

# Fysikkelevers forståelse av kvantefysikkens erkjennelsesmessige sider og dens prinsipielle brudd med klassisk fysikk

"Ja, ikke sant? Det er superfrustrerende!"

**Henning Vinjusveen**  
**Myhreagen**

Master i realfag

Innlevert: juni 2015

Hovedveileder: Berit Bungum, PLU

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Program for lærerutdanning



## Sammendrag

Denne oppgaven er et delprosjekt innenfor forsknings- og utviklingsprosjektet ReleKvant, et prosjekt som utvikler nettbaserte undervisningsressurser tilpasset læreplanens kompetansemål om kvantefysikk i programfaget Fysikk 2. Bakgrunnen for ReleKvant er at kompetansemålene i kvantefysikk i LK06 fokuserer på at elevene skal oppnå kvalitativ forståelse for begreper og erkjennelsesmessige sider ved dem. Internasjonalt er det lite forskning om hensiktsmessig undervisning og elevers forståelse i kvantefysikk. Lærere erfarer undervisning om kvantefysikk som vanskelig, og tidligere forskning viser at begreper i kvantefysikk er utfordrende for elevene.

I denne oppgaven undersøkes hvordan ReleKvant-prosjektets undervisningsressurser kan bidra til elevers forståelse av kvantefysikkens brudd med fundamentale prinsipper fra klassisk fysikk og kvantefysikkens erkjennelsesmessige sider. Undervisningsressursene legger et sosiokulturelt læringssyn til grunn, hvilket innebærer at bruk av språk er viktig i læringsprosessen. Ressursene har blitt testet ut i tre runder ved til sammen 7 klasser ved 5 skoler. Det empiriske grunnlaget for denne undersøkelsen er i hovedsak elevers skriftlige og muntlige responser fra arbeidet med ressursene, samt fire gruppeintervjuer med fire elever i hver gruppe. Analysen av datamaterialet ledet til kategorier for elevers forståelse av prinsippene om kontinuitet og determinisme og hvordan disse prinsippene brytes i kvantefysikken, samt ni påstander om elevers oppfatninger av kvantefysikkens erkjennelsesmessige sider.

Resultatene fra dette prosjektet tyder på at ReleKvants undervisningsressurser bidrar konstruktivt når det kommer til å fremme forståelse av kontinuitetsprinsippet og hvordan dette prinsippet brytes i kvantefysikk. Dette til tross for at mange elever forveksler ordet *kvantisering* med *kvantifisering*. Resultatene avdekket at elever ikke oppnår god nok forståelse av kvantefysikkens brudd med determinisme-prinsippet, og enkelte av elevers oppfatninger av kvantefysikkens erkjennelsesmessige sider er trivielle. Undervisningsressursene bidrar dermed ikke i tilstrekkelig grad til elevers forståelse av kvantefysikken og dens filosofiske grunnlag. Med bakgrunn i resultatene fremmer jeg anbefalinger for undervisning i kvantefysikk og for videre utvikling av ressursene.





## Forord

Denne oppgaven er skrevet som en avsluttende masteroppgave i fysikk fagdidaktikk ved Program for Lærerutdanning, NTNU, og avrunder en femårig lektorutdanning i realfag.

Interessen for fysikkdidaktikk og kvantemekanikk ble tent gjennom lektorutdanningen med henholdsvis Berit Bungum og Ingjald Øverbø som inspirasjonskilder. Det ble tidlig klart for meg at jeg ville skrive en didaktisk rettet masteroppgave. Med denne masteroppgaven har jeg vært så heldig å få kombinere mine interesser for både kvantemekanikk og fysikkdidaktikk. Å få ta del i et stort forskningsprosjekt som ReleKvant har vært svært motiverende og lærerikt for meg. Arbeidet med denne masteroppgaven har pågått over ett år, hvor studiepoengene ble fordelt med 7,5 stp i høstsemesteret og 22,5 stp i vårsemesteret.

Jeg vil få rette en stor takk til veilederen min Berit Bungum, som vekket interesse for fysikkdidaktikk, og som gjennom arbeidet med dette master-prosjektet har lest korrektur og gitt faglig veiledning på mesterlig vis. Videre vil jeg takke mine tidligere lærere Kjersti Austlid, Håvar Edelsteen og Kari Nordskogen. Lærere som disse vokser ikke på trær, og det er disse som inspirerte meg til å bli lektor i realfag. Takk også til medstudenter, mine medLURinger, som har bidratt til å gjøre studietiden minneverdig. En spesiell takk til Helene Kjær og Mathias Gjerland, som har vært viktige støttespillere og ikke minst gode venner.

Trondheim, mai/2015

Henning Vinjusveen Myhrehagen



# Innhold

<b>1</b>	<b>Innledning</b>	<b>7</b>
1.1	Bakgrunn for oppgaven . . . . .	7
1.2	Problemstilling og forskningsspørsmål . . . . .	7
1.3	Oppgavens oppbygning . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Historisk perspektiv</b>	
	– <b>Kvantefysikkens brudd med klassisk fysikk</b>	<b>11</b>
2.1	Milepæler i kvantefysikkens tidlige utvikling . . . . .	12
2.2	Kvantemekanikkens postulater og resultater . . . . .	16
2.3	Kvantemekanikken i et vitenskapsteoretisk lys . . . . .	21
2.4	Oppsummering . . . . .	24
<b>3</b>	<b>Didaktisk perspektiv</b>	
	– <b>Utfordringer ved undervisning i kvantefysikk</b>	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>ReleKvant-prosjektets bakgrunn og undervisningsmaterie</b>	<b>31</b>
4.1	Bakgrunn . . . . .	31
4.2	Design-prinsippene for prototypen av undervisningsmoduler . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Metode</b>	<b>37</b>
5.1	Elevresponser . . . . .	38
5.2	Gruppeintervju og observasjon . . . . .	39
5.3	Analysemetode . . . . .	42
<b>6</b>	<b>Resultater og analyse</b>	<b>45</b>
6.1	Elevers forståelse av kvantiseringsbegrepet og dets brudd med kontinuitetsprinsippet . . . . .	45
6.2	Elevers forståelse av kvantisering som brudd med kontinuitetsprinsippet	49
6.3	Utvikling av modulen ”Behov for en ny fysikk” forut for 3. utprøving	52
6.4	Elevers forståelse av determinisme-prinsippet . . . . .	53
6.5	Elevers forståelse av hvordan determinisme-prinsippet brytes i kvantefysikk . . . . .	54
6.6	Elevers oppfatninger av erkjennelsesmessige sider ved kvantefysikken .	57
<b>7</b>	<b>Diskusjon og konklusjon</b>	<b>65</b>
7.1	Diskusjon . . . . .	65
7.2	Behov for endring av læreplanen? . . . . .	68
7.3	Anbefalinger for utvikling av undervisningsmodulene . . . . .	70

7.4 Konklusjon . . . . .	72
<b>Litteraturliste</b>	<b>73</b>
<b>Vedlegg 1: Utvalgte oppslag fra ReleKvant-moduler</b>	<b>77</b>
<b>Vedlegg 2: Intervjuguide ved utprøving 2</b>	<b>89</b>
<b>Vedlegg 3: Intervjuguide ved utprøving 3</b>	<b>91</b>

# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn for oppgaven

Mitt første møte med kvantefysikk var på videregående skole, og min fysikklærer innrømmet kanskje for første gang at han nå skulle undervise noe han ikke helt forsto. Gjennom undervisningen forsto jeg hvordan lærerens mangel på forståelse kunne ha seg, for begrepene og fenomenene som dukket opp var ikke bare kompliserte, men de hadde også forundrende konsekvenser. I likhet med eleven bak sitatet ”Ja, ikke sant? Det er superfrustrerende!”, husker jeg å ha vært forvirret og litt frustrert da jeg ikke forsto hensikten med kvantefysikken som ble undervist. På universitetet møtte jeg og de andre studentene kvantemekanikken i form av det matematiske apparatet.

I motsetning til den matematiske behandlingen av kvantemekanikken på universitetet, fokuserer norske kompetansemål i hovedområdet ”Moderne fysikk” på kvalitativ forståelse av kvantefysiske begreper og fenomener, samt erkjennelsesmessige sider ved disse. Kompetansemålet om at elevene skal kunne gjøre rede for erkjennelsesmessige konsekvenser av utfordrende temaer som ”sammenfildrede fotoner” og ”Heisenbergs uskarphetsrelasjoner” ble introdusert i Kunnskapsløftet, og har bydd på hodebry for elever og lærere (Angell *et al.*, 2011). Det er få andre land som har tilsvarende læreplanmål (se Henriksen *et al.*, 2014), og det finnes dermed lite internasjonal forskning om hensiktsmessige undervisningsopplegg og om elevers begrepsforståelse og -utvikling på videregående skole-nivå.

Et prosjekt som har som mål å videreutvikle vår forståelse av dette feltet er ReleKvant-prosjektet, som er et samarbeidsprosjekt mellom fysikdidaktikere ved Skolelaboratoriet ved Fysisk institutt, UiO, Naturfagsenteret, NTNU og fysikklærere ved UiOs universitetsskoler. I ReleKvant-prosjektet utvikles nettbaserte undervisningsressurser, også omtalt som undervisningsmoduler, i moderne fysikk tilpasset norske læreplanmål som har til hensikt å motivere elever og fremme læring og filosofisk refleksjon. Prosjektet har også som mål å bidra med kunnskap om elevers begrepsutvikling og -forståelse i moderne fysikk ved utprøving av undervisningsmateriellet i klasserom (ReleKvant, 2015).

## 1.2 Problemstilling og forskningsspørsmål

Denne masteroppgaven tar sikte på å være et bidrag for ReleKvant-prosjektets målsetninger. Jeg vil i denne oppgaven undersøke hvordan undervisningsressursene ut-

viklet av ReleKvant-prosjektet fungerer med tanke på elevers kvalitative forståelse av kvantefysikken og oppfatninger av dens erkjennelsesmessige sider ved å søke svar på den overordnede problemstillingen:

Hvordan kan undervisningsmaterieell utviklet i ReleKvant-prosjektet bidra til fysikkelevers forståelse av kvantefysikken og dens filosofiske grunnlag?

Forskning tyder på at lærebøker i stor grad bruker klassiske analogier og semi-klassiske modeller i sine behandlinger av kvantefysikken, og elever får dermed ikke et klart bilde av hvordan kvantefysikk skiller seg prinsipielt fra klassisk fysikk (se Olsen, 2002; Renstrøm, 2011). Det anbefales derfor å klargjøre elevene om prinsipper som klassisk fysikk hviler på for å fremme hensiktsmessig forståelse av kvantefysiske begreper. Renstrøm (2011) utviklet i forbindelse med sin doktorgradsavhandling et undervisningsforløp i kvantefysikk, og klargjorde elevene om hvordan de tre prinsippene om *kontinuitet*, *determinisme* og *lokal virkelighet* brytes i kvantefysikk. ReleKvant-prosjektet legger i sine undervisningsressurser vekt på de samme tre prinsippene. Lærebøker beskriver ikke alle disse prinsippene i detalj, så undervisningsressursene vil være hovedkilden for elevers forståelse av dette. Med bakgrunn i dette og med henblikk på å besvare den overordnede problemstillingen ovenfor vil jeg søke svar på følgende forskningsspørsmål:

1. Hvordan forstår elevene fundamentale prinsipper fra klassisk fysikk og hvordan disse brytes i kvantefysikken?
2. Hvilke oppfatninger har elevene om erkjennelsesmessige sider ved kvantefysikken?

Disse forskningsspørsmålene må forstås i konteksten av ReleKvant-prosjektets utprøvinger av modulene. *Elevene* som forskningsspørsmålene retter seg mot, er de elevene som tar del i disse utprøvingene. Resultater fra dette prosjektet kan likevel ha relevans for undervisning i kvantefysikk generelt.

Med forskningsspørsmål 1 søkes det svar på hvordan elever forstår fundamentale prinsipper fra klassisk fysikk. I denne oppgaven tar jeg for meg to av de tre prinsippene nevnt ovenfor: prinsippene om *kontinuitet* og *determinisme*. Dette fordi jeg anser disse prinsippene som de mest relevante og fordi datamaterialet ikke ga grunnlag for analyse av elevers forståelse av prinsippet om *lokal virkelighet*. I forskningsspørsmål 1 ligger en antakelse om at en forståelse av hva prinsippene dreier seg om er nøkkelen til å kunne forstå hvordan disse brytes i kvantefysikken til grunn. Uten å forstå prinsippene i seg selv kan man ikke vise forståelse av hvordan kvantefysikken

bryter prinsipielt med klassisk fysikk.

Formuleringen *Hvordan forstår elevene* innebærer å undersøke elevenes ulike måter å forstå de to prinsippene om kontinuitet og determinisme på og vurdere hvorvidt disse er hensiktsmessige for å oppnå et tydelig bilde av hvordan kvantefysikk skiller seg fra klassisk fysikk. Disse prinsippene og hvordan de brytes i kvantefysikken nevnes ikke eksplisitt i læreplanen, og lærebøkene tar ikke opp alle disse eksplisitt. ReleKvants undervisningsmoduler kan dermed være hovedkilden for elevers kunnskap og forståelse av prinsippene og hvordan disse brytes i kvantefysikk.

*Erkjennelsesmessige sider ved kvantefysikken* i forskningsspørsmål 2 forstås som kvantefysikkens filosofiske grunnlag og epistemologi. Det undersøkes dermed hvilke oppfatninger elevene har av hva slags kunnskap kvantefysikken byr på og hvilken innsikt dette gir om verden på mikronivå. En *oppfatning* forstås som en *fortolkning* eller en *mening*. Formuleringen *elevenes oppfatninger* innebærer at elevene kan ha flere, og ikke bare én, oppfatninger omkring erkjennelsesmessige sider ved kvantefysikken. I kvantefysikk er det ingen konsensus rundt tolkningen av kvantefysikken, noe som betyr at det ikke i alle tilfeller lar seg gjøre å vurdere om elevenes oppfatninger er *riktige*. Hvordan prinsippene som omtales i forskningsspørsmål 1 brytes i kvantefysikk er også erkjennelsesmessige sider ved kvantefysikken. Det er altså en relasjon mellom forskningsspørsmålene, slik at deler av svaret på forskningsspørsmål 2 må ses i sammenheng med svaret på forskningsspørsmål 1.

Oppgavens empiriske data omfatter elevers skriftlige og muntlige responser på oppgaver gitt i forbindelse med tre utprøvningsrunder av ReleKvants undervisningsmaterieell i sju klasser ved fem forskjellige skoler. Datamaterialet omfatter i tillegg fire gruppeintervjuer med til sammen 16 elever fra forskjellige klasser ved tre skoler.

Som tidligere understreket, må problemstillingen og forskningsspørsmålene forstås i konteksten av ReleKvant-prosjektets utprøving av dets undervisningsmoduler. Siden disse modulene er under utvikling, må det også tas stilling til endringer gjort underveis og hvordan disse har bidratt til elevenes forståelse og oppfatninger. Resultater fra undersøkelsene gjort i denne oppgaven vil derfor lede til anbefalinger for videre utvikling av undervisningsmodulene, og mer generelt for undervisning i kvantefysikk, for å fremme elevers læringsutbytte. Resultater fra analysen av elevers forståelse av kvantefysikkens prinsipielle brudd med klassisk fysikk vil dessuten kunne antyde hvorvidt et fokus på prinsippene er formålstjenlig i forhold til å gi elevene et godt bilde av hvordan kvantefysikk skiller seg fra klassisk fysikk.

### 1.3 Oppgavens oppbygning

I det foregående har oppgavens bakgrunn og hensikt blitt beskrevet. I kapittel 2 inngår historiske perspektiver og kvantefysikkens teoretiske og filosofiske grunnlag. Dette danner et teoretisk bakteppe for hvordan prinsipper fra klassisk fysikk brytes i kvantefysikk. Didaktiske perspektiver relatert til undervisning i kvantefysikk blir presentert i kapittel 3. Her vises det også til resultater fra forskning som underbygger problemstillingen og forskningsspørsmålene. ReleKvant-prosjektets bakgrunn og undervisningsmoduler beskrives i kapittel 4. Til sammen utgjør kapittel 2-4 det teoretiske rammeverket for denne oppgaven. Metodene som ble brukt for å besvare problemstillingen og forskningsspørsmålene redegjøres for i kapittel 5. Kapittel 4 og 5 danner til sammen en beskrivelse av datainnsamlingens kontekst. Resultater og analyse av empirisk data legges fram i kapittel 6. I kapittel 7 diskuteres resultatene og analysen opp mot teoretiske perspektiver og egne refleksjoner med utgangspunkt i problemstillingen og forskningsspørsmålene. Oppgavens konklusjon inngår i kapittel 7.



## 2 Historisk perspektiv

### – Kvantefysikkens brudd med klassisk fysikk

I dag skiller vi mellom klassisk og moderne fysikk. Klassisk fysikk består blant annet av Newtonsk mekanikk og Maxwells elektrodynamiske teori, som begge ble utviklet før 1900. Newtonsk mekanikk er ikke bare en matematisk modell som beskriver makrokosmos, men er også et rammeverk for vitenskapelig forskning og hvordan man skal forstå verden. Et slikt rammeverk kalles ifølge Dybvig og Dybvig (2003) et paradigme. I sin doktorgradsavhandling påpeker Renstrøm (2011) tre av prinsippene som den klassiske fysikken hviler på: prinsippene om kontinuitet, determinisme for enkelthendelser og lokal virkelighet. Med *kontinuitet* menes det at alle prosesser i naturen foregår kontinuerlig i rom og tid, og energien til et system forekommer i en vilkårlig minstemengde og kan endres kontinuerlig. *Determinisme* i fysikk dreier seg om prediksjon. Det vil si at ved gitte startbetingelser kan man beregne et systems tilstand, for eksempel et objekts posisjon og hastighet, beregnes eksakt ved et vilkårlig tidspunkt. Med *lokal virkelighet* (separabilitet) menes at alle fysiske egenskaper til et objekt er veldefinerte, og måling av en egenskap til ett objekt i et sammensatt system har ingen påvirkning på de andre objektene i systemet (Renstrøm, 2011).

Etter 1900-tallet ble moderne fysikk, som består av Einsteins relativitetsteori og kvantefysikk, utviklet. Kvantefysikken, eller snarere kvantemekanikken, er en matematisk modell som beskriver mikrokosmos. Ifølge Ingjald Øverbø (u.d.) hadde kvantefysikken en ”trang fødsel” som strakte seg i perioden 1900-1925. I det følgende belyses et utvalg av fysikkhistoriske milepæler fra kvantemekanikkens svangerskapsperiode. Dette fordi fysikere i denne tidsperioden innså hvordan mikroverdens fysikk bryter med blant annet prinsippene i klassisk fysikk som ble nevnt ovenfor. Historien er ikke fullstendig, men den belyser enkelte sentrale begivenheter i denne epoken av fysikkens utvikling (kap. 2.1). Videre presenteres kvantemekanikkens postulater, og det vises til hvordan disse strider mot prinsipper fra klassisk fysikk (kap. 2.2). Her dannes det et grundig teoretisk bakteppe for noe av det fysikkfaglige som elever ifølge læreplanen i fysikk skal lære. Framstillingen av postulatene og andre kvantemekaniske resultater er i hovedsak hentet fra Hemmers lærebok *Kvantemekanikk* (2005). Til slutt går jeg i kap. 2.3 nærmere inn på to tolkninger av kvantemekanikken, som ble til etter de vitenskapsfilosofiske debattene mellom den tidlige moderne fysikkens ledende skikkelser – Albert Einstein og Niels Bohr.

## 2.1 Milepæler i kvantefysikkens tidlige utvikling

I starten av 1900-tallet ble den klassiske fysikken betraktet som en bortimot fullendt beskrivelse av verden, og tilsynelatende var det newtonske paradigmet på sitt sterkeste. Newtons mekanikk hadde vært etablert i over 200 år, og termodynamikk og statistisk mekanikk ble utviklet i løpet av 1800-tallet. Lysets bølgenatur var kjent etter eksperimenter utført av blant andre Young og Fresnel og forbindelsen mellom elektriske og magnetiske fenomener var klarlagt og sammenfattet i Maxwells likninger i 1865. Maxwell forutså eksistensen av elektromagnetiske bølger, som senere ble oppdaget av Hertz i 1887. Etter dette ble det erkjent at lys er elektromagnetiske bølger. Det som sto igjen av beskrivelsen av verden ble sett på som småproblemer, men fysikere i starten av 1900-tallet viste at disse problemene var mye større enn antatt (Hemmer, 2005). Disse små problemene blir i vitenskapsteori kalt anomalier, som vil si at det var fenomener som ikke kunne beskrives tilstrekkelig innenfor det newtonske paradigmet (Dybvig & Dybvig, 2003).

Kvantefysikkens historie starter med Max Plancks forsøk på å gi Wiens strålingslov en teoretisk begrunnelse. Wiens strålingslov ble presentert i 1896, og var basert på eksperimentelle resultater. Wiens strålingslov forklarer at strålingsenergien  $u(\nu, T)$  per volumenhet og per frekvensenhet til et svart legeme med temperatur  $T$  er fordelt på ulike frekvenser  $\nu$ , og er formulert som

$$u(\nu, T) = \alpha \nu^3 e^{-\frac{\beta \nu}{T}}, \quad (1)$$

hvor  $\alpha$  og  $\beta$  er konstanter. Eksperimenter gjort av Rubens og Kurlbaum viste at Wiens strålingslov stemte godt i det høyfrekvente området, men stemte dårlig i det lavfrekvente. Planck ble informert av Rubens om hans målinger i et selskap hjemme hos Planck. Etter selskapet satte Planck seg ned og utledet en ny strålingslov som stemte overens med Rubens målinger:

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

der  $h$  er en ny konstant, som senere ble kalt Plancks konstant (Renstrøm, 2011). For å kunne forklare denne empiriske formelen måtte Planck anta at de oscillerende ladningene i veggen hadde kvantiserte energier, og at energiutvekslingen mellom de oscillerende ladningene og strålingsfeltet ville skje i kvanta. Denne antakelsen ble av Planck selv betraktet som en handling i desperasjon (Hemmer, 2005). Selv om

antakelsen brøt med det sentrale prinsippet om kontinuitet i klassisk fysikk, fikk den ikke stor oppmerksomhet før enn fem år senere, da Einstein i 1905 viste at Plancks strålingslov ikke kan utledes fra klassisk fysikk (Renstrøm, 2011). Likevel regnes 14. desember 1900, dagen da Planck presenterte den nye strålingsloven, som kvantefysikkens fødselsdag (Hemmer, 2005).

