

Julia Susanna Fransplass

Kvanteobjekter i Fysikk 2

Utvikling og drøfting av et undervisningsopplegg om begrepet kvanteobjekt

Masteroppgave i Lektorutdanning i realfag for trinn 8-13

Veileder: Berit Bungum

Juni 2023

Julia Susanna Fransplass

Kvanteobjekter i Fysikk 2

Utvikling og drøfting av et undervisningsopplegg om begrepet kvanteobjekt

Masteroppgave i Lektorutdanning i realfag for trinn 8-13
Veileder: Berit Bungum
Juni 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for naturvitenskap
Institutt for fysikk



NTNU

Kunnskap for en bedre verden

Sammendrag

Kvanteobjekter ble nylig introdusert i kompetansemålene for Fysikk 2 i videregående skole som en del av den nye læreplanen. Den vanligste ontologiske tilnærmingen til undervisning av kvantefysikk er i dag gjennom bølge-partikkel-dualiteten, som har sitt opphav fra København-tolkingen, og baserer seg på klassisk terminologi. Et klassisk perspektiv kan føre til misoppfatninger av flere av grunner. Derfor ønsker denne studien å utforske bruken av kvanteobjekter som en alternativ og innovativ tilnærming. Studien fokuserer på en fysikkklasse med 16 videregående elever og bruker intervensjonsforskning som tilnærming. Sentrert rundt elevenes bruk og opplevelse av begrepet kvanteobjekter og et utviklet tabell-verktøy, er det i denne studien utviklet og gjennomført et undervisningsopplegg der gruppediskusjoner er i fokus. Det er gjennomført en tematisk analyse av lydopptak av ni gruppediskusjoner, samt to gruppeintervjuer. Mange elever uttrykte at de opplevde utfordringer med å bytte perspektiv mellom partikler og bølger og tok gjerne i bruk kvanteobjekter som en egen ontologi. Elevene hadde nyanserte, reflekterte og kritiske syn på ikke-determinisme og målinger, som kan stamme fra at de tar i bruk kvanteobjekters egenskaper og det implementerte tabell-verktøyet på hensiktsmessige måter. Undervisningsopplegget tar i bruk en realist-tilnærming til kvantefysikk, noe de fleste elevbesvarelsene reflekterer. Resultatene diskuteres med tanke på tidligere forskning på elevers utfordringer og undervisningsstrategier for kvantefysikk. Prosessen har vist at kvanteobjekter fungerer som et godt alternativ til bølge-partikkel-dualiteten ved å utelate klassiske assosiasjoner og introdusere en konsekvent kvantefysisk ontologi. Denne studien kan fungere som et startpunkt for å undervise om det nye kompetansemålet og kan gi lærere støtte når de skal undervise om kvanteobjekter.

Abstract

Quantum objects were recently included as part of the Norwegian upper secondary curriculum. Today the most used ontological approach in teaching quantum physics is using the wave-particle duality, which originally arose from the Copenhagen interpretation and is based on classical terminology. A classical perspective can lead to misinterpretations for an assortment of reasons, which is why this study seeks to explore the use of quantum objects as an alternative and innovative approach. The study focuses on a physics class of 16 upper secondary students and uses the approach of intervention-based research. Centring around students' use and experience of the term quantum objects, as well as a developed table learning tool, this study designed and implemented a teaching plan using small-group discussion as its focus. A thematic analysis is performed on nine audio-recorded small-group discussions and two group interviews. Many students expressed struggles with changing perspectives between particles and waves and welcomed the use of quantum objects as its own ontology. The students had nuanced, reflected and critical views on non-determinism and measurement using the characteristics of quantum objects, implemented from the table teaching tool, appropriately. The teaching plan takes a realist approach to quantum physics, which is mostly reflected in the students' answers. The results are discussed considering previous research on students' difficulties and teaching strategies in quantum physics. The process showed how quantum objects in fact work as a suitable alternative to the wave-particle duality by excluding classical associations and introducing a consequent quantum physical ontology. This study acts as a starting point for teaching the new curriculum and might provide support for teachers when teaching about quantum objects.

Forord

Denne masteroppgaven er noe av det siste jeg gjør som student ved NTNU. Før jeg ble student kunne jeg liksom godt valgt ingeniør, som lærer. Men alle opplevelsene jeg har hatt, og medstudentene jeg har møtt, har gjort valget verdt det. Uansett har det vært noen lærerike 5 år. Jeg gleder meg til framtiden og til å prøve ut læreryrket.

Jeg vil gjerne takke veilederen min som alltid har gitt god og grundig veiledning, og kommet med mange gode og sårt trengte råd. Jeg setter stor pris på alle møtene vi har hatt og all hjelpen jeg har fått.

Videre vil jeg rette oppmerksomheten mot den fantastiske klassen jeg fikk besøke og undervise for i forbindelsen med denne masteroppgaven. Takk for en god mottakelse og at så mange ville hjelpe meg med oppgaven min. En stor takk til faglærer som lot meg låne klassen, var fleksibel og hjelpsom. Det var virkelig en god opplevelse å undervise hos dere.

Sist, men ikke minst, vil jeg takke familie og venner som har støttet meg, og medstudentene som har stått sammen med meg i denne prosessen. Ikke minst takk til samboeren min. Vi har begge skrevet masteroppgave det siste halve året, støttet hverandre, gitt skrivetips og korrekturlest. Jeg kunne ikke klart det uten deg.

Trondheim, juni 2023

Julia Susanna Fransplass

Innhold

Sammendrag	i
Abstract	iii
Forord	v
1 Innledning	1
1.1 Motivasjon for oppgaven	1
1.2 Problemstilling.....	2
1.3 Oppgavens struktur	3
2 Fysikkfaglig teori	5
2.1 Kvantefysikkens tidlige utvikling.....	5
2.2 Kvanteobjekter	10
2.3 Dobbelspalteforsøket	13
2.4 Oppsummering.....	17
3 Didaktisk teori	19
3.1 Oppfatninger og utfordringer med kvantefysikk	19
3.2 Undervisningsstrategier i kvantefysikk	22
3.3 Blooms taksonomi	25
3.4 Oppsummering.....	26
4 Lærebøkens behandling av kvanteobjekter	27
4.1 Gjennomgang av Ergo	27
4.2 Gjennomgang av Kraft	28
4.3 Oppsummering.....	30
5 Metode	31
5.1 Forskningsdesign	31
5.2 Datamaterialet	33
6 Utvikling og gjennomføring av undervisningsopplegget	41
6.1 Undervisningsoppleggets innhold	42
6.2 Kommunikasjonsformer i klasserommet.....	46
6.3 Kontekst for undervisningsopplegget.....	47
6.4 Gjennomføring av undervisningsopplegget.....	47
7 Resultater	51
7.1 Resultater fra elevdiskusjoner fra første dobbelttime	51
7.2 Resultater fra elevdiskusjoner fra andre dobbelttime	59
7.3 Resultater fra intervjuer	66
8 Diskusjon	75
8.1 Hvordan bruker elevene begrepet kvanteobjekter og tabell-verktøyet?	75

8.2 Hvordan opplever elevene å bruke kvanteobjekter og tabell-verktøyet?	82
8.3 Implikasjoner av studien.....	85
8.4 Metoderefleksjon	89
9 Konklusjon	93
Referanser	95
Vedlegg.....	99
Vedlegg 1.....	99
Vedlegg 2.....	111
Vedlegg 3.....	112
Vedlegg 4.....	115

1 Innledning

Elever kan oppleve store utfordringer når de skal lære om kvantefysikk, siden det sprenger alle grenser for hva de har lært tidligere. Læreplanen fra 2020 (Utdanningsdirektoratet, 2021) introduserer begrepet *kvanteobjekter* i Fysikk 2 på videregående skole, som er et relativt ukjent begrep for både elever og lærere. Kompetansemålet er: «*gjøre rede for hva som skiller kvanteobjekter fra klassiske objekter, og beskrive situasjoner der kvanteeffekter observeres*». Siden begrepet ikke tidligere var i læreplanen (Utdanningsdirektoratet, 2006), er det ikke blitt brukt i undervisning tidligere. Det er heller ikke et ord som er vanlig å bruke i fysikkteori, som vanligvis har en mer matematisk og instrumentell vinkling (Bunge, 2003a; Johansson, Andersson, Salminen-Karlsson, & Elmgren, 2018; Pereira & Solbes, 2022).

Det finnes lite forskning på hvordan begrepet kvanteobjekt fungerer i en undervisningskontekst. Dette byr på utfordringer om hvordan man skal undervise om kvanteobjekter og hva begrepet skal innebære. Denne oppgaven er en intervensjonsbasert studie som tar for seg utformingen, gjennomføringen og evalueringen av et undervisningsopplegg om kvanteobjekter. Opplegget er en introduksjon til kvantefysikk i en Fysikk 2-klasse. I tillegg presenteres tidligere forskning og litteratur om kvanteobjekter og kvantefysikk. Med utgangspunkt i dette vil kvanteobjekter beskrives, noe som danner grunnlaget for hvordan konseptet blir framstilt i undervisningen. Formålet er å klargjøre hva som menes med selve begrepet kvanteobjekter, hvordan man som lærer kan undervise om det og hvordan elevene oppfatter begrepet. Da er det viktig å kartlegge både hvordan undervisningsopplegg om kvanteobjekter kan utformes, hvordan elevene opplever og bruker begrepet kvanteobjekter og om det bidrar til forståelse av kvantefysikk.

1.1 Motivasjon for oppgaven

I kompetansemålet presentert ovenfor er det i læreplanen lagt til en forklaring av kvanteobjekter: «*Et kvanteobjekt har både partikkelegenskaper og bølgeegenskaper. Et kvanteobjekt kan ikke beskrives fullstendig av klassisk fysikk, men krever en kvantemekanisk tilnærming.*» (Utdanningsdirektoratet, 2021). Denne dekker ikke nødvendigvis behovet for en mer tydelig og utdypende beskrivelse som vil være nyttig for elevenes forståelse, noe heller ikke lærebøkene utdyper særlig. Kvanteobjekter kan beskrives som en kvantefysisk entitet (Bunge, 2003a). Det finnes ingen enighet rundt ontologien til kvanteobjekter, hva det er og formen det eksisterer i. Dette kan gjøre det utfordrende å undervise om kvanteobjekter på konsekvente måter, noe som er sentralt for å forebygge misforståelser (Bouchée, de Putter-Smits, Thurlings, & Pepin, 2022; van den Berg, van Rossum, Grijsen, Pol, & van der Veen, 2020; Lautesse et al., 2015; Henriksen et al., 2018). Dette er en pedagogisk utfordring som fortsatt diskuteres (Bouchée et al., 2022). Derfor er det tiltrengt å utvikle undervisning om kvanteobjekter som

kan støtte elever og lærere i undervisning og å finne en god beskrivelse av kvanteobjekter som er hensiktsmessig å bruke. Denne studien kan være med på å fylle manglende empiri om undervisning med og om kvanteobjekter, og komme med forslag til hvordan undervisning kan gjennomføres.

Kvanteobjekter kan være vanskelig å konseptualisere for elever på grunn av sin abstrakte natur (Bøe & Viefers, 2021; Bouchée et al., 2022). Det finnes et behov for å utvikle verktøy elevene kan støtte seg på i utforskingen av kvantefysikk. Samtidig har elever et stort visualiseringsbehov (Henriksen et al., 2018). Siden kvantefysikk er kontra-intuitivt, risikerer man at de utvikler misforståelser hvis elevene lager egne visualiseringer (Bøe & Viefers, 2021). Det er derfor viktig å gi elevene noe å støtte seg på. I denne oppgaven har jeg utviklet et tabell-verktøy som elevene kan ta i bruk, slik kapittelet 2.2.2 utdyper. Slik kan elevene bruke begreper uten at de allerede er tildelt klassiske betydninger, slik bølge og partikkel er (Lévy-Leblond, 2003; Bunge, 2003a). Selv om bølge-partikkel-dualiteten er en vanlig innfallsvinkel i undervisning om kvantefysikk, er den fortsatt omdiskutert (Henriksen et al., 2018). Det vil derfor være relevant å utforske alternative framstillinger som for eksempel å bruke kvanteobjekter.

Hvordan elevene opplever undervisningen, kvanteobjekter og tabell-verktøyet er viktig for å kunne si nyttigheten deres. Opplevelsen til elevene kan rette oppmerksomhet mot mulighetene og utfordringene de har i kvantefysikk (Bouchée, Thurlings, de Putter-Smits, & Pepin, 2023). Det finnes mye forskning om misoppfatninger, se for eksempel Krijtenburg-Lewerissa, Pol, Brinkman, & Van Joolingen (2017), men mindre om elevers opplevelse, som kan gi et mer nyansert bilde av utfordringene de har og hvordan man kan tilrettelegge for læring. Til tross for at elevene opplever mange utfordringer med kvantefysikk, synes de at den kvalitative tilnærmingen er interessant (Bungum, Bøe, & Henriksen, 2018), som er et godt utgangspunkt for å engasjere dem i undervisningen.

1.2 Problemstilling

Denne oppgaven har som hensikt å belyse hvordan begrepet kvanteobjekt kan undervises om og hvordan det kan fungere i undervisning. Problemstillingen er:

«Hvordan kan kvanteobjekter fungere som et nyttig begrep for elever i å lære om kvantefysikk?»

Problemstillingen besvares ved å prøve ut og evaluere et undervisningsopplegg om kvanteobjekter som også implementerer det utviklede tabell-verktøy, og gjennom å holde elevbesvarelser opp mot tidligere forskning på eleveres oppfatning av kvantefysikk og fysikkfaglig teori om kvantefysikk. Dette er for å kunne støtte opp om kompetansemålet og for å kunne være veiledende for lærere når de skal undervise om kvanteobjekter. I forbindelse med dette har jeg studert litteratur om kvanteobjekter, oppfatninger elever har og utviklet og gjennomført et undervisningsopplegg. For å svare på problemstillingen vil følgende forskningsspørsmål belyses:

FS1: Hvordan bruker elevene begrepet kvanteobjekt og tabell-verktøyet i undervisningen?

FS2: Hvordan opplever elevene å bruke kvanteobjekt og tabell-verktøyet som støtte for sin forståelse?

For å besvare forskningsspørsmålene ble det samlet inn og analysert datamateriale fra lydopptak av elevenes gruppediskusjoner fra undervisningen, samt gruppeintervjuer i etterkant av opplegget. Både diskusjonene og intervjuene vil brukes til å besvare hvert forskningsspørsmål, men hovedsakelig vil diskusjonene være med på å besvare FS1 og intervjuene FS2. Hvordan elevene bruker og beskriver kvanteobjekter og begrepene fra tabell-verktøyet vil kunne vise i hvilken grad elevene er i stand til å ta dem i bruk i ulike kontekster og på reflekterte måter. Hvis elevene bruker de på hensiktsmessige måter kan man si at begrepene har vært nyttige for elevene i å lære om kvantefysikk, spesielt hvis forklaringene deres viser seg å være positive i sammenligning med tidligere forskning på elevers utfordringer. Hvordan elevene opplever å bruke begrepene vil si noe om hvor nyttige de selv opplevde begrepene, som kan ses i sammenheng med hvordan de brukte begrepene i diskusjonene sine.

1.3 Oppgavens struktur

Denne masteroppgaven starter med en gjennomgang av fysikkfaglig teori om kvantefysikk på et kvalitativt nivå i kapittel 2, etterfulgt av en utdypning av tidligere forskning på elevers oppfatninger, undervisningsstrategier og relevant didaktisk teori i kapittel 3. Kapittel 4 handler om lærebøkens behandling av kvanteobjekter. Dette er resultatet av en gjennomlesning jeg har gjort av de to lærebøkene Kraft og Ergo og er en oppsummering av hva bøkens kapittel om kvantefysikk inneholder med tanke på hvordan de introduserer og behandler begrepet kvanteobjekter. Det presenteres før metoddelen siden det kun er en gjennomgang og det er ikke brukt en analytisk metode. Gjennomgangen er ikke en del av oppgavens empiri, men heller en del av bakgrunnen for hvorfor denne studien er gjennomført. Deretter vil kapittel 5 utdype den valgte forskningsmetoden, opptak av elevdiskusjoner og intervjuer. Undervisningsoppleggets utforming legges fram i kapittel 6. Her inkluderes didaktiske begrunnelser for undervisningsoppleggets oppbygning, det faglige innholdet og undervisningens kommunikasjonsformer, etterfulgt av en presentasjon av hvordan gjennomføringen av opplegget fungerte for denne spesifikke klassen. Gjennomføringen av opplegget er med på å legge grunnlaget for oppleggets og studiens overførbarhet, siden det er nødvendig å ta forbehold for at andre klasser vil trenge opplegget tilpasset sine behov. Kapittel 7 presenterer resultatene med en gjennomgang av funn delt inn i dobbeltime 1, dobbeltime 2 og intervjuene. I diskusjonsdelen i kapittel 8 vil datamaterialet ses på tvers og settes opp mot forskning og faglig teori, samt inneholde implikasjoner av oppgaven og en metoderefleksjon. Kapittel 9 vil til slutt oppsummere innholdet i en konklusjon som svar på problemstillingen.

2 Fysikkfaglig teori

Dette kapittelet tar for seg det relevante fysikkfaglige innholdet og vil se nærmere på hva som kjennetegner kvantefysikk og noen av konsekvensene og tolkningene av kvantefysikk. Dette innebærer sentrale konsepter som bølge-partikkel-dualiteten, uskarphetsprinsippet, måling og kvanteobjekters natur. Kvantobjekter vil bli beskrevet i kapittel 2.2. Kapittelet bygger på flere kilder, deriblant Bunges artikkel «*Twenty-Five Centuries of QP: From Pythagoras to Us, and from Subjectivism to Realism*» (Bunge, 2003a), der han omtaler «quantons», eller «kvantoner», Lévy-Leblonds artikkel «*On the nature of quantons*» (Lévy-Leblond, 2003) og boka «*The Feynman Lectures on Physics*» volum 3 om kvantefysikk (Feynman, Leighton, & Sands, 1963/2010). Målet er å beskrive kvantefysikk på en måte som er hensiktsmessig å bruke i undervisning i Fysikk 2, og som kan gi retning til beskrivelsen av kvanteobjekter i forklaringen til kompetansemålet (Utdanningsdirektoratet, 2021).

«*The Feynman Lectures on Physics*» (Feynman, Leighton, & Sands, 1963/2010) tar ikke et eksplisitt ståsted når det kommer til filosofiske tolkninger og er mer rettet mot å undervise og forklare kvantefysikk og dets fenomener. Dette kan komme av at Feynman ble påvirket av holdningene på 1930- og 40-tallet da København-tolkningen dominerte og fokuset var på å kunne regne fysikk (Freire, 2003). Diskusjoner og kontroverser ble ansett som unødig tidsbruk. Bunge (2003a; 2003b) sitt arbeid er mer konseptuelt og filosofisk. Han argumenterer for en realist-tolkning, som handler om at et utfall er uavhengig en observatør og at fenomener kan beskrives utover kun det utfallet som inntreffer. Bunge (1967a; 1967b) etablerer seg på 60-tallet som en bidragsyter til den filosofiske siden av fysikk og introduserte begrepet kvanton. Dette er en tid Freire (2003) beskriver som en overgangsperiode, der man begynte å argumentere mot det instrumentalistiske synet på vitenskap. Siden Lévy-Leblond (2003) tar utgangspunkt i Bunges definisjon av kvantoner, eller kvanteobjekter, har han også et realist-perspektiv. Realist-tolkningen og København-tolkningen vil bli redegjort for senere i kapittelet i 2.1.3.

2.1 Kvantefysikkens tidlige utvikling

Fysikere var på 1800-tallet og tidlig på 1900-tallet overbevist om at det ikke var mer å oppdage innenfor fysikk, men at det kun var finjusteringer som gjensto. Det gjensto blant annet å finne en god forklaring på strålingen fra svarte legemer, noe Planck forklarte ved at energien måtte være kvantisert (Garritz, 2013; Kragh, 2002). Han understrekte at dette kun var et matematisk verktøy og at energien i virkeligheten ikke kunne være kvantisert, og det ble ofte ikke snakket om hvorfor Plancks formel var riktig (Kragh, 2002). Fysikere hadde vanskelig for å anerkjenne at det fantes en del av fysikken som ikke stemte overens med klassisk fysikk. Deres virkelighetsforståelse ble utfordret gjennom observasjoner som ikke passet med den etablerte fysikken, blant annet at lys og elektroner måtte ha både bølge- og partikkelegenskaper, slik observasjoner viste i for eksempel dobbelspalteforsøket og fotoelektrisk

effekt (Kragh, 2002). Dette betydde at fysikerne motvillig måtte akseptere et nytt felt innenfor fysikk, som skilte seg fullstendig fra klassisk fysikk, nemlig kvantefysikk (Bowler & Morus, 2010).

Kvantefysikk er unikt og skiller seg fullstendig fra klassisk fysikk ved sin statistiske natur, i motsetning til tidligere da man trodde at verden oppførte seg deterministisk (Feynman, Leighton, & Sands, 1963/2010; Bunge, 2003a). Det er mystisk for både nybegynnere og erfarne fysikere og umulig å forklare klassisk. Våre menneskelige erfaringer er knyttet til store objekter, ikke små, slik de er på kvantenivå, som medfører å måtte lære om noe abstrakt uten å kunne knytte det til egne erfaringer (Feynman, Leighton, & Sands, 1963/2010). Bølger og partikler er kjent fra klassisk fysikk og er klassiske objekter, mens i kvantefysikk kan man ikke lenger se på bølgefenomener og partikkelfenomener separat. De må sameksistere i et kvanteobjekt.

2.1.1 Bølge-partikkel-dualiteten

Bølge-partikkel-dualiteten er et konsept unikt for kvantefysikk, siden man har objekter som verken oppfører seg kun som bølger eller kun som partikler. Hovedforskjellen mellom bølger og partikler er at bølger er spredt ut og partikler er i ett punkt. Objektene man i kvantefysikk må ta hensyn til, kan ha både bølge- og partikkelegenskaper (Feynman, Leighton, & Sands, 1963/2010). En konsekvens av dette er at eksperimenter ikke kan forklares gjennom bare et bølgeperspektiv, eller partikkelperspektiv. Originalt stammer bølge-partikkel-dualiteten fra København-tolkningen av kvantefysikk, men har blitt kritisert for å gi opphav til misforståelser gjennom tvetydige tolkninger (Henriksen et al., 2018).

Lys var allerede etablert gjennom bølgeperspektivet, da Einstein oppdraget at fotoelektrisk effekt måtte forklares med partikkelperspektivet (Kragh, 2002). Begge perspektivene var nødvendig for ulike eksperimenter. Fysikere oppdaget også at det samme gjaldt for elektroner, som hadde blitt sett på som partikler. Elektroner måtte følgelig bli sett på som kvanteobjekter. Ifølge «*The Feynman Lectures on Physics*» (Feynman, Leighton, & Sands, 1963/2010) er verken bølge- eller partikkelperspektivet riktig. De har visse begrensninger som fører til at man må ha et helt eget perspektiv når man snakker om kvantefysikk. Det er derfor snakk om en dualitet mellom bølger og partikler. Bunge (2003a) påpeker at objekter i kvantefysikk er verken bølger eller partikler, dette er noe nytt som trenger et eget ord, og han innfører begrepet «kvantoner». Bølger og partikler har motstridende egenskaper som er problematiske fra et klassisk perspektiv, mens egne kvantefysiske objekter ikke har dette problemet.

2.1.2 Bølgefunksjonen og dens tolkninger

Bølgefunksjonen Ψ beskriver egenskapene til et kvanteobjekt, som posisjon, bevegelsesmengde og bølgelengde, gjennom å beskrive alle kvantetilstandene til systemet. Hvert mulige utfall av en hendelse blir beskrevet av en amplitude der sannsynligheten for at det spesifikke utfallet skjer er kvadratet av amplituden $|\Psi|^2$ (Feynman, Leighton, & Sands, 1963/2010). Kvadratet av bølgefunksjonen gir altså

sannsynlighetstettheten for å finne kvanteobjektet i en bestemt region i rommet, eller for et utfall av en hendelse. Dette betyr at det finnes flere måter en hendelse kan foregå på, som er med på å skape interferens. Interferens er at to eller flere bølgelignende objekter kan opptre på samme sted og danne et nytt bølgemønster. Det er med andre ord kun mulig å vite sannsynligheten for ulike utfall, ikke hvilket utfall som vil inntreffe. At man bare kan forutsi sannsynligheter representerer en fundamental *ikke-determinisme*, som er et skille fra den klassiske og deterministiske fysikken. Dette betyr at det finnes en fundamental uskarphet i naturen, som ikke skyldes manglende data eller måleusikkerhet. En motsetning til dette er tolkningen om skjulte variabler (Freire, 2003), som beskrives senere.

Selv om vi oppfatter hendelser som deterministiske, er verden bygd opp av kvantefysiske systemer som oppfører seg ikke-deterministisk. Et viktig utgangspunkt for dette er skalaen kvantefysikk foregår på. Når vi skal oversette eksperimentelle data fra kvantenivå til vårt nivå, gjøres dette alltid gjennom makroskopiske instrumenter, som kan betyr at informasjonen tolkes i overføringen til noe en forsker kan lese av (Bunge, 2003b). På kvantenivå vil som sagt ett og ett utfall være avhengig av objektets sannsynlighetsfordeling (Feynman, Leighton, & Sands, 1963/2010). Etter utallige slike utfall vil hendelsens fordeling komme til syne gjennom en middelvei. Det er denne middelveien som vil være representasjonen av det vi klassisk vil oppfatte som deterministisk.

Superposisjon er et sentralt begrep i kvantefysikk, men er ikke unikt til dette og finnes også innenfor klassisk bølgeteori (Bunge, 2003a). I kvantefysikk er begrepet superposisjon en måte å representere kvanteobjekters sannsynlighetsfordeling på (Feynman, Leighton, & Sands, 1963/2010; Bunge, 2003a). Hvert mulige utfall for objektet eksisterer i en superposisjon representert av en lineær kombinasjon av de ulike tilstandene. Siden bølgefunksjonen er et matematisk verktøy for å representere ulike kvantetilstander vil den uttrykke sannsynligheten for at kvanteobjektet er i de ulike tilstandene i superposisjonen ved en måling. En måling vil tvinge fram en av tilstandene ved å interagere med systemet, slik at bølgefunksjonen kollapser. Man kan tenke seg at bølgefunksjonen er en bølge i det komplekse planet som beskriver et kvanteobjekt. I en superposisjon betyr det at bølgefunksjonens komponenter individuelt representerer kvanteobjektets ulike tilstander.

Heisenbergs uskarphetsprinsipp omhandler hvordan vi forutser hendelser (Feynman, Leighton, & Sands, 1963/2010). Det gir uttrykk for hvordan man aldri vil kunne måle posisjon og bevegelsesmengde skarpt samtidig. Bunge (2003a) påpeker at bølge-partikkel-dualiteten tydelig viser seg i dette prinsippet gjennom relasjonen til uskarpheten mellom posisjon og bevegelsesmengde. Om objektet har en skarp posisjon, vil bevegelsesmengden ikke være presist bestemt og omvendt, som viser til en dualitet. Det er en fundamental begrensning på eksperimentelle egenskaper ved at vi aldri kan måle x -posisjonen og x -komponenten til bevegelsesmengden p mer skarpt enn relasjonen: $\Delta x \geq \frac{\hbar}{2} \Delta p$

(Feynman, Leighton, & Sands, 1963/2010). Dette kalles Heisenbergs uskarphetsprinsipp. Δx er posisjonens uskarphet, \hbar den reduserte Planck-konstanten og Δp bevegelsesmengdens uskarphet. Dette betyr at et instrument som kan bestemme posisjonen til et objekt ikke kan være varsom nok til ikke å interagere med objektet som skal måles. En implikasjon av dette er at når man måler et spesifikt fenomen, kan man ikke unngå å forstyrre systemet på en eller annen måte. Her er det viktig å påpeke at uskarpheten er en intrinsisk egenskap til objektet og det er ikke snakk om måleusikkerhet.

Generelt betyr dette at vi ikke kan lage måleinstrumenter som måler en skarp verdi uten å påvirke det som måles (Feynman, Leighton, & Sands, 1963/2010). Om man alltid visste hvor et objekt var og samtidig visste hvilken retning den hadde, ville man ikke kunne hatt fenomener som interferens, siden dette kommer av kvanteobjektets romslige utbredelse. Dette viser at uskarphet oppstår fra bølgeperspektivet for slike objekter. Partikkelperspektivet er begrenset siden en partikkel finnes på et bestemt punkt i rommet med en bestemt bevegelsesmengde, noe som ikke stemmer for objekter i kvantefysikk. Hvis man betrakter en bølgepakke, har den en uskarp lengde og en bevegelsesmengde representert med bølgelengden. En måling vil kun gi verdien ved det tidspunktet, og ved et senere tidspunkt vil verdien igjen være uskarp. Klassiske bølger ville skapt interferens uansett, siden de aldri vil kunne ha en bestemt posisjon. For objekter i kvantefysikk forårsaker en måling en tilnærmet kvantisert posisjon som ikke lenger tillater interferens, slik en kontinuerlig utstrekning gjør.

2.1.3 Hvordan en måling tolkes i kvantefysikk

Dersom man måler hvilken hendelse som inntraff i et kvantefysisk system, påvirkes systemet slik at man får et annet resultat enn om man ikke målte (Feynman, Leighton, & Sands, 1963/2010). Dette er et fenomen ingen kan forklare fullstendig. Derfor finnes det flere filosofiske tolkninger som har som hensikt å beskrive hva som faktisk foregår ved en måling. Disse tolkningene er også sentrert rundt å klargjøre hva den matematiske formalismen i kvantefysikk skal bety (Bouchée et al., 2022) og hvordan kvantefysiske entiteter som elektroner, fotoner og bølgefunksjonen konseptualiseres (Henriksen et al., 2018; Lautesse et al., 2015). Noen slike tolkninger er *København-tolkningen*, *realist-tolkninger*, *skjulte variabel-tolkningen* og *pilot-bølge-tolkningen*.

København-tolkningen får navnet sitt fra byen der Niels Bohr hadde sitt virke. Det er en statistisk og ikke-realistisk tolkning som gjennom bølge-partikkel-dualiteten forener bølge- og partikkelnaturen (Garritz, 2013). Om man ikke måler objektets posisjon, har ikke objektet en bestemt posisjon, men eksisterer i en superposisjon og er avhengig en observatør (Bunge, 2003a; Garritz, 2013). For kvanteobjekter betyr dette at de ikke har noen observerbare egenskaper, som utstrekning, eller fart, i det hele tatt før måling (Bunge, 2003a). Ved en måling vil bølgefunksjonen kollapse og et av de mulige utfallene vil inntreffe. *København-tolkningen* er ifølge Bunge (2003a) påvirket av fenomenalisme, som

betyr at vi beskriver fenomener slik vi opplever dem, men undersøker ikke prosessen som skjer for at hendelsen skal finne sted. *København-tolkningen* har vært og er den dominerende tolkningen (Freire, 2003) og det er hovedsakelig denne som representeres i lærebøkene på skolen (Garritz, 2013). Siden den matematiske formalismen til kvantefysikk fungerte strålende, betydde det at det var lite behov for fysikere å diskutere det ontologiske (Freire, 2003) og den bidro til å inspirere en «*shut up and calculate*»-holdning (Johansson et al., 2018; Stadermann, 2021). Denne holdningen går ut på at studenter lærer hvordan de skal regne på kvantefysikk uten at det knyttes til konseptuell forståelse.

København-tolkningen baserer seg på klassiske begreper, som Bohr var en forkjemper for (Lautesse et al., 2015). I og med at dette er den dominerende tolkningen, og at den var ganske utfordret, ble implikasjonene at man i lang tid forholdt seg til klassisk terminologi, slik at kvantefysisk terminologi og ontologi hadde en langsom utvikling. Bruken av klassiske konsepter som for eksempel i bølge-partikkel-dualiteten ses på som en konservativ tilnærming (Lautesse et al., 2015). Man kan argumentere for at klassiske begreper gir en tilstrekkelig beskrivelse av kvantefysikk så lenge de brukes riktig. Og heri ligger utfordringen for undervisning, nemlig at lærere og elever ofte ikke bruker disse begrepene konsekvent. Kun i nyere tid har man akseptert at det finnes kontroverser og deres filosofiske implikasjoner (Freire, 2003). Bunge (2003a) kritiserte *København-tolkningens* fenomenalisme, siden det ikke gir muligheten til å beskrive de intrinsiske egenskapene til kvanteobjekter når fenomenet er avhengig av sine omstendigheter (Lautesse et al., 2015). Dersom man forholder seg til kvanteobjekters fundamentale egenskaper, er det dermed nødvendig å se på dem med en *realist-tolkning*. Bunge (2003a) er en talsmann for denne tolkningen. Den handler om at verden er uavhengig en observatør og at virkeligheten kan beskrives objektivt (Bunge, 2003a; Greca & Freire, 2003).

Greca og Freire (2003) påpeker at forskjellen mellom *København-tolkningen* og *realist-tolkningen* er nokså subtil og henviser til Bunge (2003a) sin forklaring. Denne beskriver forskjellen som at *København-tolkningen* ser på sannsynligheten for å finne kvanteobjektet i et volum, mens *realist-tolkningen* ser på sannsynligheten for at kvanteobjektet eksisterer i et volum. Det finnes flere versjoner av *realist-tolkningen*, blant annet *skjulte variabler-tolkningen* og *pilot-bølge-tolkningen*. Noen *realist-tolkninger* har et deterministisk utgangspunkt, men Bunge (2003a) forholder seg fortsatt til ikke-determinisme i sin tolking gjennom å forklare resultatet av en måling som objektivt spredt omkring en middelvei. Uskarphet er en fundamental egenskap, ikke en refleksjon av hva vi ikke vet slik det er i *skjulte variabler-tolkningen*. Beskrivelsene av kvanteobjekter og kvantefysikk vil i denne oppgaven hovedsakelig basere seg på det som er beskrevet som Bunges *realist-tolkning*.

Skjulte variabler-tolkningen ble først lagt fram i 1952 av Bohm, men det var også en ide Einstein hadde vært inne på i 1935 (Freire, 2003). Det var et forsøk på å reintrodusere determinisme i vitenskapen

gjennom å påstå at det fantes noen variabler vi enda ikke visste hva var og som ikke kunne observeres. Tolkningen innebærer at et kvanteobjekt alltid vil ha en veldefinert, men ukjent, posisjon (Stadermann, 2021). I 1964 la Bell fram sine ulikheter, som tilbakeviste *skjulte variabler-tolkningens* gyldighet, noe som fører til at det forblir lite oppslutning om tolkningen (Freire, 2003).

Pilotbølge-tolkningen, eller de Broglie-Bohm-tolkningen, bruker skjulte variabler og er deterministisk (Garritz, 2013). I likhet med *skjulte variabler-tolkningen* er ikke *pilot-bølge-tolkningen* utbredt og har visse fenomener den ikke kan forklare. Denne tolkningen går ut på at partikler blir veiledet av en bølgefunksjon som samhandler med omgivelsene. Bølgefunksjonen beskriver sannsynligheten for at en partikkel eksisterer på et gitt punkt, uten at bølgefunksjonen og partikkelen er separate enheter.

Bunge (2003a) henviser til at det ikke er realisme i seg selv som er feil, når for eksempel *skjulte variabler-tolkningen* ikke viser seg å fungere, men at disse tolkningene inneholder andre faktorer som motbevises, som klassisisme og kausalisme. Det alle disse tolkningene har til felles er at bølgefunksjonen beskriver oppførselen og egenskapene til kvanteobjekter.

2.2 Kvanteobjekter

For å kunne snakke om og diskutere kvanteobjekter trenger vi en tydelig beskrivelse av hva det er. I dette delkapittelet vil jeg beskrive begrepet kvanteobjekt og dets egenskaper for å tydeliggjøre hvordan denne studien vil se på kvanteobjekter. Det kan være hensiktsmessig med en realist-tilnærming til kvanteobjekter for å kunne snakke om den ontologiske betydningen av kvanteobjektet, i motsetning til den mer instrumentelle *København-tolkningen* som er mer opptatt av den rent matematiske formalismen der ontologien ikke vektlegges (Freire, 2003; Bunge, 2003a).

«Quantum object» på engelsk brukes i litteratur ofte mer generelt og som et generisk begrep for å ha en måte å omtale «hva som helst» i kvantefysikk. Min tolkning av begrepet kvanteobjekt på norsk og i norsk skole er i større grad som et didaktisk begrep og som et alternativ til mer klassiske begreper. Begrepet «quanton» beskrives og tas i bruk på 60-tallet av Mario Bunge (1967b; 2003a). Han betrakter begrepet med en spesifikk ontologi basert på en realist-tolkning for å konsekvent fjerne seg fra begreper med klassisk opphav. Det blir ikke et særlig utbredt begrep, siden det ligger utenfor *København-tolkningen* som er den mest godtatte tolkningen, men brukes fortsatt av noen fysikere og inspirerer didaktisk forskning (Bunge, 2003a; Lautesse, Vila Valls, Ferlin, Héraud, & Chabot, 2015; Lévy-Leblond, 2003; Greca & Freire, 2003). Begrepet kvanteobjekt er lite brukt i undervisning, og bølgepartikkel-dualitet er fortsatt den vanligste inngang til undervisning (Pereira & Solbes, 2022; Henriksen, Angell, Vistnes, & Bungum, 2018; Lautesse et al., 2015). «Quanton» ligner som konsept på den beskrivelsen av kvanteobjekter som brukes i denne oppgaven. Beskrivelsen av kvanteobjekter vil ikke

ta et eksplisitt utgangspunkt i en spesifikk filosofisk tolkning, men er hovedsakelig påvirket av Bunges *realist-tolkning*. Dette betyr at et kvanteobjekt er fysisk virkelig, enten om det måles eller ikke.

2.2.1 Hva er et kvanteobjekt?

Ifølge Bunge (2003a) er et kvanteobjekt ikke definert av kvantisering av energi, men av sin ikke-deterministiske natur. Det vil si at noen av egenskapene er uskarpe, som bevegelsesmengde og posisjon, mens distribusjonen til for eksempel posisjon er veldefinert. Dette er fordi både kvantefysikk og klassisk fysikk har kvantiserte enheter (Bunge, 2003a), slik at dette ikke gir et entydig skille mellom dem. Videre beskriver Bunge (2003a) at kvanteobjekter verken er bølger eller partikler, men noe eget. Uskarphet er en faktisk egenskap ved kvanteobjekter, som ikke kan måles mer nøyaktige med bedre instrumenter, slik det også beskrives i «*The Feynman Lectures on Physics*» (Feynman, Leighton, & Sands, 1963/2010). Bunge (2003a) hevder at å bruke den fundamentale ikke-deterministiske naturen som et skille fra klassisk fysikk er mer praktisk enn å assosiere kvanteobjekter med klassiske begreper som bølger og partikler gjennom bølge-partikkel-dualiteten. Dette er fordi klassiske begreper ofte har en klassisk forutinntatthet som påvirker hvordan kvantefysikk betraktes. Dette er Lévy-Leblond (2003) enig i og forklarer at kvanteobjekter i noen tilfeller kan approksimeres som bølger og i andre tilfeller som partikler. Et eksempel på dette er når kvanteobjektet måles til å ha en skarp posisjon, så kan vi si at kvanteobjektet kan approksimeres som en partikkel. Videre kritiserer Lévy-Leblond bølge-partikkel-dualitetens tvetydige formulering siden det kan bety at et objekt er både bølge og partikkel, eller kan være enten bølge, eller partikkel. I stedet for at kvanteobjekter er bølger og partikler, kan de heller beskrives av egenskaper vi assosierer med bølger og partikler.

2.2.2 Egenskapene til et kvanteobjekt beskrevet gjennom et tabell-verktøy

For å kunne unngå de tvetydighetene som finnes i bølge-partikkel-dualiteten foreslår Lévy-Leblond (2003) en rekke egenskaper som han plasserer i en tabell. Denne har som hensikt å skape et alternativ til bølge-partikkel-dualiteten, slik at kvantefysiske objekter kan forstås gjennom en annen kontekst enn kun bølge- og partikkelegenskaper og som et eget objekt. Tabellen er framvist i Tabell 1.

	Number	Extension
Particles	Discrete	Discrete
Fields	Continuous	Continuous
Quantons	Discrete	Continuous

Tabell 1: Lévy-Leblond (2003) sin tabell for «quantons/kvantoner» sine egenskaper.

	Antall	Utstrekning
Partikler	Kvantisert	Kvantisert
Bølger	Kontinuerlig	Kontinuerlig
Kvanteobjekter	Kvantisert	Kontinuerlig

Tabell 2: Tilpasset tabell-verktøy til undervisning. Min oversettelse til norsk og tilpasning av ord for å passe elevenes behov.

Siden den originale tabellen er på engelsk, har jeg oversatt ordene til norsk, slik Tabell 2 viser. Flere av ordene er også erstattet av lignende ord, eller ord som passer bedre til undervisning i Fysikk 2. «Number» er oversatt til antall, «extension» er oversatt til utstrekning, «continuous» til kontinuerlig og «particles» til partikler. Disse er ganske rett fram å oversette. «Discrete» er oversatt til kvantisert. Dette kommer av at begrepet kvantisert er noe elevene blir introdusert for i kvantefysikk og er et vanlig konsept i kvantefysikk, i motsetning til diskret, selv om betydningen av diskret og kvantisert er ganske lik. «Fields» betyr egentlig felt på norsk, men oversettes her til bølger av samme grunn som oversettelsen av «discrete». Elevene har lært om ulike typer felt tidligere, men begrepet bølger brukes mye i for eksempel lærebøker når det handler om kvantefysikk. Dette kan sørge for at elevene kan assosiere det de lærer gjennom tabellen med det de leser om i læreboka. «Quanton» oversettes til kvanteobjekt, siden dette er begrepet kompetansemålet bruker (Utdanningsdirektoratet, 2021). Et «quanton» er, slik Bunge (2003a) og Lévy-Leblond (2003) beskriver det, et kvanteobjekt og navngivingen kommer av begrepets likhet med for eksempel proton og nøytron. Kvanteobjekt er derfor en hensiktsmessig oversettelse til norsk. Det er med andre ord gjort en jobb med både å oversette begrepene til passende norske ord, men også ved å måtte erstatte visse ord for å tilpasse seg norske elever og undervisning.

