



UNIVERSITETET I AGDER

Kvantefysikk i norske lærebøker

En analyse av fysikklærebøkers fremstilling av Heisenbergs uskarphetsrelasjoner og sammenfildrede fotoner

KJETIL VIKEN

VEILEDERE

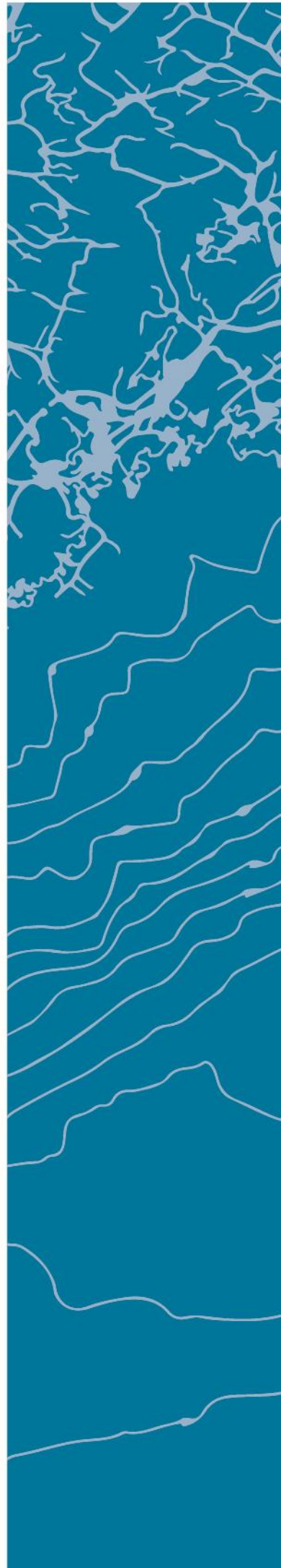
Nils-Erik Bomark

Kristina Raen

Universitetet i Agder, 2017

Fakultet for teknologi og realfag

Institutt for naturvitenskapelige fag



Forord

Denne oppgaven er skrevet som en avsluttende masteroppgave i naturfagdidaktikk ved Institutt for naturvitenskapelige fag, UiA, og markerer slutten på en femårig lektorutdannelse i realfag. Omfanget på oppgaven er 35 studiepoeng.

Først og fremst vil jeg rette en stor takk til mine to veiledere, Nils-Erik Bomark og Kristina Raen, for konstruktiv veiledning og lærerike samtaler.

Jeg ønsker også å takke Tormod Tronvoll, som skrev en lignende oppgave parallelt, for mange gode tips, samtaler og kaffekopper. Kontortiden ville ikke vært den samme uten han.

Kristiansand, Mai 2017

Kjetil Viken

Sammendrag

Kvantefysikk er et tema som mange fysikkelever synes er spennende å utforske. Teorien kommer fra krevende matematikk over det nivået som elever på videregående skole arbeider med. Av den grunn er temaet inkludert i læreplanmål med vekt på kvalitative beskrivelser. Elever som introduseres for temaet kan ha vanskelig for å se hvordan vår forståelse av den fysiske verden blir revolusjonært forandret. Dette kommer av at fenomenene oppleves som abstrakte og bryter med deres intuisjon. Det er derfor vanskelig å utvikle gode lærebøker i kvantefysikk.

Lærebøker står generelt sterkt i skolen som formidler av fagstoff, og lite tyder på at dette er et unntak i fysikk. Det finnes i dag to sett med lærebøker som skal dekke den norske læreplanen i fysikk. Lærebøkene er utgitt av Cappelen Damm og Aschehoug, og kalles respektivt Rom Stoff Tid og ERGO. I denne oppgaven blir det undersøkt hvordan disse lærebøkene behandler et av kompetansemålene innen kvantefysikk.

Problemstillingen som stilles i denne oppgaven er:

Hvordan fremstilles læreplanmålet «gjøre rede for Heisenbergs uskarphetsrelasjoner, beskrive fenomenet sammenfildrede fotoner og gjøre rede for erkjennelsesmessige konsekvenser av dem» i lærebøker, og legger denne fremstillingen til rette for en korrekt forståelse av kvantefysikk?

For å svare på problemstillingen blir det gjennomført en analyse av lærebokteksten og dens innhold. Analysen tar utgangspunkt i vurderingskriterier fra den tidligere, nå avskaffede, sentrale godkjenningsordningen for lærebøker. Resultatene blir vurdert opp mot fysikkteori og kjente utfordringer tilknyttet undervisning i kvantefysikk.

Analysen av lærebøkene viser at lærebøkene har ulike prioriteringer av fagstoffet. ERGO fokuserer i større grad på en mer tradisjonell, teknisk korrekt formidling. RST forsøker å forenkle fagstoffet med å holde seg unna fagbegreper som ikke blir ansett som pensum. Dette fører til en forskjell i hvordan begreper blir innført og hvilke begreper som benyttes. Den viktigste forskjellen innen begrepsbruk er ERGOs innføring av superposisjon til å forklare kvantefysiske fenomener, noe RST ikke gjør.

Det viktigste funnet i oppgaven er at verken ERGO eller RST klarer å beskrive Heisenbergs energi-tid-uskarphet og sammenfildrede fotoner på en tilfredsstillende måte, til tross for at det er sentrale tema i læreplanen. De historiske beretningene inneholder også feil i begge lærebøkene. Manglende faglig korrekthet har som følge at elever som bruker bøkene heller ikke blir i stand til å gi faglig korrekte beskrivelser.

En kjent formidlingsrelatert utfordring i kvantefysikk er bruk av analogier. I oppgaven konkluderes det med at begge lærebøkene er forsiktige med å ta i bruk analogier fra klassisk fysikk. De gangene det blir gjort blir det tatt forhåndsregler for å forhindre til at det fører til misoppfatninger.

Det gis til slutt anbefalinger av videre arbeid på bakgrunn av konklusjonen.

Innholdsfortegnelse

| | |
|--|-----|
| Forord | III |
| Sammendrag | V |
| Figurliste | IX |
| 1. Innledning..... | 1 |
| 1.1 Bakgrunn..... | 1 |
| 1.2 Problemstilling og forskningsspørsmål..... | 1 |
| 1.3 Relatert forskning | 2 |
| 2. Fysikkteori | 5 |
| 2.1 Klassisk fysikk..... | 5 |
| 2.2 Tolkning av kvantefysikk..... | 5 |
| 2.3 Tidlig kvantefysikk..... | 6 |
| 2.4 Innføringen av kvantemekanikk | 7 |
| 2.5 Heisenbergs uskarphetsrelasjoner | 11 |
| 2.6 Sammenfiltrering | 15 |
| 3. Didaktisk teori | 21 |
| 3.1 Kvantefysikk i skolen..... | 21 |
| 3.2 Forståelse av fysikk | 22 |
| 3.3 Elevers utfordringer i møte med kvantefysikk | 22 |
| 3.4 Godkjenning og kontroll av lærebøker | 23 |
| 3.5 Bruk av lærebok..... | 24 |
| 3.6 Modeller | 24 |
| 3.7 Begrepsbygging..... | 25 |
| 4. Metode | 27 |
| 4.1 Kvantitativ og kvalitativ metode..... | 27 |
| 4.2 Undersøkelseskategorier | 28 |
| 4.3 Relabilitet og validitet..... | 29 |
| 5. Resultater og analyse | 31 |
| 5.1 Analyse av aktuelt kompetansemål..... | 31 |
| 5.2 Presentasjon av lærebøkene | 32 |
| 5.3 Heisenbergs uskarphetsrelasjon i lærebøkene | 34 |
| 5.4 Sannsynlighetsfordeling i lærebøkene | 38 |
| 5.5 Polarisering i lærebøkene | 41 |
| 5.6 Sammenfiltrede fotoner i lærebøkene..... | 46 |
| 6. Drøfting | 55 |

| | | |
|-----|--|----|
| 6.1 | Fysikkfaglig korrekthet i lærebøkene | 55 |
| 6.2 | Fagbegreper i lærebokteksten | 57 |
| 6.3 | Modeller og illustrasjoner i lærebøkene | 60 |
| 6.4 | Lærebøkens innhold sammenlignet med kompetansemålet..... | 62 |
| 6.5 | Oppsummering og sammenligning av lærebøkene | 64 |
| 7. | Avslutning og konklusjon | 67 |
| 7.1 | Konklusjon | 67 |
| 7.2 | Veien videre | 68 |
| | Referanser | 69 |

Figurliste

| | |
|--|----|
| Figur 2:1: Interferensmønsteret til elektroner sendt gjennom en dobbeltpalte. Mønstrene i b, c, d og e stammer fra henholdsvis 100, 3000, 20 000 og 70 000 elektroner..... | 9 |
| Figur 2:2: Diffraksjon i enkeltspalte | 13 |
| Figur 2:3: Einsteins fotonboks | 14 |
| Figur 2:4: Forholdet mellom p_1 , p_2 og q_1 | 18 |
| Figur 5:1: ERGOs definisjon av Heisenbergs uskarphetsrelasjoner | 36 |
| Figur 5:2: ERGOs forklaring av tunneling med hjelp av energi-tid-uskarpheten | 37 |
| Figur 5:3: RST sin fremstilling av sannsynligheten for hvor elektronet befinner seg i forhold til hydrogenkjernen | 39 |
| Figur 5:4: ERGOs fremstilling av bølgefunksjonen til et elektron i en boks..... | 41 |
| Figur 5:5: RST sin figur som viser sammenheng mellom de elektriske og magnetiske felts retning og bølgens bevegelsesretning. | 42 |
| Figur 5:6: «Upolarisert lys» i RST..... | 42 |
| Figur 5:7: RST sin illustrasjon av hva som skjer når upolarisert lys sendes gjennom et polarisasjonsfilter | 43 |
| Figur 5:8: ERGOs figur som viser sammenhengen til lysets bevegelsesretning, det elektriske feltets retning og polarisasjonsretningen | 44 |
| Figur 5:9: Illustrasjon av polarisert lys som møter polarisasjonsfiltre i ERGO. | 45 |
| Figur 5:10: RST sin klassiske analogi av EPR-artikkelens innhold..... | 47 |
| Figur 5:11: RST sin illustrasjon av kalsium som sender to vertikalt polariserte fotoner mot to polarisasjonsfiltre..... | 48 |
| Figur 5:12: RST sin illustrasjon av kalsium som sender to polariserte fotoner med 45° vinkel relativt polarisasjonsfiltrene. | 48 |
| Figur 5:13: Tabellen som blir brukt av RST til å vise når det er trykt å bruke kodeoverføring sendt med sammenfildrede fotoner..... | 50 |
| Figur 5:14: RSTs blå boks med tilleggsm informasjon om superposisjon og Schrödingers katt .. | 51 |
| Figur 5:15: Schrödingers katt plassert i marginen ved siden av eksempel 12 og 13 i ERGO | 54 |

1. Innledning

Kvantefysikk er en suksessrik teori som kan benyttes til å beskrive fenomener som kan oppfattes som gåtefulle og mystiske (Angell et al., 2011). Siden teorien er bygd på avansert matematikk og forklarer abstrakte fenomener er den vanskelig å gi gode billedlige fremstillinger av. Kvantefysiske fenomener og bruddene med klassisk fysikk de medfører kan være vanskelig for elever å ta inn over seg. Av den grunn er dette et utfordrende tema å formidle til elever på videregående skole.

1.1 Bakgrunn

Det er få andre lands læreplaner som har like omfattende læreplanmål innen kvantefysikk som den norske læreplanen. Henriksen et al. (2014) mener at det læreplanmålet som gjør at den norske læreplanen skiller seg ut er målet om at elever skal «gjøre rede for Heisenbergs uskarphetsrelasjoner, beskrive fenomenet sammenfiltrede fotoner og gjøre rede for erkjennelsesmessige konsekvenser av dem» (Utdanningsdirektoratet, 2006, s. 6). Ifølge Henriksen et al. (2014) er det den erkjennelsesmessige delen av dette læreplanmålet som i liten grad er tatt med i andre lands læreplaner. Til dette læreplanmålet har lærebokforfatterne til en av bøkene som undersøkes i denne oppgaven gitt uttrykk for at det er vanskelig å vurdere hvor mye fagstoff som forventes (Halsan, 2009). Det er vanskelig å bestemme hvor grensen går ut fra læreplanen, så hvilke deler av kvantefysikken det fokuseres på for å oppnå dette kan variere i stor grad etter hvordan læreplanmålene tolkes.

Læreboka står sterkt i skolen (Skjelbred, 2003). Den benyttes som en viktig kilde av fagstoff og tilleggsstoff av både elever og lærere. I en undersøkelse utført av Bachmann (2005) kommer det frem at andelen norske lærere som svarer at de «ofte» bruker elevenes lærebøker i planlegging av undervisning er 87%. Bøkene er enda viktigere for lærere med svakere fagkunnskaper som støtter seg på det faglige innholdet som finnes i lærebøker (Nelson, 2006).

I Norge var det frem til år 2000 et sentralt godkjenningsorgan for lærebøker (Skrunes, 2010). Organets hovedoppgave var i de siste årene før avskaffelsen å kontrollere at faglig og pedagogisk innhold var i tråd med gjeldende læreplan. Da ordningen ble avskaffet fikk ble mye av ansvaret for kontroll av lærebøkene gitt til lærere. Det er lærerne som har ansvar for å velge lærebøker som skal benyttes til å undervise etter læreplanmålene. Norske lærere har selv gitt uttrykk for at den faglige delen av kvantefysikk som diskuteres i læreplanen er utfordrende (Bungum, Henriksen, Angell, Tellefsen, & Bøe, 2015). Tatt i betraktning at de samme lærerne føler seg usikre innenfor kvantefysikk har ansvar for å dekke læreplanmålene, er det tydelig at behovet for gode lærebøker innen kvantefysikk er stort.

1.2 Problemstilling og forskningsspørsmål

Det er per dags dato to lærebøker utviklet for fysikk-kursene i videregående skole, Rom Stoff Tid og ERGO, utgitt av forlagene Cappelen Damm og Aschehoug. På bakgrunn av lærebokas

viktige posisjon i undervisning og kvantefysikkens utfordrende kompetansemål er det i denne oppgaven utformet følgende problemstilling:

Hvordan fremstilles læreplanmålet «gjøre rede for Heisenbergs uskarphetsrelasjoner, beskrive fenomenet sammenfildrede fotoner og gjøre rede for erkjennelsesmessige konsekvenser av dem» i lærebøker, og legger denne fremstillingen til rette for en korrekt forståelse av kvantefysikk?

For å finne svar på problemstillingen vil det benyttes en lærebokanalyse hvor lærebøkens faglige korrekthet står sterkt. Det vil også undersøkes hvorvidt lærebøkens innhold er i samsvar med kompetansemålene, og begreps- og billedbruk i lærebøkene vil sammenlignes med kjente formidlingsrelaterte utfordringer innen kvantefysikk. For å presisere problemstillingen benyttes derfor følgende forskningsspørsmål i denne oppgaven:

- Presenterer lærebøkene korrekte fysiske teorier?
- Er det samsvar mellom innhold i lærebøkene og kompetansemålet?
- Er modellene som brukes hensiktsmessige?
- Hvilke fagbegreper blir benyttet og hvordan presenteres nye fagbegreper i lærebokteksten?

Med «hensiktsmessige» modeller menes det her at modellene som benyttes er relevante og at de har mulighet til å hjelpe leseren til å bedre forstå kvantefysikk. Denne oppgaven skal besvare disse forskningsspørsmålene, og dermed også gi svar på oppgavens problemstilling.

