltene, der elektronet tvingast til å innta ein bestemt posisjon. At elektronet vert lokalisert gjer det òg klart at det må gå gjennom den eine eller andre spalta.

Vidare skal me sjå at denne gruppa òg har sine vanskar:

- (7) Vilde Det viser jo som han [læreren] sa at observatøren sender ut lys for å observere. Så har jo lysbølger da en effekt på elektronet sin oppførsel.
- (8) Per Hva jeg tenkte på da. Hva hvis du hadde latt lyset stå på og ikke har noen som ser på, så dannes det ikke et interferensmønster, fordi da står lyset og påvirker.
- (9) Kåre Så lenge du ikke måler det, hvis det bare er lys så blir det interferens.
- (10) Per Ja, jeg tenkte bare litt kritisk mot den tanken at det er lyset som påvirket
- (11) Kåre Ja, men det blir et interferensmønster selv om det er lys der, når du ikke måler det.

Vilde som tidlegare har vist at ho forstår observatøren som ein sensor, visar til at ljøs må til for å observere og at lysbølgene vil ha ein effekt på elektronet sin oppførsel. Bruken av ordet ljøsbølgjer indikerer ljøs som eit kontinuerleg fenomen, og ei referanse til ljøs som foton ville vore meir passande når det omhandlar å påverke einskilde elektron.

Per forsett med ein påstand om at det er ljøset som påverkar og ikkje det at nokon ser på. Dermed tillegg han elektrona sin endra oppførsel til mediet som vert nytta å sjå gjennom, altså ljøset, framfor handlinga å sjå i seg sjølv. Kåre visar i ytring (9) og (11) at han ikkje er samd. Det er sjølve målinga som er det utslagsgjevande elementet, og ikkje ljøset. Dette kan knytast opp mot eit par andre utsegn som Kåre kom med i løpet av intervjuet:

- *«Ljøset i seg selv ikke spiller en rolle, men hvis du måler og registrer»*
- *«Det virker jo litt som, hva skal jeg si, at en måling har litt tilbakevirkende effekt, hvis man kan si det sånn da. (...) At hvis du måler og registrer så blir resultatet endret.»*

Det verkar som Kåre meiner at det er sjølve registreringa av resultatet som gjer at elektrona endrar oppførsel. Satt på spissen tolkar eg Kåre slik at når ein skriv blekk på papir og registrerer måledata så vil resultatet verte endra, derav har målingar ein tilbakeverkande effekt.

Dette er ei forståing som kan samanliknast med ein form for informasjonssperrer i naturen, som hindrar oss i å registrere resultat utan at eksperiment vert påverka. Med tilvising til Heisenbergs

uskarpleiksrelasjon så kan ein kanskje påstå at ei slik sperre eksisterer, men det fungerer ikkje på den måten Ole viser til. Forståinga som legg vekt på om ei måling vert registrert, og ikkje interaksjonen mellom måleapparat og studieobjekt som er ei føresetnad for registrere. Forståinga tek altså vekk ljuset si betyding og den møter motstand. Samtalen fortsett slik:

- (12) Trond Er du sikker på det? Jeg forstod det slik at det var.. eller da han [læreren] tok det opp i timen, at vi sendte inn lys for å finne hvilken spalte den gikk gjennom og da kunne det ha påvirket. Og da forstod jeg det slik at det var lyset som avgjorde og ikke det at man observerte
- (13) Kåre Ja, vi hadde en diskusjon på helt på slutten av timen, det var noen som lurte på om det kunne være lyset som spilte inn. Jeg følte ikke at vi kom helt til et resultat egentlig
- (14) Per Ja, tenker også hvis det var lyset som spilte inn så hadde de kanskje nevnt det i videoen. At det heller var det liksom.
- (15) Kåre Fordi i videoen virket det som de ikke visste hvorfor det endret seg når de målte. Og hvis man hadde visst det var lyset som gjør det hadde de nok presentert det i videoen tenker jeg. Og det er derfor jeg tror at lyset i seg selv ikke spiller en rolle, men hvis du måler og registrer hvor elektronet er så vil det ikke lage et interferensmønster.
- (16) Vilde Men det som [læreren] sa var at det er lyset som observatøren sender ut som påvirker elektronene.
- (17) Kjell Jeg tror det samme som Vilde, han hadde vel ikke sagt det hvis han ikke visste det.

Elevane kjem inn på diskusjonen som dei hadde i slutten av timen. Trond byrjar med å presentere si forståing, som er ei riktig forståing av at interaksjonen med ljuset vil fungera som ei måling som lokaliserer elektrona, uavhengig av om nokon er til stades for å sjå. Samtalen gjer ei interessant vending når Per kjem med poenget om at viss det var ljuset som spelte inn så hadde dei nok nemnd det i videoen, og refererer her til videoen Dr. Quantum. Kåre er einig og legg til at i videoen så verka det som om dei ikkje visste kva som forårsaka endringa frå interferens til ikkje-interferens.

Vilde og Kjell er einig med Trond om at det er lyset som påverkar og grunnlegg dette med at læraren sa det. I dette tilfellet har læraren altså inkludert interaksjonen mellom observatør og målesystem, medan dette ikkje er gjort i Dr. Quantum videoen. Videoen som er ein del av ReleKvant-ressursane vert drøfta under diskusjonsdelen av oppgåva.

Intervjuet vert avslutta med å snakke om målingar i klassisk fysikk kontra kvantefysikk:

- (18) Eg Kan dere si noe om observasjon i kvantefysikk i forhold til vanlig fysikk?
- (19) Kåre I vanlig fysikk er alt enklere.
- (20) Kjell I vanlig fysikk trenger vi ikke å tenke så mye når vi gjør målinger. Men i kvantefysikk vil man endre resultatet.
- (21) Trond Jeg tror det har med lyset å gjøre. Man trenger lys begge plasser men i kvantefysikken vil det påvirke, og ikke til vanlig
- (22) Eg Hvorfor er det slik?
- (23) Trond Lyset har vel kanskje en effekt på elektronene fordi de er veldig følsomme eller noe.
- (24) Vilde Ja, og eksperimenter i vanlig fysikk er ikke så følsomme og da har det ingenting å si.

På same vis som med den første intervjugruppa er elevane samde om at det er forskjellar mellom målingar i klassisk fysikk og kvantefysikk. Trond klarer å relatere til at ein treng lys i begge tilfella, men det vil berre påverke i kvantefysikken. Det kjem vidare fram at elektron kanskje er veldig følsame, medan i klassisk fysikk så har det ikkje så mykje å sei då det ikkje er så følsamt der. Svaret er ikkje veldig ulikt det som den første intervjugruppa kom med angående skilnadar mellom målingar i klassisk fysikk og kvantefysikk. Det liknar på forstyrningstolkinga av Heisenbergs uskarpleiksrelasjon beskrive i kapittel 2.1.5, der energien i interaksjonen til dømes ved ei posisjonsmåling påverka rørslemengda til fotona.

Resultata frå dei to fokusgruppeintervjua viser at målingar i kvantefysikk er eit utfordrande tema for elevane. Det faktum at observasjon har påverknad på resultatet av dobbeltspalteeksperimentet er ikkje det som er utfordrande, men heller å drøfte kvifor det er slik. Elevar kan ha ulike typar forståing av observasjon. Både kategorien *observasjon som å sjå* og *observasjon som måling* er

vanleg. Elevar som forstår måling som ein passiv prosess, utan noko interaksjon mellom måleobjekt og observatør, er dei som har størst vanskar med å forklare påverknaden til observasjon. Eit passivt syn på måling er spesielt vanleg i dei elevutsegnene som fell innanfor kategorien *observasjon som å sjå*, men òg innanfor kategorien *observasjon som måling* er det ingen garanti for at elevane er klar over interaksjonen som involvert i ei måling. Eit symptom på ei slik forståing er at nokre elevar stillar spørsmål som går ut på at berre nærværet av eit måleapparat gjer at elektrona i eksperimentet forandrar oppførsel, sjølv når måleapparatet ikkje er skrudd på.

Fokusgruppeintervjua legg opp til diskusjon mellom elevane, og elevane viser ein viss progresjon gjennom intervjuet. Særskild i den første intervjugruppa kom interaksjonen meir i fokus etter kvart som intervjuet gjekk fram. Elevane nyttar diskusjonen til å ta opp områder av forståinga si kor dei er usikre. I den andre intervjugruppa kom det fram at nokre av elevane var usikre på om det var ljuset som påverka eller om det var observatøren i seg sjølv. Noko av usikkerheita skyldast at gruppa var forvirra av at forklaringa dei hadde fått frå lærar stod i kontrast til det dei hadde sett i videoen Dr. Quantum.

Ser ein resultata i studien som ein heilskap, både dei presenter i dette kapitlet, og under *tidlegare resultat* i kapittel 3, er det klart at målingar i kvantefysikk er eit tema som det er knyta utfordringar til. Difor vil eg i det neste kapitelet presentere eit forslag til undervisningsopplegg som fokuserer nettopp på dette temaet, for å møte elevane sine utfordringar og styrke deira forståing.

7 UNDERVISNINGSSOPPLEGG

I dette kapittelet vert eit forslag til undervisningsopplegg presentert saman med erfaringar frå utprøving av opplegget i ein Fysikk 2-klasse.

7.1 LÆRINGSMÅL OG OPPBYGNING.

Dette kapittelet inneheld eit forslag til undervisningsopplegg der observasjon i kvantefysikk står i fokus. Opplegget er eit resultat av analysen av elevdiskusjonar som er presentert i denne studien, der det kom det fram at mange elevar har problem med å forklare rolla observasjon spelar i kvantefysikk. Ein av faktorane som gjer det vanskeleg å forklare at observasjon kan ha innverknad, er at interaksjonen som er naudsynt for å gjere ei måling, ikkje er kjend for elevane. Eg har difor definert eit læringsmåla går nettopp på interaksjon i samband med observasjon:

Læringsmål 1 (LM1): Kunne forklare hvorfor det trengs en interaksjon mellom måleapparat og studieobjekt for å observere / gjøre en måling.