Neste milepæl i erkjennelsen av energikvantisering finner vi i Einsteins artikkel (se Einstein, 1905) om teorien for den fotoelektriske effekt. Med utgangspunkt i Wiens strålingslov og betraktning av entropi viser han at uttrykket for entropiens volumavhengighet for en gass har samme form som for stråling, og foreslår ut fra dette at lyset består av uavhengige energikvanter. Disse lyskvantene kunne ifølge Einstein bare absorberes hele og kunne ikke deles opp. I artikkelen uttrykker han strålingens totale energi ved

$$E = \frac{nR\beta}{N}\nu, \quad (3)$$

der  $n$  er et heltall og  $R/N = k_B$  (Boltzmanns konstant). Ifølge Renstrøm (2011) sier ikke Einstein i artikkelen at  $R\beta/N$  er lik Plancks konstant, slik at strålingens totale energi kunne uttrykkes som  $E = nh\nu$ . Strålingsenergien består dermed av  $n$  energikvanter, hver med energi  $h\nu$ , konkluderte Einstein. Videre bruker han denne lyskvant-hypotesen for å forklare fotoelektrisk effekt, som forskere tidligere hadde utforsket eksperimentelt. I 1902 presenterte Lenard sine resultater om det samme fenomenet: frekvensen til strålingen må være over en terskelfrekvens, som var forskjellig for ulike metaller, for at elektroner skal bli løsrevet, og farten til de løsrevde elektronene er uavhengig av strålingsintensiteten. Med Lenards resultater og sin egen teori for kvantisert strålingsenergi satte Einstein opp uttrykket for sammenhengen mellom de løsrevde elektronenes maksimale fart og strålingsfrekvensen (Renstrøm, 2011). Einstein forklarte fotoelektrisk effekt med at elektroner i metallet absorberer lyskvant med energi  $E = h\nu$ . Når dette skjer, økes elektronets kinetiske energi  $E_k$  med samme mengde. Noe av denne energien må brukes til å frigjøre elektronet fra metallet, mens resten går med til kinetisk energi. Matematisk tar dette den kjente formen

$$E_k = h\nu - W, \quad (4)$$

der  $W$  er løsrivingsarbeidet. Mottakelsen av Einsteins lyskvanthypotese illustreres dekkende ved følgende sitat fra brevet til det Prøyssiske Vitenskapsakademi datert

1913, som ble skrevet av blant andre Planck:

I sum kan man si at det knapt finnes ett av de store problemer som moderne fysikk er så rik på, hvor Einstein ikke har bidratt på bemerkelsesverdig vis. At han av og til har bommet i sine spekulasjoner, som for eksempel i sin hypotese om lyskvanter, kan ikke tale for mye mot ham, for det er ikke mulig å introdusere helt nye idéer i selv de mest eksakte vitenskaper uten å ta en sjanse en gang i blant (som sitert i Renstrøm, 2011, s. 66).

Dette sitatet blir ofte trukket fram for å vise til Plancks mistro til lyskvanthypotesen. Til tross for motstanden som lyskvanthypotesen fikk, fortsatte Einstein med å forsvare og utvikle hypotesen. Selv om Einsteins likning for elektronenes maksimale kinetiske energi ble bekreftet av Millikans resultater fra eksperimenter med fotoelektrisk effekt, ble ikke dette sett på som noen bevis for lyskvanthenes eksistens (Renstrøm, 2011). En utvidet hypotese kom i Einsteins artikkel fra 1917, hvor han antar at et lyskvant med energi  $E = h\nu$  har impuls  $p$  gitt av

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (5)$$

Denne utvidelsen av lyskvanthypotesen ble brukt av Compton i det som blir regnet som det avgjørende beviset for lyskvanthypotesen. I sin artikkel fra 1923, med tittelen *A Quantum Theory on the Scattering of X-rays by Light Elements*, viser han at spredningsprosessen mellom røntgenstråler og elektroner kunne forklares ved å betrakte prosessen som et kvantefenomen (se Compton, 1923). Ut fra bevarelse av energi og impuls i en kollisjon mellom et lyskvant med energi  $h\nu$  og impuls  $h\nu/c$  og et fritt elektron kunne Compton forklare både den spredte strålens bølgelengde og spredningsvinkel. Med disse resultatene ble det slått fast at lys har både bølge- og partikkelnatur, også kalt bølge-partikkel-dualisme (Renstrøm, 2011).

En siste milepæl vedrørende kvantisering av energi som bør nevnes, er Bohrs banebrytende atomteori fra 1913. Etter Thomsons oppdagelse av elektronet i 1897 ble det ifølge Renstrøm (2011) oppfattet som sannsynlig at elektronene kom fra stoffers atomer. Neste skritt ble for fysikere å lage atommodeller som inneholdt elektroner og som blant annet kunne forklare atomets størrelse, masse, ladningsnøytralitet, stabilitet og atomenes emisjon av stråling med bestemte frekvenser. Et par år senere klarte fysikere ved Cavendish-laboratoriet å bestemme elektronets ladning, og elektronets masse ble dermed beregnet til å være i størrelsesordenen en tusendels av hydrogenets atomvekt (Kragh, 2012). I årene som fulgte ble mange forskjellige atommodeller fore-

slått, hvorav de mest kjente før Bohrs var Thomsons elektronmodell, Rutherfords kjernemodell og Nicholsons planetmodell med kvantisert banespinn. Disse modellene ble Bohrs utgangspunkt da han etter sin ankomst til Manchester i 1912 begynte å vise interesse for atomteori. Nicholsons atommodell besto av en positivt ladet kjerne omkranset med elektroner i sirkelbaner, i likhet med Rutherfords kjernemodell. Ifølge Renstrøm (2011) oppdaget Nicholson at forholdet mellom den potensielle energien  $E_p$  til  $n$  elektroner i en elektronring med radius  $a$  og omløpsfrekvens  $\nu$  er proporsjonalt med Plancks konstant. Han konkluderte også at elektroners banespinn  $L$  er gitt ved

$$L = \frac{nh}{2\pi}, \quad (6)$$

som vil si at banespinn er kvantisert.

I 1913 publiserte Bohr artikkelen med tittelen *On the Constitution of Atoms and Molecules* hvor han hevdet at klassisk mekanikk ikke ser ut til å fungere på atomnivået (Kragh, 2012). Bohr tok først for seg et stabilt atom i stasjonær tilstand, som vil si en tilstand der atomet ikke avgir stråling. For å løse problemet med å definere atomets størrelse kommer Bohr med en hypotese om at “for enhver stabil ring er det et konstant forhold mellom kinetisk energi til elektronene i ringen og elektronenes omløpsfrekvens (Bohr, sitert i Renstrøm, 2011, s. 86)”. Denne konstanten som Bohr viser til, har samme dimensjon som Plancks konstant. Med denne sammenhengen kunne han nå regne ut elektronenes diskrete energinivåer som bestemte deres bevegelsesbaner.

Bohr oppdaget senere at Balmer's formel hadde likheter med hans eget uttrykk for elektronets kinetiske energi, og skal ha sagt at “As soon as I saw Balmer's formula, the whole thing was immediately clear to me (Bohr, sitert i Kragh, 2012, s. 56)”. Det som ble klart for Bohr, var at Balmer's formel kunne tolkes som en differanse mellom to stasjonære energinivåer,

$$h\nu = \Delta E = E_m - E_n = hcR \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (7)$$

hvor  $R$  er Rydberg-konstanten,  $n = 1, 2, 3 \dots$  og  $m = n + 1, n + 2 \dots$ . Bohr kalte denne differansen for et kvantesprang, og antok at energien som ble til overs ved elektron-spranget fra ett energinivå til et lavere, ble sendt ut som elektromagnetisk stråling med energi  $h\nu$ . Dette var en revolusjonerende idé, for tidligere hadde man antatt at emisjon fra atomer skyldtes elektronenes egenfrekvens, og Bohrs idé om

elektronets overganger mellom energinivåer stred mot Maxwells elektromagnetiske teori. Bohrs beregninger stemte for hydrogenatomets spektrallinjer, og han brukte dette som et argument for teorien sin. En annen idé som Bohr presenterte var at for nivåoverganger langt unna kjernen, altså for store energikvantetall, fra  $N$  til  $N - 1$ , måtte emittert stråling ha frekvens lik omløpsfrekvensen, slik at atomteori- en i grensetilfellet ville korrespondere med klassisk elektromagnetisk teori. Dette prinsippet kalte han *korrespondanseprinsippet*, og skulle vise seg å være viktig i utformingen av kvantemekanikken (Renstrøm, 2011). Også dette prinsippet ble brukt som argument for at teorien til Bohr stemte.

I løpet av kvantefysikkens ”trange fødsel” har vi nå sett hvordan fysikerene Planck, Einstein og Bohr sine antakelser gradvis førte til erkjennelse om at strålingsenergi er kvantisert. Etter Comptons eksperimentelle bekreftelse av Einsteins lyskvanthypotese ble det slått fast at lys har både bølge- og partikkelnatur. Samme år som denne bekreftelsen kom, lanserte franskmannen de Broglie hypotesen om at også partikler på tilsvarende måte har en bølgenatur (Hemmer, 2005). Bølgenaturen skulle for en partikkel med energi  $E$  og impuls  $p$  svare til en bølgelengde  $\lambda$  og frekvens  $\nu$  henholdsvis gitt ved

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \text{og} \quad \nu = \frac{E}{h}. \quad (8)$$

Denne hypotesen ble en viktig brikke for videre fysikkteoretisk utvikling. Som vi skal se i neste delkapittel, hadde man allerede noen få år senere to beskrivelser av kvantemekanikken.

## 2.2 Kvantemekanikkens postulater og resultater

Kvantemekanikken sies å ha blitt til som fysisk teori i løpet av årene 1924-1927. Heisenberg var først ute med sin formulering, matrisemekanikken. Bakgrunnen for denne var kritikk som var reist mot Bohrs atommodell, hvor størrelser som elektronets hastighet, egenfrekvens og posisjon inngikk. Kritikerne Born og Jordan advarte mot å bruke disse størrelsene, som ikke var eksperimentelt målbare, i en teori fordi ”...quantities that enter the true laws of nature’ must all be ’observable and ascertainable in principle” (Torretti, 1999). Heisenbergs mål ble dermed å lage en teori med observerbare og bekræftbare fysiske størrelser, som resulterte i matrisemekanikken.

Andre mann ute med en formulering av kvantemekanikken var Schrödinger. Han ble motivert av de Broglies hypotese (likning (8)), som gjorde det mulig å regne

ut et elektrons bølgelengde. Denne muligheten ga opphav til idéen om å tilskrive elektronet en bølgefunksjon,

$$\Psi(\vec{r}, t) = Ae^{2\pi i(\vec{p}\cdot\vec{r}-Et)/h}, \quad (9)$$

hvor  $A$  er en vilkårlig amplitude. I 1925 kom Schrödinger fram til likningen som i dag bærer hans navn, Schrödinger-likningen. Dette var en bølgelikning som reproduserte de samme energinivåene til hydrogenatomet som Bohr postulerte i sin atomteori, og blir i dag betraktet som kvantemekanikkens grunnleggende bevegelseslikning. Den er en lineær og homogen differensiallikning som uttrykkes ved

$$i\hbar\frac{\partial\Psi}{\partial t} = \hat{H}\Psi, \quad (10)$$

hvor  $\hat{H}$  er systemets Hamiltonoperator. Schrödinger publiserte sin formulering av kvantemekanikken, bølgemekanikken, i januar 1926, nesten et halvt år etter Heisenbergs matrisemekanikk. Felles for begge er at de tar utgangspunkt i observerbare størrelser og i isomorfske Hilbert-rom. Det var Pauli som viste at disse to formuleringene av kvantemekanikken produserte de samme kvantitative prediksjonene, og at den ene beskrivelsen kunne utledes fra den andre. Matrisemekanikken og bølgemekanikken betraktes i dag som ekvivalente, selv om det fysiske innholdet avviker noe (Torretti, 1999).

Med utgangspunkt i posisjonsrommet vil jeg i det følgende presentere bølgemekanikkens fire postulater ut fra Hemmers (2005) definisjoner. Dette gjør jeg framfor den generelle formuleringen av kvantemekanikk fordi det kommer enkelt fram av postulatene hvordan kvantemekanikken bryter med prinsipper fra klassisk fysikk, og det matematiske rammeverket som postulatene uttrykkes i, betraktes som tilstrekkelig for denne oppgaven.

Kvantemekanikkens første postulat omtales gjerne som *operatorpostulatet*, og dreier seg om at enhver observerbar størrelse  $F$  svarer i kvantemekanikken til en lineær, matematisk operator  $\hat{F}$ . Det vil si at en fysisk størrelse som i klassisk mekanikk betegnes  $F(q_1, q_2, \dots, q_f, p_1, p_2, \dots, p_f)$ , svarer i kvantemekanikken til en operator på formen  $\hat{F} = F(\hat{q}_1, \hat{q}_2, \dots, \hat{p}_1, \hat{p}_2, \dots)$ . Impulsoperatorene  $\hat{p}_n$  er gitt ved

$$\hat{p}_n = \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial q_n}, \quad (11)$$

der  $\hbar = h/2\pi$ , mens operatoren for posisjonskoordinatene er gitt ved

$$\hat{q}_n = q_n. \quad (12)$$

Rekkefølgen av disse må være slik at operatoren  $\hat{F}$  er hermitesk. En operator er hermitesk dersom

$$\int \Psi_1^* \hat{F} \Psi_2 d\tau = \int \Psi_2 (\hat{F} \Psi_1)^* d\tau \quad (13)$$

gjelder for alle kvadratisk integrerbare bølgefunksjoner  $\Psi_1$  og  $\Psi_2$ . I likningen over er  $\Psi_j^*$  den komplekskonjugerte av  $\Psi_j$  og det integreres over  $d\tau = dq_1 \cdot dq_2 \cdots dq_f$ . I likningen ligger det også en betingelse om at operatoren er selvadjungert, som vil si at  $\hat{F}^\dagger = \hat{F}$ . Grunnen for at denne hermiteshetsbetingelsen stilles til operatorene vil jeg komme tilbake til snarlig. Det finnes operatører som ikke har en klassisk analog, det vil si en operatører som ikke kan konstrueres ut fra et klassisk matematisk uttrykk for den fysiske størrelsen. Spinn er et eksempel på en slik operator.

*Tilstandspostulatet* sier at tilstanden til et system er fullstendig beskrevet ved en bølgefunksjon  $\Psi$  som er en funksjon av systemets uavhengige koordinater og tida. Bølgefunksjonen løser Schrödinger-likninga gitt av likning (10) ovenfor. Dette vil si at bølgefunksjonen innehar informasjon om alle mulige tilstander et system kan være i.

Schrödinger-likninga er, som nevnt tidligere, en lineær differensiallikning. Dette medfører at hvis  $\psi_1$  og  $\psi_2$  er to stasjonære løsninger av Schrödinger-likninga, så er også lineærkombinasjonen

$$\Psi = c_1 \psi_1 + c_2 \psi_2, \quad (14)$$

hvor koeffisientene  $c_1$  og  $c_2$  er konstante og generelt komplekse, en løsning av den. Dette kalles *superposisjonsprinsippet*.

*Forventningsverdi-postulatet* gir oss at forventningsverdien til observerbare størrelser  $F$  er middelverdien av måleresultatene av den ved et stort antall uavhengige målinger. Dermed er forventningsverdien gitt av

$$\langle F \rangle = \int \Psi^* \hat{F} \Psi d\tau. \quad (15)$$

Med betingelsen om at operatorene skal være hermitiske får vi at



$$\langle F \rangle = \langle F \rangle^*, \quad (16)$$

som sørger for at vi får reelle måleresultater, noe man jo må ha, siden det er fysiske verdier som måles.

Ehrenfests teorem viser at bevegelseslikningene til forventningsverdiene for impuls, posisjon og kraft sammenfaller med de klassiske bevegelseslikningene, slik at

$$\frac{d}{dt}\langle \vec{r} \rangle = \frac{\langle \vec{p} \rangle}{m} \quad \text{og} \quad \frac{d}{dt}\langle \vec{p} \rangle = \langle -\nabla V \rangle, \quad (17)$$

hvor  $V$  er potensialet til et ytre felt. Denne sammenfallingen betyr at klassisk mekanikk er et grensetilfelle av kvantefysikk. Dette var ikke en ny idé som spratt direkte ut av bølgemeknikken, men var en videreutvikling av Bohrs korrespondanseprinsipp.

Det fjerde og siste postulatet kalles *måle-teoretisk postulat*, og gir at de eneste mulige verdier man kan få ved måling av en observerbar størrelse  $F$  er en av egenverdiene  $f_n$  av operatoren  $\hat{F}$ . Umiddelbart etter målingen av  $F$  er systemet i en egentilstand for  $\hat{F}$  som svarer til den målte egenverdien  $f_n$ . Disse egenverdiene danner sammen med tilhørende egenfunksjoner  $\phi_n$  løsninger av egenverdilikningen

$$\hat{F}\Psi_n = f_n\phi_n, \quad (18)$$

der  $f = \text{konstant}$ . Egenverdiene  $f_n$  danner et sett med diskrete måleverdier, og vi sier at den observerbare størrelsen er kvantisert.

Dersom et system er i en stasjonær tilstand med egenfunksjonen  $\Psi_n$ , vil man ved måling oppnå egenverdien  $f_n$ . Hvis derimot et system prepareres i en superponert tilstand, si  $\Psi = c_1\psi_1 + c_2\psi_2 + c_3\psi_3$ , vil man ved måling få kun én av de tilhørende egenverdiene  $f_1$ ,  $f_2$  eller  $f_3$ . La oss si at vi ved målingen får egenverdien  $f_2$ . Ifølge måle-teoretisk postulat er systemet i øyeblikket etter målingen i tilstanden beskrevet av  $\psi_2$ . Målingen har med andre ord forandret tilstanden til systemet, fra en superponert tilstand til en stasjonær tilstand. En ny måling av det samme systemet ville gitt den samme egenverdien  $f_2$ , og tilstanden til systemet etter målingen ville fortsatt være beskrevet av den stasjonære tilstanden  $\psi_2$ .

Heisenberg utledet i 1927 ut fra kvantemeknikken en matematisk relasjon som har blitt oppkalt etter ham, *Heisenbergs uskarphetsrelasjon*. Generelt sier denne at der-

som to operatører ikke kommuterer, kan de tilhørende fysiske størrelsene ikke ha skarpe verdier samtidig (Hemmer, 2005). Den generelle, matematiske uskarphetsrelasjonen lyder

$$\Delta F \Delta G \geq \frac{1}{2} |\langle [\hat{F}, \hat{G}] \rangle|, \quad (19)$$

hvor  $\Delta F$  og  $\Delta G$  er uskarphetene i de observerbare størrelsene  $F$  og  $G$ , henholdsvis, og  $[\hat{F}, \hat{G}] \equiv \hat{F}\hat{G} - \hat{G}\hat{F}$  er operatorenes kommutator. Ifølge Hemmer (2005) er standardavviket fra middelveien et naturlig mål for uskarpheten til en størrelse  $F$ . Standardavviket fra middelveien er gitt av

$$\Delta F = \sqrt{\langle (F - \langle F \rangle)^2 \rangle}. \quad (20)$$

Dersom de to operatorene ikke kommuterer, som vil si at  $[\hat{F}, \hat{G}] \neq 0$ , kan ikke de to fysiske størrelsene ha veldefinerte verdier samtidig. Heisenberg fant ut at de to parene av fysiske størrelser posisjon og impuls, samt energi og tid, ikke kommuterer. Kommutatoren til begge par av operatører er  $i\hbar/2\pi$ . Heisenbergs uskarphetsrelasjoner kan dermed for disse parene av fysiske størrelser uttrykkes som

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{4\pi} \quad \text{og} \quad \Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{4\pi}. \quad (21)$$

Det at disse parene av størrelser ikke kan ha veldefinerte verdier samtidig, er en fundamental begrensning ved naturen, og bryter med prinsippet om lokal virkelighet i klassisk fysikk. På engelsk kalles relasjonene for *Heisenberg's Uncertainty Principles*, som oversettes direkte til Heisenbergs usikkerhetsprinsipper. Generelt brukes både *uskarphet*- og *usikkerhetsprinsippet* synonymt på norsk. De norske lærebøkene bruker ordet uskarphet konsekvent, siden ordet *usikkerhet* kan gi opphav til en misforståelse om at prinsippet omhandler en *måleusikkerhet* eller mangel på informasjon. Da er det mer instruktivt å bruke betegnelsen uskarphet, som betegner at naturen i seg selv er uskarp i mikroverden.

En annen konsekvens knyttet til Heisenbergs uskarphetsrelasjoner er at kvantefysikken er indeterministisk. Med dette menes at man kun kan forutsi et systems fremtidige tilstander med en viss sannsynlighet (Fjelland, 1999). Men hvis kvantemekanikken er indeterministisk, hva kan man da forutsi med den? Hva vil det egentlig si at et system kan være i superposisjon? Og hva sier den matematiske modellen, kvantemekanikken, egentlig om den fysiske virkeligheten? Svar på slike epistemo-

logiske spørsmål avhenger av hvordan kvantemekanikken tolkes. I neste delkapittel går jeg nærmere inn på fysiske tolkninger av kvantemekanikken som fysisk teori.

### 2.3 Kvantemekanikken i et vitenskapsteoretisk lys

Dybvig & Dybvig (2003) tegner et enkelt bilde av sammenhengen mellom begreper som fysisk teori, matematisk modell og fortolkninger. Ifølge dem består en fysisk teori av en matematisk modell og korrespondanseregler. Modellen og reglene danner til sammen grunnlaget for å gjøre etterprøvbare forutsigelser om observerbare forhold ved en antatt fysisk virkelighet. For at den matematiske modellen skal kunne si noe om en fysisk virkelighet, kreves en fysisk tolkning, som forstås som den underliggende fysiske virkeligheten som teorien er ment å beskrive. Den fysiske virkeligheten kan være de observerbare forholdene. Kvantemekanikken, som er en matematisk modell, beskriver mikrokosmos. Postulatene beskrevet ovenfor relaterer de matematiske operatorene til fysiske størrelser som kan observeres. Hva kvantemekanikken forteller oss om den fysiske virkeligheten, som vi ikke så enkelt kan observere, avhenger av den fysiske fortolkningen. Forskjellene i de ulike tolkningene av kvantemekanikken bunner i uenigheter mellom hvilke konsekvenser de eksperimentelle resultatene har for våre grunnleggende forestillinger om den fysiske verden.

Bohr og Einstein var opptatte av og uenige om kvantemekanikkens filosofiske grunnlag. I lys av Heisenbergs uskarphetsrelasjoner oppsto filosofiske diskusjoner mellom disse to fysikerene. Einstein, som mange andre fysikere, hadde vansker med å gi opp prinsippet om determinisme for enkelthendelser i mikroverden. Einstein mente at det *måtte* være mulig å kunne forutsi begivenheter i kvanteverden med nøyaktighet og ikke bare med en viss sannsynlighet. I diskusjoner med Bohr foreslo han gjentatte ganger ulike tankeeksperimenter for å vise at det finnes fenomener som omgår uskarphetsrelasjonene, men Bohr fant svakheter ved disse. I 1930 ble Bohr utfordret med et tankeeksperiment som hadde til hensikt å vise at det ikke er noen sammenheng mellom uskarpheten til energien til et foton og tidspunktet for energimålingen. Bohr fant feilen i også dette tankeeksperimentet. Einstein forsøkte videre å vise at selv om man ikke nøyaktig kan måle en partikkels posisjon og impuls samtidig, så har likevel partikkelen disse egenskapene (Angell *et al.*, 2011). Hans forsøk resulterte i en artikkel skrevet av Einstein, Podolsky og Rosen med tittelen *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?* Artikkelen blir ofte referert som EPR-artikkelen. Tankeeksperimentet i denne artikkelen hadde ifølge dem to muligheter, der den ene muligheten var at virkninger kan bre seg med større hastighet enn lyset, mens den andre var at kvantemeka-

nikken er en ufullstendig teori. Forfatterene utelukket den første muligheten, siden dette stred mot prinsippet om lokalitet (Fjellstad, 1999). De mente da at de hadde bevist at kvantemekanikken er en ufullstendig fysisk teori.

Med det kjente Einstein-sitatet ”Gud spiller ikke med terninger” benekter Einstein at kvantemekanikken kan være indeterministisk, og gir med dette opphav til Bohms tolkning av kvantemekanikken (Dybvig & Dybvig, 2003). Bohm så på Heisenbergs uskarphetsrelasjoner som en angivelse av grensen for vår erkjennelse av den objektive virkeligheten. Ifølge Bohm eksisterer det fysiske størrelser selv om man ikke har fullstendig informasjon om dem (Fjellstad, 1999). En slik tolkning kalles *skjulte variabler*-tolkningen. Disse skjulte variablene er fysiske størrelser som vi ikke kjenner til, men som bestemmer utfall av målinger. Dersom disse variablene hadde vært kjente, så kunne man enkelt ha forutsett målingeresultatene og med andre ord gjort kvantemekanikken deterministisk (Dybvig & Dybvig, 2003).