La oss se på tabell-verktøyet i Tabell 2 mer kvalitativt. En partikkel har en kvantisert utstrekning, altså en bestemt avgrensning i rommet og et kvantisert og tellbart antall som betyr at individuelle partikler kan skilles fra hverandre (Lévy-Leblond, 2003). En bølge er noe som har en kontinuerlig utstrekning i rommet, altså uten en tydelig avgrensning, og har også et kontinuerlig antall, som betyr at man ikke kan telle dem opp uten videre. Et kvanteobjekt beskrives ved hjelp av en kontinuerlig utstrekning i rommet og med et kvantisert og tellbart antall. Disse egenskapene eksisterer på et spektrum, slik Heisenbergs uskarphetsrelasjon viser at uskarpheten i posisjon og bevegelsesmengde er avhengige av hverandre. Dette betyr at et kvanteobjekt ikke har tvetydige egenskaper. Man kan i forsøk behandle ett og ett kvanteobjekt, samtidig som objektet er i en superposisjon av ulike tilstander.

Uskarphetsrelasjonen viser at man aldri kan bestemme for eksempel en posisjon skarpt, som betyr at kvanteobjektet alltid vil ha en viss kontinuerlig utstrekning. Man kan imidlertid i visse tilfeller approksimere kvanteobjektet med en bestemt posisjon, som ved en måling. I slike tilfeller kan man approksimere kvanteobjektet med en partikkel, siden den vil ha tilnærmet kvantisert antall og utstrekning, men dette er et eksempel på et ekstremt tilfelle.

Tabell 2 ble brukt i undervisningsopplegget som er utviklet og utprøvd i denne masteroppgaven, slik beskrevet i kapittel 6. Den ble i undervisningen, og i elevdiskusjonene, brukt til å beskrive kvanteobjekter og deres egenskaper. Målet med tabell-verktøyet var å legge til rette for diskusjoner der elevene kan utforske kvanteobjekter og deres egenskaper uten at de utelukkende måtte støtte seg på et språk de assosierer med klassisk fysikk, som bølger og partikler.

2.3 Dobbelspalteforsøket

Dobbelspalteforsøket brukes ofte for å demonstrere både bølge- og partikkelegenskapene til kvanteobjekter. Det er et eksempel som uttrykker sentrale konsepter ved kvantefysikk, som å demonstrere den fundamentale uskarpheten og den statistiske naturen som eksisterer, samt hvordan dette resulterer i at man ikke kan forutsi eksperimentelle resultater. Feynman et al. (1963/2010) kaller det for et fenomen som umulig kan forklares klassisk og som ligger sentralt i kvantefysikk.

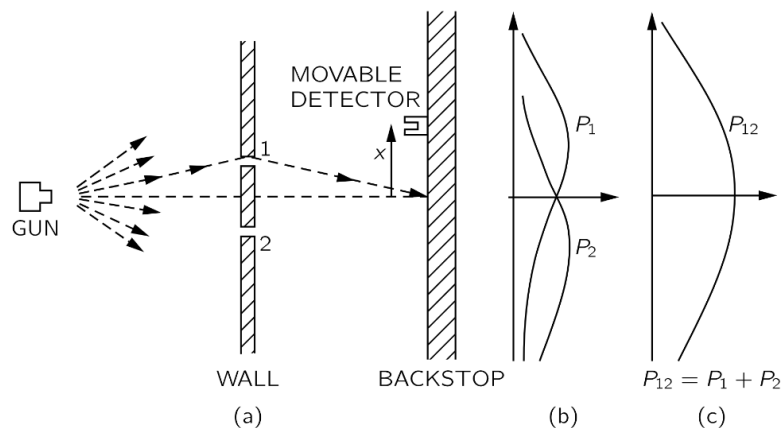
2.3.1 Historisk bakgrunn

Den følgende historiske bakgrunnen baserer seg på Kragh (2002). Newton hadde utviklet et partikkel-perspektiv for lys med «korpuskler» og selv om det fantes observasjoner som motsa denne teorien, dominerte den fram til starten av 1800-tallet. Da Young foreslo at lys kunne oppføre seg som bølger, ble han møtt av skepsis, siden han motsa Newtons teori. Dette endte med at han valgte å ta et steg bort fra fysikken. Det var Fresnel som i 1817 klarte å fremstille overbevisende eksperimentelt bevis for bølge-perspektivet gjennom et interferenseksperiment basert på prinsipper fra Huygens og Young. Bølge-perspektivet for lys var dominerende i 100 år fram til 1900-tallet, da Einstein viste at lys også måtte ha partikkelegenskaper, gjennom fenomenet fotoelektrisk effekt. I tiden etter denne nye oppdagelsen aksepterte flere og flere fysikere at lys måtte ha både bølge- og partikkelegenskaper. Det var enda ikke kjent at elektroner hadde de samme egenskapene. I 1927 publiserte Davisson og Germer en artikkel der de viste at elektroner måtte ha både partikkel- og bølgeegenskaper og beviste de Broglies berømte formel for sammenhengen mellom elektronets bevegelsesmengde og bølgelengde. Man kunne da beskrive objekter med masse ved hjelp av det man kalte materiebølger. Det viste seg at mikroskopiske objekter oppførte seg likt og hadde både bølge- og partikkelegenskaper.

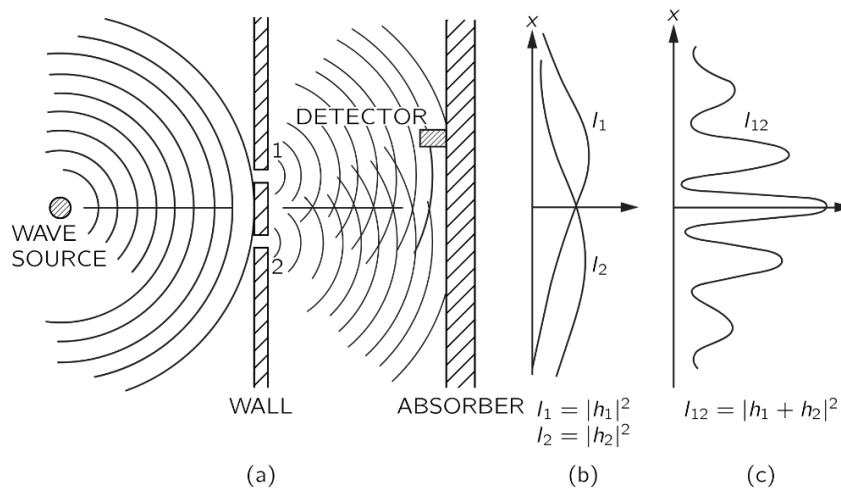
2.3.2 Kvantefysisk forklaring

Dette delkapittelet er basert på boka «*The Feynman Lectures on Physics*» (Feynman, Leighton, & Sands, 1963/2010). I den kvantefysiske forklaringen av hva som skjer i dobbelspalteforsøket vil vi først se på hva som skjer om man sender inn enten klassiske partikler, la oss kalle dem kuler, klassiske bølger, eller kvanteobjekter. Dette vil gjøres ved å se på hvordan måling og uskarphet påvirker forsøket. Generelt er oppsettet til dobbelspalteforsøket en vegg med en sensor som kan måle hvor og hvor mange objekter som treffer. Foran veggen er det en plate med to spalter. Disse spaltene er så små at om man skyter kuler mot dem, kan bare en gå gjennom av gangen. Spaltene vil være mellom veggen med sensoren og noe som skyter objekter som bølger, partikler, eller kvanteobjekter mot spaltene.

Først undersøker vi udelelige kuler som blir skutt litt tilfeldig mot spaltene, slik Figur 1 viser. Vi måler sannsynligheten P_{12} , slik vi ser i Figur 1c, for at kulene treffer et eller annet sted på veggen bak. Kulene treffer alltid som hele kuler og sannsynlighetsfordelingen viser ingen interferens. Dersom vi dekker til ett og ett hull vil vi få to nye sannsynlighetsfordelinger P_1 og P_2 , som i Figur 1b, og summen av disse to vil være lik P_{12} som vi fikk da begge spaltene var åpne.



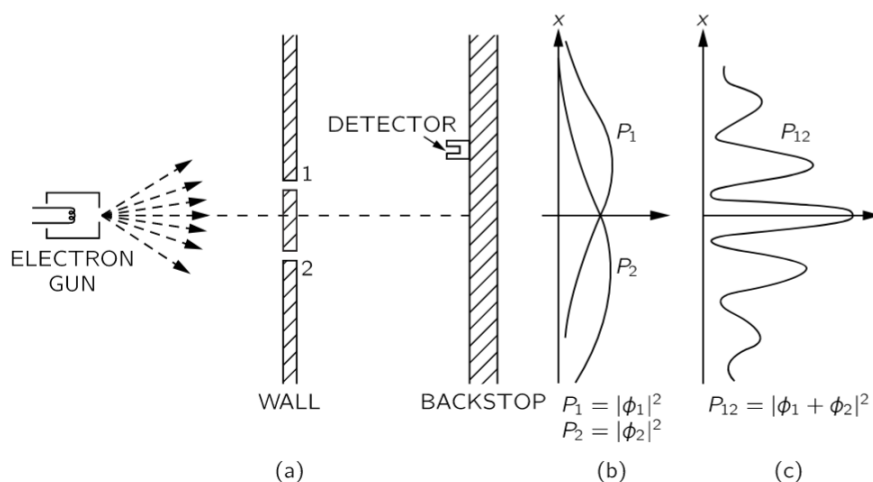
Figur 1: Et interferensforsøk med kuler. From *The Feynman Lectures on Physics The New Millenium Edition Volume III: Quantum Mechanics* by Richard P Feynman, Robert B Leighton, and Matthew Sands, copyright © 2010. Reprinted by permission of Basic Books, an imprint of Hachette Book Group, Inc.



Figur 2: Et interferensforsøk med vannbølger. From *The Feynman Lectures on Physics The New Millenium Edition Volume III: Quantum Mechanics* by Richard P Feynman, Robert B Leighton, and Matthew Sands, copyright © 2010. Reprinted by permission of Basic Books, an imprint of Hachette Book Group, Inc.

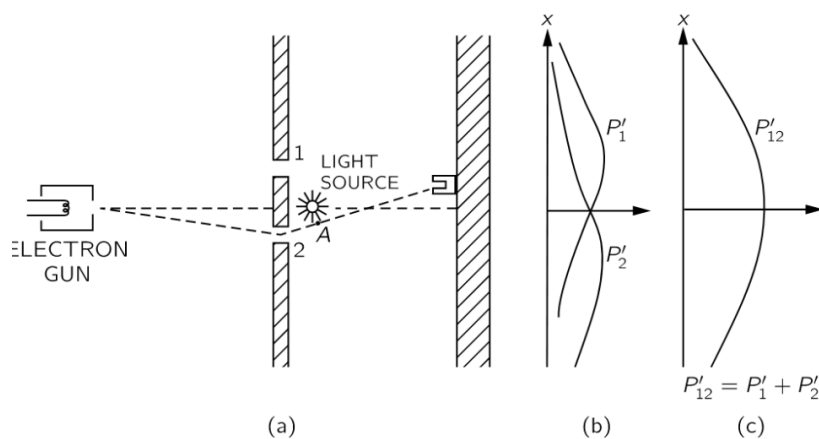
Vi sender deretter inn vannbølger, som vi kan se i Figur 2. Detektoren måler at bølgenes intensitet er proporsjonal med bølgenes energi og kvadratet av bølgenes høyde når den treffer vegg. Intensiteten kan ha hvilken som helst verdi, som betyr at vi her måler et kontinuerlig mønster. Hvis en og en spalte dekkes, måler vi intensitetene I_1 og I_2 , slik som i Figur 2b. Disse ligner på fordelingen vi fikk for kuler i Figur 1b. Dersom bølgekilden produserer bølger som sendes inn mot to åpne spalter, vil ikke målt intensitet være summen av I_1 og I_2 , men et interferensmønster, der intensitetens fordeling beskrives av Figur 2c og formelen $I_{12} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\delta)$. Intensiteten har i dette tilfellet et ekstra interferensledd som inkluderer faseforskjellen δ mellom I_1 og I_2 . Vi vil få konstruktiv og destruktiv interferens avhengig av faseforskjellen mellom bølgefrontene som møtes ved sensoren. Interferensen kommer av at bølgene kan være i superposisjon med hverandre.

Nå tar for oss hvordan forsøket beskrives for kvanteobjekter, som beskrevet i Figur 3. Det er vanlig å bruke enten elektroner eller fotoner som eksempel i dette forsøket. Vi sender inn kvanteobjekter, for eksempel med en elektronkanon, mot to åpne spalter. Fordelingen som detektoren måler er et interferensmønster, som tilsvarer I_{12} som vi fikk for bølger, slik vi kan se i Figur 3c. Ett og ett kvanteobjekt vil detekteres i et punkt når det treffer vegg, og det er i distribusjonen av mange slike treff at interferensmønsteret viser seg. Hvis elektronene hadde gått gjennom bare en av spaltene, burde resultatet vært som for kulene, men fordelingen er ikke en sum av hver enkelt spaltens sannsynlighet, slik Figur 3b og c illustrerer. Kvanteobjektet detekteres i et punkt, siden vi måler hvor på vegg den treffer, mens distribusjonen er slik vi målte for bølger. Dette betyr at et kvanteobjekt må oppføre seg både som en partikkel og som en bølge. Kvanteobjektet må være i en superposisjon med seg selv, gå gjennom begge spaltene samtidig og interferere med seg selv for å skape et interferensmønster. Dette er en egenskap som kommer av kvanteobjektets kontinuerlige utbredelse.



Figur 3: Et interferensforsøk med elektroner. From *The Feynman Lectures on Physics The New Millenium Edition Volume III: Quantum Mechanics* by Richard P Feynman, Robert B Leighton, and Matthew Sands, copyright © 2010. Reprinted by permission of Basic Books, an imprint of Hachette Book Group, Inc.

Når en lyskilde plasseres ved spaltene, slik som i Figur 4a, for å måle hvilken spalte kvanteobjektet passerer gjennom, viser målingen at kvanteobjektet går gjennom en av spaltene. Da forsvinner interferensmønsteret som illustrert i Figur 4c. Vi står igjen med en sannsynlighetsfordeling som ligner kulenes, slik Figur 4b viser. Forsøket blir altså annerledes når vi måler hvilken spalte kvanteobjektet går gjennom. Posisjonen er ikke lenger uskarp og kontinuerlig utbredt, slik at kvanteobjektet ikke kan interferere. Forsøket påvirkes siden vi ikke kan måle hva som foregår uten å interagere med systemet. Dette kan kalles en aktiv måling. I klassisk fysikk har man ofte en passiv måling, som ikke påvirker det man måler. Ved å bruke tabell-verktøyet kan vi se at kvanteobjektets kontinuerlige og romslige beskrivelse forklarer interferens og hvorfor man ikke kan si hvilken spalte den gikk gjennom. Det kvantiserte antallet forklarer hvorfor vi vil detektere et kvantisert antall støt i veggen bak.



Figur 4: Et forsøk med elektroner og en lyskilde. From *The Feynman Lectures on Physics The New Millenium Edition Volume III: Quantum Mechanics* by Richard P Feynman, Robert B Leighton, and Matthew Sands, copyright © 2010. Reprinted by permission of Basic Books, an imprint of Hachette Book Group, Inc.

Hvis man kan konstruere forsøket slik at man ikke påvirker det som skjer, vil man fortsatt møte en uskarphet. Ved å senke intensiteten på fotonene som skytes inn, vil bevegelsesmengden deres bli så liten at de ikke lenger har en betydelig nok størrelse til å påvirke elektronene når målingen gjennomføres. Dette betyr at fotonene har lengre og lengre bølgelengde når intensiteten senkes. På grunn av bølgenaturen til lys vil det være en begrensning på hvor nøyaktig noe kan måles. Når bølgelengden blir lengre enn avstanden mellom spaltene i forsøket får man da ikke et skarpt, men uklart glimt når fotonet støter elektronet. Det er umulig å bestemme hvilken spalte elektroner gikk gjennom. Når bølgelengden blir enda lengre vil vi til slutt kunne se et interferensmønster. Dette viser at selv om vi klarer å måle på en måte som ikke interagerer med systemet, vil vi fortsatt møte på en fundamental uskarphet.

2.4 Oppsummering

Dette kapitlet har pekt på en rekke dilemmaer og utfordringer i kvantefysikk. Dette blir viktig i neste kapittel som ser på hvordan elevene lærer om kvantefysikk. Ulike konsepter som bølge-partikkel-dualiteten, bølgefunksjonens og målingers tolkninger, kvanteobjekter og dobbel-spaltforsøket har blitt presentert. Det er viktig å ha en fundamental forståelse for det som kjennetegner kvantefysikk, for å kunne identifisere og framheve hvilke utfordringer som finnes. Elever møter disse temaene og utfordringene når de arbeider med kvantefysikk. Det kan oppstå misoppfatninger, slik at det er viktig å ha kjennskap til hvordan man kan forebygge disse, hvilke undervisningsstrategier som finnes og hvordan man best mulig kan kommunisere om dette i klasserommet.

3 Didaktisk teori

Dette kapittelet vil gi en oversikt over tidligere forskning på undervisning av kvantefysikk og hvilke oppfatninger og utfordringer elever har med kvantefysikk. Kvantefysikk er et tema innenfor fysikk i skolen der det er behov for mer forskning og det er lite forskning på hvordan kvanteobjekter fungerer i undervisning. Mye tidligere forskning fokuserer på hvilke misoppfatninger som finnes og konkluderer med at det er et behov for mer forskning på blant annet undervisningsstrategier (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017; Pereira & Solbes, 2022; Bøe & Viefers, 2021). Kvantefysikk er spesielt vanskelig siden ontologien er bestridt, og fysikere forholder seg ofte kun til den matematiske formalismen uten å ta hensyn til ontologi (Henriksen et al., 2018). I noen tilfeller kan fysikere bruke «quanton», som en konseptualisering av en kvantefysisk entitet (Lautesse et al., 2015), som oversettes til kvanteobjekt på norsk. Det vil være viktig å være klar over hvilke utfordringer som finnes når jeg i denne oppgaven skal undersøke elevers beskrivelser av kvanteobjekter og kvantefysikk og utvikle et passende undervisningsopplegg. Kapittelet tar for seg oppfatninger og utfordringer som elever har i kvantefysikk, blant annet temaene bølge-partikkel-dualiteten og måling. Videre vil undervisningsstrategier og bruk av språk i fysikkundervisning bli presentert. Dette er for å gi et bredt bilde av hva undervisning av kvantefysikk innebærer og for å gi innsikt i hva man burde være forberedt på å møte i undervisning og fra elevene.

3.1 Oppfatninger og utfordringer med kvantefysikk

Her skal vi ta for oss ulike oppfatninger og utfordringer elever har om kvantefysikk, samt sentrale temaer som bølge-partikkel-dualiteten, bytte av perspektiv, måling og ikke-determinisme fra tidligere forskning på undervisning av kvantefysikk. Dette inkluderer også de misoppfatningene som elever har og hva som kan gjøres for å forebygge disse.

Det er gjennomgående at elevers utfordringer med å konseptualisere og forstå kvantefysikk har utgangspunkt i klassisk fysikk (Angell et al., 2019; Bøe & Viefers, 2021; Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017; Pereira & Solbes, 2022; Bouchée et al., 2022). Dette kan stamme fra at blant annet partikler og bølger er grunnleggende klassiske begreper, som elevene har klassiske assosiasjoner med. Kvantefysikk oppleves som kontra-intuitivt av elevene (Bøe & Viefers, 2021; Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017) og inneholder mange filosofiske elementer som krever tolkning (Bunge, 2003a; Garritz, 2013). Dette krever en stor tilpasning av elevenes perspektiver, og en fullstendig og krevende omstilling fra det klassiske de tidligere har lært om. Istedenfor å skulle forstå akkurat hva som skjer, må man ofte akseptere at konsepter i kvantefysikk er som de er. Vi har ikke alltid en god forklaring siden konseptene er tvetydige (Lévy-Leblond, 2003). Det kan også være vanskelig å forholde seg til

kvantefysikk og kvantefysiske fenomener, siden det ofte ikke er noe vi kan observere eller erfare i hverdagen vår, slik at elevene ofte ikke har erfaringer med fenomenene (Angell et al., 2019).

3.1.1 Bølge-partikkel-dualiteten og kvanteobjekter

Bøe og Viefers (2021) identifiserer at konsepter som bølge-partikkel-dualitet, uskarphetsrelasjonen og superposisjon representerer både sentrale temaer i kvantefysikk, men også brudd med klassisk fysikk som gir utfordringer for elever. Spesielt bølge-partikkel-dualiteten pekes ut som et viktig tema. Henriksen et al. (2018) viser i sin artikkel til at det ikke finnes en konsensus rundt ontologien til og bruken av bølge-partikkel-dualiteten i undervisning. Til tross for dette er bølge-partikkel-dualiteten en vanlig inngang til kvantefysikk (Pereira & Solbes, 2022), siden det er gjort lite forskning på alternativer (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017).

Bølge-partikkel-dualiteten beskrives ofte av elevene på en klassisk måte, der kvanteobjekter beskrives som enten bølger, partikler, eller ved hjelp av en blandet beskrivelse. En blandet beskrivelse betyr at elevene ser at bølge- og partikkelegenskaper kan sameksistere, men at de fortsatt bruker klassiske beskrivelser (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017). I noen tilfeller har også elevene tilnærminger som ligner mer på kvantefysikk. Det innebærer at elevene kan forstå at kvanteobjekter oppfører seg som både bølger og partikler samtidig, men at de fortsatt sliter med å beskrive ikke-deterministiske hendelser, noe som beskrives av både Krijtenburg-Lewerissa et al. (2017) og Bouchée et al. (2023).

For veien videre vil det være viktig å utvikle og evaluere gode undervisningsstrategier med tanke på utfordringene med bruddet fra det klassiske og kontroversene bølge-partikkel-dualiteten skaper (Bøe & Viefers, 2021). Mange av utfordringene elevene møter er relatert til at de ikke klarer å koble kvantefysikk opp mot deres egen erfaring av verden (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017). Et alternativ til den utbredte bølge-partikkel-dualiteten er introduksjonen av konseptet kvanteobjekter for å unngå de ontologiske utfordringene som kommer med bølge-partikkel-dualiteten. Lautesse et al. (2015) undersøkte bruken av det de kalte for en innovativ tilnærming med begrepet «kvantoner» i franske lærebøker. De påpeker at ontologiske utfordringer ofte kan spores tilbake til Bohrs bruk av klassiske konsepter som bølge og partikkel. Resultatet av deres undersøkelse viste færre utfordringer hos elever med bruken av slike innovative begreper, siden man unngår klassisk tvetydighet, men de påpeker at lærebøkene ofte ikke implementerte dem på konsistente måter.

Kvanteobjekt er et begrep som forener egenskapene til partikler og bølger ved å se på antall og utstrekning som to separate ting, for å unngå tvetydighet (Lévy-Leblond, 2003). Dette kan være fordelaktig siden få elever konseptualiserer forskjellen mellom bølger og partikler (van den Berg et al., 2020). Slik kan kvantefysikk forklares med kvanteobjekter, istedenfor bølge-partikkel-dualiteten, på en måte som adresserer utfordringene elevene har. Dette burde undersøkes mer i dybden for å se om det

er nyttig for elevenes konseptuelle forståelse av kvantefysikk. Kvantobjekter er et begrep uten klassisk ekvivalens (Henriksen et al., 2018) og kan derfor utvide begrepsrepertoar til elevene med mer passende kvantefysiske begreper.

Elever har en tendens til å ha et partikkelperspektiv når de beskriver elektroner i kvantefysikk, siden de er vant til det fra klassisk fysikk (Pereira & Solbes, 2022), slik at de mister dualitetsaspektet. Det er ikke nødvendigvis bølge-partikkel-dualiteten i seg selv som er problemet, men at elever ikke får med seg tvetydigheten i konseptet (van den Berg et al., 2020). Elever har problemer med å forestille seg at en bølge er spredt utover i rommet og assosierer bølger med oscillasjoner, som kan være med på å forårsake at de foretrekker partikkelperspektivet. Dette er med på å begrense elevenes forståelse av for eksempel dobbelspalteforsøket, der bølgenaturen til kvantobjektet er sentralt. Potensielt vil en god beskrivelse av kvantobjekter være med på å framheve hvorfor det er visse egenskaper som motsier hverandre. Dualiteten som framheves i kvantefysikk kan tolkes som at objekter oppfører seg enten som bølger eller partikler, som gir inntrykket av at de ikke kan ha egenskaper fra begge samtidig og som er med på å skape tvetydighet (Huseby & Bungum, 2019).

Elever har ofte et sterkt behov for å se for seg det som skjer, mens kvantefysikkens abstrakte natur gjør at den vanskelig kan relateres til virkeligheten (Henriksen et al., 2018). Derfor burde man være forsiktig i bruken av klassiske analogier, siden disse kan føre til feil (Bungum, Bøe, & Henriksen, 2018; Bunge, 2003a). Dette betyr ikke at man aldri kan inkludere klassiske analogier, men at både læreren og elevene må være klare over hvilke konsekvenser det kan ha for forståelsen. Konseptuell læring handler ofte om å lage mening gjennom å visualisere og tolke konsepter gjennom et eksisterende rammeverk for forståelse (Bouchée et al., 2022). Når elever da møter på utfordringer i kvantefysikk vil de falle tilbake på det de vet, som fører til misoppfatninger. Dette betyr at elevene vil trenge mer støtte og tilbakemeldinger, og de kan ha nytte av en kombinasjon av dialogiske og autoritative tilnærminger i undervisningen av en lærer som virker sikker på temaet (Bouchée et al., 2023).

3.1.2 Utfordringer med måling

At kvantefysikk er grunnleggende abstrakt handler om hvordan det ikke er noe man kan erfare i hverdagen (Angell et al., 2019). Det er dermed vanskelig for elever å akseptere for eksempel kvantefysisk måling, superposisjon og ikke-determinisme (Huseby & Bungum, 2019). Dette kan være en av grunnene til at Pereira og Solbes (2022) sier at vi trenger mer forskning på slike kompliserte temaer. Både Huseby og Bungum (2019) og Bøe og Viefers (2021) påpeker at for å avmystifiseres observasjon må man redegjøre for hvordan en måling griper inn i og interagerer med systemet.

Uskarphetsprinsippet kan ofte tolkes som at det ble gjort en målefeil, eller som en konsekvens av inngrepet en måling gjør i systemet, når det egentlig er et fundamentalt prinsipp (Bøe & Viefers, 2021).

Det vil være viktig å skille mellom observasjon i klassisk fysikk og at en måling må ses på som en interaksjon med systemet du måler i kvantefysikk. Elever sliter med å forstå hva en måling er, og de bruker ofte en klassisk forståelse av ikke-determinisme eller tar et realist-perspektiv (Huseby & Bungum, 2019; Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017). De kan for eksempel beskrive hva som skjer i dobbelspalteforsøket, men konseptene måling og superposisjon er utfordrende for dem. Påvirket av hverdagspråket sitt, tolker ofte elever observasjon som å se på noe, slik at de ikke tenker over hvordan en måling vekselvirker med systemet, og dermed påvirker selve målingen. I gjennomgangen av 74 artikler fant Krijtenburg-Lewerissa et al. (2017) lignende resultater. Elevene kunne tolke uskarphet som en feil i målingen, i instrumentet, en måleforstyrrelse eller et problem med systemet.

3.2 Undervisningsstrategier i kvantefysikk

Bøe og Viefers (2021) påpeker at et sentralt mål ved norsk undervisning av kvantefysikk er en hovedsakelig konseptuell og kvalitativ forståelse, noe som er gjennomgående i flere land (Stadermann, 2021). Dette står i kontrast til mer tradisjonell fysikkundervisning som har en tendens til å være mer fokusert på å kunne regne fysikk (Bungum, Bøe, & Henriksen, 2018), noe som kan være en utfordring for elevene dersom de ikke er vant til å jobbe på en mer kvalitativ måte. Undervisning gjøres enda vanskeligere av at mange lærere ikke har god nok trening i kvantefysikk, siden de i løpet av utdanningen deres ofte har hatt lite, eller ingen undervisning om temaet (Lautesse et al., 2015). Hvis de har hatt undervisning om kvantefysikk som studenter, har den ofte vært basert på kvantefysikkens abstrakte og matematiske formalisme, og ikke de komplekse konseptuelle spørsmålene som finnes (Johansson et al., 2018; Pereira & Solbes, 2022).

3.2.1 Strategier og anbefalinger fra tidligere forskning

Siden undervisning om kvantefysikk kan være utfordrende for både lærere og elever er det et behov for mer kunnskap om undervisningsstrategier og undervisning som fremmer konseptuell forståelse (Bøe & Viefers, 2021; Bungum, Bøe, & Henriksen, 2018). Bøe og Viefers (2021) peker ut at det er viktig å utvikle og evaluere gode undervisningsstrategier innen kvantefysikk. De framhever at bølge-partikkel-dualiteten er et vanlig utgangspunkt for å introdusere kvantefysikk, men at det er problematisk og kan føre til misoppfatninger dersom tvetydighetene ikke framheves, noe Lautesse et al. (2015) også viser til. Videre peker de på at man burde se etter alternativer, som for eksempel kvanteobjekter. De klassiske konseptene er begrenset (Henriksen et al., 2018) og det mangler forskning på undervisningsstrategier der alternativer til bølge-partikkel-dualiteten brukes (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017). Henriksen et al. (2018) sier blant annet at det er mulig å bruke kvanteobjekters uskarpe egenskaper til å bedre kunne forklare kvanteobjekters bølgeegenskaper, uten å måtte bruke klassiske analogier, og foreslår at dette burde undersøkes videre. Elever er ofte ikke kritiske nok til bølge-

partikkel-dualiteten, og man burde derfor oppmuntre til en mer kritisk holdning (Henriksen et al., 2018), som vil være nyttig uavhengig av om man tar utgangspunkt i kvanteobjekter eller dualitet.

Pereira og Solbes (2022) er blant de som framhever at det er nyttig å være tydelig på ontologien og hvordan man tolker kvantefysikk mens man underviser. Det viser seg at elever foretrekker et realistperspektiv, men har en tendens til å bytte perspektiv etter hva som passer dem best, spesielt mellom klassiske og semi-klassiske syn. Man burde altså være tydelig ovenfor elevene på hvorfor ting tolkes som de gjør. For eksempel kan dobbelspalteforsøket bli utfordrende for elever hvis de hele tiden skal bytte mellom et bølge- og partikkelperspektiv. Forskjellen mellom klassiske bølger og partikler burde tydeliggjøres samtidig som elevene bevisstgjøres på tvetydighetene disse skaper rundt dualiteten (van den Berg et al., 2020). Digitale hjelpemidler kan være nyttige for å gjøre elevene oppmerksomme på overraskende resultater og på å sammenligne klassisk og kvantefysisk oppførsel. Samtidig må det innføres i undervisningen med nok støtte til elevene, som for eksempel gjennom å forberede klassen gjennom diskusjoner, eller pågående formative vurderinger (Bouchée et al., 2023).

3.2.2 Bruk av språk og diskusjon i fysikkundervisning

Den mer kvalitative og konseptuelle vinklingen til kvantefysikkpensum kan kreve en mer språkbasert undervisningsform, siden den matematiske formalismen innenfor kvantefysikk ikke er tilgjengelig i like stor grad for elever på videregående skole (Bøe & Viefers, 2021). Språk er generelt en vesentlig del av å utvikle kunnskap (Angell et al., 2019). Å kunne fagspråket er viktig for at elevene skal kunne uttrykke og utvikle sin kunnskap. Henriksen et al. (2018) henviser til at elever ofte har en upresis bruk av terminologi og at de blander klassisk fysikk og kvantefysikk i sine beskrivelser. Dette kan relateres til for lite forståelse av hvordan kvantefysikk bryter med klassisk fysikk. Elevene trenger eksplisitte forklaringer for hva dette skillet er. Språket vårt er tilpasset virkeligheten slik vi ser den og hvordan vi visualiserer den (Bunge, 2003a). Bunge (2003a) hevder at København-tolkningens dominans og instrumentalisme har ført til en langsom utvikling av terminologi. Dette skyldes at København-tolkningen baserer seg på klassisk terminologi. I tillegg forholder tolkningen seg til at den kvantemekaniske formalismen fungerer og at man derfor ikke trenger å forholde seg til uopklarte filosofiske problemer. Fagspråket er viktig for faget, for å kunne uttrykke seg på fagets språk og for å delta i utviklingen av ideer innenfor fagfeltet, eller i klasserommet (Angell et al., 2019). Språk i alle modaliteter har en viktig rolle i læringsprosessen og er vesentlig for å utvikle kunnskap. I sin undersøkelse viser Pereira og Solbes (2022) til hvordan de har brukt diskusjonsspørsmål av konseptuell natur for å skape engasjement blant elevene, slik at de sammen kunne utveksle kunnskap. Eksempler på temaer var bølge-partikkel-dualitet, bølgefunksjonen, sannsynlighet og superposisjon.

Språk blir uttrykt ulikt avhengig av kontekst (Wallace, 2004). Dette betyr at elever kan oppfatte betydninger av et ord ulikt, som kan føre til misoppfatninger. Derfor er det viktig å ha en felles forståelse og avklaring i klassen av hva de ulike begrepene betyr. Begreper er ikke frittstående søyler av kunnskap, men skaper kunnskap når de settes i sammenheng med ulike kontekster. Å ha en felles avklaring av begreper, kan skape et fellesskap og vil gjøre det lettere å eksplisitt adressere de forskjellige forståelsene (Angell et al., 2019). I sosiokulturell læringsteori anses språkliggjøringen som nødvendig for å delta i utviklingen av kunnskap. Tradisjonelt er ikke samtale om begreper som modalitet den vanligste i fysikkundervisning (Angell et al., 2019; Bungum, Bøe, & Henriksen, 2018). Selv om elevene kan reflektere og tenke over konsepter, trenger de å formulere og uttrykke seg for å videreutvikle forståelsen sin (Bungum, Bøe, & Henriksen, 2018). Elevene har ofte ikke like mye erfaring med dialog og diskusjon i fysikkundervisning, som kan gjøre det utfordrende å ta dette i bruk.

Kommunikasjon generelt i klasserommet foregår ofte på en av de fire formene vi kan se presentert i Tabell 3 (se Angell et al., 2019, s. 218). De ulike kategoriene har ulike funksjoner i undervisningen og alle burde inkorporeres på en eller annen måte. Den interaktive/ikke-interaktive dimensjonen handler om hvorvidt elevene deltar i samtalen som foregår (Angell et al., 2019). Dialogisk/autoritativ er om læreren tar hensyn til elevenes innspill. I et autoritativt klasserom er det læreren som har det korrekte svaret, som ofte er tilfellet i fysikkundervisning. Mens i kvantefysikk sitter ikke læreren med alle svarene, noe som åpner opp for nødvendigheten av mer dialogiske interaksjoner og samtaler om kvalitativ kunnskap. Tilfelle A i Tabell 3 er en samtale mellom to eller flere parter, i B peker for eksempel læreren ut tidligere innspill fra elevene, C handler om å gi avklarende tilbakemeldinger på innspill fra elevene og D er at læreren har en forelesning. Alle formene er nødvendige for god undervisning. Dialog er med på å utvikle kunnskapen til elevene, mens en autoritativ tilnærming er nødvendig for å gi elevene tilgangen til den kunnskapen.

	Interaktiv	Ikke-interaktiv
Dialogisk	A	B
Autoritativ	C	D

Tabell 3: De fire vanligste formene for kommunikasjon i klasserommet, utviklet av Mortimer og Scott og hentet fra boka *Fysikkdidaktikk* (Angell et al., 2019).

I de interaktive kommunikasjonsformene er det viktig å være bevisst på hvem som er aktive (Angell et al., 2019). Ofte er det et fåtall elever som snakker, som kan gi et skeivt bilde på hvilke syn som finnes i klassen. Korte gruppesamtaler underveis i undervisningen kan være med på å oppmuntre flere elever til å delta. Samtidig må man tenke på hvordan elevene deltar. Hvis samtalen følger et IRE-mønster, initiering, respons og evaluering, kan ofte elevene sitte igjen med inntrykket av at læreren er ute etter et spesifikt svar (Angell et al., 2019). Det kan være mer hensiktsmessig med sekvenser der elevene får sette egne ord på forståelsen sin. Dette gir læreren innsikt i hvilke tolkninger elevene sitter igjen med. En dialog, mellom lærer og elev, eller elevene seg imellom, gir muligheten til å utfordre tolkningene elevene har. Da er det viktig å støtte elevene slik at de ikke er redde for å gjøre feil. Dette kan gjøres gjennom å påpeke at det ikke nødvendigvis finnes riktige svar og at de spørsmålene de sitter med er de samme som fysikere har jobbet med i mange år (Bungum, Bøe, & Henriksen, 2018). På den måten kan elevene oppmuntres til å være kritiske, som er viktig når de skal lære om kvantefysikk. Elevediskusjoner er en sentral del av dialogisk undervisning (Angell et al., 2019). Da har alle elevene muligheten til å sette ord på ideene og utfordringer sine. Men det er ikke alltid disse er produktive siden lærerens autoritative stemme mangler (Bungum, Bøe, & Henriksen, 2018). Dette kan føre til at elever ikke kommer fram til noe nytt, eller at de sitter igjen med misoppfatninger (Angell et al., 2019).

3.3 Blooms taksonomi

Blooms taksonomi er en klassifiseringsmodell fra 1956 som brukes til å kategorisere læringsmål og læringsaktiviteter etter kompleksitet (Bloom, Engelhart, Furst, Hill, & Krathwohl, 1956). Modellen består av seks ulike nivåer: faktakunnskap, oppfatning, anvendelse, analyse, syntese og vurdering. Hvert nivå beskriver en stadig mer avansert kognitiv ferdighet, fra det enkleste til det mest komplekse. Undervisningsaktiviteter kan tilrettelegges for å passe inn i de ulike nivåene og dermed gi en mer systematisk tilnærming til læring, eller man kan ta utgangspunkt i nivåene for å undersøke elevenes kunnskapsnivå med mer åpne oppgaver. Blooms taksonomi er et rammeverk for å kunne se hvor avansert kunnskap om et tema er (Bloom et al., 1956). I dette delkapitlet vil rammeverket tilpasses slik at det kan brukes som et verktøy for å se på datamaterialet som er samlet inn.

Anderson et al. (2001) reviderte Blooms taksonomi slik at klassifiseringen består av verb istedenfor substantiv. De nye kategoriene er nokså like Blooms originale og er som følger: å gjengi, å forstå, å anvende, å analysere, å evaluere og å skape. Denne undersøkelsen ser først og fremst på elevenes faktuelle og konseptuelle forståelse av kvantefysikk. Den faktuelle dimensjonen kommer til syne gjennom kunnskap om isolerte elementer og detaljer, som kunnskap om terminologi. Den konseptuelle dimensjonen handler om elevenes mer komplekse og organiserte kunnskapsformer, som inkluderer å kunne bruke prinsipper, teorier, modeller eller andre strukturer mer generelt. Selv har jeg

tilpasset Anderson et al. (2001) sine kategorier til de følgende for å passe til undersøkelsens datamateriale: å bruke begrepene slik de er, å beskrive begrepene med egne ord, å anvende begrepene i ulike kontekster og å reflektere rundt begrepene og kontekstene. Det handler altså om å først kunne forstå og anvende begreper som kvanteobjekt og deretter å kunne bruke dem på hensiktsmessige måter i relevante kontekster.

3.4 Oppsummering

Perspektivene presentert i dette kapitlet er viktige deler av innholdet og utformingen av opplegget. Oppfatninger og utfordringer elevene har, og møter på, er sentrale for å kunne utvikle undervisning som kan håndtere disse. Dette var med på å veilede hvordan innholdet i opplegget mitt ble valgt. Det er viktig å ha oversikt over hvilke undervisningsstrategier som finnes og hvordan de fungerer når man skal velge undervisningsmetoder og temaer. Den tilpassede taksonomien i kapittel 3.3 kan brukes til å evaluere og beskrive elevenes bruk av tabell-verktøyet og begrepet kvanteobjekt. Dette vil være en del av det analytiske rammeverket som brukes til å undersøke nyttigheten av tabell-verktøyet som brukes i undervisningen.

4 Lærebøkene behandling av kvanteobjekter

Dette kapitlet går gjennom kvantefysikk-kapitlet til to Fysikk 2-lærebøker, Ergo (Callin, Dokka, Hellesøy, Seland, & Skåland, 2022) og Kraft 2 (Fossum, Sandstad, Bergli, Dellnes, & Myhreagen, 2022). Gjennomgangen av innholdet vil se på når og hvordan kvanteobjekter introduseres og beskrives. I tillegg beskrives hvordan begreper som kontinuerlig, kvantisert, utstrekning og antall brukes, siden dette er relevant for tabell-verktøyet som ble utviklet til undervisningsopplegget. Denne gjennomgangen er relevant som motivasjon for hvorfor det er nødvendig med en grundigere gjennomgang og beskrivelse av kvanteobjekter, og hvorfor vi burde undersøke nærmere hvordan man kan ta i bruk kvanteobjekter på hensiktsmessige måter.