1.3 Relatert forskning

Blant tidligere forskning er det aktuelt å se på Olsen (1999) sin undersøkelse av fysikkelevers forståelse av kvantefysikk. Selv om denne undersøkelsen ble utført omkring innføringen av læreplanverket L97 er hans funn aktuelle ettersom han ser på eventuelle årsaker til disse misforståelsene. I dette kapitlet vil det også tas opp et studie om historiebasert undervisning og en undersøkelse av elevers læringsutbytte av en alternativ, internettbasert læringsressurs. Det har ikke lyktes å finne tidligere lærebokanalyser i fysikk med utgangspunkt i enkelte læreplanmål, men det finnes en undersøkelse av lærebøkene på et mer generelt plan. Relevante funn fra denne vil bli lagt frem mot slutten av dette kapitlet.

1.3.1 Undersøkelse av fysikkelevers forståelse av kvantefysikk

Olsen (1999) gjennomførte i sin hovedfagsoppgave i realfagsdidaktikk en undersøkelse av norske elevers forståelse av ulike temaer innenfor kvantefysikk både før og etter innføringen av læreplanverket L97. Temaene innenfor kvantefysikk som blir undersøkt var fotoelektrisk effekt, bølge-partikkel-dualisme, Heisenbergs uskarphetsrelasjoner og atommodeller.

I oppgaven argumenteres det for å legge stor vekt på uskarphetsrelasjonene i fysikkundervisningen. Olsen (1999) mener at kvalitative tolkninger av denne bør tilknyttes sannsynlighetsbegrepet og på den måten tydeliggjøre hvordan kvantefysikken bryter med determinismen vi finner i klassisk fysikk. Dette mener han vil hjelpe elever til å se hvorfor

mange fenomener i kvanteverdenen ikke kan beskrives av klassisk fysikk. I undersøkelse av elevenes forståelse av uskarphetsrelasjonene fant han ut at den vanligste feiltolkningen er at uskarphetene blir forvekslet med måleusikkerhet. Årsaken til dette er ifølge Olsen (1999) at ordet som benyttes til å beskrive uskarpheter, «usikkerhet», ofte forveksles med usikkerheter fra målinger.

1.3.2 Historiebasert fysikkundervisning

I sin doktorgradsavhandling undersøkte Renstrøm (2011) kvantefysikkens utvikling i lærebøker og fysikkundervisning. Avhandlingen var bygd opp i tre deler. Den første var å undersøke i hvilken grad fysikklærebøker og fagbøker inneholdt historiske myter om hvordan kvantefysikken ble til, noe som viste seg å være et utbredt problem. Hun forteller at hovedårsaken til at slike myter oppstår er undervisningsformål. Den andre delen bestod av en tekst som skulle fortelle den historiske utviklingen av kvantefysikk. En elevversjon av denne teksten ble så brukt i den tredje delen av avhandlingen til å undersøke hvorvidt historiske eksempler fra kvantefysikkens utvikling kan benyttes til å undervise fysikk 2 i videregående skole.

Konklusjonen i den tredje delen av prosjektet forteller at elevene opplevde kvantefysikkens utvikling som en spennende og interessant historie (Renstrøm, 2011). Elevene oppnådde en god forståelse av hvordan kvantefysiske fenomener bryter med klassisk fysikk. Gjennom undervisning i kvantefysikkens historie hadde også mange elever utviklet et godt faglig språk. Hun anbefaler å utnytte historiske fremstillinger i lærebøker og argumenterer for dette med å påpeke at det fører til en bedre oversikt over fysikkfaget som en helhet og prosessene som til slutt fører frem til nye teorier. På bakgrunn av dette argumenteres det for at alle fysikklærerutdanninger burde inneholde kurs i fysikkhistorie.

1.3.3 Kvantefysikkens erkjennelsesmessige sider gjennom ReleKvant

Myhrehaugen (2015) utfører i sin mastergradsoppgave en undersøkelse av elevers læringsutbytte etter å ha brukt læringsmoduler utviklet i forskningsprosjektet ReleKvant. ReleKvantprosjektet er et samarbeidsprosjekt mellom fysikere, fysikkdiraktikere og erfarne lærere fra flere institusjoner og målet er å utvikle og teste undervisningsmoduler i moderne fysikk som fremmer elevers læring, samt å bidra med kunnskap om elevers forståelse av moderne fysikk.

I oppgaven ble det avdekket at elever ikke oppnår god nok forståelse av kvantefysikkens brudd med determinisme ved å bruke ReleKvants læringsmoduler (Myhrehaugen 2015). Det kom også frem at enkelte av elevers oppfatninger av kvantefysikkens erkjennelsesmessige sider er trivielle. Det konkluderes derfor med at undervisningsmodulene ikke bidrar tilstrekkelig til elevers forståelse av kvantefysikken og dens filosofiske grunnlag. Det blir av den grunn diskutert forslag til forbedringer i modulene. Myhrehaugen (2015) tar også til orde for å endre læreplanmålene innen kvantefysikk. Han foreslår å ta i bruk mer deduktive læreplanmål innen kvantefysikk. Det vil si at elevene skal

få en mer generell innføring i kvantefysikken fremfor å fokusere på enkeltfenomener. Har mener at gjennom en slik innføring vil elevene bli bedre utrustet til å overføre kunnskapen til nye kontekster, som for eksempel i innføringskurs i kvantefysikk i høyere utdanning.

1.3.4 Tidligere lærebokanalyse av Rom Stoff Tid og ERGO

Halsan (2009) utførte i sin masteroppgave en analyse av lærebøkene Rom Stoff Tid 2 og ERGO Fysikk 2. I tillegg til å analysere innholdet i lærebøkene ble det også gjennomført et intervju av lærebokforfattere og utsendt spørreskjema til fysikklærere. Dette ble gjort for å blant annet kunne svare på hvordan nye temaer innført av kunnskapsløftet fremstilles i lærebøkene og for å kartlegge valgene som ligger til grunn for fremstillingen.

Hvordan lærebøkene tilnærmer seg fysikk blir beskrevet som hovedforskjellen. Ifølge Halsan (2009) ønsker Rom Stoff Tid å bringe fysikken mer opp til filosofiske spørsmål og hvordan fysikk kan søke svar på disse. ERGO forsøker derimot å bringe fysikken inn i elevenes virkelighet og benytte fysikk til undring omkring hverdagsfenomener. Rom Stoff Tid har større fokus på naturfagets egenart gjennom historisk utvikling enn ERGO. Et eksempel som trekkes frem er hvordan Einstein og Bohr benyttes som talerør innen kvantefysikk. ERGO har mer vekt på det Halsan (2009) omtaler som «korrekte forklaringer». Dette blir også beskrevet som en mer tradisjonell måte å fremlegge fysikk. Det betyr ikke at ERGO ikke presenterer naturfagets egenart gjennom bruk av historisk fremstilling.

Strukturen av fagstoffet er ulik i de to lærebøkene. ERGO inneholder flere eksempelbokser enn Rom Stoff Tid (Halsan, 2009). Rom Stoff Tid har egne blå rammer som inneholder tilleggsstoff som går utover pensum. Halsan (2009) påpeker at en av grunnene til at ERGO har flere eksempelbokser er at mye av fagstoffet som Rom Stoff Tid definerer som tilleggsstoff blir av ERGO brukt som eksempler. Dette blir tolket som at Rom Stoff Tid tar læreplanen mer bokstavelig ved å tydelig markere den delen av fagstoffet som går utover pensum.

Halsan (2009) konkluderer blant annet med at det er interessant at lærebøkene er så forskjellige som de er, men at det samtidig er en lite gunstig situasjon. Dette blir begrunnet med at elevenes sluttkompetanse i fysikk i stor grad blir påvirket av hvilket læreverk som benyttes. Dette kommer av at flere av kompetansemålene i kunnskapsløftet er svært åpne for tolkning. Av den grunn stiller Halsan (2009) seg kritisk til utformingen av flere kompetansemål, deriblant kompetansemålene innenfor kvantefysikk.

2. Fysikkteori

Dette kapitlet har som oppgave å gi en oversikt av de fysikkteoriene som lærebøkene diskuterer innenfor kvantefysikk. I tillegg til å generelt beskrive kvantemekanikk, uskarphetsrelasjoner og sammenfildrede fotoner, starter dette fysikkteoretiske kapitlet med å definere klassisk fysikk slik at kvantefysikkens brudd med klassisk fysikk kan tydeliggjøres. Kapitlet inneholder også en kort beskrivelse av ulike tolkninger rolle i kvalitative beskrivelser av kvantefysikk.

Renstrøm (2011) fremmer i sin doktorgradsavhandling fordeler med å benytte en historisk fremstilling av kvantefysikken. Et av argumentene er at en historisk fremstilling kan gi bedre oversikt over kvantefysikken som en helhet. Av den grunn vil det benyttes en historisk fremstilling i store deler av kapitlet. Det innebærer i dette tilfellet å følge den historiske utviklingen av kvantefysikk, samt å ta i bruk primærkilder.

2.1 Klassisk fysikk

Begrepet «klassisk fysikk» brukes ofte om en gruppe fysikkteorier for å tydeliggjøre hvordan kvantefysikken forandret vårt verdensbilde (Olsen, 1999; Renstrøm, 2011; Utdanningsdirektoratet, 2006). Renstrøm (2011) bruker tre prinsipper som gjelder i alle klassiske fysikkteorier og som tydeliggjør hvilken fysikk som er å regne for klassisk:

- **Kontinuitet:** Alle forandringer i naturen skjer kontinuerlig i tid og rom. Det finnes ingen minstemengde for energi og energien til et system kan endres kontinuerlig.
- **Determinisme:** Når alle verdiene til et systems tilstand som f.eks. posisjon, masse, bevegelsesmengde og dreiemoment er kjent, er det mulig å beregne enhver senere tilstand for systemet.
- **Lokal virkelighet:** Alle partikler har en bestemt tilstand til enhver tid. Det vil si at egenskaper som posisjon og bevegelsesmengde til enhver tid kan bestemmes. Partikler som er adskilt fra hverandre i rommet kan betraktes som uavhengige. En måling av en egenskap til en partikkel har ingen betydning for de andre partiklene.

I løpet av det fysikkteoretiske kapitlet i oppgaven vil kvantefysikkens brudd med disse prinsippene bli tydeliggjort.

2.2 Tolkning av kvantefysikk

Det finnes mange ulike måter å tolke kvantefysikk (Schlosshauer, Kofler, & Zeilinger, 2013). Matematisk og eksperimentelt sett vil man få de samme resultatene uavhengig av hvilken tolkning som benyttes. Det er først når de kvantefysiske fenomenene skal redegjøres kvalitativt at ulike tolkninger av kvantefysikken gir ulike beskrivelser. Den kvalitative redegjørelsen av kvantefysikken i denne oppgaven baseres på københavntolkningen, utviklet av Niels Bohr og Werner Heisenberg omkring 1927 (Pais, 1991). Begrunnelsen for dette valget er at i tillegg til å være den fremstillingen majoriteten av fysikere foretrekker

(Schlosshauer et al., 2013), så er det denne fremstillingen av kvantefysikk som brukes i de aktuelle lærebøkene (Callin, Pålsgård, Stadsnes, & Tellefsen, 2012; Jerstad et al., 2014).

2.3 Tidlig kvantefysikk

Dette delkapittelet beskriver den tidlige delen av kvantefysikken i årene før 1925. Denne korte historiske beretningens hensikt er å introdusere lesere med varierende kunnskap i kvantefysikk og kvantefysikkens historie en generell innføring i temaene.

På 1800-tallet hadde Maxwells teorier gitt fysikere en god forståelse av lys og dets observerte egenskaper (Gasiorowicz, 2003). Det fantes dog ett kjent fenomen som man ikke klarte å gi en fullgod beskrivelse av: strålingen fra et sortlegeme. Etter mange forsøk av ulike fysikere på å lage en funksjon som kan beskrive de observerte dataene kom til slutt Max Planck frem til en funksjon som stemte (Renstrøm, 2011). For å komme frem til denne funksjonen utførte han en kvantisering av energien til oscillerende atomer. Antakelsen om at energi kun kunne avgis og mottas i hele kvanta nhf , der h er Plancks konstant og f er svingningsfrekvensen, var for Planck kun et matematisk verktøy. Det var ikke før fem år senere at idéen om energikvantisering ble tatt opp.

Albert Einstein gav i 1905 ut flere artikler (Renstrøm, 2011). Blant disse artiklene finner vi Einsteins spesielle relativitetsteori, en teori som plasserte Einstein blant de mest respekterte fysikerne. I en annen artikkel presenterer han sin lyskvanthypotese. Denne hypotesen beskrev Einstein selv som revolusjonerende. Årsaken til dette var at Einstein brøt med Maxwells teorier for stråling, teorier som var bekreftet i mange forsøk i de forgående tiårene. Maxwells teorier beskriver lysenergi som kontinuerlig fordelt i rommet, og en økning av rommets volum vil føre til at lysets energi fordeles kontinuerlig utover et større volum. Ut fra Wiens lov for sortlegemestråling utledet Einstein en beskrivelse av lys som diskontinuerlig fordelt i rommet. Lyset består her av et endelig antall lyskvanter som ikke kan deles, og som derfor ikke fordeles utover større volum dersom rommets volum øker. Einsteins lyskvanter kan kun sendes ut og absorberes hele. Han anvender i samme artikkel sin lyskvanteteori til å forklare et fenomen som det enda ikke hadde blitt gitt tilfredsstillende forklaringer av, fotoelektrisk effekt. I tillegg til å forklare fenomenet la Einstein frem ei likning som forutså sammenhengen mellom elektronenes hastighet og strålingens frekvens. Robert Millikan gjennomførte et forsøk som bekreftet denne sammenhengen 11 år senere. Om det eksperimentelle resultatet kommenterer Millikan (1916) at til tross for at Einsteins resonnement gir en riktig likning, er teorien så uholdbar at han antar at Einstein selv har gått fra den.

I 1917 gav Einstein ut en ny artikkel som diskuterer lyskvantene. I artikkelen utleder han fotonenes bevegelsesmengde ut fra den spesielle relativitetsteori (Renstrøm, 2011). Denne egenskapen får lyskvantene til å ligne mer på klassiske partikler, og dette førte til enda mer motstand mot hans lyskvanteteori. Introduksjonen av bevegelsesmengde gav i tillegg til økt motstand en ny mulighet til å utprøve Einsteins teorier. Eksperimentalfysikeren

som klarte å bekrefte lyskvantteorien i 1922 var Arthur Compton. Resultatet, som bryter med prinsippet om kontinuitet, kom som en overraskelse på mange.

Ut fra Einstein og Plancks arbeid ble stadig flere fysikere overbevist om at lysenergi er kvantisert (Dunningham & Vedral, 2011). En av de som var overbevist var den franske adelsmannen Louis de Broglie. I tillegg til å anerkjenne at lys har en partikkelnatur tok han steget videre og antok at det vi normalt ser på som partikler, som for eksempel elektroner, kan beskrives som bølger. For å underbygge sin hypotese viste de Broglie til en enkel utligning. Bølgelengden til en partikkel med massen M som beveger seg med farten v vil ha en bevegelsesmengde p gitt ved,

$$p = Mv. \quad (1)$$

Fra Einsteins beregninger er det kjent at et fotons bevegelsesmengde er omvendt proporsjonal av bølgelengden λ , der h er Plancks konstant,

$$p = \frac{h}{\lambda}. \quad (2)$$

Som en følge av de Broglies antakelse av at elektroner også kan oppføre seg som bølger kan vi med å kombinere likning (1) og (2) får vi et uttrykk for partikkelens bølgelengde,

$$\lambda = \frac{h}{Mv}. \quad (3)$$

Her ser vi at større masse gir mindre bølgelengde, noe som forklarer hvorfor det ikke observeres kvanteoppførsel på tyngre, komplekse strukturer. De Broglies resonnement var enkelt, men skulle vise seg å ha stor betydning i den videre utviklingen av det som skulle bli til kvantemekanikk.