Den (til nå) mest dominerende fortolkningen av kvantemekanikken stammer fra Bohr, som mente at det man i eksperimentelle målinger kunne observere, måtte ses i sammenheng med konteksten for målingen og apparaturen. Dette ga opphav til det som senere ble kalt *København*-tolkningen, som helt grunnleggende er en instrumentalistisk forståelse av kvantemekanikken. Med dette menes at det er meningsløst å beskrive den fysiske virkeligheten utover de observerbare fenomenene (Dybvig & Dybvig, 2003). Derfor kan man ikke forutsi utfallet for enkelthendelser.

København-tolkningen tillegger bølgefunksjonen  $\Psi$  en sannsynlighetsegenskap ved å definere sannsynligheten for å finne en partikkel innenfor et volumelement  $d^3r$  ved et tidspunkt  $t$  som  $|\Psi(\vec{r}, t)|^2 d^3r$ . Bølgefunksjonens kvadrerte absoluttverdi angir dermed en sannsynlighetsfordeling. Dette krever at bølgefunksjonen også er normert, slik at følgende betingelse holder

$$\int |\Psi(\vec{r}, t)|^2 d^3r = 1. \quad (22)$$

I sammenheng med forventningsverdi-postulatet, vil man etter denne betingelsen kunne si at kvantemekanikken gir en *statistisk* determinisme. Dette innebærer at man ved målinger av mange identiske systemer (et *ensemble*), oppnår en statistisk fordeling som sammenfaller med sannsynlighetsfordelingen. Ved superposisjon av tilstander (likning (14)) betegner koeffisientene  $|c_n|^2$  sannsynligheten for å oppnå tilstanden  $\psi_n$  ved måling. Bølgefunksjonen i Schrödingers likning (likning (10)) inneholder altså informasjon om sannsynlighetsfordelingen av tilstandene. Da kan man si at naturlover i kvanteverden er statistiske i stedet for strengt deterministiske

(Dybvig & Dybvig, 2003).

Schrödingers katt er et tankeeksperiment som illustrerer hva som menes med superposisjon og det å kunne si noe om den fysiske virkeligheten utover det observerbare. I tankeeksperimentet er en katt innesperret i en boks. Inni boksen blir kattens virkelighet sammenkoblet med en kvantehendelse, som for eksempel et radioaktivt stoff som vil sende ut stråling ved et vilkårlig tidspunkt. Dersom stoffet sender ut stråling, dør katten. Det radioaktive stoffet er dermed i en superposisjon av tilstandene *utsendt stråling* og *ikke utsendt stråling*. Siden kattens tilstand er sammenkoblet med kvantehendelsen vil den være i en superposisjon av tilstandene *levende* og *død*. Kattens skjebne avhenger dermed av kvantehendelsen. Før målingen, det vil si før boksen åpnes, er katten ifølge København-tolkningen hverken død eller levende fordi man ikke kan si noe om virkeligheten utover det man observerer. Ved målingen tvinges kvantesystemet av det måle-teoretiske postulatet til å velge en tilstand. På denne måten må man se på kattens skjebne som en del av den eksperimentelle situasjonen. Med *skjulte variable*-tolkningen vil man si at katten før observasjon hele tiden er i én av tilstandene *død* eller *levende*, og denne tilstanden er uavhengig av målingen (Dybvig & Dybvig, 2003).

Et annet eksempel som tydelig viser forskjellen mellom tolkninger basert på Bohrs og Einsteins meninger er Aspects eksperiment, som setter tankeeksperimentet fra EPR-artikkelen i livet. Aspects forsøk besto i å bruke en kalsiumkilde som sender ut par av fotoner. Det er en bestemt sammenheng mellom fotonenes polarisasjon, for eksempel slik at polarisasjonen til det ene fotonet er vinkelrett i forhold til polarisasjonen til det andre fotonet. Dette innebærer at en måling av det ene fotonets polarisasjon påvirker polarisasjonen til det andre fotonet. Ut fra Einsteins forståelse av virkeligheten vil de to fotonene være uavhengige, slik at en endring av det ene fotonet ikke medfører en endring på det andre, og man har lokal virkelighet. Ifølge København-tolkningen kan man ikke si noe om tilstanden til fotonene forut for en måling. Måling av polarisasjonen til det ene fotonet får da det andre fotonet til å bestemme sin tilstand. Dette eksperimentet med sammenfiltrede fotoner er et eksempel på et fenomen som bryter med prinsippet om lokal virkelighet i klassisk fysikk.

## 2.4 Oppsummering

Som vi i det ovenstående har sett, medførte de små gjenværende problemene ved klassisk fysikk i starten av 1900-tallet fremskritt innenfor både atom- og strålings-teori. Disse fremskrittene var viktige milepæler som ledet mot kvantemekanikken, og sammen med Einsteins relativitetsteori utgjorde dette et paradigmeskifte. Litt etter litt ble det avdekket at prinsipper fra klassisk fysikk som kontinuitet, determinisme for enkelthendelser og lokal virkelighet ikke gjelder i kvantepartiklenes verden. To tolkninger av kvantefysikken ble presentert, den ene, *skjulte variabler*-tolkningen, stammer fra Einsteins standhaftige oppfatning om at en fysisk teori uten determinisme umulig kunne være en fullendt teori. Den andre, *København*-tolkningen, stammer fra Bohrs instrumentalistiske syn på kvantemekanikken som et regneinstrument. København-tolkningen er i dag den dominerende tolkningen ved at det er den som oftest blir lagt til grunn i lærebøker. Likevel er det ingen konsensus om hvilken tolkning som er den riktige beskrivelsen av virkeligheten. Etter de vitenskapsfilosofiske debattene mellom Bohr og Einstein har det også kommet flere tolkninger av kvantemekanikken, men ingen av disse har til nå ført fram til allmenn enighet om hvordan virkeligheten skal forstås.

### 3 Didaktisk perspektiv

#### – utfordringer ved undervisning i kvantefysikk

Det at det ikke er konsensus omkring tolkning av kvantemekanikken er bare én faktor som gjør begrepsutvikling i kvantefysikk utfordrende for elever (Ayene, Kriek & Damtie, 2011; Cheong & Song, 2013). Jeg vil i dette kapitlet gjøre rede for noen utfordringer som elever og lærere møter i tilknytning undervisning og elevers begrepsutvikling i kvantefysikk med støtte av forskningslitteraturen. Avslutningsvis viser jeg til to undervisningsstrategier som har vist seg å være fruktbare for elevers forståelse av kvantefysikkens begreper og fenomener.

Kunnskapsløftets læreplan i Fysikk 2 i videregående skole innførte noen nye kompetansemål om kvalitativ forståelse av sentrale prinsipper og begreper i hovedområdet "Moderne fysikk". Ifølge Utdanningsdirektoratet handler dette hovedområdet om kvanteteorien og "kvanteeffekter (...) som er overraskende og bryter med vanlige forestillinger" skal inngå. Kompetansemålene som relaterer seg til kvantefysikk lyder som følger:

Mål for opplæringen er at eleven skal kunne:

- gjøre rede for Einsteins forklaring av fotoelektrisk effekt, og kvalitativt gjøre rede for hvordan resultater fra forsøk med fotoelektrisk effekt, comptonspredning og partiklers bølgenatur representerer et brudd med klassisk fysikk
- gjøre rede for Heisenbergs uskarphetsrelasjoner, beskrive fenomenet sammenfildrede fotoner og gjøre rede for erkjennelsesmessige konsekvenser av dem (Utdanningsdirektoratet)

En undersøkelse gjort av Henriksen *et al.* (2014) viser at norske læreplanmål skiller seg vesentlig fra andre lands læreplaner når det kommer til kvantefysikk. Blant de undersøkte landene er LK06 den eneste læreplanen som ibefatter sammenfildrede fotoner og erkjennelsesmessige konsekvenser av Heisenbergs uskarphetsrelasjoner. Utfordringene knyttet til disse kompetansemålene har skapt hodebry for både elever og lærere. Likevel er det gode grunner for å ha disse kompetansemålene i fysikk. En grunn er det at å lære om sentrale begreper innenfor moderne fysikk er med på å gi elevene i videregående skole et bedre helhetlig bilde av fysikken og dens teknologiske anvendelser innen blant annet kommunikasjon og medisin. Dette er sider ved skolefysikken som er allmenndannende. I tillegg vil kvalitativ kunnskap om begreper i kvantefysikk kunne bidra til å forberede elever som kommer til å fortsette og studere fysikk i sin høyere utdanning for emner i teoretisk fysikk.

Tidligere undersøkelser (Angell, Guttersrud, Henriksen & Isnes, 2004; Renstrøm, 2011) har vist at kvantefysikk er et tema som interesserer og motiverer elever, selv om kvantefysikkens abstrakte begreper alltid har bydd på store utfordringer for elevene (Ayene *et al.*, 2011). Det at kvantefysikken beskriver verden på mikronivå gjør at fenomenene som studeres ikke er direkte observerbare i elevenes hverdag. Elevene møter dermed disse fenomenene og begrepene først i undervisningssammenhengen, og de får dermed ikke mulighet til å teste sin forståelse av fenomenene opp mot hverdags erfaringer, sin intuisjon eller sunne fornuft. Dette bidrar med å vanskeliggjøre elevenes begrepsutvikling ved at de mangler forestillinger og spontane begreper knyttet til disse nye fenomenene og begrepene, samt ved at deres misforståelser oppstår først i undervisningssammenhengen (Angell *et al.*, 2011; Olsen, 2002). *Spontane begreper* omhandler sanseintrykk tilknyttet spesielle situasjoner og praktiske erfaringer, i motsetning til *vitenskapelige begreper*, som er konvensjonelle begreper om en gitt faglig sammenheng. De vitenskapelige begrepene er språklige i natur, og kommer til uttrykk skriftlig gjennom tekst og ulike representasjonsformer (Angell *et al.*, 2011). Innenfor det sosiokulturelle læringssynet er en viktig del av begrepsutviklingen samhandlingen mellom spontane og vitenskapelige begreper, og det knyttes utfordringer til begrepsutviklingen ved fravær av spontane begreper.

I tradisjonell fysikkundervisning i Norge inngår aktiviteter som lærergjennomgang av nytt fagstoff og arbeid med regneoppgaver omtrent hver fysikktime (se Angell *et al.*, 2011, s.136). Hovedgrunnen til at elever i videregående skole ikke skal lære å utføre kvantitative beregninger i kvantefysikk er fordi elevene mangler den matematiske kompetansen som kreves for å løse kvantemekanikkens likninger (Ghirardi, Grassi og Micheli, 1995). I tillegg er elevene vandt med å utføre eksperimenter og bruke ulike representasjonsformer i undervisningen. Å jobbe for oppnåelse av kvalitativ forståelse uten bruk av kvantitative regneoppgaver og praktiske eksempler er dermed en arbeidsform som er lite forenelig med den tradisjonelle fysikkundervisningen og innebærer at andre undervisningsstrategier må tas i bruk. Ifølge Angell *et al.* (2003) etterlyser elevene mer diskusjon om begreper og problemer i klassen. Hadzidaki (2008) skriver at undervisning i kvantefysikk er en godt egnet kontekst for diskusjon og refleksjon, og på denne måten oppnå økt forståelse for naturvitenskapens egenart (Nature of Science). I sitt master-prosjekt utviklet Frode Aalmen (2010) et undervisningsopplegg i kvantefysikk med fokus på naturvitenskapens egenart ved bruk av drama som undervisningsmetode. Hans resultater tydet på at dette opplegget bidro positivt til elevens motivasjon og læring.

I en pilotstudie for ReleKvant-prosjektet utført av Bungum, Henriksen, Angell, Tellefsen og Bøe (2015) uttrykker lærere at kvantefysikk er vanskelig å undervise. De



samme lærerene føler at de er mindre kompetent til å undervise i kvantefysikk enn i andre områder av læreplanen, og opplever at det er vanskelig å gi en kvalitativ beskrivelse. Dette fordi den matematiske teorien som begrepene stammer fra, er vanskelig i seg selv. En utfordring ved dette er at det i noen tilfeller er vanskelig for dem å svare adekvat på spørsmål fra elevene. En annen utfordring lærerene trekker frem er at det er få undervisningsressurser tilpasset nivået til fysikkfaget i videregående skole som de kan støtte seg til og bruke for å aktivisere elevene i undervisningen.

I forhold til emner i klassisk fysikk finnes det langt færre studier om elevers oppfatninger og forståelse av begreper innen kvantefysikk (Çaliskan, Selçuk & Erol, 2009), og det er ifølge Ayene *et al.* bred enighet blant forskere om at det er et reelt behov for mer kunnskap om hvordan elever erfarer, forstår og utvikler begreper i denne grenen av fysikken (2011). En stor del av den empiriske forskningen tar for seg universitetsstudenters oppfatninger og kvalitative forståelse av begreper og fenomener i kvantefysikk samt utfordringer studenter møter i den matematiske behandlingen. Resultater fra disse kan likevel ha betydning for hvordan begreper og fenomener bør behandles i fysikkundervisning på videregående skole-nivå i fravær av kvantefysikkens matematiske formalisme.

Empirisk forskning fra de siste par tiårene har vist at lærebøker og tradisjonell undervisning kommer til kort med å gi elevene en hensiktsmessig og god forståelse av kvantefysiske begreper (Ayene *et al.*, 2011; Fischler & Lichtfeldt, 1992; Hadzidaki, 2008). Hovedgrunnene til dette er at tradisjonell undervisning og lærebøker definerer ulike begreper forskjellig og benytter klassiske analogier og semi-klassiske modeller. På denne måten skjules de prinsipielle forskjellene mellom klassisk fysikk og kvantefysikk. Forskning viser at dette fører til en snål blanding av begrepsapparater med røtter i både et klassisk og kvantefysisk verdensbilde (Angell *et al.*, 2011; Ayene *et al.*, 2011; Fischler & Lichtfeldt, 1992; Hadzidaki, 2008; Olsen, 2002; Renstrøm, 2011). Studenters forståelse av begreper i kvantefysikk kjennetegnes dessuten ofte ved å være fragmenterte, isolerte fakta (Johnston, Crawford & Fletcher, 1998).

Det har vist seg at studenters misoppfatninger og misforståelser i kvantefysikk er robuste og overlever introduksjonsemner i høyere utdanning der matematisk formalisme har en stor plass (Hadzidaki, 2008; Olsen 2002). Derfor er det viktig at elever i videregående skole oppnår en tilfredsstillende forståelse av fenomener i kvantefysikk. For å oppnå dette har det blitt anbefalt å klargjøre for elevene hvordan kvantefysikken bryter med fundamentale prinsipper fra klassisk fysikk som kontinuitet, determinisme og lokal virkelighet, samt unngå semi-klassiske analogier og

modeller (Hadzidaki, 2008; Olsen, 2002; Renstrøm, 2011). Jeg har ikke lyktes i å finne empirisk forskning om hvordan elever oppfatter disse prinsippene fra klassisk fysikk og hvordan de brytes i kvantefysikk. I og med at norsk læreplan er den eneste som har med erkjennelsesmessige konsekvenser av Heisenbergs uskarphetsrelasjoner, er ikke dette så rart. Studier som tar for seg studenters kvalitative forståelse av uskarphetsrelasjoner (se f.eks. Ayene *et al.*, 2011), forteller ingenting om studentenes erkjennelsesmessige konsekvenser.

Fischler og Lichtfeldt (1992) utviklet en undervisningssekvens som tidlig introduserer uskarphetsrelasjonene og unngår referanser til klassisk fysikk, dualisme og den halv-klassiske atommodellen til Bohr. I deres undervisningssekvens foreslår de blant annet at behandling av fenomenet fotoelektrisk effekt bør ta utgangspunkt i elektronet framfor fotonet, og fokusere på eksperimentelle resultater. Ifølge dem bidrar undervisning basert på deres forslag til å bevisstgjøre elevene om deres forståelse og sette spørsmålsteget ved disse. På denne måten ble elevene utsatt for situasjoner hvor kognitive konflikter oppsto, slik at elevene fikk bedre innsikt i begrepene i kvantefysikk.

Ifølge Hadzidaki (2008) bør undervisning i kvantefysikk få fram naturvitenskapens egenart, som innebærer å belyse dens historiske utvikling og midlertidige teorier. Ved å vise til den historiske utviklingen av fysikken fremheves det også at fysikkvitenskapen har blitt til som en sosial konstruksjon, der debatter og kontroverser mellom mennesker har vært avgjørende for utviklingen (Angell *et al.*, 2011). En fysikkhistorisk tilnærming til undervisning er ifølge Angell *et al.* (2011) krevende både for elever og lærere, og det er viktig å tilpasse det historiske materialet til elevenes faglige nivå. Renstrøm (2011) utviklet i hennes doktorgradprosjekt en undervisningsrekke med en slik historisk kontekst. Etter gjennomføring av undervisningsrekken hadde “de fleste elevene oppnådde målene om kvalitativ forståelse av sentrale kvantefysiske begreper og fenomener” og elevene “mestret å uttrykke sin forståelse på en presis og meningsfull måte (Renstrøm, 2011, s. iii)”.

Undervisning der målet er å utvikle kvalitativ kunnskap om begreper og fenomener i kvantefysikk er etter det ovenstående utfordrende både for elever og lærere. For elevene er det utfordrende å lære om kvantefysikken fordi det er manglende konsensus om tolkningen av kvantefysikken, og fordi de ikke har noen forhold til begreper og fenomener de møter i kvantefysikkundervisningen. For lærere er det utfordrende å undervise om disse begrepene og fenomenene fordi disse er vanskelige i seg selv, og fordi det finnes lite forskningsbasert kunnskap om elevers begrepsutvikling og hensiktsmessige undervisningsmetoder. ReleKvant-prosjektet, som beskrives nærmere i

neste kapittel, har blant annet som mål å bidra til økt kunnskap om elevers læring og hensiktsmessig undervisning i kvantefysikk.



## 4 ReleKvant-prosjektets bakgrunn og undervisningsmaterieil

I dette kapittelet går jeg nærmere inn på ReleKvant-prosjektets målsetninger, bakgrunn og forskningsmetode (kap. 4.1), samt hovedprinsipper (design-prinsipper) for utviklingen av undervisningsmateriellet (kap. 4.2). Dette for å gi et innblikk i prosjektet som ligger bak undervisningsmateriellet, som er en viktig bakgrunn for konteksten som datamaterialet i dette master-prosjektet har blitt til i. Design-prinsippene som undervisningsmodulene bygger på og hvilket læringssyn modulene legger til grunn har direkte konsekvenser for hvordan elevers forståelse og oppfatninger måles i dette prosjektet. Forskningsmetoden til ReleKvant-prosjektet har også implikasjoner for metoden som ble brukt i dette master-prosjektet.

### 4.1 Bakgrunn

Det at norske læreplanmål i kvantefysikk er i særstilling internasjonalt, samt elevers og læreres utfordringer i undervisning av dette vanskelige temaet aktualiserer et prosjekt som ReleKvant. I fysikkfaget i videregående skole består moderne fysikk av relativitetsteori og kvantefysikk, derav ordspillet i navnet *ReleKvant*. Navnet speiler også prosjektets ønske om vinkle fagstoffet på en slik måte at det oppfattes som relevant for elevene. Prosjektets overordnede mål er å

1. utvikle og teste undervisningsmoduler i moderne fysikk som fremmer elevers læring og begrepsutvikling og som oppfattes som relevant og motiverende.
2. bidra med kunnskap om elevers forståelse av moderne fysikk og undersøke læringsstrategier designet for å fremme kvalitativ forståelse og forståelse av fysikkens epistemologiske konsekvenser (ReleKvant, 2015).

Forskningsmetoden som brukes i ReleKvant-prosjektet er undervisningsrettet designforskning (Educational Design Research; EDR), som også blir referert til som *Design-based research*. Juuti og Lavonen (2006) peker på tre aspekter som utgjør denne forskningsmetoden. For det første må prosjektet utvikle et produkt som kan brukes direkte av et bredt publikum. I ReleKvant er dette produktet den nettbaserte undervisningspakken som består av moduler. Det at modulene er internettbaserte gjør ressursene lett tilgjengelig for lærere og elever. Innledende forskning tar for seg undersøkelse av eksisterende forskningslitteratur og identifisering av relevante læringsperspektiver. I denne fasen er målet å komme fram til *design-prinsipper* som

legges til grunn for utvikling av en prototype for produktet (Bungum *et al.*, 2015). Senere, i kapittel 4.2, trekker jeg frem noen av disse design-prinsippene og viser hvordan disse ble implementert i prototypen av modulene.

For det andre er det viktig at prosessen er iterativ, som vil si at produktet testes, evalueres og revideres i sykler. Dokumentert revisjon av produktet og kunnskapen som utvikles, bidrar til økt pålitelighet. Det anbefales også å dokumentere og rapportere i flere faser. I ReleKvant-prosjektet blir dette gjort ved utprøving av modulene i flere omganger, med revisjon av modulene mellom hver utprøving. Dette har til nå resultert i to artikler (Bungum *et al.*, 2015; Henriksen *et al.*, 2014).

For det tredje skal man gjennom EDR oppnå ny kunnskap knyttet undervisning og praksis. Kunnskapen som utvikles skal være knyttet til et innhold, og kunnskapen må være direkte anvendbar for praktiserende. I et EDR-prosjekt er det anbefalt å la de praktiserende delta på linje med forskerene. Med EDR kan man dermed bygge bro mellom undervisning og praksis, samt utdanningsforskere og undervisere (Juuti & Lavonen, 2006). Deltakere i ReleKvants prosjektgruppe er derfor fysikere, fysikkdidaktikere og erfarne lærere (Henriksen *et al.*, 2014), men prosjektet involverer også lektorstudenter.

## **4.2 Design-prinsippene for prototypen av undervisningsmoduler**

I tillegg til utfordringer knyttet til undervisning i kvantefysikk (se kap. 3), tar ReleKvant-prosjektet utgangspunkt i funn og teoretiske perspektiver fra tidligere forskning som angår fysikkfaget generelt. Noen av disse utfordringene belager seg på rekruttering både på videregående skole-nivå og universitetsnivå, andel jenter som velger programfagene i fysikk og elevenes kompetansenivå.

Fysikk-fagene på videregående skole er viktig både for fremgang for nordmenns allmenndanning, og for å forberede elever til studier i fysikkrelaterte utdanningsretninger (Angell *et al.*, 2011). I skoleåret 2014-2015 var Fysikk 1 det største programfaget i realfag på nivå 1, mens Fysikk 2 har litt over halvparten så mange elever. Andelen jenter i Fysikk 1 er litt over 40%, mens andelen jenter i Fysikk 2 er noe under 30%. Dette er et bilde som ikke har endret seg betraktelig de siste årene (Utdanningsdirektoratet, 2015). Angell, Lie og Rohatgi (2011) rapporterte om resultater fra TIMSS Advanced Study fra 2008, som viste at norske fysikkelevens kompetanse har falt betraktelig sammenliknet med resultater fra TIMMS 1995.

Den lave andelen av jenter som velger fysikk og fallet i elevenes kompetanse er bekymringsverdig. Undervisningsmateriellet som utvikles i prosjektet tar dermed sikte på å basere seg på læringsstrategier som kan motivere og engasjere en mer mangfoldig elevgruppe. For å få til dette har det blitt foreslått å bruke samarbeidsformer i undervisningen samt vise til eksempler og bruksområder som relaterer seg til elevenes hverdagsliv (Angell *et al.*, 2004; Bøe & Henriksen, 2013). Med bakgrunn i dette legges et sosiokulturelt læringssyn til grunn for undervisningsmodulene.