4.1 Gjennomgang av Ergo

Ergo (Callin et al., 2022) bygger opp kapittel 8 Kvantefysikk slik: «8A Bølger og partikler», «8B Bølger som partikler», «8C Partikler som bølger», «8D Universets byggesteiner» og «8E Dypere inn i kvanteverden». De tre første delkapitlene handler om egenskapene til bølger og partikler og hvordan de oppfører seg som enten bølger eller partikler. På denne måte framheves bølger og partikler som fokuset for kvantefysikk. Det impliseres at i noen tilfeller skal man se på bølger og deres partikkelegenskaper, mens i andre tilfeller skal man ta for seg partikler og deres bølgeegenskaper. Man må forholde seg til å bytte mellom de to ulike perspektivene. Begrepet kvanteobjekt introduseres i slutten av delkapittel 8C, der uskarphetsrelasjonen og bølgefunksjonen introduseres. Boka tar for seg sannsynlighetsfordelinger, dobbelspalteforsøket for elektroner, måling og tolkninger til slutt.

4.1.1 Beskrivelser av bølger og partikler

Når boka beskriver partikler i 8A, framhever de at et støt er et bevis for at noe er en partikkel. Noen typiske egenskaper er masse, bevegelsesmengde og posisjon. En partikkel har en bestemt posisjon med begrenset utstrekning, som kan beskrive en kvantisert posisjon. At partikler støter kommer av at de ikke kan være på samme sted til samme tid, som kan beskrive et kvantisert antall. Partikler blir sammenlignet med klinkekuler, som er klassiske objekter. Bølger beskrives som noe som kan overlage. Typiske egenskaper er bølgelengde, frekvens og amplitude. En bølge er spredd ut i rommet uten noen klar utstrekning, som kan beskrive en kontinuerlig posisjon. Det beskrives også hvordan bølger kan overlape på samme sted i rommet når de for eksempel overlager, som kan skape interferensmønster og beskrive et kontinuerlig antall. Bølger sammenlignes med vannbølger og det forklares at lys oppfører seg på samme måte som vannbølger. I denne konteksten nevnes også dobbelspalteforsøket og hvordan et resultat ville sett ut for vannbølger og klinkekuler. Både partikler og bølger sammenlignes med klassiske objekter. Begrepet kvantisering introduseres i delkapittel 8B ved å snakke om lys, med hensikten om å introdusere elevene for at bølger kan ha partikkelegenskaper. Et foton

beskrives som både en bølge og en partikkel. Boka forklarer hvordan energien til lys er delt inn i bestemte biter, eller kvanter. Disse utgjør de minste byggsteinene og kvantisert er det motsatte av kontinuerlig. Et foton beskrives som masseløst, men med bevegelsesmengde, slik at de kan kollideres. Fotonet introduserer elevene for egenskaper som i klassisk fysikk ikke kan sameksistere.

I 8C introduseres man for partikler som har bølgeegenskaper. I både 8B og 8C kan vi se at konseptene bølger og partikler blir behandlet separat, som kan gi et inntrykk av at alt enten må være en bølge eller en partikkel, og at det er noe vi selv må se ut ifra konteksten. Elektronet trekkes fram som et eksempel på en partikkel, og elektroner og partikler brukes i flere tilfeller om hverandre. Videre forklares det hvordan elektroner kan lage interferensmønstre. Bølge-partikkel-dualiteten introduseres ved å forklare at både fotoner og materie har både bølgelengde og bevegelsesmengde. Uskarphetsrelasjonen, bølgefunksjonen og begrepet kvanteobjekt introduseres videre i kapitlet. Bølgefunksjonen forklares som en funksjon som beskriver partiklers egenskaper som en bølgepakke, som enten har liten spredning i posisjon og stor spredning i bølgelengde, eller motsatt. Denne spredningen beskrives som uskarphet. Begrepet kvanteobjekter introduseres ved å presentere at bølgefunksjonen beskriver en partikkel, og at partikkelen ikke kan ha en skarp posisjon eller bevegelsesmengde samtidig, noe som skyldes kvanteobjekters bølgenatur. Videre skriver de at «Egenskapene til et kvanteobjekt kan beskrives med en bølgefunksjon» (Callin et al., 2022, s. 375). Partikkel og kvanteobjekt kan her tolkes som det samme og boka bruker disse om hverandre.

4.1.2 Utdyping av kvanteeffekter

«Dypere inn i kvanteverden» tar for seg sannsynlighetsfordelinger, dobbelspalteforsøket, København-tolkningen, superposisjon, sammenfiltrering, tunnelering og determinisme. Det er første gang flere av disse nevnes eksplisitt. 8E begynner med å definere kvadratet av bølgefunksjonen som en sannsynlighetsfordeling og bruker dette til å forklare København-tolkningen, som er den eneste tolkningen som nevnes. Både København-tolkningen og dobbelspalteforsøket brukes til å introdusere en måling, og det forklares hvordan en måling vil påvirke et elektron, en partikkel eller et kvanteobjekt, som videre viser at disse begrepene blir brukt om hverandre om det samme. Kvanteobjekter nevnes når superposisjon introduseres, men da om hverandre med partikkel og brukes ellers i liten grad. Kvanteobjekter brukes på den andre siden mye i forklaringen av sammenfiltrering og tunnelering. Ikke-determinisme nevnes i et avsnitt helt på slutten av kapitlet som «tilfeldighet» og knyttes ikke til kvanteobjekter som en viktig egenskap.

4.2 Gjennomgang av Kraft

Kraft (Fossum et al., 2022) bygger opp kapittel 9 slik: «9.1 Lys – bølge eller partikkel?», «9.2 Dobbelspalteforsøket – bølge og partikkel», «9.3 Kvanteobjekt – bølger og partikler på samme tid» og

«9.4 Konsekvenser av kvantetilstander». Boka starter med en introduksjon av hvordan kvantefysikk skiller seg fra det klassiske, og tar opp temaene sannsynlighet, diskrete verdier av energi, at en måling vil påvirke systemet og at målinger kan forutsies og beskrives, men at vi ikke vet nøyaktig hva som skjer siden kvantefysikk ikke er deterministisk. De to første delkapitlene introduserer flere eksperimenter, mens delkapittel 9.3 tar for seg begrepet kvanteobjekt. Kvanteobjekt, kvantepartikkel og partikkel brukes om hverandre når ulike konsepter og fenomener beskrives.

4.2.1 Bølge eller partikkel, eller bølge og partikkel?

I 9.1 tar boka for seg fotoelektrisk effekt, Comptonspredning og hvordan disse forklares ved hjelp av at lys er partikler. De påpeker at kvantefysikk handler om at noe er både bølge og partikkel, og lys og fotoner brukes som en introduksjon til dette. Fotoner beskrives som kvantiserte energipakker, samtidig som det må ha bevegelsesmengde for å kunne støte med andre partikler. I 9.2 er dobbelspalteforsøket fokuset og brukes som et eksempel på at lys fortsatt er bølger. Slik blir bølge- og partikkelperspektivet behandlet separat. Boka påpeker at fotoner og elektroner begge resulterer i det samme interferensmønsteret som en bølge når vi ser på gjennomsnittet av mange partikler. Begrepene foton, partikkel, elektron og bølge blandes, noe som kan gjøre det vanskelig å vite hva man til enhver tid skal forholde seg til. Her introduserer de måling ved å påpeke at ved en måling vil ikke lyset, eller elektronet, lenger oppføre seg som en bølge, men som en partikkel. Siden fotoner og elektroner kan oppføre seg som både bølger og partikler finnes det en bølge-partikkel-dualitet, og de kan derfor interferere med seg selv. Videre framheves de ulike eksperimentene og hvordan ulike fenomener brukes til å vise hvordan kvantefysikk handler om noe som er både bølger og partikler.

4.2.2 Kvanteobjekt som både bølge og partikkel

Delkapittel 9.3 tar for seg flere sentrale aspekter, som bølgefunksjonen, superposisjon, uskarphet, målinger og ulike tolkninger. Fra tittelen til delkapittelet, «Kvanteobjekter – bølger og partikler på samme tid», viser de at et kvanteobjekt er både en bølge og en partikkel. Noe av det første som gjøres er å beskrive begrepet kvanteobjekter slik: «*Hvert kvanteobjekt, eller hver kvantepartikkel, er beskrevet av noe vi kaller en bølgefunksjon*» (Fossum et al., 2022, s. 304). Kvanteobjekt blir fort erstattet av begrepet kvantepartikkel. Videre brukes kvanteobjekt, kvantepartikkel, elektron og partikkel om hverandre, uten at det skilles mellom dem, slik at kvanteobjekt ikke brukes konsekvent. Bølgefunksjonen beskriver hvordan en partikkel er fordelt i rommet og at den kan brukes til å regne ut sannsynlighetsfordelingen til en partikkel. Videre beskrives Schrødingers-ligningen som en slags bevaringslov for kvanteobjekter. Superposisjon forklares som å addere ulike bølger for å finne det totale utsagnet, men den beskrives også gjennom at summen av bølgefunksjoner beskriver en partikkel i superposisjon. Bølge- og partikkelperspektivet brukes her om hverandre.

Uskarphet introduseres ved å koble sammen bevegelsesmengden og bølgelengden til en kvantepartikkel gjennom de Broglie-bølgelengden, og ved å fortelle hvordan det er umulig å måle både bevegelsesmengde og posisjon nøyaktig samtidig. Boka påpeker at dette handler om en iboende uskarphet i naturen. De fleste tilstandene et kvanteobjekt kan være i, vil utgjøre en slags balanse mellom disse. Boka presenterer tre kjente tolkninger: skjulte variabel-tolkningen, København-tolkningen og mange verdener-tolkningen. Det siste delkapittelet, 9.4, tar for seg ulike konsekvenser av kvantetilstander, som tunnelering, spinn, sammenfiltrering og polarisering. Også her brukes partikler, kvantepartikler og kvanteobjekter om hverandre.

4.3 Oppsummering

Ingen av bøkene lar kvanteobjekter dominere framstillingen av kvantefysikk og introduserer begrepet rundt midten av kapittelet. Kvanteobjekter får ikke en egen plass og behandles på lik linje med begreper som partikkel, elektron og kvantepartikkel, og disse brukes ofte om hverandre. Kvanteobjekter bidrar ikke med noe direkte nytt innhold, siden flere begreper brukes på akkurat samme måte. Både Ergo og Kraft presenterer kvanteobjekter ved at de beskrives av bølgefunksjonen, men kommer ikke med en mer tydelig beskrivelse, slik at elevene ikke nødvendigvis har noen knagger å henge begrepet på.

I et overblikk over Ergos kapittel ligger fokuset tilsynelatende på bølger og partikler. Når bølgefunksjonen blir introdusert, brukes det til å forklare både partikler og kvanteobjekter. Kvanteobjekter, partikler og elektroner har altså en tendens til å bli brukt om hverandre. Man må da hele tiden bytte perspektiv og tenke over hvilken representasjon som i hver situasjon blir den korrekte. Begrepet kvanteobjekt settes ikke spesielt tydelig inn i eksperimentelle kontekster, som kan gjøre det vanskelig å vite når og hvordan begrepet burde brukes. I motsetning til Ergo, har Kraft en tendens til å presentere eksperimentene og deretter hvordan resultatene vil bli for henholdsvis bølger og partikler, men bytter også ofte perspektiv. Begge bøkene snakker i stor grad om hva ting «er», ved at begge peker på hvordan man i kvantefysikk har noe som er både en partikkel og en bølge. Kraft har et mer tydelig fokus på de ulike tolkningene innenfor kvantefysikk enn Ergo og framhever tre av dem. Tolkningene kommer først mot slutten av kapittelet og de settes ikke eksplisitt i sammenheng med de ulike eksperimentene, eller fenomenene som blir presentert.

Det kan virke som at inkluderingen av begrepet kvanteobjekt er på grunn av at det står i læreplanene, siden det ikke tilfører noe nytt til innholdet om kvantefysikk og det brukes på samme måte som en partikkel, eller et elektron. Det kan hende at allerede skrevne kapitler fra tidligere utgaver av bøkene måtte tilpasses slik at de inkluderte kvanteobjekter.

5 Metode

Denne masteroppgaven er en intervensjonsbasert studie der et undervisningsopplegg ble utviklet og gjennomført. Hensikten var å utforske hvordan et opplegg om kvanteobjekter kunne være nyttig for elevers forståelse av kvantefysikk, hvordan de brukte begrepet og hvilken opplevelse de hadde. Bakgrunnen for dette er kompetansemålet som ble presentert i kapittel 1, og hvordan kvanteobjekter nå er en del av hva elever skal lære i Fysikk 2. Dette kapittelet tar for seg oppgavens metode, forskningsdesignet, hvordan data ble samlet inn, hva innsamlingen resulterte i og hvordan datamaterialet blir presentert i analysen.

5.1 Forskningsdesign

Hvilket forskningsdesign som velges er avhengig av hvordan forskningsspørsmålene er formulert, hvilken kontekst man undersøker og hvilke perspektiver som finnes i disse kontekstene (Robson & McCartan, 2016). Siden denne oppgaven ligner en intervensjonsbasert studie, var det naturlig å basere seg på et fleksibelt kvalitativt design (Fraser & Galinsky, 2010). Å bruke etablerte forskningspraksiser gir forskningen mer struktur og gir konkrete strategier for å forebygge tap av troverdighet. I dette delkapittelet vil forskningsdesignet, valget av datainnsamlingsmetoder, analyse og mine resonnementer bli utdypet for å gi innsikt i og åpenhet om prosessen. Objektivitet er ikke det viktigste i slike studier, men at settingen er naturlig og kontekstnær (Robson & McCartan, 2016).

5.1.1 Fleksibelt kvalitativt design

Oppgaven tar i bruk et fleksibelt forskningsdesign, som er den vanligste tilnærmingen for kvalitative undersøkelser og kjennetegnes ved at designet kan endres og tilpasses underveis i studien (Robson & McCartan, 2016). Dette var ønskelig i denne undersøkelsen siden kvanteobjekter er et såpass nytt begrep i norsk skole. Da kunne opplegget endres underveis for å tilpasse seg klassens behov, samtidig som intervjuguiden kunne utvikles i etterkant, basert på informasjon fra undervisningen og opptakene av elevdiskusjoner. Dette var viktig for å kunne tilpasse seg elevenes utfordringer. Samtidig er det viktig med struktur og rigorøsitet i fleksible studier (Robson & McCartan, 2016). Derfor bygger datainnsamlingen på eksisterende tradisjoner innenfor kvalitativ forskning som opptak av samtaler og intervjuer, som gir to datakilder. For å gi leseren mulighet til å vurdere troverdighet og validitet er det redegjort for valgene som er tatt underveis i undersøkelsen (Kvale & Brinkmann, 2015).

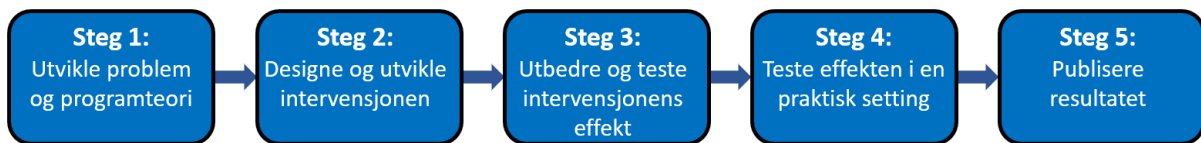
5.1.2 Intervensjonsforskning

Intervensjonsforskning handler om å implementere strategier for endring på bevisste og systematiske måter (Fraser & Galinsky, 2010). En intervensjonsstudie innebærer å identifisere et problem og utvikle og gjennomføre en intervensjon for å forebygge, eller forhindre problemet. Fraser og Galinsky (2010) beskriver intervensjonsforskning som distinkt fra annen forskning ved at fokuset ligger på selve

designet og utviklingen av intervensjonen. Det er en kreativ og evaluerende prosess som tillater å bøye eksisterende forskningspraksiser for å tilpasse seg en praktisk setting. Forskningsdesignet passer da godt til kvalitative studier og en klasseromssetting, slik som i denne studien.

Å utvikle og gjennomføre et undervisningsopplegg, slik det er gjort i denne oppgaven, er en type intervensjonsstudie, selv om den ikke er like omfattende som Fraser og Galinsky (2010) beskriver i sine fem steg, illustrert i Figur 5. I denne undersøkelsen er intervensjonen å endre på hvordan undervisning av kvantefysikk skal foregå, ved å inkludere begrepet kvanteobjekt og tabell-verktøyet som nye aspekter i undervisningen. Studien tar imidlertid ikke i bruk steg 3 der intervensjonen utbedres og testes i mindre studier, og den tar heller ikke i bruk den utviklingsprosessen som Fraser og Galinsky (2010) beskriver. Her tar oppgaven nytte av designets fleksibilitet for å tilpasse seg den spesifikke problemstillingen og konteksten opplegget gjennomføres i. Steg 1 handler om å utvikle en problemstilling og avgrense teori som er relevant for studien, slik det er gjort i kapitlene 1, 2 og 3. Her ble misoppfatninger og utfordringer identifisert som risikofaktorer, slik at undervisningsopplegget kunne utvikles på en måte som forebygget disse. Konteksten og utvalget ble valgt tidlig i prosessen, siden disse er en integrert del av problemstillingen. I steg 2 ble selve undervisningsopplegget utviklet, sammen med den essensielle teoretiske beskrivelsen av kvanteobjekter og tabell-verktøyet, som representerer den endringen som intervensjonene tilfører kvantefysikkundervisningen. Opplegget er beskrevet mer detaljert i kapittel 6. Steg 4 ble gjennomført i den utvalgte klassen. Presentasjon, analyse og refleksjoner rundt datamaterialet er representert i kapitlene 7 og 8 som en del av steg 5.

Endringer er en ikke-lineær prosess (Fraser & Galinsky, 2010; Robson & McCartan, 2016). Det involverer usikkerhet og uklarhet som i løpet av prosessen kan bli erstattet av tydelighet og klarhet. Man kan ikke anta at sin egen versjon er den beste, men at man gjennom de fem stegene i Figur 5 kan utvikle en bedre og bedre utgave av det originale designet for å best mulig implementere gode og varige løsninger på det identifiserte problemet. Selv godt konseptualiserte intervensjoner kan ødelegges av en dårlig implementasjon (Fraser & Galinsky, 2010). Det blir dermed viktig at utvikleren har god kjennskap til konteksten studien gjennomføres i, og at personen(e) som gjennomfører har god kjennskap til intervensjonen. I dette tilfellet gjorde jeg både utviklingen og gjennomføringen, som betyr at jeg inntok både lærer- og forskerrolle. Dette anbefales ikke av Fraser og Galinsky (2010), men var nødvendig for at opplegget skulle bli gjennomført innenfor rammene av en masteroppgave og med vekt på de detaljene jeg ønsket.



Figur 5: Fraser og Galinsky (2010) sine steg i intervensjonsforskning. Egen oversettelse.

De fem stegene Fraser og Galinsky (2010) legger fram passer godt til en studie som foregår over lengre tid og med et større utvalg. Nødvendigvis må prosessen tilpasses avhengig av studiens omfang og begrensninger.

5.2 Datamaterialet

Dette delkapittelet tar for seg undersøkelsens utvalg, datainnsamlingsmetode og hvordan datamaterialet ble behandlet. Et fleksibelt kvalitativt forskningsdesign kjennetegnes ofte av flere kilder til kvalitative data (Robson & McCartan, 2016). I forbindelse med denne oppgaven ble det samlet inn lydopptak av gruppediskusjoner og intervjuer. Flere datainnsamlingsmetoder gir muligheten for triangulering, som ifølge Robson og McCartan (2016) kan styrke validiteten til oppgaven.

Kvalitative datamaterialer kan stå i fare for å bli unøyaktige og ufullstendige, som kan svekke studiens validitet (Robson & McCartan, 2016). Flere kilder viser til at man burde ta opptak der det lar seg gjøre (Robson & McCartan, 2016; Bjørndal, 2017; Kvale & Brinkmann, 2015), noe som ble gjort i denne studien for begge datainnsamlingsmetodene. Dette ble gjort for å kunne bevare nøyaktige utsagn og ikke gå glipp av viktige resultater. Elevene tok opptak på egne enheter og leverte til læreren. Læreren ga meg tilgang til dette for de elevene som hadde samtykket. Når lydopptak transkriberes bearbeider man en samtale slik at man mister en del av konteksten (Kvale & Brinkmann, 2015). Transkripsjoner er sosiale konstruksjoner og kan tolkes på ulike måter. Man kan imøtekomme dette problemet ved å la flere forskere transkribere uavhengig og deretter sammenligne, eller ved å være åpen om prosessen og egne bias, slik at leser kan gjøre egne vurderinger. Skriftlig form egner seg bedre til analyse, og da må ofte det muntlige språket skrives om for å bli mer forståelig. Jeg valgte å transkribere ord for ord for å unngå å miste mening i «oversettelsen». Dette ble gjort på bokmål istedenfor dialekt for å ha et mer leselig språk. I tillegg tilpasset jeg språket noe i utvalgte sitater, siden muntlige samtaler kan bli uoversiktlige. Siden det var jeg som gjennomførte intervjuene, transkripsjonen og analysen kan jeg lettere gjengi kontekst og tonefall hvis dette er relevant for sitatet, men tonefall og pauser er utelatt i selve transkripsjonsdelen siden innholdet er i fokus, ikke måten samtalen foregår på.

I prosessen med å skrive resultatene er visse sitater tilpasset for at de skulle være lettere å lese. Disse endringene er så minimale som mulig. Det innebærer å fjerne gjentakende fraser som «på en måte», eller «liksom». Nedenfor kan vi se endringen gjort i sitat (50) fra kapittel 7. Vi ser først det uendrede utsagnet, etterfulgt at det endrede utsagnet.

Benedikte: Kanskje det er at de skyter inn et bestemt antall elektroner også blir det på en måte et kontinuerlig mønster på en måte.

Benedikte: Kanskje det er at de skyter inn et bestemt antall elektroner også blir det på en måte et kontinuerlig mønster.

Elevene bruker «på en måte» flere ganger i setningen. I det første tilfellet kan det gi oss inntrykket av at hun ikke er helt sikker og å fjerne det kan være med på å endre nyansene i utsagnet. Å fjerne frasen på slutten av setningen gjør det mer behagelig å lese, spesielt siden dette er en frase mange av elevene bruker veldig ofte.

5.2.1 Utvalg og etiske hensyn

Utvalget til datainnsamling besto av en Fysikk 2-klasse på en norsk videregående skole og besto av 16 elever. Det er et bekvemmelighetsutvalg (Robson & McCartan, 2016) siden læreren ble kontaktet direkte. Klassen ble beskrevet av faglærer som en vanlig fysikkklasse som var spredt over hele karakterspekteret, men at de fortsatt var en ganske sterk klasse. Rundt en tredel var jenter og to tredeler var gutter. Elevene hadde erfaring med gruppediskusjoner, men da ofte korte diskusjoner på rundt fem minutter og ikke like langvarige som i dette opplegget. Sannsynligvis har elevene levert lydopptak i andre fag, slik at de var kjente med metoden. De hadde ikke gjort det i fysikk, men de hadde erfaring med muntlig vurdering. 15 av elevene ga samtykke til lydopptak av diskusjonene sine og noen færre ga samtykke til gruppeintervju etter undervisningsopplegget. Dette medførte at jeg ikke fikk tilgang til en av gruppenes opptak. I alt ble det samlet inn lydopptak fra fem grupper den første økta og fire grupper den andre økta, grunnet fravær. Gruppene ble delt inn av læreren deres i forkant av undervisningen for å unngå visse gruppesammensetninger, og de beholdte så like grupper som mulig begge øktene. Alle gruppene måtte levere inn lydopptakene sine til faglærere uavhengig av om de deltok i undersøkelsen.

Tabell 4 gir en oversikt over hvilke elever som tilhører hvilke grupper. Av hensyn til elevenes anonymitet er alle navn fiktive, slik foreslått av Bjørndal (2017). Forbokstavene er like for alle på samme gruppe og identifiserer hvilken gruppe de tilhørte. Gruppe F sine lydopptak er ikke inkludert i datainnsamlingen. Navnene under blir brukt til å beskrive resultatene i kapittel 7.

Tre grupper som hadde samtykket ble valgt ut til å delta i gruppeintervjuene. Mange jenter var borte på sesjon som resulterte i at det var ingen jenter igjen på gruppene. For at utvalget skulle representere klassen ble det etterspurt frivillige, der en av disse ble valgt. Intervjuene, delt inn i Gruppe 1 (Emil, Elias, Alex) og Gruppe 2 (David, Daniel, Derek, Frida).

Gruppe A	Alex, Amelia
Gruppe B	Bjørk, Benedikte, Bella
Gruppe C	Christian, Christoffer, Carsten
Gruppe D	David, Daniel, Derek
Gruppe E	Emil, Elias
Gruppe F	Fred, Frank, Frida

Tabell 4: En oversikt over gruppene og tilhørende elever med fiktive navn.

Prosjektet er godkjent av Norsk senter for forskningsdata (NSD). Elevene ble varslet av læreren sin i forkant av undervisningsopplegget og ble informert både muntlig i timen om prosjektets formål, deres rettigheter og rolle i undersøkelsen, og skriftlig gjennom en samtykkeerklæring (se vedlegg 4) for å ivareta rettighetene deres. De fikk også informasjon om at de kunne delta på ingenting av datainnsamling, kun opptak av gruppediskusjon, eller på både diskusjon og intervju. Siden undersøkelsen fant sted etter nyttår i tredjeklasse på videregående skole, var alle elevene over 18 år og over alderen der det kreves samtykke fra foreldre. Det ble derfor samlet inn samtykke i oppstarten av undervisningsopplegget. De ble informert om at deltagelse var frivillig, at de når som helst kunne trekke seg og at alle elever ville kunne delta i undervisningen uavhengig om de samtykket, eller ikke.

5.2.2 Datamaterialet fra elevenes gruppediskusjoner

Datamaterialet fra gruppediskusjonene ble samlet inn i to bolker, en fra hver undervisningsøkt. Det ble samlet inn lydopptak fra fem grupper den første økten og fra fire den andre. Alle opptakene ble transkribert ord for ord og i sin helhet, men ble i noen utvalgte tilfeller endret på for å gjøre dem mer lesbare. Gruppediskusjonene kan ligne på fokusgruppeintervjuer på den måten at elevene står stort sett fritt til å velge hvilken vei samtalen deres tar (Kvale & Brinkmann, 2015; Robson & McCartan, 2016). Elevene får minimale input i form av diskusjonsspørsmål for å holde seg til tema, men som fortsatt gir dem muligheten til å trekke fram ulike synspunkt og styre samtalens retning. Dette kan bringe fram mer spontane og ufiltrerte utsagn fra elevene, også siden de ikke trenger å forholde seg til en moderator eller intervjuer i denne settingen (Kvale & Brinkmann, 2015). Mer spontane utsagn kan i større grad gi uttrykk for elevenes tanker, istedenfor innøvde fraser, eller at de gjengir det læreren sa.

Dette datamaterialet presenteres i kapitlene 7.1 og 7.2. De presenteres uten at diskusjonsspørsmålet gis, men er delt inn i kategoriene utviklet i kodingsprosessen. Disse kategoriene presenteres i delkapittel 5.2.4. Diskusjonsspørsmålene er inkludert som vedlegg 3. Ofte leste ikke elevene opp spørsmålene de svarte på, men hovedgrunnen til at disse ikke er inkludert er at temaet de snakker om er viktigere enn det spesifikke spørsmålet. Elevene gjentok seg selv flere ganger, visse spørsmål overlappet noe og de snakket seg ofte bort fra spørsmålet. Derfor vil overskriften utsagnet står under,

samt beskrivelsen som gis i resultatet, være nok til å gi den konteksten som trengs for å lese resultatene. Under gir jeg et eksempel der jeg inkluderer spørsmålet og elevsitat (30) fra kapittel 7 for å eksemplifisere at selv om elevene holder seg til tema, svarer de ikke nødvendigvis direkte på spørsmålet. Her nevner ikke Elias bølge- eller partikkelegenskaper, men snakker fortsatt om måling.

Spm 3a): Hva kan vi tenke oss at skjer med partikkel- og bølgeegenskapene til kvanteobjektet når det blir observert? Begrunn svaret.

...

Elias: Ja, også er det litt problematisk å observere da. Når du skal skyte fotoner på en kvantepartikkel, eller for å observere situasjonen, så er det det samme som å observere hvordan katten reagerer på hundemat også skyte den med en kanonkule. Da ødelegger du hele eksperimentet. Du introduserer en faktor som klusser til systemet. Så det er sikkert veldig vanskelig å få en ren observasjon av noe så smått.

Når såpass mange sitater inkluderes i resultatene er det ikke lenger hensiktsmessig å inkludere alle spørsmålene når resultatet organiseres i tematiske kategorier.

5.2.3 Datamaterialet fra intervjuer

Jeg valgte å gjennomføre to semi-strukturerte gruppeintervjuene med til sammen syv elever, på mellom 20 og 30 minutter. Gruppe 1 besto av tre elever og Gruppe 2 besto av fire elever, slik beskrevet i utvalget i 5.2.1. Elevdiskusjonene som ble tatt for seg i forrige delkapittel ble delvis gjennomgått før intervjuene og var med på å forme intervjuguiden. Dermed kunne jeg stille spørsmål om noe var uklart med elevenes utsagn, om det var interessante ting som kom opp i løpet av diskusjonene deres eller om det var visse temaer de synes var spesielt interessante eller vanskelige.

Semi-strukturerte intervjuer brukes ofte i kvalitative undersøkelser og kan hjelpe med å utforske ulike perspektiver og få dypere innsikt i elevenes opplevelse (Kvale & Brinkmann, 2015; Robson & McCartan, 2016). Et slikt intervju tar i bruk en intervjuguide med bestemte temaer, men uten en rigid struktur, slik at man kan følge samtalens flyt (Kvale & Brinkmann, 2015; Robson & McCartan, 2016). Temaene kan bytte rekkefølge, tas bort, eller nye kan legges til, som gjør intervjuet svært fleksibelt (Kvale & Brinkmann, 2015; Bjørndal, 2017). Detaljer som ellers ville blitt oversett kan i et intervju hentes fram, noe som i dette tilfellet forsterkes av at det blir tatt lydopptak. En annen fordel er at man får inn data fra flere informanter samtidig og de kan føle seg tryggere ved at de slipper å være alene om svaret (Kvale & Brinkmann, 2015; Robson & McCartan, 2016). Ulempene er at de med sterkest stemme lettest blir hørt og man kan tape andres perspektiver, og derfor burde man ta hensyn til gruppedynamikken. I tillegg krever intervju mye tid til forberedelse, gjennomføring og bearbeiding (Bjørndal, 2017), men i mitt tilfelle overveier de positive aspektene ulempene, siden det gir viktige perspektiver til resultatene.

Intervjuene ble lagt opp til å være gruppeintervjuer, men har også visse egenskaper fra fokusgruppeintervjuer. Det innebærer at elevene fikk stor grad av frihet til å styre samtalen og jeg

kunne fungere som en tilbaketrasket intervjuer (Kvale & Brinkmann, 2015; Robson & McCartan, 2016). Min rolle var å passe på at elevene holdt seg til temaet og lede dem videre om de satt fast. Dette er med på å forebygge at man påvirker informantene med ordene sine (Kvale & Brinkmann, 2015; Robson & McCartan, 2016). Intervjuguiden var derfor konstruert med tanke på å unngå ledende spørsmål. Jeg kunne forebygge muligheten for å påvirke elevene ved å være klar over dette fra begynnelsen (Bjørndal, 2017). Det var planlagt fraser for å hjelpe elevene hvis de sto fast, eller trengte oppmuntring, slik Robson og McCartan (2016) anbefaler. Min inngang til intervjuet var å la elevene snakke mest mulig seg imellom, men også å gi hver enkelt elev muligheten til å svare og forebygge at de overkjørte hverandre for å få et jevnere og mer troverdig resultat.

Resultatet fra intervjuene presenteres i 7.3 og gis uten å ta med mine spørsmål. Dette er et bevisst valg. Ofte har elevene lange sekvenser der de snakker kun med hverandre. Da er det ikke mulig å først ta med spørsmålet og så hele sekvensen. Alternativt kunne spørsmålet tas med og så bare det enkelte utsagnet, men dette gir ikke alltid mening for konteksten. Utsagnet svarte ofte ikke på spørsmålet siden elevene styrte samtalen selv. Noen sitater vil også stamme fra samme sekvens, og det vil være uoversiktlig om spørsmålene gjentas ofte. Alternativt kunne resultatene struktureres etter spørsmålet de tilhørte, men dette ville også være uoversiktlig siden det ikke ville gitt mening tematisk. Elevene kunne snakke seg bort fra spørsmålet de ble gitt og da gir det ikke mening for konteksten å inkludere spørsmålet. Under viser jeg et eksempel fra et utdrag av elevsitat (60) som eksempel på at elevene kom inn på nye temaer av seg selv. Sitatet kommer ganske langt ut i samtalen som fulgte spørsmålet.

Intervjuer: Så hvis dere skulle forklart begrepet kvanteobjekt til en medelev. Hvordan ville dere gjort det?

...

Elias: Men det jeg lurer på er. Er kvanter byggesteinene til noe som er deterministisk? Hvis jeg triller en ball, er det ikke-deterministisk da? Eller er det deterministisk fordi kvantene er ikke-deterministisk som gjør det deterministisk?

Emil: Det er sånn i større skala så blir det deterministisk, men hvis man deler det opp i mindre skala så er det ikke-deterministisk. Så noe som er deterministisk er bygd opp av masse ting som er ikke-deterministisk.

Dette er med på å vise at elevene var selvstendige. De snakket om mange av temaene jeg skulle ta opp, uten at jeg trengte å veilede dem dit, som er et eksempel på preg fra fokusgruppeintervjuer (Kvale & Brinkmann, 2015). Under gir jeg et eksempel for sitat (73) fra kapittel 7.5.3 der mitt spørsmål er tatt med der jeg forsøker å få frem ulike synspunkter, for å forsikre meg om at jeg ikke la ord i munnen på dem ved å bare spørre om positive ting.

Intervjuer: Ja, nå har dere sagt at det er jo kanskje nyttig. Kan dere se noen ulemper med det?

...

Alex: Jeg, personlig, synes at det er ikke så spesifikt da. Det dekker veldig mye, men jeg føler det er et veldig bredt begrep da.

Selv om Gruppe 2 trengte litt mer veiledning enn Gruppe 1, kunne jeg fortsatt ta en tilbaketrukket rolle i begge intervjuene, som gjorde at intervjuene var nokså like, selv om jeg opplevde gruppene som forskjellige.

5.2.4 Analytisk metode

I dette delkapittelet vil jeg redegjøre for temaene brukt i analysen og hvordan de endelige kategoriene ble utformet fra disse. Tematisk analyse er en kvalitativ og tilpasningsdyktig metode, som er kompatibel med mange metodiske rammeverk og presenteres av Braun og Clarke (2006) gjennom fem steg. De fem stegene går ut på å bli kjent med datamaterialet, skape begynnende koder og søke etter temaer som man gjennomgår og definerer. Jeg gjennomførte en induktiv tematisk analyse som vil si at man lar temaer dukke opp naturlig fra datamaterialet uten et eksisterende rammeverk, som er en empirinær prosess (Braun & Clarke, 2006). Dette tillater fleksibilitet og kreativitet. Dette tillater oppdagelsen av temaer man ellers ikke ville oppdaget. I en induktiv tematisk analyse trenger ikke temaene å være spesielt relatert til spørsmålene som er stilt og de er i større grad drevet av datamaterialet (Braun & Clarke, 2006). Dette er med på å begrunne hvorfor spørsmålene ikke er tatt med i presentasjonen av resultatene i kapittel 7, da spørsmålene ikke nødvendigvis har direkte sammenheng med kategorien. Det betyr heller ikke at kodingen har foregått i et teoretisk vakuum, siden man alltid er påvirket av egne forutinntattheter (Robson & McCartan, 2016). Utgangspunktet for analysen var å lage temaer som kunne gi mening i lys av problemstillingen.

Det er viktig å kunne vise til et rigorøst arbeid og å vise åpenhet om prosessen, med fokus på dokumentasjon, refleksivitet og mulig forskerbias for å styrke validitet og reliabilitet i undersøkelsen (Braun & Clarke, 2006). Å redegjøre for den analytiske metoden er med på å gi troverdighet til studien. Dette er et steg for å motvirke ulempene som finnes med induktiv tematisk analyse, som blant annet overforenkling og reduksjonisme (Braun & Clarke, 2006). Robson og McCartan (2016) påpeker at et potensielt problem med tematisk koding er at man ofte ikke beskriver prosessen i fullstendig detalj. I denne studien gis det innsikt i prosessen, men av plasshensyn beskrives likevel ikke prosessen med alle detaljene inkludert.

Det ble laget tre overordnende temaene i transkripsjonsprosessen: «*språkbruk*», «*misforståelser*» og «*kvanteobjekter*», slik Tabell 5 viser. Disse ble brukt for å unngå strenge kategorier der interessante utsagn ble utelatt hvis de ikke passet (Robson & McCartan, 2016). For eksempel er temaet «*kvanteobjekter*» kodet ut ifra om elevene tok i bruk begrepet kvanteobjekt, begreper fra tabellverktøyet eller andre ord for å beskrive disse begrepene. Dette innebar at jeg så mønstre og mening i elevenes utsagn som beskrevet av Braun og Clarke (2006). Hvilke mønstre jeg ser vil være påvirket av antagelsene jeg har og implisitt bruker i analysen. «*Misoppfatninger*» er et tema nettopp fordi mye

tidligere forskning om undervisning av kvantefysikk skriver om elevers misoppfatninger. Hvilke utsagn som kodes under denne kategorien kan dermed være påvirket av artiklene jeg har lest. Da datamaterialet var kodet ved hjelp av temaene, ble de brutt ned i mindre kategorier som ble videre bearbeidet. De endelige kategoriene kan ses i Tabell 5. Kategorien «kvanteobjekter» ga for eksempel opphav til «Elevenes beskrivelse av kvanteobjekter», språkbruk til «Klassiske analogier» og misoppfatninger til «Elevenes beskrivelse av kvanteobjekter og elektroner som partikler». En del av det som er trukket fram er inspirert av aspekter ved kvantefysikk som tidligere forskning trekker fram som utfordrende, eller som er etablerte misoppfatninger elevene har, som viser at induktiv koding ikke er uten påvirkning.

I tillegg til de induktive kategoriene, ble det i analysen tatt hensyn til den tilpassede taksonomien, som er forklart i 3.3. Det er fire nivåer som kan indikere hvordan elevene har forstått innholdet: å bruke begrepene ordrett, å forklare begrepene med egne ord, å kunne bruke begrepene i en kontekst og å vise at de er reflekterte. Hvis elevene oppnår høyere taksonomiske nivåer kan det vise til at opplegget og begrepene var nyttige for å utvikle forståelse. Følgende elevsitater fra kapittel 7 kan passe inn i første kategori: (3), andre kategori: (1), (2) og (18), tredje kategori: (41) og (42) og fjerde kategori: (7), (16), (22) og (60).

Induktive temaer for alt datamaterialet	«Kvanteobjekter», «misforståelser» og «språkbruk».
Endelige kategorier for første dobbeltime	«Elevenes beskrivelse av kvanteobjekter», «Hvordan skiller elevene klassisk fysikk fra kvantefysikk?», «Misforståelser om måling», «Klassiske analogier» og «Hvordan elevene ser for seg kvantefysikk».
Endelige kategorier for andre dobbeltime	«Elevenes beskrivelse av kvanteobjekter», «Hvordan skiller elevene klassisk fysikk fra kvantefysikk?», «Hvordan elevene misoppfatter interferens som støt mellom partikler», «Elevenes beskrivelse av elektroner som partikler» og «Hvordan elevene ser for seg kvantefysikk».
Endelige kategorier for intervjuene	«Elevenes beskrivelse av kvanteobjekter», «Hvordan elevene beskriver ikke-determinisme, superposisjon og måling», «Elevenes beskrivelse av kvanteobjekter og elektroner som partikler», «Elevenes bruk av billedlige forklaringer» og «Elevenes opplevelse av å bruke kvanteobjekter og tabell-verktøyet».

Tabell 5: En oversikt over de induktive kodene og alle de ulike kategoriene som til slutt ble brukt for å beskrive resultatene i kapittel 7.

Andre ulemper med tematisk analyse inkluderer å behandle store datasett og å balansere struktur og fleksibilitet (Braun & Clarke, 2006). Denne undersøkelsen samlet inn mye data og jeg brukte derfor programmet Nvivo for å gjøre analysen mer effektiv. Strategiene som legges fram av Braun og Clarke (2006) vil kunne hjelpe med å finne en balanse mellom fleksibilitet og struktur, noe som blant annet gjøres ved å være klar over metodens styrker og svakheter.