2.4 Innføringen av kvantemekanikk

I sin bok om kvantefysikk mener Gasiorowicz (2003) at kvantemekanikk ble oppdaget to ganger. Først av Werner Heisenberg og deretter året etter av Ervin Schrödinger. Heisenberg utledet i 1925 en forklaring av de kjente frekvensene i emisjonspektrene til atomer. For å gjøre det brukte han rader av tall som fulgte bestemte multiplikasjonsregler med disse frekvensene (Sakurai & Tuan, 2010). Umiddelbart etter publiseringen ble det påpekt at Heisenbergs multiplikasjonsregler i essensen var de samme som i algebraiske matriser. Videreutviklingen av Heisenbergs oppdagelse førte til det som vi i dag kjenner som matrisemekanikk. Den inneholder abstrakte matematiske fremstillinger av kvantefysikk som i liten grad er egnet til å gi kvalitative forklaringer av kvantefysikk. Fremover i teorikapittelet vil derfor fokuset være på Schrödingers oppdagelse.

2.4.1 Schrödingers bølgefunksjon

Schrödinger var den andre som oppdaget kvantemekanikken og publiserte sin oppdagelse året etter Heisenberg (Gasiorowicz, 2003). Han tok utgangspunkt i de Broglies hypotese som gav partikler bølgeegenskaper. En generell planbølge er gitt med formelen

$$f(x, t) = Ae^{i(kx - \omega t)}, \quad (4)$$

der ω er vinkelfrekvensen til bølgens oscillasjoner og har verdien $\omega = vk$ (Dunningham & Vedral, 2011). v er bølgens forplantningshastighet, A er bølgens amplitude, $i = \sqrt{-1}$ og k er bølgenummer med verdien,

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (5)$$

Ved å kombinere likning (2) og (5) kan bevegelsesmassen uttrykkes med,

$$p = \frac{hk}{2\pi} = \hbar k, \quad (6)$$

der $\hbar = h/2\pi$. Et elektrons kinetiske energi uttrykkes som,

$$E = \frac{p^2}{2M} = \frac{\hbar^2 k^2}{2M}. \quad (7)$$

Ut fra energien til en bølgefunksjon $E = \hbar\omega$ kombinert med likning (7) får vinkelfrekvensen verdien

$$\omega = \frac{\hbar k^2}{2M}. \quad (8)$$

Settes vinkelfrekvensen, likning (8), inn i formelen for en generell planbølge som beskrevet i likning (4) kan man lage en bølgefunksjon for et elektron,

$$\psi(x, t) = e^{i\left(kx - \frac{\hbar k^2 t}{2M}\right)}. \quad (9)$$

Ved å derivere bølgefunksjonen for et elektron, likning (9), på både rom og tid kom Schrödinger til slutt frem til en likning som beskriver utviklingen av bølgefunksjonen for alle partikler over tid,

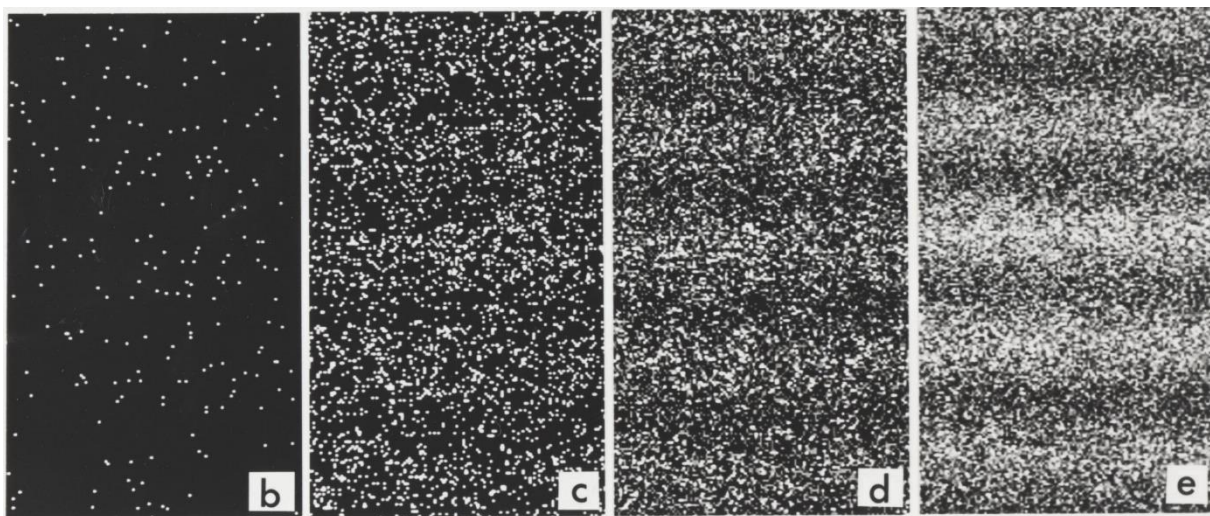
$$i\hbar \frac{\partial \psi(x, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x, t)}{\partial x^2} + V(x)\psi(x, t). \quad (10)$$

Dette er den berømte Schrödingerlikningen, en likning som beskriver energibevaring i et kvantemekanisk perspektiv (Dunningham & Vedral, 2011). Ut fra bølgefunksjonen kan man få informasjon om et systems kvantetilstand. En kvantetilstand, eller tilstand, inneholder blant annet informasjon om en partikkels masse, bevegelsesmengde og spinn ved et gitt tidspunkt (Dirac, 1947). Etter kort tid ble det slått fast at innholdet i Schrödingers bølgemekanikk og Heisenbergs matrisemekanikk var det samme, men bølgemekanikk var

foretrukket av datidens fysikere på grunn av kjennskap til matematikk tilknyttet dem (Gasiorowicz, 2003).

2.4.2 Sannsynlighetsfordeling

I forsøkene til Thomas Young i 1802 med interferens i dobbelspalte observerte han en, tilsynelatende, kontinuerlig fordeling av lys (Hemmer, 2005). Som en følge av at alle partikler har en bølgefunksjon vil man også kunne måle interferensmønstre til partikler på lik linje som med lys. Dersom man ønsker å måle interferensen av elektroner som er sendt gjennom en dobbelspalte vil man ikke observere en kontinuerlig varierende mengde treff på detektoren, men derimot en serie av enkelttreff. Dette kommer frem i resultatene fra et slikt forsøk i Figur 2:1. Om det brukes lys med lav intensitet vil de enkelte fotonene kunne skilles fra hverandre og et lignende resultat registreres.



Figur 2:1: Interferensmønstret til elektroner sendt gjennom en dobbelspalte. Mønstrene i b, c, d og e stammer fra henholdsvis 100, 3000, 20 000 og 70 000 elektroner (Tonomura, Endo, Matsuda, Kawasaki, & Ezawa, 1989).

Resultatene som vises i Figur 2:1 demonstrerer en grunnleggende egenskap som elektronene har ut fra bølgefunksjonen. Det finnes ikke en forutbestemt bane som elektronene vil følge i kvantemekanikken. Som en følge av at bølgefunksjonen har flere mulige utfall, vil resultatet bli ulikt hver gang selv om vi har samme utgangspunkt. Dette er et klart brudd med den klassiske fysikkens premisser om determinisme. Det betyr likevel ikke at vi opererer med total tilfeldighet, ettersom hvert utfall har en gitt sannsynlighet (Hemmer, 2005).

I resultatene i Figur 2:1 ser elektronene i b ut til å ha blitt registrert på tilfeldige steder uten noen sammenheng. Etter hvert som antallet elektroner som er skutt mot detektoren øker fra 100 i b lengst til venstre, til 70 000 i e på høyre side, kommer et interferensmønster til syne. Dette er et resultat av en forutbestemt sannsynlighetsfordeling som avgjør hvor mange elektroner som treffer ulike deler av detektoren, en sannsynlighet som kan beregnes med hjelp av Schrödingers likning (10) (Hemmer, 2005).

2.4.3 Superposisjonsprinsippet

Et av kvantefysikkens viktigste trekk, som skiller kvantemekanikken fra tidligere fysikkteorier, er det kvantemekaniske superposisjonsprinsippet. Når Schrödingerlikningen til en system har to eller flere mulige løsninger, altså flere mulige tilstander, vil en superposisjon av disse tilstandene være en mulighet (Dunningham & Vedral, 2011). Det kan tolkes som at systemet kan befinne seg i flere tilstander på en gang, men en mer korrekt tolkning vil være å si at tilstanden er udefinert. Om man måler hvilken tilstand systemet befinner seg i vil man kun få én av disse tilstandene som resultat. Årsaken til det er at systemets opprinnelige bølgefunksjon, som beskriver en superposisjon av flere tilstander, kolliderer som følge av målingen av den. Bølgen kolliderer fra en superposisjon av flere tilstander til å bli definert som kun en av disse.

Dirac (1947) forklarer superposisjon med hjelp av en tenkt superposisjon av to tilstander, A og B . Dersom det utføres en måling vil man kunne måle to resultater, a og b . En partikkel som er i tilstand A ved måling vil alltid få a som resultat. Tilsvarende vil tilstand B alltid gi resultatet b . Hvis vi tenker oss en situasjon hvor vi utfører en rekke målinger av partikler som er i superposisjon av A og B , vil noen målinger gi a som resultat, mens andre ganger vil vi få b som resultat. Hvor ofte vi får hvert av resultatene er bestemt av en sannsynlighetsfordeling avhengig av vektfordelingen av tilstandene A og B . I et mer konkret eksempel, gitt av Dunningham og Vedral (2011), tenker vi at de to mulige målingene a og b betyr at partikkelen befinner seg på a ; laboratoriet eller b ; månen. Da vil partikkelen som befinner seg i superposisjon av A og B være på laboratoriet og på månen samtidig, altså en lite definert posisjon. Det er først ved måling av posisjonen at partikkelen får en bestemt posisjon, enten på laboratoriet eller månen.

Superposisjonsprinsippet og tilfeldighetene i naturen som det medfører kan være vanskelig å akseptere (Dunningham & Vedral, 2011). Det gjaldt også for fysikerne som var delaktige i den tidlige utforskningen av kvantemekanikken, og det motiverte Schrödinger (1935/1980) til å fremsette et tankeeksperiment for å belyse hvor absurd kvantemekanikken kan tolkes. Han tar utgangspunkt i kvanteeffekten som ligger bak radioaktivt henfall, som beskriver henfall av et radioaktivt atom som en gitt sannsynlighet i et gitt tidsrom. Det radioaktive materialet plasseres i en stålbeholder sammen med en geigerteller, en hammer, en beholder med gift og en katt. Det hele kobles sammen slik at når geigertelleren registrerer et henfall, vil hammeren knuse beholderen med gift slik at stålbeholderen fylles med dødelig gass som tar livet av katten. Schrödinger argumenterer for at ettersom kvantemekanikk tilsier at bølgefunksjonen til det uobserverte radioaktive stoffet er i en superposisjon av henfalt og ikke henfalt, vil også bølgefunksjonen til hele systemet inne i boksen være i en superposisjon. Superposisjonen til systemet forteller at katten er i en bisarr blandingstilstand av å være død og levende samtidig. Tankeeksperimentets funksjon er å sette kritisk, delvis humoristisk, fokus på hvor problematisk det er å akseptere en modell som gir uskarpe og udefinerte beskrivelser av virkeligheten. Bohr på sin side mener at katten til enhver tid er enten død eller levende (Pais, 1991). Han begrunner sitt syn på Schrödingers

latterlige paradoks med at geigertelleren kollapse bølgefunksjonen til det radioaktive stoffet selv lenge før noen åpner boksen. Katten vil etter hans mening alltid være definert som levende eller død. Det er vanskelig å si at Bohrs syn er den riktige måten å tolke Schrödingers katt, ettersom det finnes mange andre tolkninger av kvantefysikk som vil gi andre forklaringer (Schlosshauer et al., 2013). Det er ikke hensiktsmessig å diskutere mer omkring ulike tolkninger her, ettersom det hele vil være en filosofisk basert diskusjon.

2.5 Heisenbergs uskarphetsrelasjoner

I dette kapittelet vil Heisenbergs uskarphetsrelasjoner og tolkninger av dem presenteres. Det vil også bli forklart hvordan man kan benytte uskarphetsrelasjonene til å forklare hvorfor vi observerer diffraksjon når lys sendes gjennom en enkeltspalte. Dette eksempelet blir ikke benyttet i noen av lærebøkene som analyseres senere, men det er interessant ta med i denne gjennomgangen av kvantefysikk for å tydeliggjøre uskarphetenes betydning i observerbare eksempel. I slutten av kapittelet blir et av Einsteins historiske forsøk for å vise at det er mulig å bryte uskarphetsrelasjonene diskutert. Dette tankeeksperimentet er tatt med for å tydeliggjøre den historiske uenigheten mellom Einstein og Bohr.

I gjennomgangen av uskarphetsrelasjoner er det behov for å nevne et par aktuelle regneregler i matrisemekanikken (Hemmer, 2005):

1. I matrisemekanikken vil enhver observerbar egenskap F til et system ha en lineær operator \hat{F} , der både F og \hat{F} er matriser.
2. To matriser kommuterer dersom rekkefølgen de anvendes er likegyldig. Dette kan skrives som $F_1F_2 - F_2F_1 = 0$

2.5.1 Posisjon-bevegelsesmengde-uskarpheten

Heisenberg oppdaget i 1927, etter introduksjonen av matrisemekanikken, en viktig konsekvens av matriseregnerne. Tar man utgangspunkt fra operatorene av to ikke-kommuterende størrelser, som for eksempel posisjon x og bevegelsesmengde p_x , får vi følgende forhold,

$$\hat{x}\hat{p}_x - \hat{p}_x\hat{x} = i\hbar. \quad (11)$$

Dersom to operatører ikke kommuterer vil ikke de tilhørende fysiske størrelsene ha skarpe verdier samtidig. Utfra kommutatorrelasjonen, likning (11), kan man beregne seg frem til forholdet mellom standardavvikene Δx og Δp_x (Hemmer, 2005),

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{1}{2} \hbar, \quad (12)$$

som forteller oss hvor nøyaktig verdiene for posisjon og bevegelsesmengde er definert, altså hvor skarpe verdier som finnes for posisjon og bevegelsesmengde (Hemmer, 2005). Denne ulikheten er en av Heisenbergs to uskarphetsrelasjoner, og den forteller oss at vi ikke kan ha en bølgefunksjon som beskriver både posisjon og bevegelsesmengde nøyaktig (Gasiorowicz,

2003). Griffiths (1994) påpeker at notasjonsbruken av Δx , og den muntlige versjonen «uskarpheten av x », som slurvete notasjonsbruk og språk. Det er viktig å huske på at Δx er brukt for å beskrive et standardavvik som man ville fått frem dersom man utførte flere forsøk på identiske systemer. Det samme gjelder også de andre standardavvikene, som for eksempel Δp_x .