Å observera eller å gjere ei måling er i kvantefysikk eit og same gjeremål, og difor står det skråstrek mellom dei. Læringsmåla og anna tekst frå undervisningsopplegget står på bokmål, då det var slik det vart presentert for elevane. For å forklare kvifor observasjonar eller målingar kan ha innverknad på eksperiment innan kvantefysikk, er det òg viktig å vere klar over den spesielle rolla målingar har i dei mest kjende tolkingane av kvantefysikk. Det andre læringsmålet omhandlar dette og er som følgjer:

Læringsmål 2 (LM2): Kunne drøfte ulike syn på målinger sin rolle i kvantefysikk.

Inkludert i undervisningsopplegget er målingar si rolle i ljøs av ukjend-variabel interpretasjonen og København-tolkinga. Sjølv om ukjend-variabel teoriar i sin enklaste form ikkje har noko støtte blant fysikarar i dag, meiner eg at det er gode pedagogiske grunnar til å samanlikne nettopp denne tolkinga opp mot København-tolkinga. Ukjend-variabel interpretasjonen representerer ei form for realisme i kvantefysikken, slik ein er van med frå den klassiske fysikken. Den slår i hel mange av dei litt absurde resultatata i kvantefysikken ved å seie at det må finnast underliggande mekanismar, som viss dei var kjende kunne ha forklart resultatata på ein deterministisk og logisk måte. København-tolkinga er motstykke til denne realismen, der ein ikkje kan snakke om ibuande

eigenskapar til kvantesystem, men der eigenskapane berre gjer seg til kjenne i samband med målingar.

Analysen av resultatane frå denne studien viser at elevane gjennom diskusjonar er flinke til å uttrykke forståinga si og utfordre kvarandre. Det er vist at diskusjonar kan spele ei positiv rolle for læring av kvantefysikk (Bungum et al., 2018), og difor legg opplegget opp til diskusjon, både i grupper og i plenum. Undervisningsopplegget består i prinsippet av to delar som går på dei to ulike læringsmåla. Tabell 1 gir ei oversikt over opplegget, som har ei tidsramme på to skuletimar eller ein dobbelttime, og deretter følgjer ei utdjuping av dei ulike punkta:

Tabell 1: Oversikt over undervisningsopplegg

Del 1	LM1: <i>Kunne forklare hvorfor det trengs en interaksjon mellom måleapparat og studieobjekt for å observere / gjøre en måling.</i>
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Introduksjon til tema med video Dr. Quantum. 2. Diskusjon om videoen. 3. Eksperiment: Simulering av eit måleapparat med og utan interaksjon. 4. Elevdiskusjon kring simuleringa.
Del 2	LM2: <i>Kunne drøfte ulike syn på målinger sin rolle i kvantefysikk.</i>
	<ol style="list-style-type: none"> 5. Diskusjonsoppgåve 6. Lærarstyrt gjennomgang av alternativa i diskusjonsoppgåva. 7. Oppsummering.

Del 1: Kunne forklare hvorfor det trengs en interaksjon mellom måleapparat og studieobjekt for å observere / gjøre en måling.

1. Introduksjon til tema med video Dr. Quantum.

Videoen Dr. Quantum (sjå kapittel 3) har mange kvalitetar som gjer at den passar godt til å starte undervisningsøkta. Videoen forklarar dobbelspalteeksperimentet på ein illustrativ og spanande måte, samstundes gjer den grunnlag for å reise spørsmål kring observasjon og observatøren si rolle.

2. Gruppediskusjon om videoen.

Elevane diskuterer innhaldet i videoen Dr. Quantum saman i grupper. Lærar kjem med desse spørsmåla på PowerPoint:

- *Hva skjer hvis man prøver å finne ut hvilken spalte elektronet går igjennom?*
- *Hvorfor blir det forskjellig resultat med observasjon?*

Spørsmåla er omtrent dei same som vert brukt i ReleKvant-ressursane. Dette er spørsmål som gjennom datamaterialet har vorte vist at eignar seg til å få fram elevane sine oppfatningar. Diskusjonen vert runda av med ei oppsummering i plenum der representantar frå gruppene fortel kva dei har diskutert, og kva oppfatninga som har kome fram.

3. Eksperiment: Simulering av eit måleapparat med og utan interaksjon.

Om ein brukar datamaterialet presentert i denne oppgåva som peikepinn kan ein forvente at dei aller fleste elevane har fått med seg at observasjon har ein påverknad, men ikkje alle er klar over at observasjon eller måling inneber ein interaksjon. Påverknaden kan difor framstå som mystisk for elevane, som vist i kapittel 4. I det følgjande eksperimentet ønsker eg å vise at for at noko informasjon frå eit eksperiment skal nå fram til eit måleapparat så må det vere ein interaksjon i form av eit fysisk samband mellom dei :

Elevane skal vere måleapparat for eit eksperiment som lærar gjennomfører framme ved kateteret. Eksperimentet går ut på at lærar kastar eit papirfly som flyg og så kolliderer i veggen. Variablar av interesse er banen til flyet og tidspunktet når det treff veggen. Eksperimentet vert første gong gjennomført i eit opplyst klasserom, og det er ikkje vanskeleg for elevane å anslå parameterane.

Eksperimentet vert så gjort på nytt, men nå skal det gjerast utan at noko elektromagnetisk stråling når fram til måleapparata frå eksperimentoppsettet. Dette er sjølvstakt ikkje mogeleg i settingen av ein vanleg skuletimen, og eksperimentet krev difor at elevane bruker fantasien. Ljoset i klasserommet vert sløkt, men eventuelle vindauge vil gjere at det ikkje vert heilt mørkt. Difor må elevane hjelpe til med å lukke augo for å få det heilt svart. Lærar presiserer at augo vert lukka for å simulere fråvær av all elektromagnetisk stråling, deriblant ljøs, men i prinsippet er augo eigenleg opne. Om det er tilgang til eit rom utan vindauge kor det kan verte heilt mørkt, til dømes eit gammalt mørkerom for fotoframkalling, så er det ein ideell plass for eksperimentet. Å lukka augo er då ikkje

naudsynt. Dette eksperimentet «utan» elektromagnetisk stråling gjer at det er umogeleg å seie noko om hastigheita eller banen til flyet, men ein kan framleis høyre når flyet treff vegg.

Eksperimentet vert gjenteke ein tredje gong, framleis utan elektromagnetisk stråling, men nå òg i «vakuum». Eit tankebilete som kan vere nyttig er at elevane tenkjer seg at dei flyt rundt i verdsrommet i absolutt mørke, og absolutt vakuum. I praksis kan dette gjerast ved at elevane held seg for øyra, slik at det ikkje lenger er mogeleg å høyre lyd frå eksperimentet. Elevane har nå ingen haldepunkt for å seie noko om variablane til papirflyet, og dei kan i det heile ikkje vere sikre på om eksperimentet er vorte gjennomført. Det kjem ikkje noko informasjon frå eksperimentet fram til «måleapparata». Ein kan seie at dette er utan noko form for interaksjon.

Det er viktig for lærar å understreke at elevane må tenkje seg at det faktisk er vakuum og inga elektromagnetisk stråling, og ikkje berre lukke augo og øyra. Ved å berre lukka augo og øyra er det ikkje mangel på interaksjon, men sambandet vert berre blokkert og informasjonen difor helde utanfor. Det er viktig at lærar er sikre på at elevane forstår at føremålet med eksperimentet er å illustrere at for å overføre informasjon frå ein plass til ein annan må de vere eit fysisk samband. Ein kan trekka parallellar med å prøve å lese ei bok stummande mørke, informasjonen i boka er utilgjengeleg for lesaren, utan mediet ljøs som den kan overførast gjennom. Eksperimentet illustrer *ikkje* påverknaden som følgje av observasjon, del 2 av undervisningsopplegget har som føremål å gjere dette, men ved å først etablere ein fysisk kontakt mellom observatør og system er det tatt ein første viktig steg.

4. Elevdiskusjon kring simuleringa.

Elevane får litt tid til å diskutere seg imellom etter eksperimentet. Diskusjonen vert avrunda med ei oppsummering i plenum der representantar frå gruppene fortel kva dei har diskutert. Plenumssamtalen gir lærar mogelegheiter til å sjå om elevane har oppnådd læringsmålet om interaksjon, og lærar kan eventuelt støtte elevane med spørsmål og betraktningar for å hjelpe dei å kome fram mot ei rett forståing av eksperimentet.

Nå som ei forståing av interaksjon er etablert, går timen vidare med til å fokusere på effekten av ei måling og ulike tolkingar av den.

Del 2: Kunne drøfte ulike syn på målinger sin rolle i kvantefysikk.

5. Diskusjonsoppgåve:

Det neste temaet vert introdusert som ei diskusjonsoppgåve. Oppgåva er inspirert av eit utdrag frå Griffiths (2005) si lærebok i kvantefysikk, og er som følgjer:

Dere gjør en måling og finner et elektron i et punkt p . Hva betyr det?

- 1) *Elektronet befant seg i punktet p akkurat i det øyeblikk da målingen ble gjort.*
- 2) *Elektronet befant seg egentlig ingen steder, men målingen tvang den til å «gjøre et valg»*
- 3) *Dumt spørsmål / Nekter å svare.*

Ønsket er at elevane skal diskutere seg gjennom alle alternativa og ikkje berre bestemme seg for et alternativ utan å vurdere dei andre i detalj. Difor får elevane høyre frå lærar at alle alternativa viser viktige aspekt ved kvantefysikk ved at dei representerer ulike tolkingar, og at desse vil verte gjennomgått i plenum etterpå. Elevane vert oppfordra til å tenkje på kva dei forskjellige alternativa betyr for kvantefysikken.

6. Lærarstyrt gjennomgang av alternativa i diskusjonsoppgåva.

Elevane legg fram kva dei har diskutert, og lærar utdjuar. Viktige aspekt som bør verte nemnde for kvart svaralternativ er som følgjer:

1) Partikkelen befant seg i punktet p akkurat i det øyeblikk da målingen ble gjort.

Dette verkar intuitivt som det mest fornuftige svaret, og bland anna det svaret som Einstein meinte var rett. Men viss dette stemmer er kvantefysikken ein ufullstendig teori, då teorien ikkje vil kunne ha føresagt at partikkelen var i punktet p før målinga, sjølv om dette verkeleg var tilfellet. Det som ser ut som mangel på determinisme i kvantefysikk er ikkje ein fundamental del av naturen, men skyldast ei ukunne frå vår side. Det må altså vere nokre variablar som er ukjende for oss, som viss dei var kjende kunne gitt ei fullstendig og deterministisk beskriving av partikkelen. Alternativ 1 peikar altså på ein skjult variabel tolking av kvantefysikken.