6 Utvikling og gjennomføring av undervisningsopplegget

Som en del av dette masterprosjektet ble det utviklet og utprøvd et undervisningsopplegg. Opplegget har som hensikt å møte kompetansemålet «gjøre rede for hva som skiller kvanteobjekter fra klassiske objekter, og beskrive situasjoner der kvanteeffekter observeres» (Utdanningsdirektoratet, 2021). Dette kompetansemålet er for Fysikk 2 for videregående elever på tredje trinn. Hver økt av det utviklede opplegget består av en lærersentrert presentasjonsdel som har som hensikt å introdusere elevene for kvantefysikk og kvanteobjekter, etterfulgt av en elevsentrert diskusjonsdel, med en felles oppsummering til slutt. Hensikten er å gi elevene redskapene de trenger og muligheter til å bruke dem for å kunne diskutere kvanteobjekter på hensiktsmessige måter. Det medfølger også to sett diskusjonsspørsmål som elevene skal diskutere i smågrupper. Både presentasjonen og diskusjonsspørsmålene som ble brukt i opplegget ligger under vedlegg 1 og 3. Dette kapitlet vil gå gjennom prosessen bak utviklingen av opplegget og begrunnelsene for undervisningsoppleggets struktur vil presenteres og diskuteres. Dette inkluderer det utvalgte teoretiske innholdet og bruken av ulike kommunikasjonsformer i klasserommet. Tabell 6 gir en oversikt over undervisningsopplegget slik det var planlagt. Den inneholder en omtrentlig tidsramme, hvilken undervisningsform som hovedsakelig brukes i hver sekvens og et kort sammendrag av innholdet som sto mest sentralt i hver del.

Økt 1 2x45 min		
Tid	Undervisningsform	Innhold
10 min	Lærersentrert presentasjon	Intro til hvorfor har vi kvantefysikk. Partikler og bølger.
5 min	Elevsentrerte samtaler	Elevene snakker sammen om de presenterte temaene.
25 min	Lærersentrert presentasjon	Bølge-partikkel-dualiteten. Kvanteobjekter, deres egenskaper, tabell-verktøyet, hvordan vi kan skille mellom klassisk fysikk og kvantefysikk og måling.
5 min	Elevsentrerte samtaler	Elevene snakker sammen om de presenterte temaene.
5 min	Pause	
30 min	Elevsentrert diskusjon	Forklaring av aktivitet og gjennomføring av diskusjoner.
15 min	Oppsummerende dialog	Felles oppsummering av diskusjonens temaer. Samle inn info om hva som var utfordrende for elevene.
Økt 2 2x45 min		
Tid	Styringsform	Innhold
5 min	Lærersentrert presentasjon	Oppsummering basert på elevenes utfordringer. Introduksjon til dobbelspalteforsøket.
5 min	Elevsentrerte samtaler	Elevene snakker sammen om de presenterte temaene.
25 min	Lærersentrert presentasjon	Videre om dobbelspalteforsøket. Video om Dr. Quantum.
5 min	Elevsentrerte samtaler	Elevene snakker sammen om de presenterte temaene.
5 min	Pause	
30 min	Elevsentrert diskusjon	Forklaring av aktivitet og gjennomføring av diskusjoner.
15 min	Oppsummerende dialog	Felles oppsummering av diskusjonens temaer. Alle gruppene skrev det de synes var vanskeligst på tavla.

Tabell 6: Skjematisk beskrivelse av undervisningsoppleggets oppbygning, slik det var planlagt gjennomført.

I resten av kapittelet skal vi se på hvilke didaktiske og faglige begrunnelser som har inngått i å utforme undervisningsopplegget og hvordan selve gjennomføringen gikk.

6.1 Undervisningsoppleggets innhold

Kompetansemålet for kvantefysikk introduserer begrepet kvanteobjekt, men beskriver ikke hvordan de skal skilles fra klassiske objekter, eller hvilke fenomener som skal beskrives. Mitt utgangspunkt var at det var nødvendig med en grundig beskrivelse kvanteobjekter, noe som elevene kunne bruke til å forklare ulike kvantefysiske konsepter. I tillegg gjorde jeg i planleggingen et valg om hvilken/hvilke fenomener som skulle inkluderes for å sette kvanteobjektet inn i en eksperimentell kontekst. Som utgangspunkt for beskrivelsen av kvanteobjekter og dets egenskaper ble Bunge (2003a) sin og Lévy-Leblond (2003) sin artikkel brukt, samt et teoretisk kvantefysisk perspektiv i samsvar med det som legges fram i «*The Feynman Lectures on Physics*» (1963/2010). I tillegg ble visse elementer inspirert av lærebøkene for faget, Ergo (Callin et al., 2022) og Kraft (Fossum et al., 2022), slik at oppleggets innhold tok hensyn til de begrepene og fenomenene elevene ville møte ved videre lesing.

6.1.1 Valg av innhold

Først og fremst fokuserer jeg i opplegget på hvordan begrepet kvanteobjekt introduseres for elevene, siden læreplanen innfører begrepet. Kvantobjekter er et alternativ til de klassiske begrepene knyttet til bølge-partikkel-dualiteten, som er noe tidligere artikler påpeker at vi trenger mer forskning på (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017; Henriksen et al., 2018). Det viser seg at elevers utfordringer ofte kommer fra deres forståelse av klassisk fysikk (Lautesse et al., 2015). Sammen med tabell-verktøyet kan kvanteobjekter hjelpe elever med å konseptualisere kvantefysikk på en mer kvantefysisk måte. Da kan de støtte seg på tabell-verktøyet istedenfor å visualisere det som skjer. Denne studien baserer beskrivelsen av kvanteobjekter mye på Bunge (2003a) sin beskrivelse, slik framstilt i kapittel 2. Andre studier som nevner kvanteobjekter, eller «kvantoner», referer også ofte til Bunge (Lévy-Leblond, 2003; Pereira & Solbes, 2022; Henriksen et al., 2018; Greca & Freire, 2003; Lautesse et al., 2015).

Siden det ikke finnes konsensus rundt ontologien i kvantefysikk, er det viktig å konstruere en beskrivelse som er hensiktsmessig for elevene, slik gjort i sammenheng med denne oppgaven. Det er viktig å påpeke tvetydighetene man finnes i bølge-partikkel-dualiteten, selv om dualiteten i seg selv ikke har vært utgangspunktet for undervisningen, siden dette er en vanlig framstilling i lærebøker og fysikkteori generelt. Dette stammer fra at noen av utfordringene elevene har med dualiteten kan komme fra at de ikke legger merke til, eller forstår hvordan de ulike egenskapene til bølger og partikler vil motsi hverandre. Dermed ikke får de ikke med seg en sentral og problematisk del av kvantefysikken, slik van den Berg et al. (2020) beskriver det. Siden bølge-partikkel-dualiteten stammer fra klassisk fysikk skapes det motsetninger mellom bølgeegenskaper og partikkelegenskaper, som kan være med

på å framheve skillet mellom klassisk fysikk og kvantefysikk. Kvantobjekter er verken bølger eller partikler. Det er en helt egen type kvantefysisk objekt uten tvetydige egenskaper (Lévy-Leblond, 2003). Slik kan man oppmuntre elevene til å tenke kritisk og gir dem muligheten til å utfordre det de lærer, slik at de kan diskutere kvantefysikk på hensiktsmessige måter. Dette vil også kunne forebygge misoppfatninger knyttet til bølge-partikkel-dualiteten, klassiske analogier og klassisk fysikk.

Jeg besluttet å starte undervisningsopplegget med å introdusere egenskapene til partikler og bølger. Både lærebøkene og tabell-verktøyet sine beskrivelser ble brukt for å bygge videre på et grunnlag som er noenlunde kjent for elevene. Deretter introduseres kvantobjekter og tabell-verktøyet. Det er viktig å tydelig beskrive alle de ulike begrepene fra tabell-verktøyet for elevene, siden disse bygger grunnlaget for den videre forståelsen og kan være fremmedord for elevene. De tre hovedpunktene om hvordan kvantefysikk skiller seg fra klassisk fysikk er hentet fra nettressursen på Viten.no utviklet av prosjektet ReleKvant (Angell et al., 2022), som oppsummerer det på en fin og konsekvent måte og trekker fram sentrale temaer som ikke-determinisme og måling.

Et viktig skille mellom klassisk fysikk og kvantefysikk er den ikke-deterministiske og uskarpe naturen til kvantobjektet. Selv om dette er utfordrende aspekter ved kvantefysikk, er det viktige konsepter for at elevene skal utvikle en dypere forståelse. Det er konsepter de vil møte videre i undervisningen av kvantefysikk, etter dette undervisningsopplegget. Da kan elevene bygge videre på og anvende kunnskapen sin i andre forsøk enn dobbelspalteforsøket. Samtidig ville det vært vanskelig å gi en fullstendig beskrivelse av kvantobjekter og dobbelspalteforsøket uten i å ha med alle disse aspektene. Kvantobjekter beskrives av sin ikke-deterministiske og uskarpe natur (Bunge, 2003a; Lévy-Leblond, 2003), noe opplegget baserer seg på og kommer til syne gjennom kontinuerlig utstrekning i rommet som er med på å beskrive bølgenaturen dets og interferensfenomenet i dobbelspalteforsøket. Måling er også grunnleggende annerledes i kvantefysikk, siden man ofte må ta hensyn til at måleinstrumentet interagerer og påvirker systemet den måler, mens observasjon for elevene ofte er assosiert med å kunne se noe, som kan føre til misoppfatninger om det ikke blir adressert eksplisitt (Huseby & Bungum, 2019; Bøe & Viefers, 2021). Det var derfor viktig for utformingen av opplegget at misoppfatninger rundt måling var kjent og forebygget gjennom å tydeliggjøre denne problemstillingen for elevene.

Jeg valgte å bruke dobbelspalteforsøket i undervisningen siden det utviser mange av de egenskapene som kjennetegner kvantefysikk, slik beskrevet i kapittelet 2. Bøe og Viefers (2021) beskriver dobbelspalteforsøket som en god introduksjon til kvantefysikk og Feynman et al. (1963/2010) sier at dobbelspalteforsøket er et eksperiment som dekker de mest sentrale aspektene ved kvantefysikk. Forsøket viser både kvantobjekters bølgeegenskaper og partikkelegenskaper, hvordan en måling interagerer med systemet, den fundamentale uskarpheten i kvantefysikk og kvantobjekters

sannsynlighetsfordeling. Dobbelspalteforsøket gir muligheten til å snakke om hva kvanteobjekter er ontologisk sett og å bruke både bølge- og partikkelegenskaper til å beskrive fenomenet. Elevene sliter ofte med ikke-determinisme og dobbelspalteforsøket kan vise at man fortsatt kan forutse fordelingen av objekter på en eksakt måte. Elevenes forståelse av dobbelspalteforsøket kan begrenses av en manglende forståelse av kvanteobjektets bølgenatur (van den Berg et al., 2020). Opplegget introduserte tabell-verktøyet som et hjelpemiddel for at elevene skulle kunne snakke om både bølge- og partikkelegenskaper og skille mellom hvordan disse bidro til ulike fenomener. Dette vil også kunne hjelpe dem med å skille mellom det klassiske og det kvantefysiske, som er en utfordring mange møter. For eksempel superposisjon og måling er utfordrende for elevene, noe som er sentralt i dette forsøket. God begrepsforståelse og god begrepsbruk kan da være med på å løfte elevenes forståelse fra kun å gjengi det som er sagt, til å kunne diskutere de ulike fenomenene på konstruktive måter.

Måten dobbelspalteforsøket ble introdusert i undervisningen kan sammenlignes med det første kapittelet i «*The Feynman Lectures on Physics*» (1963/2010). Først snakker man om hvordan det ville sett ut for bølger og partikler i klassisk forstand. Deretter snakker man om kvanteobjektet elektron og hvordan forsøket vil fungere da. Det er viktig å tydeliggjøre at elektronet er et kvanteobjekt og ikke en partikkel, siden elevene har en tendens til å tenke klassisk (Pereira & Solbes, 2022). Oppbygningen mot den kvantefysiske forklaringen er med på å gjøre skillet mellom klassisk fysikk og kvantefysikk eksplisitt, samtidig som det viser hvordan bølge- og partikkelegenskapene til kvanteobjektet vil vise seg i forsøket. På denne måter kommer også tvetydigheten med dualitetskonseptet tydelig fram og problematiseres, som er en viktig utfordring å håndtere (van den Berg et al., 2020).

I opplegget blir videoen om Dr. Quantum (FreeScienceLectures, 2007) brukt til å oppsummere dobbelspalteforsøket for elevene, som finnes som en del av nettressursen til Viten.no (Angell et al., 2022), for å gi dem informasjonen også gjennom en mer visuell modalitet. Det finnes problematiske elementer i videoen, som at måling framstilles som et øye. Elever kan ha en tendens til å tolke observasjon som å se noe gjennom hverdagspråket sitt, slik at dette er en viktig utfordring å ta tak i (Bøe & Viefers, 2021). Siden elevene på dette punktet har fått undervisning om måling som interaksjon, vil de ha muligheten til å problematisere dette selv, men kan også oppmuntres gjennom spørsmål fra læreren. Å gjøre et poeng ut av det vil gi elevene mulighet til å bruke den kritiske vurderingsevnen som tidligere ble oppmuntret og støtte dem til å være kritiske og reflekterte videre inn i diskusjonen.

Det er mange aspekter ved kvantefysikk som må påpekes eksplisitt for elevene, siden det er så kontra-intuitivt (Bøe & Viefers, 2021; Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017). Det har derfor vært et fokus i opplegget på å bygge en logisk progresjon som eksponerer elevene for kontroverser og nye konsepter. Eksempler på dette er bølge-partikkel-dualiteten og de utfordrende, men sentrale konseptene ikke-

determinisme, superposisjon og måling. Samtidig har det blitt gjort tydelig at det er kvanteobjekter og deres egenskaper som er hovedfokuset, og verken bølger, eller partikler, siden kvanteobjekter er verken eller. Det er viktig å påpeke at innholdet burde justeres for hver individuelle klasse etter behov og at ikke alle klasser vil kunne ta seg gjennom alt innholdet på to dobbeltimer. Dette er ment som elevenes første møte med kvantefysikk og hvert nye konsept og begrep burde forklares nøye, siden dette legger grunnlaget for elevenes forståelse for kvantefysikk. Opplegget baserer seg ikke på en spesifikk bok og bruker ikke læreboka som ressurs i løpet av undervisningstidene. Det er fordelaktig at elevene ikke har lest i boka før undervisning, siden de da kan ha en forutinntatthet basert på de klassiske begrepene de møter der. Opplegget er lagt til oppstarten av temaet nettopp for at elevene skal få et noenlunde ferskt møte med kvanteobjekter, som de kan bruke i videre undervisning.

6.1.2 Konstruksjon av diskusjonsspørsmål

Diskusjonsspørsmålene elevene fikk utdelt ligger som vedlegg 3 og ble utviklet sammen med veileder. Utgangspunktet for diskusjonsspørsmålene var de temaene som undervisningsopplegget skulle ta for seg og hadde som hensikt å gi elevene muligheten til å bruke de begrepene og konseptene de hadde blitt introdusert for. Da kan de bli vant til å bruke terminologien sammen med sine medelever. Undervisningsopplegget legger opp til at elevene skal kunne nå alle de ulike nivåene av den tilpassede taksonomien fra kapittel 3.3. Spørsmålene er plassert i ulike sekvenser, både etter tema, men også slik at hver sekvens bygger seg opp fra mer kjente, eller «lettere» konsepter, til mer komplekse, eller «vanskeligere» etter hvert. De ble gjort nokså åpne. Da kunne elevene vinkle svarene sine mot det de hadde forstått og kunne snakke enten så lite, eller så mye de ville om alle de ulike temaene. Spørsmålene er da laget slik at de starter på et lavere taksonomisk nivå og krever mer komplekse svar etter hvert, samtidig som de er nokså åpne, slik at elevene selv legger seg på et nivå som passer dem.

Spørsmålene var av konseptuell natur for å oppmuntre elevene til diskusjon av ulike konsepter som måling og superposisjon, samt aspekter ved bølge- og partikkelegenskaper. Dette kan oppmuntre elevene til å oppdage tvetydigheter. Slik får elevgruppene utfordret hverandres forståelse av konseptene og formet felles kunnskap. Samtidig får de tatt i bruk begrepene i de ulike kontekstene som tas opp. Diskusjonsspørsmålene til den første dobbeltimen handler om kvanteobjekters egenskaper og måling, men får også elevene til å vurdere to påstander mot hverandre for å få elevene til å reflektere rundt hvordan de tar i bruk begrepene kvanteobjekt, bølge og partikkel. Mens spørsmålene til den andre dobbeltimen handler om hovedsakelig om dobbeltpaltesforsøket. Arkene med diskusjonsspørsmålene kom med tabell-verktøyet på baksiden, slik at elevene hadde tilgang til den mens de diskuterte.

6.2 Kommunikasjonsformer i klasserommet

Undervisningsopplegget har en mer språkbasert tilnærming, siden dette passer til kvantefysikkens mer kvalitative og konseptuelle innhold og krever at undervisningen bruker modaliteter som passer dette. Dette opplegget velger å fokusere på det muntlige språket. Det er viktig å kunne uttrykke fagspråket for å delta i og utvikle kunnskap (Angell et al., 2019). En utfordring med muntlig kommunikasjon er at elevene ofte ikke har like mye erfaring med dette. Det ble derfor lagt opp til snakkepauser i løpet av den lærersentrerte delen av undervisningen. Slik fikk elevene trening i å snakke kvantefysikk og bli mer vant til begrepene før de brukte dem i gruppediskusjonene senere. Som en tilpasning til opplegget er det mulig å legge inn flere snakkepauser. Det er også hele tiden mulig for læreren å aktivisere elevene gjennom å stille spørsmål om det som gjennomgås. De fire dimensjonene av kommunikasjonsformer i klasserommet presentert i Tabell 3 i kapittel 3.2.2 er alle inkorporert i undervisningen for å gi varierte kommunikasjonsformer. Slik får elevene og lærer ulike måter å samhandle og uttrykke seg på. Disse dimensjonene passer bra til å beskrive kvalitativ undervisning, siden de handler om hvordan interaksjoner foregår i klasserommet og hvorfor alle fire er viktige for god undervisning. Videre i dette delkapittelet tar jeg for meg hvordan de ulike dimensjonene er brukt i undervisningsopplegget.

De første 45 minuttene av hver økt faller under den autoritative undervisningskategorien siden læreren først og fremst forelesninger for elevene. Fra Tabell 3 kan vi se de to tilfellene C og D, som begge finnes i økta. Dette betyr at elevene står fritt til å stille spørsmål og vil få svar, C, men at de ofte følger med, D. En autoritativ undervisningsform er nødvendig for å tilføre ny kunnskap, siden det er læreren som har ny informasjon. Samtidig kan dette bli ensformig for elevene over lengre perioder. Derfor er opplegget laget slik at det brytes opp av snakkepauser, der elevene deltar i den dialogiske og interaktive dimensjonen. De bruker egne ord, som kan oppmuntre flere elever til å delta. Deretter tar læreren opp noe av det elevene snakket om gjennom A, eller B. Man må også tenke på hvordan disse samtalene mellom lærer og elev foregår, slik at man unngår å se etter «riktige» svar, men får en faktisk innsikt i hva elevene har tenkt. Videoen om Dr. Quantum er en type autoritativ og ikke-interaktiv kommunikasjonsform, men oppsummerer dobbeltpaltesforsøket på en ny måte for elevene. Samtidig vil læreren ta opp visse aspekter med videoen, som vil føre til en mer interaktiv kommunikasjonsform.

Elevdiskusjonene i opplegget er et eksempel på kategori A, en dialogisk og interaktiv kommunikasjonsform mellom elevene. Diskusjon var en sentral del av dette undervisningsopplegget. Elevene får brukt kunnskap de sitter inne med for å utvikle sin egen og en felles forståelse (Angell et al., 2019). En ulempe med dette er at læreren ikke får med seg hva alle elevene sier og kan ikke bryte inn i diskusjonene for å rette på misoppfatninger der og da. Her ble lydopptak brukt som hjelpemiddel til å fange opp misoppfatninger og konsepter som elevene synes var vanskelige. Tilgang til lydopptakene gir muligheten for å bruke kommunikasjonsform B fra Tabell 3, dialogisk og ikke-

interaktiv, der misoppfatninger adresseres og gruppens hovedpoeng oppsummeres. Undervisningsopplegget er inntil alle fire dimensjonene for å balansere opplegget og legge til rette for god undervisning der det kvantefysikkfaglige innholdet formidles og brukes slik at elevene står igjen med kunnskap de kan ta i bruk på hensiktsmessige måter og i ulike kontekster.

6.3 Kontekst for undervisningsopplegget

Undervisningsopplegget gikk over to ulike økter, hver av øktene 2x45 minutter, med 5 minutters pause midt i. Hver økt har etter planen rundt 45 minutter presentasjon av teori, med regelmessige diskusjonspåuser slik at elevene fikk tid til å tenke gjennom det som foregikk. Elevene var stort sett stille og fulgte med. Noen av dem tok notater underveis i undervisningen, noe som ble oppmuntret i starten siden de kunne bruke notatene i diskusjonen. En viss ulik grad av interesse og engasjement er å forvente, siden alle elever og klasser er forskjellige. Etter pausen var det planlagt rundt 30 minutter til diskusjon som elevene tok lydopptak av. Denne tiden inkluderte tiden det tok å levere ut ark med diskusjonsspørsmål og organisering av elevgruppene. Hver gruppe var enten to, eller tre, elever. De er få nok til at det er vanskelig å trekke seg helt ut av diskusjonene. Planen for opplegget var at alle ideelt skulle være tre, men det måtte tilpasses antallet elever i klassen. Det ble planlagt av klassens faglærer hvilke grupper som kunne være to avhengig av elevenes egenskaper, slik at det er en fordel å ha kunnskap til klassens dynamikk. Diskusjonene foregikk uten forstyrrelser og kun mellom elevene. De siste 15 minuttene ble brukt til å oppsummere spørsmålene i fellesskap for å høre hva gruppene hadde snakket om. Disse øktene var elevenes første møte med kvantefysikk, slik at undervisningen måtte ta nødvendige forbehold for at elevene hadde lite forkunnskap om temaet. Diskusjon er ikke den vanligste aktiviteten i fysikkundervisning, men klassen var ifølge læreren deres vant til å jobbe i grupper og hadde erfaring fra andre fag med å ta opptak av samtalen sin på mobilen. Denne delen av opplegget gikk dermed uten problemer, men kan være en mulig utfordring i andre klasser. Diskusjonene gikk i dette tilfellet sømløst, men det er viktig å ta forbehold for at ulike klasser har ulike forutsetninger.

6.4 Gjennomføring av undervisningsopplegget

Dette delkapitlet tar for seg hvordan den faktiske gjennomføringen av det utviklede opplegget gikk for seg. Dette inkluderer hvordan klassen fungerte i opplegget, samt ting som gikk og ikke gikk etter planen. Klassens lærer var til stede i begge øktene for å trykke elevene. Hun deltok ikke i undervisningen, med unntak av å introdusere meg og dele elevene inn i grupper, og satt bakerst i klasserommet under undervisningen. Alle elevene var til stede den første dobbeltimen, mens det var to elever borte den andre dobbeltimen. Elevene ble delt inn i grupper på to og tre av læreren sin og de satt i disse gruppene gjennom begge undervisningsøktene. Første time av begge dobbeltimene ble brukt til å presentere elevene for det faglige innholdet gjennom en lærerstyrt gjennomgang av

kvanteobjekter og deres egenskaper. Dette ble i den første dobbeltimen gjort ved å introdusere tabell-verktøyet framstilt i kapittel 2.2.2, skillet mellom klassisk fysikk og kvantefysikk, måling og superposisjon. I den andre dobbeltimen ble disse konseptene brukt til å forklare dobbelspalteforsøket. Presentasjonen inneholdt regelmessige avbrekk der elevene skulle snakke seg imellom om det som nettopp hadde blitt forklart. De siste 45 minuttene av begge dobbeltimene ble brukt til gruppediskusjoner blant elevene og oppsummering av diskusjonene i fellesskap.

6.4.1 Første dobbeltime

Den første økta startet kvart over åtte på morgenen og ikke alle elevene kom tidsnok til timen, som ifølge læreren var normalt for klassen. Dette forsinket timens start. Kvantefysikk kan i utgangspunktet være krevende og da enda mer krevende om elevene er trøtte i tillegg, som gjorde at samtalepausene i løpet av presentasjonen var viktig siden de aktiviserte elevene. De fleste elevene deltok i disse samtalene, men det var få som ville dele samtalens innhold med klassen, eller svare på spørsmål fra meg. Stort sett de samme tre elevene svarte hver gang, Alex, Elias og Fred, men de var engasjerte og stilte spørsmål og oppfølgingsspørsmål som kunne være til hjelp for andre elever. Slike interaksjoner kunne vare i flere minutter, siden disse elevene hadde mange egne tanker om temaet. Siden få elever deltok i fellesskap, måtte jeg tenke over at jeg kunne få et skeivt bilde på kunnskapen i klassen. Et virkemiddel jeg brukte for å trygge elevene var å påpeke at det ikke alltid var riktige svar i kvantefysikk.

Som anslag til timen skulle elevene sette navn på noen bilder av kjente fysikere fra kvantefysikken. Elevene kjente fort igjen Einstein, mens de tre andre var mindre kjente for dem. Dette ble brukt som en innledning til å snakke om at kvantefysikkens utvikling ikke var lineær og ukomplisert, for å gjøre elevene bevisste på prosessen bak og at de burde sette spørsmål ved det de lærte. Presentasjonen tok for seg kvanteobjekter og de ulike begrepene elevene senere fikk se i tabell-verktøyet, som utstrekning, antall, kvantisert og kontinuerlig. Disse forklarte jeg nøye, siden de var sentrale for undervisningen. Elevene hadde flere spørsmål om betydningen av disse begrepene og ga uttrykk for at de ikke hadde god kjennskap til dem fra tidligere. I tillegg forklarte jeg superposisjon og måling, siden dette er viktige konsepter vi kom til å få bruk for i neste dobbeltime. På denne måten fikk elevene tid til å prosessere disse konseptene.

Eleveengasjementet kom til syne gjennom hvordan eleven Fred reagerte på ikke-determinisme. Han kunne ikke godta at verden var ikke-deterministisk og at det måtte være noe vi ikke enda visste om som kunne forklare kvanteobjektets oppførsel annet enn en sannsynlighetsfordeling. En del av det som var vanskelig å akseptere for eleven var at man ikke kan forklare hvordan målingen påvirker resultatet, bare at vi vet at den gjør det. Han mente at dette måtte bety at når vi fant ut av det, så ville vi se at verden faktisk var deterministisk, som ligner på skjulte variabler-tolkningen. Eleven argumenterte og

fikk uttrykt ideer sine. De andre i klassen virket interessert i synspunktet, men etter hvert virket det imidlertid som om flere elever falt av, som førte til at jeg besluttet å avslutte samtalen der det virket naturlig. Fred var ikke helt villig til å akseptere ikke-determinisme, men han viste at han var villig til å være kritisk til det han lærte og ikke akseptere alt uten å tenke gjennom det, slik jeg oppfordret. Denne elevinteraksjonen viser at han har fått med seg hovedpoenget med hva ikke-determinisme er, siden han kunne formulere argumenter og mot-hypoteser.

Elevene satte seg fort i gruppene de hadde blitt tildelt og tok opptak med mobilene sine. Lydopptakene var en obligatorisk undervisningsaktivitet satt opp av læreren deres, men også en del av min datainnsamling. Alle kom kjapt i gang og de hadde ingen tekniske problemer. De fikk oppgavene på papir, med tabell-verktøyet på baksiden. Det virket som om mange elever ikke fikk med seg at de fikk utdelt tabellen, selv om det ble vist fram da arkene ble delt ut, som kan ha ført til at ikke alle brukte den like aktivt i diskusjonen. Etter at elevene hadde diskutert ferdig, ble de viktigste poengene lagt fram i en felles oppsummering, men få elever deltok aktivt. Det var de samme elevene som deltok muntlig i undervisningen som svarte på spørsmål, selv om alle hadde fått muligheten til å forberede seg til oppsummeringen ved å ta notater fra diskusjonen og timen.

6.4.2 Andre dobbelttime

I den andre økta tok vi for oss dobbelspalteforsøket og hvordan egenskapene til kvanteobjekter ble brukt til å beskrive forsøket, som gir kontekst til begrepene elevene hadde lært. Jeg startet med å vise forsøket for klassiske bølger og partikler, for å vise hvordan resultatet kom til å bryte med klassiske antagelser. Før jeg presenterte resultatet for kvanteobjekter, spurte jeg elevene hva de trodde. De beskrev noe som lignet på den klassiske beskrivelsen for partikler, med to streker bak spaltene. Resultatet med interferens overrasket og virket å interessere elevene. Jeg viste dem også videoen til Dr. Quantum om dobbelspalteforsøket som en oppsummering. Elevene uttrykte at de likte videoen og at den var til hjelp, siden de klarte å få et klarere bilde av hva som foregikk.



Figur 6: En ordsky fra menti der elevene har svart med stikkord de assosierer med kvantefysikk.

Oppstarten var en menti der elevene skrev ord de assosierer med kvantefysikk slik Figur 6 viser, for å omstille hodene deres til kvantefysikk. Menti er en nettside der elevene skriver inn ord, eller setninger, som lager en ordsky, der størrelsen på ordene er et mål for antallet elevsvar.

Figur 6 viser at bølger og partikler er størst, men superposisjon og kvanteobjekt er høyt på listen, som tyder på at elevene merket seg dette forrige økt. En grunn til at bølger og partikler ble nevnt mest, kan være at det er begreper de kan fra før av og som ofte assosieres med kvantefysikk. Jeg startet med å oppsummere forrige time for å minne dem på de poengene vi skulle bygge videre på, som hva et kvanteobjekt er, tabell-verktøyet og måling. Superposisjon og måling ble i forrige økt framhevet av elevene som vanskelige konsepter, så det ble lagt vekt på å repetere disse. Elevenes tilbakemeldinger var altså med på å tilpasse undervisningsopplegget. Denne øktas oppbygning var lik den første, med presentasjon etterfulgt av elevdiskusjon av utdelte spørsmål, noenlunde i de samme gruppene.

Denne økta reagerte Elias på hvordan en måling bryter superposisjonen i dobbelspalteforsøket. Han prøvde å tenke seg om man fikk interferens, eller ikke, hvis man målte foran spaltene, ved spaltene og bak spaltene. Eleven resonerte sammen med meg og fikk luftet ideene sine. Han viste en reflektert forståelse av utfordringene som finnes og hvordan vi ikke har avgjørende bevis for visse konsepter. Han kom fram til at kvanteobjekter alltid har visse egenskaper, men disse egenskapene kan bli påvirket av forsøket og brukte tabell-verktøyet til å navigere disse egenskapene når kvanteobjektet var i superposisjon, interfererte og ble målt. Eleven klarte fortsatt ikke å se for seg akkurat hva som skjedde med superposisjonen og interferens ved måling, men dette er også umulig å se for seg.

Diskusjonene foregikk på samme måte som den første økta, men gruppene ble omorganisert siden noen elever var bort. Elevdiskusjonene satte i gang rett etter fem minutters pause. Elevene var lite aktive i oppsummeringen av diskusjonen. For å motvirke dette ble det improvisert at hver gruppe skulle skrive opp noe de hadde snakket om på tavlen. De ble mer aktive da de opplevde at presset om å si noe var fjernet. Alle gruppene skrev om superposisjon, men de relaterte det ofte til posisjon istedenfor tilstand. For eksempel «*superposisjon er vanskelig siden elektronet er over alt, men ikke når det måles*», eller «*jeg kan ikke se for meg superposisjon siden kvanteobjektet er i alle mulige posisjoner*». Det er ikke nødvendigvis et dårlig tegn at elevene synes superposisjon var vanskelig. Hvis de bare hadde akseptert det, kunne det ha tydet på at de ikke hadde tenkt gjennom konseptet. Etter oppsummeringen var det ti minutter igjen. Den ekstra tiden ble brukt til å fortelle litt om den tidlige historiske konteksten til kvantefysikk, inkludert Planck og Einstein. Det virket som om dette temaet engasjerte dem. Det var planlagt at opplegget kunne inneholde fotoelektrisk effekt om det var nok tid, noe det ikke var, slik at det ble utelatt.

7 Resultater

I dette kapittelet vil elevenes gruppediskusjoner fra dobbeltimene og gruppeintervjuene presenteres ved å gi eksempler på og beskrive utsagnene deres. Dobbelttime 1, dobbelttime 2 og intervjuene er delt inn i de kategoriene som blir beskrevet i delkapittel 5.2.4 i Tabell 5. Hver økt presenteres i hvert sitt delkapittel og utsagnene er organisert i de tematiske kategoriene. Begge intervjuene presenteres i samme delkapittel. Selv om for eksempel Gruppe A og B sine sitater bare presenteres i visse kategorier, så kan de ha hatt sitater som passer inn i de andre kategoriene i tillegg. Noen sitater passet inn flere steder, men ble valgt ut og presentert bare i en kategori. Når sitatene presenteres vil de først bli beskrevet i et avsnitt, før selve sitatene kommer under avsnittet, for å gjøre det lettere for leseren å lese sitatet. Som presentert i delkapittel 5.2.1, har hver gruppe fått en bokstav A-F og navnene til elevene vil starte på deres tildelte gruppebokstav. Hvis for eksempel sitatet er Alex sitt, tilhører han Gruppe A. Hvert sitat er også markert med et tall med parenteser rundt for å kunne henvise til de i løpet av teksten. Tallet starter fra (1) og går fortløpende for hele kapittel 7. Hvert tall beskriver spesifikke utsagn og et nytt tall betyr at utdraget er et nytt elevutsagn. I de tilfellene parentesene «[...]» brukes i sitatene gir det uttrykk for min egen forklaring for å gi leseren kontekst. De nummererte sitatene som kommer i samme sekvens tilhører ikke samme samtale, men eksemplifiserer det samme temaet. Elevsitat (1), (2) og (3) kommer for eksempel i samme sekvens, men er fra tre ulike grupper, som man kan se av elevene har forbokstav A, B og E.

Dette kapittelet vil gi en oversikt over forståelsen og begrepsbruken til elevene ved å presentere utsagnene deres, som vil kunne informere om hvordan kvanteobjekter kan være nyttig for å undervise om kvantefysikk.

7.1 Resultater fra elevdiskusjoner fra første dobbelttime

Den første dobbeltimen tar for seg kvanteobjekter og konseptene måling, superposisjon og ikke-determinisme. Diskusjonsspørsmålene finnes i vedlegg 3. Oppgavene gitt til elevene er å snakke om bølger, partikler, kvanteobjekter og deres egenskaper, hva som skiller klassisk fysikk fra kvantefysikk og hva en måling betyr i kvantefysikk. Elevene tok opptak av diskusjonene sine mens de svarte på de utdelte spørsmålene. Den første dobbeltimen var elevenes introduksjon til kvantefysikk. Utgangspunktet for diskusjonene var informasjonen introdusert i de 45 minuttene før elevdiskusjonene ble gjennomført, gjennom lærersentrert undervisning.

7.1.1 Elevenes beskrivelse av kvanteobjekter

Denne kategorien handler om hvordan elevene tar i bruk begrepet kvanteobjekter. Dette inkluderer også hvordan de bruker begrepene bølger, partikler, kontinuerlig, kvantisert, antall og utstrekning direkte i samtalen, ved å bruke egne ord til å beskrive dem, hvilke kontekster de bruker dem i og

hvordan de reflekterer rundt begrepene. Gjennom elevsitatene kan man lese at elevene i stor grad tar i bruk tabellverktøyet.

Under ser vi noen eksempler der elevene beskriver bølger (1), partikler (2) og kvanteobjekter (3) ved hjelp av begrepene innført i tabell-verktøyet som kan ses i kapittel 2.2.2. Ved å bruke de spesifikke begrepene viser de at de kan skille mellom egenskapene til bølger, partikler og kvanteobjekter som vil være viktig i kvantefysikk. Elevene bruker både begrepene og sine egne ord til å besvare de innledende spørsmålene.

- (1) *Alex: Ja, er ikke det bare at de [bølger] har bølgeegenskaper og er kontinuerlige. At de har en utstrekning som ikke er kvantisert. Ja, hvilke andre bølgeegenskaper kan et kvanteobjekt ha?*
Amelia: Det er jo interferens og interferensmønster. Kan også overlagre med seg selv.
Alex: Frekvens. Ha bølgelengde. Det har ingen bestemt grense.
Amelia: Sier at det er vanskelig å finne posisjon, eller sånn nøyaktig hvor det befinner seg.
- (2) *Bjørk: Det handler vel om at den [partikkelen] var kvantisert, altså at den var i egne verdier.*
Bella: Ja, at man kan måle en verdi, den er ikke-kontinuerlig da, det kan være noen verdier den kan være på. Så vi kan måle hvilken posisjon den har.
- (3) *Emil: Da vil det [kvanteobjekt] få spesielle egenskaper, som det sto i tabellen bak at kvanteobjekter er kontinuerlige i utstrekningen, mens de er kvantisert i antallet.*

Både Gruppe A og E tar under opp at objekter kan støte med hverandre og at dette er en partikkelegenskap. Gruppe A assosierer det i (4) nedenfor med masse og bevegelsesmengde. Gruppe E kobler dette opp mot fotoelektrisk effekt i sitat (5), som er en kontekst vi ikke hadde tatt opp i timen.

- (4) *Alex: Også andre er jo at hvis den har partikkelegenskaper og sånn, så har den masse og bevegelsesmengde. De kan krasje inn i hverandre og greier.*
- (5) *Emil: Og siden de er partikler kan de også kollider.*
Elias: Hvordan observerer vi det? Jeg vet ikke hvilket eksperiment man kan gjøre det med.
Emil: Et eksempel på det er jo fotoelektrisk effekt. Løsrive elektroner med lys. Det fungerer bare, det kan vi bare forklare med at lys er partikler.
Elias: Siden den må ha en bevegelsesmengde for å rive løs da.
Emil: Ja, det har med hvordan energien blir tilført.

Elevene viser at de kan bruke egne ord til å snakke om kontinuerlig, kvantisert, antall og utstrekning. Eksempler på dette finnes i (8) og (9) nedenfor, der elevene snakker om begrepene kvantisert og kontinuerlig. I noen tilfeller snakker de om kvanteobjektets uskarpe egenskaper, som vi ser i både (6) og (9), uten å bruke akkurat det begrepet. Sitat (7) viser at elevene kan forklare hvordan kvanteobjektets egenskaper ikke alltid er de samme og kan endre seg, og poengterer hvordan dette strider mot det han allerede kjenner til. Dette viser at eleven kan reflektere over den nye kunnskapen og finne inkonsistente egenskaper.

- (6) *Amelia: Sier at det er vanskelig å finne posisjon, eller sånn nøyaktig hvor det befinner seg.*
- (7) *Alex: Hun snakket om at det kan være litt mer kvantisert, eller noe sånt, at det var nesten som et spektrum. Og det virker litt motstridende, at logisk gir det ikke helt mening. At noe er kontinuerlig, men har fortsatt start og slutt, at bølger kan krasje med hverandre.*
- (8) *David: At de er kvantisert da.*
Derek: Ja, tellbare. Vi kan jo telle mengden da.

- (9) *Emil: Ja, at de har bølgeegenskaper det innebærer at kvanteobjektene er kontinuerlige, så de kan ikke deles opp i så mange deler som man vil, også kontinuerlig i utbredelsen i rommet.*
Elias: Så den har ikke et fast punkt i rommet som en partikkel da.

I løpet av undervisningen uttrykte elevene at de var overrasket over kvanteobjekters ikke-deterministisk oppførsel og at de hadde superposisjon beskrevet av en sannsynlighet og ble påvirket av en måling. Samtidig kunne de snakke om og beskrive det ved hjelp av egne ord, eksempelvis i (10), (11) og (12) under. I (10) snakker en elev i tillegg om at superposisjon vil stride mot partiklers egenskaper, siden partikler vil ha en bestemt, eller kvantisert, posisjon. Dette viser at han kan ta med seg begrepene han lærte inn i ulike kontekster, slik som å snakke om superposisjon, samtidig som han reflekterer over hvordan de ulike kontekstene vil påvirkes av egenskapene han snakker om.

- (10) *Alex: Ja, at det [klassiske objekter] er deterministisk da. Også er det det med superposisjon, at det [kvanteobjektet] kan befinne seg flere steder. At det er sannsynligheter man bruker for å avgjøre hvor det befinner seg. Jeg føler det er litt motstridende med partikkelegenskaper. Fordi de tydeligvis skal ha en bestemt posisjon, men da har den alt samtidig.*
(11) *Alex: Det blir jo påvirket da, åpenbart. I og med at når man observerer noe i en superposisjon så får man en bestemt måling og hvis man måler på en annen måte så får man en annen måling. Det som skjer med bølge- og partikkelegenskapene til kvanteobjektet når det blir observert. Det endrer seg ut ifra målingen, er det ikke sånn da? Hvis vi observerer kvanteobjektet som vi skulle observert en partikkel «blir» det en partikkel, i hermetegn. Så vi gir jo kvanteobjektet egenskaper ved å måle, på samme måte.*
(12) *Emil: Ja, sånn når det [kvanteobjektet] blir observert da vil det gitt ut ifra sammenhengen da, at de blir valgt, om det er det ene eller det andre [bølge, eller partikkel]. Så før den er observert så er den i en superposisjon, med at den er begge deler samtidig.*

I alle de tre sitatene over snakker elevene om superposisjon og hvordan det betyr at kvanteobjektet er i en tilstand av alle muligheter, eller hvordan en måling vil påvirke hva som skjer med kvanteobjektet. Sitat (12) er også interessant med tanke på at eleven uttrykker at en måling får kvanteobjektet til å velge en tilstand, som er et uttrykk for kollaps av bølgefunksjonen fra København-tolkningen.

Elevene uttrykker ikke alltid kvanteobjekter gjennom hvilke egenskaper de har, men snakker om hva de tror det faktisk er, slik vi kan se under der kvanteobjekter beskrives som partikler eller bølger. Dette er noe Gruppe D gjør i (13) og Gruppe E i (14), som kan skape et skille mellom bølge- og partikkelegenskapene til kvanteobjektet som potensielt kan være med på å skape misoppfatninger.