2.5.2 Energi-tid-uskarpheten

Ifølge Griffiths (1994) finner man ofte sammen med posisjon-bevegelsesmengde-uskarpheten, likning (12), uskarpheten mellom standardavviket for tid Δt og standardavviket for energi ΔE . Energi-tid-uskarpheten kan skrives som,

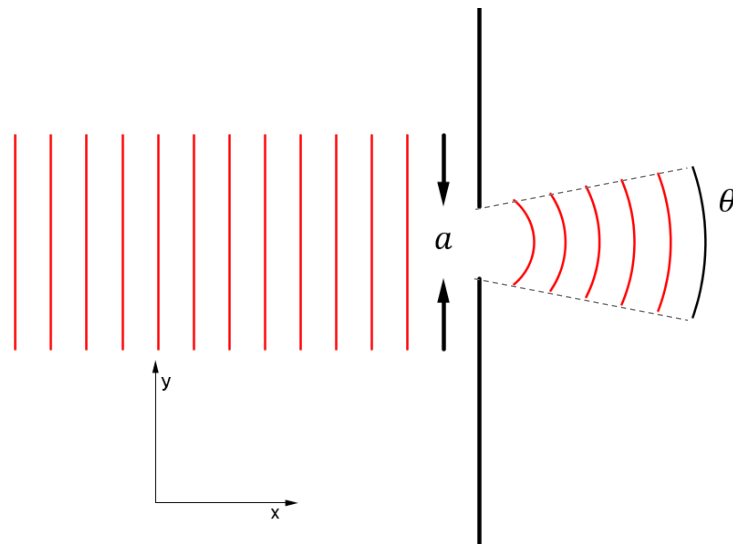
$$\Delta t \Delta E \geq \frac{1}{2} \hbar, \quad (13)$$

og er ofte utsatt for feiltolkninger. Det blir ofte påstått at energi-tid-uskarpheten forteller oss at med høy sikkerhet i målingen av energien vil tidspunktet for målingen være usikkert, men dette er en feiltolkning av ulikheten. Det blir også ofte påstått at energi ikke er strengt bevart i kvantefysikk. Feiltolkninger av uskarpheten kan føre til påstander som at man kan «låne» energi ΔE så lenge man betaler tilbake innen $\Delta t \approx \hbar/2\Delta E$, der større mengde «lånt» energi må betales tilbake hurtigere. Griffiths (1994) mener at denne måten å tolke energi-tid-uskarpheten ikke har rot i virkeligheten. Kvantemekanikken bryter aldri med energibevaringsloven.

For å tolke energi-tid-uskarpheten er det viktig å huske på at tid i Schrödingerlikningen er en uavhengig variabel (Griffiths, 1994). Tid er, i motsetning til posisjon, bevegelsesmengde og energi, ikke en dynamisk, målbar egenskap av systemets tilstand. I stedet for beskriver Δt tiden det tar for et system å endre seg. Lav forventningstid for endring Δt gir høy uskarphet i systemets energi. Uskarpheten kan brukes til å forklare at partikler med svært kort levetid, som for eksempel Z^0 -bosonet, er nødt til å ha energi som er lite definert. Målinger av energien til Z^0 -bosoner vil ut fra energi-tid-uskarpheten gi ulikt resultat hver gang. Etter mange utførte målinger vil det bli klart at resultatene er normalfordelt med et standardavvik ΔE .

2.5.3 Diffraksjon som følge av uskarphet

For å illustrere hvordan uskarphetsrelasjonen kan brukes i laboratorieforsøk til å forklare egenskaper som man tidligere kun har brukt klassisk bølgemekanikk for å besvare, benytter Gasiorowicz (2003) diffraksjon gjennom en spalte. En laserstråle peker vinkelrett mot en spalte med bredden a , der x -aksen følger laseren og y -aksen er parallell med spaltens bredde. På andre siden av spalten får vi en spredning av lyset der θ er vinkelspredningen, som vist i Figur 2:2.



Figur 2:2: Diffraksjon i enkeltspalte

Vi vet, som vis i likning (2), at et fotonets bevegelsesmengde i x -retning er $p_x = h/\lambda$ og at $p_y \approx 0$. Utfra eksperimentets oppsett vet vi at for at et foton skal gå gjennom spalten må det befinne seg i et område Δy som ikke kan være større enn a ,

$$\Delta y \leq a . \quad (14)$$

Dette impliserer at jo mindre spalteåpning a , desto mindre er standardavviket til Δy . Fra uskarphetsrelasjonen i likning (12) er det kjent at jo skarpere verdi av posisjonen vi har, desto mindre skarp blir verdien av bevegelsesmengden i samme retning. Utfra en sannsynlighetsfordeling vil derfor fotonene få bevegelsesmengde langs y -aksen. Bevegelsesmengde langs y -aksen har som følge at fotonene vil bevege seg i y -retning etter å ha passert gjennom spalten. Ved måling vil man registrere spredning av lysstrålen langs y -aksen som følge av at lyset har passert gjennom spalten.

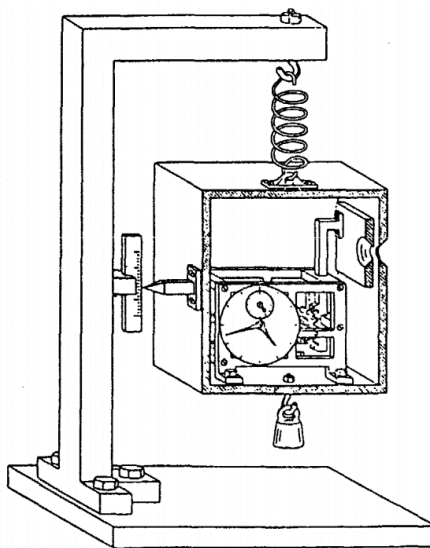
2.5.4 Heisenbergs og Bohrs tolkning av uskarphetsrelasjon

I sin originale tolkning av uskarphetsrelasjonen hadde Heisenberg selv problemer med forstå hva resultatet innebar (Pais, 1991). I et tidlig utkast av artikkelen som presenterte uskarpheten mener han at det er selve målingen som utføres som gjør den ikke-kommuterende egenskapen blir uskarpt definert. Som eksempel viser Heisenberg til at

fotonene i strålingen som brukes til å måle posisjonen til en partikkel vil påvirke bevegelsesmengden. Bohr påpekte at det ikke var målingen som var årsaken til uskarpheten, men at det skyldes en grunnleggende egenskap i kvantemekanikken. I den ferdige, publiserte, artikkelen skriver Heisenberg (1927/1983) selv at Bohr har hjulpet han med å påpeke essensielle mangler og feil. Konklusjonen i artikkelen er at uskarphetsrelasjonen bryter med loven om determinisme. Han tar utgangspunkt i en definisjon av determinisme: «Nøyaktig kjennskap til alle parametere i nåtiden gjør det mulig å kalkulere fremtiden» (Heisenberg, 1927/1983, s. 32). Det er ikke konklusjonen i denne definisjonen som brytes av uskarphetsrelasjonen, men premisset som legges til grunn. Av den grunn markerer dette nok et brudd med prinsippet om determinisme som er gjeldende i klassisk fysikk. Ifølge kvantemekanikken er det prinsipielt umulig å vite alle parametere nøyaktig ved et tidspunkt.

2.5.5 Einsteins fotonboks

Langt ifra alle ble like overbevist av Bohr og Heisenbergs tolkning og bruddet det medførte med determinisme. En av de fremste motstanderne var Einstein (Angell et al., 2011). Han var sterkt overbevist om at naturen var deterministisk, også i kvanteverden. Det var dette synet som motiverte han til å utfordre Heisenbergs uskarphetsrelasjon, og dermed også Bohrs syn, ved flere anledninger. I 1930 kom Einstein med et av sine mest overbevisende tankeeksperiment. Det bestod av en kasse som henger i ei fjærvekt som vist i Figur 2:3.



Figur 2:3: Einsteins fotonboks (Pais, 1991, s. 429)

Kassen inneholder elektromagnetisk stråling og ei klokke. Klokka er koblet opp slik at den styrer en mekanisme som åpner og lukker et hull i ei kasse, og kobles opp slik at hullet i kassen åpnes i et lite tidsrom slik at ett foton slippes ut. Einstein mente da at tidsrommet for hendelsen kan bestemmes med vilkårlig stor nøyaktighet, siden åpningstiden kan justeres. Når kassen veies på nytt vil man deretter kunne måle energien til fotonet som forlot boksen med vilkårlig nøyaktighet. Einstein argumenterer med at ettersom fotonboksen bryter med uskarphetsrelasjonen for tid og energi bryter den også med kvantemekanikken.

Tankeeksperiment skulle derfor støtte Einsteins syn om at verden er målbar og deterministisk (Angell et al., 2011).

Etter å ha blitt presentert for fotonboksen var Bohr svært opprørt over utfordringen tankeeksperimentet presenterte, men allerede morgenen etter hadde han klar en forklaring på hvordan uskarphetsrelasjonen ikke blir brutt (Angell et al., 2011). Ut fra Einsteins egen relativitetsteori forklarer Bohr at det vil være uskarphet som følge av klokkenes bevegelse i tyngdefeltet. Uskarphet i bevegelsen i tyngdefeltet gir uskarphet i tidsdilatasjon. Resultatet er at det ikke er mulig å bestemme nøyaktig når fotonet forlater boksen, og derfor er ikke uskarphetsrelasjonen brutt av Einsteins fotonboks. Bohr hadde med resonnementet sitt slått tilbake på Einsteins forsøk på å finne feil i kvantemekanikken.

2.6 Sammenfiltring

I de kommende kapitlene vil den historiske utviklingen av sammenfiltring bli gjort rede for. Det tas utgangspunkt i Einstein, Podolsky og Rosen sin berømte EPR-artikkel og dens kritikk av kvantefysikken. Det vil så bli forklart hvordan denne artikkelen, som opprinnelig skulle vise at kvantefysikken var ukorrekt, førte til oppdagelsen av et nytt kvantefysisk fenomen som fikk navnet sammenfiltring. Til slutt vil det bli gitt en forenklet forklaring av hvordan fenomenet ble eksperimentelt bevist med hjelp av polariserte fotoner.

2.6.1 EPR-artikkelen

I et nytt forsøk på å vise hvordan kvantemekanikken ikke kunne være komplett fremsatte Einstein, Podolsky, og Rosen (1935) et tankeeksperiment i en artikkel som i ettertid har fått navnet EPR-artikkelen. I første del av artikkelen presenteres et bevis, utledet fra Schrödingers bølgefunksjon, for at én av følgende påstander må være sann:

- I. Den kvantemekaniske beskrivelsen av virkeligheten er ukomplett
- II. Det er umulig å kjenne til verdiene til to fysiske størrelser med skarpere verdier enn hva uskarphetsrelasjonene tillater

Deretter tar artikkelen for seg to system, eller to partikler, som vekselvirker med hverandre i et gitt tidsrom. Deretter frastøtes de uten påvirkning utenfra. I artikkelen understrekes det at partiklene nå er adskilt, og som konsekvens vil det ikke kunne være noen slags påvirkning mellom dem. Om vi gjør en skarp måling av den første partikkelens bevegelsesmengde vet vi at for å oppfylle kravet om energibevaring må den andre partikkelen ha samme bevegelsesmengde, men i motsatt retning av den første. Den andre partikkelen kan ifølge Einstein et al. (1935) ikke ha blitt påvirket av målingen av den første. Det blir derfor påstått at vi kjenner bevegelsesmengden til den andre partikkelen uten å ha påvirket dens bølgefunksjon. Vi står fritt til å gjøre en nøyaktig måling av den andre partikkelens posisjon, og resultatet er at vi kjenner til bevegelsesmengde og posisjon med veldefinerte størrelser. Dette tillates ikke av uskarphetsrelasjonen, noe som betyr at påstand II ikke er sann. «Vi er derfor tvunget til å konkludere med at den kvantemekaniske beskrivelsen av fysisk virkelighet gitt av bølgefunksjoner ikke er komplett» (Einstein et al., 1935, s. 780). En

essensiell del av konklusjonen kommer fra kravet om at det ikke er mulig at partiklene kan påvirke hverandre, ettersom avstanden mellom dem teoretisk sett kan være veldig stor. Dette blir ofte omtalt som kravet om lokal virkelighet (Angell et al., 2011). I artikkelen skriver Einstein et al. (1935) at dersom det sees bort ifra kravet om lokal virkelighet vil konklusjonen være ugyldig, men dette avfeies med at ingen fornuftig definisjon av virkeligheten kan tillate påvirkning mellom partiklene som er fraskilt.

Bohrs umiddelbare reaksjon på EPR-artikkelen var å legge alt annet arbeid til side for å komme til bunns i problemet. Bohr skal ha uttrykt «Det er et tegn på at vi begynner å forstå problemet ... De gjør det smart, men det som teller er å gjøre det riktig» (Pais, 1991, s. 431). Tre måneder etterpå kom han med sitt svar på artikkelen. Her mente Bohr at EPR-artikkelen ikke tilfører noe til forståelsen av kvantefysikken. Han mente at konklusjonen i EPR var et resultat av forfatterens utvalgte antakelser og eksperimentelle prosedyrer (Pais, 1991).

2.6.2 Sammenfiltring som fenomen

Ikke alle var enige i Bohrs utsagn om at EPR-artikkelen ikke hadde noe å tilføre til vår forståelse av verden. Samme år ga Schrödinger (1935) ut en artikkel hvor han utforsket tankeeksperimentet. Han starter med å uttrykke at etter at systemene i EPR-artikkelen har vekselvirket med hverandre og blitt fraskilt kan man ikke lenger se på systemene som tidligere. Vekselvirkningen uten påvirkning utenfra har ført til at systemene, altså deres bølgefunksjoner, har blitt sammenfiltret. Det innebærer at vi ikke kan beskrive systemene separat lengre, men at en felles bølgefunksjon må brukes til å beskrive begge systemene som et samlet system uansett hvor stor avstanden er mellom dem er. Systemene vil fortsette å være sammenfiltret helt til en ytre påvirkning bryter sammenfiltringen.

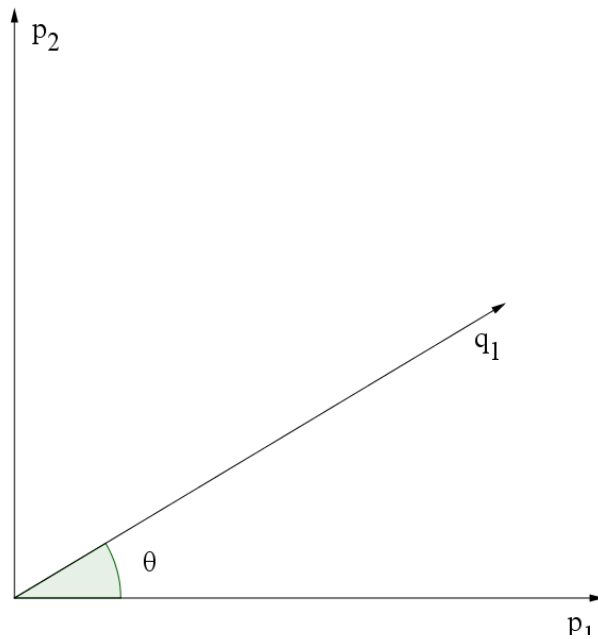
Om vi går tilbake til eksemplet i EPR-artikkelen kan vi se hvilken følge Schrödingers sammenfiltring har i tolkningen av tankeeksperimentet. Hans tolkning har samme utgangspunkt: Dersom det gjøres en antakelse av at partiklene befant seg i et endimensjonalt koordinatsystems origo før de frastøtes gjelder $x_1 = -x_2$ for enhver tidspunkt. Her er x_1 og x_2 posisjonene til respektivt partiklene 1 og 2. Det samme gjelder bevegelsesmengdene p_1 og p_2 til de to partiklene, $p_1 = -p_2$. Forskjellen mellom EPR-artikkelen og Schrödinger (1935) sin tolkning er at hans tolkning ikke bare tillater, men krever at partiklene påvirker hverandre selv om de er adskilt. Vi forutsetter at vi i kvantemekanikken ikke kan forutsi nøyaktig partikkelens bevegelsesmengde, og det er ikke et unntak ved sammenfiltring. Når vi måler bevegelsesmengden til den ene partikkelen p_1 vil bølgefunksjonen kollapse og den får en nøyaktig definert verdi. Ettersom vi var nødt til å beskrive partiklene med en felles tilstand med bevart bevegelsesmengde vil den andre partikkelen også få en nøyaktig definert bevegelsesmengde $p_2 = -p_1$. En følge av målingen på én av partiklene i det samlede systemet er at bølgefunksjonen til det samlede systemet kolliderer. Dette innebærer at tilstanden hvor begge partiklene måtte beskrives med en samlet bølgefunksjon ikke lengre eksisterer, og den sammenfiltrede tilstanden er brutt.