Problem: Viss partiklar heile tida er lokalisert og har ein veldefinert posisjon, korleis kan ein då forklare interferensmønsteret i dobbelspalteeksperimentet? Lokaliserte partiklar må nødvendigvis gå igjennom den eine eller den andre spalta og fordelinga på bakplata vil då vere summen av fordelingane for kvar av dei to spaltene. Dette kan ikkje vere eit interferensmønster. Sjå tilbake til kapittel 2.1.2 for vidare forklaring.

Det er òg bevist av John Steward Bell, at lokale skulte variablar ikkje kan forklare fenomenen i kvantefysikk (sjå kapittel 2.1.7)

2) Elektronet befant seg egentlig ingen steder, men målingen tvang den til å «gjøre et valg»

Viss ein går for alternativ 2, så tyder dette på at målingar har ein særst spesiell rolle i kvantefysikken. Partikkelen som ikkje hadde nokon definert posisjon før målinga, har gjennom målinga fått nettopp dette. Eit måleapparat måler ikkje berre eit resultat, men ein kan seie at resultatet vert til i samband med måleapparatet. Ein partikkel i seg sjølv har nokon fysiske storleikar slik som posisjon og rørslemengde. Desse eigenskapane vert først ein realitet når partikkelen interagerer med eit måleapparat eigna for å få desse fram. At ein ikkje kan føresei kor partikkelen er i forkant av ei måling skyldast altså ikkje ukunne, men heller at den ikkje har ein definert posisjon. Dette synet er tett knytt opp til Københavntolkinga av kvantefysikk.

I ljøs av dobbeltspalteeksperimentet kan ein seie at ved å måle kva spalte elektronet passerer gjennom i vil ein tvinge elektronet til innta ein definert posisjon. Det lokaliserte elektronet passerte berre gjennom den spalta der det vart detektert, og let seg ikkje påverka av om den andre spalta var open eller ikkje. Resultatet vil difor verte det same som klinkekulene i kapittel 2.1.2.

3) Dumt spørsmål / Nekter å svare.

Kvifor skulle ein nekte å svare? Det botnar ut i kva som er eit spørsmål som det er verdt å bruke tid på. Innan naturvitskap vil det å bruke mykje tid på eit spørsmål som ein per definisjon aldri vil kunne få svar på eller vite noko om, vere lite fruktbar bruk av tid. På same måte vil det å prøve og svare på korleis eit system var før ei måling, være meningslaust, då ein per definisjon ikkje kan vite noko om systemet utan å gjere ei måling, og vert det målt så er ikkje lenger systemet slik det var før det vart målt. Pauli samanliknar ei slik problemstilling med spørsmålet om kor mange englar det er plass til på eit knappenålshovud, eit spørsmål som opptok geistleg lærde gjennom hundreåra, og som i dag verte brukt som ein metafor for å kaste vekk tid på å debattere spørsmål av ingen verdi (Griffiths, 2005).

Denne oppgåva som har ikkje noko direkte eintydig fasit, men ein majoritet av fysikarar ville ha stilt seg bak alternativ 2. Særst få eller ingen ville valt alternativ 1, medan alternativ 3 er ein akseptabel posisjon, som òg har band opp mot København-tolkinga og instrumentalisme (Griffiths, 2005; Schlosshauer et al., 2013).

7. Oppsummering i klassen.

Elevane snakkar først i grupper om kva dei har lært i lært i denne økta, før me snakkar saman i plenum. Lærar bør legge spesielt merke til om elevane viser forståing for alternativ 2, som svarar til storleikar går frå å vere fundamentalt ubestemt til bestemt, og måling såleis er ein aktiv handling. Lærar kan gjerne hjelpe elevane med å sette dette i kontrast med alternativ 1, kor måling svarar til ei passiv registrering av på førehand vel definerte tilstandar.

7.2 ERFARINGAR FRÅ UTPRØVING PÅ VIDAREGÅANDE SKULE B.

Opplegget som beskrive foran har vorte prøvd ut i ein dobbeltime med ein Fysikk 2-klasse. Klassa bestod berre av 4 elevar. Eg var difor bevisst på og ikkje styre diskusjonen i gruppa i dei delane av timen der det var planlagt gruppediskusjonar.

Skulen var ikkje med i ReleKvant-prosjektet, og elevane var ikkje kjende med ReleKvant-læringsressursane. Klassen hadde tidlegare fått ei kort innføring i kvantefysikk frå faglærar og det var såleis eit relativt nytt tema for elevane. Dobbeltspalteeksperimentet hadde vore eit av temaa i innføringa, så videoen med Dr. Quantum var ikkje første møte med dobbeltspalteeksperimentet.

Vidare vil utdrag frå elevdiskusjonane ved utprøvinga av undervisningsopplegget verte presentert. Dei fire elevane i klassen har fått pseudonyma Anita, Birgit, Caroline og Daniel, som svarar til kjønn. Etter videoen med Dr. Quantum skulle elevane diskutere desse spørsmåla:

- *Hva skjer hvis man prøver å finne ut hvilken spalte elektronet går igjennom?*
- *Hvorfor blir det forskjellig resultat med observasjon?*

Diskusjonen i klassen gjekk godt, og elevane var interessert og aktive. Nedanfor følgjer eit utdrag frå diskusjonen i gruppa:

- (1) Daniel Når man skulle finne hvilken spalte det var så ble det et annet resultat.
- (2) Caroline Og det var på grunn av observatøren, og at elektronene gjorde ting annerledes da. Det virker ganske sært egentlig.
- (3) Daniel Ja, ser ikke helt hvorfor de [elektronene] skulle gjøre det liksom. Å oppføre seg annerledes.
- (4) Anita De må vel føle det på en måte?

- (5) Daniel Men hvordan kan elektroner som en fysisk ting føle noe? Og hva føler de? At de ble observert?
- (6) Anita Det er vel kanskje at observatøren gjør noe da, og det gjør at elektronene endrer seg.
- (7) Caroline Men observatøren ser jo bare på, og det er så rar at det skal endre seg bare for det. Men de sier jo at kvantefysikk er rart så man vet jo aldri.
- (8) Daniel Ja, det gir ikke mening i forhold til vanlig fysikk i alle fall.

Diskusjonen viser oppfatningar som i det tidlegare analyserte datamaterialet har vist seg å vere vanlege. *Observasjon som å sjå* er tydeleg til stades i utsegn (7) frå Caroline, som seier at «*observatøren ser jo bare på*». *Observasjon som å sjå* kan òg verte tolka som å vere til stades i utsegn (5) frå Daniel. I utsegna er Daniel inne på det faktum at elektron er ein fysisk ting, og difor ikkje burde ikkje kunne føle om dei ble observert. Mi tolking er at i dette tilfellet kan omgrep «fysisk ting» verte lest som; ikkje levande. Innvendinga om at elektron som ikkje er levande er ei oppfatning som har kome til syne fleire gonger i det innsamla datamaterialet for studien.

«*Det er vel kanskje at observatøren gjør noe da*» seier Anita i ytring (6), og viser at ho er inne på tanken om at observatøren gjer noko aktivt for å observere, men det vert ikkje utdjupa i den vidare diskusjonen.

Vidare skal me sjå på utdrag av diskusjonen i gruppa etter at eksperimentet med simulering av eit måleapparat og eit studieobjekt utan nokon interaksjon er utført:

- (9) Caroline For å se så må man ha lys, eller så er det bare helt svart og man kan man ikke vite noe heller. Eller så kan man ha lyd da.
- (10) Anita Det var en interaksjon med det som blir observert eller målt.
- (11) Birgit og lyset er vel det som påvirker?
- (12) Daniel Ja, og det forklarer litt da, om hvorfor observatøren endrer det.
- (13) Birgit Lys er jo fotoner, så det er kanskje de som gjør det.
- (14) Caroline Kanskje lyd gjøre at det endrer seg også.

(15) Daniel Tror vi har knekt koden nå.

Utdraget frå samtalen viser at elevane nå fokuserer på kva som må til for å observere. Caroline (9) nemner spesifikt lyd og ljøs, som var dei to media som vart snakka om i simulasjonen, medan Anita (9) snakkar meir generelt om ein interaksjon med det som vert målt. Utsegna her viser at elevane i stor grad hadde nådd det første læringsmålet med timen:

- *LM1: Kunne forklare hvorfor det trengs en interaksjon mellom måleapparat og studieobjekt for å observere / gjøre en måling.*

Nå som fokus i diskusjonen er retta mot interaksjonen i samband med observasjon, tek det ikkje lang tid før elevane uttrykkjer idear at om denne interaksjonen kan vere det som gjer at resultatet vert endra under observasjon. Dette er eit gjentakande fenomen òg i resultata frå fokusgruppeintervjua, at når interaksjonen mellom måleapparat og systemet vert kjend, vil elevane stille spørsmål med om dette er forklaringa på påverknaden under observasjon.