- (13) *Daniel: Det er noe posisjon da [om hvordan bølgeegenskaper observeres]. Fordi det er en superposisjon. Fordi det er jo partikler [om kvanteobjekter] og de har jo kvantisert posisjon, mens bølger har ikke kvantisert posisjon.*
(14) *Emil: Å snakke om bølger og partikler fordi man sier at man har et objekt som et kvanteobjekt, men i visse situasjoner er det en bølge og i andre situasjoner er det en partikkel. Sånn jeg har forstått det, så blir det på en måte valgt da, om det er en bølge eller en partikkel.*

Eksempelet til Gruppe D over viser at man i noen tilfeller bruker ord som superposisjon uten å forklare hva det er, eller hvorfor de nevnte det i samtalen.

At elevene noen ganger snakker om kvanteobjekter som bølger og partikler, betyr ikke at de ikke har innsikt i hva dette kan bety for å snakke om kvantefysikk. Da de ble bedt om å vurdere hvilke begreper som passet best til å snakke om kvantefysikk, uttrykte de at bølger og partikler ikke dekker alt av kvantefysikk, og at de ser behovet for å bruke kvantespesifikke begreper. Tre eksempler på dette blir presentert i sitatene (15), (16) og (17) under. Elevene var ikke helt enige og mange tenkte at det fortsatt var behov for å bruke begrepene partikkel og bølge, siden det er noe de allerede har hørt om. Samtidig viser de at de kan reflektere rundt og være kritiske til bruken av partikler og bølger, og at de kan se problematikken dette kan skape, noe sitat (16) er et godt eksempel på.

(15) *Alex: Hvis vi bare bruker bølger og partikler til å forklare kvanteobjekter så dekker man ikke hele fenomenet. Man går innom noe, det blir ikke så effektivt. Det er bedre å forklare det med noen nye begreper som passer bedre, istedenfor å ta grunnlag i noe som ikke er, ikke feil da, men som ikke passer helt.*

(16) *Bjørk: Ja, fordi når vi skal snakke om kvantefysikk, hvis vi hadde brukt kvanteobjekter bare i seg selv, så tror jeg det blir litt vanskelig å se for seg. Det blir litt mye ord uten at du har noen knagger å henge det på.*

Bella: Ja, fordi hvis du har bølger og partikler å sammenligne med blir det lettere å forstå hvordan det er ulikt. Men man burde fortsatt, man gjør det jo klart at det er noe annet. Så det går jo fint å bruke de andre begrepene.

Bjørk: Så lenge du gjør veldig klar over at det er ikke det, og du kan egentlig ikke se det for deg, men bare bruke det som en knagg og heng det på. Fordi faren ved å bruke bare bølger og partikler er at du begynner å se for deg bølger. Ja, den må gjøre sånn siden en bølge gjør sånn og at du da får litt mistolknings ting. Men jeg synes fortsatt det er den beste løsningen.

(17) *Christian: Det med bølger og partikler er kanskje litt, det er jo litt feil å snakke det da. Siden det ikke er en av dem egentlig, men en kombinasjon, så da er det jo egentlig en egen ting.*

Christoffer: Men man må jo nesten snakke litt om det og. For å kunne knytte det opp mot noe, hvis ikke blir det enda vanskeligere. Det blir en hybrid.

Carsten: Å bygge på det, men ikke gjøre det for likt egentlig. Da blir det jo vanskelig. Da assosierer vi det mest med bølger og partikler.

Elevene bruker noen ganger fotoner og elektroner som spesifikke eksempler på hva et kvanteobjekt er. I denne dobbeltimen gjelder dette spesielt for fotoner, som i (18) og (19), der de anerkjenner hvordan fotoner har motstridende egenskaper. I (18) beskrives fotonet ved hjelp av egenskapene kvantisert antall, ved at de kan telles, og kontinuerlig utstrekning, ved at de ikke har en eksakt posisjon som er beskrivelsen av et kvanteobjekt. I sitat (19) sies det direkte at fotonet er et kvanteobjekt og at det må det være siden fotonet har motstridende egenskaper. En slik reflektert bruk av fotoner, elektroner og kvanteobjekter vil kunne forebygge misoppfatninger.

(18) *Derek: Men, jeg vet egentlig ikke hva et kvanteobjekt er da?*

Daniel: Et foton. Du ser jo at et foton har jo, du klarer å telle antallet fotoner, men vet ikke akkurat hvor posisjonen til et foton er i et lys. Når du ser det lyset her.

(19) *Elias: Ja, for eksempel som når fotoner ikke skal ha masse, men har fortsatt bevegelsesmengde. Så gir den forskjellige evner som den egentlig ikke burde ha, men vi sier at den har det.*

Emil: Ja, fordi det er et kvanteobjekt.

Elevene viser at de kan bruke begrepet kvanteobjekt og tabell-verktøyet på hensiktsmessige måter, og at de gjennom egne ord kan beskrive både kvanteobjektens egenskaper og hva som skjer ved en

måling. De viser innsikt i problemene med måling i kvantefysikk og de kontroversene som finnes med bølger, partikler og kvanteobjekter, som tyder på at de er reflekterte og har forstått mange av de sentrale konseptene innenfor kvantefysikk.

7.1.2 Hvordan skiller elevene klassisk fysikk og kvantefysikk?

Elevene skiller mellom klassisk fysikk og kvantefysikk på flere måter og generelt kommer de med to ulike poeng. Det første poenget, eksemplifisert under i (20) og (21), er at kvanteobjekter beskrives av både bølge- og partikkelegenskaper, men er ulike både bølger og partikler. I klassisk fysikk vil du ha enten bølgeegenskaper eller partikkelegenskaper, mens i kvantefysikk kan et objekt ha begge, slik beskrevet av Gruppe A og B i sitatene under.

(20) Alex: Hvilke forskjeller er det [mellom klassiske objekter og kvanteobjekter]? Er det ikke at den [kvanteobjektet] kan ha litt av hvert da, en blanding.

Amelia: Jo, og at noe har enten bølgeegenskaper, eller partikkelegenskaper, eller begge.

Alex: Ja, eller forskjellig grad av begge.

(21) Bella: Det som er med kvanteobjekters egenskaper er at de kan motsi partikler sine definisjoner og bølger sine egenskaper. Så den kan ikke ha masse, men fortsatt ha bevegelsesmengde.

Det andre poenget, som nesten alle gruppene tok opp, var at kvantefysikk var ikke-determinisme og hadde superposisjon, mens klassisk fysikk var determinisme. Blant annet sitat (22) tar opp det at vi ikke kan forutsi kvanteobjekter som et tydelig skille. Christian kommer med en god og beskrivende setning om kvantefysikk under i sitat (22), der han snakker om hvordan vi rett og slett ikke kan vite hva et kvanteobjekt gjør, eller hvor det er. Det tyder på at han har forstått et viktig poeng om kvantefysikk. I (23) ser vi hvordan elevene snakker om at det klassiske er deterministisk, mens kvantefysikk handler om sannsynlighet og gjetting. Dette er konsepter som blir sett på som kompliserte og utfordrende, men elevene viser at de kan beskrive dem på konstruktive måter.

(22) Christian: Det blir litt vanskelig å forutsi dem da. Vi vet ikke helt hvor de er, hva de gjør og om de er overalt samtidig, eller om de faktisk er en plass, eller hva de holder på med.

Carsten: Det er litt sånne ting som er litt vanskelig å vite, når de har en kombinasjon av både partikkel- og bølgeegenskaper, tenker jeg. Så det skiller ganske sterkt fra klassisk fysikk.

(23) Daniel: Når vi måler klassisk så er det vel deterministisk ja.

Derek: Fordi da kan du faktisk vite hva som skjer. Og nå i sånn kvantefysikk så er det mer sannsynlighet og gjetting.

David: Ja, du klarer å måle farten hvis du har strekning og posisjon. Og det er jo determinisme.

Gruppe E forklarer i sitat (24) at størrelsesorden på det som skjer i kvantefysikk kan ha noe med hvorfor målingen påvirker systemet, som er med på å vise en reflektert forståelse av konteksten.

(24) Emil: Og det her skiller seg fra det klassiske med at i det klassiske blir ikke systemet påvirket av målingen da. Men det kan også ha med størrelsesordenen å gjøre. At et foton, eller lysbølge, at de er så store i forhold til et kvanteobjekt, i motsetning til et vanlig fysisk objekt så er den ingenting.

Flere grupper bruker måling for å skille mellom klassiske og kvantefysiske systemer ved at målingen ville påvirke resultatet i kvantefysikk, men ikke i klassisk fysikk. Måling beskrives under som en aktiv

interaksjon, noe som påvirker kvanteobjektet, istedenfor en passiv observasjon som ikke påvirker. Elevene beskriver i (25) nedenfor at målingen er det som bryter superposisjonen og gir ulike egenskaper avhengig av målingen.

(25) Bjørk: Det var vel noe sånn at hvis du brukte instrumenter til å måle sånn aktiv måling, at det kunne bli forstyrret. For eksempel ved lys.

Bella: Ja, at du forstyrrer det naturlige ved det. Målingen blir ut ifra hva målingen har gjort.

Elevene viser altså at de kan forklare og bruke konsepter som måling og superposisjon, som er utfordrende, men sentrale i kvantefysikk. De viser at de kan snakke om disse konseptene ved å bruke begrepene fra tabell-verktøyet på hensiktsmessige og reflekterte måter.

7.1.3 Misforståelser om måling

Denne kategorien tar for seg utsagn der elevene misforstår eller mistolker konseptet måling, siden dette var noe de fleste elevene var innom. Elevene viser flere misoppfatninger om målinger, som er beskrevet i litteratur og gjengitt i kapittel 3. Gruppe A forklarer i (26) en aktiv måling som upresis på grunn av den forstyrrelsen og endringen som skjer ved målingen, mens i (27) tar Gruppe B opp at både aktive og passive målinger kan være unøyaktige. Begge gruppene misforstår her en aktiv måling sin påvirkning av systemet som en kilde til unøyaktighet, når dette egentlig er et uttrykk for uskarphet.

(26) Amelia: Det jeg kommer på mot er at det kan generelt bli vanskelig å måle fordi, også når du gjør målingen så er det unøyaktig fordi du må gjøre en måling og går aktivt inn og endrer, påvirker det. Og da er det vanskelig å si hvordan det ville vært uten å måle det.

(27) Bjørk: Så du vet ikke nødvendigvis om målingen er rett. For du har gått inn med et instrument og forandret det.

Bella: Det var vel passiv måling som gjør at du får best resultat da.

Bjørk: På en måte, men passiv måling det er mer det man observerer. Og det er ikke nødvendigvis så nøyaktig, det er en del verdier du ikke kommer fram til.

Bella: Nei, du får ikke verdier, nei, men det er sant.

Bjørk: For det fungerer jo bra til mye andre ting, men kvantefysikk er så smått at det er litt vanskelig å observere.

Gruppe C snakker i (28) under om at en partikkel vil bli deterministisk ved måling og går da i den fellen de selv snakket om i (17) når de assosierer kvanteobjektet med en partikkel. En partikkel, som er et klassisk objekt, vil jo oppføre seg klassisk, mens et kvanteobjekt alltid er ikke-deterministisk.

(28) Carsten: Hva skjer med egenskapene til objektet når det er observert?

Christoffer: Den blir deterministisk da. Før det kan du ikke si noe på hvor partikkelen er.

Måling er komplisert i kvantefysikk. Det kan være ganske vanskelig å akseptere og bortimot umulig å faktisk forstå seg på, men at elevene klarer å diskutere hva som skjer ved en måling, selv om de noen ganger viser misoppfatninger, viser at de er i stand til å vurdere ulike sider ved målinger som kan være konstruktivt for å utvikle en bedre forståelse.

7.1.4 Klassiske analogier

Denne kategorien inneholder to klassiske analogier elevene brukte. Vi starter med Gruppe D og en analogi som vil bli kalt «bord-analogien». Deretter vil Gruppe E sin «katt og kanon-analogi» bli presentert. Gruppe D bruker i sitat (29) et bord som et eksempel på et klassisk objekt. Først etablerer de at klassiske objekter kan være kontinuerlige, som bølger. De diskuterer fram og tilbake om et bord er kontinuerlig eller kvantisert. Dette er et eksempel på at elevene anvender begrepene de har lært på måter som ikke alltid vil gi mening, men at de forsøker å bruke ulike kontekster til å reflektere over hvordan de ulike egenskapene fungerer.

(29) David: Et klassisk objekt, er det et bord?

Derek: Nei, er ikke det ofte kontinuerlig da?

David: Er klassiske objekter kontinuerlig?

Derek: Ja, var de ikke det da.

Daniel: Det er jo bølger liksom. Det er bølger som er kontinuerlige.

Derek: Ofte kan du, du kan jo telle uendelig mange måter, hvor stort det bordet her er. Det er jo kontinuerlig.

Daniel: Absolutt.

David: Men, det stopper jo en gang da.

Derek: Men du kan, mellom en og ti kan du telle uendelig tall. Men når det er kontinuerlig kan du ikke telle alle tallene.

David: Men du klarer jo å telle antallet partikler i bordet her.

Daniel: Det er kanskje ikke så lett, men det er mulig.

Gruppe D kommer fram til at både en bølge og et bord er klassiske objekter og bruker dette som basis for å finne ut om et bord er kontinuerlig eller ikke. De kommer fram til at et bord må være kvantisert, siden det er mulig å telle antallet partikler i bordet. Samtidig slår de fast at dette ville vært vanskelig, men ikke umulig.

Under kan vi se Gruppe E, i (30), snakke om «katt og kanon»-analogien. Konteksten i denne sammenhengen er at gruppen snakker om hvilke egenskaper som blir valgt ut når en måling gjøres og superposisjonen kollapser. Elias bruker analogien for å reflektere over problematikken med en aktiv måling. Han sammenligner å skyte fotoner på en partikkel for å måle situasjonen som å skyte en katt med en kanonkule for å kunne måle den. Poenget han konstaterer er at målingen ødelegger hele situasjonen siden man introduserer en faktor som endrer på noe. Han gjør dette ved å sammenligne størrelsesordenen på det som måles og det som måler. Det gir et tydelig bilde på hva han forestiller seg skjer ved en måling.

(30) Elias: Ja, også er det litt problematisk å observere da. Når du skal skyte fotoner på en kvantepartikkel, eller for å observere situasjonen, så er det det samme som å observere hvordan katten reagerer på hundemat og så skyte den med en kanonkule. Da ødelegger du hele eksperimentet. Du introduserer en faktor som klusser til systemet. Så det er sikkert veldig vanskelig å få en ren observasjon av noe så smått.

Sitat (30) er også et eksempel på at elevene bytter ut kvanteobjekt med andre ord, som i dette tilfellet er kvantepartikkel. «Katt og kanon»-analogien er ikke en sammenligning som ble tatt opp i

undervisningen, som tyder på at dette er et eksempel eleven har kommet på selv og viser en god forståelse.

7.1.5 Hvordan elevene ser for seg kvantefysikk

Kvanteobjekter og kvantefysikk er vanskelig for elevene å se for seg, men det er fortsatt noe de kan ha behov for å gjøre. Derfor vil det være interessant å se hvordan elevene velger å visualisere og eventuelt hva dette kan bety for undervisningen og deres forståelse. Det ble tidligere gitt eksempler der elevene synes begrepet var abstrakt, eller vanskelig, spesielt hvis de ikke fikk noen knagger å henge det på, slik Gruppe B forklarte i sitat (16).

Superposisjon og måling er også noe de sliter med å se for seg og elevene uttrykker at dette er generelt vanskelige konsepter for dem. I sitat (31) nedenfor viser eleven innsikt i at kvantefysikk ikke har alle svarene, men at vi har en modell som ofte fungerer. Det viser en forståelse for hvilke begrensninger som finner. På den andre siden er dette et instrumentelt perspektiv, siden det gir uttrykk for at vi ikke trenger å kunne beskrive hva som skjer for å kunne bruke teorien.

(31) Alex: Ja, så lenge teorien gir oss svar så kanskje det er alt vi trenger for å bruke det praktisk. Det har sammenheng med at det ikke har så mye å si om modellen ikke helt samsvarer med det som skjer, men så lenge den er brukbar.

Når elevene viser at de er klar over at forklaringene av kvantefysikk har visse begrensninger, tyder det på at de en viss forståelse for hva man kan forklare og hva vi enda ikke vet.

7.1.6 Oppsummering

I denne delen har vi sett at elevene stort sett klarte å ta i bruk de relevante begrepene i hensiktsmessige kontekster, selv om elevene også synes det var utfordrende. Begrepene som ble introdusert for elevene i tabell-verktøyet i delkapittel 2.2.2, ble beskrevet av elevene både ved å bruke begrepene direkte, men også gjennom elevenes egne ord og beskrivelser. Mange elever anerkjente at å blande de forskjellige begrepene kunne være problematiske for forståelsen deres av kvantefysikk og at det fantes motstridende konsepter, som tyder på god innsikt i kontroversene som følger av bølge-partikkel-dualiteten.

Elevene brukte de begrepene som ble introdusert gjennom tabell-verktøyet til å beskrive egenskapene til bølger, partikler og kvanteobjekter. De beskriver kvanteobjekter med kvantisert antall og kontinuerlig utstrekning og setter disse egenskapene i sammenheng med andre bølge- og partikkelegenskaper. Ved å gjøre dette viser og uttrykker elevene at de forstår hvordan egenskapene til bølger og partikler er motstridende og ikke kan sameksistere i klassiske objekter, som kun bølger, eller kun partikler. De ser tydelige forskjeller mellom bølger og partikler og hvordan kvanteobjekter skiller seg fra begge.

7.2 Resultater fra elevdiskusjoner fra andre dobbelttime

I den andre dobbeltimen var dobbelspalteforsøket i fokus og denne timens resultater må ses i kontekst av dette innholdet. De tingene elevene lærte om og diskuterte i den første dobbeltimen, som superposisjon, må her brukes for å forklare det spesifikke forsøket. Elevene fikk spørsmål om dobbelspalteforsøket, måling og kvanteobjekters egenskaper i dobbelspalteforsøket (se vedlegg 3). Når elevene hadde diskusjoner i den andre dobbeltimen, hadde de hatt rundt 1 time og 30 minutters lærersentrert undervisning om kvantefysikk til sammen på de to dobbeltimene. Elevdiskusjonene fra denne timen forekom etter at all ny informasjon fra undervisningsopplegget hadde blitt introdusert for elevene. I denne timen er Elias fra Gruppe E plassert i Gruppe D på grunn av fravær.

7.2.1 Elevenes beskrivelse av dobbelspalteforsøket

Her presenteres hvordan elevene, i lydopptakene, beskriver hva som foregår i dobbelspalteforsøket ved å undersøke hvordan elevene snakket om forsøket ved hjelp av kvanteobjekter, bølger, partikler og deres egenskaper, samt tabell-verktøyet. Dette inkluderer hvilke utfordringer elevene møter når de diskuterer spørsmål om dobbelspalteforsøket og videoen om Dr. Quantum.

Flere av gruppene synes forsøket gir mest mening med bølgeegenskaper som hovedfokuset. Det kan være siden en bestemt posisjon er vanskelig å forklare ved hjelp av bølgeegenskaper, slik (33) nedenfor er inne på, og i dobbelspalteforsøket vil elektronet være i en superposisjon. I sitat (32) ser vi at Gruppe A gir uttrykk for at de føler at bølgeegenskaper gir mening når de skal beskrive dobbelspalteforsøket, siden det vil forklare interferensmønsteret.

(32) Amelia: Noe som er vanskelig å forklare med bølgeegenskaper? Føler egentlig ikke det altså, det gir ganske mye mening. Det her med at det kan bli forsterket med bølgetopper og nøytralisert hvis det er topp og bunn. Også det der med at det var intensitet liksom, med de mønstrene på veggen.

(33) Christian: Det er jo det med posisjon da, at det er vanskelig å vite hvor en bølge er, synes jeg.

Før det ble forklart hvordan kvanteobjekter vil interferere, forventet elevene at mønsteret ville vise to streker på veggen bak. Utdragene under er fra opptak av at elevene svarer på et spørsmål der de blir bedt om å beskrive videoen til Dr. Quantum. Selv om det som skjer er mot deres forventninger, som beskrives i både (34) og (35), snakker de om at elektronet, eller kvanteobjektet, vil lage et interferensmønster. De er klar over egne forventninger og hvordan det de lærte brøt med disse.

(34) Alex: Først så starter han med å sende klinkekuler gjennom to spalter. Så ble det bare to streker. Havnet der vi trodde det skulle havne. Så viste han det samme med bølger og viste at det ble et interferensmønster, ikke sant.

Amelia: Og så gjorde han det med elektroner. Og da ble det vel interferensmønster der og.

(35) Bella: Så han viser hva som skjer når elektroner blir sendt ut mot den todelingen da. Og så skjer det noe annet. Da får vi liksom et interferensmønster, selv om man ikke skulle trodd at man fikk det da.

Bjørk: Ja, det kommer jo ikke som en direkte bølge da, men det blir fortsatt interferensmønster. Og selv om du bare sender ut ett og ett [elektron].

Da elevene ble bedt om å snakke om videoen til Dr. Quantum, var de fleste elevene klare på at øyet som i videoen representerer en måling ikke var realistisk og kan være misledende, slik vi ser Gruppe B snakke om i (36). De beskriver det å se på noe som en passiv måling og å forklare det slik vil være en forenkling av hva som faktisk skjer, som viser en forståelse av konteksten ut ifra kunnskap de har med seg fra den første dobbeltimen.

(36) Bella: Da var det jo et øye da. Det er jo litt misledende for man kan jo ikke se elektroner.

Bjørk: For det de viste der var jo ganske enkelt for å vise det, forenkla det veldig, men det de viste der var jo en passiv måling. Så jeg synes det var spesielt misvisende, fordi de viste at når man kom inn med den passive målingen at du bare fikk en av sannsynlighetene, et av resultatene. Men det er ikke sant, det gjelder bare på aktiv måling.

Superposisjon er vanskelig å forklare ved hjelp av partikkelegenskaper, noe flere grupper tar opp, blant annet i (37) under. Det kan vise til at de er klar over kontroversen i bølge-partikkel-dualiteten og hvordan kvanteobjekter må ha både bølge- og partikkelegenskaper.

(37) Bjørk: Om det er noe som er vanskelig å forklare med partikkelegenskaper? Det er jo kanskje mer det der at den er på alle plasser til samme tid sånn som du sa. Og at liksom, det forsvinner når man skal begynne å måle. I alle fall når du sender inn ett og ett elektron. At det fortsatt er på alle plassene.

Gruppe A påpeker i (38) at det kan være vanskelig å skille mellom konseptene antall og utstrekning som innføres for elevene i tabell-verktøyet. Det kan gjøre det vanskeligere for elevene å snakke om disse begrepene, siden de er usikre på dem.

(38) Amelia: Jeg føler at antall og utstrekning henger sammen, men hvordan skal man forklare det da.

Selv om det kunne oppleves utfordrende, framhever Gruppe B i (39) at tabell-verktøyet fungerte godt til å bruke i forklaringer.

(39) Bjørk: Altså det fungerer jo det vi har lært her, med tabellen, men jeg føler det er mer vanskelig å akseptere at det kan være alle plasser og sånn der ting.

Bella: Jeg synes den beste forklaringen, det er kontinuerlig og kvantisert.

Elevene påpeker at tabell-verktøyet kan være både vanskelig og god å bruke, men alle gruppene viste at de klarte å ta den i bruk på gode måter.

Gruppe C ble spesielt overrasket over at enkeltelektroner kan oppføre seg som bølger, som kommer fram i (40) nedenfor, og at det er rart at forsøket blir annerledes når man måler. Dette kan tyde på at elevene opplever tvetydigheten mellom bølger og partikler. Måling i kvantefysikk er et komplisert konsept, slik at det ikke er overraskende at elevene synes dette ikke ga helt mening. Det at elevene framhever det de synes er rart er med på å vise god forståelse. Da kan de reflektere over hvordan kvantefysikk bryter med egne forventninger og framheve hvilke konsepter som er annerledes i kvantefysikk.

(40) *Christoffer: Jeg synes det var overraskende at elektroner kan, at et enkeltelektron kan oppføre seg som en bølge da.*
Carsten: Også synes jeg det er litt rart at det blir helt annerledes når vi måler hvilken greie den drar igjennom.

Det at visse konsepter er vanskelig å akseptere for elevene, viser at de har tenkt over hva det betyr, siden det er mange konsepter vi ikke har en god forklaring på.

I sitat (41) under snakker elevene om kvanteobjektet ved hjelp av sannsynlighet. De snakker også om hvordan en måling har den effekten at man måler en bestemt verdi og da vil sannsynligheten for at kvanteobjektet har en annen tilstand forsvinne. Gruppen uttrykker det slik at du vil få det resultatet du måler for og at målingen er noe som aktivt påvirker systemet. Derfor har vi ikke lenger alle de mulige sannsynlighetene i en superposisjon, slik man hadde før målingen. Dette eksemplet viser at elevene har en ganske avansert forståelse for hva superposisjon og måling betyr.

(41) *Bjørk: Så selv om du bare sender ut ett [kvanteobjekt] så, fordi den sannsynligheten for at den er på begge spalteåpningene samtidig, så er den det. Helt fram til du begynner å måle.*
Bella: Ja, fordi da finner du det du har regnet ut fra før av, eller du forstyrrer jo på en måte.
Bjørk: Da måler du at den er en plass og da er det ikke sannsynlighet for at den er flere plasser lenger. For da er sannsynligheten borte.
Bella: Ja, for da måler du jo på en måte det du ser etter, eller du får jo det du måler for. Så det er, ja, det var det forsøket.

Slik vi kan se i de to neste sitatene beskriver elevene målingen på et kvanteobjekt som en interaksjon som ødelegger for det man prøver å måle, som slik Gruppe D viser i sitat (42). De snakker om hvordan målingen ødelegger superposisjonen og man vil måle et kvantisert kvanteobjekt, istedenfor kvanteobjektet i en superposisjon. De diskuterer hvordan man kunne satt opp forsøket annerledes for å kunne måle elektronet og retter på seg selv underveis. Dette viser forståelse for det de snakker om, siden de kan vurdere ulike utfall av forsøket. Sitat (43) kommer fra senere i den samme samtalen. De prøver her å bruke kontinuerlig utstrekning og kvantisert antall til å forklare interferens, mens synes det er utfordrende å bruke begrepene til å snakke om interferens. Det virker som om de kommer fram til at det er noe de må akseptere, men viser god forståelse for kvanteobjektets egenskaper ved å bruke dem til å beskrive forsøkets kontekst.

(42) *Derek: Det sa vi i stad, på grunn av superposisjonen, at det ene elektronet interfererer med seg selv.*
Daniel: Når det er to spalter, men hvis det er en spalte så oppfører det seg som en vanlig, ja, kvantisert. Kanskje hvis vi sender inn ett og ett elektron, nei, det var jo det at de interfererer med seg selv. Hvis du prøver å finne ut hvilken spalte elektronet går gjennom, da ødelegger vi hele greia.
Elias: Oppfører det seg kvantisert igjen.
(43) *Daniel: Var ikke det det du så i stad da, med det at det er kontinuerlig utstrekning og kvantisert antall.*
Derek: Det er jo vanskelig å forklare hvorfor den interfererer med seg selv da.
Daniel: Man kan ikke se det.
Elias: Man bare sier at de er der, på alle stedene samtidig. Så derfor så gjør de det.
Daniel: Ja, du sier jo bare at det er det, selv om når du måler så er det ikke det.
Derek: Ja, så man kan aldri se det, for når man måler så interfererer den ikke.

Når elevene diskuterer spørsmålene de fikk om dobbelspalteforsøket bruker de mye tid på å snakke om superposisjon og måling. Det tyder på at det er både utfordrende og interessant. Elevene trekker fram superposisjon og måling som rart, men bruker det samtidig til å beskrive hvordan dobbelspalteforsøket foregår. De bruker også kvanteobjekter og de tilhørende egenskapene fra tabell-verktøyet til å snakke om superposisjon og dobbelspalteforsøket som viser hvordan de er i stand til å ta med seg og bruke begrepene på gode måter i spesifikke kontekster.

7.2.2 Hvordan skiller elevene mellom klassisk fysikk og kvantefysikk?

I motsetning til dobbelttime 1 er ikke fokuset denne timen i like stor grad rettet mot skillet mellom klassisk fysikk og kvantefysikk, men elevene kommer fortsatt med utsagn som (44), der bølger og partikler beskrives som noe annet enn kvanteobjekter. Det tyder på at de tenker over skillet som finnes mellom klassiske objekter og kvanteobjekter.

(44) Christoffer: Jeg tenker liksom at partikler de befinner seg alltid ett sted og har liksom, ja, de er bare på et sted og det er et antall av dem da, på de stedene de er. Bølger er liksom, det er vanskelig å si hvor mange bølger det er.

Christian: Vi vet at de brer seg ut veldig konsistent og de klarer å interferere og sånne ting.

Carsten: Mens kvanteobjekter har litt mer sånn, du vet hvor mange det er, men du vet ikke hvor de er. De er en bølge i det at det er bare sannsynligheter for hvor de er.

Også i sitat (45) under blir det tatt opp hvordan kvanteobjekter ikke kan forklares med klassiske fysikk, mens bølger og partikler allerede er forklart her. Eleven viser at de kan identifisere bølger og partikler som klassiske objekter og skille dem fra kvanteobjekter.

(45) Amelia: Hvordan forklaringen ville sett ut i klassisk fysikk, ja det er jo umulig å forklare kvanteobjektene da. Og partikler og bølger er jo allerede forklart i klassisk fysikk.

At elevene fortsatt tenker over hvordan kvanteobjekter skiller seg fra bølger og partikler, kan vise at tabell-verktøyet er med på å lage tydelige rammer rundt hvordan partikler, bølger og kvanteobjekter er ulike hverandre.

7.2.3 Hvordan elevene misoppfatter interferens som støt mellom partikler

Alle gruppene hadde stort sett to måter å beskrive interferens på. Den første var ved hjelp av sannsynlighet og superposisjon, som ble gjennomgått i kapittel 7.2.1. Den andre var ved at objektene krasjet, eller støtet, med hverandre for å lage interferensmønsteret. Det at objektene kan krasje er en beskrivelse vi ser igjen i noen av elevenes forklaring av partikler fra den første dobbeltimen. Denne egenskapen kan ha påvirket hvordan de tenker på interfens.

Under kan vi se tre sitater der fra Gruppe A, der Alex snakker om at elektroner støter med hverandre. Han forteller om hvordan fysikere først trodde at elektronene krasjet med hverandre, som vi ser i (46), men at videre undersøkelser viste at elektronene interfererte med seg selv i en superposisjon. Senere, i (47), forklarer Alex at han synes det gir mening at elektronene vil krasje med hverandre, siden de er

partikler med masse. Samtidig synes han det er overraskende at man får et interferensmønster som med bølger, som viser at han forstår at det er noen egenskaper som motsier hverandre. I sitat (48) nevner han at interferens kan komme av bølgeegenskapen kontinuerlig utstrekning, men at de krasjer med hverandre kommer av kvantisert antall. Her har han delt inn i enten bølgeegenskaper, eller partikkelegenskaper, når han prøver å forklare interferens og ender da opp med to motstridende forklaringer.

(46) Alex: Ja, og så sa han sånn at fysikere først trodde at det først var siden de krasjet inn i hverandre. Så de bestemte seg for å sende et og et elektron, men at det fortsatt ble samme interferensmønster. Det viste seg at når de sendte inn et elektron så gikk det gjennom begge spaltene og interfererte med seg selv.

(47) Alex: Ja, det synes jeg var merkelig da. Også mer enn det da, nei, jeg vet ikke, kanskje at mønsteret var litt likt da. Jeg føler det gir mening av de krasjer i hverandre og interfererer fordi de er partikler og har masse og kan krasje i hverandre. Men at mønsteret er helt likt, det synes jeg var litt overraskende.

(48) Alex: Nei, det er jo da at elektronene krasjer med hverandre, interfererer med hverandre. Som er en bølgeegenskap. Kanskje det er der man kommer inn på det der med kontinuerlig utstrekning da. Men akkurat det med at den krasjer med hverandre er et resultat av at det er et kvantisert antall.

Selv om Alex her har en misoppfatning om at interferensmønsteret for elektroner kommer av at de krasjer med hverandre, har gruppen også mange andre utsagn der de snakker om interferens ved hjelp av superposisjon. Det er viktig å påpeke at selv om gruppene noen ganger uttrykker misoppfatninger, så har de stort sett hensiktsmessige forklaringer.

Slik som Gruppe A, snakker også Gruppe B om at elektroner krasjer med hverandre og interfererer når mange elektroner skytes ut av gangen, som vi kan se i (49). Gruppe B beskriver også hvordan en måling vil påvirke interferensmønsteret i sitatet under. De går imidlertid over til å snakke om ett og ett elektron, og snakker da om elektronets sannsynlighet istedenfor at det støter med hverandre. I tillegg nevner de at interferensmønsteret for elektroner kommer av hvor det er sannsynlig at elektronene treffer, som tyder på at de forstår at det er i distribusjonen av elektroner at vi kan se interferensmønsteret.

(49) Bella: Når vi sender inn massevis av elektroner så vil vi jo få det [mønsteret] for de støter hverandre. Også det som vil skje hvis vi sender inn ett, fordi selv om det er ett før spalteåpningen så er den på en måte på alle sannsynlige plasser.

Bjørk: Ja, fordi alle elektronene som sendes, det er sannsynlighet for at de skal havne på alle mulige plasser samtidig, liksom. Også blir det jo markert i et sånt bølgemønster ut ifra der det er mest sannsynlig at de treffer da. Det er litt vanskelig å forstå.

Bella: Det som skjer hvis vi prøver å finne ut hvilken spalte den går gjennom er at da finner du ut hvor den er og da er den ikke på de andre sannsynlighetsplassene.

Bjørk: Ja, for da finner du ut at den går gjennom den spalten, men da blir alle de andre mulighetene borte for du måler på en måte akkurat det da.

Bella: Så da vil du ende opp med å bare få en rett strek på veggen bak spalteplassen.

Et annet viktig poeng Gruppe B nevner, i sitat (50) nedenfor, er at man vil ikke få et interferensmønster av bare ett elektron, men at en mengde elektroner til sammen vil gi oss et interferensmønster, noe de også er inne på i sitat (49).

(50) Benedikte: Kanskje det er at de skyter inn et bestemt antall elektroner også blir det på en måte et kontinuerlig mønster.

Halvparten av gruppene beskriver interferens som partikler som støter, eller krasjer, med hverandre, men alle gruppene snakker også om interferens ved hjelp av superposisjon, eller sannsynlighet. Elevene har ikke en entydig måte å snakke om interferens på og varierer hvilke begreper de bruker. Det er også viktig å tenke over at elevene bare har hatt to timer undervisnings om kvantefysikk til nå, og disse opptakene vil hjelpe læreren med å rette opp i eventuelle misoppfatninger.

7.2.4 Elevenes beskrivelse av elektroner som partikler

Både (51) og (52) under gir eksempler på hvordan flere grupper omtaler elektronet som en partikkel, Elias ble flyttet fra Gruppe E til D på grunn av fravær og det er han som har sitat (52) fra Gruppe D.

(51) Christian: Det er som vi kjenner, at et elektron har egentlig en masse og det er en partikkel da egentlig.

Carsten: Hva skjer om vi prøver å finne ut av hvilken spalte elektronet går gjennom?

Christoffer: Det er jo det at den mister superposisjonen sin da.

Christian: Så blir det bare basert på sjanse, blir det ikke det da.

Carsten: Jo, vil den ikke gå gjennom begge da, også blir det to striper istedenfor mange.

(52) Elias: Det er derfor den [elektronet] har bare egenskapene til bølger, det er ikke en bølge, det er en partikkel. Bare med egenskapene.

Generelt mener elevene at partikler er lettere å forklare enn bølger, som sitat (53) nedenfor er et eksempel på. De påpeker at både antall og utstrekning er kvantisert for partikler, som gjør det lettere å se for seg. Sitat (54) er med på å vise at elevene assosierer elektroner med klassiske objekter. Dette kan påvirke at elevene lettere ser for seg elektroner som partikler, slik sitat (51) ovenfor viser. Denne misoppfatningen kan være med på å skape tvetydigheter i forklaringene deres, slik eksemplifisert tidligere for interferens.

(53) Christian: Er det noe som er vanskelig å forklare med partikkelegenskaper?

Carsten: Jeg synes det er lettere å forklare enn bølger.

Christoffer: Det er lettere å tenke på det som noe fysisk. Det kan være noe fysisk liksom, mens bølger er sånn, det jeg tenker når jeg tenker bølger er vann liksom. At bølger, på vannet. Mens ellers er det ikke så veldig enkelt å visualisere seg hva en bølge er.

Christian: Ja, det er jo både antallet og utstrekningen er kvantisert. Så det blir enklere å skjønne for oss.

(54) Benedikte: Ja, jeg synes det var rart fordi de elektronene ligner på klassiske objekter, også får de sånne bølgemønstre.

Elevene synes partikler er lettere å se for seg enn bølger, og har en tendens til å se for kvanteobjekter som partikler. Det kan kanskje innebære at det er problematisk å tenke på elektronet som en partikkel og ikke et kvanteobjekt, siden det da er lettere å se bort ifra bølgeegenskapene til elektronet.

7.2.5 Hvordan elevene ser for seg kvantefysikk

Noe vi så i delkapittel 7.2.4 er at elevene ofte snakker om elektroner istedenfor kvanteobjekter. Dette kan komme av flere ting, som at videoen til Dr. Quantum snakket om elektroner, elektroner er noe de har hørt om før og at dobbelspalteforsøket ofte blir forklart ved hjelp av elektroner, som for eksempel

i læreboka deres. Elevene uttrykte at de ofte ser for seg elektroner som partikler, slik som i sitatene (51) og (52) ovenfor, og at dette kan være problematisk siden de da ikke alltid tar hensyn til både bølge- og partikkelegenskapene som finnes samtidig.

Begrepet elektroner trenger imidlertid ikke være problematisk om man tenker på dem som kvanteobjekter. I sitat (55) snakker elevene om videoen til Dr. Quantum og hvordan sammenligningen mellom klinkekuler og elektroner kan gjøre det vanskeligere for dem. Elevene viser med dette forståelse for egne utfordringer som er viktig å reflektere over når de lærer om utfordrende konsepter. Det kommer også fram av sitat (55) at det er vanskelig å se for seg bølge- og partikkelegenskaper samtidig, som er en del av de motstridende aspektene ved bølge-partikkel-dualiteten.

(55) Bjørk: Ja, det er rart, for de må jo vise det fram på en måte, men når de viser det fram som det ligner på de klinkekulene så blir det litt ekstra vanskelig.

Bella: Det er veldig vanskelig å se for seg, for du kan ikke fysisk se for deg at det er både bølgeegenskaper og partikkel. Sånn, du kan ikke se for deg en bølge, men at den oppfører seg som det.

At de framhever denne problematikken er et tegn på at de ser utfordringene som kan komme av å prøve å se for seg elektroner. Det kan være et tegn på at det ikke nødvendigvis er så problematisk å forholde seg til elektroner når de snakker om dobbelspalteforsøket.

I sitat (56) nedenfor kan vi se et eksempel på hvordan elevene ser for seg bølger som vannbølger og hvordan de synes det da var lettere å se for seg interferens, siden de kan sammenligne det med noe de er kjent med. Selv med denne visualiseringen synes de fortsatt at det er vanskelig å forestille seg hvordan kvanteobjektet kan komme gjennom begge spaltene i dobbelspalteforsøket samtidig. At de sliter med å se det for seg kommer av at det faktisk er umulig og viser at elevene forstår dilemmaet og ikke har laget egne misoppfatninger om hva som skjer med kvanteobjektet.

(56) Bella: Det var jo litt som det første da, med den vannbølgen.

Bjørk: Da gir det jo veldig mening at du får et interferensmønster. Så jeg synes det gir mening å tenke på det som en bølge, etter at den har kommet gjennom spalteåpningen.

Bella: Ja, får da, kanskje fordi at man får et mer sånn fysisk bilde på det. Fordi man ser liksom at bølgene møtes og sånt.

Bjørk: Det er det, jeg sliter fortsatt med å forstå det med at det kan være på flere plasser på samme tid. Det med bølgeegenskaper, hvis du ser for deg før spalteåpningen, at bølgen, at det kommer en gjennom begge. For der sliter jeg med å se for meg.

I sitatet under tar elevene opp et viktig poeng. Sitat (57) framhever at man ikke burde se for seg hva elektronet er, men at man burde tenke på hvilke egenskaper objektet har. Da kan man unngå å se for seg partikler, eller bølger, slik elevene har nevnt tidligere i dette delkapittelet.

(57) Daniel: Hvis elektronene skulle vært som bølger i klassisk fysikk, hvordan skulle du sett på atomer da? Hvis det hadde vært masse bølger rundt greien.

Elias: Det er derfor den har bare egenskapene til bølger, det er ikke en bølge, eller partikkel. Bare med egenskapene.

Daniel: Ja, men ...

Elias: Så du ser ikke, du kan ikke se egenskapene til bølgen til elektronet. Det bare er der.

Selv om elevene noen ganger ser for seg elektroner som partikler, er mange også klare over at man burde skille mellom hva noe er og hvilke egenskaper det har. Elevene viser at de kan reflektere rundt de utfordringene de støter på når de snakker om kvantefysikk.