Innenfor det sosiokulturelle læringssynet er bruk av språket essensielt i en læringsprosess. Gjennom språklig vekselvirkning med hverandre utvikler elever forståelse av fagstoffet. Slik vekselvirkning kan være skriftlig så vel som muntlig. En forståelse blir til ved å bruke språket, og slik blir begrepene en del av selve eleven, men forståelsen og kunnskapen er også situert i undervisningens sosiale kontekst (Angell *et al.*, 2011). Ved samarbeidende arbeidsformer som diskusjon mellom elever, får elever dessuten muligheten til å ” snakke fysikk ” seg imellom. Det er også et viktig aspekt ved dette læringssynet at læringen foregår i vekselvirkning mellom elev og lærer. Elevens læring foregår innenfor det Vygotsky kaller *den nærmeste utviklingssonen*, som dreier seg om hva en elev kan få til alene og det eleven kan få til med medvirkning av en lærer (Angell *et al.*, 2011).

Fysikkens språk er multimodalt, som vil si at det fysikkfaglige representeres på mange måter. For å oppnå god forståelse i fysikk er det nødvendig å lære om de ulike representasjonsformene, men også å kunne veksle mellom dem. I undervisningsmodulene får elevene trening i å veksle mellom blant andre representasjonsformer som grafisk representasjon, verbal tekst, diagrammer og i noen grad matematiske formel. Ved innlæring av å oversette mellom representasjonsformer anses det som viktig å ta i bruk visualiseringer av teoretiske begreper og prinsipper. Dette tas hensyn til i undervisningsmodulene gjennom animasjoner og interaktive simuleringer (Henriksen *et al.*, 2014). Mange fenomener i kvantefysikk er vanskelige å visualisere i hverdagslivet eller i laboratoriet. Bruk av teknologi og IKT har derfor et godt potensiale for å visualisere en rekke kvantefysiske effekter og fenomener (se Bungum *et al.*, 2015). Ifølge Singh (2008) kan visualiseringer hjelpe elever med å trekke linjer mellom formelle og begrepsmessige aspekter i kvantefysikk. Ved bruk av animasjoner og videoer er det viktig at disse er tilpasset eleven og læreplanen, og læringsutbyttet ved bruk av visualiseringer øker ved å stille konkrete spørsmål tilknyttet det som visualiseres (Angell *et al.*, 2011).

Table Of Contents

Slide	Title
1	Lys: bølger eller partikler?
2	Både bølge og partikkel?
3	Inspirasjon fra historien
4	Oppsummering
5	Brudd med klassisk fysikk
6	Kvantisering av energi
7	Kvantisert og kontinuert
8	Kvantisering: Diskusjonsoppgave
9	Determinisme
10	Determinisme: Stoler du på fysikken?
11	Determinisme og bevegelseslikninger
12	Lokal virkelighet
13	Ikke lokal virkelighet
14	Oppgave om kontinuitet
15	Oppgave om determinisme
16	Oppgave om lokal virkelighet
17	Oppsummering



## Behov for en ny fysikk

Rundt år 1900 kom fysikerne ordentlig i gang med å studere atomene og mindre partikler som elektronet.

Etter hvert ble det klart at den kjente fysikken ikke klarte å forklare det de observerte i eksperimenter. De trengte en ny og fundamentalt annerledes fysikk, kvantefysikken.

Kvantefysikk er en matematisk modell som beskriver mikroverden, slik som Newtons mekanikk er en matematisk modell som beskriver makroverden. Hvis man bruker kvantefysikk på store gjenstander, sammenfaller resultatene med Newtonsk mekanikk.

I denne første delen skal du se hvordan kvantefysikken representerer et brudd med klassisk fysikk.



Figur 1: Oppsettet av viten-siden med en meny til venstre. Dette er forsiden til modulen med tittelen "Behov for en ny fysikk"

Design-prinsippene for prototypen av undervisningsmodulene ble presentert av både Bungum *et al.* (2015) og Henriksen *et al.* (2014). Med bakgrunn i begge presentasjonene oppsummerer jeg design-prinsippene i listen under.

1. Sosiokulturelt læringssyn legges til grunn
2. Kvantefysikkens brudd med fundamentale prinsipper i klassisk fysikk bør formuleres eksplisitt
3. Eksempler som viser hvordan vitenskapelig kunnskap har blitt til som et menneskelig produkt bør inngå
4. Visualiseringer og interaktive animasjoner bør inngå
5. Utfordrende begreper bør diskuteres og vanlige misoppfatninger knyttet til disse bør henvendes til eksplisitt
6. Eksempler som viser hvordan fysikere kan være uenige om tolkningen av kvantefysikk bør inngå
7. Eksempler på anvendelser som er relevante for elevers hverdagsliv og filosofiske aspekter bør inngå

Modulene blir utviklet i læringsplattformen viten.no. Denne plattformen gjør det



mulig å samle tekst, bilder og visualiseringer i et enhetlig format. Elevene kan skrive sine svar direkte på nettsidene, og læreren får enkelt tilgang til alle elevens skriftlige svar. På den måten kan læreren underveis vurdere elevenes læring, forståelse og progresjon. Figur 1 viser oppsettet til viten-plattformen. Nettsidene er kompatible med både datamaskiner og mobile enheter, noe som gjør modulene mer tilgjengelig for elevene. Lenker til modulene finnes i litteraturlisten. I vedlegg 1 finnes et utvalg av oppslag fra modulene.

Med sosiokulturelt læringssyn som grunnlag legger ReleKvant-modulene opp til at elevene får bruke språket i begrepsutviklingen. Dette kommer til syne ved at oppgavene som blir gitt til elevene, skal utføres i samarbeidende elev-par. I figur 25 vises et eksempel på en diskusjons- og en skriveoppgave.

I modulen med tittel "Behov for en ny fysikk" tas kvantefysikkens brudd med kvantefysikk opp eksplisitt, se figur 2- 9. Elevene blir introdusert for prinsippene om kontinuitet, determinisme og lokal virkelighet og hvordan disse brytes i kvantefysikken. I samme modul inngår animasjoner (se figurene 4 og 7) og et historisk tilbakeblikk (se figur 9) som er ment å illustrere hvordan vitenskapelig kunnskap har blitt til som et menneskelig produkt. Med historiske tilbakeblikk vises det også til hvordan fysikere kan være uenige om tolkningen av kvantefysikken.

Modulen "Kvantefysikk og filosofi", se figurene 10- 14, tar for seg noen filosofiske aspekter, og elevene får mulighet til å reflektere med utgangspunkt i tankeeksperimentet Schrödingers katt. Videre tas utfordrende begreper som Heisenbergs uskarphetsrelasjoner og sammenfiltrede fotoner opp i henholdsvis modulene "Uskarphet" og "Sammenfiltrering".



## 5 Metode

I likhet med ReleKvant-prosjektet er forskningen i dette master-prosjektet designbasert. Dette innebærer kombinasjonen av utvikling og forskning. Som forklart i kapittel 4.1, kjennetegnes designbasert forskning ved at det utvikles et produkt i en iterativ prosess samtidig med kunnskap om undervisning og praksis (Juuti & Lavonen, 2006). I dette prosjektet har jeg tatt del direkte i to av tre utprøvningscykler, men jeg bruker innsamlet data fra tre utprøvningsrunder. Det at jeg ikke har tatt del i første delen av ReleKvant innebærer at jeg ikke har hatt innvirkning på utformingen av prototypen for produktet som utvikles. Gjennom denne oppgaven med problemstillingen formulert i kapittel 1.2 vil jeg ha innvirkning på videre evaluering og revisjon av undervisningsmateriellet, og det er dette som utgjør oppgavens utviklingsdimensjon.

Å ta del i et større forskningsprosjekt som ReleKvant har gjort handlingsrommet for forskningsdesignet for denne oppgaven noe begrenset, siden jeg har måttet forholde meg til fastsatte rammer. ReleKvant-prosjektet er basert ved Universitetet i Oslo, som har samarbeidsavtaler med skoler i det sentrale østlandet. Utprøving av undervisningsmateriellet ble derfor utført ved disse *universitetsskolene*. Jeg har dermed ikke kunnet påvirke selve ReleKvant-prosjektets datainnsamling og utvalget av skoler, klasser og antall elever.

Til tross for det begrensede handlingsrommet har deltakelsen i ReleKvant gjort at jeg har fått tilgang til en større datamengde fra et bredere utvalg enn det jeg ville fått på et helt eget prosjekt. Data som samles inn av ReleKvant i klasserommene består av elevers skriftlige og muntlige responser på oppgaver i viten-programmene. I tillegg har jeg inkludert elevers besvarelse på et spørsmål fra en prøve som ble gitt den ene klassen etter utprøving 1. Som en triangulering av data utførte jeg fire gruppeintervjuer fra fire klasser fordelt på tre skoler. Tabell 1 viser en oversikt over tidspunkt for utprøvinger, antall skoler og klasser, hvilke moduler som ble testet og hvilket datamateriale som ble samlet inn. Det er dette datamaterialet som danner grunnlaget for diskusjon rundt problemstillingen og forskningsspørsmålene for dette master-prosjektet. Med responser fra sju klasser fra fem skoler har jeg et rikt datamateriale fra et bredt utvalg elever. Med "bredt utvalg" mener jeg at mange elevtyper er representerte.

ReleKvant-prosjektet er registrert i NSD, og elevene som har bidratt, har signert samtykkeskjema. Elevene samtykket til bruk av skriftlig og muntlig materiale, samt eventuelle opptak av lyd og video. Lagring av datamaterialet for denne oppgaven har

Tabell 1: Oversikt over tidspunkt for utprøvingene, hvilke moduler som ble testet og innsamlet data som ble brukt i dette master-prosjektet. \*) Modulen ”Kvantefysikk og filosofi” var i første utprøving en del av modulen ”Behov for en ny fysikk”.

Utprøving nr.	Mnd-år	Antall klasser/skoler	Moduler	Innsamlet data
1	03-2014	3/2	Behov for en ny fysikk Fotoelektrisk effekt	Skriftlige responser Elevdiskusjoner Prøve
2	10-2014	2/1	Behov for en ny fysikk Fotoelektrisk effekt Røntgen Kvantefysikk og filosofi*	Skriftlige responser Elevdiskusjoner 2 gruppeintervjuer
3	03-2015	2/2	Relativitetsteori Behov for en ny fysikk Fotoelektrisk effekt Røntgen Kvantefysikk og filosofi Uskarphet Sammenfiltrering	Skriftlige responser Elevdiskusjoner 2 gruppeintervjuer

blitt gjort etter ReleKvant-prosjektets og nasjonale forskningsetiske retningslinjer for personvern av involverte elever. All rapportert informasjon i denne oppgaven er anonymisert og aidentifisert. Navn som brukes i denne oppgaven er pseudonymer.

I det følgende beskriver jeg den totale datainnsamlingen, og jeg trekker fortløpende frem noen refleksjoner om metodiske begrensninger. Siden det er gjennom planlegging og gjennomføring av gruppeintervjuene som jeg har hatt størst innvirkning, er det naturlig at aspekter ved denne datainnsamlingsmetoden beskrives og begrunnes i mest detalj.

## 5.1 Elevresponser

Elevresponser som er en del av datamaterialet for denne oppgaven, omfatter elevers skriftlige og muntlige besvarelser på oppgaver i arbeidet med modulene. Innenfor det sosiokulturelle læringssynet kommer elevers forståelse fram gjennom språket deres. Derfor kan innsamling av disse være verdifull data. Elevene ga sine skriftlige svar på oppgaver direkte i modulene på viten-siden. Disse ble lagret med elevenes navn på viten-siden. Elevbesvarelsene fra samtlige spørsmål fra hver utprøvingsrunde måtte samles i ett dokument manuelt. Fra de to siste utprøvingsrundene bidro jeg i ar-

beidet med disse dokumentene. I dokumentene ble elevenes navn og skoletilhørighet anonymisert.

Under arbeidet med modulene brukte elevene egne mobiltelefoner til å ta lydopptak av deres diskusjoner av diskusjonsoppgaver. Elevene sendte lydfilene til sin lærer, som distribuerte dem videre til prosjektgruppa. Elevdiskusjonene ble så transkriberte. Det er elevers svar på disse oppgavene som jeg refererer som ”muntlige responser” i denne oppgaven.

For denne oppgaven ble i hovedsak oppgavene fra de vedlagte sidene fra modulene brukt i analysen (se vedlegg 1). I presentasjonen av resultatene (kap. 6) uttrykkes hvilke oppgaver som elevresponsene stammer fra eksplisitt.

Svarandelen fra de to første utprøvingene var veldig bra. Hver klasse brukte én skoleuke (med fagdag) med å gå gjennom modulene. Ved tredje utprøving var det, slik som vist i tabell 1, flere nye moduler som ble testet ut. Klassene brukte tre eller fire uker på å komme gjennom alle modulene. I disse modulene var det fler diskusjons-spørsmål enn ved de to første utprøvingene, siden noen av de skriftlige oppgavene i modulene fra de to første utprøvingene ble omgjort til diskusjonsoppgaver. Svarandelen på både skriftlige oppgaver og diskusjonsoppgaver ved tredje utprøvingsrunde sank betraktelig mot de siste modulene. Det kan tenkes at elevene ble lei mot slutten av utprøvingsrunden.

Etter første utprøvingsrunde ble den ene klassen gitt en skriftlig prøve om kvantefysikk. Jeg fikk tilgang til elevenes svar på det ene spørsmålet fra denne prøven, og valgte å inkludere disse i datamaterialet for denne oppgaven, siden den var veldig relevant for forskningsspørsmål 1. Det lot seg ikke gjøre å samle inn tilsvarende data ved de andre utprøvingsrundene. Fordelen med elevers svar på oppgaver fra skriftlig prøve fremfor oppgaver i undervisningen er at man kan måle elevenes forståelse etter endt undervisning og uten hjelpemidler. Siden prøver blir vurdert med karakter, vil elevene gjøre sitt beste og svare så fyldig som mulig. På den måten kan elevers kunnskap og forståelse avdekkes.

## 5.2 Gruppeintervju og observasjon

Modulene som utvikles i ReleKvant er først og fremst undervisningsressurser, og ikke et forskningsverktøy. For ReleKvant-prosjektets del blir elevers responser samlet inn for å evaluering og revidering av modulene. Det har dermed ikke vært mulig i utstrakt grad å tilpasse oppgavene i modulene for denne oppgaven, siden hensikten

med disse er å fremme læring for elevene. Modulene inneholder dermed ikke oppgaver med potensiale for å besvare alle sider ved mine forskningsspørsmål. Det var dermed nødvendig å samle inn data på en annen måte. Jeg valgte derfor å foreta gruppeintervjuer av elever etter endt utprøving både som supplement til og utdypning av innsamlede elevresponser. Med intervjuer kunne jeg dermed få et bedre innblikk i elevenes resonnement omkring oppgaver som ble gitt i modulene ved å stille oppklarende og utdypende spørsmål. Intervjuer av elever ble også utført for å styrke validiteten gjennom metodetriangulering.

Intervjuene ble planlagt og gjennomført sammen med medstudent Mathias Gjerland, som også har deltatt i ReleKvant-prosjektet som masterstudent. På grunn av tid og midler som ble gitt til rådighet, måtte vi gjennomføre intervjuene sammen. Siden ingen av oss hadde utført intervjuer før, oppfattet vi det som en fordel å kunne hjelpe hverandre underveis. Det ble gitt rom for ett intervju fra hver av de fire klassene fra de to siste utprøvingene.

Vi valgte å intervju fire elever om gangen fordi vi ønsket å ha med to par av elever som i løpet av utprøvingen hadde diskutert og arbeidet sammen. Det var klassenes lærere som valgte ut elever til intervjuene basert på hvem som meldte seg frivillig. I forbindelse med utvelgelsen av elever uttrykket vi ovenfor lærerne at vi ønsket to elev-par som hadde arbeidet sammen, gjerne elever på forskjellig fysikkfaglige nivåer, men først og fremst satte vi som kriterium at elevene måtte være taleføre. Dette for å få fram et spekter av elever, og ikke bare elever som er faglig sterke. Av de 16 intervjuede elevene var fire av dem jenter. Jenteandelen speiler dermed andelen jenter i programfaget Fysikk 2. Det er min oppfatning at det var et spekter av faglig nivå blant elevene som ble intervjuet.

Valget av gruppeintervju framfor individuelle intervjuer stammer fra det sosiokulturelle læringssynet, hvor kunnskapen er situert og kommer til syne gjennom sosial vekselvirkning mellom deltakerne (se kap. 4.2). Ved å intervju elev-par håpet vi på å kunne bevare noe av konteksten som elevenes kunnskap og forståelse ble til i. Ifølge Wibeck (2000) er fire intervjuobjekter et godt utgangspunkt for gruppeintervju. Det blir ifølge henne vanskelig for deltakerene å beholde oppmerksomheten i samtalen ved et større antall. Med fler enn fire intervjuobjekter kan det også bli lettere for enkelte å innta en passiv rolle (Wibeck, 2000).

Valg av gruppeintervjuer framfor individuelle ble også gjort i hensyn til elevene, som antakeligvis ikke har blitt intervjuet før. I en gruppe har elevene alltid noen medelever å støtte seg på, noe som kan redusere nervøsitet. Et annet grep som ble gjort for å skape en trygg ramme for elevene var at vi besøkte klassene forut

for intervjuene. Under disse besøkene inntok vi hovedsakelig en ikke-deltakende og observerende rolle for å minimere påvirkning av læringskonteksten. Dette gjorde at vi kunne presentere oss for elevene i forkant av intervjuene, og det ble gitt rom for at vi kunne snakke med dem i skoletimen og i pauser. På denne måten var vi ikke totalt fremmede for elevene da intervjuene fant sted. Intervjuene ble holdt i elevenes lunsjpauser, så vi hadde 45 minutter til disposisjon for intervjuene. Vi ordnet med bevertning, og innviet til hyggelig prat før vi startet intervjuene, noe som skapte en hyggelig og trygg atmosfære, som foreslått i O'Briens artikkel fra 1993.

Klassebesøkene gjorde også at vi kunne observere og få bedre kjennskap til konteksten som datamaterialet ble til i. Vi observerte at samtlige lærere lot elevene arbeide selvstendig gjennom modulene, og det var få eller ingen plenumsdiskusjoner omkring temaer relevante for denne oppgaven.

Intervjuene ble planlagt å være semi-strukturerte og med preg av "stimulated recall". Dette for å åpne for at elevene kunne diskutere fritt, samt at vi ikke skulle låse oss inn på forhåndsbestemte spørsmål. Vi utarbeidet en intervjuguide (se vedlegg 2 og 3). I intervjuguidene inngikk forslag til lette innledningsspørsmål, slik at elevene kunne venne seg til intervjusituasjonen før de mer faglige spørsmålene. Vi delte opp "hoveddelen" mellom oss, og forberedte spørsmål rettet mot hver vår oppgave. Jeg forberedte noen åpne spørsmål med mål om at elevene kunne snakke fritt og diskutere spørsmålene mellom seg. Spørsmålene tok også utgangspunkt i oppgaver fra modulene. På denne måten kunne elevene potensielt huske tilbake til det de diskuterte i undervisningen, derav "preg av stimulated recall". I de to siste intervjuene hadde jeg også noen innledende spørsmål rettet mot mine tema, som er kvantefysikkens prinsipielle brudd med klassisk fysikk og erkjennelsesmessige sider ved kvantefysikken. Avslutningsvis hadde vi forberedt noen oppsummerende spørsmål hvor elevene ble invitert til å trekke noen konklusjoner basert på diskusjonene.

For å dokumentere intervjuene valgte vi å ta opptak av lyd framfor video-opptak. Dette fordi elevene gjennom arbeidet med modulene antakeligvis hadde blitt komfortable med lydopptak av sine diskusjoner. I tillegg er det lettere å glemme at lyden blir tatt opp, slik at dette ikke blir et forstyrrende element for intervjuet (Wibeck, 2000), slik et kamera kan bli. Før lydopptakene startet fortalte vi om hensikten med intervjuene, temaer som skulle inngå og at elevene hadde mulighet for å trekke sin deltakelse og besvarelse i ettertid.

I samtlige intervjuer oppfattet jeg ingen elever som mer dominerende eller passive enn andre. Jeg erfarte de to første intervjuene som vellykkede ved at elevene viste engasjement og snakket i stor grad fritt, kun avbrutt av oppfølgingsspørsmål fra min

side. De to siste intervjuene bød på noen fler utfordringer ved at elevene ikke hadde mine temaer helt friskt i minne, siden det var et par uker siden de hadde arbeidet med de aktuelle modulene. Dette løste jeg ved å vise dem skjermbilder fra modulene. Dermed bar de to siste intervjuene et sterkere preg av ”stimulated recall” en de to første. Elevene i ett av de siste intervjuene viste fra starten av preg av nervøsitet, men etter å ha snakket litt løst og fast og spist litt mat ble stemningen mer avslappet. Elevene i de to siste intervjuene snakket ikke like fritt som de to første, så jeg måtte oftere stimulere til videre diskusjon med spørsmål som ”hva tenker/reagerer dere andre om hva han/hun nettopp sa?”, noe som så ut til å fungere bra.

Etter intervjuene ble lydfilene transkriberte i det Wibeck (2000) omtaler som transkripsjons-nivå 2. Det vil si at alle ordforekomster ble skrevet ned slik de framkom, med innslag av skilletegn etter skriftspråkets regler og indikasjoner for pauser. Dette nivået ble valgt framfor nivå 1, som i tillegg markerer blant annet detaljer som avbrytelser, overlappende tale, talestyrke og bakgrunnslyd. Det var få innslag av overlappende tale og avbrytelser i intervjuene og det var lett å skille mellom hvem som snakket, så nivå 2 ble vurdert som tilstrekkelig. Selv om intervjuene ble gjennomført i samarbeid med min medstudent, valgte vi å transkribere hver for oss de delene av intervjuene som vi anså som relevante for egne oppgaver.

Elevbesvarelser fra intervjuene som siteres i kapittel 6 er utdrag fra transkribert tekst, men med moderate modifikasjoner. Gjentakelser og ”pauseord” som ”ehm” ble kuttet. Dette for å lette leservennligheten. Når muntlig tekst blir omgjort til skriftlig tekst, kan utsagnene fort anses som ”dumme”. Små modifiseringer av transkribert tekst ble derfor også gjort av etiske hensyn til elevene.

### 5.3 Analysemetode

I denne kvalitative, design-baserte undersøkelsen var innholdsanalyse et naturlig valg av analysemetode. Datamengden ble progressivt fokusert. I mangel av kategorier av forståelse av kvantefysikkens prinsipielle brudd med klassisk fysikk fra tidligere forskning, søkte jeg etter nye kategorier induktivt. Resultatene for denne oppgaven er dermed kategorier og påstander som har blitt til ved datareduksjon og subjektiv tolkning. I det følgende beskriver jeg datareduksjonsprosessen. Presentasjonen av resultatene i kapittel 6 beskriver hvordan mine tolkninger ligger til grunn for resultatene. Dette for å styrke resultatenes reliabilitet.