For å få eit svar på det spørsmålet er det viktig at elevane er kjende med den rolla som observasjonar har i kvantefysikk. Økta går derfor vidare med dette som mål, og tar utgangspunkt i ein situasjon kor eit elektron vert funnet i eit punkt p . Elevane skal diskutera følgjande tre alternativ:

- 4) *Elektronet befant seg i punktet p akkurat i det øyeblikk da målingen ble gjort.*
- 5) *Elektronet befant seg egentlig ingen steder, men målingen tvang den til å «gjøre et valg»*
- 6) *Dumt spørsmål / Nekt å svare.*

Det verkar som om denne oppgåva gjekk litt over hovudet på elevane, og gruppa kom aldri inn på det som eg meiner er kjernen i oppgåva, som var å diskutera kva dei tre alternativa betyr for rolla til observasjon eller målingar i kvantefysikk. Diskusjonen vart difor ikkje så produktiv som eg hadde håpa. Nedanfor er eit par enkeltutsegn som illustrerer dette:

- Caroline *Det virker logisk at det må være [alternativ] 1), men samtidig er det vel kanskje for normalt til å være kvante, når det er sånn det er til vanlig. Nummer 2) virker mer som kvantefysikk. At elektronet ikke er noen plass.*

- Daniel *Jeg nekter å svare, så velger nummer 3.*

Samstundes er det kanskje mykje å vente at elevane på eige hand skal klare å leggje ut om det som er ein djuptgripande filosofisk debatt. Etter lærarstyrt gjennomgang av kva kvart enkelt alternativ i diskusjonsoppgåva betyr for observasjonen si rolle i kvantefysikk, vert økta avslutta med at elevane oppsummerer kva dei har lært:

- (16) Caroline Jeg har lært at for å observere så må man bruke noe. For eksempel lys eller lyd. Og at observasjon er ganske spesielt, fordi det kan gjøre at ting blir bestemt, og dette er spesielt for kvantefysikk. Fordi ting kan også være ubestemt der.
- (17) Anita De sier at det er en interaksjon mellom observatøren og det som blir observert.
- (18) Caroline Ja, lyset altså.
- (19) Birgit Og det med den påvirkningen var vel fordi fotonene i lyset gjorde det.
- (20) Daniel Hvis det ikke det er lys eller noe eller så vet man ingenting, heller ikke om de har gjort eksperimentet i det hele tatt. Men vet ikke helt om jeg skjønnte det med at den hadde ubestemt posisjon. Den er liksom ingen plass eller?
- (21) Anita Ja, syntes også det var merkelig med at ting kan være ubestemt, eller posisjonen ubestemt da.
- (22) Daniel Ja, ikke sant?
- (23) Caroline Det er vel kanskje meningen at det ikke skal gi mening da.

Oppsummeringa av timen ser eg i samband med læringsmåla, og tek først ta utgangspunkt i det første læringsmålet (LM1):

- *LM1: Kunne forklare hvorfor det trengs en interaksjon mellom måleapparat og studieobjekt for å observere / gjøre en måling*

Ein kan sjå av ytringane at alle elevane har fått med seg at observasjon involverer ein interaksjon, i den forstand at ein må bruke noko for å observere. Caroline si ytring (16), om at ein må bruke lys eller lyd for å observere, heng tett saman med simuleringa som vart gjort i økta, kor nettopp lyd og lys var det ein brukte for å observere. Anita (17) knyter dette til interaksjon mellom observatøren og det som vert observert, og innfører såleis meir faglege omgrep. Daniel (20) viser òg til simulasjonen kor elevane opplevde og ikkje kunne vite noko om eksperimentet, heller ikkje om det hadde vorte utført eller ei. Ljoset som må til for å observere har kanskje skyld i påverknaden hypoteserer Birgit i ytring (19), viser såleis at ho er på eit nivå der ho kan spekulere i konsekvensar av interaksjonen.

Vidare ser me på elevytringane i forhold til det andre læringsmålet (LM2):

- *LM2: Kunne drøfte ulike syn på målinger si rolle i kvantefysikk.*

Synet på målingar si rolle som kjem opp i oppsummeringa er at ei måling kan gjere at «ting» i kvantefysikken, går frå ubestemt til bestemt, sjå til dømes Caroline si ytring (16). Det vert ikkje drøfta andre syn på målingar i oppsummeringa, til dømes det skjulte variabel synet som var knytt til alternativ 1: *Partikkelen befant seg i punktet p akkurat i det øyeblikket da målingen ble gjort.* Eg meiner at dette ikkje er noko tap, då denne oppfatninga er identisk med slik målingar vert opplevd til vanleg, nemleg at dei upåverka visar verda slik ho er.

Det kjem fram i utsegnene (20) og (21) at i det minste Daniel og Anita synast det er vanskeleg å sjå føre seg kva det betyr at posisjonen til elektronet var ubestemt før målinga. Anti-realist synet som er forbunde med København-tolkinga, som involverer at det å snakke om fysiske eigenskapar til kvantesystem i fråvær av målingar er meningslaust, kan vere ubehageleg, og er nesten ikkje mogleg og sjå føre seg i våre klassiske sinn. Difor synast eg at Caroline si respons (23) om at «*Det er vel kanskje meningen at det ikke skal gi mening da*» er veldig passande.

7.3 AVSLUTTANDE KOMMENTARAR.

Undervisningsopplegget vil verte eit tema i drøftinga, men i dette delkapittelet presenterer eg eit par forslag til forbetringar som eg har tenkt på sida opplegget vart gjennomført.

I boka *The new world of Mr Tompkins*, teiknar George Gamow (2001) eit bilete av korleis verda ville sett ut viss Planck sin konstant h var lik 1, i staden for å vere på storleiksorden 10^{-34} . På same måte kunne lærar saman med elevane førestilt seg korleis verda ville vore viss medelevar berre

hadde hatt fysiske eigenskapar i samband med målingar. Ein kunne til dømes ha snakka om høgda eller posisjonen til klassekameratar i tilfelle kor den ikkje vart målt, og difor var ubestemte.

Slike øvingar vil ikkje vere realistiske på alle hald, og kan vere enkle å slå høl på med argument om at det ikkje ville vore heilt slik, eller at det ikkje ville vore mogeleg. Men ved å nytte kjende og konkrete objekt, i staden for meir abstrakte omgrep slik som elektron og foton, kan elevane i større grad oppleve kor merkeleg verda ville ha vore om målingar hadde hatt same rolla som dei har i kvantefysikk ved København-tolkinga.

Schrödingers katt, som er eit tankeeksperiment kor ein makroskopisk katt vert kopla til eit mikroskopisk kvantesystem, hadde òg kunne passa inn i samband med undervisningsopplegget. Tankeeksperimentet vart laga for å illustrere kor absurd kvantefysikk er når den vert projisert opp til ei makroskopisk verd, og er tett knyta til observasjon. Posisjonsmålinga for elektronet er analogt med målinga av katten sin vitale tilstand ved opninga av boksen.

I følge København-tolkinga er begge i ein ubestemt eller superposisjonert tilstand i før ei måling. Det kan difor vere ein idé for eit undervisningsopplegg å knyte Schrödingers katt saman med posisjonsmålinga på elektronet.

8 DISKUSJON

Resultata i denne studien viser at observasjon er eit anna område kor elvar møter utfordringar i kvantefysikk. Observasjon er eit tema som har ein ganske triviell rolle i den klassiske fysikken, men som i kvantefysikken vert meir utfordrande, som diskutert i kapittel 2.1.6 om kollaps av bølgefunksjon og 2.1.7 om Københavntolkinga. Dette er i liten grad tatt omsyn til i læreplanar og undervisningsmateriell. I dette diskusjonskapittelet skal eg svare på forskingsspørsmålet som vart presentert i innleiinga:

- *Korleis forstår elevar i Fysikk 2 observasjon i kvantefysikk?*

Gjennom diskusjonen håpar eg å overtyde lesaren om at ei bevisstheit kring observasjon er ei viktig brikke i ei god forståing av kvantefysikk som heilskap, og diskusjonen vert avslutta med forslag til korleis undervisning og undervisningsressursar kan bidra til å betre elvar si forståing om observasjon.

8.1 KORLEIS FORSTÅR ELEVAR I FYSIKK 2 OBSERVASJON I KVANTEFYSIKK?

I dette delkapittelet vil eg forsøke å gje eit svar på korleis elevar i Fysikk 2 forstår observasjon i kvantefysikk. Dette vil eg gjere ved å drøfte elevar si forståing opp mot moglege eksisterande førestillingar hjå elevane. Det inkluderer førestillingar om kvantefysikk generelt, blant anna som følgje av fokus på kvantefysikk i populærkultur, samt førestillingar kring omgrepet observasjon i ljøs av kvardagslege erfaringar og språk. Det vil vere ein analyse av videoen Dr. Quantum presentert i Kapittel 3. Videoen vert nytta som ein undervisningsressurs både i ReleKvant-prosjektet og i mitt forslag til undervisningsopplegg i kapittel 7.1, noko som betyr at alle elevane resultata i denne studien bygger på har sett den. Eg vil argumentere for at videoen nettopp belyser og kan forklare litt av forståinga som gjer seg gjeldande hjå elevane. Delkapittelet vert avslutta med ei systematisering av elevforståingar kring observasjon som kan verte nytta som eit rammeverk for vidare forskning og utvikling.

8.1.1 Førestillingar kring omgrepet observasjon

Førestillingar som elevar har om korleis verda fungerer har vorte mykje studert i didaktisk forskning, og det er vist at dei kan ha stor innverknad på læringa til elevane. Førestillingar, som blant anna vert danna gjennom erfaringar og omgang med språk, kan vere fornuftige i eleven sine

eigne auge, og treng ikkje nødvendigvis å samsvare med fysikken (Angell et al., 2011). Eit klassisk døme er omgrepet straum innanfor elektrisitetslære kor erfaringar og kvardagsspråk kan forma ein førestilling om omgrepet som kan by på misforståingar. I fysikken viser straum til mengd ladningar som passerer eit tverrsnitt per tidseining, og vert målt i Ampere. I kvardagsspråk derimot kan omgrepet elektrisk straum knytast til mange forskjellige tilhøve: Elektriske apparat kan bruke mykje straum, batteri kan gå tom for straum, når ein sikring ryk så er det ikkje lenger straum i stikkkontakten, og straumen kan gå slik at heile bygda eller byen vert mørk.

Vidare vil eg argumentere for at på same måten som dømet ovanfor, kan førestillingar om omgrepet observasjon, forma gjennom kvardagsspråk og tidlegare erfaringar òg vere med på å skape misforståingar ved undervisning i kvantefysikk. Innanfor kvantefysikk er ei fysikkfagleg tyding av omgrepet observasjon synonymt med ei måling, og observatør er synonymt med eit måleapparat. Difor les ein ofte setningar med slike ordlydar: «*observasjon påvirker resultatet i dobbelspalteeksperimentet*», eller «*En observasjon av systemet vil gjøre at systemet faller ned på én bestemt tilstand*», der det siste døme er henta frå ReleKvant modul 5 i teksten om superposisjon³. Det ein skal lese ut av desse setningane er at: «*måling påvirker resultatet i dobbelspalteeksperimentet*» og «*ei måling gjør at systemet faller ned på ein bestemt tilstand*».