Bruddet av sammenfiltringen medfører at partiklene nå beskrives som to separate systemer, og da gjelder ikke lengre relasjonen $x_1 = -x_2$. Det er derfor ifølge Schrödinger (1935) ikke mulig å bruke en måling av posisjonen x_2 til den andre partikkelen for å få veldefinerte størrelser av både p_1 og x_1 slik som det blir gjort i EPR-artikkelen.

Schrödingers tolkning bryter med EPR-artikkelens premisser på et viktig område når den tillater påvirkning mellom partikler som er fraskilt med store avstander (Einstein et al., 1935; Schrödinger, 1935). Selv mener han at sammenfiltring er den kvantemekaniske egenskapen som fører til et endelig skille mellom klassisk fysikk og kvantefysikk. I sin egen tid bidrog ikke EPR-artikkelen til store forandringer av kvantefysikken, foruten at den var med på å legge til rette for en vitenskapsfilosofisk diskusjon som har ført frem til ulike syn på hvordan kvantefysikken skal tolkes (Pais, 1991). Einstein mente at partiklenes egenskaper alltid er bestemt og at verden derfor er deterministisk. Partiklenes posisjon og bevegelsesmengde er ifølge han bestemt av «skjulte variabler» som vi enda ikke har klart å oppdage. De skulle variablene gir forutbestemte utfall fra hendelser som i kvantefysikken tilsynelatende er sannsynlighetsbestemt. Dette innebærer for eksempel fotonenes vekselvirkninger med ulike polarisasjonsfiltre. Heisenberg (1927/1983) har uttrykt forståelse for dette synet, men sier eksplisitt at det vil være poenngløst å spekulere i om det eksisterer noe som ikke kan observeres. Einstein holdt fast på sitt syn av kvantemekanikken frem til han døde i 1955 (Pais, 1991). Selv om han selv mente at kvantemekanikken var uholdbar har han bidratt i stor grad til å påvirke utviklingen av den, også etter 1925.

2.6.3 Polarisering av lys

Lys, eller elektromagnetisk stråling, er svingninger i de elektriske og magnetiske feltene. Svingningene går på tvers av fartsretningen, og står vinkelrett på hverandre. Begrepet polarisasjon brukes om elektromagnetisk stråling til å beskrive hvilken retning de elektriske bølgesvingningene har i forhold til bevegelsesretningen. I kvantemekanikken ser man på det som at hvert enkelt foton har en polarisasjonstilstand. En lysstråle som er planpolarisert må ses på som flere fotoner som har polarisasjon i samme plan (Dirac, 1947). Dersom man ønsker polarisere lys i en gitt retning kan man bruke et polariseringsfilter. Et polariseringsfilter slipper kun gjennom lys med polarisasjon i en gitt retning, p_1 . Lys med polarisering som er vinkelrett med filteret, polarisering i p_2 , slippes ikke gjennom. Om lyset har polarisering i retning q_1 med vinkelen θ i forhold til polarisasjonsfilteret i retning p_1 , som vist i Figur 2:4, er det mer utfordrende å forutsi om fotonene slipper gjennom.



Figur 2:4: Forholdet mellom p_1 , p_2 og q_1

Dersom det sendes et foton med polarisasjon q_1 mot filteret og utføres en måling på baksiden, vil det noen ganger registreres et foton, andre ganger ikke (Dirac, 1947). Forsøk utført med mange fotoner og ulike vinkler vil gi sannsynligheten for å registrere et foton

$$P_{pass} = \cos^2 \theta. \quad (15)$$

Tilsvarende er sannsynligheten for at fotonet ikke slippes gjennom filteret

$$P_{absorb} = \sin^2 \theta. \quad (16)$$

Denne sannsynligheten kan beskrives kvantemekanisk ved hjelp av Heisenbergs matrisemekanikk (Gasiorowicz, 2003). Så lenge $q_1 \neq p_1, p_2$ vil polarisering i q_1 kunne beskrives med hjelp av koordinater som inneholder komponenter av p_1 og p_2 . Det er derfor mulig å beskrive polarisasjon i q_1 som en superposisjon av polariseringsretningene p_1 og p_2 , som sammen danner p -planet. Fotoner med polarisasjon q_1 har udefinert polarisasjon i henhold til p -planet. En måling som utføres i p -planet vil fortelle oss at fotonet enten har polarisasjon som er parallell med filteret p_1 eller vinkelrett på filteret p_2 . En mindre vinkel θ mellom fotonets polarisasjon og polarisasjonsfilteret gir større sannsynlighet for at fotonet får angitt polarisasjon parallelt med filteret. Fremstillingen gir en identisk sammenheng som eksperimentelle resultater i likning (15).

Fra lyskilder får man upolariserte fotoner, fotoner som har svært lite definert polarisasjonsretning. De er i en superposisjon med polarisasjon i alle retninger, der alle polarisasjonsvinkler er like sannsynlige (Dirac, 1947). Upolariserte fotoner som sendes mot et polarisasjonsfilter får en definert polarisasjon i møtet med filteret. I møtet med filteret er

det som kjent kun to muligheter, fotonet slippes enten gjennom filteret eller stoppes av det. Det betyr at fotonet får en definert polarisasjon som er parallell eller vinkelrett i forhold til filteret. Når alle polarisasjonsvinkler er like sannsynlige og det kun er to mulige polarisasjonsvinkler kan det konkluderes med upolarisert lys gjennom et polarisasjonsfilter gjelder sannsynligheten

$$P_{pass} = P_{absorb} = 1/2. \quad (17)$$

Intensiteten til en upolarisert lysstråle gjennom et polarisasjonsfilter vil halveres som et resultat av at hvert enkelt foton har sannsynligheten $1/2$ for å få trengje gjennom. Denne sannsynligheten er en viktig del av det første eksperimentelle beviset av det kvantemekaniske fenomenet sammenfiltrering.

2.6.4 Eksperimentell bekreftelse av sammenfiltrering

John Bell utførte i 1964 en analyse av hvordan en teori som inneholder skulte variabler og som bygger på lokal virkelighet vil fremstille korrelasjon mellom ikke-kommuterende egenskaper til to system (Gasirowicz, 2003). Han kom frem til at korrelasjonen var avhengig av ulikheter som ikke stemte overens med det kvantemekanikken forutså. Ulikhetene gjorde det mulig å gjennomføre et eksperiment som skulle kunne vise om det er sammenfiltrering eller skulte variabler som gir en korrekt forklaring av EPR-artikkelen (Angell et al., 2011)

Dette ble ikke testet før på starten av 1980-tallet i forsøk utført av Alain Aspect (Angell et al., 2011). Han brukte en kalsiumkilde som sender ut par av sammenfiltrede fotoner i sitt forsøk (Aspect, 2004). Det er ikke mulig å forutsi noe om hvilken retning fotonene er polarisert siden begge fotonene er upolarisert, altså i superposisjon av alle mulige polarisasjonsretninger. Det eneste som er kjent er at fotonene alltid har polarisasjon i samme plan.

I en forenklet forklaring av Aspects forsøk kan man si at fotonene blir sendt i hver sin retning mot to polarisasjonsfilter som står vinkelrett på hverandre. For at fotonene skal slippes gjennom må polariseringen forandres til å være parallell med filtrene (Angell et al., 2011). Når et upolarisert foton treffer polarisasjonsfilteret er sannsynligheten $1/2$ for at fotonet får polarisasjon som er parallell med filteret. Ved observasjon av fotonene som går gjennom det første filteret vil det noen ganger registreres at fotonet slippes gjennom, og andre ganger ikke. Det samme fenomenet kan observeres for fotonene som går gjennom det andre polarisasjonsfilteret. Om hele systemet observeres viser det en sammenheng mellom de to fotonene, ett av fotonene fra hvert fotonpar slipper gjennom med hvert forsøk. Dette kan forklares med at i det samme tidspunktet fotonet som slippes gjennom filteret får en bestemt polarisasjon, vil det andre få gitt en polarisasjon i samme plan, og dermed også vinkelrett på sitt respektive polarisasjonsfilter. Dette skjer selv om fotonene treffer filtrene samtidig og ikke har mulighet til å utveksle informasjon om deres polarisasjon med hverandre. Dette kommer av at den felles bølgefunksjonen som beskrev begge fotonene kollapser i den ene måles, noe som gjør at begge partiklene får definert polarisasjon

samtidig. Aspects forsøk beviste dette var et faktum med hjelp av Bells ulikheter. Med andre ord viste han at tidligere antakelser om lokal virkelighet ikke stemmer. Partiklene har ikke definerte tilstander til enhver tid, og partikler som av fraskilt fra hverandre må i dette tilfellet betegnes som avhengige av hverandre.

3. Didaktisk teori

I de kommende kapitlene vil det bli presentert aktuell didaktisk teori for lærebokanalysen. Dette innebærer en gjennomgang av kvantefysikkens posisjon i skolen og elevers utfordrende møte med kvantefysikk. Det vil også bli gitt en kort beskrivelse av hvordan lærebøker brukes i skolen. Avslutningsvis vil det gis en teoretisk beretning om modellbruk og begrepsformidling.

3.1 Kvantefysikk i skolen

Læreplanen i fysikk er læreplanmålene fordelt inn under hovedområdene «Klassisk fysikk», «Moderne fysikk», «Å beskrive naturen med matematikk», «Den unge forskeren» og «Fysikk og teknologi» (Utdanningsdirektoratet, 2006). Under «moderne fysikk» står det fire punkter:

Mål for opplæringen er at eleven skal kunne

- gjøre rede for postulatene som er grunnlag for den spesielle relativitetsteorien, drøfte kvalitativt noen av konsekvensene av denne teorien for tid, bevegelsesmengde og energi, og gi en kvalitativ beskrivelse av den generelle relativitetsteorien
- 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 bevaringslover som gjelder i prosesser med elementærpartikler, og beskrive vekselvirkningene mellom elementærpartikler
- gjøre rede for Heisenbergs uskarphetsrelasjoner, beskrive fenomenet sammenfiltrede fotoner og gjøre rede for erkjennelsesmessige konsekvenser av dem (Utdanningsdirektoratet, 2006, s. 6)

Av disse fire punktene er det punkt to, tre og fire som går inn under kvantefysikk. Det er få andre land som har like omfattende læreplanmål (Henriksen et al., 2014). Norge skiller seg ut med målet om at elevene skal forstå kvantefysikkens brudd med klassisk fysikk og hvilke erkjennelsesmessige konsekvenser det har.

I alle læreplanmålene for moderne fysikk er det gjennomgående vekt på at elevene skal ha kvalitativ forståelse. Forfattere til Ergo og Rom Stoff Tid har uttalt at det var utfordrende å skrive lærebok til disse læreplanmålene (Halsan, 2009). En av lærebokforfatterne av Ergo har uttalt følgende om de kvalitative læreplanmålene:

«Nå er det veldig mye [matematikk] noen steder og så skal det ikke være noe på noe annet, det er et litt kunstig skille [...] Det laget jo vanskeligheter for oss når vi skrev – visse ting skulle man ikke matematisere sånn som man vanligvis har gjort» (Halsan, 2009, s. 94)

I tillegg til å fortelle at de kvalitative læreplanmålene byr på utfordringer i forhold til å skrive en helhetlig bok, har forfatterne uttalt at det er vanskelig å vurdere hvor mye fagstoff som forventes (Halsan, 2009). Flere av fenomenene kan gi en kvalitativ forklaring på alt fra én side til et helt bibliotek. Det er vanskelig å bestemme hvor grensen går utfra læreplanen.

Det er ikke bare lærebokforfatterne som møter på utfordringer i forhold til læreplanmålene. Lærere har også gitt uttrykk for at kvantefysikken i læreplanen er et utfordrende område. Dette gjelder ikke bare på et didaktisk plan. Generelt sett mener lærere at de har lavere fagkunnskap innen kvantefysikk (Bungum et al., 2015). Behovet er derfor stort i kvantefysikk for godt tilrettelagte læringsressurser. Selv om lærere opplever det som utfordrende mener mange at det er et viktig tema, og at måten læreplanmålene er utformet gir et etterlengtet avbrekk fra det ellers matematisk tunge faget.

3.2 Forståelse av fysikk

I læreplanen for fysikk står det at et av formålene med faget er å gi forståelse av naturen, fysikkfaglige problemer og prosesser (Utdanningsdirektoratet, 2006). Denne forståelsen skal gi elevene økt innsikt i fysikkens verden. For å kunne utføre en vurdering av lærebøkenes fremstilling av kvantefysikk vil det derfor være naturlig å kartlegge hva det betyr å forstå fysikk. Duit og Treagust (1995) mener at det å kunne skrive ned en likning og kunne gjennomføre beregninger med den ikke nødvendigvis betyr at du har forstått hva likningen står for og hva den betyr. Elevene er nødt til å kunne gi en kvalitativ forklaring for å vise at de har forståelse av emnet. Olsen (1999) bruker Newtons mekanikk som eksempel. Blant elever som kan bruke bevegelseslikningene og kommer frem til svar på oppgaver som blir gitt i undervisningssammenheng vil overraskende mange ha problemer med å gi en forklaring på hva et objekts akselerasjon er. Utfra Duit og Treagust (1995) definisjon vil elevene som ikke klarer å kvalitativt gjøre rede for hva akselerasjon er ha manglende forståelse av Newtons mekanikk. Dette gjelder også andre begreper som brukes. I det aktuelle læreplanmålet i denne oppgaven blir det lagt vekt på at elevene skal kunne forklare og beskrive kvantefysiske fenomener (Utdanningsdirektoratet, 2006). Lærebøkene som dekker et slik læreplanmål skal tilrettelegge for at elevene blir utrustet til å kunne gi en enkel, kvalitativ forklaring på de kvantefysiske fenomenene.

3.3 Elevers utfordringer i møte med kvantefysikk

Mange lærere mener at elever ofte er mer motivert når de arbeider med kvantefysikk enn andre temaer (Bungum et al., 2015). Elevene viser interesse for fenomener som oppleves som obskure og mystiske, og som ikke alltid forskere heller er enige i. Kvantefysikk som undervisningstema skiller seg med dette ut fra andre tema i fysikk i videregående skole (Angell et al., 2011; Myhrehagen 2015; Olsen, 1999). Siden kvantefysikken er bygd på

avansert matematikk og inneholder mange abstrakte fenomener er det vanskelig å gi gode billedlige fremstillinger som elevene kan bruke for å konstruere sin egen forståelse. Det er følgelig også vanskelig for elevene å skape korrekte mentale bilder av innholdet (Angell et al., 2011). I klassisk fysikk vil fenomener beskrives som kontinuerlige og deterministiske, noe som stemmer godt overens med den virkelighetsoppfatning som elevene har. Introduksjon av kvantefysikk kan derfor oppleves problematisk siden teoriene bryter med elevenes intuisjon og eksisterende virkelighetsbilde. Da kan elevene stå i fare for i likhet med Einstein, Podolsky og Rosen tenke tanken «Ingen fornuftig definisjon av virkeligheten kan forventes å tillate dette» (1935, s. 780).