7.2.6 Oppsummering

Delkapittelet har nå tatt for seg hvordan elevene tar i bruk kvanteobjekter og deres egenskaper til å snakke om dobbelspalteforsøket, superposisjon og måling. Elevene har i stor grad kapasitet til å snakke om dobbelspalteforsøket på hensiktsmessige måter, gjennom å beskrive det ved hjelp av superposisjon og sannsynlighet. Dette kan være siden de ofte tar i bruk tabell-verktøyet i diskusjonene sine, slik at de har noe å støtte seg på. Samtidig kan man se at visse utfordringer oppstår når elevene begynner å se for seg kvanteobjekter som partikler og ved hjelp av partikkelegenskaper som at elektroner kan støte med hverandre. Selv om elevene hadde varierende måter å forklare interferens på, snakket de stort sett om superposisjon og sannsynlighet når de beskrev interferensfenomenet. Elevene tar også opp at partikler er lettere å se for seg enn bølger og beskriver kvanteobjekter som partikler ved flere tilfeller. De viser seg også å være reflekterte og kritiske til det de lærer og tar opp videoen til Dr. Quantum som problematisk, både i måten videoen viser måling på og hvordan de sammenligner klinkekuler med elektroner. Dette er i samsvar med det elevene uttrykte i den første dobbeltimen om at det er viktig å skille mellom bølger, partikler og kvanteobjekter og forholde seg til kvanteobjekters egenskaper istedenfor hva de er, for å unngå problemer med bølge-partikkel-dualiteten. Elevene viser at de kan diskutere på hensiktsmessige måter og tar i bruk de introduserte begrepene til å snakke om dobbelspalteforsøket i dybden, noe innføringen av tabell-verktøyet kan ha bidratt til. Elevene kan anvende verktøyet riktig og i ulike kontekster. De bruker både begrepene eksplisitt og ved hjelp av egne ord og kan reflektere over og vurdere hvordan de bruker dem. At de selv kan framheve ulike utfordringer rundt å snakke om kvantefysikk viser at de har tilegnet seg en gjennomgående forståelse, som tyder på at introduksjonen av begrepet kvanteobjekt og det tilhørende tabell-verktøyet har fungert godt for å utvikle elevenes forståelse.

7.3 Resultater fra intervjuer

Intervju 1 bestod av Alex, Emil og Elias, som kalles Gruppe 1, mens Intervju 2 bestod av Frida, David, Daniel og Derek, som kalles Gruppe 2. Intervjuene er en blanding av elever fra gruppene A, E, D og F. Frida tilhørte Gruppe F, og var på den gruppen jeg ikke hadde tilgang på gruppediskusjonen til. Elevene i Gruppe 1 var mer aktive enn de i Gruppe 2, men begge gruppene snakket og diskuterte med hverandre, mer enn bare å svare på spørsmålene de ble stilt i intervjuene. Elevene i Gruppe 2 svarte i noe større grad direkte på spørsmålene etter tur, som førte til at de ikke gikk like mye i dybden som Gruppe 1. Begge gruppene tok imidlertid opp mange av de samme tingene og de presenteres samlet i det følgende.

7.3.1 Elevenes beskrivelse av kvanteobjekter

Denne kategorien er lik som i resultatene fra første dobbelttime i kapittel 7.1 og inneholder elevenes beskrivelser av kvanteobjekter og hvordan de bruker tabell-verktøyet til å snakke om konsepter som interferens og superposisjon.

Innledningsvis i intervjuet ble elevene bedt om å gjengi sin egen forståelse av visse konsepter for å undersøke hva de satt igjen med etter undervisningsøktene. I sitat (58) under kan vi se hvordan Gruppe 1 bruker begreper, som kvantisert antall og kontinuerlig utbredelse, fra tabell-verktøyet. De svarer her på et innledende spørsmål om hva de tenker at et kvanteobjekt er. Et viktig poeng som kommer fram i første setning er at kvanteobjekter er definert som et objekt som har både partikkel- og bølgeegenskaper. De tar opp at kvanteobjektet noen ganger vil oppføre seg mer som en partikkel og mer som en bølge andre ganger, som kan variere mellom forsøk. Dette er i samsvar med diskusjonene fra dobbelttime en og to, som framstilt i kapittel 7.1 og 7.2, der kvanteobjekter beskrives ved hjelp av tabell-verktøyet. Elevene tar opp både bølge- og partikkelegenskaper og holder de opp mot hverandre, som gir dem et godt utgangspunkt til å vise forståelse for bølge-partikkel-dualitetens tvetydighet.

(58) Alex: Nei, min forståelse av det er at det er et objekt som har både partikkel- og bølgeegenskaper. Det er nesten litt sånn motstridende da. Det er litt merkelig da. Hvilken forståelse har dere?

Elias: At det kan, det er ganske generelt bra oppsummering da. At selv om det er et punkt, selv om det er et punkt så har det egenskaper til en bølge. Eller ikke da.

Alex: Ja, litt sånn som elektronene i spalteforsøket. At de fikk sånn interferensmønster og oppførte seg som en bølge.

Emil: Det at kvanteobjektet i antall så er de kvantisert, men i utbredelse er de kontinuerlige.

Alex: Men det kan være motsatt og, ikke sant. Også blir det et spekter nesten fordi det kan være litt kvantisert og ganske kontinuerlig. Var det ikke sånn da? At det ikke var sånn at det helte skikkelig mot en side, men at det kunne være som et spekter.

Emil: Også varierer det jo i forhold til hvilket forsøk man gjennomfører da. Om det er, om kvanteobjektet oppfører seg mest som en partikkel, eller mest som en bølge.

I likhet med Gruppe 1 framhevet Gruppe 2 i sitat (59) også at et kvanteobjekt har både bølge- og partikkelegenskaper, eller er en blanding mellom bølger og partikler. Gruppe 2 tar også opp at bølge- og partikkelegenskapene vil variere. Elevene viser at de fokuserer på kvanteobjektene egenskaper, framfor å se for seg om de er partikler, eller bølger.

(59) Daniel: Jeg tror det er en blanding mellom bølger og partikler. Tror jeg.

Frida: Et objekt som har både bølgeegenskaper og partikkelegenskaper, som du sier da.

Daniel: Så det er fokus på egenskapene og ikke hva det er.

David: Ja, det er at det er varierende hvilke egenskaper som er partikkelegenskaper og hvilke som er bølgeegenskaper, mellom hvert objekt.

Daniel: Eller det kan ha begge.

David: Ja, men liksom, hvilke egenskaper som kommer fra partiklene og hvilke som kommer fra bølgene, varierer med objektene.

Begge gruppene beskriver kvanteobjekter ganske likt, ved å si at det må ha både bølge- og partikkelegenskaper. Gruppe 1 tar i tillegg i bruk begrepene kvantisert, kontinuerlig, antall og utbredelse som de har lært gjennom tabell-verktøyet.

7.3.2 Hvordan elevene beskriver ikke-determinisme, superposisjon og måling

Ikke-determinisme, superposisjon og måling er sentrale, men utfordrende konsepter innenfor kvantefysikk. Her skal vi se nærmere på hvordan elevene snakker om disse.

Under, i sitat (60), kan vi lese hvordan Gruppe 1 diskuterer sammenhengen mellom ikke-determinisme på kvantenivå og determinisme på makronivå. De stiller et undrende spørsmål om hvordan kvantefysikk kan være ikke-deterministisk når vi opplever verden som deterministisk. Elevene tar opp to gode poeng om hvorfor vi opplever verden som deterministisk. Det første poenget handler om at skalaen er helt ulik på kvantenivå enn slik vi opplever den. Det andre poenget handler om antall. På kvantenivå vil man kunne måle utfallet av ett og ett kvanteobjekt, mens vi opplever gjennomsnittet av utallige utfall. Det vi opplever som determinisme er egentlig hvordan sannsynlighetene vil gå mot et gjennomsnitt og virke deterministisk.

(60) Elias: Men det jeg lurer på er. Er kvanter byggesteinene til noe som er deterministisk? Hvis jeg triller en ball, er det ikke-deterministisk da? Eller er det deterministisk fordi kvantene er ikke-deterministisk som gjør det deterministisk?

Emil: Det er sånn i større skala så blir det deterministisk, men hvis man deler det opp i mindre skala så er det ikke-deterministisk. Så noe som er deterministisk er bygd opp av masse ting som er ikke-deterministisk.

Alex: Men gir det ikke litt mening, hvis alle kvantene er basert på sannsynlighet også hvis du får mange samlet, så vil sannsynligheten for at en ball er en ball ...

Elias: At sannsynligheten for at noe rart skjer blir mindre. Fordi det er så mange.

Emil: Ja, det kan hende at de påvirker hverandre og det gjør at de trender mot en bestemt retning da. Så det gjør sånn at i større skala så blir det deterministisk.

Sitatet over er deres egne tanker da dette ikke er noe vi eksplisitt snakket om i timen og viser meget god evne til å reflektere over kvantefysikk og hvordan det henger sammen med hvordan vi opplever verden.

Superposisjon er et tema som ble snakket om i begge dobbeltime, samt i intervjuet, og i (61) kan vi se hvordan Gruppe 1 beskriver at kvanteobjektet er i alle posisjoner samtidig, som uttrykkes ved hjelp av sannsynlighet. De er ikke helt fornøyde med denne forklaringen og uttrykker frustrasjon siden man ikke kan vite hvordan kvanteobjektet kan oppføre seg på denne måten. At de synes superposisjon er rart viser at de har en viss innsikt i fenomenet. Sitatet er også med på å vise at elevene ofte tolker superposisjon som et uttrykk for stedsposisjon og ikke nødvendigvis tilstand.

(61) Alex: Jeg synes det gir mening, superposisjon. Som jeg tenkte på det før var at det bare var en sannsynlighet for at den var mange steder, men det var bare ett sted, men det at partikkelen eksisterer alle steder samtidig og at den kan påvirke seg selv, det synes jeg var skikkelig rart.

Elias: Det som er frustrerende er at jeg vet ikke hvordan den bestemmer seg hvor den skal være.

Under kan vi se at Gruppe 2, i (62), er enige med Gruppe 1 i at superposisjon er rart, ved å gi uttrykk for at superposisjon ikke gir mening for dem. De klarer fortsatt å uttrykke hva de mener med superposisjon.

(62) Frida: Altså, jeg synes ikke superposisjon gir så mye mening. Men, det er jo en sånne ting som det gir jo mening, eller det gir litt mening, men samtidig at noe er på alle plassene samtidig, det gir ikke mening.

Derek: Jeg synes det var litt vanskelig å forstå at når det er sånn dobbelspalting, med det der dobbelspalteforsøket, at når man sender inn ett og ett elektron så interferer de med seg selv, siden de er i superposisjon. Derfor blir det samme mønster som, eller derfor får de sånne bølgeegenskaper da.

De påpeker at det var vanskelig å forstå, som gir mening siden det ikke går an å «forstå» det. Hvis elevene mente de forsto superposisjon fullstendig hadde det tydet på at de egentlig ikke forsto det, siden det ikke er noe vi innenfor fysikk har en fullstendig forståelse av.

I sitat (63) nedenfor får Gruppe 1 uttrykt to viktig poeng med måling. De påpeker at systemet vil oppføre seg annerledes ved en måling og at dette skjer siden målingen vil påvirke systemet. En måling er ikke å se på hva som skjer på en passiv måte slik elevene snakker om i starten av beskrivelsen sin, men at man faktisk påvirker hva som skjer.

(63) Elias: Da forskerne fant ut at hvis du så på objektet, eller hvis du så på elektronet så oppførte det seg annerledes enn hvis du ikke så. Men det er jo som du sa at vi må være kritiske til det og. At du ikke faktisk kikker på det, men at du måler det. Sånn passiv og aktiv måling da.

Alex: Ja, og da må du måle aktivt og da påvirker det eksperimentet.

Også Gruppe 2 forklarer at målinger ødelegger for det man måler på, slik Gruppe 1 snakker om i (63). De vurderer i sitat (64) om det kan finnes bedre måleinstrumenter i framtiden, slik at man kan måle hvilken spalte et elektron går gjennom uten å ødelegge interferensmønsteret.

(64) Daniel: Med tanke på at målingen ødelegger da, så vet jeg ikke om vi kommer til å finne ut av det helt spesifikt.

David: Hvis vi finner opp et nytt måleinstrument som klarer det. Men det er bare sånn hva hvis da. Tenkt optimistisk.

Begge gruppene har gode beskrivelser av ikke-determinisme, superposisjon og måling og snakker om disse konseptene slik de gjorde i opptakene av diskusjoner fra undervisningen. Elevene bruker imidlertid ikke begrepene fra tabell-verktøyet like aktivt i løpet av intervjuene som de gjorde i gruppediskusjonene. Det kan ha sammenheng med at intervjuene ikke lenger var en del av undervisningssammenhengen der de lærte om tabell-verktøyet, men også at intervjuene fokuserte mer på hvordan de hadde opplevd undervisningen og det å snakke om kvanteobjekter.

7.3.3 Elevenes beskrivelse av kvanteobjekter og elektroner som partikler

Både Gruppe 1 i (65) og 2 i (66) nedenfor assosierer elektroner med partikler, noe de selv påpeker, og som vi også så uttrykt i løpet av de forrige delkapitlene. Gruppe 2 påpeker også at det er lett å se for

seg elektroner i dobbelspalteforsøket, siden man kan se for seg kuler som skytes ut. De uttrykker at de vet at et elektron er et kvanteobjekt, men at de tenker på partikler når de har med elektroner å gjøre.

(65) Alex: Jeg føler det er lett å tenke sånn om elektroner siden vi er så vant til å tenke på de som partikler.

(66) Daniel: For med et elektron så tenker jeg veldig tydelig en partikkel, så når den også skal være et kvanteobjekt så er det litt sånn ...

David: Men da vi så på det forsøket, så skjøt de jo sånne klinkekuler, og da er det litt lettere å sammenligne med elektroner.

I motsetning til hvordan elevene i (65) og (66) ovenfor snakker om kvanteobjektet som en partikkel, snakker Gruppe 2 i (67) nedenfor om hvordan det er lurt å tenke på et elektron i dobbelspalteforsøket som et kvanteobjekt, siden forsøket ikke ville fungert hvis elektronet var en partikkel. De har fått med seg at partikler ikke har visse egenskaper som er nødvendig for å få ønsket resultat i forsøket.

(67) Derek: Med tanke på dobbelspalteforsøket så er det greit å se på elektron som et kvanteobjekt da, for da hadde det jo ikke fungert hvis du hadde sett på et elektron som en partikkel.

I sitat (68) under uttrykker Elias fra Gruppe 1 at han føler at kvantefysikk egentlig er deterministisk, men at vi ikke vet nok, som er et uttrykk for skjulte variabler-tolkningen av kvantefysikk.

(68) Elias: Jeg føler at kvanter er deterministiske, jeg bare føler at vi ikke vet nok.

Gruppe 2 foreslår i (69) nedenfor at man kan unngå å ødelegge målingen ved å måle konstant for å se en endring, noe de selv tviler på. Det kan vise til deres forståelse av at det å gjøre en måling bare påvirker systemet idet måleinstrumentet blir ført inn i systemet, mens det egentlig vil påvirke så lenge instrumentet fortsetter å gjøre en måling.

(69) Frida: Det der med måling er litt sånn. Hvorfor kan vi ikke bare måle det uten å påvirke det?

David: Men kan man finne en måte å, der man kan måle konstant da, så man kan se endringen. Eller kommer det aldri til å gå?

Elevene korrigerer ved flere tilfeller hverandre i løpet av intervjuene, spesielt Gruppe 1 har flere slike tilfeller og det er derfor en av deres sekvenser er framhevet her. Det er med på å vise at de har fått med seg detaljene i det som har blitt undervist og er sikre nok i sin egen kunnskap til å rette på medelever. At elevene korrigerer hverandre er med på å vise at de er i stand til å diskutere temaene og kan peke ut uregelmessigheter. I sitat (70) under forklarer Gruppe 1 et kvanteobjekt og et elektron som en partikkel. Da tar de andre elevene ordet og stiller spørsmål ved dette utsagnet, siden disse egentlig er objekter som har både partikkel- og bølgeegenskaper.

(70) Elias: At det er ulike egenskaper, så det [kvanteobjektet] kan være en partikkel eller bølge, med egenskapene til hverandre.

Alex: Men er det en partikkel, eller en bølge? Er det ikke et sånt objekt som er verken partikkel, eller bølge. Men som viser samme, noen lignende egenskaper. Det er hvert fall mitt inntrykk at det.

Emil: Så den har egenskapene til begge deler, men man kan ikke si at det er en av tingene.

Elias: Men vi vet jo at et elektron er en partikkel, det vet vi jo.

Alex: Tydeligvis ikke da.

Elias: Ja, men det er jo en partikkel, men den har egenskapene til bølgen. Så det er fortsatt en partikkel.

Alex: Men er det en partikkel da? Hvis den har egenskapene til en bølge.

Gruppe 1 hadde flere slike eksempler siden de i større grad snakket med hverandre, mens Gruppe 2 hadde færre samtaler seg imellom og fokuserte mer på å svare direkte på spørsmålene.

Når vi snakker om kvantefysikk, snakker vi ofte om elektroner, noe elevene assosierer med partikler, som kan være problematisk siden partikler er klassiske objekter. Samtidig viser elevene at de er klar over at det finnes begrensninger for hva man kan forklare med partikler og de er klare over sine egne assosiasjoner.

7.3.4 Elevenes bruk av billedlige forestillinger

Denne kategorien tar for seg to ulike forestillinger, eller sammenligninger, elevene snakket om i intervjuene. Det handler om hvordan de kunne se for seg bølge-partikkel-dualiteten. Det er verdt å merke seg at måten det blir sagt på med humoristisk og ikke nødvendigvis seriøse forslag til tolkninger av kvantefysikk.

Forestillingen under, i (71), kan minne litt om streng-teori i sin framstilling av en partikkel som spagetti. Om det faktisk er inspirert av streng-teori, er uvisst. Dette bildet oppfyller imidlertid også utbredelse i rommet og kvanteobjekters kontinuerlige egenskaper, ved å se for seg hvordan en partikkel ikke trenger å være lokalisert til ett punkt.

(71) Elias: Gjør partikkelen om til spagetti og så er det en spagetti-partikkel, som bare er veldig lang.

Sitat (72) viser fram en annen analogi Elias kom med. Dette er en beskrivelse av et kvanteobjekt som minner om pilot-bølge-tolkningen av kvantefysikk, her i form av en spøkelsesbølge. Dette har ikke blitt forklart eller vist til elevene på noen måte, så det er interessant at elevene kom på dette selv. Man kan tolke at eleven uttrykker en type dualitet, siden konseptene partikkel og bølge sameksisterer.

(72) Elias: Det går ikke an å forestille seg det. Jeg forestiller meg at det er en bølge der, men den er usynlig så du ser ikke at det er en bølge der. Det er en spøkelsesbølge som får tingene til å oppføre seg som en bølge, men den er ikke det. Så jeg forestiller meg et elektron og så kommer det en spøkelsesbølge som gjør ting for elektronet.

Emil: At det er en sånn, et elektron som fører med seg en bølge liksom.

Det er interessant at det er samme elev som kommer med begge disse forestillingene og at han i tillegg kommer med andre interessante forestillinger i løpet av gruppediskusjonene. Det virker som om han har et stort behov for å se for seg ting som skjer og som konsekvens kommer han med mange metaforer. Det viser også at han ikke har en konsekvent måte å forestille seg kvanteobjekter på, men varierer og lager nye.

7.3.5 Elevenes opplevelse av å bruke kvanteobjekter og tabell-verktøyet

Denne kategorien handler om hvordan de opplevde begrepet kvanteobjekter og tabell-verktøyet, samt undervisningen og deres oppfatninger om kvantefysikk generelt.

Gruppe 1 forteller at kvanteobjekt kan være et vagt begrep som rommer mye, slik vi ser i (73). Når det dekker mye, kan det blir for bredt, som kan gjøre det vanskelig å forholde seg til.

(73) Alex: Jeg, personlig, synes at det er ikke så spesifikt da. Det dekker veldig mye, men jeg føler det er et veldig bredt begrep da.

Gruppe 2 snakker i (74) om hvordan de ser nytten av kvanteobjekter som et begrep som skilles fra bølger og partikler, siden kvanteobjekter oppfører seg på en helt egen måte, og de føler at det har gitt dem en bedre forståelse. Elevene opplever at siden kvanteobjekter er noe særegent burde det behandles som noe eget.

*(74) Frida: Påvirker ikke meg så veldig mye, men altså det må jo være greit å kunne skille mellom ting som bare har partikkelegenskaper og bare har bølgeegenskaper. I hvert fall fordi de [kvanteobjekter] oppfører seg på en annen måte. Og det er jo lurt å skille det, når vi vet mye mer om for eksempel bølger og partikler alene, mens kvanteobjekter er vanskeligere å vite om og måle og sånn der. Så det burde kanskje være et skille så det blir lettere å omtale det. Men jeg synes jo det har vært greit å ha et eget begrep for det når man skal snakke om ting som har begge egenskapene.
Derek: Jeg synes det har gitt meg litt bedre forståelse.*

Fra (75) under kan man hente ut at eleven fra Gruppe 1 snakker om hvordan andre regler gjelder for kvanteobjekter, slik at man ikke kan anta om man har med en bølge, eller partikkel å gjøre og at det da er mest hensiktsmessig å jobbe med begrepet kvanteobjekter. Det kan bety at eleven mener at man burde bruke kvanteobjekt som begrep i alle tilfeller istedenfor bølger og partikler, siden det alltid vil passe.

(75) Emil: Også når man bruker begrepet, så her kan vi ikke anta om det er en bølge, eller en partikkel, som vi holder på med, så vi må gjøre litt andre ting. Andre regler som gjelder.

Selv om elevene synes at tabell-verktøyet var til hjelp, som vi kan se under i sitat (76), at de synes det var vanskelig å forestille seg at et kvanteobjekt kunne være både kvantisert i antall og kontinuerlig i utstrekning, men som påpeker av dem selv, er det umulig å forestille seg. Hensikten med tabell-verktøyet er å kunne støtte seg på det istedenfor å måtte se det for seg.

*(76) Elias: Den var hjelpsom, veldig.
Alex: Den var, jeg synes det var vanskelig å tenke på at et kvanteobjekt kunne være kvantisert i antall, men utstrekning var kontinuerlig.
Elias: Det går ikke an å forestille seg det.
Alex: Men synes jo tabellen gjør en god jobb å forklare.
Elias: Men det er vanskelig da, fordi det er nye begreper. Som kvantisert, kontinuerlig, ja. Det er mye nytt.*

Vi kan se i sitat (77) at Gruppe 2 sier noe som ligner det Gruppe 1 sa i (76). Gruppe 2 uttrykker at de synes tabell-verktøyet var nyttig, men at det å skulle se for seg egenskapene var forvirrende, selv om de mente det hjalp dem med å se sammenhenger. De påpekte samtidig at kvantefysikk generelt var forvirrende, som var med på å gjøre begrepene i tabell-verktøyet vanskeligere å forstå.

(77) Frida: *Jeg skjønnte ikke helt den, for å se for seg. Jeg vet ikke. Jeg synes det ble litt forvirrende når antallet er kvantisert, men utstrekningen er kontinuerlig. Det ble litt sånn, hva betyr det egentlig. Så jeg synes det var litt forvirrende, men alt er jo litt forvirrende med det her da.*
David: *Jeg synes det hjalp meg med å forstå sammenhengen da.*
Derek: *Jeg synes den var veldig hjelpsom.*

I sitat (78) påpeker Gruppe 1 at tabell-verktøyet var et godt hjelpemiddel for å kunne bruke egenskapene til kvanteobjekter, når det er verken en bølge eller en partikkel. Det virker altså som om tabellen var noe elevene kunne støtte seg på, noe de viser gjennom å bruke den i diskusjonene sine.

(78) Elias: *Ja, en ting som er så liten at den har egenskaper, men ikke er. Det var det jeg ble forvirret av, at den hvis den er en bølge, men den er ikke en bølge. Den bare oppfører seg som en bølge noen ganger, vi vet ikke helt. Så det er sånn, den der var jo ganske bra, det arket der [peker på tabellen]. For den har egenskaper, at den er kontinuerlig eller kvantisert da.*
Emil: *Men det er verken eller.*

Spesielt Gruppe 2 framhevet hvordan tabellen kunne være vanskelig å bruke, som vi kan se i (79) og (80). I (79) framhever de hvordan de kunne bruke begreper i tabell-verktøyet som en start til å snakke mer utdypende om kvantefysikk, men også hvordan tabellen kunne være vanskelig å bruke hvis man ikke forstår hva den inneholder. Dette videreføres i (80) der det forklares hvordan det er viktig at begrepene kontinuerlig og kvantisert forklares godt, siden de var fremmede og vanskelige å forstå. Samtidig uttrykker også elevene i (80) at dette kan være en treningssak, siden det ble lettere å bruke tabellen etter hvert som de hadde hatt mer undervisning om den.

(79) Frida: *Vi prøvde litt, men det var kanskje litt vanskelig når vi ikke klarte å benytte den. Så ikke så veldig mye. Vi prøvde, men jeg skjønner den ikke så det ble litt vanskelig.*
David: *Nei, vi brukte den litt når vi sa om posisjonen var kvantisert, eller var kontinuerlig og sånn. Også utdypet vi rundt det, som hva det betyr i sammenheng med superposisjon og, ja.*
(80) Frida: *Ja, jeg tror at problemet er litt at jeg skjønner ikke helt hva det betyr at utstrekningen er kontinuerlig, eller at antallet er kontinuerlig. Så kanskje, hvis man vet litt bedre hva kvantisert og kontinuerlig betyr, eller klarer å se for seg det, så blir det litt lettere å bruke tabellen også. Og det kanskje hadde vært litt lettere å få med seg alt og forstå det litt bedre om jeg hadde mer kunnskap om partikler og bølger.*
Derek: *At etter den andre undervisningen så var det lettere å forstå tabellen.*

Gruppe 2 framhever, som vi kan se i (81), at til tross for at de opplevde vanskeligheter, synes de at kvanteobjekter var et begrep de ville ta i bruk istedenfor bølger og partikler når dette var relevant og at det tross alt var et begrep som var lett å bruke, selv når de ikke helt forsto det.

(81) Frida: *Ja, de begrepene som superposisjon og kvanteobjekt, jeg synes at det virker veldig lett å bruke begrepene, selv om jeg ikke skjønner alt. Og hvert fall kvanteobjekt jeg synes ikke det er et problem å bruke det. Jeg synes at de fungerer fint og jeg kommer til å, jeg vil heller bruke kvanteobjekt om det ikke er en bølge, eller en partikkel.*
Derek: *Så lenge man aksepterer at det er sånn, så er det lettere å forklare med de begrepene.*

Mot slutten av intervjuet kom Gruppe 2 med et poeng som framhevet at de synes kvantefysikk var generelt vanskelig, ved at de i sitat (82) tar opp hvordan de tidligere har stilt flere spørsmål i løpet av timene, men at kvantefysikk var såpass vanskelig at de ikke helt visste hvor de skulle starte å stille spørsmål. Dette kan være en grunn til at elevene var lite aktive i løpet av undervisningsøktene.

(82) Frida: Også føler jeg at når vi har hatt om ting, som når vi har hatt om relativitetsteori så har det kanskje vært litt lettere å stille spørsmål, som hva skjer her, men her er det litt sånn man kan såpass lite at det er vanskelig å stille spørsmål. For man vet ikke hva man ikke vet.

Dette delkapittelet om elevenes opplevelser har vært med på å fremheve utfordringer elevene hadde med begrepet kvanteobjekter, hvordan de forsøkte å se det for seg, hvilke egenskaper det hadde og hva de assosierte det med.

7.3.6 Oppsummering

Elevene tar opp mange av de samme temaene som de gjorde i opptakene av diskusjonene fra de to dobbeltimene. Måten de beskriver kvanteobjekter, superposisjon og måling stemmer godt overens med deres tidligere beskrivelser, men de har her muligheten til å legge til sine egne meninger og opplevelser av hvordan det var å jobbe med begrepene på denne måten. De påpekte at kvantefysikk generelt er vanskelig, som kan ha bidratt til at de opplevde begrepene og konseptene som vanskelige, og de snakket om at det var visse ting de bare måtte akseptere. Noen elever synes det ble lettere å bruke tabellen ettersom de fikk flere muligheter. Elever synes også at tabell-verktøyet var et godt startpunkt for videre diskusjon og at det var godt å kunne støtte seg på den, siden det var vanskelig å se for seg egenskaper når de ikke kunne forholde seg til hva et kvanteobjekt faktisk var. Elevene beskriver og diskuterer komplekse konsepter som ikke-determinisme og måling i dybden, og viser gode refleksjonsevner. I hovedsak har elevene hatt nytte av tabell-verktøyet og de viser gjennom diskusjonen sine at de klarer å ta i bruk verktøyet. De uttrykker også selv å ha opplevd at å bruke tabell-verktøyet var til hjelp for dem og noe de så nytten med. Elevene kan gjengi begrepene de lærer, som kvanteobjekt og fra tabell-verktøyet, de kan beskrive dem med egne ord, anvende begrepene på gode måter og diskutere kvantefysikk ved hjelp av begrepene. De påpeker tvetydigheter og motsigelser og viser at de kan være reflekterte som viser at de oppnådde et høyt taksonomisk nivå. Resultatene gir innsikt i hvordan elevene stort sett klarer å bruke kvanteobjekter og tabell-verktøyet, til tross for at de noen ganger opplevde kvantefysikk som vanskelig.

8 Diskusjon

I denne masteroppgaven har jeg utviklet og gjennomført et undervisningsopplegg om kvantefysikk som fokuserer på introduksjonen av kvanteobjekter, ved hjelp av tabell-verktøyet i Tabell 2, for å undersøke elevenes bruk av de nye begrepene. Bakgrunnen for dette er de nye kompetansemålene for Fysikk 2 der kvanteobjekt introduseres som begrep (Utdanningsdirektoratet, 2021). Siden det ikke er gitt konkrete forslag til hvordan man skal undervise om det, er det mer åpent for hva elever skal lære og hvordan lærere skal undervise. En stor del av arbeidet lagt ned i denne oppgaven er utviklingsjobben med undervisningsopplegget. Jeg har tatt for meg hvilke misoppfatninger som finnes, hvordan forebygge disse og hva innholdet i beskrivelsen av kvanteobjekter skulle være, siden det er et ontologisk bestridt objekt (Henriksen et al., 2018; Pereira & Solbes, 2022). Det man kan skjelve fra litteraturen om temaet er at det er viktig at undervisning om kvantefysikk eksplisitt tar for seg tvetydigheter og behandler begreper på konsekvente måter (Bouchée et al., 2022; Lautesse et al., 2015; van den Berg et al., 2020). Tabell-verktøyet brukt i opplegget er noe jeg har tatt med inn i undervisning og står verken i læreplanen eller lærebøker.

Det er tatt lydopptak av gruppediskusjoner og to gruppeintervjuer. Resultatene i kapittel 7 stammer fra denne datainnsamlingen og belyser elevenes bruk av og opplevelser med kvanteobjekter. Elevene viste at de mestret utfordrende temaer og tar i bruk både begrepet kvanteobjekter og tabell-verktøyet på hensiktsmessige måter i kontekster som måling og dobbelspalteforsøket. De har også vist at de kan oppnå alle de fire taksonomiske nivåene, at de kunne være kritiske og kunne se nyanser ved kvantefysikk.

Dette kapittelet vil diskutere forskningsspørsmålene presentert i 1.2 for å kunne besvare problemstillingen. Deretter vil implikasjoner av studien legges fram i form av en evaluering av undervisningsopplegget og anbefalinger for videre forskning samt lærebøkene. Avslutningsvis tar jeg for meg refleksjoner rundt oppgavens metodevalg.

8.1 Hvordan bruker elevene begrepet kvanteobjekter og tabell-verktøyet?

Kvanteobjekter slik de er beskrevet i tabell-verktøyet skiller seg fra bølger og partikler (Lévy-Leblond, 2003). Å kunne bruke kvanteobjekters egenskaper til å skille de fra klassiske objekter er et sentral aspekt ved kompetansemålet som mitt opplegg tar utgangspunkt i (Utdanningsdirektoratet, 2021). Bøe og Viefers (2021) og Henriksen et al. (2018) påpeker at kvanteobjekter ikke har en klassisk ekvivalens og er uavhengig bølger og partikler. Dette er elevene inne på i sine beskrivelser av partikler, bølger og kvanteobjekter i (44), og nevner det tydelig i sitat (45). Elevene bruker med dette kvanteobjekter som uavhengige klassisk fysikk og det kan virke som et tydelig skille mellom klassisk fysikk og kvantefysikk. Slik vi kan se i (20) og (21), bruker elevene kvanteobjekter og dets egenskaper

til å skille dem fra klassisk fysikk, og bølger og partikler. Det er svært viktig å kunne tydelig skille mellom kvantefysikk og klassisk fysikk (Feynman, Leighton, & Sands, 1963/2010; Bunge, 1967a; Bunge, 2003a).

Å assosiere kvanteobjekter med kun bølgeegenskaper eller partikkelegenskaper, slik de er klassisk, kan lede til misoppfatninger (Pereira & Solbes, 2022; Henriksen et al., 2018). Dette kan oppstå hvis elever ikke forstår hvordan disse egenskapene må henge sammen i kvantefysikk (Bøe & Viefers, 2021). I sitatene (13) og (14) omtaler Gruppe D og E kvanteobjekter som bølger og partikler. Denne måten å tenke på er en mer klassisk vinkling (Henriksen et al., 2018), som kan føre til flere misoppfatninger hvis denne bruken får fortsette i kontekster som krever et mer sammensatt bilde av kvanteobjekters egenskaper.

Elever bytter ofte mellom bølge- og partikkelperspektivet når de lærer kvantefysikk (Bouchée et al., 2022). Dette kan føre til at elevene blander perspektivene og bruker dem ukritisk, som kan være med på å forårsake misoppfatninger (Henriksen et al., 2018). I sitat (9) viser elevene at de kan ta i bruk tabell-verktøyet til å beskrive et kvanteobjekt uten å assosiere objektet med å være en bølge eller en partikkel. I noen tilfeller tar elevene i bruk billedlige forestillinger for å uttrykke sameksistensen av bølge- og partikkelegenskaper. Sitat (71) kan tolkes som et uttrykk av at kvanteobjekter kan oppføre seg som en partikkel, men ha en romslig utbredelse, ved at eleven forestiller seg en partikkel som spagetti. Et kvanteobjekt, slik Bunge (2003a) og Lévy-Leblond (2003) beskriver det, er en ny ontologi uten klassisk tilknytning. Elevene viser at de kan snakke om kvanteobjekter på en måte slik at de ikke trenger å bytte mellom bølge og partikkel. De viser i tillegg at de er gode til å påpeke motstridende egenskaper i løpet av opplegget og tvetydigheter der de opplever dem, som vi kan se eksempler på i sitatene (7), (10), (21) og (37). Her tar elevene i bruk begrepene fra tabell-verktøyet, også med egne ord, til å synliggjøre tvetydighetene de opplever. Dette står i kontrast med forskning som viser at elever sliter med å se sammenhenger og stort sett er naive og ukritiske til dualiteten (Bøe & Viefers, 2021; Henriksen et al., 2018). Dette tyder på at tabell-verktøyet slik det er introdusert i dette opplegget med en lærersentrert innføring etterfulgt av gruppediskusjoner kan hjelpe elevene med å forebygge skiftende perspektiver og identifisere motstridende egenskaper, ved å bruke begreper som kvantisert og kontinuerlig som tydeligere skiller kvanteobjekter fra bølger og partikler.

Et viktig aspekt ved å forebygge misoppfatninger hos elevene er at de selv kan peke ut utfordringer de møter når de ser for seg bølger og partikler (Henriksen et al., 2018; Pereira & Solbes, 2022), som er noe elever ofte sliter med (Bøe & Viefers, 2021; Bouchée et al., 2023). Elevene i denne studien viser imidlertid gode refleksjonsevner i (16), når de peker ut akkurat slik dette. De påpeker hvordan å se for seg bølger og partikler kan føre til mistolkninger om man ikke er forsiktig, som kan hjelpe med å bygge forståelse. Både sitat (15) og (17) viser at elevene ser fordeler med å bruke kvanteobjekter, nettopp

siden det ikke er assosiert med klassiske begreper som bølger og partikler. Samtidig uttrykker de i (16) og (17) et behov for noe kjent, som ikke trenger å være problematisk siden de kjenner konsekvensene (Bouchée et al., 2022). Begge gruppene i intervjuet tar opp bølge- og partikkelegenskaper når de i (58) og (59) beskriver kvanteobjekter. Spesielt i (58) bruker elevene tabell-verktøyet samtidig som bølger og partikler påpekes som motstridende. Elevene viser eksplisitt at de forstår begrensningene språk har til å uttrykke kvantefysikk og at det er konsekvenser når begreper allerede har klassiske assosiasjon, som er noe Bouchée et al. (2022) påpeker som sentralt i utviklingen av konseptuell forståelse.

Skillet mellom kvantefysikk og klassisk fysikk er vanskelig og byr spesielt på utfordringer med tanke på *sannsynlighet, ikke-determinisme, uskarphet* og *superposisjon*, siden dette er kontra-intuitive måter å tenke på (Krijtenburg-Lewerissa et al. 2017; Bouchée et al., 2022). Opplegget jeg har utviklet bruker imidlertid ikke-determinisme som en grunnleggende egenskap til kvanteobjekter. Dette førte til at elevene ofte bruker determinisme i klassisk fysikk og ikke-determinisme i kvantefysikk som et skille mellom dem, og de snakker da om hvordan man må forholde seg til sannsynligheter i kvantefysikk som for eksempel i (10), (23), (41), (42) og (60). De brukte generelt hensiktsmessige forklaringene som er i samsvar med litteratur (Feynman, Leighton, & Sands, 1963/2010; Bunge, 2003a; Lévy-Leblond, 2003). Det viser et mer positivt resultat enn Krijtenburg-Lewerissa et al. (2017) sin beskrivelse av hvordan elever sliter med å beskrive ikke-deterministiske hendelser. Det kan komme av at kvanteobjekter er ikke-klassiske og kan dermed være lettere å assosiere med noe ikke-deterministisk, enn noe klassisk.

En grunn til at elevene i denne studien har en konsekvent bruk av *ikke-determinisme*, kan skyldes at konseptet har stått sentralt og blitt framstilt konsekvent i hele undervisningsopplegget. Dette er faktorer Bouchée et al. (2022), van den Berg et al. (2020) og Huseby og Bungum (2019) framhever som viktig for å at elevene skal lykkes og kan tyde på at undervisningsopplegget har støttet elevene på egnede måter. Spesielt viser sitat (60) en reflektert tilnærming til ikke-determinisme ved å hente fram poenger vi ikke hadde snakket om i timene, men som også finnes i litteraturen (Feynman, Leighton, & Sands, 1963/2010). Elevene forklarer for eksempel i sitat (60) sammenhengen mellom ikke-determinisme og determinisme ved å se på skalaen det foregår på og antallet. På makroskala vil fenomenet komme til synes gjennom mange små objekter som styres av sannsynlighet på mikroskala og det er middelvei av disse vi opplever som determinisme. Bøe og Viefers (2021) trekker fram at det å se sammenheng mellom ulike skalaer er viktig for å bygge kunnskap. Elevsitat (50) gir et annet eksempel som støtter denne forståelsen. Elevene viser sammenhengen mellom ikke-determinisme og interferens ved å ta i bruk tabell-verktøyet, som er temaer tidligere forskning påpeker at elever kan slite med (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017; Huseby & Bungum, 2019).

Superposisjon er et spesielt vanskelig konsept, som kan komme av at elever har vanskeligheter med bølgeegenskaper og hvordan dette relaterer til uskarphet og kontinuerlige egenskaper (van den Berg et al., 2020). Elevene nevner hvordan bølgeegenskaper, kontinuerlig utstrekning og superposisjon er vanskeligere å visualisere og akseptere, slik (33), (37) og (53) framhever. Samtidig sier de i (32) at dobbelspalteforsøket gir mest mening forklart med bølgeegenskaper. Spesielt (53) kobler dette opp mot at partikler er lettere å visualisere siden de har kvantisert antall og utstrekning, som reflekteres av tidligere forskning (Bouchée et al., 2023; Henriksen et al., 2018), samtidig som bølgeegenskaper viser seg å være vanskeligere å se for seg (van den Berg et al., 2020). Tidligere forskning viser at kvanteobjekter antakelig kan gi færre slike problemer (Lautesse et al., 2015). Elever har behov for å se for seg hva som skjer, som kan være utfordrende med superposisjon (Bungum, Bøe, & Henriksen, 2018; Bøe & Viefers, 2021). Til tross for dette viser elevene i min undersøkelse at de kan forklare superposisjon, som for eksempel i (42). Samtidig oppnår de ikke det høyeste taksonomiske nivået, siden de sliter med å se sammenhenger mellom superposisjon og sannsynlighet. På den andre siden viser sitat (10) at enkelte elever ser denne sammenhengen og peker ut hvordan dette motstrider partikkelegenskaper, som tyder på at eleven ser et behov for bølge- eller uskarpe egenskaper. I tillegg tolker ofte elevene superposisjon som kun et uttrykk for sted og ikke nødvendigvis tilstand, som sitat (61) er et eksempel på. Dette kan komme av selve ordet *superposisjon*, men også av at man i dobbelspalteforsøket må ta for seg at kvanteobjekter går gjennom begge spaltene samtidig som har med posisjon å gjøre. Det viser imidlertid en begrenset forståelse av superposisjon.