Erfaring og kvardagspråk tilseier at observasjon er knyta saman med det å sjå. Gjerne å sjå ekstra nøye, eller å sjå etter noko spesielt. I skulesamanheng er det ikkje uvanleg at studentar kan kome for å observera i timane, og i samfunnsfag er valobservatørar menneskjer som skal følgje med på at val går korrekt føre seg i ulike land i verda. Tilsvarende vil ein sjå at verbet *å observera* i Nynorskordboka, heng tett saman med det å sjå, slik ein ser i Figur 11:

³ <https://filarkiv.viten.no/kvantefysikk/>

Oppslagsord Ordbokartikkel

observera observere	observere v2 (av latin <i>ob-</i> og <i>servare</i> 'passe på'; jmfør <i>ob-</i>)	☰
	1 akte nøye på; halde auge med; granske, undersøke <i>observere eit framandt fly på radaren</i>	
	2 sjå, leggje merke til, registrere <i>bli observert på åstaden</i>	
	• i melding i imperativ; forkorta <i>obs.</i>	

Figur 11: Resultat med *observera* som oppslagsord i Nynorskordboka (Universitetet i Bergen og Språkrådet, 2012).

Mange har nok difor med rette ei gjengs kvardagsleg oppfatning av at observasjon har ein sterk samanheng med det å sjå, på grensa til synonymt. Eit forhold som viser seg i analysen av resultata i denne oppgåva, der kategorien *observasjon som så sjå*, dominerer over kategorien *observasjon som måling*.

Elevane må altså ta omsyn til to forskjellige tydingar av ordet observasjon. Ei fysikkfagleg tyding knytt til kvantefysikk der observasjon er synonymt med målingar, og ei meir kvardagsleg forståing der observasjon er nesten synonymt med å sjå. Figur 12 viser ein skjermdump henta frå ReleKvant-modul 4 – *Partikler som bølger*⁴, der videoen Dr. Quantum nyttast som læringsressurs i samband med dobbeltspalteeksperimentet. Sjølve innhaldet i videoen vil eg kome nærare inn på seinare i diskusjonen, men skjermdumpen av videoen saman med den påfølgjande oppgåva viser at elevane ikkje har ei enkel oppgåve når dei skal skilje mellom observasjon i ein kvardagsleg kontekst – å sjå, og i ein fysikkfagleg kontekst – å måle.

⁴ <https://filarkiv.viten.no/kvantefysikk/#/id/57f92e1763378ebe0629dc0e>



Oppgave 7

3) Kvardagsspråk: Les som sjå

Fyll inn det du **observerer** i filmen "Dr. Quantum og dobbeltspalteforsøket" i tabellen under. Dr. Quantum kontrollerer variabler ved å gjøre forsøket på ulike måter. Han sender både klinkekuler, vannbølger og elektroner mot enten én eller to spalter. Fyll inn om du **observerer** interferensmønster eller ikke i de ulike tilfellene.

4) Kvardagsspråk: Les som sjå

		Gjennom én spalte	Gjennom to spalter
Klassisk / makroskopisk	Klinkekuler		
	Vannbølger		
Kvantefysisk / mikroskopisk	Elektroner (mange samtidig)		
	Elektroner (ett og ett)	###	
	Elektroner (ett og ett med observatør)	###	

5) Fysikkfagleg: Les som måleapparat

Figur 12: Teksten i videoruta er underteksten til videoen, og viser kva som vert sagt på dette punktet i videoen. Bruken av omgrepa *observasjon* og *observatør*, enten på norsk eller engelsk, er nummererte.

Slik Figur 12 viser bør *observasjon* og *observatør* i tilfelle 1) 2) og 5) lesast fysikkfagleg, som ei måling eller måleapparat, medan i tilfelle 3) og 4) bør *observerer* lesast i ei daglegdags tyding, som å sjå.

Analysen av resultatane i kapittel 4 og 6 viser nettopp at kategorien *observasjon som så sjå*, dominerer over kategorien *observasjon som måling* i elevanes forståing. Om ein tek i betraktning innverknaden frå kvardagsspråk, saman med at undervisningsressursane ikkje presiserer noko skilnad i tydinga av omgrepet *observasjon* i kvantefysikk, er det kanskje ikkje så rart at mange elevar ender opp med å lese *observasjon* synonymt med å sjå.

Resultatane frå denne studien tyder på at elevar som sit med ei oppfatning av *observasjon som å sjå* i kvantefysikk, kan ha vanskar med å forklare påverknaden på eksperiment. Elevane med ei slik oppfatning uttrykker ofte at dei synest påverknaden er merkeleg, og kan uttrykke at det ville gitt

meining viss elektrona var levande, noko dei sjølvsagt ikkje er. Til dømes denne utsegna tidlegare presentert i kapittel 4:

«(...) jeg skjønner ikke, elektroner er ikke levende, du ser på dem så gjør de noe annet?
Det gir ikke mening.»

Elevar innanfor denne kategorien vil lese ei typisk setning i kvantefysikk som til dømes: «eksperiment vert påverka under observasjon», til å bety «eksperiment vert påverka av å bli sett på». Å sjå er underforstått ei passiv handling som ikkje skapar noka forstyrning. Me lever i eit miljø kor det nesten alltid er ljøs til stades, enten frå sola eller frå andre ljøskjelder, difor er det lett å gløyme at nettopp ein føresetnad for å sjå objekt er at dei reflekterer ljøs tilbake frå omgjevnadene. Ljoset som vert reflektert av studieobjektet, og treff augo til den som ser, er ei form for fysisk samband kor informasjon vert overført. Ei form for interaksjon som skildra ovanfor, der informasjon let seg overføre frå ein stad til ein annan, er kva elevane innan kategorien *observasjon som å sjå* ikkje er seg bevisst.

Viss ei slik interaksjonsfri oppfatning av observasjon, synonymt med *å sjå*, ikkje vert utfordra, vil dette føre med seg fleire uheldige konsekvensar, og elevane vil ikkje få ei så god forståing av kvantefysikk som dei elles kunne ha oppnådd. Denne påstanden vil eg vidare underbygge i dei neste delkapitla.

8.1.2 Populærkultur: Kvantefysikk som vanskeleg og uforståeleg

«Kvantefysikk er vanskeleg og uforståeleg» er ein av kategoriane som Myhreagen og Bungum (2016) bruker for å klassifisere elevoppfatningar i samband med tankeeksperimentet Schrödingers katt, og kategorien er på ein delt førsteplass når det kjem til talet på elevsvar som den femnar om. Eg vil argumentera for at kategorien «*vanskeleg og uforståeleg*», ikkje berre kan verte nytta om elevar si oppfatning av Schrödingers katt, men òg kan vere beskrivande for kvantefysikk som heilskap.

Elevane møter ikkje kvantefysikk som ein *tabula rasa*. Det er ein fascinasjon for kvantefysikk innanfor populærkultur (Barad, 2007) som dei andre felte innan fysikkfaget ikkje kan skilta med, kanskje med unntak av relativitetsteori og kosmologi. Den vide fascinasjonen for kvantefysikk har ført til ei rekke populærvitskaplege attgjevingar kor rigiditeten har vorte ofra til fordel for tilgjengelegheit og underhaldning (Barad, 2007). Noko av det som vert kommunisert er at

kvantefysikk er rart, på engelsk «*wierd*». Ein kan sjå døme på dette i korleis kvantefysikk vert omtalt i allmennretta magasin på internett⁵.

Som følgje av eksponeringa frå blant anna populærvitskapen er det sannsynleg at mange elevar har ei førestilling om at kvantefysikk er noko rart, som ikkje gir meining, og kjem difor til fysikktimane med ei tilsvarande forventning. Ei slik forventning meiner eg det er mogleg å lese ut frå denne elevytringa henta frå utprøvinga av undervisningsopplegget (Kapittel 7.2):

«Det virker logisk at det må være [alternativ] 1, men samtidig er det vel kanskje for normalt til å være kvante».

Kvantefysikk er "uforståeleg" i den forstand at fenomenen ikkje kan forklarast ut frå ein klassisk tankegang, og ei forventning om at ting ikkje kjem til å vere som normalt, treng slett ikkje å vere eit dårleg utgangspunkt. Men kva er det innan for kvantefysikk som er annleis enn i klassisk fysikk, og på kva måte skil det seg ut? Er det slik at alt innanfor kvantefysikk er annleis, eller er det berre nokre sentrale fenomen som skil seg? Elevane er i det eg vil skildre som ein sårbar situasjon, der ei forventning om at ting ikkje kjem til å gi meining kan gje ei kjensle av og ikkje kunne stole på eigen fornuft og intuisjon. Dette kan gjere at elevane aksepterer ting som dei kanskje ikkje ville gjort elles, eller kjenner seg oppgjevne av aldri å kunne avkrefte teoriar og forklaringar sjølv om dei høyrer aldri så absurde ut.

Dette forholdet kan potensielt spele saman med det som vart snakka om i samband med *observasjon som å sjå* i førre delkapittel. Det kan tenkjast at elevar som til dømes les setninga: «*eksperiment vert påverka under observasjon*» som: «*eksperiment vert påverka av å bli sett på*», i større grad vil kunne godta dette under fana om at kvantefysikk er uforståeleg. Resultata i kapittel 4 viser at nokre elevar ser ut til å akseptere eit slikt syn utan mykje motstand. Sjå til dømes denne utsegna:

«Altså man kan jo alltid observere, men så fort man ser på vil ikke elektronene oppføre seg som bølger. (...)»

⁵ Sjå til dømes: <https://www.forbes.com/sites/chadorzel/2018/03/21/why-do-we-think-quantum-mechanics-is-weird/#7294ec3d4b66>
<https://cosmosmagazine.com/physics/five-weird-quantum-effects>

Dette har likskapstrekk med *ukritisk dualisme* (Gjerland, 2015), berre nytta for observasjon. Ukritisk dualisme er eit omgrep i kvantefysikkdidaktikk som beskriv at elevar ukritisk nyttar bølge-partikkel-dualiteten utan å ta inn over seg erkjenninga av konsekvensane. Ein tilsvarande ukritisk samanheng mellom observasjon og den følgjande påverknaden er heller ikkje heldig, då det mykje på same måte signaliser ein manglande refleksjon over dei erkjenningsmessige konsekvensane. Ei slik forståing kan vi kalle *ukritisk påverknad ved observasjon*.