I systematiseringen av datamaterialet har jeg operert med *analyseenheter*, som i denne oppgaven defineres som en meningsbærende ytring. Spesielt ved analyse av



de muntlige responsene og intervjuene viste dette seg å være fordelaktig, i og med at ikke alt elevene sier eller skriver er meningsfylt med tanke på det som det i denne oppgaven søkes svar på. Dette medfører at jeg i denne oppgaven ikke kan beskrive andeler av elever som har de ulike forståelsene og oppfatningene. I stedet kan andel av analyseenheter i hver kategori angis. På denne måten beskrives også deler av resultatene i denne oppgaven semi-kvantitativt. Resultatene er dermed ikke statistisk generaliserbare, men det semi-kvantitative innslaget gir en indikasjon hva gjelder fordeling av analyseenheter. I hvilken grad resultatene har en overføringsverdi diskuteres i kapittel 7.

Etter den andre utprøvningsrunden startet arbeidet med datamaterialet. Første steg i innholdsanalysen var å bli kjent med materialet og skape oversikt. Tatt datamengdens størrelse i betraktning, viste det seg å være utfordrende å finne ut hvordan jeg skulle behandle datamaterialet og hvor systematiseringen skulle starte. Elevers kunnskaper og forståelse så ut til å være fragmentert, og analyse av dette ble utfordrende. Jeg tok dermed for meg elevenes skriftlige besvarelser, og startet å systematisere elevenes besvarelser på enkeltoppgaver, med oppgavene som utgangspunkt for tematisk inndeling. I arbeidet med datareduksjonen benyttet jeg programvaren *Nvivo*, som er et verktøy som gjør det mulig å kode og systematisere tekst. Etter å ha systematisert elevenes responser på de skriftlige oppgavene hadde jeg kategorier av *elevbesvarelser*. Jeg startet så å systematisere elevbesvarelser fra utprøvningsrunde 1. Da dette ikke førte til nye kategorier, valgte jeg derfor å inkludere disse dataene for å styrke validiteten.

Som nevnt tidligere er undervisningsmodulene først og fremst et undervisningsverktøy. Dette viste seg blant annet ved at kategoriene av elevbesvarelser på oppgavene ikke besvarte mine forskningsspørsmål. Jeg måtte dermed endre den tematiske inndelingen med å innføre temaene ”kvantisering”, ”determinisme” og ”erkjennelsesmessige sider ved kvantefysikken”. Dette medførte at jeg måtte benytte åpen koding av elevbesvarelsene, som tillot meg å dele opp elevbesvarelsene i mindre enheter. En elevs besvarelse kunne dermed i prinsippet plasseres i forskjellige kategorier og innenfor forskjellige temaer. Subjektiv tolkning og min faglige bakgrunn ble her en sentral del av systematiseringen. Dette er en metodisk begrensning ved at forskere med andre faglige bakgrunner kunne ha funnet andre påstander om elevers oppfatninger av kvantefysikkens erkjennelsesmessige sider. Jeg gjorde meg ferdig med systematisering av elevers skriftlige responser før inkludering av muntlige responser og intervjuer. Koding av sistnevnte førte ikke til nye kategorier eller påstander. Den åpne kodingen er også en faktor som gjør at det ikke er mulig å angi antall eller andel elever som viser de ulike oppfatningene av kvantefysikkens erkjennelsesmessige

sider.

Da datamaterialet fra tredje utprøvningsrunde var samlet inn, innså jeg at svarandelen på spesielt spørsmål omkring kvantisering og hvordan dette representerer et brudd med klassisk fysikk var nokså lav. Derfor hadde jeg ikke grunnlag til å danne nye kategorier. Elevers responser om dette temaet ble dermed sett i lys av eksisterende kategorier for å se etter kvalitative forskjeller og likheter. For de andre temaene var svarandelen god, men ingen vesentlige forskjeller ble funnet. Alle analyseenheter fra siste utprøving kunne plasseres innenfor samme kategorier som fra de to foregående utprøvingene.

## 6 Resultater og analyse

I dette kapitlet legges resultatene fra analysen frem. Disse er resultat av min tolkning av foreliggende datamateriale. I kapittel 6.1 presenteres kategorier for elevers forståelse av kvantiseringsbegrepet etter de to første utprøvningsrundene, mens elevenes forståelse av hvordan kvantisering bryter med kontinuitetsprinsippet presenteres i kapittel 6.2. Kapittel 6.3 tar for seg endringer gjort i modulen ”Behov for en ny fysikk”. Hvordan elever ser ut til å forstå kvantiseringsbegrepet og dets brudd med klassisk fysikk etter tredje utprøvningsrunde presenteres også. Elevers forståelse av determinisme-prinsippet presenteres i kapittel 6.4, og kategorier for elevers forståelse av dets brudd med klassisk presenteres i kapittel 6.5. Hvor stor andel av analyseenheter som kan plasseres innenfor hver kategori blir også presentert for å gi et bilde av relativ forekomst av kategoriene i elevsvarene, men gir ikke grunnlag for generalisering ved statistisk inferens. I tillegg presenteres hvordan noen av mine tolkninger har ledet til disse kategoriene. For elevers oppfatninger av erkjennelsesmessige sider ved kvantefysikken, som presenteres i kapittel 6.6, førte analysen frem til ni påstander. Elevsitater trekkes frem for å eksemplifisere kategoriene og påstandene.

I presentasjonen av elevsitater har jeg i mange tilfeller streket under relevante deler av sitatet for å klargjøre for leseren hvilket poeng som kommenteres. Elevsitater som er markerte med kulepunkter er sitater som kommer fra ulike deler av datamaterialet, mens sitater uten kulepunkt står i samme rekkefølge som i datamaterialet. Sitater og utdrag fra gruppeintervjuene som inneholder flere elevers ytringer markeres med pseudonymet som er tillagt den enkelte eleven som siteres. Gruppeintervjuer fra andre utprøving omtales som *gruppeintervju nr. 1* og *2*, mens *gruppeintervju nr. 3* og *4* ble gjennomført ved tredje utprøving.

### 6.1 Elevers forståelse av kvantiseringsbegrepet og dets brudd med kontinuitetsprinsippet

Elevers forståelse av begrepet kvantisering og deres oppfatning av hvordan dette bryter med kontinuitetsprinsippet i klassisk fysikk ble i de to første utprøvningsrundene dokumentert hovedsakelig fra gruppeintervjuer og elevers besvarelser av oppgaven formulert som følger (se figur 5):

“Det er mye her i verden som er kvantisert. For eksempel antall hårstrå på hodet. Snakk med en annen elev. Prøv å komme på minst fire ting i deres hverdag som er kvantisert.”

Ut fra analysen av elevenes besvarelser på dette spørsmålet er det tydelig at elevene har vanskelighet med å forstå kvantiseringsbegrepet, og viser dermed vanskelighet med å forklare hvordan kvantisering bryter med kontinuitetsprinsippet i andre oppgaver. Fra datamaterialet er det mulig å finne tre kvalitativt ulike kategorier av elevers forståelse av kvantiseringsbegrepet. Disse er:

- Kvantisering som *kvantifisering* (80%)
- Kvantisering som *inndeling av et sammensatt system* (10%)
- Kvantisering som *diskontinuitet* (8 %)

Den første kategorien, *kvantisering som kvantifisering*, innebærer å tillegge noe en kvantitet. Med hele 80% av analyseenhetene, er dette den kategorien som er mest dominerende. Elevbesvarelsene i denne kategorien ser ut til å følge opp eksempelet med *antall hårstrå* ved å gi eksempler på antall av tellbare gjenstander. De aller fleste eksemplene som elevene trekker frem er gjenstander som er heltallige, som for eksempel ”antall mennesker i et rom”. Andre variasjoner er antall som er for store til å telle (antall sandkorn i Sahara) og gjenstander som opptrer i konstante antall (antall hjul på bilen). Fra de muntlige responsene kan elevenes resonnering bak disse eksemplene illustreres:

- ”Det sto for eksempel antall hårstrå på hodet ditt... Hvis du tar det på det nivået så er alt kvantifisert, antall stoler i rommet, antall ben på menneskekroppen, antall fingre på hendene”
- ”Men kvante betyr jo pakke, eller på latin, så det er jo egentlig bare det at man skal forstå det, det er liksom noe man teller på en måte”
- ”(...) i hverdagen for eksempel, så kan man eksemplifisere med antall venner. Du kan ikke ha et halvt antall venner. Man kan ha 1, 2, 3.. Man kan ta naturlige tall for eksempel da.”

Fra disse elevsitatene framgår det at alle typer tellbare gjenstander er kvantiserte, og de tillegger dette betydningen av å finne gjenstander som kun opptrer i heltallige mengder. En slik forståelse er konsistent med begrepet *kvantifisere*, som betyr å tillegge noe en kvantitet. Mange elever bruker nettopp dette ordet, kvantifisere, i sammenheng med denne oppgaven. Et søk i det totale datamaterialet viste at ordene *kvantisering* og *kvantifisering* forekom henholdsvis 64 og 58 ganger. En grunn til dette kan være at elevene antakeligvis har hørt om dette ordet tidligere. I tillegg kan elevers assosiasjoner av ordet *kvantifisering* fra andre sammenhenger også være med på å skape en slik forståelse av kvantiseringsbegrepet.

En slik forståelse, eller snarere *misforståelse*, ser ut til å stamme direkte fra oppgaveformuleringen, og spesielt fra hårstrå-eksemplet som ble gitt i oppgaveteksten. Hensikten med denne oppgaven var å knytte begrepet *kvantisering* til elevers hverdags erfaringer, til tross for forskningslitteraturens advarsel mot å vise til den makroskopiske verden som beskrives av klassisk fysikk (se kapittel 3). Oppgaven legger dermed opp til en forståelse av kvantisering som kvantifisering, noe som ikke er forenelig med hvordan kvantisering faktisk opptrer i kvantefysikk (se kap. 2.1 og 2.2). Denne oppgaven ble også kilde for irrelevante diskusjoner, blant annet om det er forutbestemt hvor mange hårsekker man er født med. Følgelig ble denne oppgaven et hinder for hensiktsmessig forståelse av hvordan fysiske størrelser i kvantefysikk kan være kvantiserte.

Den andre kategorien, *kvantisering som inndeling av et sammensatt system*, utgjør om lag 10% av analyseenhetene. Her peker elevene på eksempler av gjenstander som består av mindre deler. Eksempler er en mursteinsvegg, som består av mursteiner, og vanddråper, som består av vannmolekyler.

Enkelte elever problematiserer hårstrå-eksemplet ved å diskutere hvordan antall hårstrå kan være kvantisert når ikke alle hårstrå er like lange. Følgende utdrag fra gruppeintervju nr. 1 er et eksempel på en slik diskusjon

Kristian: "Så egentlig så deler man bare opp noe i en bestemt pakke?"

Jonas: "Ja, så, det er så så mange fotoner"

Kristian: "så det kan virke på hår, for hvis man ser på hår som en pakke så kan man også kvantifisere.. da antall hår på hodet ditt.. men hvis man kan tenke seg at en pakke gjerne også inneholder andre ting og det kan ses på som molekylnivå"

Elin: "men så frustrerende, for må være, på en måte likt, ser jeg for meg da, for hvis man skal kvantifisere noe så må man liksom kategorisere noe i like ting, og mennesker er ikke like, og biler er ikke like og"

Pål: "og hårstrå er ikke like lange"

Elin: "ja, ikke sant, det er superfrustrerende (latter)"

I diskusjonen prøver elevene å skape en forståelse av kvantiseringsbegrepet med utgangspunkt i hårstrå-eksempelet ved å tenke på kvantisering som å dele noe opp i definerte "pakker". Dette kan minne om hvordan Einstein beskrev at lys består av udelelige energikvanter (se kap. 2.1). Elin forklarer videre at hun mener at disse "pakkene", eller kategoriene, må bestå av identiske ting. Ut fra dette tolker jeg at elever kan oppfatte kvantisering som inndeling av et sammensatt system, og bestanddelene kan være identiske. Det nevnes også at man ved en finere oppstyking

av pakkene kanskje må gå ned på molekylnivå. Dette kan ha en sammenheng med at elevenes forbindelse med at kvantefysikk tar for seg verden på partikkel-nivå, som beskrevet i kap. 6.6. Dette illustrerer hvordan oppgaven som knytter et kvantefysisk begrep opp mot det klassiske domenet, kan skape uhensiktsmessig kognitiv konflikt. En annen variant innenfor denne kategorien illustreres i følgende utdrag fra gruppeintervju nr. 2:

Øystein: ”at når noe er kvantisert så er det på en måte en mengde som er”

Thomas: ”så man sier at dette her er den ene delen, og dette er en annen del, også er hver del en kvantifisert del av det hele”

Her fokuseres det ikke på at bestanddelene må være identiske. Med ”man sier at dette her er den ene delen” tolker jeg at eleven mener at man kan stå fritt til å definere bestanddelene som man vil, men at bestanddelene til sammen utgjør en helhet. Etter diskusjon mellom to elever om en mursteinsvegg kan kvantiseres, konkluderes det slik:

”Prinsippet om en murstein, den kan være kvantifisert for du kan ikke ha noen... Det finnes ingen grad av en murstein. Det er enten murstein eller ikke murstein.”

Følgelig er en murstein en murstein selv om den har en annen størrelse enn de andre mursteinene, og kan dermed være en bestanddel av et sammensatt system (mursteinsvegg).

Som sitatene ovenfor viser, er det to nyanser innenfor kategorien ”kvantisering som bestanddel av et sammensatt system”, der noen mener at bestanddelene av systemet må være identiske, mens andre mener at man står fritt til å definere en bestanddel som man vil. Sitatene viser også at elevene bruker ordet kvantifisering, men ut fra konteksten tillegger de ordet betydningen å dele noe inn i pakker eller bestanddeler.

Den siste kategorien er *kvantisering som diskontinuitet*. Denne forståelsen er mer hensiktsmessig enn de øvrige ved at elevene viser til fysiske størrelser som tar diskontinuerlige verdier. Kun 8% av analyseenhetene tyder på en slik forståelse. En elev beskriver forskjellen mellom en kontinuerlig størrelse og en kvantisert størrelse slik:

”En kjetting har en minsteverdi for lengde. En kjetting kan kun ha lengder som går opp i kjettingringenes lengde, i motsetning til en tråd, som kan kuttes i akkurat den lengden du vil. Tråden blir da et eksempel på

noe kontinuerlig når du korter ned lengden, imens en kjetting må gjøre hopp i lengdene, og er derfor ikke kontinuerlig - kvantisert.”

En tråd kan altså klippes i vilkårlige minstelengder, mens en kjetting kan bare kortes ned til et visst multippel av kjettingringer. Dermed er dette et veldig godt eksempel på en fysisk størrelse som opptrer i diskrete verdier i hverdagen. Det at ingen andre elevbesvarelser har med dette eksempelet tyder på at eleven selv har konstruert det.

Et elev-par konkluderer en diskusjon om kvantisering slik:

”Så du mener kvantifisert er, ehm, det er liksom noe som ...”

”Kvantifisert det vil si, det er en inndelingsmåte for nivåer av en verdi.”

Elevene i dette sitatet sier at kvantisering i kvantefysikk betyr at fysiske verdier er delt inn i nivåer, som er helt i tråd med for eksempel elektroners energinivåer i et atom. Sitatet viser også at elever bruker *kvantifisering* i sammenheng med denne oppgaven, men innholdet i ytringen viser likevel en hensiktsmessig forståelse.

Slik jeg ser det, er forståelsen av kvantisering som diskontinuitet den kategorien som er mest forenelig med hvordan kvantisering opptrer i kvantefysikken, ved at ulike fysiske størrelser kun kan ta diskrete verdier diktert av det måle-teoretiske postulatet, jfr. kap. 2.2. Siden det var såpass lav andel av analyseenhetene (8%) som viste en slik hensiktsmessig forståelse, så er det ikke unaturlig at elevene viser vanskelighet med å vise forståelse for hvordan kvantisering representerer et brudd med kontinuitetsprinsippet.

De siste 2% av analyseenhetene utgjør eksempler som ”(elektrisk) strøm”, ”lyd” og ”fart”, som jo er kontinuerlige. Slike eksempler kan dermed ikke tolkes som en forståelse av kvantiseringsbegrepet. Dette, samt at andel av analyseenhetene som viste den hensiktsmessig forståelsen av kvantisering som diskontinuitet, er med på å underbygge påstanden om at elever har vanskelighet med å forstå begrepet.

## **6.2 Elevers forståelse av kvantisering som brudd med kontinuitetsprinsippet**

I det følgende viser jeg til andre sammenhenger hvor elevene viser vanskelighet med å forstå hvordan kvantiseringsbegrepet i kvantefysikk utgjør et brudd med kontinuitetsprinsippet i klassisk fysikk. Den første sammenhengen jeg vil trekke fram er en skriftlig oppgave i forbindelse med fotoelektrisk effekt fra utprøvningsrunde 2:

“Snakk med en annen elev. Er det noe brudd med klassisk fysikk i resultatene dere har fått?”

I forkant av denne oppgaven har elevene utforsket en simulering av fotoelektrisk effekt ved å variere ulike parametere som lysintensiteten og bølgelengden til det innfallende lyset. *Resultatene* som det vises til i oppgaven ovenfor, viser til hvordan variasjon av de nevnte parametrene påvirker elektronenes kinetiske energi. I simuleringen vises at det er lysets bølgelengde, og ikke lysets intensitet, som påvirker den kinetiske energien til elektronene. Oppgaven ovenfor utfordrer dermed elevene til å anvende kunnskap om kvantefysikkens prinsipielle brudd med klassisk fysikk i konteksten av fotoelektrisk effekt. Det var svært lav svarandel på dette spørsmålet ved de to første utprøvingene. Det var kun ett elevsvar som fokuserte på at lysets partikkelegenskap viser at lys er kvantisert, noe som er et brudd med klassisk fysikk. Det var likevel noen elevsvar som var delvis riktige. Dette elevsvaret er representativt for slike svar:

”Maxwell mente at lysstyrken bestemte energien til lyset. Det er ikke korrekt, og ved hjelp av disse forsøkene har vi funnet ut at det er frekvensen som bestemmer energien.”

Ifølge dette elevsvaret representerer fotoelektrisk effekt et brudd med klassisk fysikk ved at energien avhenger av frekvensen. Det er riktig at fotonenes energi er gitt av  $h\nu$ , men det er først og fremst kvantisering av lyset i energimengden  $h\nu$  som representerer et brudd med klassisk fysikk. Det siste leddet i argumentasjonen blir ikke uttrykt i disse elevbesvarelsene, og svarene kan dermed karakteriseres som *delvis riktige*. Det at få elever svarte på spørsmålet og at de fleste som svarte, svarte feil, kan tyde på at deres forståelse av kvantiseringsbegrepet ikke omfatter at lysets energi i kvantefysikk er kvantisert. En annen mulighet kan være at elevene ikke har forstått forskjellen mellom begrepene kontinuitet og kvantisering.

I dette utdraget fra gruppeintervju nr. 2 uttrykker Anna forvirring om begrepens betydning, og får hjelp fra Thomas som eksemplifiserer begrepene:

Meg: ”Hvis vi starter med kontinuitet, kan vi snakke litt om hva det var?”

Anna: ”Ja, det var der jeg ble så forvirret over hva som var kontinuerlig og ikke-kontinuerlig eller noe sånt noe”

Thomas: ”Ja, det sann.. tror det var en avstand mellom to biler.. antall mynter i en brønn..”

Anna: ”Ja”



Thomas: ”Hvordan.. avstanden mellom to biler er kontinuerlig.. mens mynter i en brønn er sånn.. det er fast antall mynter.. også”

Anna: ”Ja, for jeg skjønnte ikke helt.. jeg synes ikke begrepet kontinuerlig ga så mye mening i forhold til det det betydde, var det bare meg liksom?”

En liknende diskusjon oppsto også i gruppeintervju nr. 1. Diskusjon av disse begrepenes definisjoner tyder på at flere av elevene ikke har et tydelig bilde av begrepenes betydning. Dette viser også at antakelsen i forbindelse med forskningsspørsmål 1 er berettiget ved at elever som ikke har en hensiktsmessig forståelse av kontinuitetsprinsippet og kvantiseringsbegrepet, viser vanskelighet med å forklare hvordan prinsippet brytes i kvantefysikk. Thomas eksemplifiserer begrepene kontinuitet og kvantisering med henholdsvis avstanden mellom to biler og antall mynter i en brønn. Disse eksemplene stammer fra en oppgave gitt i modulen ”Behov for en ny fysikk”, se figur 8.

Etter utprøvningsrunde 1 var det én klasse som ble stilt følgende spørsmål på en skriftlig prøve:

”På hvilke måter kan vi si at kvantefysikken representerer et brudd med klassisk fysikk?”

Dette spørsmålet er åpent, og innbyr til å forklare hvordan kvantefysikken bryter prinsipielt med klassisk fysikk. Blant de 27 elevene i denne klassen var det om lag halvparten som nevnte i stikkordsform at kontinuitetsprinsippet brytes i klassisk fysikk. Likevel var det kun tre av elevene som ga et meningsfylt eksempel på hvordan dette prinsippet brytes i kvantefysikken. Ett av disse tilfredsstillende elevsvarene er:

”I kvantefysikken er det ikke kontinuitet slik som det er i den klassiske fysikken. Energien vi regner med i kvantefysikken er kvantisert. Dvs at den har bestemt verdier, den kan ikke ha alle mulige verdier.” [elevens egen understreking]

Fra alle resultatene ovenfor framgår det at en stor del av elevene oppfatter kvantisering på en måte som ikke er hensiktsmessig i forhold til hvordan kvantisering fremtrer i kvantefysikken. Dermed ser det ut til at elevene ikke lærer hvordan kvantisering representerer et brudd med kontinuitetsprinsippet i klassisk fysikk etter arbeid med undervisningsmaterialet. I det følgende argumenterer jeg for noen endringer som ble gjort i undervisningsmodulene i forkant av tredje utprøvningsrunde for å forbedre elevenes forståelse av kvantiseringsbegrepet og dets brudd med kontinuitetsprinsippet.

### 6.3 Utvikling av modulen ”Behov for en ny fysikk” forut for 3. utprøving

I utviklingen av undervisningsmodulene ble det, med bakgrunn i analysen ovenfor, nødvendig å tydeliggjøre kvantiseringsbegrepets betydning. Figur 16 tydeliggjør visuelt forskjellen mellom et kontinuerlig spekter og kvantiserte energinivåer til et elektron i et atom. Forskjellen mellom kontinuitet og kvantisering visualiseres i figur 17. Som nevnt ovenfor, later det til at oppgaven som ble gitt, ikke egnet seg til å utvikle en god forståelse for kvantiseringsbegrepet, og en ny oppgave ble derfor foreslått (figur 18). Denne nye oppgaven om kvantisering tar utgangspunkt i det filosofiske og faglige framfor elevenes hverdag, og utfordrer elevene til å snakke om hva det vil si at noe er kvantisert og hvordan dette representerer et brudd med klassisk fysikk:

”Diskuter med en annen elev: Hva betyr kvantisering, og hvordan representerer det et brudd med klassisk fysikk?”

Ut ifra foreliggende data fra elevenes diskusjoner av denne oppgaven kommer det fram at elevene i større grad snakker om kvantisering som diskontinuitet. Følgende elevsitat illustrerer dette:

”Ja, kvantifisering, hva vil du si at det er?”

”Det er vel å begrense noe. Innenfor en viss mengde.”

”Ja, det er på en måte... Ja, jeg er enig der egentlig. Det er sånne slags kvantesprang da og sånn at energien ikke er kontinuerlig fordelt da. Sånn i atomer for eksempel”.

I sitatet kommer det også fram at elever fortsatt bruker ordet *kvantifisering*, men fra konteksten ser man at elevene ikke mener at kvantisering er å tallfeste ulike gjenstander. Elevene viser i større grad til eksempler som elektroners energinivåer i atomer og fotoner som kvantisert lys i sine diskusjoner. Elevene viser også bedre forståelse for hvordan kvantisering bryter med kontinuitetsprinsippet. Utdrag fra gruppeintervju nr. 3 eksemplifiserer dette:

Meg: ”Men hvorfor er det [kvantisering] et brudd med klassisk fysikk da?”