Bølgeegenskaper står sentralt i *dobbelspalteforsøket* (Feynman, Leighton, & Sands, 1963/2010). van den Berg et al. (2020) foreslår at dobbelspalteforsøket kan hjelpe elever med å visualisere både partikkel- og bølgeegenskaper, når ett og ett kvanteobjekt skytes ut. Det er mulig å bruke partikler og materiebølger til å snakke om interferensfenomenet for objekter med masse (Bunge, 2003a) som lærebøkene er inne på (Callin et al., 2022; Fossum et al., 2022), men dette kunne ha ført til en mer utbredt bruk av partikler istedenfor kvanteobjekter, som ikke er hensiktsmessig med tanke på at bølgeegenskaper står sentralt i *dobbelspalteforsøket*.

Kijtenburg-Lewerissa et al. (2017) påpeker i sin omfattende studie at det er vanlig for elever å utelukkende forstå elektroner som partikler, noe som kan unngås ved å bruke alternative begreper uten klassisk tilknytning som kvanteobjekt (Henriksen et al., 2018; Greca & Friere, 2003). Elektroner assosieres ofte med partikler når de snakkes om i flertall, siden de da virker som separate objekter og minner om et partikkelperspektiv (Bouchée et al., 2022). Det finnes tendenser til partikkelperspektivet i elevsitatene (51) og (52) der elevene bruker partikkel til å beskrive elektroner, som kan komme av at de synes partikler er lettere å se for seg (Pereira & Solbes, 2022; Bouchée et al., 2023). I tillegg kan dette stamme fra at bølger og bølgeegenskaper ofte er vanskeligere å konseptualisere (van den Berg

et al., 2020), som eksemplifiseres av elevene i sitat (53) ved at de foretrekker partikler fordi bølger er vanskelig å visualisere. I kombinasjon kan disse to faktorene gjøre det utfordrende for elevene om de fortsetter å assosiere elektroner, eller kvanteobjekter mer generelt, med partikler. Elevene viser at de er vant til å tenke på elektroner som partikler ved å snakke om hvordan assosiasjoner med klassiske objekter er problematiske, i (54), (55), (65), (66) og (67). Dette viser at de er på riktig vei og assosiasjonene er ikke like problematiske om elevene er selvbevisste (Bouchée et al., 2022). Det er derfor viktig å framheve kvanteobjekter som distinkte (Bunge, 2003a).

Å forstå *interferens* som en kollisjon mellom partikler er en ganske vanlig misoppfatning og kan relateres til en klassisk oppfatning av objekters baner, eller hvordan individuelle kvanteobjekter måles for å til slutt utgjøre et interferensmønster (Bouchée et al., 2022; Bunge, 2003a; Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017; Henriksen et al., 2018). I denne studien viser resultatene at to av fem grupper til tider konseptualiserte interferens som slike støt mellom partikler, som (46) til (49) eksemplifiserer. Interferens er et abstrakt fenomen som gir uttrykk for bølgeegenskaper (Feynman, Leighton, & Sands, 1963/2010). Elevene uttrykte at bølger er vanskelige, mens partikler er lettere å se for seg, som kan ha bidratt til at de foretrekker et partikkelperspektiv. Bouchée et al. (2022) trekker fram at dette kan komme fra elevenes klassiske syn på partikler, mens Bunge (2003a) påpeker at dette kan stamme fra at de ikke forstår kvanteobjekters bølgeegenskaper. Misoppfatningen kommer da sannsynligvis fra elevenes forståelse av hvordan klassiske partikler oppfører seg. Undervisningen som er gjennomført i forbindelse med denne oppgaven påpekte tydelig at interferens ikke var støt, som også kan være grunnen til at de fleste elevene ikke hadde denne misoppfatningen. Elevene i sitatene (48) og (49) starter med støt, men beveger seg bort fra dette og mot å ta i bruk tabell-verktøyet eller sannsynlighet. Alex i Gruppe A tar mest konsekvent opp interferens som støt, noe vi kan se i (46), (47) og (48), men ender med å rette på seg selv i (48). Videoen om Dr. Quantum (FreeScienceLectures, 2007) nevner at fysikere først antok at interferens ble skapt av at partikler krasjet med hverandre og at dette fort ble motbevist. Videoen bruker imidlertid ikke begrepet kvanteobjekt, men ord elevene allerede kan assosiere med klassisk fysikk. Det er vanskelig å vite om dette var en bestemmende faktor i dannelsen av denne misoppfatningen blant elever i denne studien.

Man kan ikke forvente at eleven har helt konsekvente måter å beskrive fenomener på (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017; Huseby & Bungum, 2019), siden de fortsatt er i en læringsprosess. De fleste av elevenes forklaringer av interferens viser seg i lys av dette å stort sett beskrive fenomenet på en hensiktsmessig måte for deres nivå, i både diskusjonene og intervjuene, slik vi kan se i (32), (40), (41), (42) og (62). Her tar elevene opp sannsynlighet, superposisjon og bølgeegenskaper når de snakker om dobbelspalteforsøket og interferens. De viser, for eksempel i (42), en implisitt forståelse for at interferens kommer av en kontinuerlig utstrekning når de beskriver at interferensen ødelegges når

elektronet måles og blir kvantisert. Istedenfor å måtte bytte perspektiv mellom bølge og partikkel når elevene snakker om interferens (Bouchée et al., 2023; Bouchée et al., 2022; Henriksen et al., 2018), kan de heller snakke om kontinuerlige og kvantiserte egenskaper og forholde seg til en konsekvent ontologi, som kan føre til mindre forvirring for elevene i samsvar med hva Bunge (2003a) hevder.

Måling pekes på som utfordrende for elever, spesielt om det ikke gjøres eksplisitt (Huseby & Bungum, 2019; Pereira & Solbes, 2022). Derfor ble måling som interaksjon framhevet og tydeliggjort gjennom hele undervisningsopplegget, i tråd med anbefalingene til Huseby og Bungum (2019), Henriksen et al. (2018) og Bøe og Viefers (2021) angående hvordan man tilnærmer seg målinger og tolkninger i kvantefysikk. Sitater som (11), (12), (24) og (25), er eksempler på at elevene i denne studien beskriver en måling som aktiv, som noe som interagerer med systemet og kan ødelegge og påvirke systemets tilstand. Forståelsen av måling som interaksjon er svært konsekvent blant elevene. Disse resultatene tyder på at misoppfatningen om at en måling kan gjøres ved å se på noe eller målingen ikke påvirker systemet, kan forebygges av det utviklede opplegget. Dette tyder på at undervisningen i stor grad har lyktes med å formidle dette. Sitatene (36) og (63) er gode eksempler på hvordan elevene oppdaget og reflekterte over misledende informasjon og forenklete forklaringer, i dette tilfellet om videoen til Dr. Quantum (FreeScienceLectures, 2007). Det viser at de er på et høyt taksonomisk nivå ved å ha både gode og reflekterte beskrivelser av konseptet, samtidig som det settes i kontekst med dobbelspalteforsøket.

Elevene i denne studien har få misoppfatninger om måling, og ingen knyttet til interaksjon. At elever tolker målinger og instrumenter som usikre påpekes av Krijtenburg-Lewerissa et al. (2017) og Huseby og Bungum (2019), og kan komme fra undervisning om måleusikkerhet (Bouchée et al., 2023). Usikkerhet behandles ulikt i klassisk fysikk og kvantefysikk, som begrenser det kvantefysiske språket (Bouchée et al., 2022), og kan være kilden til utfordringene resultatene viser at elevene opplever. I (26) og (27) snakker de om at målingen blir unøyaktig når systemet påvirkes, når dette egentlig er systemets uskarphet. Uskarphet er et komplisert tema (Bøe & Viefers, 2021; Bungum, Bøe, & Henriksen, 2018; Bouchée et al., 2022) og handler om kvanteobjektets kontinuerlige egenskaper, som er vanskelige å konseptualisere (Henriksen et al., 2018; van den Berg et al., 2020). Også elevsitat (64) er et eksempel der elevene ikke tenker på uskarphet som fundamental, men tenker at resultatet er mer nøyaktig om vi hadde bedre måleinstrumenter. To strategier for å rette dette opp er å gjøre uskarphet mer eksplisitt for elevene (Huseby & Bungum, 2019) og å bruke kvanteobjektets ikke-deterministiske natur til å skape et nyansert bilde av uskarphet (Bouchée et al., 2022). Opplegget utviklet i denne oppgaven introduserer kun uskarphet gjennom å beskrive kvanteobjekter som kontinuerlige og ikke-deterministiske. Uskarphetsprinsippet er noe som kan utforskes mer i videre undervisning. Sitat (22)

og (60) viser imidlertid at elevene i studien kan ha fanget opp essensen av uskarphet, som viser at Bouchée et al. (2022) sitt forslag om å bruke ikke-determinisme kan være en god inngang.

Elever har en tendens til å være naive realister, eller å beholde en klassisk forståelse (Henriksen et al., 2018). Elevene hadde varierende tolkningsperspektiver, men foretrakk et realist-perspektiv, noe som stemmer overens med funn fra Pereira og Solbes (2022) sin undersøkelse. Elevenes tendens til å bytte mellom forklaringer kan forebygges gjennom konsekvent bruk av terminologi og at tvetydighetene som finnes må gjøres eksplisitte for elevene (Lautesse et al., 2015; Bouchée et al., 2022). Det finnes eksempler i resultatene mine der vi kan se hvordan elevene gir uttrykk for ulike tolkninger, selv om opplegget er basert på et realist-perspektiv. I (24) har elevene et mer realistisk bilde på måling og beskriver prosessen som skjer for at målingen påvirker fenomenet, mens (12) og (14) kan tolkes som en kollaps av bølgefunksjonen og ligner på København-tolkningen (Bunge, 2003a). I tillegg kan sitat (72) minne om pilot-bølge-tolkningen (Garritz, 2013; Bunge, 2003a). Alle fire utsagnene er fra samme elev, som viser at elevene ikke alltid er konsekvente verken på tvers av grupper, eller mellom egne utsagn. Det viser også at til tross for at opplegget er inspirert av et realist-perspektiv, ender ikke nødvendigvis elevene opp med det samme perspektivet. Det er viktig å være klar over at elevene kan ha blitt dyttet mot et realist-perspektiv siden opplegget er basert på realistene Bunge (2003a) og Lévy-Leblond (2003), men det viser seg at elevene ikke utelukkende hadde denne oppfatningen.

Et viktig element i å forebygge misoppfatninger er at elevene er klar over begrensningene av analogier og modeller (Bouchée et al., 2022). Elevsitatene (31) og (72) kan vise at elevene har forståelse for at modeller ikke alltid samsvarer med virkeligheten. Tabell-verktøyet vil da forebygge at elevene lener seg på eksisterende klassiske modeller. Elevene bruker klassiske analogier i sitatene (29), (30) og (55), men som de forklarer i (16), (55) og (72), er de klar over hvordan en slik visualisering ikke nødvendigvis beskriver virkeligheten, og at den har begrensninger. Den klassiske analogien i (30) viser at man kan bruke analogier så lenge man er bevisst på begrensningene, siden den gir elevene et tydelig bilde på hvordan en måling vil påvirke et kvanteobjekt uten å innføre misoppfatninger. Dette kan tyde på at opplegget gir nødvendig støtte, noe Bouchée et al. (2022) hevder er viktig for elevenes forståelse.

Oppsummert viser resultatene at alle gruppene tar i bruk begrepet kvanteobjekter og beskriver det og kvantefysiske fenomener ved hjelp av tabell-verktøyet. Elevene viser at undervisningsopplegget har gitt dem støtte til å håndtere å tolke kontra-intuitive konsepter og fenomener, overgangen fra klassisk fysikk til kvantefysikk og å forstå språkets begrensninger. Sammenlignet med tidligere forskning utviser elevene generelt en god og kritisk holdning til bølge-partikkel-dualiteten, ved å oppdage og påpeke tvetydigheter, ofte ved å ta i bruk begrepene fra tabell-verktøyet i sine beskrivelser. Dette viser at elevene klarer å se sammenhenger og begrensninger. De viser en god forståelse for ikke-determinisme

og måling og kan gi reflekterte forklaringer. Dette er spesielt utfordrende temaer, som viser at elevene har kommet langt på relativt kort tid. Måten de tar i bruk de innførte begrepene på til å gi utdypende og reflekterte beskrivelser av kvantefysikk og skillet mellom klassisk fysikk og kvantefysikk, tyder på at begrepene har vært en nyttig del av læringsprosessen til elevene og har skapt et grunnlag de kan fortsette å bygge på i videre undervisning om temaet.

8.2 Hvordan opplever elevene å bruke kvanteobjekter og tabell-verktøyet?

Elevenes opplevelser er subjektive og vil variere fra elev til elev. Det er fortsatt en viktig del av undervisning å kunne ta hensyn til og tilpasse seg etter hva elevene opplever og erfarer. Store deler av intervjuene fokuserte på å utdype elevenes opplevelser og erfaringer med opplegget og bruken av kvanteobjekter og tabell-verktøyet. Elevene uttrykte at de opplevde kvantefysikk og kvanteobjekter som utfordrende, men at de foretrakk å snakke om kvanteobjekter og deres egenskaper, framfor bølger og partikler.

Kvantefysikk og begrepet kvanteobjekt er abstrakt og oppleves slik av elevene, noe blant annet Henriksen et al. (2018) og Bouchée et al. (2023) beskriver. Dette peker også elevene på i denne studien. Gruppe 1 trekker i sitat (73) fram at de synes kvanteobjekt er et vagt begrep, som kan reflektere en opplevd abstrakthet. Derimot opplever de også at det dekker mye, som kan tyde på at de ser på det som nyttig. Samtidig kan abstrakthet føre til at elevene sliter med å visualisere fenomenet (Bouchée et al., 2023) og kan i denne prosessen tilegne kvanteobjektet klassiske egenskaper (Bouchée et al., 2022). Til tross for dette viser elevene i sitatene (3) og (6) til (9) fra gruppediskusjonene at de tar i bruk kvanteobjekter og forklarer de tilhørende egenskaper på gode måter, både direkte og med egne ord.

Både Gruppe 1 og 2 synes kvantefysikkundervisningen var vanskelig. Gruppe 2 uttrykte i større grad at de opplevde kvantefysikk, kvanteobjekter og tabell-verktøyet som utfordrende. De synes det var mange nye og vanskelige begreper å forholde seg til, slik at det kunne oppleves som forvirrende, noe vi kan se i sitatene (77), (79), (80) og (82). Dette kan komme av den abstrakte og kontra-intuitive naturen som skiller seg fullstendig fra deres klassiske forståelse (Bouchée et al., 2022; Bunge, 2003a; Henriksen et al., 2018). Elevene uttrykte at de opplevde begrepene kvantisert antall og kontinuerlig utstrekning som vanskelige, slik (76), (77) og (80) illustrerer. Dette er, som de nevner, nye begreper for dem. Videre forklarer de i både (76), (77) og (78) at de opplevde at tabell-verktøyet og kvanteobjekter var til hjelp, blant annet som alternativ til å skulle forstå egenskapene og for å forstå sammenhenger, noe Bøe og Viefers (2021) peker på som utfordrende for elever. Og i (80) understreker de at dette var lettere å forstå etter hvert som de fikk bruke dem mer og mer. Det kan bety at de trenger mer tid, støtte og tilbakemeldinger på bruken av de spesifikke begrepene som ble brukt i tabell-verktøyet (Bouchée et al., 2023).

Elevene snakker om at det var forvirrende når de måtte forholde seg til objekter som kunne være en bølge, og så var det ikke en bølge. Når denne problematikken tas opp i (78), fortsetter eleven med å forklare at han opplevde at dette forbedret seg når han tok i bruk tabell-verktøyet og heller tenkte på egenskapene som kontinuerlig og kvantisert. Utfordringer med perspektivbytte framheves som utfordrende i forskningslitteratur, som for eksempel i Bouchée et al. (2022) og Henriksen et al. (2018) og om det viser seg at tabell-verktøyet kan støtte elevene kan dette ha en positiv innvirkning på slike utfordringer. I (81) uttrykker elevene at de opplever kvanteobjekt som det beste alternativet, framfor bølge og partikkel. Det kan tyde på at de synes det var utfordrende å måtte bytte mellom bølger og partikler, noe de ikke erfarte da de brukte kvanteobjekt. Dette poenget underbygges videre av (75) der en elev tydelig framhever at når man bruker kvanteobjekt trenger man ikke anta om noe er bølge og partikkel. Elevene har dermed en mer konsekvent ontologi å forholde seg til som er viktig for å utvikle et sammenhengende konseptuelt rammeverk (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017; Bouchée et al., 2023; Lautesse et al., 2015). Ved at undervisningsopplegget introduserer kvantefysiske begreper kan elevene differensiere mellom det klassiske og det kvantefysiske på konsekvente måter, istedenfor å måtte bytte ontologi mellom partikkel- og bølgeperspektivet (Henriksen et al., 2018; Bouchée et al., 2022). Tabell-verktøyet kan tilby en konsekvent tilnærming til kvantefysisk terminologi, noe Lautesse et al. (2015) hevder er sentralt i utviklingen av elevenes forståelse og kan forebygge unødvendig forvirring. Gruppe 2 tar dette opp i (74) der de snakker om hvordan de opplevde at tabell-verktøyet fungerte godt som et skille fra det klassiske og at det da blir lettere å snakke om kvantefysikk. At de har en erfart nytte av å kunne skille mellom kvantefysikk og klassisk fysikk, viser at de også har en viss forståelse for dette skillet.

Frida fra Gruppe 2 forteller at det er begrepenes betydning hun opplevde som vanskelig å se for seg, som kan stamme fra utfordringer hun har med å visualisere begrepene (Bouchée et al., 2023; Henriksen et al., 2018). Gruppe 2 er imidlertid enige i (81) i at de foretrekker å bruke kvanteobjekt framfor bølge og partikkel, siden de synes det er mer dekkende. Frida legger til at hun synes begrepene opplegget introduserte var enkle å bruke selv om hun ikke helt forsto dem. Gruppen uttrykker at de foretrekker kvanteobjekter framfor andre begreper og erstatter dermed klassiske begreper som bølge og partikkel med kvanteobjekt, som vil føre til færre klassiske assosiasjoner og dermed vil det kunne skape færre misoppfatninger (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017; Henriksen et al., 2018; Lautesse et al., 2015; Bunge, 2003a). Dette er blant annet som følge av at det klassiske språket har begrensninger (Bouchée et al., 2022). At Frida beskriver utfordringer samtidig med fordeler kan tolkes som et behov for en dypere forståelse, eller et «riktig» svar, som ikke nødvendigvis er mulig i kvantefysikk (Angell et al., 2019). Det hun uttrykker er imidlertid en refleksjon av flere elevers generelle frustrasjon med å ikke få entydige svar i løpet av både undervisningen og gruppediskusjonene.

Elever synes det er vanskelig å forestille seg bølger og bølgeegenskaper (van den Berg et al., 2020; Henriksen et al., 2018). En kontinuerlig posisjon uttrykker kvanteobjektets uskarpe egenskaper, som er viktig for å forstå en rekke fenomener og er ofte utfordrende for elever delvis siden det går mot klassisk intuisjon (van den Berg et al., 2020; Bøe & Viefers, 2021; Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017). Som vi så i sitatene (51), (52) og (53), foretrakk elevene ofte partikkelperspektivet framfor bølgeperspektivet, noe som støttes av Pereira og Solbes (2022) og Bouchée et al. (2023). Slik van den Berg et al. (2020) påpeker, kan dette være siden elever sliter med å se for seg bølger som spredt utover i rommet, som støttes av at elevene i (53) synes bølger er vanskelig å forklare og visualisere. Også Henriksen et al. (2018) henviser til at konseptet bølge kan være utfordrende for elever og at assosiasjoner mellom kvanteobjektets bølgeegenskaper og klassiske bølger ofte fører til uproductive visualiseringer. Videre påpeker de at nøkkelen til dette problemet kan ligge i hvordan kvanteobjektets uskarpe egenskaper beskrives, noe som undersøkes i denne oppgaven gjennom introduksjonen av kvanteobjektets kvantiserte og kontinuerlige egenskaper. Elevene synes superposisjon er et vanskelig konsept. I sitat (43) snakker elevene om utfordringer med å forklare interferens, men kobler det imidlertid mot at et kvanteobjekt kan være overalt samtidig, som er et uttrykk for kvanteobjektets kontinuerlige egenskaper. Dette kan tolkes som et uttrykk for superposisjon, som blir pekt på som spesielt utfordrende for elevene (van den Berg et al., 2020).

Selv om elevene opplevde bølgeegenskaper som utfordrende, klarer de for eksempel i (22) og (48) å formulere uskarpe egenskaper gjennom å bruke tabell-verktøyets begreper, eller ved å beskrive kvanteobjekter som overalt samtidig. Også i (79) er elevene inne på uskarpe egenskaper når de snakker om kvanteobjektets kontinuerlige utstrekning og at de brukte det til å snakke om superposisjon. Elevene kan danne hensiktsmessige forklaringer som kan minne om uskarphet, ved å støtte seg på kvanteobjekter og deres egenskaper.

Tidligere i dette delkapitlet ble elevenes opplevelser av hvordan kvanteobjekt hjalp dem med å skille mellom klassisk fysikk og kvantefysikk framhevet. De viser denne forståelsen i gruppediskusjonene for eksempel i (10), (21) og (22). Å være klare over dette skillet kan hjelpe dem med å utvikle en mer kritisk holdning (Henriksen et al., 2018), noe sitatene (10), (21), (44), (67) og (70) er med på å vise at de har. Å kunne se på skillet med en kritisk holdning kan hjelpe elevene med å se at et bølge- eller et partikkelperspektiv utgjør et klassisk ståsted, og en kvantefysisk ontologi som allerede har forent bølge- og partikkelperspektivet kan hjelpe dem med å utvikle en bedre forståelse (Henriksen et al., 2018; van den Berg et al., 2020). Tabell-verktøyet er med på å innføre denne ontologien og er et redskap for å bruke den konsekvent, slik at den kan ha bidratt til at elevene opplevde et tydelig skille og en kritisk holdning til klassiske sammenligninger. Hvordan elevene opplever ulike aspekter ved å bruke kvanteobjekter kan altså være svært nyttig for å identifisere hvilke konsepter som trenger mer

oppmerksomhet i undervisningen. Ikke bare hvilke misoppfatninger elevene har er viktig, men de medfølgende oppfatningene og opplevelsene vil kunne veilede hvilke steg som er nødvendig for å nå fram til elevene. Til tross for at flere elever opplevde forvirring og frustrasjon, har de vist at de er mer enn kapable til å snakke om og diskutere kvantefysiske konsepter ved hjelp av kvanteobjekter og tabell-verktøyet, noe de viser i de fleste av utsagnene representerte i resultatene i kapittel 7, og som er diskutert i 8.1.

Begge gruppene som ble intervjuet var inne på at det var utfordringer å måtte skifte mellom ulike perspektiver og at bruken av kvanteobjekter og dets egenskaper var med på å støtte dem, slik at de kunne bruke et mer konsekvent språk. Det kan derfor tyde på at kvanteobjekter og tabell-verktøyet er nyttig for elevenes opplevelse av å snakke om kvantefysikk, siden de hadde en positiv opplevelse. Samtidig viser gruppediskusjonene deres at de kan ta begrepene i bruk på hensiktsmessige, reflekterte og være kritiske. Det er viktig å tenke på den begrensede tiden elevene har hatt til å tilegne seg denne kunnskapen, og at det er konsepter som ble bygget videre på i senere undervisningsøkter etter dette opplegget. Elevene viste til tross for den begrensede tiden at de kunne ta i bruk de verktøyene de fikk introdusert på hensiktsmessige måter og er på denne måten med på å demonstrere nytten av tabell-verktøyet og kvanteobjekt som begrep. Å utvikle kunnskap om kompliserte konsepter som ikke-determinisme, sannsynlighetsfordelinger og superposisjon oppleves ofte som utfordrende av elever, men de viste at de fikk det til, selv på kort tid.

8.3 Implikasjoner av studien

Dette kapitlet tar for seg implikasjoner av studien og anbefalinger for videre forskning, undervisning og lærebøker. Først evalueres opplegget som er utviklet i denne oppgaven og jeg vil foreslå tilpasninger som kan gjøres. Videre legger jeg fram mangler og mulige forbedringer jeg har oppdaget i løpet av studiens gang. Blant annet presenteres det implikasjoner for undervisning av kvanteobjekter og anbefalinger for lærebøkene for å best mulig kunne støtte elever og lærere. Anbefalingene er generelle og ikke ment som kritikk.

8.3.1 Mulige tilpasninger

Dette delkapitlet har til hensikt å framheve aspekter ved undervisningsopplegget som var uforutsette, eller spesielt utfordrende, slik at disse kan forbedres, eller slik at man kan være klar over eventuelle utfordringer man kan møte på. Dette inkluderer hvilken klassedynamikk man har, hvordan visse konsepter må gjøres enda mer eksplisitte og eventuelle begreper og konsepter som burde fokuseres ekstra på siden disse viste seg å være vanskeligere enn antatt.

Elevene var relativt lite aktive i løpet av de lærersentrerte delene av undervisningen, noe en elev tar opp i sitat (82). Dette kan ha kommet av at de opplevde kvantefysikk som såpass abstrakt og

annerledes enn de var vant til (Bouchée et al., 2022; Bunge, 2003a; Henriksen et al., 2018), slik at de ikke visste hva de kunne spørre om, noe sitatet underbygger. En eventuell framgangsmåte for å trygge elevene kan være å legge vekt på at det ikke alltid er riktige svar, at de har lov til å være kritiske og at alle deres tanker og ideer er verdifulle for å utvikle forståelse (Bungum, Bøe, & Henriksen, 2018; Henriksen et al., 2018). Dette var imidlertid en taktikk jeg tok i bruk. I tillegg lot jeg elevene regelmessig få tid til å snakke kun seg imellom om spesifikke temaer, før jeg spurte klassen om disse temaene. Eventuelt er dette noe som kan forebygges ved å bygge en klassekultur rundt deltagelse, men det er ikke noe som denne studien kunne implementert.

Både ved å være eksplisitt til bruken av tolkninger og å være konsekvent i bruken av begreper og ontologi, vil misoppfatninger elevene har kunne forebygges (Bøe & Viefers, 2021; Bouchée et al., 2022; Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017; Pereira & Solbes, 2022; Garritz, 2013). Som tatt opp tidligere i kapitlet, hadde elevene visse misoppfatninger som å se for seg elektroner og kvanteobjekter som partikler, samt om målinger. Et virkemiddel for å forebygge slike misoppfatninger er å være klar over og adressere dem i undervisningsløpet. De misoppfatningene man oppdager i løpet av og i etterkant av undervisningen kan imidlertid tas opp og rettes på i etterkant av opplegget. Dette kan være med på å gi tilstrekkelig støtte til elevene, noe blant annet Bouchée et al. (2023) tar opp. Elevene i denne studien har vist at de ofte er klar over begrensninger i egne utsagn, som viser at de er på god vei mot å forebygge slike misoppfatninger. De ulike tolkningene i kvantefysikk kan også brukes som inngang til undervisning om kvantefysikk (Garritz, 2013), men dette er ikke inkludert i denne studien. Å gjøre dette kan gjøre elevene mer bevisst på hvordan de selv tolker kvantefysikk og bidra til å en dypere forståelse for dets kompleksitet (Bøe & Viefers, 2021; Bunge, 2003a). Men dette har i denne undersøkelsen vist seg å være mulig også for et opplegg som tar i bruk kvanteobjekter som innfallsvinkel.

Begge intervjugruppene uttrykte at det var mye nytt for dem i løpet av undervisningsøktene og at dette kunne ha bidratt til at kvantefysikk generelt var mer utfordrende for dem enn andre tema. Derfor er det viktig å ha en myk start som bygger seg opp mot skillet mellom klassisk fysikk og kvantefysikk, slik at elevene ikke blir overveldet. Skillet må fortsatt framstilles tydelig og konsekvent, men på en måte slik at elevene fortsatt har knagger å henge kunnskapen de lærer på, blant annet ved å la elevene koble bølge- og partikkelegenskaper til deres konseptuelle rammeverk for kvanteobjekter (Henriksen et al., 2018; Bouchée et al., 2022). Generelt sliter mange elever med å relatere kvantefysikk fra egne erfaringer og den fysiske virkeligheten, og de klarer ikke skape gode nok bilder av den mikroskopiske verden til å kunne omstille seg fra en klassisk forståelse (Krijtenburg-Lewerissa et al. 2017; Greca & Friere, 2003). Derfor kan det være lurt å ta med bølge- og partikkelegenskaper som mer kjente konsepter, men at man da er forsiktig med hvilke assosiasjoner disse kan gi. Blant annet kan tabellverktøyets begrep kvantisert kobles mot partikkelegenskaper, mens kontinuerlig kan knyttes mot

bølgeegenskaper. Det vil i framtidig bruk av undervisningsopplegget være nyttig å bruke litt mer tid på begrepene kvantisert og kontinuerlig, siden elevene synes disse til tider var utfordrende.

Om jeg hadde gjennomført samme opplegget en gang til ville jeg nok endret litt på ordlyden i visse diskusjonsspørsmål. Jeg ville ha inkludert begrepene kontinuerlig og kvantisert eksplisitt, i hvert fall i ett spørsmål, for å oppmuntre elevene til å snakke mer direkte om dem, selv om mange elever gjorde dette i studien. Tenkelig kunne elektroner blitt erstattet med kvanteobjekter i enkelte spørsmål, men det gir elevene muligheten til å snakke om noe de er kjent med, samtidig som det gir læreren muligheten til å fange opp eventuelle misoppfatninger.

Noen av elevene trengte mer tid og fokus på begrepene enn jeg antok, slik at en mulig tilpasning er å sette av mer tid den første økten av opplegget til å gjennomgå begrepene og tabell-verktøyet. Samtidig vil elevene få mer og mer trening dersom begrepene aktivt brukes videre i undervisningen etter oppleggets slutt. De hadde imidlertid gode diskusjoner uansett om de hadde begrenset tid til å tilegne seg kunnskap. Elevene viste at de kunne ta i bruk de verktøyene de fikk introdusert på hensiktsmessige måter og er slik med på å demonstrere nytten av tabell-verktøyet og kvanteobjekt som begrep. Å utvikle kunnskap om kompliserte konsepter som ikke-determinisme, sannsynlighetsfordelinger og superposisjon er komplisert (Bøe & Viefers, 2021; Bouchée et al., 2022; Lévy-Leblond, 2003; Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017; Huseby & Bungum, 2019). Dette er imidlertid konsepter som brukes videre i undervisningen om kvantefysikk.

8.4.2 Anbefalinger for videre forskning

Lærere har en tendens til å støtte seg mer på lærebøkene når de underviser om kvantefysikk (Bouchée et al., 2023). Dette kan være en konsekvens av at de ofte har lite kvantefysikk i løpet av utdanningen sin, spesielt om konseptuell forståelse (Lautesse et al., 2015). Opplegget som er utviklet i denne masteroppgaven gir et forslag til hvordan man kan undervise om kvanteobjekter. For videre forskning kan det være relevant å undersøke ikke bare et introduksjonsopplegg om kvantefysikk, men hvordan bruken av kvanteobjekter fungerer gjennom hele temaet og i andre fenomenologiske kontekster enn dobbelspalteforsøket. Flere elever opplevde at begreper som kvantisert og kontinuerlig var vanskelig å begripe, men at de utviklet en bedre forståelse utover i opplegget, slik Derek nevner i (80). Da ser man lettere hvilken kompetanse de sitter igjen med til slutt, noe en lengre undersøkelse eller et lengre undervisningsopplegg kunne tatt for seg.

Det finnes mye tidligere forskning om kvantefysikkundervisning som kan informere hvordan veien videre formes. Selv om undervisningsopplegget baserer seg på mye av dette, er det fortsatt behov for å undersøke videre hvordan kvanteobjekter kan fungere i undervisning utover kun to økter. Det vil være hensiktsmessig å i større grad utforske hvordan uskarphetsprinsippet oppfattes og brukes av

elever i sammenheng med kvanteobjekter, siden dette står sentralt i mange ulike fenomener (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017; Lautesse et al., 2015). Denne vinklingen kan angripes ved å legge større vekt på kvanteobjekters kontinuerlige aspekter. Bøe og Viefers (2021) foreslår dobbelspalteforsøket som en god inngang til kvantefysikk og det demonstrere kvanteobjekters uskarpe egenskaper (Feynman, Leighton, & Sands, 1963/2010), men dette er kun ett forsøk. Elever har utfordringer med dobbelspalteforsøkets og kvanteobjekters bølgenatur (van den Berg et al., 2020), noe vi kan kjenne igjen hos elevene i denne undersøkelsen. Ved å undersøke slike egenskaper i ulike fenomener kan elevene utvikle bedre forståelse ved å se hvordan egenskaper og fenomener henger sammen i ulike kontekster (Bøe & Viefers, 2021).

Videre vil jeg anbefale å undersøke lærernes perspektiv på og bruk av kvanteobjekter, siden denne undersøkelsen fokuserer på elevperspektivet. Slik Bouchée et al. (2023) påpeker er det gjort mye forskning på elevers konseptuelle utfordringer med kvantefysikk, men ikke like mye på hvordan elever og lærere opplever det. Lærere er en sentral del av undervisningen og det er dermed ikke tilstrekkelig å undersøke kun elevperspektivet. Kvantobjekter er et nytt begrep for de fleste lærere og det kan være vanskelig å vite hva dette begrepet skal inneholde. Hva lærere legger i begrepet kvanteobjekter vil forme hvordan det formidles til elevene, slik at forskning på lærerperspektivet vil kunne gi informasjon om en viktig side av undervisning om kvanteobjekter og kvantefysikk generelt.

8.4.3 Anbefalinger for lærebøker og undervisning

Kvanteobjekter ble introdusert i den norske læreplanen i 2020, som tredde i kraft for Fysikk 2 høsten 2022 (Utdanningsdirektoratet, 2021). Kvantobjekt er lite brukt i litteratur og det finnes få eksempler der kvanteobjekter brukes som en del av undervisning (Lautesse et al., 2015). Et eksempel er den franske læreplanen fra 2012, som valgte å ikke presentere bølge-partikkel-dualiteten slik København-tolkningen framstiller den, men gjennom «kvantoner» (Lautesse et al., 2015; Henriksen et al., 2018; Bunge, 2003a). Det viste seg imidlertid at «kvantoner» fikk lite plass i franske lærebøker og ble brukt lite konsekvent, slik at det er vanskelig å si mye om hvor virkningsfullt introduksjonen av begrepet var (Lautesse et al., 2015). Kvantobjekter kan ses på som et alternativ til den mest dominerende framstillingen av kvantefysikk (Bunge, 2003a; Henriksen et al., 2018), men har blitt lite utforsket. Elevene i denne undersøkelsen uttrykte at de heller ville bruke kvanteobjekter enn bølger og partikler, og at de opplevde det å måtte bruke ulike perspektiver som utfordrende. Det er altså viktig å være konsekvent med kvanteobjekters ontologi (Bouchée et al., 2022; Bouchée et al., 2023; Bøe & Viefers, 2021), spesielt hvis de skal fungere som et ekte alternativ, uten å skulle blande det med partikkel- og bølgeperspektivet. Tabell-verktøyet jeg har utviklet kan gi både lærere og elever støtte i forståelsen av kvanteobjekters ontologi, noe som er nødvendig (Bouchée et al., 2023). Jeg anbefaler dermed at tabell-

verktøyet brukes som en del av undervisning av kvanteobjekter og i bøker som en del av kapittelet om kvantefysikk.

Gjennomgangen av lærebøkene i denne oppgaven er ikke en analyse, ulikt det Lautesse et al. (2015) gjorde med franske lærebøker. Jeg ønsker dermed å ikke være for påståelig når jeg sier at jeg fant likheter med konklusjonene deres i min gjennomgang. Lautesse et al. (2015) viser at vi trenger flere undersøkelser om bruken av kvanteobjekter og et mer «innovativt» språk. Vi mangler gode og tilgjengelige konseptualiseringer av begrepet kvanteobjekt og at lærebøkene stort sett ikke brukte begrepene på konsekvente og tydelige måter. Dette fører til mange perspektivbytter mellom partikkel, bølge og kvanteobjekt (Lautesse et al., 2015), som ikke er ideelt (Bunge, 2003a; Lévy-Leblond, 2003; Pereira & Solbes, 2022; Bouchée et al., 2022). Det virker ikke som om de norske lærebøkene (Callin et al., 2022; Fossum et al., 2022) har strukturert kapittelet om kvantefysikk rundt kvanteobjekter, slik at det kan virke som en ettertanke som måtte plasseres et sted. Kvanteobjekter brukes dermed ikke konsekvent, men om hverandre med begrepene partikler, elektroner og kvantepartikler, som fører til mange unødvendige perspektivbytter. Jeg anbefaler at lærebøkens kapitler om kvantefysikk i større grad struktureres omkring begrepet kvanteobjekt, slik at det kan brukes mer konsekvent og som et eget begrept, for eksempel gjennom å introdusere tabell-verktøyet utviklet i denne studien. Da kan begrepet brukes som et alternativ til bølge-partikkel-dualiteten, istedenfor å være et tilleggsbegrep som brukes om hverandre med de mange andre, som partikkel, elektron og kvantepartikkel.

8.4 Metoderefleksjon

Metodene brukt i denne oppgaven baserer seg på kvalitativ forskningspraksis. Den analytiske tilnærmingen var induktiv tematisk analyse. Datamaterialet ble samlet inn som lydopptak av gruppediskusjoner i løpet av et undervisningsopplegg, samt gruppeintervjuer etter opplegget.

Jeg har gjennom hele prosessen som forsker forsøkt å være klar over og forhindre subjektive bias som kan påvirke innsamlingen og analysen av datamaterialet. I prosessen før gjennomføringen av datainnsamlingen ble troverdigheten ivaretatt ved å planlegge diskusjonsspørsmålene på måter for å unngå best mulig å påvirke svarene til elevene (Braun & Clarke, 2006; Kvale & Brinkmann, 2015), samtidig som elevene opplevde en naturlig oppbygging av temaet. Dette ble blant annet implementert i løpet av undervisningen ved å oppmuntre til kritiske holdninger, noe opptakene viste at elevene ofte hadde. Elevenes evne til refleksjon og kritisk vurdering styrker troverdigheten, siden det tyder på at de ikke kun gjentar det jeg som lærer har sagt. I løpet av og i etterkant av analysearbeidet har det vært viktig å redegjøre godt for selve analyseprosessen, blant annet ved å forklare hvordan temaer ble til kategorier, for å være åpen og vise at analysen har vært strukturert (Braun & Clarke, 2006; Kvale & Brinkmann, 2015). Dette gir innsikt i mine tanker, bias og redegjør for egen subjektivitet (Robson &

McCartan, 2016). En svakhet kan være at transkripsjonene ikke er lagt ved, men dette er valgt siden transkripsjonen er svært lange grunnet store datamengder, og de er derfor meget uoversiktlige.

Jeg samlet inn to ulike datakilder, både opptak av gruppediskusjoner og opptak av intervjuer, som gjør det mulig å triangulere. Det resulterte i store datasett som er en av ulempene som tematisk analyse kan ha og som fører til et større analysearbeid (Braun & Clarke, 2006). Samtidig kan mye data gi muligheten til å finne mønstre, eller vise at elevene er konsekvente i svarene sine. Temaer man finner induktivt burde vurderes opp mot eget bias, men ved å se etter samsvar mellom elevenes svar i diskusjonene og intervjuene var det mulig å triangulere datamaterialet, som kan styrke troverdigheten (Robson & McCartan, 2016).

Både gruppediskusjoner og gruppeintervjuer er en vanlig innfallsvinkel for kvalitative studier som dette (Robson & McCartan, 2016). Mye tidligere forskning på samme tematikk bruker disse som datainnsamlingsmetode (Bungum et al., 2018; Bouchée et al., 2023; Henriksen et al., 2018; Huseby & Bungum, 2019). Det dialogiske datamaterialet får den nødvendige dybden en slik undersøkelse trenger for å svare på den kvalitative problemstillingen. Tematisk analyse er en tilpasningsdyktig og utbredt metode for å analysere kvalitativ data og passer godt sammen med en induktiv metode. Tematisk analyse kunne også blitt brukt sammen med deduktiv metode, men da kunne jeg risikert at analysen ble oversimplifisert og for strukturert (Braun & Clarke, 2006). Deduktiv analyse hadde resultert i en annen, mindre åpen og utforskende undersøkelse og ville ikke vært hensiktsmessig. Hvordan elever bruker kvanteobjekt som begrep er relativt lite utforsket, noe denne undersøkelsen ønsket å gjøre uten å begrense de mulige innfallsvinklene. Koding har vært datastyrt, slik at datamaterialet har styrt hvilke koder som brukes. En induktiv analyse gir muligheten til å oppdage mønstre i datamaterialet man ellers kunne oversett (Braun & Clarke, 2006; Robson & McCartan, 2016).

I intervjuene kunne jeg gripe inn hvis noen dominert samtalen. Hvis man ikke griper inn blir ikke flertallets stemme representert i dataene, som kan svekke troverdigheten (Kvale & Brinkmann, 2015; Robson & McCartan, 2016). Mens Gruppe 1 ikke hadde dette problemet, kunne en elev på Gruppe 2 til tider dominere. Jeg hadde planlagt forebyggende metoder som å gripe inn og gi andre elever ordet, ved å spørre dem direkte og ved å gi dem oppmuntringer underveis, slik Robson og McCartan (2016) anbefaler. Til tross for dette svarte Gruppe 2 ofte kort på slike henvendelser. Begge gruppene gikk mer i dybden i samtalen sine når de snakket med hverandre, som er positivt for troverdigheten, siden de da i mindre grad ble påvirket og ledet. Hensikten med at gruppeintervjuet lignet noe på et fokusgruppeintervju var at elevene skulle diskutere seg imellom med minimale innspill fra intervjuer (Kvale & Brinkmann, 2015). De snakket seg ofte bort fra spørsmålene, som viser at de er uavhengige

intervjueren og spørsmålene, og at de kan danne egne meninger og snakke om temaer de interesserer seg for.