I det som kan anses som tradisjonell fysikkundervisning blir ofte forskjellene mellom klassisk fysikk og kvantefysikk sjult for elevene (Angell et al., 2011). Kvantemekaniske fenomener som bølge-partikkel-dualitet blir normalt først presentert med hjelp av klassiske analogier, for så å få en kvantemekanisk forklaring senere (Ayene, Kriek, & Damtie, 2011). Det blir av flere fysikkdidaktikere påpekt at denne fremgangsmåten fører til manglende forståelse av kvantefysikkens begreper (Angell et al., 2011). En av årsakene til det er at bilder og begreper fra klassisk fysikk kan føre til meningsløse eller ufullstendige forklaringer som elevene tar til seg som reelle forklaringer på fenomener. Når elevene så blir presentert for en kvantemekanisk forklaring på fenomenet senere fører det til at eleven sitter igjen med en blanding av klassiske og kvantemekaniske begreper som ikke har rot i fysikkfaget (Ayene et al., 2011). Misforståelser som kommer av slik blanding av klassiske og kvantemekaniske tolkninger er utfordrende å omgjøre etter at de er innarbeidet (Olsen, 1999). For at elevene skal få riktig forståelse av kvantefysikken og fagbegrepene som tilhører må man derfor fra tidlig av fokusere på særegenheten til kvantefysikk. En historisk fremstilling av paradigmeskiftet som kvantemekanikken innførte i fysikkverdenen i starten av forrige århundre sees på som en god måte å tydeliggjøre denne særegenheten (Angell et al., 2011; Olsen, 1999; Renstrøm, 2011).

Undersøkelser i videregående skole viser at fysikkelever generelt er flinke til å utføre beregninger med hjelp av kvantefysiske teorier, men at det ikke er en opplagt korrelasjon mellom det å kunne utføre kvantitative beregninger og det å kvalitativt kunne redegjøre for kvantefysikken (Angell et al., 2011; Ayene et al., 2011; Olsen, 1999). De har vanskelig for å se hvordan vår forståelse av den fysiske verden blir revolusjonært forandret av kvantefysikken (Ayene et al., 2011). Dette gjelder ikke bare i videregående skole. Studenter på høyere utdanningsnivå, også blant anerkjente universiteter i utlandet, har i likhet med elever på videregående skole problemer med å redegjøre kvalitativt for kvantefysiske fenomener (Olsen, 1999).

3.4 Godkjenning og kontroll av lærebøker

I Norge har det i mange år vært et sentralt godkjenningsorgan for lærebøker. Fra ordningens originale oppgave som var å sikre at befolkningen fikk korrekt ideologisk opplæring i unionstiden med Danmark, har fokuset blitt flyttet mer over på faglig innhold og pedagogikk

(Skrunes, 2010). I nyere tid har ordningen vært et ledd i å sikre at lærebøkene innhold er i tråd med gjeldende læreplan. I tillegg har ordningen blitt brukt til å fremme bestemte holdninger etter vedtak i stortinget. Et eksempel på dette er tiltak for å motvirke diskriminering av enkelte folkeslag og kulturer og tiltak for likestilling i henholdsvis 1962 og 1984.

Den sentrale godkjenningsordningen stod ikke uten kritikk (Skrunes, 2010). At det eksisterer en ordning er ikke en garanti for at det faktisk fungerer. Ordningen omfattet mange konsulenter som ofte kunne ha konkurrerende syn på ting, og samarbeidet mellom de ulike konsulentene var til dels minimalt. Lærebokas posisjon har i tillegg fått større konkurranse av alternative læringsmidler. Av den grunn ble ordningen til slutt fjernet i 2000, men dette må på ingen måte tolkes som at staten gir ifra seg styringen av skolen. Det er tross alt læreplanen som bestemmer innholdet i fagene. Ansvaret for kontroll av lærebøkene ble flyttet over til forlagene og lærerne. Forlagene som produsent av lærebøkene og lærerne i form av økt frihet i bruk av lærebok og metode. Læreren har ansvaret for å dekke læreplanmålene, og hvilken lærebok som brukes for å gjøre det velges lokalt.

3.5 Bruk av lærebok

Læreboka står sterkt i undervisningssammenheng. I en undersøkelse utført av Bachmann (2005) kommer det frem at andelen norske lærere som svarer at de «ofte» bruker elevenes lærebøker i planlegging av undervisning er 87%. I samme undersøkelse svarer 80% at de mener at læreboken har spilt en «stor rolle» i planleggingen av undervisningens innhold.

For å få oversikt over de ulike bruksområdene setter Skjelbred (2003) opp en tredelt inndeling: Kunnskapsformidling, elevarbeid og kontroll. At læreboka benyttes til kunnskapsformidling innebærer at læreboka benyttes av både elever og lærere som en viktig kilde til fagstoff og tilleggsstoff. Knain (2002) konkluderer etter intervjuer med elever at læreboka i stor grad brukes som en kilde av informasjon som de må memorere til prøver. Lærere bruker boka for å få oversikt over aktuelle tema. Denne funksjonen er viktigere for lærere med svakere fagkunnskaper da de støtter seg mer på det faglige innholdet som finnes i læreboka (Nelson, 2006). Læreboka benyttes også til elevarbeid. Dette begrunnes med at lærere ofte bruker læreboka for å finne oppgaver, elevforsøk og prosjektforslag som elevene kan arbeide med (Skjelbred, 2003). Det tredje bruksområdet er kontroll. Læreboka blir brukt av både lærere og elever som et utgangspunkt for vurdering. Læreren avgjør hvilken informasjon som elevene skal testes i, og elever bruker læreboka til forberedelse og til å kontrollere sin egen kunnskap i forkant av en prøve.

3.6 Modeller

Visuelle virkemidler som bilder og modeller er viktige virkemidler i fremstillingen av fysikkfaget. Dette kommer frem i læreplanen for fysikk, der det å kunne tyde innholdet i bilder og modeller er nevnt som en grunnleggende ferdighet (Utdanningsdirektoratet, 2006). En av fordelene med å bruke visuelle virkemidler og tekst sammen er at det utnyttes ulike

deler av hjernen som sammen gjør det enklere å få et helhetsinntrykk av et fenomen (Sætre, 2015). I fysikkbøker brukes det både vitenskapelige og pedagogiske modeller (Angell et al., 2011). Lærebøker, spesielt på lavere utdanningsnivå, bruker ofte pedagogiske modeller. Modeller kan redusere kompleksiteten av et fenomen slik at en ønsket side av fenomenet blir tydeliggjort. En følge av dette er at andre deler av fenomenet kan bli forvrengt. Ved bruk av modeller i undervisningen er det derfor viktig å være klar over at figurer som skal hjelpe til å forstå et tema bedre også kan føre til misforståelser. Det er derfor viktig at elever er klar over at de modellene som brukes ikke nødvendigvis gjenspeiler virkeligheten, men at de er der for å formidle en ønsket side av virkeligheten. En modell er ikke riktig eller gal i seg selv, men vil alltid ha et begrenset bruksområde (Angell et al., 2011).

For å konkretisere litt hva slags modeller som brukes i fysikk deler Angell et al. (2011) opp i tre hovedkategorier: Skalamodeller, analogimodeller og matematiske modeller. Skalamodeller skal gjengi fysiske objekt og prosesser i en bestemt målestokk. Noen ganger bruker vi en forminskelse, mens andre ganger en forstørrelse av det som skal undersøkes. I selve modellen trenger ikke alle aspekter nødvendigvis å ha en riktig målestokk i forhold til hverandre. Et eksempel på dette er modeller av solsystemet, hvor det ofte benyttes ulik skala på planetene og sola. Analogimodeller benytter objekter og prosesser fra godt kjente områder til å forklare et nytt, ukjent fenomen. Det legges her vekt på de likhetene som finnes. Analogier er mye brukt i fysikk, men kan virke mot sin hensikt og være opphav for feiltolkninger dersom de trekkes for langt. Ved bruk av analogier er det derfor viktig å ikke bare fokusere på likheter, men også ulikheter. På den måten blir elevene påminnet at det ikke er et bilde på hvordan virkeligheten er. Den tredje og siste hovedkategorien av modeller er matematiske modeller. De er symbolske beskrivelser av fysikken, som for eksempel bevegelsesmengden til en partikkel, $p = Mv$. Symbolene i modellene står for ulike fysiske størrelser. For å kunne bruke de matematiske modellene er det avgjørende at elevene kjenner til betydningen av de ulike symbolene. Den matematiske modellen trenger ikke være gjellende i alle tilfeller, så det er derfor vanlig å oppgi i hvilke tilfeller modellen gjelder.

3.7 Begrepsbygging

I læreboktekster blir det ofte presentert nye fagbegreper. Det er i naturvitenskapen tradisjon for at alle begrep har en tilhørende definisjon som gir begrepet mening (Ringnes & Hannisdal, 2006). Hensikten med definisjoner er å kunne gi en kort og presis beskrivelse av begreper. Det skal på denne måten være mulig å kunne forstå begrepene uavhengig av hvor de er brukt. Når man introduseres for et nytt begrep er det derfor viktig at det forekommer en definisjon av begrepet. Denne definisjonen ligger til grunn for den videre oppbygningen omkring forståelsen av begrepet. En definisjon alene ikke er nok for å kunne forstå et begrep. Assosiasjoner tilknyttet begrepet har minst like stor betydning for forståelsen som definisjonen. Et mål med fysikkundervisningen er å innføre definisjoner som et fundament, og deretter konstruere opp en begrepsforståelse på dette. Etter hvert som elevene får mer kunnskap om et emne gjennom utdannelse skal deres oppfatning av begrepet nærme seg oppfatningen til fagpersoner.

4. Metode

Konklusjonen i denne oppgaven blir utarbeidet med å undersøke resultatene fra en lærebokanalyse med fysikkfaglig teori og didaktisk teori. I dette kapittelet blir det gitt en beskrivelse av hvordan denne lærebokanalysen gjennomføres.

4.1 Kvantitativ og kvalitativ metode

Hvilken metode en bruker i lærebokanalyser avhenger av hva en ønsker å undersøke. Det deles hovedsakelig inn i to hovedkategorier, kvantitative og kvalitative metoder. Kvantitative metoder innenfor tekstanalyse gir informasjon angående plassbruk, mengde og frekvens. Om en har et ønske å finne ut hvor mange ganger eller hvor ofte et navn, begrep eller ord blir brukt er det hensiktsmessig å bruke kvantitative metoder. I lærebokanalyser er kvantitative metoder hovedsakelig brukt for å undersøke vektleggingen av ulike tema (Pingel, 2010). Fordelen med kvantitativ lærebokanalyse er i hovedsak metodens objektivitet og intersubjektivitet (Angvik, 1982). Resultatene gis i form av tall og statistikker, og er lett etterprøvbare og i liten grad avhengige av forskeren som gjennomfører undersøkelsen (Postholm & Jacobsen, 2014). Det er også viktig å være klar over at det finnes svakheter med metoden (Angvik, 1982). Selv om det legges til rette for objektivitet og intersubjektivitet finnes det også innslag av subjektive vurderinger, som for eksempel valget av hvilke data som skal samles inn. Hvilke spørsmål som kan besvares med data fra kvantitativ lærebokanalyse er begrenset. Av den grunn brukes innsamling av kvantitativ data som tilleggsinformasjon til kvalitativ data.

Kvalitativ metode er i stor grad brukt for analyse av lærebøker (Angvik, 1982; Pingel, 2010). Ved bruk av kvalitative metoder får man resultater i form av ord og tekster (Postholm & Jacobsen, 2014). I kvalitativ analyse av lærebøker ser man på innholdet i tekstene (Pingel, 2010). Man undersøker hva teksten prøver å formidle og hvordan det formidles. En vanlig form for kvalitativ metode ved tekstanalyse er deskriptiv analyse (Postholm & Jacobsen, 2014). Den deskriptive analysemetoden handler om å organisere teksten, finne fellestrekk og kategorisere ulike deler av teksten. Teksten kan analyseres setning for setning, avsnitt for avsnitt eller side for side. De kategoriene man setter opp må oppfylle to kriterier. Kategoriene må fortelle relevant informasjon i henhold til analysen, og den enheten som settes i en kategori må være den minste del som kan stå alene. Fordelen med en slik analyse er at den kan gi mye informasjon utfra relativt lite materiale. På grunn av metodens avhengighet av analytikerens tolkning av teksten vil metodens store svakhet være subjektivitet.

Det er lang tradisjon for å dele inn i kvalitative og kvantitative forskningsmetoder, der de ofte blir sett på som motsetninger. Postholm og Jacobsen (2014) mener at dette er et kunstig skille. Begge metodene har sine styrker og svakheter. Sammen komplementerer de hverandre, derfor bør man i en lærebokanalyse bruke begge metodene (Pingel, 2010). Fokuset i analysen som beskrives i neste kapittel er hovedsakelig på innholdet i en liten del

av lærebøkene. Av den grunn vil den store majoriteten av innsamlede data bestå av kvalitative.

4.2 Undersøkelseskategorier

Den informasjonen som vi finner i lærebøkene er resultat av en lang prosess og det endelige innholdet har blitt påvirket og redigert av flere personer i tillegg til forfatteren. Teksten i læreboken skal ta hensyn til en lang rekke faktorer innenfor verdisyn, fagsyn og didaktisk tenkning (Skrunes, 2010). Som en følge av lærebøkernes kompliserte natur kan det være utfordrende å gjennomføre en lærebokanalyse (Johnsen, Lorentzen, Selander, & Skyum-Nielsen, 1997). Det er derfor viktig at man i en lærebokanalyse har tydelige mål med analysen, og at man har bestemte undersøkelseskategorier. For at det skal være mulig å etterprøve resultatene fra en lærebokanalyse er det også viktig å ha tydelig definerte undersøkelseskategorier (Pingel, 2010; Skrunes, 2010).

For å utarbeide undersøkelseskategorier i denne analysen tas det først utgangspunkt i vurderingskriterier utviklet av Kirke- og utdanningsdirektoratet. I de offisielle godkjenningskriteriene gitt av direktoratet i 1987 kan man blant annet hente ut følgende hovedpunkter (Skrunes, 2010):

- Det faglige innholdet i læreboka skal være riktig
- Læreboka må være i samsvar med læreplanmålene for det enkelte fag. I tillegg til å inneholde fagplanen skal vektleggingen av innholdet vurderes
- Det pedagogiske innholdet i bøkene skal være i samsvar med læreplanen. Her legges det særskilt vekt på at språk, illustrasjoner og faglig innhold er tilpasset alderstrinnet, elevenes forutsetninger og behov.

For å supplere på disse hovedpunktene vil Bjarne Bjørndals (1967) vurderingskriterier hentet fra hans bok om undersøkelseskategorier være et godt bidrag. Her presenteres det 12 hovedpunkter for vurdering av bøker, hvor noen disse sammen med kriteriene fra Kirke- og utdanningsdirektoratet vil danne grunnlaget for denne analysen. Bjørndals kriterier for vurdering av lærebøker stemmer overens med punktene gitt ovenfor, og har i tillegg en mer detaljert versjon av kriteriene til det pedagogiske innholdet. I punkt 5, abstraksjonsnivå, stilles de tre spørsmålene: «a. Hvordan blir nye ord og begreper innført og forklart i teksten? b. Brukes de faglige begreper på en passende abstrakt måte? c. Bygger generaliseringene på «holdbare» premisser?» (Bjørndal, 1967, s. 57) Angående bruk av illustrasjoner legger Bjørndal vekt på nødvendig sammenheng mellom tekst og bilder, om illustrasjonene er satt inn på hensiktsmessige steder og at illustrasjonene har tilknyttet tekst som gjør det mulig for elevene å hente ut informasjon på egen hånd.