På den andre sida viser mange elevar at dei synast samanhengen mellom observasjon og påverknad er merkeleg. Men som diskutert tidlegare kan forventninga om at kvantefysikk er merkeleg, kombinert med at ein er ny og utan erfaring i faget, gjere at det er vanskeleg å forkaste ei hypotese, sjølv om den strir mot fornufta. Til dømes at elektrona vil te seg annleis når nokon ser på dei.

Problemstillingane eg har skissert her viser at god undervisning og undervisningsressursar er viktige for å gi elevane ei god forståing i kvantefysikk. Konkret kva som bør inngå i slike ressursar vil verte satt i fokus i kapittel 8.2 seinare i diskusjonen. Før det vil eg diskutere ein eksisterande undervisningsressurs nytta i ReleKvant - Dr. Quantum (Sjå Kapittel 3), som eg vil argumentere for at kan forklare litt av forståinga og utfordringane som gjer seg gjeldande hjå mange elevar.

8.1.3 Dr. Quantum: Kvantefysikk som eit mysterium

Noko av utfordringa til lærarar og undervisningsressursar er å klare og vise kvantefysikken slik den er. Noko som inkluderer at særeigenheitene må kome fram, samstundes som eventuelle førestillingar som ikkje er riktige må eliminerast.

Animasjonsvideoen Dr. Quantum tek for seg dobbeltspalteeksperimentet med vassbølger, klinkekuler og elektron. Videoen har mange kvalitetar, ved at den illustrativt viser dei viktigaste resultatata bak eksperimentet, medan den uttrykksfulle røysta til Dr. Quantum forklarar på ein engasjerande måte. Noko av suksessen til videoen kan ein sjå ved at tilnærma alle elevane som datamaterialet er basert på verkar å ha ei tydeleg førestilling om korleis eksperimentet går føre seg, og kva som er resultatata i dei ulike fasane.

Videoen spelar på nysgjerrigheita hjå elevane, og eg meiner at noko av måten den gjer dette på er å legge fokus på det som eg vil kalle mysteriet kvantefysikk. Videoen kjem med utsegn slik som:

«the quantum world is far more mysterious than they [the scientist] could have imagined»

I situasjonen kor eksperimentet vert gjennomført med observasjon, vel videoen å illustrere observatøren som eit stort auga, og samstundes å uttrykkje seg på denne måten (sjå Figur 13):

«The electron decided to act differently as though it was aware it was being watched»

Mi omsetjing av sitatet ovanfor er: *«Elektronet bestemte å te seg annleis som om det vart klar over at det vart sett på»*. Ei slik formulering kan verke som ei villeiing på fleire måtar. At elektronet skal kunne gjere eit val om eigen oppførsel som respons på at det føler blikket til ein observatør, antydar ei besjeling av elektronet ved å tillegge det kjensler og vilje. Og saman med at ein i videoen vel å illustrera observatøren som eit stort auga, og i det aktuelle sitatet nyttar verbet *to watch*, å sjå på norsk, antydar ikkje på nokon måte at det er ein interaksjon knytt opp til handlinga å observere. Videoen kan her seiast å vere med på å byggje opp under *observasjon som å sjå*, som var tema tidlegare i diskusjonen.



Figur 13: Skjermdump frå video med undertekst: «[The electron] decided to act differently as though it was aware it was being watched»

Om ein har videoen som kjelde er det difor ikkje vanskeleg å kome på idear om at elektrona har ei bevisstheit av noko slag, slik som det òg er å finne i nokre av elevytringane (Kapittel 4 og 6). Ei anna mogleg oppfatning kan vere at bevisstheita til observatøren er det som påverkar eksperimentet. Den sistnemnde oppfatninga er relativ vanleg i New Age miljø, kor bevisstheit ofte er gitt ei spesiell rolle, der det vert sagt den skapar realitetar. Observasjonseffekten i kvantefysikk vert nytta til å legitimere ei slik oppfatning i fleire pseudo-vitskaplege nettartiklar og bøker som til dømes: *The Observer Effect*⁶.

Eg refererer til sitatet frå John Stewart Bell frå Kapittel 2.1.10 som tilsvar til ei slik oppfatning:

“What exactly qualifies some physical systems to play the role of ‘measurer’? Was the wavefunction of the world waiting to jump for thousands of millions of years until a single-celled living creature appeared? Or did it have to wait a little longer, for some better qualified system ... with a Ph.D

(sjå til dømes Norsen, 2017, s. 63)

Videoen Dr. Quantum, som alle elevane i studien har sett, enten som del av ReleKvant-ressursane, eller i samband med forslag til undervisningsopplegg (Kapittel 7), kan altså leggje til rette for uvitskaplege forståingar som ikkje er heldige.

8.1.4 Ei systematisering av elevforståingar

For å belyse korleis elevar forstår observasjon i kvantefysikk vil eg i dette delkapittelet gjere eit forsøk på å systematisere elevforståingar kring temaet. Systematiseringa baserer seg på to element, som eg meiner er definerande for forståinga av observasjon: Kjennskap kring interaksjon forbunde med ei måling, og målingar si rolle i kvantefysikk.

At det eksisterer ein interaksjon, som eg har vigd mykje merksemd i oppgåva, er aleine inga god forklaring på kvifor observasjonar skal kunne påverke eksperiment. Frå teorikapittel 2.1.4 om observasjon av dobbeltspalteeksperimentet kjem det fram at målingar må ha ei anna rolle enn i vanleg fysikk. Sjølv om ei posisjonsmåling alltid vil finne elektrona som lokaliserte partiklar ved ei av spalteopningane, kan ein ikkje forklare opphavet til interferensmønsteret ved å berre ta utgangspunkt i elektron som lokaliserte partiklar.

⁶ <http://a.co/d/fWVxefC>

Slik elektrona vert funne i målingar er difor ikkje synonymt med tilstanden deira før måling. Ifølgje Københavntolkinga kan ein ikkje seie at elektronet hadde nokon veldefinert posisjonen i forkant av målinga. Ein kan berre finne sannsynner for moglege måleresultat ved å kjenne bølgefunksjonen. Sannsynene representerer ikkje eit ukunne, men reflekterer heller den fundamentalt udefinerte posisjonen til elektronet. Ei måling har difor ei spesielle rolle i og med at ho tvingar elektronet frå ein ubestemd til ein bestemd posisjon (Kapittel 2.1.7).

Ei skjult variabel tolking er på mange måtar motstykket til Københavntolkinga, og forsøker å forklare fenomenen i kvantefysikk gjennom mangel på kunnskap om nokre underliggende mekanismar (Kapittel 2.1.8). Dette inneber at målingar ikkje har noko spesielle rolle, men er ei passiv registrering av eksisterande eigenskapar. Dette representerer altså ikkje noko skilje frå klassisk fysikk. Dei underlege resultatene i kvantefysikken kunne vorte forklarte om ein berre hadde hatt kunnskap om nokre skjulte variablar.

Sjølv om det er bevist gjennom Bells ulikheit at lokale skulte variablar ikkje er ein mogleg teori for å forklare alle fenomenen i kvantefysikk (sjå Kapittel 2.1.7), kan skjult variabel tolkinga vere nyttig i eit undervisningsperspektiv, då den saman med Københavntolkinga representerer to ulike syn på observasjon si rolle. Tabell 2 er ei systematisering av moglege elevforståingar med omsyn til om desse ulike syna på observasjon og interaksjon er kjend eller ikkje. Totalt gir systematiseringa fire forskjellige kombinasjonar som vert referert til som alternativ 1 til 4.

Tabell 2: Mogelege kombinasjonar av forståingar med omsyn på interaksjon og observasjon si rolle.

	<i>Interaksjon ukjend</i>	<i>Interaksjon kjend</i>
<i>Måling/observasjon tvingar systemet å innta ein bestemd tilstand. (Københavntolkinga)</i>	(1)	(2)
<i>Måling/observasjon som avlesing av eksisterande eigenskapar. (Skjult variabel tolking / Klassisk tolking av måling)</i>	(3)	(4)

Alternativ (1) inneber ei forståing der elevane kjenner til at systemet, som tidlegare ikkje hadde nokon veldefinert tilstand, gjennom observasjon vert tvinga til å innta ein bestemd tilstand. Dette representerer eit syn overeins med Københavntolkinga, og er eit skilje med korleis ein er van med å tenkje om målingar i klassisk fysikk. Det er ikkje kjend for elevane, eller dei har inga bevisstheit kring at ein observasjon eller ei måling vil innebere ein fysisk interaksjon mellom måleapparat og system. Utan kjennskap til denne kunnskapen verkar det umogleg at observasjon skal kunne ha ein slik innverknad. Då er det nærliggande at nokre elevar vil kome inn på tankar om at påverknad gjennom bevisstheit kan vere ei forklaring, enten hjå observatør eller elektron. Diverre er det òg slik at viss dei leitar rundt på internett etter svar, og ikkje er kritisk til kjelder, så er det gode sjansar for at dei vil få bekrefte ei slik urett oppfatning.

Alternativ (2) representerer det som etter mi meining er den ønskja forståinga. Ein observasjon i kvantefysikk har ei spesiell rolle, ved at den gjer at systemet går frå ein ubestemd til ein bestemd tilstand i tråd med Københavntolkinga. På høgare nivå seier ein gjerne at bølgefunksjonen kollapsar som følgje av ei måling (Kapittel 2.1.6). Dette representerer eit viktig skilje med den klassiske fysikken, kor målingar ikkje har ei slik rolle. Elevane forstår òg at det må vere eit samband mellom kvantesystemet og måleapparatet. Bevisstheita kring dette naudsynte fysiske

sambandet bidreg til at fysikken ikkje framstår som meir rar og mystisk enn den er, noko som var tilfellet i forståing av alternativ (1).