Den store datamengden førte til problemer med å velge ut og møblere sitatene i resultatene. Dette problemet stammet fra at flere sitater passet inn i flere kategorier, som tyder på at kategoriene ikke var spesifikke nok. En eventuell utbedring ville da vært å lage nye kategorier og kode datamaterialet på nytt for så å se om sitatene lettere kunne møbleres. Det er imidlertid vanskelig å lage så konkrete kategorier at ett utsagn kun passer inn i en kategori. Dobbelspalteforsøket kan for eksempel ikke forklares uten å nevne interferens, bølgeegenskaper og måling. Jeg valgte å bruke tid på å plassere sitatene, istedenfor å finne nye kategorier. Uten den tilførte strukturen programmet Nvivo ga, kunne analysen gått i fellen Braun & Clarke (2006) peker ut, nemlig å miste struktur. Det er positivt at elevene hadde mange gode utsagn, men samtidig vil man alltid velge med subjektivitet og bias. Jeg forsøkte å forebygge dette ved å trekke fram sitater fra ulike grupper og trekke røde tråder på tvers av samtalen.

Mulige endringer på undersøkelsen kunne vært å inkludere et spørreskjema før intervjuene for å få oversikt over alle elevenes erfaringer og hva de synes var utfordrende, for å deretter kunne ta opp dette spesifikt (Robson & McCartan, 2016). Da hadde det vært nødvendig å vite identiteten til elevene, som kunne ha blitt opplevd som mer ubehagelig. Alternativt kunne jeg hørt gjennom alle gruppediskusjonene i forkant av intervjuene og tilpasset intervjuet deretter. Dette ble delvis gjort. Dermed påvirket elevenes diskusjoner intervjuets innhold, men siden intervjuene ble gjennomført dagen etter siste økt, var det knapt med tid til å planlegge intervjuene med hensyn til alle elevenes besvarelser. Det var denne dagen som passet klassen best for intervjuer, noe jeg tilpasset meg til. Jeg rakk å høre opptaket til noen elever på Gruppe 1, men ingen på Gruppe 2. Dermed kan intervjuet ha vært mer tilpasset elevene på Gruppe 1, som kan være grunnen til at de virket mer engasjerte. Samtidig snakket elevene på Gruppe 2 om stort sett de samme tingene i sine diskusjoner, slik at forskjellen på elevene sannsynligvis var en større faktor.

Kvalitative undersøkelser har ikke det samme behovet for ekstern generaliserbarhet, men vi kan fortsatt se på analytisk generaliserbarhet og hva som kan være tilfellet (Robson, 2002). Utvalget besto kun av én klasse på 16 elever som bekvemmelighetsutvalg, slik at resultatet ikke kan generaliseres statistisk, men man kan fortsatt argumentere for overførbarhet (Robson & McCartan, 2016). Stort sett fungerte den valgte metoden godt, mye siden elevene oppførte seg eksemplariske. Dette kan ha vært siden jeg kom inn i klassen som ny person. Fysikklasser er imidlertid generelt motiverte elever (Angell, et al., 2019). Elevene var noe kjent med å ta lydopptak av seg selv og var kjente med gruppediskusjoner i fysikk, selv om disse diskusjonene ikke var på like stor skala som dette opplegget brukte. De fleste snakket tydelig på opptakene og ga plass til hverandre. Det samme gjaldt stort sett i intervjuene også.

Om lignende metoder skal brukes i andre grupper, burde man ta hensyn til elevenes kjennskap til lydopptak og diskusjoner. Samtidig er begge disse mye brukt i klasserommet, slik at det ikke burde være en stor utfordring for elever eller lærere å ta i bruk. Dette argumenterer for overføringsverdi, siden den samme metoden fullt mulig kan brukes i andre fysikklasser.

Gruppene i denne studien var godt etablerte ettersom de var en eksisterende klasse, og de fikk selv styre samtalen. Dette er faktorer som vil trygge situasjon, slik at alle kan si sine meninger, som videre bygger troverdighet (Robson & McCartan, 2016). Et problem som oppsto, var at visse elever kunne være mer dominerende enn andre, noe som pekes på i metodelitteratur (Kvale & Brinkmann, 2015; Robson & McCartan, 2016). Et virkemiddel jeg brukte for at alle skulle delta var å sette dem i forhåndsplanlagte grupper på to og tre, slik at det ble vanskelig å melde seg ut av gruppa. Klassen var fordelt over hele karakterskalaen, selv om de ble beskrevet som en relativt sterk klasse. Siden alle de ulike nivåene er representert i klassen og de aller fleste elevene bidro aktivt til diskusjonene eller intervjuene, tyder det på at opplegget traff de fleste. Dermed kan man si at opplegget og undersøkelsen kan utnyttes i lignende situasjoner, som i andre fysikklasser.

Som lærer i undervisningsdelen av forskningen var jeg en aktiv deltager av intervensjonen. Da tok jeg på meg rollen som både lærer og forsker samtidig, som kan føre til konflikt (Robson & McCartan, 2016; Kvale & Brinkmann, 2015). Når man blir kjent med elevene som lærer vil man utvikle meninger og bias, der man selektivt retter oppmerksomheten kun mot visse aspekter ved situasjonen (Robson & McCartan, 2016). Dette kan forebygges dersom man er klar over problematikken fra starten av intervensjonen, holder seg åpen for nye inntrykk, reflekterer over egne bias og hvordan man vil påvirke dataene man samler inn. Samtidig gir det muligheten til å se situasjoner fra to ulike perspektiv som kan informere forskningen på unike og varierte måter. For meg betyr dette blant annet muligheten til å tilpasse seg den unike situasjonen i klassen slik en lærer ville gjort, selv om opplegget er planlagt ut ifra tidligere forskning. En klasse vil ha egne behov og en lærer vil ha en didaktisk fleksibilitet i undervisningen sin. Der en forsker er mer fokusert på selve gjennomføringen av datainnsamlingen og hvordan dette kan gjøres på en best og mest troverdig måte, vil en lærer kunne fokusere på formidlingen av innholdet til elevene. Disse egenskapene i kombinasjon fører til at all den nødvendige kunnskapen for intervensjonen er hos en person, slik at man i større grad sikrer at både undervisningen og forskningen skjer på best mulig måte.

9 Konklusjon

I denne studien har jeg forsøkt å svare på problemstillingen: «Hvordan kan kvanteobjekter fungere som et nyttig begrep for elever i å lære om kvantefysikk?». Det har blitt gjort ved å utvikle og gjennomføre et undervisningsopplegg om kvanteobjekter i en fysikkklasse på videregående skole, der det ble samlet inn lydopptak av gruppediskusjoner og gjennomført semi-strukturerte intervjuer.

Elevene viser at de har gode beskrivelser av kvantefysikk som ofte er i sammenheng med bruk av kvanteobjekt og begrepene i tabell-verktøyet, og at de da ofte er på et høyere taksonomisk nivå. Samtidig forklarer de i dybden også ved å ta i bruk andre konsepter enn begrepene direkte, som viser at elevene ser sammenhenger og er reflekterte. De trenger ikke alltid å ta i bruk begrepene for å gi gode beskrivelser av kvantefysikk, men bruker dem ofte som utgangspunkt og kan støtte seg på dem. Tabell-verktøyet er med på å konkretisere kvanteobjekters kvantefysiske egenskaper for å unngå det klassiske perspektivet, gjennom å beskrive en konkret ontologi.

Elevene er fortsatt i en læringsprosess og trenger videre undervisning om kvantefysikk og tilbakemeldinger i etterkant av opplegget, som kan hjelpe dem å rette opp i misoppfatninger som kunne ha oppstått. Undersøkelsens resultater har vist at kvanteobjekter og tabell-verktøyet kan gi elevene nødvendige redskaper til å snakke om kvantefysikk uten å hovedsakelig støtte seg på klassiske begreper. Gjennom dette har elevene vist høy grad av forståelse av kompliserte konsepter som måling og ikke-determinisme, noe tidligere forskning viser at elever generelt sliter med, noe som viser at de dermed når høye taksonomiske nivå. Dette argumenterer for at kvanteobjekter og tabell-verktøyet er nyttige for elevene når de lærer om kvantefysikk.

Resultatene har bidratt til å identifisere flere viktige elementer som kan tas med i undervisningen av kvanteobjekter. Språk- og begrepsbruken burde være konsekvent og tydelig og bygges på ikke-klassiske begreper som kvanteobjekter. Dette er for å unngå perspektivbytter og for å holde seg til en konkret ontologisk forklaring av kvanteobjekter. Da kan man lettere forebygge misoppfatninger som kommer fra både klassisk språkbruk og forvirring fra perspektivbytter. Det vil være hensiktsmessig å framheve kvanteobjekters ikke-deterministiske natur som et sentralt aspekt, siden dette gir bedre innsikt i de fundamentale forskjellene mellom kvantefysikk og klassisk fysikk. Samtidig burde man oppmuntre til kritiske og ikke-naive holdninger blant elevene og gi dem de verktøyene de trenger for å se tvetydigheter og motstridende egenskaper. Dette gjøres blant annet ved å påpeke og gjøre det eksplisitt hvordan ting fungerer og hvilke tvetydigheter som eksisterer i kvantefysikk. Dette gjelder også for lærebøkene, som ikke har gitt kvanteobjekter spesielt stor plass. Kvantobjekt burde innføres mer konsekvent, for eksempel ved å bruke tabell-verktøyet utviklet i denne studien, med en tydelig og egen ontologi.

Referanser

- Anderson, L. W., Krathwohl, D. R., Airasian, P. W., Cruikshank, K. A., & Mayer, R. (2001). *A taxonomy for learning teaching, and assessing: A revision of Bloom's Taxonomy of Educational Objectives*.
- Angell, C., Bungum, B., Henriksen, E. K., Kolstø, S. D., Person, J., & Renstrøm, R. (2019). *Fysikkdidaktikk* (2. utg.). Cappelen Damm Akademisk.
- Angell, C., Frågåt, T., Henriksen, K. E., Bøe, M. V., Steier, R. E., Tellefsen, C. W., . . . Kersting, M. (2022, september). *Kvantefysikk*. Hentet fra Viten.no Naturfagssenteret: <https://www.viten.no/filarkiv/kvantefysikk/#/>
- Bjørndal, C. (2017). *Det vurderende øyet Observasjon, vurdering og utvikling av pedagogisk praksis* (3. utg.). Gyldendal Akademisk.
- Bloom, B. S., Engelhart, M. D., Furst, E. J., Hill, W. H., & Krathwohl, D. R. (1956). *Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals: Handbook I cognitive domain*.
- Bouchée, T., de Putter-Smits, L., Thurlings, M., & Pepin, B. (2022). Towards a better understanding of conceptual difficulties in introductory quantum physics courses. *Studies in Science Education*, 58(2), ss. 183-202.
- Bouchée, T., Thurlings, M., de Putter-Smits, L., & Pepin, B. (2023). Investigating teachers' and students' experiences of quantum physics lessons: opportunities and challenges. *Research in Science & Technological Education*, 41(2), ss. 777-799.
- Bowler, P. J., & Morus, I. R. (2010). *Making modern science: A historical survey*. University of Chicago Press.
- Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative research in psychology*, 3(2), ss. 77-101.
- Bunge, M. (1967a). *Foundations of physics*. Springer.
- Bunge, M. (1967b). Analogy in quantum mechanics: From insight to nonsense. *The British Journal for Philosophy of Science*, 18(4), ss. 265-286.
- Bunge, M. (2003a). Twenty-Five Centuries of Quantum Physics: From Pythagoras to Us, and from Subjectivism to Realism. *Science & Education*, 12, ss. 445-466.
- Bunge, M. (2003b). Quanta are Quaint but Basic and Real, and the Quantum Theory Explains Much but not Everything: Reply to my Commentators. *Science & Education*, 12, ss. 587-597.
- 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), ss. 856-877.
- Bøe, M. V., & Viefers, S. (2021). Secondary and University Students' Descriptions of Quantum Uncertainty and the Wave Nature of Quantum Particles. *Science & Education*.
- Callin, P., Dokka, I. H., Hellesøy, A., Seland, A., & Skåland, E. K. (2022). *Ergo Fysikk 2*. Aschehoug.
- Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. (1963/2010). *The Feynman Lectures on Physics: Volume III: Quantum Mechanics (The New Millennium Edition)*. Basic Books.

- Fossum, J. C., Sandstad, M., Bergli, E., Dellnes, H. R., & Myhrehagen, H. V. (2022). *Kraft 2 Fysikk 2*. Cappelen Damm.
- Fraser, M. W., & Galinsky, M. J. (2010). Steps in intervention research: Designing and developing social programs. *Research on social work practice, 20*(5), ss. 459-466.
- FreeScienceLectures. (2007, 05. 02.). *Dr. Quantum Explains Double Slit Experiment*. Hentet 2023 fra Youtube.com: https://www.youtube.com/watch?v=6Q4_nl0ICao
- Freire, O. (2003). A Story Without an Ending: The Quantum Physics Controversy 1950-1970. *Science & Education, 12*, ss. 573-586.
- Garritz, A. (2013). Teaching the Philosophical Interpretations of Quantum Mechanics and Quantum Chemistry Through Controversies. *Science & Education, 22*(7), ss. 1787-1808.
- Greca, I. M., & Freire, O. (2003). Does an Emphasis on the Concept of Quantum States Enhance Students' Understanding of Quantum Mechanics? *Science & Education, 12*, ss. 541-557.
- Henriksen, E. K., Angell, C., Vistnes, A. I., & Bungum, B. (2018). What is light? Students' reflections on the wave-particle duality of light and the nature of physics. *Science & Education, 27*, ss. 81-111.
- Huseby, A., & Bungum, B. (2019). Observation in quantum physics: Challenges for upper secondary physics students in discussing electrons as waves. *Physics Education, 54*(6).
- Johansson, A., Andersson, S., Salminen-Karlsson, M., & Elmgren, M. (2018). "Shut up and calculate": the available discursive positions in quantum physics courses. *Cultural studies of science education, 13*(1), ss. 205-226.
- Kragh, H. (2002). *Quantum Generations: A History of Physics in the Twentieth Century*. Princeton University Press.
- Krijtenburg-Lewerissa, K., Pol, H. J., Brinkman, A., & Van Joolingen, W. R. (2017). Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education. *Physical review physics education research, 13*(1).
- Kvale, S., & Brinkmann, S. (2015). *Det kvalitative forskningsintervju* (3. utg.). Gyldendal Akademisk.
- Lautesse, P., Vila Valls, A., Ferlin, F., Héraud, J. L., & Chabot, H. (2015). Teaching Quantum Physics in Upper Secondary School in France: 'Quanton' Versus 'Wave-Particle' Duality, Two Approaches of the Problem of Reference. *Science & Education, 24*.
- Lévy-Leblond, J. M. (2003). On the Nature of Quantons. *Science & Education, 12*, ss. 495-502.
- Pereira, A., & Solbes, J. (2022). The Dynamics of Perspective in Quantum Physics: An Analysis in the Context of Teacher Education. *Science & Education, 31*(2), ss. 427-450.
- Robson, C. (2002). Establishing Trustworthiness in Flexible Design Research. I *Real World Research: A Resource for Users of Social Research Methods in Applied Settings* (2. utg., ss. 168-177). Blackwell.
- Robson, C., & McCartan, K. (2016). *Real World Research: A Resource for Users of Social Research Methods in Applied Settings* (4. utg.). Wiley.

- Stadermann, K. (2021). Connecting Secondary Quantum Physics and Nature of Science: Possibilities and challenges in curriculum design, teaching and learning [Doktorgradsavhandling]. Riksuniversiteit Groningen.
- Utdanningsdirektoratet. (2006, 4. 3.). Læreplan i fysikk - programfag i utdanningsprogram for studiespesialiserende (FYS1-01). Hentet fra https://www.udir.no/kl06/fys1-01/hele/komplett_visning
- Utdanningsdirektoratet. (2021, 24. 3.). Kompetansemål og vurdering: Kompetansemål etter Fysikk 2. Hentet fra <https://www.udir.no/lk20/fys01-02/kompetansemaal-og-vurdering/kv467>
- van den Berg, E., van Rossum, A., Grijsen, J., Pol, H., & van der Veen, J. (2020). Teaching particle-wave duality with double-slit single-photon interference in Dutch secondary schools. I J. Guisasola, & K. Zuza (Red.), *Research and innovation in physics education: Two sides of the same coin* (ss. 135-143).
- Wallace, C. S. (2004). Framing new research in science literacy and language use: Authenticity, multiple discourses, and the "Third Space". *Science education*, 88(6), ss. 901-914.

Vedlegg

Vedlegg 1

KAP. 8

KVANTEFYSIKK

KVANTEOBJEKTER



6.1.2023 2

KVANTEFYSIKK

PLAN FOR TIMEN



- Egenskaper til partikler og bølger
- Bølge-partikkel-dualiteten
- Kvanteobjekter
- Skille mellom klassisk fysikk og kvantefysikk
- Litt om måling
- Diskusjon

6.1.2023 3

KVANTEFYSIKK

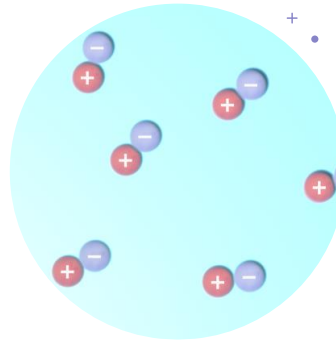
HVORFOR HAR VI KVANTEFYSIKK?



Mange forskere bidrar over mange tiår.
Vi har enda ikke alle svarene, men teorien ga oss mange presise forutsigelser.

Partikler

- Partikler er begrenset til et punkt i rommet. Den har endelig utstrekning, også kalt en tydelig posisjon. Både utstrekningen og antallet partikler er kvantisert.
- Kvantisert betyr at vi ikke kan bryte det ned i mindre bestanddeler. Hvis vi har en partikkel, kan vi ikke dele den i mindre, like, partikler.
- Typiske partikkelegenskaper: masse, bevegelsesmengde og posisjon. Men det finnes unntak.

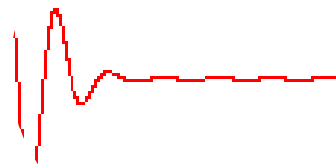


6.1.2023

4

Bølger

- Bølger brer seg utover i rommet, uten en bestemt grense. Den har alltid utstrekning. Vi kan ikke telle opp antallet bølger. Både utstrekningen og antallet er kontinuerlig.
- Kontinuerlig betyr at bølgen ikke har en bestemt begynnelse, eller slutt, den kan ha alle mulige størrelser.
- Typiske bølgeegenskaper: bølgelengde, frekvens, amplitude, interferens.



6.1.2023

5

Snakk med en partner

- Hva er noen av egenskapene som gjør partikler til partikler og bølger til bølger?
- Nevn noen av forskjellene mellom dem.

6



Bølge-partikkel-dualiteten

- Har både partikkelegenskaper og bølgeegenskaper.
- Eksempler?
- Både bevegelsesmengde og bølgelengde.
- Interfererer samtidig som antallet er kvantisert.

7

KVANTEOBJEKTER

Hva er egentlig et kvanteobjekt?

Hva er et objekt?

- Noe uspesifikt.
- En ting.
- Noe fysisk.
- Noe vi kan observere.

Hvordan beskriver vi det?

- Som en modell.
- Modeller er ofte ufullstendige forklaringer.
- Siden kvanteobjekter kan oppføre seg som partikler og bølger, kan vi bruke deres egenskaper til å modellere kvanteobjekter.

Egenskaper til et kvanteobjekt

- Kvanteobjekter er verken bølger, eller partikler.
- Vi kan si at kvanteobjekter har både bølge- og partikkelegenskaper, uten at det ER en bølge, eller en partikkel.
- Kommer dere på noen eksempler der partikkelegenskapene er mest fremtredende?
- Hva med bølgeegenskapene?
- Vi snakket om at bølger og partikler er kontinuerlige eller kvantiserte i antall og utstrekning. Hvordan ville dere beskrevet kvanteobjekter ved å bruke disse begrepene?

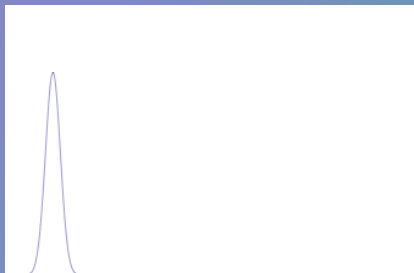
10

Beskrevet i en tabell:

	Antall	Utsrekning
Partikkel	Kvantisert	Kvantisert
Bølge	Kontinuerlig	Kontinuerlig
Kvanteobjekt	Kvantisert	Kontinuerlig

Hvilke konsekvenser kan dere se for dere at dette har?

11



Måling i kvantefysikk

- Hva er forskjellen på en måling og observasjon?
- Passiv vs. aktiv måling
- Hva betyr det at en måling er aktiv?
- Ikke-determinisme
- Hva betyr det av kvanteobjekter er ikke-deterministiske?

KVANTEFYSIKK

12

Kvanteobjekter krever en annen fysikk enn klassiske objekter

Kvanteobjekter skiller seg fra klassiske objekter fordi de må beskrives av størrelser som er kvantiserte i stedet for kontinuerlige.

- Fra tabellen ser vi at dette gjelder for både antall, men også energien. Størrelser som utstrekningen kan fortsatt være kontinuerlig.
- Kvanteobjekter har kvantisert utstrekning hvis vi måler posisjonen, men vil ellers være kontinuerlig.

Kvanteobjekter krever en annen fysikk enn klassiske objekter

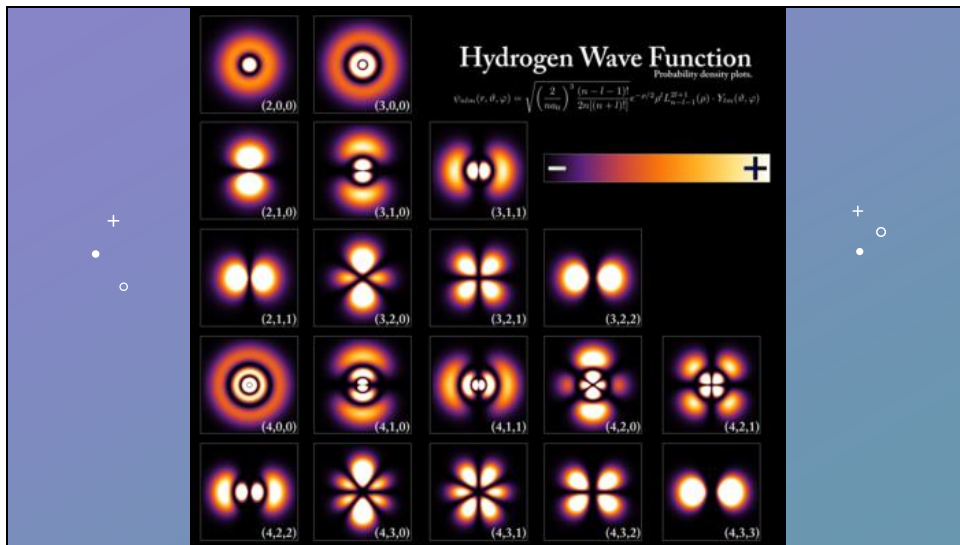
Kvanteobjekter skiller seg fra klassiske objekter ved at utfallet av enkelthendelser ikke kan forutsies deterministisk.

- Kvanteobjekter beskrives av en bølgefunksjon, der sannsynlighetsfordelingen er kvadratet av bølgefunksjonen.
- Vi har en viss sannsynlighet for at en hendelse inntreffer, men vi vet ikke hva som skjer før det faktisk skjer.

Kvanteobjekter krever en annen fysikk enn klassiske objekter

Kvanteobjekter skiller seg fra klassiske objekter ved at de kan være i superposisjon, dvs. i flere kvantetilstander samtidig.

- Vi vet ikke i hvilken posisjon den er i før måling, med den er beskrevet av bølgefunksjonen.
- Dette betyr at kvanteobjektet ikke er i en posisjon før vi måler, den er i alle posisjonene samtidig.



Snakk med en partner

- Hvilke egenskaper deler kvanteobjekter med bølger og partikler?
- Hvordan kan vi si at kvanteobjekter er noe annet enn en bølge, eller en partikkel?
- Nevn minst en ting som skiller kvantefysikk fra klassisk fysikk. På hvilken måte endres fysikken og hvilke konsekvenser kan det ha?

17

DISKUSJON

Sett dere i gruppene.
Oppgavene finner dere på papir.
Finn fram en mobil.
Lever opptaket i mappen på Canvas.

OPPSUMMERING

KVANTEFYSIKK

- Hva skiller kvanteobjekter fra klassiske objekter?
- Hvordan skiller kvanteobjekter seg fra bølger og partikler?
- Burde vi heller si at kvanteobjekter oppfører seg som bølger eller partikler, eller at det finnes situasjoner der vi kan tilnærme kvanteobjekter med bølgeegenskaper eller partikkelegenskaper?

6.1.2023

19

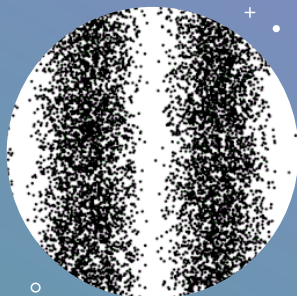
KAP. 8 KVANTEFYSIKK

+
•
○

PLAN FOR TIMEN

- Oppsummering fra sist
- Dobbelspalteforsøket
- Fotoelektrisk effekt
- Diskusjon i de samme gruppene
- Oppsummering

KVANTEFYSIKK



21

MÅLING

- Måling i kvantefysikk er aktiv.
- Kvanteobjektet er i en superposisjon før og etter måling.
- Utfallet er ikke-deterministisk. Vi kan ikke vite utfallet før det har skjedd.
- Målingen kan være god. Problemet er at man ikke vet hvordan målingen påvirket resultatet.

○

Kvanteobjekter

Kvanteobjekter er objekter som har kvanteegenskaper.

- Kan ha både partikkelegenskaper og bølgeegenskaper.
- Eksempler?



Tabellen fra sist:

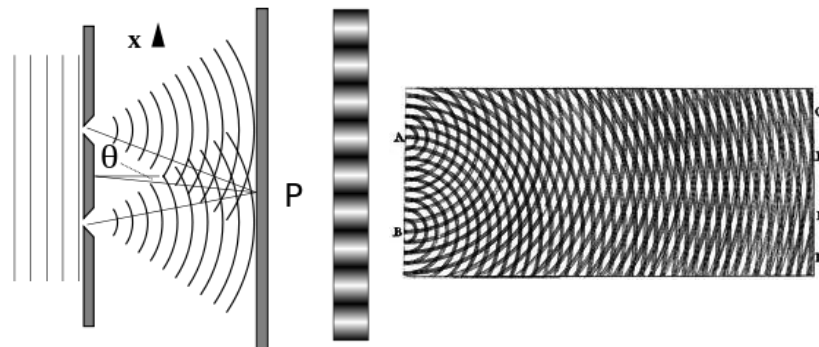
	Antall	Utstrekning
Partikkel	Kvantisert	Kvantisert
Bølge	Kontinuerlig	Kontinuerlig
Kvanteobjekt	Kvantisert	Kontinuerlig

Dobbelspalteforsøket

- Brukes ofte til å vise fram kvanteobjekters bølgeegenskaper.
- Betyr ikke at vi ikke ser partikelegenskaper.

25

Dobbelspalteforsøket med bølger



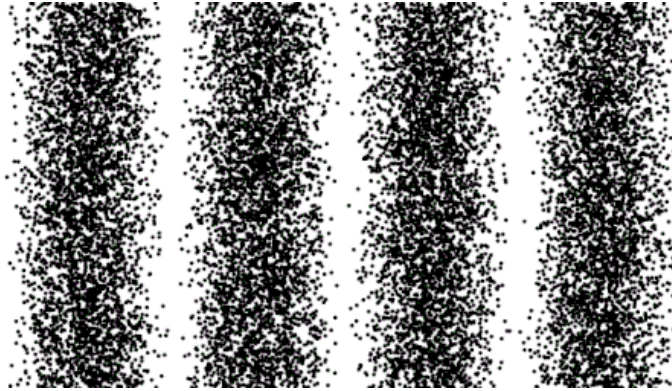
26

SNAKK SAMMEN

Hvordan tror du forsøket vil se ut med elektroner? + •

Hvilke kvanteegenskaper tror du vi vil se da?

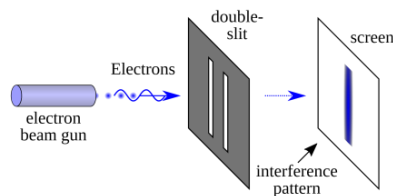
Hva ser vi her?



28

Dobbelspalteforsøket med elektroner

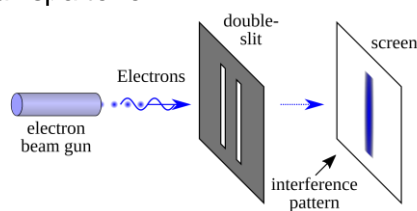
- Hvis vi sender av gårde mange elektroner får vi samme interferensmønsteret som med bølger.
- Hva skjer hvis vi sender inn ett og ett elektron?
- Elektronet vil interferere med seg selv på grunn av superposisjon.



29

Dobbelspalteforsøket med elektroner

- Hva skjer når vi måler i en av spaltene?
- Når vi måler, finner vi posisjonen til elektronet og vi vil ikke lenger ha en superposisjon.
- Derfor får vi ikke et interferensmønster, men to streker på skjermen bak spaltene.



30

Dobbelspalteforsøket med kvanteobjekter

- Et elektron er et kvanteobjekt og kvanteobjekter vil oppføre seg slik vi så at elektronene gjorde.
- Det betyr ikke at kvanteobjektet alltid vil oppføre seg som et elektron, men at kvanteobjekter i dette forsøket viser fram akkurat de egenskapene vi ser.

31



32

SNAKK SAMMEN

- Hvorfor sier vi at dobbelspalteforsøket viser at kvanteobjekter har bølgeegenskaper?
- Hva legger du mest merke til i videoen?

33

DISKUSJON



Sett dere i gruppene.
Oppgavene finner dere på papir.
Finn fram lydoptaker, eller mobil.
Lever opptaket i mappa på Canvas

Oppsummering av videoen

- Var det noe du la spesielt merke til?
- Kan noe av det du så gi feil inntrykk?
- Hva tenker du er viktigst å ta med seg fra videoen?



KVANTEFYSIKK

37

OPPSUMMERING

KVANTEFYSIKK

- Den ikke-deterministiske naturen til kvanteobjekter er viktig når vi skal forklare dobbelspaltforsøket.
 - Sannsynlighet
 - Superposisjon
- Når vi måler bak spalten vs. når vi også måler ved en spalte.
 - Interferensmønster eller ikke.
- Bølge
 - En bølge interfererer med seg selv siden den har kontinuerlig utstrekning.
- Partikkel
 - En partikkel har kvantisert utstrekning og har en posisjon, slik at den ikke kan interferere med seg selv. Superposisjon gjør dette mulig.
- Kvantobjekt
 - Et kvanteobjekt kan interferere med seg selv, siden den har kontinuerlig utstrekning. En måling vil begrense utstrekningen slik at kvanteobjektet ikke lenger kan interferere med seg selv.

38

Vedlegg 2

Gruppeintervju elever Fysikk 2:

Kvanteobjekt	Hva tror dere menes med kvanteobjekt? <ul style="list-style-type: none">- Noe uklart, eller spesielt vanskelig?
Trenger vi det?	Kvanteobjekter i læreplanen. <ul style="list-style-type: none">- Er det nyttig?- Hjalp det dere med forståelse?- Mer/mindre forvirrende med bare kvanteobjekt?
Forklare	Hvordan ville dere forklart et kvanteobjekt til en medelev som ikke hadde hørt om ordet? <ul style="list-style-type: none">- Spesielle utfordringer?
Tabell	Hva synes dere om tabellen? <ul style="list-style-type: none">- Fikk dere bruk for den?- Var den til hjelp i diskusjonen, eller ikke?
Vanskelig	Hva synes dere var det vanskeligste konseptet/begrepet å forstå? <ul style="list-style-type: none">- Hva med superposisjon gir minst mening? Hvorfor?- Hva med kvantefysikk er vanskelig?- Hva med kvanteobjekter er vanskelig?
Undervisningen	Hvordan opplevde dere undervisningen? <ul style="list-style-type: none">- Var det for mye innhold?- Var innholdet for vanskelig?- Var det noe dere savnet? Følte dere at dere fikk vist alt dere kunne i diskusjonsspørsmålene? <ul style="list-style-type: none">- Var det noe mer dere kunne snakket om?- Om dobbeltpaldeforsøket.
Avsluttende	Noe dere ikke fikk sagt, men vil si? Er det noe dere vil utdype? Følte dere at dere fikk kommet til ordet?

Diskusjonsspørsmål time 1:

Husk å ta opptak av diskusjonene deres og lever lydfilene i en egen mappe på Canvas. Dere kan ta et opptak per oppgave, eller alle oppgavene i et opptak. Dere trenger ikke komme gjennom alle spørsmålene. Diskuter heller mer i dybden på noen av dem. Det er ikke nødvendigvis alltid er riktig svar.

1) Kvanteobjekter er ulike klassiske objekter. Nå kan vi sammenligne og undersøke eventuelle ulikheter og likheter.

- a) Hva innebærer det at kvanteobjekter har bølgeegenskaper? Hvordan observeres det?
- b) Hva innebærer det at kvanteobjekter har partikkelegenskaper? Hvordan observeres det?
- c) Hvordan er kvanteobjektene sine egenskaper ulike partikler og bølger sine egenskaper?
 - o Hvordan skiller dette dem fra klassiske objekter? Hva er likt/ulikt med klassiske?

2) Ting kan ikke være både bølge og partikkel (i klassisk forstand), men i kvantefysikk kan de det. Velg ulike påstander innad i gruppen og diskuter følgende påstander mot hverandre.

- a) Vi burde holde oss til å snakke om bølger og partikler for å forklare kvantefysikk.
 - o (Det er det vi har gjort til nå og det fungerer fint. At forklaringene ikke alltid fungerer, har ikke noe å si så lenge teorien gir oss svar.)
- b) Vi burde snakke om bare kvanteobjekter, ikke bølger og partikler.
 - o (Fordi begrepet kvanteobjekter forteller oss det vi trenger å vite.)

3) Vi må tenke på måling og observasjon som noe annet innenfor kvantefysikk og det er fortsatt mye vi ikke er helt sikre på enda. Da er det ikke nødvendigvis et riktig svar.

- a) Hva kan vi tenke oss at skjer med partikkel- og bølgeegenskapene til kvanteobjektet når det blir observert? Begrunn svaret.
- b) Hvordan skiller dette seg fra det klassiske?

Diskusjonsspørsmål time 2:

Husk å ta opptak av diskusjonene deres og lever lydfilene i en egen mappe på Canvas. Dere kan ta et opptak per oppgave, eller alle oppgavene i et opptak. Dere trenger ikke komme gjennom alle spørsmålene. Diskuter heller mer i dybden på noen av dem. Det er ikke nødvendigvis alltid et riktig svar.

1) Dobbelspalteforsøket handler om å sende elektroner inn mot to spalter og å måle interferensmønsteret som lages. Bruk det dere så i videoen i diskusjonen.

- a) Oppsummer forsøket til Dr. Quantum. Hva er det Dr. Quantum finner i eksperimentet?
- b) Er det noe som overrasker dere?
- c) Hva tenker dere om metoden for å måle?
- d) Hvordan påvirkes et kvanteobjekt av en måling?

2) Tenk tilbake på det vi har sett på om dobbelspalteforsøket og finn fram tabellen om kvanteobjekter.

- a) Hvordan vil forsøket foregå hvis vi tenker på kvanteobjektet som en bølge?
 - Er det noe som er vanskelig å forklare med bølgeegenskaper?
- b) Hvordan vil forsøket foregå med et elektron?
 - Hva skjer hvis vi sender inn et og et elektron?
 - Hva skjer om vi prøver å finne ut hvilken spalte elektronet går gjennom?
 - Er det noe som er vanskelig å forklare med partikkelegenskaper?
- c) Bruk tabellen til å diskutere hva som skjer i dobbelspalteforsøket ved å bruke egenskapene til kvanteobjektene.
 - Er det noe som er vanskelig å forklare?
- d) Hva tenker dere gir den beste forklaringen av partikler, bølger og kvanteobjekter? Begrunn svaret.
 - Hvordan ville det sett ut i klassisk fysikk?

	Antall	Utstrekning
Partikkel	Kvantisert	Kvantisert
Bølge	Kontinuerlig	Kontinuerlig
Kvanteobjekt	Kvantisert	Kontinuerlig

Forespørsel om deltagelse i forskningsprosjekt

Dette er en forespørsel om din deltagelse i mitt forskningsprosjekt, som er en del av min masteroppgave. Formålet er å undersøke tanker om begrepet kvanteobjekter. Her vil du finne informasjon om prosjektet og hva deltagelse vil innebære for deg.

Prosjektet vil undersøke et av kompetansemålene i den nye læreplanen for Fysikk 2.

«gjøre rede for hva som skiller kvanteobjekter fra klassiske objekter, og beskrive situasjoner der kvanteeffekter observeres»

Hensikten er å finne ut hvordan elever tolker begrepet kvanteobjekter og hvilke tanker de har om temaet generelt, for å finne ut hvordan vi kan undervise om temaet på best mulig måte. Dette vil bidra til økt forståelse av læreplanmålet og hva vi må finne ut mer om. Forskningen vil innebære opptak av gruppediskusjoner og intervjuer i etterkant.

Dere er bedt om å delta siden dere skal gjennom det aktuelle kompetansemålet i løpet av Fysikk 2 og er målgruppen undervisningsopplegget er laget til.

De neste sidene finner du informasjon om personvern. Dette er noe jeg er pålagt å opplyse om og handler hovedsakelig om at deltagelse er frivillig og at innholdet vil anonymiseres og oppbevares kryptert. På siste side er samtykkeskjemaet.

Informasjon om personvern og rettigheter:

Dine rettigheter:

Så lenge du kan identifiseres i datamaterialet, har du rett til:

- Innsyn i hvilke opplysninger vi behandler om deg, og å få utlevert en kopi av opplysningene
- Å få rettet opplysninger om deg som er feil eller misvisende
- Å få slettet personopplysninger om deg
- Å sende klage til Datatilsynet om behandlingen av dine personopplysninger

Rett til å trekke tillatelsen:

Det er frivillig å delta i prosjektet. Hvis du velger å delta, kan du når som helst trekke samtykket tilbake uten å oppgi noen grunn. Alle dine personopplysninger vil da bli slettet. Det vil ikke ha noen negative konsekvenser for deg hvis du ikke vil delta eller senere velger å trekke deg. Ta i så fall kontakt med oppgaveansvarlig.

Hva gir oss rett til å behandle personopplysninger om deg?

Vi behandler opplysninger om deg basert på ditt samtykke. Det er NTNU som har behandlingsansvar for dine personopplysninger.

På oppdrag fra NTNU har NSD vurdert at behandlingen av personopplysninger i dette prosjektet er i samsvar med personvernregelverket.

Ditt personvern – hvordan vi oppbevarer og bruker dine opplysninger:

Vi vil bare bruke opplysningene om deg slik som beskrevet i dette skrivet. Vi behandler opplysningene konfidensielt og i samsvar med personvernregelverket.

- Det er kun oppgaveansvarlig Julia Fransplass som vil ha tilgang til personopplysninger, via koblingsnøkkel.
- Personopplysningene dine vil bli erstattet med en kode som lagres på en navneliste adskilt fra øvrige data (koblingsnøkkel). Datamaterialet vil lagres ved hjelp av en lagringsløsning driftet av NTNU.
- I en eventuell publisering vil ingen utenforstående være i stand til å gjenkjenne deg. Dine personopplysninger vil ikke bli publisert.

Hva skjer med personopplysningene dine når forskningsprosjektet avsluttes?

Masterprosjektet vil etter planen avsluttes 1. juni 2022. Lyddopptakene vil anonymiseres gjennom transkribering der det vil bli gitt fiktive navn og vil bli slettet ved prosjektslutt.

Hvor kan jeg finne ut mer?

Hvis du har spørsmål til studien, eller ønsker å benytte deg av dine rettigheter, ta kontakt med meg:

- Masterstudent og oppgaveansvarlig: Julia Fransplass, tlf: 92210602, e-post: juliasf@stud.ntnu.no

Under ligger også kontaktinformasjonen til min veileder og NSD som har godkjent denne undersøkelsen:

- Veileder for masteroppgaven: Berit Bungum, e-post: berit.bungum@ntnu.no, tlf: 75391881, professor ved institutt for fysikk.
- NSD – Norsk senter for forskningsdata AS, på epost (personverntjenester@nsd.no) eller telefon: 55582117.

Hvis du har spørsmål knyttet til Personverntjenester sin vurdering av prosjektet, kan du ta kontakt med:

- Personverntjenester på epost (personverntjenester@sikt.no) eller på telefon: 53211500.

Med vennlig hilsen

Julia Fransplass

Prosjektansvarlig

(Student)

Samtykkeerklæring:

Jeg har mottatt og forstått informasjon om prosjektet «tolkninger av begrepet kvanteobjekter», og har fått anledning til å stille spørsmål. Jeg samtykker til:

- å delta i gruppediskusjoner med lydopptak
- å delta i intervju med lydopptak

Jeg samtykker til at mine opplysninger behandles frem til prosjektet er avsluttet

(Signert av prosjektdeltaker, dato)