Erik: ”Fordi de mener at alt er kontinuerlig, så alt vil skje i.. altså glide over til neste overgang på en måte, mens når man ser på det som er ikke-kontinuerlig så hopper den i stedet for å gå.. sånn.”

Eleven forklarer her på selvstendig vis at i klassisk fysikk tar fysiske størrelser kontinuerlige verdier, mens i kvantefysikk har man diskontinuerlige verdier, og endring av disse medfører ”hopp”. Dette er i tråd med definisjonen av kontinuitetsprinsippet, jfr. kap. 2.

Når det kommer til oppgaven fra simulering av fotoelektrisk effekt som ble nevnt ovenfor, var svarandelen betydelig bedre ved tredje utprøving. Over halvparten av elevbesvarelsene trakk fram at bruddet med klassisk fysikk i simuleringen baserer seg på at lys viser partikkelnatur. Generelt er elevbesvarelsene mer sofistikerte enn ved tidligere utprøvinger av modulene:

”Det at energimengden som kreves for å slå løs et elektron er kvantifisert, bryter med klassisk fysikk. Ifølge klassisk fysikk skulle man kunne øke intensiteten, og dermed kompensere for lav energi i form av lang bølgelengde (lav frekvens).”

Etter endringene som ble gjort, ser det altså ut til at elevene oppnår en mer hensiktsmessig forståelse av kvantiseringsbegrepet og hvordan dette skiller seg fra prinsippet om kontinuitet.

## 6.4 Elevers forståelse av determinisme-prinsippet

I undervisningsmaterialet er det ingen spørsmål som går direkte på hva determinisme er og hvordan det brytes i kvantefysikk. Derfor er det i hovedsak gruppeintervjuene og prøvebesvarelser som er datakilde for elevers forståelse av dette begrepet. I tillegg er det noen elever som tar for seg determinisme-prinsippet implisitt eller eksplisitt i besvarelsene av diskusjons- og skriveoppgaven i tilknytning Schrödingers katt, hvor de inviteres til å uttrykke hvordan tankeeksperimentet påvirker deres syn på kvantefysikk. Til tross for at undervisningsmodulen som ble brukt i tredje utprøvingsrunde definerer kort at man i kvantefysikken har *statistisk determinisme*, gir dette ingen vesentlig forskjell i elevers forståelser. Når jeg nå presenterer elevers forståelse av determinisme-prinsippet og i kapittel 6.4 presenterer hvordan dette prinsippet brytes i kvantefysikk, er disse basert på analyseenheter fra ulike deler av datamaterialet fra alle tre utprøvingsrundene. Elevers forståelse av prediksjon i kvantefysikk kan også ses på som en erkjennelsesmessig side ved kvantefysikken, men jeg har altså valgt å presentere dette som et eget tema.

Elever som nevner determinisme-prinsippet eksplisitt, viser en forståelse av at begrepet handler om å kunne forutsi hendelser i klassisk fysikk eller kunne utføre

predikerende beregninger. Datamaterialet viser ingen andre måter å forstå dette begrepet på. En elev i gruppeintervju nr. 1 beskriver determinisme slik:

Meg: ”Hva tenker dere om determinisme i kvanteverden?”

(...)

Jonas: ”(...) i klassisk fysikk kan si at etterfølgende av lovene.. litt sånn hvis du har lov A og B som sier noe om hvordan et objekt beveger seg, så kan man vite at siden den har den farten og den akselerasjonen og så videre så vil den ende der borte på det tidspunktet da”

Eleven beskriver her at dersom man kjenner initialbetingelsene til et system, så kan systemets evolusjon predikeres, jfr. kap. 2. Ikke alle ytringer var like detaljerte og spesifikke som denne. Følgende muntlige respons eksemplifiserer dette:

”I klassiske fysikken kan man regne seg fram til mye før man observerer og få akkurat det man regnet ut”

Denne eleven skriver at man i klassisk fysikk kan gjøre beregninger av noe, og ved eksperiment vil man få en overensstemmelse med det som ble beregnet. På denne måten viser eleven forståelse av at prinsippet om determinisme handler om prediksjon.

## 6.5 Elevers forståelse av hvordan determinisme-prinsippet brytes i kvantefysikk

Selv om elevene ikke viser andre måter å forstå determinisme-begrepet på, viser de to ulike forståelser av hvordan dette prinsippet brytes i kvantefysikk. Disse lyder og fordeler seg som følger:

- I kvantefysikk kan ingenting predikeres (31%)
- I kvantefysikk beregnes sannsynlighet for at hendelser skal skje (46%)

De resterende elevens ytringer er svært kortfattede responsers som ikke lar seg tolkes som *forståelse*. Disse ytringene er gjengivelser av at kvantefysikken er ikke-deterministisk. Hva elevene legger i ikke-deterministisk kommer ikke fram i disse besvarelsene, men slike besvarelses kan omfatte én av kategoriene ovenfor eller mulig også helt andre forståelser. Jeg har likevel tatt med denne gruppen av responsers fordi en vesentlig andel av elevresponsene var av en slik art, og jeg vil senere trekke frem noen sitater for å illustrere dem. Følgende er altså ikke en kategori for elevens

forståelse, men snarere en gruppering av elevresponser:

- Kvantefysikk er ikke-deterministisk (23%)

I den første forståelsen av kvantefysikkens brudd med determinisme-prinsippet, *I kvantefysikk kan ingenting predikeres*, framgår det at ingenting kan forutsies eller beregnes i kvantefysikk. Følgende to elevsitater illustrerer videre hvordan to skriftlige elevresponser forklarer at kvantefysikken ikke er deterministisk:

- ”Den [Tankeeksperimentet Schrödingers katt] vil også vise at regler på makroskopisk nivå ikke lenger gjelder/er relevant på kvantenivå.”
- ”Schrödingers katt er et eksempel på hvordan kvantefysikken fungerer. Katten er i superposisjon, og er enten død eller levende. Vi kan ikke vite, og vi kan heller ikke på noen måte beregne hvilken fase den er i. Dette viser hvor vanskelig og annerledes kvantefysikken er all gammel fysikk, der alt kan beregnes.”

I første sitat tolker jeg ”regler på makroskopisk nivå” som naturlover i klassisk fysikk, som for eksempel Newtons lover, som har en predikerende funksjon. Eleven uttrykker at disse reglene ikke gjelder eller er relevante i kvanteverden. Med dette tolker jeg elevens ytring som at i kvantefysikken gjelder ikke disse naturlovene, og man kan dermed ikke forutsi noe om naturen på kvantenivå. I det andre sitatet skriver eleven at man ikke kan beregne hvilken tilstand Schrödingers katt er i, og på denne måten skiller kvantefysikk seg fra klassisk fysikk. Elevens utsagn om at ”i klassisk fysikk kan alt beregnes” og at ”kvantefysikken er annerledes, kan tolkes som at i kvantefysikk kan ingenting beregnes, og er dermed ikke predikerende.

Forståelsen av at ingenting kan predikeres i kvantefysikk er en forståelse som ikke er i tråd med kvantefysikkens postulater, jfr. kap. 2.2. Dersom elevene hadde vist forståelse av at *enkelthendelser* ikke kan predikeres, hadde det vært mer hensiktsmessig. Hvis man forstår at enkelthendelser ikke kan predikeres, virker det kanskje mer logisk for elevene at en *statistisk fordeling* kan predikeres.

Den andre kategorien av forståelse av kvantefysikkens brudd med determinisme-prinsippet, *I kvantefysikk kan sannsynlighet for hendelser predikeres*, karakteriseres ved at man i kvantefysikk betrakter sannsynlighet for hendelser og sannsynlighetsfordelinger. Dette vises i følgende elevsitat fra en prøvebesvarelse:

- ”Determinisme. I normal fysikk så kan vi regne oss fram til hva som vil skje (...) Dette kan man ikke i kvantefysikk men man må gå ut i fra en sannsynlighetsfordeling.”

Eleven viser forståelse for determinisme-prinsippet, og forklarer at dette prinsippet brytes i kvantefysikk ved at ”man må gå ut fra en sannsynlighetsfordeling”. Jeg tolker dette som at i kvantefysikk kan man bare beregne sannsynligheten for at en hendelse skal inntreffe. En liknende forklaring vises i dette skriftlige elevsitatet fra oppgaven om fotoelektrisk effekt:

”Det er også brudd med klassisk fysikk fordi det ikke er determinisme. Vi kan ikke vite nøyaktig hvor[dan] elektronene oppfører seg, vi kan bare regne med sannsynligheter for at noe skal skje.”

I dette sitatet bruker eleven, slik som elever i flere andre analyseenheter, formuleringen ”sannsynligheter for at noe skal skje”, noe som kan tyde på at eleven snakker om sannsynlighet for at en enkelthendelse skal opptre. Dersom eleven mener dette, er det nærliggende å tro at eleven forstår sannsynlighet for at en hendelse skal inntreffe slik det defineres i skolematematikken, altså ved  $P(\text{hendelse}) = \frac{\text{\#gunstige utfall}}{\text{\#mulige utfall}}$ . I kvantefysikk er ikke en slik oppfatning hensiktsmessig, siden man her snakker om sannsynlighetsfordeling som en prediksjon av en statistisk fordeling ved måling av et ensemble av identiske systemer, jfr. kapittel 2.3. I København-tolkningen av kvantefysikken tolkes dessuten  $|c_n|^2$  i det matematiske uttrykket for superposisjon (likning (14)) som sannsynligheten for å oppnå egenverdien  $f_n$  ved måling av en størrelse. Elevenes forståelse av sannsynligheten for at noe skal *skje* er dermed ikke forenelig med sannsynligheten for et målingsutfall. Slik jeg ser det, ville en forståelse av at enkelthendelser i kvantefysikk kan ikke predikeres, men at man kan forutsi en statistisk fordeling ved mange forsøk vært mer hensiktsmessig.

Gruppen av elevresponser om at kvantefysikken er ikke-deterministisk baserer seg på elevsvar som sier at prinsippet om determinisme brytes i kvantefysikk, uten å forklare hvordan det brytes. Fra samtlige elevintervjuer finnes eksempler der elever svarer kontant at det i kvantefysikken finnes ingen determinisme. Dette eksempelet fra gruppeintervju nr. 2 viser dette:

Meg: ”(...) Er kvanteverden deterministisk?”

Øystein: ”Nei”

(...)

Thomas: ”Jeg tror også nei”

Elevene svarer altså kjapt ”nei” på spørsmål om kvantefysikken er deterministisk. I undervisningsmodulene som ble brukt ved de to første utprøvningsrundene framgår det at prinsippet brytes i kvantefysikk, uten videre forklaring. Ved tredje utprø-

ving framgår det i undervisningsmodulen at man i kvantefysikk har en statistisk determinisme. Likevel svarer intervjuede elever fra tredje utprøving som følger:

Meg: "(...) så determinisme går ut på å kunne forutsi noe om fysiske størrelser. Er kvanteverden deterministisk?"

Lars: "Nei"

Meg: "Du sier nei, hvorfor sier du det?"

Lars: "Fordi jeg har hørt at den ikke er det"

At elever i gruppeintervjuene fra siste utprøvingsrunde fortsatt svarer "nei" på dette spørsmålet er dermed overraskende.

Innenfor samme gruppe av elevresponser inngår oppramsende besvarelser fra prøven som ble gitt elever etter første utprøvingsrunde. Disse besvarelsene tar formen:

"Kvantefysikken bryter med klassisk fysikk, ved lokal virkelighet, determinisme, kontinuitet."

Slike besvarelser tyder på at elevene har pugget tre prinsipper i klassisk fysikk som brytes i kvantefysikk, men forklarer ikke hva disse prinsippene betyr og *hvordan* disse brytes.

## **6.6 Elevers oppfatninger av erkjennelsesmessige sider ved kvantefysikken**

Som vi har sett, beskriver elever determinisme-begrepet i forbindelse med oppgaven om Schrödingers katt. I tillegg viser elever i denne oppgaven oppfatninger av erkjennelsesmessige sider både ved tankeeksperimentet og ved kvantefysikken som helhet. Erkjennelsesmessige sider omfatter oppfatninger av virkeligheten som kan minne om København-tolkningen og skjulte variabler-tolkningen av kvantefysikken, men elevene oppfatter også kattens superposisjon på forskjellige måter. Interessant er også elevenes forsøk på å si noe generelt om kvantefysikken basert på sine refleksjoner om Schrödingers katt, fordi disse viser hvordan åpne spørsmål om tankeeksperimentet kan avdekke oppfatninger. Kvantefysikkens predikerende funksjon er også en erkjennelsesmessig side. Dette delkapittelet tar for seg elevers oppfatninger av erkjennelsesmessige sider utover det som nevnes i kapittel 6.5. Analysen av det totale datamaterialet resulterte i ni påstander som reflekterer elevers ulike oppfatninger av erkjennelsesmessige sider ved kvantefysikk. Disse er:

1. Man kan ikke vite noe om et systems tilstand før måling
2. Det er målingen av systemet som bestemmer utfallet
3. Et system er i kun en tilstand om gangen før måling
4. Superposisjon som at et system er i flere tilstander samtidig
5. Superposisjon som menneskelig uvitenhet
6. Superposisjon som bokstavlig tolkning
7. Superposisjon som sannsynlighet for utfall ved måling
8. Kvantefysikk omhandler verden på partikkel-nivå
9. Kvantefysikk er vanskelig og uforståelig

Det er få elevresponser som viser kun én av disse oppfatningene, og som sitater nedenfor vil vise, kan ulike oppfatninger avdekkes fra samme setning. Det gir derfor ikke mening å tallfeste andeler av hver oppfatning. I tillegg blir det umulig å vise til eksempler for hver oppfatning i kronologisk rekkefølge etter listen ovenfor. Jeg tar utgangspunkt i de fire øverste påstandene, og forklarer disse oppfatningene ved å vise til elevsitater. Det er disse fire første oppfatningene som er mest utbredt. Andre oppfatninger av superposisjonsprinsippet vil bli eksemplifisert via disse elevsitatene. Numrene i listen ovenfor settes i klammeparenteser i elevsitatene for å tydeliggjøre hvilken oppfatning jeg mener det gjeldende elevsitatet viser. De to siste oppfatningene, oppfatning 8 og 9, skiller seg fra de andre ved at de er oppfatninger om kvantefysikken som helhet.

For Schrödingers katt betyr oppfatningen av at *man ikke kan vite noe om et systems tilstand før måling* (oppfatning nr. 1) at man ikke kan vite om katten er død eller levende før man åpner boksen. Dette kommer fram i følgende elevbesvarelser.

- ”vi kan ikke vite om katten er død eller ikke med mindre man åpner boksen. [1]”
- ”(...) Ser vi på Schrödingers katt så vet vi ikke om katten er levende eller død før vi åpner boksen [1]. Da er katten i en slags superposisjon [5], og forsøket viser godt hvordan vi må se på kvantefysikk.”

I begge disse sitatene kommer det frem at man ikke kan vite noe om kattens tilstand før observasjon, som vil si å åpne boksen. Slik jeg tolker den andre elevbesvarelsen, er katten i superposisjon fordi man ikke vet kattens tilstand før observasjon. På denne



måten kan kattens superposisjon forstås som et resultat av menneskelig uvitenhet, altså at de faktiske forhold er skjult for oss. Samme oppfatning av superposisjon illustreres i neste elevbesvarelse:

”Jeg vil si meg enig med det Schrödinger sa, at vi ikke vet om katten er død før vi ser etter [1], og at katten da vil være i en superposisjon [5]. Noe vi ikke er sikre på er om katten er i et stadie mellom liv og død, og at dette også gjelder i kvantefysikken, at f.eks fotonet er i et stadie mellom bølger og partikler. Det dette får meg til å tenke om kvantefysikk, er at om vi ikke får sjekket/gjort målinger av det vi er ute etter, kan vi aldri være sikre på hva som egentlig skjer [1].”

Avslutningsvis generaliserer denne eleven Schrödingers katt ved å si at i kvantefysikk kan man ikke vite hva som skjer med mindre man gjør målinger. En slik tolkning av kvantefysikk er triviell, men forenelig med København-tolkningen, hvor man ikke kan ha noen kunnskap om et system utover det som blir observert, jfr. kap. 2.3.

*Oppfatning nr. 2* går ut på at målingen av et systems tilstand bestemmer tilstanden. En slik oppfatning kan illustreres ved følgende utdrag fra gruppeintervju nr. 4:

Meg: ”Hvis et system da er i en superposisjon, hva er det som på en måte som skjer når vi da åpner boksen?”

Lars: ”Ender opp i én posisjon, det var sånn i double slit-eksperimentet også.. der var det masse superposisjoner, men så fort en observerte det så endte den opp i bare en posisjon og da endra forsøket.. eller resultatene fra forsøket seg [2]”

På spørsmålet om hva som skjer med et system i superposisjon ved observasjon (måling) svarer eleven at fra å være i superposisjon, vil systemet ved observasjon være i én posisjon. Fra tidligere diskusjon i intervjuet kom det fram at Lars med ”posisjon” mener ”tilstand”. Jeg tolker elevens svar som at det er målingen som påvirker systemet til å ”bestemme seg” for én tilstand. Eleven i neste sitat beskriver en slik oppførsel som at ”superposisjonen kollapse”:

”Et kvantesystem i superposisjon kan kollapse om det blir foretatt en observasjon av systemet. Da forsvinner de mulige utfallene og vi sitter igjen med ett. Åpner vi boksen ser vi enten en levende eller en død katt - vi observerer katten, og dermed vil bare ett av utfallene inntreffe. [2] ”

Eleven beskriver at før måling finnes det flere mulige utfall, men målingen gjør at bare ”ett av utfallene inntreffe(r)”. For katten betyr dette at man observerer en katt

som enten er død eller levende.

Følgende elevsitat er ett eksempel på en besvarelse som viser oppfatning av at målingen bestemmer systemets tilstand og at man ikke kan vite tilstanden til systemet før målingen (oppfatning nr. 1):

”Dersom vi prøver å sjekke om katten er død vil resultatet endre seg [2] og vi vil ikke kunne sjekke den egentlige tilstanden [1].”

Ifølge eleven endrer resultatet seg av selve målingen. Jeg tolker ”den egentlige tilstanden” som tilstanden til systemet før målingen. Fra dette følger det at dersom man observerer en død katt, vet man ikke tidspunktet for kattens dødsfall.

Felles for de tre forrige elevsitatene er altså påstander om at det er målingen av et systems tilstand som bestemmer måleresultatet. Disse er kvalitative forklaringer som er i tråd med kvantemekanikkens *måle-teoretisk postulat* (se kap. 2.2), hvor det inngår at en måling av et system i superposisjon endrer tilstanden.

*Oppfatning nr. 3* omfatter elevbesvarelser som uttrykker at katten i virkeligheten bare kan være i én tilstand av gangen. Et eksempel er dette sitatet fra en diskusjon om superposisjon i gruppeintervju nr. 2:

”Det er et veldig bra bilde på det [superposisjon], men samtidig så er det liksom.. Hvis du ser helt konkret på det eksemplet med Schrödingers katt så er det sånn.. katten er jo enten død eller levende selv om du ikke vet det [5]... Den kan jo faktisk ikke være begge deler [3].”

Eleven sier her at katten ikke kan være *både* død *og* levende. En slik oppfatning innebærer at kattens tilstand til enhver tid *i virkeligheten* er veldefinert. Sitatet viser også, som forklart tidligere, hvordan elever kan oppfatte superposisjon som resultat av menneskelig uvitenhet. Følgende elevsitat fra skriftlig oppgave viser samme kombinasjon av oppfatninger om virkeligheten og superposisjon:

”Dett er et paradox, i og med at katten i seg selv ikke er i mer enn 1 fase [tilstand] [3], men ettersom vi ikke vet er det vår uvitenhet som skaper dette eksperimentet [5]. Kvantefysikk er derfor kanskje kun en form for fysikk pga. vår uvitenhet og er kanskje derfor ikke noe som burde brukes som relevant fysikk [9].”

Dette sitatet illustrerer hvordan oppfatning av superposisjon som resultat av menneskelig uvitenhet kan føre til en feilaktig beskrivelse av kvantefysikk. Jeg tolker elevens argumentasjon med at siden ”vår uvitenhet” danner tankeeksperimentet, og

dermed denne tolkningen av superposisjon, så kan kvantefysikken tenkes på som et uttrykk for menneskelig uvitenhet. På grunn av dette betegner eleven kvantefysikk som ”irrelevant”, og på den måten viser eleven hvordan kvantefysikk kan være vanskelig å forstå (opfatning nr. 9).

I tillegg til oppfatning nr. 3 om virkeligheten inni boksen, viser følgende elevbesvarelse en annen oppfatning om systemets superposisjon:

”Schrödingers katt sier egentlig at noe kan ha en sannsynlighet for begge tilstander helt til man sjekker [7]. Joda, men katten er i ”virkelighet” enten død eller levende, ikke begge deler [3].”

Med denne ytringen tolker jeg at tilstandene som inngår i superposisjon er like sannsynlige ved måling. Dette er ett eksempel på at superposisjon kan oppfattes som sannsynlighet for utfall ved måling (opfatning nr. 7). En annen oppfatning av superposisjon illustreres med dette sitatet fra gruppeintervju nr. 1:

”Tanken om Schrödingers katt er interessant på den måten at den strider imot vår virkelighetsopfatning. Jeg synes det virker umulig at et legeme kan være flere steder samtidig [3 og 6], og det er kanskje det som gjør det så vanskelig å forstå kvantefysikken [9].”

Fra den understrekede setningen tolker jeg at et legeme bare kan være i én tilstand om gangen. Med elevens ordvalg, ”steder”, tolker jeg dessuten at eleven oppfatter superposisjon på en bokstavelig måte, altså at superposisjon betyr at noe kan være på flere forskjellige posisjoner samtidig. Det er dette jeg legger i *opfatning nr. 6*. Eleven påpeker videre at kvantefysikken er vanskelig å forstå (opfatning nr. 9).

De fire forrige elevsitatene er eksempler på oppfatning om at et system ”i virkeligheten” er i kun én tilstand om gangen. En slik oppfatning er forenelig med skjulte variabler-tolkningen, hvor det sies at dersom man kan finne eller ha kunnskap om de skjulte variablene, vil man kunne vise at systemets tilstand er veldefinert til enhver tid, jfr. kap. 2.3. Dersom så er tilfelle, vil man oppnå en teori som ikke bryter determinisme-prinsippet og prinsippet om lokal virkelighet.

I motsetning til oppfatning nr. 3, beskriver elevbesvarelser med *opfatning nr. 4* katten som både død og levende på samme tid før en måling av systemet. Dette kan ses på som en tolkning av superposisjon så vel som en tolkning av virkeligheten inni boksen. Tilsvarende oppfatning finnes i fler elevbesvarelser, som for eksempel denne:

”Schrödingers katt er et eksempel som forklarer en kvantefysisk teori som går på at en gjenstand kan befinne seg på to forskjellige steder samtidig,

eller samme sted [6], men i forskjellige tilstander [4].”