Alternativ (3) inneber eit reint klassisk syn på prosessen rundt ei måling. Måling er berre ei avlesing av eksisterande eigenskapar og har såleis ikkje noko anna funksjon enn informasjonsinnhenting. Det er heller inga bevisstheit kring interaksjonen i ei måling. Det verkar umogeleg å forklare påverknaden ut frå dette perspektivet og mange elevar vil kanskje føle på frustrasjon. Elevar kan i likskap med alternativ (1) kome inn på tankar om bevisste elektron. Det som eg har kalla *ukritisk påverknad ved observasjon* (Kapittel 8.1.2) kan òg vere ei mogelegheit, som vil seie at elevane ikkje har reflektert noko over påverknaden av observasjon, og såleis ikkje oppfattar noko konflikt.

Alternativ (4) inneber at interaksjonen er kjend. Endring av resultat som følgje av observasjon, til dømes i dobbeltspalteeksperimentet, er lett å tilskrive interaksjonen i seg sjølv. Som tidlegare nemnd er interaksjonen aleine inga god forklaring. Om ein tek utgangspunkt i at ein nyttar ljøs til å lokalisere elektrona kan ein tenkje seg at eit foton og eit elektron treff kvarandre som to biljardballar, og såleis slår kvarandre ut av bane, noko som er opphavet til dei endra resultata. Denne forståinga er i si kjerne bygd på eit klassisk verdsbilde, og elevane misser med denne forståinga noko av det særlege med kvantefysikk. I forståinga av elektronet og fotonet som to biljardballar, er det nemleg underforstått at dei to partiklane har veldefinerte posisjonar og moment heile tida. Sjølv om dette kan stemme ut frå ei *skjult variabel tolking*, og at eg tidlegare har argumentert for at ei slik tolking kan vere nyttig i undervisningssamanheng som ein *kontrast* til Københavntolkinga, er det ikkje ønskeleg at elevane sit igjen med ei slik forståing. Historisk var skjult variabel tolking på mange måtar eit forsøk på å behalde eit klassisk verdsbilde (sjå Kapittel 2.1.7).

Resultata i denne oppgåva har ikkje vorte analyserte med dette nye forslaget for systematisering av elevforståingar, men eg kan kome med ein peikepinn. Kategoriane *observasjon som måling* og *observasjon som å sjå* går delvis på interaksjon, som er den horisontale raden i Tabell 2, der det å sjå i liten grad impliserer interaksjon, medan å måle i større grad tyder på interaksjon (sjå analyse kapittel 4 og 6). Den vertikale kolonnen om målingar som avlesing av eksisterande eigenskapar eller som definerande for eigenskapar sin eksistens, er ikkje fanga like godt opp av

analysekategoriane i denne oppgåva. Spørsmålet om korleis observasjon i kvantefysikk skil seg frå klassisk fysikk i samband med fokusgruppeintervju (Kapittel 6) kan gje ein peikepinn:

«Lyset har vel kanskje en effekt på elektronene fordi de er veldig følsomme eller noe.

«Det har vel kanskje med at det er så lite og så stort, og at derfor blir det en forskjell. Når det er veldig lite påvirker målingen, men til vanlig er ting så store at det ikke har noe å si. For eksempel med en laser.»

Svar av denne typen tyder lite på måling som definerande for eigenskapane til elektronet, men heller påverknad som følgje av ljøs i kontakt med små ømfintlege elektron, noko som kan tolkast i banar av ein klinkekulemodell, alternativ (4) i tabellen. Analysen i denne studien har ikkje plassert alle data om elevforståingar i kontekst av det nye rammeverket i Tabell 2, men vidare studiar kan nytte dette som eit utgangspunkt. Det kan òg nyttast som eit verktøy for å gjere undervisarar bevisste på dei ulike typar av forståingar som kan vere til stades hjå elevar, og leggje opp undervisning deretter.

8.2 KORLEIS KAN UNDERVISNING OG UNDERVISNINGSRESSURSAR BIDRA TIL Å BETRE ELVAR SI FORSTÅING?

Eg vil avslutte diskusjonen med å sjå på korleis undervisning og undervisningsressursar kan bidra til å betre elvar si forståing av observasjon i kvantefysikk, med støtte frå erfaringane frå undervisningsopplegget som vart utvikla og prøvd ut.

Eg har tidlegare i diskusjonen vore inne på elevar sine førestillingar. Dei har vist seg å ha stor innverknad på læring, noko som har gjort det til eit område som har vore i fokus for fagdidaktisk forskning gjennom fleire årtier (Angell et al., 2011). For lærarar er det viktig å vere kjende med dei vanlegaste førestillingane innan dei forskjellige fagfelte for å kunne leggje opp til ei god undervisning. Sjølv om kvantefysikk på mange måtar er så langt frå kvardagen som ein kjem, er det ikkje slik at elevane er frie for eksisterande førestillingar. Difor må undervisning i kvantefysikk, på same måte som med anna fysikkundervisning, verte lagt opp slik at den møter elevane sine førestillingar. Gjennom oppgåva har eg argumentert for at førestillingar kring omgrepet observasjon, men òg om kvantefysikk som heilskap, må gjere seg gjeldande i læreprosessen.

Konkret bør undervisning difor prioritere å gi elevane ei forståing av kva ein observasjon inneber, nettopp for å møte eksisterande førestillingar som elevane har om omgrepet. Elevane må gjerast kjende med skilnadar av omgrepet observasjon i ei fysikkfagleg betyding og ei kvardagsleg betyding, men òg slik at elevane vert bevisste på interaksjonen mellom måleapparat og studieobjekt forbunde med ei måling. I forslaget til undervisningsopplegg presentert i kapittel 7 valde eg å illustrere dette med ein aktivitet som eg kalla *simulering av måleapparat*, der elevane skulle førestille seg at dei var eit måleapparat som får sambandet med omverden bryte. Erfaringane frå utprøvinga viste at dette var ein aktivitet som gjorde elevane bevisste på at interaksjon er ein føresetnad for å observere.

Hadzidaki et al. (2000) skriv at ei meiningsfull forståing av kvantefysikk må innebere ei erkjenning av korleis kvantefysiske fenomen bryt med sentrale prinsipp i klassisk fysikk. Synspunktet vert støtta mellom anna av Özcan (2010), som seier at undervisning i kvantefysikk difor bør sikte mot å gjere skilnadane mellom kvantefysikk og klassisk fysikk tydelege for elevane. For temaet observasjon betyr dette mellom anna eit fokus på kva rolle Københavntolkinga tillegg observasjon, og korleis dette skil seg frå observasjon innan klassisk fysikk.

Ei undervisningsressurs som kan nyttast i denne samanhengen kan igjen verte funne i undervisningsopplegget presentert i kapittel 7. Dette er ei diskusjonsoppgåve som går ut på at ei måling finn eit elektron i eit punkt p , og elevane skal drøfte alternativ som svarar til ulike syn på observasjon. Alternativa er knytte til Københavntolkinga og skjult-variabel-teori, der sistnemnde samsvarar med eit klassisk syn. (sjå kapittel 2.1.7). Erfaringa frå utprøvinga viste at dette var ei utfordrande oppgåve å diskutere aleine, men etter gjennomgang saman med lærar viste elevane eit godt læringsutbytte. Tankeeksperimentet Schrödingers katt er òg ein mogleg veg til å diskutere kva rolle observasjonar har i kvantefysikk.

Elevdiskusjonar bør vere ein del av læringsprosessen, då dei kan hjelpe elevar med å formulere nye spørsmål, utveksle forståingar, og ordleggje vanskar i forståingar i kvantefysikk (Bungum et al., 2018). Eg vil likevel poengtere at det er naudsynt at elevane får tilstrekkeleg stønad, enten frå undervisningsressursar eller lærar, som må hjelpe dei med å identifisere misoppfatningar og klassiske tenkjemåtar. Gjennom god stønad vil elevane få føresetnadar til å diskutera kvantefysikk og kva tolkingane inneber.

Videoen Dr. Quantum (Kapittel 3), som eg nyttar i forslaget til undervisningsopplegg, og som er ein del av ReleKvant-ressursane, er eit døme på ein ressurs som bør ha følgje av vidare ressursar eller forklaring frå lærar⁷. Videoen kan likevel vere ein del av god undervisning då den, gjennom resultatane i denne studien, har vist seg som godt egna for å skape diskusjon.

I ein studie i samband med ReleKvant-prosjektet uttrykker lærarar at dei føler seg mindre kompetente i kvantefysikk enn i dei andre delane av fysikkfaget, og difor synest at emnet er meir utfordrande å undervise (Bungum et al., 2015). Lærarane i studien har sakna gode undervisningsressursar i kvantefysikk, noko som er eit behov ReleKvant-prosjektet set seg som mål å oppfylle.

Undervisningsressursar bør generelt synleggjere dei tema som ekspertar peiker på som viktige for å oppnå ei tilfredsstillande forståing i kvantefysikk. I studien til Krijtenburg-Lewerissa et al. (2018) identifiserer ekspertar mellom anna temaa: *Bølgje-partikkel-dualitet*, *partikkeleigenskapar til ljøs*, *dobbelspalteeksperimentet*, *bølgjefunksjon* og *sannsyn*, som nokon av dei viktigaste. Målingar var kandidat i utveljingsprosessen, men er ikkje med på den endelege lista sitert ovanfor. Likevel kan det ut frå eit fagleg perspektiv argumenterast for at observasjon inngår i mange av temaa nemnde ovanfor, og kan difor verte sett på som eit meir overordna konsept.

Denne oppgåva har konsentrert seg mykje om dobbeltspalteeksperimentet, og frå desse resultatane kan ein konkret seie at ei god forståing av observasjon ville ha ført til ei betre forståing av eksperimentet. Dette ville òg vore tilfelle for fleire andre viktige tema i kvantefysikk, til dømes *bølgjefunksjon* og *sannsyn* (sjå kapittel 2.1.3). Å gi ei god forståing av observasjon er altså viktig i seg sjølv, men òg for å betre forståinga av andre sentrale fenomen i kvantefysikken. Eg vil difor tilrå at undervisning og undervisningsressursar generelt i større grad bør fokusere på observasjon innan kvantefysikk.