Med hjelp av de foreslåtte analysepunktene og de didaktiske utfordringene som finnes inne kvantefysikk har jeg utarbeidet følgende analysepunkter for å kartlegge lærebøkernes presentasjon av kvantefysikk:

1. Det fysikkteoretiske innholdet

2. Faglig begrepsbruk
3. Lærebøkernes bruk av modeller

Faglig korrekthet i læreboken er det første kriteriet som trekkes frem i de tidligere offentlige lærebokgodkjenningskriteriene (Skrunes, 2010). Det er også det første analysepunktet i denne analysen skal kartlegge. I analysen skal dette gjennomføres med å undersøke setning for setning og avsnitt for avsnitt hvorvidt lærebokas fysikkteori stemmer overens med et fysikkfaglig korrekt bilde. Det faglige innholdet som presenteres vil bli notert ned slik at resultatene av analysen kan benyttes til å avgjøre i hvilken grad læreboka dekker kompetansemålene som er gitt av læreplanen. Ulike temaers omfang vil også undersøkes. Dette blir gjort med å se på sideantall.

Kvantefysikk inneholder mange begreper som elever ofte har begrenset forståelse av (Angell et al., 2011). Sett i sammenheng med Bjørndal (1967) sine analysepunkt hvor han vektlegger god begrepsinnføring som viktig i lærebøker, vil det tredje analysepunktet i analyse dreie seg om faglig begrepsbruk. Analysen skal kartlegge hvordan nye ord og begreper presenteres i teksten, og hvordan begrepene benyttes i senere sammenhenger. Dette gjøres med å aktiv lete etter fagbegrepene som brukes, for så å følge bruken av dem videre i læreboka.

Det er utfordrende å bruke gode billedlige fremstillinger i kvantefysikk ettersom den er bygd på abstrakte teorier og formler (Angell et al., 2011). Derfor er det tredje og siste analysepunktet relatert til bruken av modeller. Som Bjørndal (1967) foreslår vil analysen gi en oversikt over sammenhengen mellom tekst og bilder, hvor illustrasjonene er plassert og at illustrasjonene har tilknyttet tekst som gjør det mulig for elevene å hente ut informasjon på egen hånd. Modeller innebærer ikke bare illustrasjoner og matematiske fremstillinger. Her inkluderes også de analogier som benyttes i teksten. Analysen skal derfor også kartlegge hvilke analogier som benyttes og hva som er hensikten med analogiene, samt undersøke om analogiene blir brukt på en måte som kan føre til misforståelser.

4.3 Relabilitet og validitet

Når man gjennomfører en lærebokanalyse vil det alltid kunne stilles spørsmål med påliteligheten av undersøkelsen. Metodens pålitelighet omtales gjerne som metodens relabilitet (Postholm & Jacobsen, 2014). En forskningsmetode med høy relabilitet vil gi samme resultat hver gang den benyttes, uansett hvem som benytter den. Innen didaktisk forskning er dette dessverre umulig ettersom det er mange faktorer som påvirker resultatene. For eksempel har forskjellige personer har ulike forkunnskaper gjør ulike prioriteringer, så resultatene fra en lærebokanalyse vil variere selv om to personer benytter samme metode. Dersom samme person benytter samme metode to ganger vil det også gi ulikt resultat. Dette kommer av at flere andre faktorer er ulike mellom de to gangene. For eksempel kan forskeren arbeide annerledes på grunn av at arbeidet føles meningsløst.

Debatter angående lærebokanalyse er det i stor grad tilknyttet analysemetodens objektivitet (Pingel, 2010). Årsaken til dette ser man utfra de metodene som brukes. Med disse metodene er det umulig å ikke møte på utfordringer i forbindelse med kravet til objektivitet. Siden det er umulig å unngå må en derfor som forsker arbeide aktivt for å begrense subjektiv påvirkning av resultatene. Det viktigste verktøyet for å oppnå dette er åpenhet omkring de vurderinger og valg som har blitt gjort i arbeidet. Skrunes (2010) beskriver dette som åpen subjektivitet. Åpen subjektivitet legger til rette for at andre kan få innsyn i de valgene som er gjort i arbeidet og gir andre mulighet til å selv vurdere om valgene er riktige. Resultatet av en analyse vil få relabilitetsproblemer dersom det i analyser er tydelig at en ser bort ifra elementer som peker i en annen retning enn det som er hovedkonklusjonen. I gjennomføringen av analysen vil man som forsker være nødt til å søke etter nødvendig bredde i det stoffet som velges. Hvis en ikke gjør dette kan man ende opp med en analyse på et skjevt utvalg av tekster og eksempler som er valgt ut med hensyn på å understreke eller motbevise de utsagnene som er i kriteriene og problemstillingen. I de tilfellene hvor man oppdager en slik skjev fordeling skyldes det som oftest at analytikerne enten har vist lite våkenhet ovenfor problemet, men det kan også være bevisst fra analytikerens side for å tilfredsstille underliggende interesser.

En undersøkelses validitet er en betegnelse på hvor god dekning det er for dens resultater. Med andre ord er validitet en beskrivelse av gyldigheten til resultatene (Postholm & Jacobsen, 2014). Man kan si at god validitet kjennetegnes av godt samsvar mellom innsamlede data og de spørsmålene disse dataene benyttes til å besvare. I kvantitative undersøkelser kan man benytte tallverdier til å beskrive forventet avvik, noe man ikke kan i kvalitative undersøkelser. I en kvalitativ lærebokanalyse er det derfor viktig at man ikke trekker konklusjoner uten at det er et godt grunnlag for det. Dette innebærer at oppgavens forskningsspørsmål må samsvare med både gjeldende problemstilling og undersøkelseskategoriene som benyttes i analysen. Om ikke dette er tilfelle vil ikke lærebokanalysen gi grunnlag for å besvare problemstillingen.

I resultatene fra analysen i denne oppgaven vil det legges stor vekt på å vise hvilke vurderinger som har blitt gjort, samt begrunnelser for valgene. Dette blir gjort slik at andre kan få innsyn og selv kan vurdere hvorvidt de er enige. Hele lærebokteksten i de aktuelle seksjonene av læreboka analyseres slik at lærebøkens innhold skal kunne vurderes i sin helet. Dette gir resultater som bedre beskriver det som faktisk står i lærebøkene og leseren av oppgaven blir bedre utrustet til å kunne vurdere om innholdet er pålitelig. Konklusjonene som til slutt blir trukket blir begrunnet utfra lærebøkens innhold slik at de kan regnes som gjellende beskrivelser av lærebøkens innhold.

5. Resultater og analyse

I dette kapittelet vil resultatene fra analysen presenteres. Det første som presenteres i kapittel 5.1 er en kort analyse av det aktuelle kompetansemålet. Etter at læreplanmålet har blitt analysert presenteres lærebøkene i kapittel 5.2. Denne presentasjonen inneholder en kort beskrivelse av hver lærebok. Når lærebøkene har blitt presentert vil resultatene fra analysen beskrevet i kapittel 4 bli lagt frem. For ordens skyld er resultatene inndelt i fire ulike kapitler, fra 5.3 til 5.6, hvor hvert kapittel inneholder analyse av et tema i begge lærebøkene. Oppdelingen i fire tema er basert på lærebøkernes oppbygning i de samme temaene. Resultatene fra analysen blir presentert som en helhet. Med «helhet» menes det her at lærebøkernes innhold følges tilnærmet kronologisk fra starten til slutten av lærebokteksten. Resultatet er at funnene innenfor de ulike undersøkelseskategoriene er samlet i en sammenhengende tekst. Denne teksten inneholder resultater fra de tre undersøkelseskategoriene som benyttes i analysen. Valget om å fremstille resultatene som en helhet er gjort for at leseren skal få bedre oversikt over lærebokteksten som en helhet, og for at konteksten hvor ulike begrep og modeller benyttes blir tydeligere enn den ville gjort dersom disse ble fremstilt i egne kapitler.

5.1 Analyse av aktuelt kompetansemål

For å kunne avgjøre hvorvidt kompetansemålet i oppgavens problemstilling blir dekket av læremidler er det først nødvendig å klargjøre hva man forventer av kompetansemålet. Ordene «gjøre rede for» blir brukt mange ganger i læreplanen for fysikk 2. I denne analysen vil dette bli tolket som at eleven skal være i stand til å beskrive et fenomen og dets virkemåte med hjelp av egne ord på en slik måte at det kommer frem at eleven har forstått fenomenet. Kompetansemålet som det arbeides med i denne analysen lyder som følgende: «Mål for opplæringen er at eleven skal kunne gjøre rede for Heisenbergs uskarphetsrelasjoner, beskrive fenomenet sammenfiltrede fotoner og gjøre rede for erkjennelsesmessige konsekvenser av dem» (Utdanningsdirektoratet, 2006, s. 6). For å kunne få bedre oversikt over dette kompetansemålet deles det i denne analysen opp i fire delmål:

Mål for opplæringen er at eleven skal kunne ...

1. gjøre rede for Heisenbergs uskarphetsrelasjoner.
2. gjøre rede for erkjennelsesmessige konsekvenser av Heisenbergs uskarphetsrelasjoner
3. beskrive fenomenet sammenfiltrede fotoner
4. gjøre rede for erkjennelsesmessige konsekvenser av fenomenet sammenfiltrede fotoner

Utfra det første delmålet kommer det frem at elevene skal kunne gjøre rede for ulikhetene (12) og (13), som ble diskutert i kapittel 2.5. Ifølge Duit og Treagust (1995) syn på hva det vil så å forstå fysikk vil dette tolkes som at elevene ikke bare skal kunne skrive ned å gjøre beregninger med ulikhetene. Elevene skal også kunne kvalitativt beskrive Heisenbergs uskarphetsrelasjoner. Her forventes det derfor at eleven skal kunne gi en enkel beskrivelse av de ulike variablene og konstantene ulikhetene representerer, i tillegg til å kunne gjøre enkle beregninger med ulikhetene og tolke resultatene fra beregningene.

Det andre delmålet bygger videre på det første. Det forteller oss at eleven i tillegg til å kunne gjøre rede for Heisenbergs uskarphetsrelasjon også skal kunne gjøre rede for hvilke erkjennelsesmessige konsekvenser fenomenet har. Dette tolkes her som at elevene skal kunne beskrive hvordan uskarphetsrelasjonene bryter med virkelighetsbildet som er gjellende fra klassisk fysikk, og som gjerne også er det virkelighetsbildet som elevene selv har (Angell et al., 2011).

Det tredje delmålet tar for seg sammenfiltrede fotoner. Det er verdt å merke seg at det her brukes ordet «beskrive» istedenfor «gjøre rede for». Ordvalget tolkes som at man ikke forventer at elever skal kunne gi en like omfattende redegjørelse av sammenfiltrede fotoner som det man gjør av uskarphetsrelasjonene. Den matematiske bakgrunnen for sammenfiltring er avansert, og det vil derfor være urimelig å kreve at elevene skal kunne gjennomføre kvantitative beregninger innenfor sammenfiltring (Angell et al., 2011). Det som derimot forventes er at eleven kan beskrive hva en sammenfiltret tilstand er og hvordan to sammenfiltrede fotoner sendt mot parallelle polarisasjonsfiltre vil reagere.

Til sist forventes at eleven skal kunne redegjøre for hvilke erkjennelsesmessige konsekvenser fenomenet sammenfiltrede fotoner har. Her skal eleven, i likhet med det andre delmålet, gi en beskrivelse av hvordan resultatene fra Aspects forsøk med sammenfiltrede fotoner representerer et brudd med virkelighetsbildet i klassisk fysikk.

5.2 Presentasjon av lærebøkene

I dette kapitlet gis det en kort generell beskrivelse av lærebøkene som forteller om lærebøkens oppbygning.

5.2.1 Rom Stoff Tid 2

Læreboka Rom Stoff Tid 2, som fra nå av blir omtalt som RST, er en lærebok utgitt av Cappelen Damm og er utformet etter Kunnskapsløftet. I denne analysen er det 2. utgave, utgitt i 2014, som benyttes. Den er skrevet av Per Jerstad, Bjørn Sletbak, Arne Auen Grimenes, Reidun Renstrøm, Morten Nymo og Olav Bråtveit Holm. Læreboken er på 480 sider fra perm til perm. 348 av disse sidene er satt av til 13 hovedkapitler hvor fagstoff, noen oppgaver og forslag til elevforsøk presenteres. Fagstoffet blir etterfulgt av en oppgavesamling på 96 sider. Læreplanmålene om kvantefysikk er hovedsakelig dekket i kapittel 11, «Kvantefysikk», og 12, «Partikkelfysikk». I tillegg blir de Broglies idé om partiklers bølgeegenskaper presentert i kapittel 1, «Fire ideer som forandret verden».

Fremstillingen av fagstoffet forekommer hovedsakelig som det boka omtaler som hovedstoff. Under hovedstoffet inngår det meste av tekst, figurer og bilder. I tillegg brukes det også eksempeloppgaver. Deler av hovedstoffet som blir ansett som viktige, som for eksempel viktige definisjoner og matematiske formler, blir uthevet i egne bokser med grå bakgrunn. RST bruker egne rammer med blå bakgrunn for å fremlegge stoff som ikke er direkte pensum, men som er relatert til hovedstoffet. I slutten av hovedkapitlene, foruten kapittel 1, står det et sammendrag. Sammendragene blir etterfulgt av oppgaver.

Det er kun i kapittel 11 at det aktuelle læreplanmålet om uskarphetsrelasjoner og sammenfiltring blir dekket. Dersom man ser bort fra ifra kapittelets sammendrag og oppgaver er fagstoffet fordelt fra side 280 til 298. Det starter med å bruke historien om Plancks strålingslov, kvantefysikkens fødsel, som introduksjon til kapittelet. Deretter er kapittelet delt opp i fire delkapitler. Det første temaet som blir behandlet er fotoner. RST bruker en historisk fremstilling av Einsteins lyskvanter og hans forklaring på fotoelektrisk effekt. Neste delkapittel presenterer fotoners bevegelsesmengde og elektroners bølgelengde. Også her brukes det en historisk fremstilling av fagstoffet. Fagstoffet her legger vekt på Comptons forsøk og hvordan Einsteins lyskvanteteori ble bekreftet av forsøket. I tillegg blir de Broglies bølgelengde til partikler presentert. Tredje delkapittel heter «Kvantemekanikk». Det beskriver Heisenbergs uskarphetsrelasjoner, sannsynlighetsfordeling i kvantemekanikk og sammenligner klassisk fysikk med kvantefysikk. Det siste delkapittelet heter «Sammenfiltrede fotoner». Her blir først EPR-artikkelen presentert med en makroskopisk analogi slik at Einsteins syn på kvantefysikken kommer til syne. Deretter blir eleven gitt en forklaring av hva et fotons polarisasjon er, før det gis en beskrivelse av sammenfiltrede fotoner. Avslutningsvis blir eleven presentert for hvordan sammenfiltring kan anvendes til kryptering.