Denne elevbesvarelsen eksemplifiserer oppfatning av superposisjon som bokstavelig tolkning, men her vises det ingen skepsis til hvorvidt dette er reelt, sammenliknet med forrige eksempel med oppfatning nr. 6. Det legges dessuten til at en gjenstand kan være i ”flere forskjellige tilstander” samtidig. Følgende elevsitat beskriver hvilken konsekvens en slik oppfatning vil ha for katten:

”Schrødingers katt er et spennende eksperiment, men det er ikke så lett å forstå og det er ikke kvantefysikk heller. Katten kan både være død og levende, og sånn er det også i kvantefysikken [9]; ting kan være i to tilstander samtidig. [4]”

Bortsett fra ytringen om at kvantefysikk ikke er lett å forstå (oppfatning nr. 9), uttrykkes det her at katten er *både* levende *og* død samtidig før en måling. Basert på dette generaliserer eleven ved å si at i kvantefysikk kan gjenstander være i to tilstander samtidig. En tilsvarende generalisering opptrer også i følgende sitat:

”Poenget med superposisjon er at en partikkel [8] kan være i to tilstander samtidig, og ikke enten eller, som det ville vært med ting fra hverdagslivet. Men det er kanskje det som er poenget med forsøket [4].”

I tillegg til generaliseringen påpeker eleven at det er en *partikkel* som kan være i superposisjon. Dette tyder på at eleven har oppfatningen om at kvantefysikken tar for seg verden på partikkel-nivå (oppfatning nr. 8). I tre av av fire gruppeintervjuer forklarte elever på en god måte hva kvantefysikk dreier seg om, her eksemplifisert med et utdrag fra gruppeintervju nr. 4:

Meg: ”(...) Først, hva er det dere forbinder med ordet kvantefysikk? Hva er det kvantefysikken dreier seg om? Kan vi ta en runde på det?”

(...)

Rita: ”Det jeg føler de modulene har vist oss bare alt vi tidligere har trodd om fysikk er feil liksom. Ting er ikke som man tror det er”

Arne: ”Kvantefysikken må vi bruke for å ta for oss de mindre partiklene [8] i universet sånn jeg har forstått det da fordi Newton har rett, men har feil når det går på mindre nivåer enn det vi kan observere sånn han har rett på baller og epler og sånne ting men går du ned på partikkelnivå så stemmer ikke Newtons beregninger (...)”

I dette utdraget erkjenner elevene at kvantefysikk er forskjellig fra klassisk fysikk. Rita påpeker at det man ”tidligere har trodd om fysikk er feil”. En slik uttalelse

kan tyde på at hun har forstått at kvantefysikken bryter prinsipielt med klassisk fysikk. Arne overtar ordet og forklarer på en god måte at kvantefysikken tar for seg verden på partikkel-nivå, og forklarer hvorfor behovet for en ny fysikk meldte seg da man så at klassisk fysikk ikke strakk til med å forklare fenomener i mikroverden. Det at elever fra tre av gruppeintervjuene gir slike gode forklaringer kan tyde på at undervisningsmodulene lykkes med å forklare hva kvantefysikk er og hvordan kvantefysikken relaterer seg til klassisk fysikk.



## 7 Diskusjon og konklusjon

I det følgende diskuteres resultatene i lys av teori med utgangspunkt i oppgavens problemstilling og forskningsspørsmål og med henblikk på gi anbefalinger for både undervisning i kvantefysikk generelt og utvikling av ReleKvant-modulene spesielt. Diskusjonen vil dermed uttrykke resultatets overføringsverdi. Forslag om endringer i ReleKvant-modulene blir indirekte forslag til videre forskning, siden ReleKvant-prosjektet kommer til å fortsette i minst to år til. Videre introduserer jeg en ny vinkling for læreplanens kompetansemål i kvantefysikk, og foreslår videre forskning relatert til dette.

### 7.1 Diskusjon

Resultatene i denne oppgaven har avdekket at *kvantisering* er et utfordrende begrep for elevene. Majoriteten av elevene i første og andre utprøvningsrunde forsto kvantisering som kvantifisering. Elever som viste andre forståelser av kvantisering brukte også ordet *kvantifisering*. I tredje utprøving ble oppgaven om kvantisering endret, og elevene viste en mer hensiktsmessig forståelse av dette prinsippet og hvordan det bryter med kontinuitetsprinsippet. Det at ingen elever i tredje utprøvningsrunde viste forståelse av kvantisering som kvantifisering tyder på at det var oppgaven fra de tidligere versjonene av modulen som bidro til denne misforståelsen. Å forsøke å knytte begreper fra kvantefysikk til elevenes hverdags erfaringer kan altså bidra til en uhensiktsmessig forståelse. Dette er i overensstemmelse med resultater fra tidligere forskning som tilsier at klassiske analogier kan føre til en blandet begrepsforståelse som stammer fra både det klassisk og kvantefysiske domenet (Fischler & Lichtfeldt, 1992; Olsen, 2002; Renstrøm, 2011). Selv om bildet av fjellene i figur 17 er en henvisning til elevenes hverdags erfaringer, tyder resultatene på at bildet kan være til hjelp for å forstå forskjellen på kvantisering og kontinuitet. Fra dette tolker jeg at advarslene fra forskningslitteraturen bør tas på alvor i undervisning av kvantefysikk, og analogier og klassiske bilder bør velges med omhu, selv om det finnes enkelte velfungerende bilder til støtte for elevenes forståelse.

Elevenes forklaringer av begrepet kvantisering og dets brudd med kontinuitetsprinsippet var mer sofistikerte ved tredje utprøving. Selv om ingen elever i tredje utprøving viste misforståelsen av kvantisering som kvantifisering, var det likevel mange elever som brukte ordet kvantifisering for begrepet kvantisering. Dette kan komme av at elevene assosierer ordet kvantisering med ordet kvantifisering, siden dette er et ord de antakelig kjenner fra før. Dette er et viktig funn som ikke ikke

inngår i resultater fra tidligere forskning. Det var heller ingenting som på forhånd skulle forutsi denne feilaktige ordbruken. Funnet av elevers feilaktige ordbruk kan ha en overføringsverdi til læringskontekster uavhengig av ReleKvants undervisningsmateriell. Funnet kan også være relevant for andre språk enn norsk der ordene for kvantisering og kvantifisering likner hverandre. Det er derfor viktig for både lærere og lærebokforfattere å være klar over at mange elever gjør denne assosiasjonen, slik at de tidlig kan rette opp elevenes feilaktige ordbruk. Dette fordi denne ordbruken kan være en mulig kilde for misforståelse av kvantiseringsbegrepet, og som Olsen (2002) påpeker, kan misforståelser i kvantefysikk overleve selv introduksjonsemner ved høyere utdanning.

Resultatene avdekket at elever viser to ulike forståelser for hvordan determinismeprinsippet brytes i kvantefysikk. Disse forståelsene gikk ut på at i kvantefysikk *kan ingenting forutsies* og *sannsynligheten for at hendelser skal skje kan beregnes*. Disse forståelsene er ikke direkte feil, men de er heller ikke fullt ut hensiktsmessige. Forståelse av at ingenting kan forutsies er riktig kun når det er snakk om enkelthendelser, mens forståelse av at sannsynlighet for at en hendelse inntreffer er ikke helt forenelig med hvordan det egentlig er i kvantefysikken, jfr. kap. 2. Det ble også påpekt at elevers forståelse av sannsynlighet fra skolematematikken kan gi opphav til en forståelse av at sannsynligheten for at en enkelthendelser skal inntreffe kan beregnes i kvantefysikken. Ved å betegne determinisme-prinsippet som ”determinisme for enkelthendelser”, slik som i kapittel 2.3, kan elevene trolig oppnå en bedre og mer hensiktsmessig forståelse. Med denne betegnelsen understrekes det at i klassisk fysikk kan enkelthendelser forutsies, mens i kvantefysikk har man en ”statistisk determinisme”. Det tydeliggjør altså at i kvantefysikk kan en statistisk fordeling forutsies, selv om man ikke kan beregne enkelthendelser eksakt. Dersom lærere i undervisning og lærebokforfattere i lærebøkene ønsker å poengtere kvantefysikkens prinsipielle brudd med klassisk fysikk eksplisitt, anbefaler jeg å klargjøre for elevene distinksjonen mellom ”determinisme for enkelthendelser” og ”statistisk determinisme”.

Videre tyder resultatene på at elevene må ha en hensiktsmessig forståelse av selve prinsippene fra klassisk fysikk for å kunne forstå hvordan prinsippene brytes i kvantefysikken, slik som antatt innledningsvis i denne oppgaven. Som nevnt ovenfor, tyder resultatene på at elever fra tredje utprøving har en hensiktsmessig forståelse av hvordan kvantisering bryter med kontinuitetsprinsippet, men viser en mindre hensiktsmessig forståelse av hvordan determinisme-prinsippet brytes i kvantefysikken. En grunn til dette kan være at elevene i arbeid med undervisningsmaterialet ikke oppfordres til å bruke sitt eget språk i møte med determinisme-prinsippet. Som det



inngår i kapittel 4.2, er bruk av språket i vekselvirkning med andre i møte med nye begreper viktig, i tråd med sosiokulturelt syn på læring. Vi har også sett at selv om elevene viser vanskelighet med å forstå hvordan prinsippene brytes i kvantefysikken, er disse begrepene til hjelp for elevene når de skal gjøre rede for fenomener som inngår i læreplanens kompetansemål.

Som nevnt i kapittel 5, ble det observert at lærerne lot elevene jobbe selvstendig med modulene, og tok i liten grad opp plenumsdiskusjoner. En grunn til dette kan være at modulene ikke legger opp til naturlige ”stoppe-steder” der slike diskusjoner kan inngå. Et argument for å la elevene jobbe mest mulig selvstendig kan være at elevene arbeider i forskjellige tempo, som gjør det uhensiktsmessig å stoppe opp og diskutere i plenum underveis fordi det avbryter elevene i arbeidet. Som nevnt i kapittel 3, byr kvantefysikkens begreper på store utfordringer for elever (Ayene *et al.*, 2011). Resultatene avdekket at også kvantefysikkens prinsipielle brudd med klassisk fysikk er utfordrende for elevene. Dette taler for at diskusjon mellom elev-par ikke er tilstrekkelig for oppnåelse av hensiktsmessig kvalitativ forståelse i kvantefysikk. Ved å i større grad benytte klasseromsdiskusjon kan læreren hjelpe elevene med å forstå utfordrende begreper. Dette er i tråd med teori om *nærmeste utviklingszone*, jfr. kapittel 3, som understreker at lærerens rolle er en viktig faktor for elevenes læringspotensial. Lærere kan dessuten ta i bruk lydfilene fra elevdiskusjonene ved å ta opp utfordringer og misforståelser som elevene viser i disse. En slik ”ikke-interaktiv/dialogisk” kommunikasjonsform kan ifølge Angell *et al.* (2011) være en konstruktiv måte å samle tråder og vise likheter og forskjeller ved elevenes forståelser. Variasjon av kommunikasjonsformer og språklige samhandlinger kan bidra til at elevene gjør fagstoff og språk til sitt eget.

I resultat-kapittelet så vi at tankeeksperimentet om Schrödingers katt og de åpne spørsmålene tilknyttet dette bidro til ulike tolkninger av eksperimentet og utsagn om kvantefysikken generelt. Vi så også variasjoner i innholdet av elevenes diskusjoner. Enkelte oppfatninger som kommer fram i kapittel 6.6 kan knyttes opp mot og sammenliknes med København-tolkningen (oppfatning 1) og skjulte variabler-tolkningen (oppfatning 3). Det at elevene selv ikke trekker inn kvantefysikkens tolkninger gjør at deres oppfatninger kan anses som trivielle. Elevene viser også uhensiktsmessige generaliseringer og beskrivelser av begrepet superposisjon (oppfatning 5 og 6). Åpne spørsmålsformuleringer i forbindelse med Schrödingers katt ser dermed ut til å gi opphav til misoppfatninger, men kan også bidra til triviell refleksjon over erkjennelsesmessige sider ved kvantefysikken. Slik jeg ser det, har tankeeksperimentet et potensiale til å illustrere epistemologiske konsekvenser av de ulike tolkningene av kvantefysikken, jfr. kapittel 2.3. Dette potensialet utnyttet ikke av den type spørs-

mål som ReleKvants undervisningsmoduler tar opp. En bedre forståelse av kvantefysikkens filosofiske grunnlag kan dermed oppnås ved å knytte tankeeksperimentet opp mot ulike tolkninger av den. En slik vinkling kan tilføre elevenes diskusjoner mer faglig innhold, og kan føre til at diskusjonene oppleves som mer relevant og meningsfylt for elevene.

I denne oppgavens innledning delte jeg mitt minne av undervisningen i kvantefysikk på videregående som vanskelig, og at jeg ikke forsto kvantefysikkens hensikt. En slik oppfatning er beslektet med elevenes oppfatninger av kvantefysikken som vanskelig og uforståelig (oppfatning 9). En mulig grunn til slike oppfatninger kan være at sider av kvantefysikken som ”funker”, ikke kommer godt nok frem i undervisningen. Ved kvalitativ behandling av kvantefysikk kommer det kanskje ikke godt nok fram at kvantefysikk er en matematisk modell. Elevene kan dermed få inntrykk av at kvantefysikk ikke er ”vanlig fysikk” hvor man kan oppnå sikker kunnskap. Et forslag kan være å introdusere noen av postulatene i kvantemekanikken fra kapittel 2.2 for å få fram det matematiske aspektet, og vise at det faktisk er ”regneregler” i kvantefysikk også, selv om eleven ikke skal bruke de matematiske sammenhengene til å gjøre beregninger. Da kan man også vise til konkrete områder som gjør at kvantefysikken ”funker”, selv om man har ulike tolkninger av den.

## 7.2 Behov for endring av læreplanen?

Som beskrevet i kapittel 3, angir kompetansemålene om kvantefysikk ulike fenomener og begreper som elevene skal gjøre rede for, men de skal også forklare hvordan disse bryter med klassisk fysikk og gjøre rede for erkjennelsesmessige konsekvenser av dem. Det er hvordan disse begrepene bryter med klassisk fysikk og erkjennelsesmessige konsekvenser av dem som bidrar til elevenes generelle kunnskap om kvantefysikk som teori. Kompetansemålene har dermed en induktiv vinkling ved at elevene skal lære noe generelt om kvantefysikken ved å lære om enkelte begreper og fenomener. Tidligere forskning har vist at elevene sliter med å forstå begrepene og fenomenene, og resultater i denne oppgaven tyder på at det ikke er så enkelt for elevene å forstå hvordan prinsipper bryter med klassisk fysikk. En kan derfor sette spørsmålstegn om hvorvidt dagens formulering av kompetansemålene i kvantefysikk er formålstjenlig med tanke på fysikk-fagets hensikt og beskrivelsen av hovedområdet ”Moderne fysikk”.

Etter å ha sett at kompetansemålenes induktive vinkling byr på store utfordringer for både elever og lærere, er det naturlig å utforske om en deduktiv vinkling kan

møte utfordringene på en bedre måte. Med deduktiv vinkling mener jeg at gjennom generell forståelse av kvantefysikken kan oppnå forståelse av enkelte begreper og fenomener. En deduktiv vinkling kan i større grad rette fokus mot kvalitative sider ved kvantefysikken som fysisk teori. Bildet som skapes av kvantefysikken i skolefysikken kan dermed bli mer i overensstemmelse med det elever vil møte i introduksjonsemner i høyere utdanning. Kompetanse er i LK06 definert ved å kunne bruke kunnskap i ulike sammenhenger. Den kompetansen som elevene kan oppnå med deduktivt vinklede kompetansemål kan dermed bli mer relevant for elever som velger videre studier i fysikk. Kompetansen kan også være mer relevant for elever som ikke velger fysikkrelaterte studieretninger, ved at de kan få et riktigere bilde av kvantefysikkens innhold. Med induktiv vinkling tror jeg det er vanskeligere å overføre sin kunnskap til nye kontekster, for eksempel i introduksjonsemner i kvantemekanikk i høyere utdanning eller i møte med populærvitenskapelige medier, enn ved en deduktiv vinkling.

Hovedområdet ”moderne fysikk” inneholder kvanteeffekter som er ”overraskende” og som bryter med ”vanlige forestillinger” (se kap. 3). Dette tolker jeg som at elevene skal innse hvordan resultater fra kvantefysikken bryter med klassisk fysikk. Den induktive vinklingen i dagens kompetansemål indikerer at eleven først skal bli overrasket ved å forstå enkelte fenomener, for så å forstå hvorfor fenomenene er overraskende. Det at elever har vanskelighet med å forstå begreper og fenomener i kvantefysikk, får meg til å mistenke at elevene ikke blir overrasket. Slik jeg ser det, kan et fokus på de fundamentale prinsippene som klassisk fysikk bygger på, danne en bevissthet om de ”vanlige forestillingene” i klassisk fysikk. Denne bevisstheten kan gjøre elevene bedre i stand til å bli overrasket i møte med fenomener fra kvantefysikken som bryter med de fundamentale prinsippene. Dette taler for en deduktiv vinklet formulering av kompetansemålene.

I tillegg til å stimulere til nysgjerrighet og være ”overraskende”, skal skolefysikken være studieforberedende. Da er det mer hensiktsmessig at elevene har et realistisk bilde av kvantefysikkens innhold. Dette bildet bør være overens med introduksjonsemner i høyere utdanning. Undervisningen i kvantefysikk bør derfor være konkret, og uklare påstander som ”kvantefysikk er vanskelig” og ”kvantefysikk er uforståelig og merkelig” bør unngås. Dette fordi slike påstander trolig kan virke demotiverende for elevene, som kan virke destruktivt for elevenes opplevelse av å bli overrasket. For hvorfor skal en lære om noe som ikke kan forstås? Det kan også legitimere at det er greit å ikke sette seg inn i problemstillinger, og kan bidra med å skape et bilde av at kvantefysikken ikke er ”relevant fysikk”, slik som det påpekes i det ene elevsitatet i kapittel 6.6. En introduksjon av kvantefysikkens postulater kan bidra med å gi

elever et mer realistisk bilde av kvantefysikk. Dette taler for at elevene bør oppnå en mer generell forståelse av kvantefysikken framfor kunnskap om enkeltstående fenomener. Med en deduktiv vinkling kan det gis rom for en mer generell behandling av kvantefysikken.

Med en deduktiv vinkling kan kompetansemålene eksempelvis formuleres som:

Mål for opplæringen er at eleven skal kunne

- kvalitativt gjøre rede for hvordan kvantefysikk bryter med prinsipper fra klassisk fysikk ved å vise til fenomener som fotoelektrisk effekt, comptonspredning og partiklers bølgenatur, hvor disse prinsippene brytes
- gjøre rede for tolkningers rolle i kvantefysikken og diskutere erkjennelsesmessige konsekvenser knyttet til sammenfiltrede fotoner og Heisenbergs uskarphetsrelasjoner.

Undervisning kan med en slik vinkling starte med fundamentale prinsipper fra klassisk fysikk, eksempelvis prinsippene om kontinuitet, determinisme og lokal virkelighet, for så å vise til hvordan disse brytes i kvantefysikk ved henholdsvis kvantisering, statistisk determinisme og ikke-lokal virkelighet, som vil si at naturen er uskarp. Videre kan disse eksemplifiseres ved fotoelektrisk effekt, compton-spredning, bølgenatur, Heisenbergs uskarphetsrelasjoner og sammenfiltring. Med kunnskap om ulike tolkninger i kvantefysikk og deres rolle, kan man så diskutere epistemologiske sider ved dem. Videre forskning kan undersøke hvorvidt en deduktiv vinkling i formuleringen av kompetansemålene kan bidra til økt læringsutbytte og til å skape et mer realistisk bilde av kvantefysikkens innhold.

### 7.3 Anbefalinger for utvikling av undervisningsmodulene

På bakgrunn av ovenstående diskusjon, ønsker jeg her å fremme anbefalinger for utvikling av ReleKvants undervisningsmaterieil. Anbefalingene har til hensikt å forbedre modulene og utnytte dets potensial til å fremme elevens forståelse av kvantefysikken og dens filosofiske grunnlag. Noen av disse punktene kan også relatere seg til undervisning i kvantefysikk uavhengig av modulene.

- Ta opp distinksjonen mellom *kvantisering* og *kvantifisering*, eventuelt gjøre lærere oppmerksomme på elevens feilaktige bruk av ordet kvantifisering.
- Betegne *determinisme* med *determinisme for enkelthendelser*, og at dette prinsippet brytes i kvantefysikk ved at man har en *statistisk determinisme*.

- Droppe beregningsoppgaven på oppslaget i figur 19, og slå sammen resterende av figur 19, altså definisjonen av *determinisme*, med viten-oppslaget ”Determinisme og bevegelseslikninger”, (se figur 21)
- Lage en oppgave relatert til videoen i figur 20, som reiser spørsmålet ”stoler du på den klassiske fysikken?”, og determinisme-prinsippet og hvordan det brytes i kvantefysikken. Dette fordi læringsutbyttet ved bruk av visualiseringer øker ved å stille konkrete spørsmål tilknyttet det som visualiseres, slik som anbefalt i Angell *et al.* (2011).
- Legge inn ”diskuter i plenum” i enkelte diskusjonsoppgaver, eksempelvis for diskusjonsoppgaven i figur 18 om kvantisering.
- I en lærerveiledning kan lærere tipses om lydopptak av elevers diskusjoner som pedagogisk hjelpemiddel, fordi disse opptakene kan inneholde verdifull informasjon om elevenes progresjon. Lærerne kan også tidlig oppdage misforståelser og begreper som elever sliter med. Lærere kan dessuten ta i bruk lydfilene fra elevdiskusjonene ved å ta opp utfordringer og misforståelser som elevene viser i disse.
- Utvide modulen ”Kvantefysikk og filosofi” ved å: 1) gjøre rede for tolkningsrolle i kvantefysikk, 2) inkludere debatten mellom Einstein og Bohr og knytte denne opp mot henholdsvis skjulte variabler-tolkningen og København-tolkningen og 3) knytte tankeeksperimentet Schrödingers katt opp mot de ulike tolkningene av kvantefysikken. En utfordrende oppgave tilknyttet tankeeksperimentet kan være ”Hvordan tror du Einstein og Bohr ville tolket Schrödingers katt?”
- Tydeligere poengtere at kvantefysikk er en matematisk modell av verden på partikkel-nivå som fungerer, for eksempel ved å forklare Ehrenfests teorem kvalitativt.
- Unngå formuleringer som ”kvantefysikk er vanskelig/uforståelig/merkelig” og heller fokusere på at ”kvantefysikken predikerer fenomener og oppførsler som ikke kan beskrives av klassisk fysikk”.
- Gi et bilde av kvantefysikk som er mer i tråd med kvantefysikkens innhold, for eksempel ved å forklare noen av postulatene kvalitativt. Slik kan aspektet med kvantefysikken som en matematisk modell komme tydeligere frem.

## 7.4 Konklusjon

Problemstillingen for denne oppgaven var ”Hvordan kan undervisningsmaterieell utviklet i ReleKvant-prosjektet bidra til fysikkelevers forståelse av kvantefysikken og dens filosofiske grunnlag?”. Resultatene har vist at undervisningsmodulenes fokus på kvantefysikkens prinsipielle brudd med klassisk fysikk er nyttig for elevers forståelse av kvantefysikken. Dette og annet er viktig for lærere å kjenne til selv om de ikke bruker ReleKvants undervisningsmaterieell. Modulene ser ut til å bidra positivt med å fremme forståelse av hvordan kvantefysikken bryter med kontinuitetsprinsippet til tross for at mange elever forveksler ordet *kvantisering* med *kvantifisering*. Modulene lykkes også å fremme hensiktsmessig forståelse av determinisme-prinsippet, men kommer til kort med å bidra til hensiktsmessig forståelse av hvordan dette prinsippet brytes i kvantefysikk. I arbeidet med undervisningsmateriellet stimuleres elevene til å reflektere rundt trivielle erkjennelsesmessige sider ved kvantefysikken. Det har blitt foreslått hvordan modulene kan utvikles for å i større grad bidra til elevers forståelse av kvantefysikkens prinsipielle brudd med klassisk fysikk og gjøre elevenes erkjennelsesmessige diskusjoner mer faglig relevant. ReleKvants undervisningsmoduler har altså et godt potensiale for å bidra positivt til elevers forståelse av kvantefysikken og dens filosofiske grunnlag. Gjennom anbefalinger for undervisning i kvantefysikk, håper jeg å ha bidratt til fremtidige elevers nysgjerrighet og interesse for kvantefysikk. Kanskje vil elever i fremtiden komme med utsagn som ”Ja, ikke sant? Det er super-fascinerende!”