⁷ Eit supplement til Dr. Quantum kan vere denne videoen som ein ung Youtube-fysikar har laga, kor dei fysikkfagelege problema med Dr. Quantum blir tekne opp: <https://youtu.be/yotBpxXiivA>

9 KONKLUSJON

Forskingsspørsmåla i denne oppgåva var «*Korleis forstår elevlar i Fysikk 2 observasjon i kvantefysikk?*» og «*Korleis kan undervisning og undervisningsressursar bidra til å betre elevlar si forståing?*»

Det kjem fram av studien at observasjon er eit tema kor elevane har vanskar. Resultata har vist at mange elvar forstår observasjon som synonymt med å sjå, noko som kan ha samanheng med ei kvardagsleg førestilling av omgrepet. Forståinga skapar forvirring når det kjem til å forklare påverknaden som følgje av observasjon, mellom anna ved at elevane undrar seg på korleis elektron kan *føle* at dei vert sett på. Ei slik forståing representerer ein mangel på bevisstheit om interaksjonen i samband med ein observasjon eller ei måling, og forståinga kan verte forsterka av undervisningsmaterieil slik som til dømes Dr. Quantum som elles har gode kvalitetar.

Elevlar som forstår observasjon synonymt med måling er i større grad kjent med interaksjonen mellom måleapparatet og systemet som vert målt. Elevane kan då enkelt forklare påverknaden berre som ei forstyrring som følgje av ømfintlege kvantepartiklar. Dette gjer at dei mister den viktige forståinga om rolla som observasjon har ifølgje Københavntolkinga, og dermed ei erkjenning av korleis kvantefysikk bryt med sentrale prinsipp i klassisk fysikk.

Denne oppgåva har presentert eit rammeverk for systematisering av elevforståingar kring observasjon, med omsyn til observasjon si rolle og kjennskap til interaksjon. Rammeverket, som kan vere eit verktøy for vidare forsking på temaet, vil òg kunne nyttast av lærarar for å verte meir bevisste på mogelege elevførestillingar i kvantefysikkundervisning.

Lærarar kan òg hente idear frå undervisningsopplegget presentert i denne oppgåva. Opplegget fokuserer på å gi elevane ei god forståing av observasjon, og er laga slik at det møter vanlege elevutfordringar som er kome fram i resultata. Dette vert gjort ved å diskutere observasjon si rolle i ulike tolkingar av kvantefysikk, og gjennom ei simulering av eit måleapparat utan noko samband med studieobjektet.

Kvantefysikk er eit tema som trass i å vere fjernt frå elevane sin kvardag, har ein relevans gjennom ei allmenn interesse. Emnet har ein eigenart som gjer at det kan vere vanskeleg å få ei god forståing, og framstillingar i populærkulturen kan overforenkla temaet til fordel for tilgjengelegheit. Dette gjer at misforståtte fenomen frå kvantefysikk, mellom anna effekten av observasjon, vert nytta for

å legitimere oppfatningar som ikkje har rot i verkelegheita, til dømes at kvanteverda kan verte knyta til menneskeleg bevisstheit på mystisk vis. Resultata frå denne studien syner at ei god forståing av observasjon er ein nøkkel til ei meir korrekt forståing av kva kvantefysikken inneber.

10 LITTERATURLISTE

- Angell, C., Bungum, B., Henriksen, E., Kolstø, S., Persson, J. & Renstrøm.(2011). *Fysikkdidaktikk*.
- Baggott, J. (2004). *Beyond measure: Modern physics, philosophy, and the meaning of quantum theory* Oxford University Press on Demand.
- Barad, K. (2007). *Meeting the universe halfway: Quantum physics and the entanglement of matter and meaning* duke university Press.
- Berg, B. L. (2004). *Qualitative research methods for the social sciences* Pearson Boston, MA.
- Bungum, B., Bøe, M. V. & Henriksen, E. K. (2018). Quantum talk: How small-group discussions may enhance students' understanding in quantum physics. *Science Education*, 102(4), 856-877.
- 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. *Nordic Studies in Science Education*, 11(2), 153-168.
- Cheong, Y. W. & Song, J. (2014). Different levels of the meaning of wave-particle duality and a suspensive perspective on the interpretation of quantum theory. *Science & Education*, 23(5), 1011-1030.
- cnx.org. (2017). *The-Heisenberg-Uncertainty-Principle*. Henta 25 September 2018 frå <https://cnx.org/contents/uNNozUZi@1.80:cNerpl43@2/The-Heisenberg-Uncertainty-Principle>
- Cohen, L., Manion, L. & Morrison, K. (2007). *Research methods in education. I: New York: Routledge*.
- Feynman, R. P., Leighton, R. B. & Sands, M. (2006). *The Feynman lectures on physics : Vol. 3 : Quantum mechanics* (Definitive ed. utg.). San Francisco: Pearson Addison Wesley.
- Gamow, G. & Stannard (2001). *The new world of Mr Tompkins*. Cambridge University Press,.
- Gjerland, M. (2015). *Elevers oppfatning om lys og bølge/partikkel-dualismen* NTNU.
- Griffiths, D. J. (2005). *Introduction to quantum mechanics* (2nd ed. utg.). Upper Saddle River, N.J: Pearson/Prentice Hall.
- Hadzidaki, P. (2008). Quantum Mechanics' and 'Scientific Explanation'An Explanatory Strategy Aiming at Providing 'Understanding, 17(1), 49-73.
- Hadzidaki, P., Kalkanis, G. & Stavrou, D. (2000). Quantum mechanics: a systemic component of the modern physics paradigm. *Physics Education*, 35(6), 386-392.
- Hemmer, P. C. (2000). *Kvantemekanikk* (2. [i.e. 4.] utg. utg.). Trondheim: Tapir akademisk forl.
- Huseby, A. (2016). *Elevers forståelse av dobbeltspalteeksperimentet med elektroner*.

- Jacobsen, D. I. (2005). *Hvordan gjennomføre undersøkelser?: innføring i samfunnsvitenskapelig metode*. Høyskoleforlaget Kristiansand.
- Krijtenburg-Lewerissa, K., Pol, H., Brinkman, A. & van Joolingen, W. J. I. J. o. S. E. (2018). Key topics for quantum mechanics at secondary schools: a Delphi study into expert opinions, 1-18.
- Myhreagen, H. V. & Bungum. (2016). 'From the cat's point of view': upper secondary physics students' reflections on Schrödinger's thought experiment, *51*(5), 055009.
- Nilssen, V. L. (2012). *Analyse i kvalitative studier : den skrivende forskeren*. Oslo: Universitetsforl.
- Norsen, T. (2017). *Foundations of Quantum Mechanics: An Exploration of the Physical Meaning of Quantum Theory* Springer.
- NSD. (2018). Barnehage og Skole. Henta frå http://www.nsd.uib.no/personvernombud/hjelp/forskningstema/barnehage_skole.html
- O'Brien, J. (1993). Action research through stimulated recall. *Research in Science Education*, *23*(1), 214-221.
- 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.
- Ozawa, M. (2003). Universally valid reformulation of the Heisenberg uncertainty principle on noise and disturbance in measurement. *Physical Review A*. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.67.042105>
- Rozema, L. A., Darabi, A., Mahler, D. H., Hayat, A., Soudagar, Y. & Steinberg. (2012). Violation of Heisenberg's measurement-disturbance relationship by weak measurements.
- Schlosshauer, M., Kofler, J., Zeilinger (2013). A snapshot of foundational attitudes toward quantum mechanics, *44*(3), 222-230.
- Shankar, R. (1994). *Principles of quantum mechanics* (2nd ed. utg.). New York: Plenum Press.
- Singh, C., Belloni, M. & Christian, W. (2006). Improving students' understanding of quantum mechanics. *Physics Today*.
- Store norske leksikon. (2009a). Bølgefunksjon, Hentet 2. desember 2016. Henta frå <https://snl.no/b%C3%B8lgefunksjon>
- Store Norske Leksikon. (2009b). Halley's komet. I *Store Norske Leksikon*, . Henta frå https://snl.no/Halleys_komet
- Store norske leksikon. (2015). Mikroskop (Hentet 2. desember 2016). Henta frå <https://snl.no/mikroskop>
- Susskind, L. & Friedman, A. (2014). *Quantum Mechanics : The Theoretical Minimum*. New York: Basic Books.
- Tegmark, M. & Wheeler, J. A. (2001). 100 Years of the Quantum.

- Tjora, A. H. (2010). *Fra nysgjerrighet til innsikt : kvalitative forskningsmetoder i praksis* (2. utg. utg.). Trondheim: Sosiologisk forlag.
- Universitetet i Bergen og Språkrådet. (2012). Nynorskordboka. I T. Svoldal (Red.), *Nynorskordboka*. Henta frå https://ordbok.uib.no/perl/ordbok.cgi?OPP=observere&ant_bokmaal=5&ant_nynorsk=5&nynorsk=+&ordbok= begge
- Utdanningsdirektoratet. (2006). Læreplan i fysikk - programfag i utdanningsprogram for studiespesialisering (FYS1-01). Henta frå <https://www.udir.no/kl06/FYS1-01/Hele/Kompetansemaal/fysikk-2>
- Whitaker, A. (2006). *Einstein, Bohr, and the quantum dilemma : from quantum theory to quantum information* (2nd ed. utg.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Wibeck, V. (2000). *Fokusgrupper : om fokuserade gruppintervjuer som undersökningsmetod*. Lund: Studentlitteratur.
- Wikipedia contributors. (2018). Circular polarization. I *Wikipedia: The Free Encyclopedia*. Henta 25 September 2018 frå https://en.wikipedia.org/wiki/Circular_polarization
- Özcan, Ö. (2010). How do the Students Describe the Quantum Mechanics and Classical Mechanics? *Latin-American Journal of Physics Education*, 4(1), 3.

11 VEDLEGG

Vedlegg 1: Intervjuguide

Innledning

Liker dere fysikk? Hvordan har kvantefysikkundervisningen vært så langt?

Kan dere fortelle meg om dobbeltspalteeksperimentet som dere har hatt om i undervisning? (Hvordan det er med vanlige partikler, vann og elektroner)

Observasjon

Kan man si hvilken spalte elektronet går igjennom?

Hva skjer hvis man prøver å finne det ut?

Hvorfor blir det forskjellig resultat med observasjon?

Hva er det som menes med at eksperimentet blir «*observert*»?

Observatør – menneske eller måleapparat?

Avslutning

Hvilke tanker / inntrykk har dere rundt kvantefysikk?

Kan dere si noe om observasjon i kvantefysikk i forhold til vanlig fysikk?