## Litteraturliste

Lenker til ReleKvant-modulene:

- [www.viten.no/relekvant](http://www.viten.no/relekvant)
- [www.viten.no/relekvant2](http://www.viten.no/relekvant2)
- [www.viten.no/relekvant3](http://www.viten.no/relekvant3)

Aalmen, F. (2010). *Bruk av drama for undervisning av naturvitenskapens egenart* (Mastergradavhandling, NTNU). Trondheim: NTNU Trykk.

Angell, C., Bungum, B., Henriksen, E. K., Kolstø, S. D., Persson, J. & Renstrøm, R. (2011). *Fysikkdidaktikk*. Kristiansand: Høyskoleforlaget.

Angell, C., Guttersrud, Ø., Henriksen, E. K., & Isnes, A. (2004). Physics: Frightful, but fun. Pupils' and teachers' view of physics and physics teaching. *Science Education*, 88, s. 683-706.

Angell, C., Henriksen, E. K., & Isnes, A. (2003). Hvorfor lære fysikk? Det kan andre ta seg av! Fysikkfaget i norsk utdanning: Innhold - oppfatninger - valg. I D. Jorde & B. Bungum (red.), *Naturfagdidaktikk. Perspektiver Forskning Utvikling*. (s. 165-198). Oslo: Gyldendal Akademisk.

Angell, C., Lie, S. & Rohatgi, A. (2011). TIMSS Advanced 2008: Fall i fysikk-kompetanse i Norge og Sverige. *NorDiNa*, 7, (1), s. 17-31.

Ayene, M., Kriek, J. & Damtie, B. (2011). Wave-particle duality and uncertainty principle: Phenomenographic categories of description of tertiary physics students' depictions. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 7, 020113.

Bungum, B., Henriksen, E. K., Angell, C., Tellefsen, C. W. & Bøe, M. V. (2015). ReleQuant - Improving teaching and learning in quantum physics through educational design research. *NorDiNa*, 11, (2), s. 153-168.

Bøe, M. V. & Henriksen, E. K. (2013). Love it or leave it. Norwegian students' motivations and expectations for post-compulsory physics. *Science Education*, 97, (4), s. 550-573.

Çaliskan, S., Selçuk, G. S. & Erol, M. (2009). Student Understanding of Some Quantum Physical Concepts. *American Journal of Physics Education*, 3, (2), s. 202-206.

- Cheong, Y. W. & Song, J. (2013): Different levels of meaning of wave-particle duality in a suspensive perspective on the interpretation of quantum theory. *Science Education*, 23, (5), 1011-1030.
- Compton, A. H. (1923). *A Quantum Theory on the Scattering of X-rays by Light Elements*. Hentet 10.03.2015, fra <https://www.aip.org/history/gap/PDF/compton.pdf>
- Dybvig, D. D. & Dybvig, M. (2003). *Det tenkende mennesket* (2. utgave). Trondheim: Tapir akademisk forlag.
- Einstein, A. (1905). *Concerning an Heuristic Point of View Toward the Emission and Transformation of Light*. Hentet 10.03.2015, fra <http://people.isy.liu.se/jalar/kurser/QF/references/Einstein1905b.pdf>
- Fischler, H. & Lichtfeldt, M. (1992). Modern physics and students' conceptions. *International Journal of Science Education*, 14, (2), s. 181-190. DOI: 10.1018/0950069920140206.
- Fjelland, R. (1999). *Innføring i vitenskapsteori*. Oslo: Universitetsforlaget.
- Ghirardi, G. C., Grassi, R. & Michelini, M. (1995). *A Fundamental Concept in Quantum Theory. The Superposition Principle*. New York: Plenum Press.
- Hadzidaki, P. (2008). 'Quantum Mechanics' and 'Scientific Explanation' An Explanatory Strategy Aiming at Providing 'Understanding'. *Science & Education*, 17, s. 49-73. DOI: 10.1007/s11191-006-9052-8.
- Hemmer, P. C. (2005). *Kvantemekanikk*. Trondheim: Tapir Akademisk Forlag.
- Henriksen, E. K., Bungum, B., Angell, C., Tellefsen, C. W., Frågåt, T. & Bøe, M. V. (2014). Relativity, quantum physics and philosophy in the upper secondary curriculum: challenges, opportunities and proposed approaches. *Physics Education*, 49, (6), s. 678-684. DOI: 10.1088/0031-9120/49/6/678
- Johnston, I. D., Crawford, K. & Fletcher, P. R. (1998). Student difficulties in learning quantum mechanics. *International Journal of Science Education*, 20, (4), s. 427-446.
- Juuti, K. & Lavonen, J. (2006). Design-based research in science education: one step towards methodology. *NorDiNa*, 4, s. 54-68.
- Kragh, H. (2012). *Niels Bohr and the Quantum Atom* (1. utgave). Oxford: Oxford University Press.



- O'Brien, J. (1993). Action research through stimulated recall. *Research in Science Education*, 23, s. 214-221.
- Olsen, R. V. (2002). Introducing quantum physics in the upper secondary school: A study in Norway. *International Journal of Science Education*, 24, (6), s. 565-574. DOI: 10.1018/09500690110073982
- ReleKvant (2015). Hentet 13.05.2015, fra <http://www.mn.uio.no/fysikk/forskning/prosjekter/relevant/>
- Renstrøm, R. (2011). *Kvantefysikkens utvikling i fysikklærebøker, vitenskapshistorien og undervisning*. (Doktoravhandling, UiO). Oslo: AiT e-dit AS.
- Singh, C. (2008). Interactive learning tutorials on quantum mechanics. *American Journal of Physics*, 76, s. 400-405.
- Torretti, R. (1999). *The Philosophy of Physics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Utdanningsdirektoratet. *Læreplan i fysikk - programfag i studiespesialiserende utdanningsprogram - kompetansemål*. Hentet 02.04.2015, fra <http://www.udir.no/k106/FYS1-01/Kompetansemaal/?arst=1858830314&kmsn=46633111>
- Utdanningsdirektoratet (2015). *Fagvalet til elevane i videregående opplæring skoleåret 2014/15*. Hentet 18.05.2015, fra <http://www.udir.no/Tilstand/Analyser\og-statistikk/vgo/Fagvalg-i-videregaende-opplaring/Fagvalet-til-elevane-i-vidaregaende-opplaring-skolearet-201415/>
- Wibeck, V. (2000). *Fokusgrupper (2. opplag)*. Sverige: Studentlitteratur.
- Øverbø, I (uten dato). *Tillegg 1*. Hentet 02.02.2015, fra <http://folk.ntnu.no/ioverbo/TFY4215/til1.pdf>



## Vedlegg 1: Utvalgte oppslag fra ReleKvant-moduler

Figurtekstene spesifiserer hvilken utprøvningsrunde de er fra, navn på modulen og nummer i rekkefølgen av oppslag.



### Behov for en ny fysikk


Rundt år 1900 kom fysikerne ordentlig i gang med å studere atomene og mindre partikler som elektronet.

Etter hvert ble det klart at den kjente fysikken ikke klarte å forklare det de observerte i eksperimenter. De trengte en ny og fundamentalt annerledes fysikk, kvantefysikken.

I denne første delen skal du se hvordan kvantefysikken representerer et brudd med klassisk fysikk.



Figur 2: Utprøvningsrunde 2, Behov for en ny fysikk (1/18).



### Brudd med klassisk fysikk

De fleste fysikerne slet med å akseptere kvantefysikken i starten. Den brøt nemlig fullstendig med sentrale prinsipper i den klassiske fysikken.



Figur 3: Utprøvningsrunde 2, Behov for en ny fysikk (7/18)

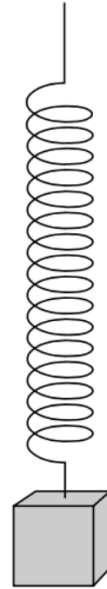


### Kontinuitet

Tenk på en kloss som henger i en fjær som svinger. Den kinetiske energien til klossen kan vi beskrive som:

$$E_k = \frac{1}{2} mv^2$$

Klossen kan ha alle mulige verdier for energi. Vi kaller det at energien er **kontinuerlig**. I kvantefysikken er det ikke slik. Det kjenner du allerede til fra Bohrs atommodell. Her kan atomet bare ha visse energitilstander, ikke alle mulige. Energien til atomet er kvantisert.



**kontinuerlig:** Alle prosesser i naturen foregår kontinuerlig i tid og rom. Energi kan finnes i en vilkårlig minstemengde, og energien til et system endres kontinuerlig på samme måte som f.eks. temperaturen.

Figur 4: Utprøvningsrunde 2, Behov for en ny fysikk (8/18).

## Oppgave om kontinuitet

### Oppgave 2

Det er mye her i verden som er kvantisert. For eksempel antall hårstrå på hodet. Snakk med en annen elev. Prøv å komme på minst fire ting i deres hverdag som er kvantisert.

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



Figur 5: Utprøvningsrunde 2, Behov for en ny fysikk (9/18).



### Determinisme

Du kaster en ball rett opp i lufta med en startfart på 6,0 m/s. Hvor høyt kommer ballen hvis du ser bort fra luftmotstanden?

m

OK



Figur 6: Utprøvingrunde 2, Behov for en ny fysikk (10/18).



### Stoler du på den klassiske fysikken?

Se fysikkelever utfordre sin tillit til den klassiske fysikken.



Figur 7: Utprøvingrunde 2, Behov for en ny fysikk (11/18).



### Oppgave om kontinuitet

Sett rett kategori på de ulike beskrivelsene.

kontinuitet

ikke-kontinuitet

Avstanden mellom to biler på veien

Antall mynter på bunnen av en ønskebrønn

Nullstill

Avgi svar

Figur 8: Utprøvningsrunde 2, Behov for en ny fysikk (14/18).



### Oppsummering

Du har nå sett at kvantefysikk bryter med tre sentrale prinsipper fra klassisk fysikk: Kontinuitet, determinisme for enkelthendelser, og lokal virkelighet. Kvantefysikken ble til gjennom en rekke uenigheter og diskusjoner rundt disse prinsippene. Se hva noen av kvantefysikkens utviklere var uenige om.



Figur 9: Utprøvningsrunde 2, Behov for en ny fysikk (18/18).





## Kvantefysikk og filosofi

Har kvantefysikken noe å si for hvordan vi ser på verden og hva vi kan vite om hvordan den er?



Figur 10: Utprøvningsrunde 2 og 3, Kvantefysikk og filosofi (1/5)



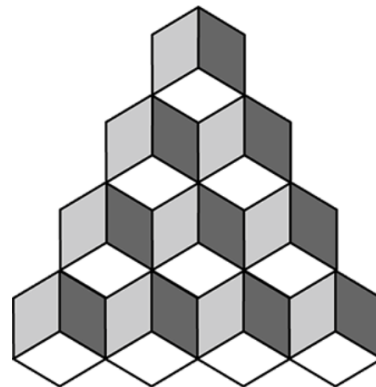
### Kvantetilstander

Hvor mange kuber ser du på bildet?

Hjernen din kan tolke bildet på to forskjellige måter. Enten ser du ti kuber med hvit bunn eller så ser du seks kuber med hvit topp.

Dette er en analogi til såkalte kvantetilstander. Bildet kan vise både ti kuber og seks kuber på en gang. På samme måte kan et kvantesystem være i flere forskjellige kvantetilstander på en gang. Systemet er da i en superposisjon av tilstander.

Se på bildet en gang til. I det øyeblikket du velger hvit topp eller bunn "låser" du bildet og kan telle antall kuber. Superposisjoner i kvanteverden oppfører seg tilsvarende. Når vi måler på kvantesystemet vil det «kollapse» til kun én av sine kvantetilstander.



Snu figuren

Figur 11: Utprøvningsrunde 2 og 3, Kvantefysikk og filosofi (2/5).



### Schrödingers katt

Fysikeren Erwin Schrödinger presenterte i 1935 et kjent tankeeksperiment. Schrödingers katt illustrerer hvor merkelig kvantefysikken kan være når vi kobler den til vår makroskopiske hverdag. Tankeeksperimentet inneholder nemlig en katt som er både død og levende.

Se hvordan TV-serien «Big Bang Theory» illustrerer Schrödingers Katt.



Figur 12: Utprøvningsrunde 2, Kvantefysikk og filosofi (3/5).



### Oppgave om kvantefysikk og filosofi

Tankeeksperimentet om Schrödingers katt utfordrer ideen om at et system kan være i en superposisjon av tilstander (altså med en sannsynlighet for både det ene og det andre) helt til man gjør en måling på det.

Katten vil bli utsatt for en dødelig dose gift i det en radioaktiv kjerne sender ut stråling. Men siden den radioaktive kjernen er et kvantesystem, kan vi ikke vite når stråling blir sendt ut, og kjernen vil være i en superposisjon av «sendt ut stråling» og «ikke sendt utstråling» helt til vi ser etter.

Vil da også katten være i en superposisjon av «død» og «levende»?



Figur 13: Utprøvningsrunde 2, Kvantefysikk og filosofi (4/5)



## Oppgave om kvantefysikk og filosofi

### Oppgave 13

Diskuter med en annen elev.

Hva synes dere om Schrödingers katt? Gjør det noe med hva dere tenker om kvantefysikk? Skriv ned.

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



Figur 14: Utprøvningsrunde 2, Kvantefysikk og filosofi.



## Brudd med klassisk fysikk

De fleste fysikerne slet med å akseptere kvantefysikken i starten. Den brøt nemlig fullstendig med sentrale prinsipper i den klassiske fysikken.

Vi skal ta for oss tre sentrale prinsipper:

- kontinuitet
- determinisme
- lokal virkelighet.



Foto: Britt Celine Oldebråten

Figur 15: Utprøvningsrunde 3, Behov for en ny fysikk (9/21).

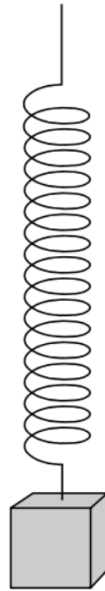


### Kvantisering av energi

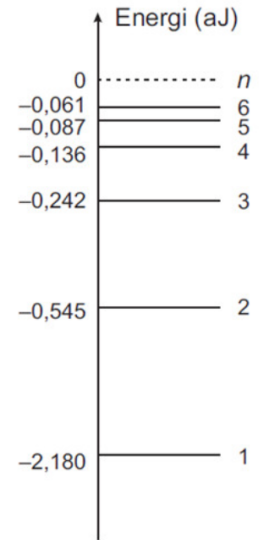
Tenk på en kloss som henger i en fjær som svinger. Den kinetiske energien til klossen kan vi beskrive som:

$$E_k = \frac{1}{2} mv^2$$

Klossen kan ha alle mulige verdier for energi. Vi kaller det at energien er *kontinuerlig*. I kvantefysikken er det ikke slik. Det kjenner du allerede til fra Bohrs atommodell. Her kan atomet bare ha visse energitilstander, ikke alle mulige. Energien til atomet er *kvantisert* og kan bare ha helt bestemte verdier.



Kontinuerlig energi



Kvantisert energi

Figur 16: Utprøvningsrunde 3, Behov for en ny fysikk (10/21).



### Kvantisert og kontinuerlig

Noen sider tidligere brukte vi bildet nedenfor. Kanskje du lurte på hvorfor? Ser du noe på bildet som kan illustrere kvantisering og kontinuitet?

Hint



Figur 17: Utprøvningsrunde 3, Behov for en ny fysikk (11/21).



### Kvantisering: Diskusjonsoppgave



Naturfilosofer fra det gamle Hellas og helt fram til Newtons tid mente at alle prosesser i naturen foregår på en kontinuerlig måte: *natura non saltum facit* - naturen gjør ingen sprang.

Einstein skriver i 1905 i sin artikkel om lyskvantene: "Fenomener som har med utsendelse eller omdannelse av lys å gjøre, kan bedre forstås ved å anta at lysenergien er fordelt diskontinuerlig i rommet. Når en lysstråle utsendes fra et punkt vil energien, i følge den antakelsen som her legges frem, ikke være kontinuerlig fordelt over et stadig større volum, men bestå av et endelig antall lyskvanter som er lokalisert i rommet, og som beveger seg uten å bli delt, og som kun kan absorberes eller sendes ut som hele"

#### Diskusjon 3

Diskuter med en annen elev: Hva betyr kvantisering, og hvordan representerer det et brudd med klassisk fysikk?



Figur 18: Utprøvningsrunde 3, Behov for en ny fysikk (12/21).



### Determinisme

Det at vi kan forutsi hva som kommer til å skje ved gitte startbetingelser, kaller vi determinisme.

Du kaster en ball rett opp i lufta med en startfart på 6,0 m/s. Hvor høyt kommer ballen hvis du ser bort fra luftmotstanden?

 m 

Figur 19: Utprøvningsrunde 3, Behov for en ny fysikk (13/21).





## Stoler du på den klassiske fysikken?

Se fysikkelever utfordre sin tillit til den klassiske fysikken.



Figur 20: Utprøvningsrunde 3, Behov for en ny fysikk (14/21).



## Determinisme og bevegelseslikninger

I klassisk fysikk har vi bevegelseslikninger som beskriver et objekts posisjon som funksjon av tiden,  $x(t)$ . Vi har determinisme siden vi kan forutsi hvor objektet er til enhver tid hvis vi kjenner alle startbetingelsene.

Bevegelseslikningen i kvantefysikk kalles *Schrödinger-likningen*. Løsningen av denne likningen gir oss en *sannsynlighet* for at en partikkel befinner seg i en posisjon  $x$  ved et tidspunkt  $t$ .

I kvantefysikk kan vi altså ikke forutsi hvor en enkelt partikkel befinner seg på en gitt tid. Men hvis vi gjør mange målinger får vi en fordeling av posisjonene som er entydig bestemt. Dette er en form for *statistisk determinisme*.

Slik ser Schrödinger-likningen ut!

$$\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V\Psi = \frac{i\hbar \partial}{\partial t} \Psi$$

Figur 21: Utprøvningsrunde 3, Behov for en ny fysikk (15/21).



### Oppsummering

Du har nå sett at kvantefysikk bryter med tre sentrale prinsipper fra klassisk fysikk: Kontinuitet, determinisme for enkelthendelser, og lokal virkelighet. Kvantefysikken ble til gjennom en rekke uenigheter og diskusjoner rundt disse prinsippene. Se hva noen av kvantefysikkens utviklere var uenige om.



Figur 22: Utprøvningsrunde 3, Behov for en ny fysikk (21/21).



### Big bang presenterer Schrödingers katt

Se hvordan TV-serien «Big Bang Theory» illustrerer Schrödingers Katt.



Figur 23: Utprøvningsrunde 3, Kvantefysikk og filosofi (3/5).



### Schrödingers katt

I dette tankeeksperimentet blir en katt plassert i en lukket boks som også inneholder en ampulle med gift. Giften blir frigjort idet en radioaktiv atomkjerne sender ut stråling. Da vil katten dø.

Den radioaktive kjernen er et kvantesystem som bare kan beskrives med en sannsynlighet for at atomkjernen vil sende ut stråling i løpet av et visst tidsintervall. Derfor kan vi ikke vite nøyaktig når strålingen blir sendt ut.

I kvantefysikken sier vi at atomkjernen er i en superposisjon av begge tilstandene («sendt ut stråling» og «ikke sendt ut stråling») samtidig. En observasjon av systemet vil gjøre at systemet faller ned på én bestemt tilstand (for eksempel «ikke sendt ut stråling»).

Kan vi da si at også katten (som er et makroskopisk system, ikke et kvante-system) vil være i begge tilstandene, død og levende, inntil vi har åpnet boksen?

Hvordan skal vi i så fall forstå dette?



Figur 24: Utprøvningsrunde 3, Kvantefysikk og filosofi (4/5).

## Oppgave om kvantefysikk og filosofi



Erwin Schrödinger presenterte tankeeksperimentet om katten i 1935 for å illustrere det han mente var problematiske tolkninger av kvantefysikken.

### Diskusjon 7

Diskuter med en annen elev: Hva synes dere om Schrödingers katt? Gjør det noe med hva dere tenker om kvantefysikk?



### Oppgave 12

**Skriv ned noen tanker om Schrödingers katt.**

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

Figur 25: Utprøvningsrunde 3, Kvantefysikk og filosofi (5/5).

## Vedlegg 2: Intervjuguide ved utprøving 2

### Innledende:

Hvordan synes dere de siste dagene har vært? Hva var/var ikke spennende? Har dere lært noe nytt? Var det noe som var overraskende?

---

*Kontinuitet:* Hva vil det si at noe er kvantisert? Eksempler?

*Determinisme:* Hva tenker determinisme i kvanteverden? Er kvanteverden deterministisk? Er det noe i kvanteverden som kan kvantiseres? Heisenbergs uakarphetsrelasjoner. Hva forteller de? Hva vil det si at to størrelser ikke kan ha skarpe verdier samtidig?

### *Schrödingers katt:*

Hva tenker dere om tankeeksperimentet? Forandrer dette hvordan dere ser på kvantefysikk? Hvordan skiller dette seg fra *vanlige* eksperimenter? Hva sier dette om målinger og virkeligheten i kvantefysikk?

---

### Avsluttende:

Hva er moderne fysikk? Hva er klassisk fysikk? Hva forbinder dere med ordet kvantemekanikk?

Hvis dere skal oppsummere nå, hva er det som skiller kvantemekanikk fra klassisk fysikk?





## Vedlegg 3: Intervjuguide ved utprøving 3

### Innledende:

Hva forbinder du med ordet kvantefysikk? Hva dreier det seg om?  
Hvordan tenker du at den skiller seg fra klassisk fysikk? (La elevene få svare på dette med egne ord)

Kontinuitet: Hva vil det si at noen fysiske størrelser i kvantefysikk er kontinuerlig/kvantisert? Eksempler på størrelser?

Kan et elektron være i noen andre tilstander enn de kvantiserte verdiene (den hopper jo mellom tilstander av og til)  
Hvordan representerer kvantisering et brudd med klasisk?

Hva er determinisme?

Hva tenker du om determinisme i kvanteverden? Er kvanteverden deterministisk? Er det noe i kvanteverden som kan forutsies?

Kvantefysikk og filosofi:

Hva vil det si at et system kan være i superposisjon?  
Hva går tankeeksperimentet ut på? Forandrer det måten dere ser på kvantefysikk på?

Hva menes med Heisenbergs uskarphetsrelasjon? Hva vil det si at naturen er uskarp?

Dobbeltspalteforsøk: Hva tenker dere om forsøket? Hvordan kan det ha seg at observatøren har noe å si for utfallet? Hvordan ser dere for dere elektronenes vei fra "kanon", gjennom spaltene til skjermen?

Hva menes med lokal virkelighet?

Hva var Bohr og Einstein uenige om? Hva er forskjellene mellom deres tolkninger? Hva tenker du om sammenfiltring? Hva mener du?

Avsluttende

Hvordan vil du oppsummere kvantefysikkens brudd med klassisk fysikk? På hvilke måter er de forskjellige? Er de like på noen måte?  
Hvordan kan to teorier som Newtons mekanikk og kvantefysikk leve side om side?