5.2.2 ERGO Fysikk 2

Læreboka ERGO Fysikk 2, heretter omtalt som ERGO, er en elevbok i Aschehougs læreverk tilhørende fysikkfaget i Kunnskapsløftet. Boka er skrevet av Petter Callin, Jan Pålsgård, Rune Stadsnes og Cathrine Wahlstrøm Tellefsen og inneholder teori, eksempler, oppgaver og forslag til elevforsøk. I denne analysen er den reviderte 2. utgaven av boka som benyttes. Den reviderte utgaven er fra 2012 og består av 448 sider fra perm til perm. Fagstoffet er fordelt på 300 sider over 10 hovedkapitler. Hvert hovedkapittel deles inn i flere underkapittel markert med A, B, C osv. Hovedkapitlene bli etterfulgt av 105 sider med oppgavesamling og elevforsøk.

I ERGO starter kapitlene med en kort introduksjon hvor fenomener som skal forklares i løpet av det kommende kapittelet blir presentert. Det stilles også spørsmål som elevene skal være i stand til å besvare når de er ferdige med kapittelet. Etter en kort introduksjon begynner presentasjonen av hovedstoffet. I ERGO består hovedstoffet av tekst, figurer og bilder. Viktige definisjoner og formler som er nevnt i teksten blir ofte gjengitt i egne beige bokser. Eksempler blir i ERGO satt i nummererte blå bokser, men det er ikke nødvendigvis

oppgaveeksempler. De er ofte eksempler på bruksområder eller alternative forklaringer på det som står i teksten. Noen av eksempelboksene inneholder informasjon som kan anses som tilleggsinformasjon til pensum. Til hvert av delkapittel er det avslutningsvis noen repetisjonsspørsmål kalt for «Prøv deg». Hovedkapitlene blir avsluttet med et sammendrag som blir etterfulgt oppgaver.

De læreplanmålene som tilhører kvantefysikk skal alle dekkes i kapittel 9. Dette kapittelet kalles for «Kvantefysikk» og spenner seg fra side 248 til 279, ekskludert sammendrag og tilhørende oppgaver. Som introduksjon blir det gjort et poeng av hvor rart det ville ha vært om kvantemekaniske fenomener kunne observeres i vår makroskopiske verden. Deretter stilles det noen spørsmål som det forventes at eleven skal kunne besvare når arbeidet i kapittelet er ferdig, sammen med tilknyttede læreplanmål. Delkapittel 9A tar for seg lysets partikkelegenskaper, og forklarer fotoelektrisk effekt utfra Einsteins lyskvantteori. Det blir også her redegjort for fotonenes bevegelsesmengde, Compton-effekten og pardanning og annihilering. 9B tar for seg røntgenstråling som et av bruksområdene til den tidlige kvantefysikken, og computertomografi som mer moderne bruksområde. 9C tar skrittet inn mot kvantemekanikken og presenterer de Broglies hypotese for bølgelengde til partikler. Her vises det også til resultater fra forsøk som viser at både elektroner og fotoner har partikkel-bølge dualitet. Selve kvantemekanikken starter med Heisenbergs uskarphetsrelasjoner og fortsetter med en kort beskrivelse av sannsynlighetenes rolle i kvantefysikk. Kapittel 9D beskriver sammenfiltrede fotoner, og starter med en gjennomgang av elektromagnetiske bølger og polarisering. Deretter blir sammenfiltrede fotoner og hvordan dette bryter med EPR-artikkelens krav om lokal virkelighet diskutert. Kapittel 9D avsluttes med eksempler på hvordan sammenfiltrering kan anvendes. Kapittel 9E omhandler elementærpartiklene og vekselvirkningene dem imellom, og tar opp de siste 9 sidene av kapittelet.

5.3 Heisenbergs uskarphetsrelasjon i lærebøkene

Tekstanalysen starter i begge lærebøkene med introduksjonen av Heisenbergs uskarphetsrelasjoner. Det er resultatene fra denne delen av lærebøkene som vil bli presentert i de neste delkapitlene.

5.3.1 Heisenbergs uskarphetsrelasjoner i RST

Analysen her er tar opp den delen av RST som har som mål å formidle Heisenbergs uskarphetsrelasjoner. Omfanget i læreboka er på to læreboksider.

I RST blir elevene introdusert for Heisenbergs uskarphetsrelasjon under overskriften «Kvantemekanikk». Kapittelet starter med å presentere begrensninger i Bohrs atommodell som grunnleggende motivasjon bak Schrödinger og Heisenbergs «atomteorier» i 1925 og 1926, som til sammen la grunnlaget for kvantemekanikk. Hvorvidt det er riktig at de ble utviklet som atomteorier kan diskuteres. Heisenbergs matrisemekanikk kommer riktig nok fra frekvensene til emisjonsspektrene til atomer (Sakurai & Tuan, 2010). Det er vanskeligere å

argumentere for at Schrödingers bølgelikning er ment som atomteori ettersom den tar utgangspunkt i de Broglies hypotese (Dunningham & Vedral, 2011). Uavhengig av hvordan matrise- og bølgemekanikk ble introdusert kan det være misvisende å omtale det som atomteori. Kvantemekanikk beskriver mye mer enn bare atomer.

Før selve uskarphetsrelasjonen blir presentert blir det slått fast at det ikke finnes noen grenser for hvor nøyaktig bestemt fysiske størrelser kan være i den newtonske mekanikken. Deretter blir Heisenbergs posisjon-bevegelsesmengde-uskarphet omtalt som at det i prinsippet er umulig å bestemme fart og posisjon til en partikkel samtidig, noe som stemmer godt overens med beskrivelsen til Hemmer (2005) gjengitt i kapittel 2.5.1. Slik skiller det mellom kvantemekanikk og newtonsk mekanikk helt fra starten av.

Etter at det har blitt fastsatt at det ikke er mulig å bestemme farten og posisjonen til en partikkel samtidig fortsetter teksten med:

«Fra likninger i kvantemekanikken utledet han et prinsipp som sier at hvis vi bestemmer posisjonen til en partikkel med stor nøyaktighet, fører det til at bevegelsesmengden blir mer ubestemt. Motsatt vil en bestemmelse av bevegelsesmengden med stor nøyaktighet føre til at posisjonen blir ubestemt. Heisenberg kom frem til at det er en nedre grense for produktet av usikkerhetene i samtidig observasjon av en partikkels posisjon Δx og bevegelsesmengde Δp .» (Jerstad et al., 2014, s. 289)

I dette utdraget fra teksten kommer det frem at læreboka først velger å bruke ordene «ubestemt» istedenfor «uskarp» for å beskrive uskarphetene i posisjon og bevegelsesmengde. Deretter fortsetter RST med å omtale Δx og Δp som «usikkerhetene» i partikkelens posisjon og bevegelsesmengde.

I beskrivelsen av energi-tid-uskarpheten blir det påstått av ulikheten beskriver relasjonen mellom usikkerhetene i samtidig bestemmelse av tidspunktet Δt for observasjonen av en partikkel og partikkelens energi ΔE . Som diskutert i kapittel 2.5.2 mener Griffiths (1994) at dette er en vanlig feiltolkning av ulikheten. Bortsett fra en matematisk fremstilling med en kort beskrivelse blir ikke energi-tid-uskarpheten kommentert mer i læreboka.

RST har ingen klar definisjon av hva uskarphetene, eller «usikkerhetene», Δx og Δp er. Læreboka omtaler det kun som usikkerhetene av posisjon og bevegelsesmengde, en fremstilling som Griffiths (1994) mener er svært unøyaktig. Det forekommer ingen videre utdyping av hva en «usikkerhet» er før posisjon-bevegelsesmengde-uskarpheten og energi-tid-uskarpheten blir fremstilt som matematiske ulikheter. Det gis heller ikke konkrete forklaringer av variablene som inngår i dem i etterkant.

Når leseren har blitt kjent med den matematiske fremstillingen blir det fremlagt et eksempel på hvordan man kan bruke posisjon-bevegelsesmengde-uskarphetene til å beregne «usikkerheten i posisjonen» til ei kule og et elektron. Eksempelet starter med en antakelse av at vi kjenner til bevegelsesmengden til ei kule og et elektron med gitte

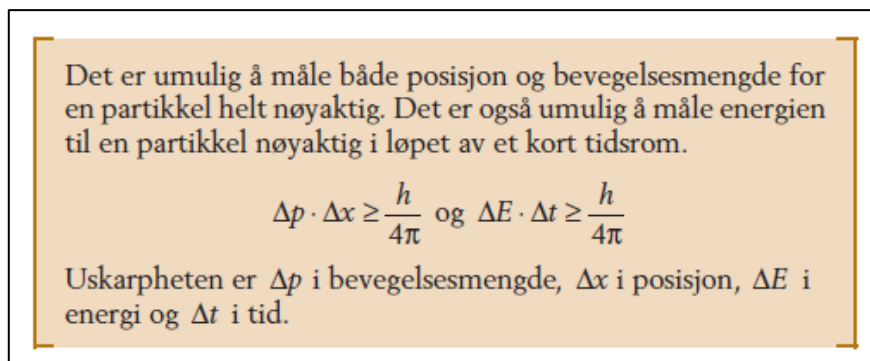
«usikkerheter». Verdiene for disse uskarphetene settes så inn posisjon-bevegelsesmengde- uskarpheten, og resultatet er at vi finner «den minste usikkerheten i posisjonen» til elektronet Δx_e og kula Δx_k : $\Delta x_e = 3,1\text{nm}$ og $\Delta x_k = 5,1 \cdot 10^{-32}\text{m}$. Matematisk sett er dette enkle beregninger. Utfordringen ligger i å kunne tolke de svarene som man får. Som kommentar står det derfor avslutningsvis nevnt at «usikkerheten i posisjonen» til kula er neglisjerbar, og at den for elektronet er omtrentlig 30 ganger diameteren til et hydrogenatom.

Avslutningsvis blir uskarphetsrelasjonens praktiske betydning diskutert. Her poengteres det at en nøyaktig måling av fart kan føre til at posisjonen får stor usikkerhet i samme tidspunkt. For å kunne beregne banen til en partikkel er man nødt til å kunne vite begge verdiene samtidig. Denne argumentasjonen brukes for å fortelle at det er umulig å beregne banen til en kvantepartikkel. Avsnittet oppsummeres med: «Vi må erkjenne at for disse partiklene må vi velge mellom presis måling av fart eller posisjon ved et tidspunkt, og at banen til partiklene derfor ikke kan bestemmes.» Innholdsmessig er dette den samme tolkningen av uskarphetsrelasjonenes erkjennelsesmessige konsekvens som Heisenberg (1927/1983) benytter.

5.3.2 Heisenbergs uskarphetsrelasjon i ERGO

Analysen her dekker det området i ERGO som omhandler Heisenbergs uskarphetsrelasjoner. Omfanget av temaet er halvannen læreboksider.

ERGO starter delkapittelet om uskarphet med å kort fortelle at prinsippet ble lansert i 1927 av Heisenberg. I marginen ved siden av introduksjonen har ERGO skrevet en kort definisjon av uskarphet. I denne definisjonen blir det poengtert at «Vi bruker begrepet *uskarphet* istedenfor usikkerhet, ettersom uskarpheten *ikke* har noe med måleteknikk å gjøre.» Det blir også fortalt at uskarphetene er tilfeldigheter som det er umulig å komme utenom. Dette er et så viktig del av uskarphetsrelasjonene at det gjerne kunne ha vært plassert inn i hovedteksten istedenfor å være plassert i marginen. Heisenbergs uskarphetsrelasjoner blir konkretisert i en egen beige boks vist i Figur 5:1.



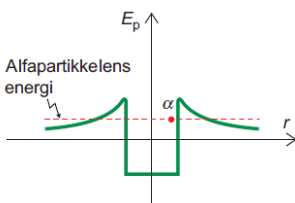
Figur 5:1: ERGOs definisjon av Heisenbergs uskarphetsrelasjoner

I ERGOs definisjon av Heisenbergs uskarphetsrelasjoner blir det sagt at man ikke kan måle posisjon og bevegelsesmengde nøyaktig. Denne påstanden er korrekt, men den passer

bedre til å beskrive en følge av posisjon-bevegelsesmengde-uskarpheten enn hva den faktisk betyr: Usikkerheten forteller oss at vi ikke kan ha en bølgefunksjon som beskriver både posisjon og bevegelsesmengde med skarpe verdier (Gasiorowicz, 2003).

I en eksempel-boks med overskriften «Eksempel 8: Uskarphet og determinisme» blir posisjon-bevegelsesmengde-uskarpheten fremstilt med en makroskopisk analogi. Det er basert på en bil som kjører forbi et kamera. Om man har en kjent lukketid på kameraet, kan man regne bakover og finne farten med en gitt nøyaktighet. Med lang lukketid får man et bedre estimat av farten, men posisjonen til bilen på bildet blir mer uskarp. Kort lukketid gir et skarpt bilde, men det er tilsvarende vanskeligere å si noe om bilens hastighet. Etter presentasjonen av analogien blir det presisert at det i tilfellet med bilen er dårlig måleutstyr som er årsaken i uskarphetene. Dette blir så sammenlignet med uskarphetsrelasjonene, og det understrekes at det ikke er måleutstyret som gir uskarpheter i kvantefysikken. En slik poengtering av både likheter og ulikheter er viktig for å forhindre misforståelser ved bruk av analogier (Angell et al., 2011). Eksempelen oppsummerer med at «En partikkel har rett og slett ikke en veldefinert posisjon og bevegelsesmengde samtidig.» Dette er en mer presis definisjon av posisjon-bevegelsesmengde-uskarpheten enn den som blir brukt i ERGOs definisjon.

I definisjonene av uskarphetsrelasjonene vist i Figur 5:1 forteller ERGO mener at energi-tid-uskarpheten forteller at det er «umulig å måle energien til en partikkel nøyaktig i løpet av et kort tidsrom». Dette er en feiltolkning ettersom tidspunktet for målingen ikke er en dynamisk, målbar egenskap av systemets tilstand (Griffiths, 1994). Energi-tid-uskarpheten blir brukt i en eksempelboks, «Eksempel 9: Radioaktivitet» vist i Figur 5:2, til å forklare tunneleffekten og radioaktivt henfall. I eksempelet blir det beskrevet en alfapartikkel i en energibrønn. For at alfapartikkelen skal komme ut av denne energibrønnen, og bli frigjort fra atomkjernen, er den tilsynelatende avhengig av å bli tilført energi. ERGO forteller at for at partikkelen skal komme ut av brønnen så kan den faktisk låne en energimengde ΔE ut av ingenting så lenge den tilbakebetales i løpet et kort tidsrom Δt . En slik tolkning har ifølge Griffiths (1994) ingen ting med virkeligheten å gjøre.



9-17 Tunneleffekt. En alfapartikkel er nede i en energibrønn i atomkjernen.

Eksempel 9: Radioaktivitet

En alfapartikkel i en radioaktiv atomkjerne befinner seg i en *energibrønn*. Alfapartikkelen har ikke nok energi til å ta seg over «kanten» av brønnen, men likevel er det en viss sannsynlighet for at den plutselig befinner seg på utsiden. Hvor fikk den energien fra? Et mulig bilde kan være at den beveget seg tvers gjennom vegg i brønnen. Derfor kaller vi også fenomenet for *tunneleffekten*. Hvis observasjonstiden Δt er liten, blir uskarpheten i partikkelens energi stor. Det betyr at alfapartikkelen kan «låne» en energi ΔE ut av ingenting en kort tid Δt uten at det blir «oppdaget», forutsatt at energilånet er *mindre* enn $h/(4\pi \cdot \Delta t)$. Når alfapartikkelen har kommet seg ut av brønnen, leverer den energien tilbake. Fra utsiden ser det ut som om alfapartikkelen plutselig kom seg fri fra atomkjernen, samtidig med at energiloven er oppfylt.

Figur 5:2: ERGOs forklaring av tunneling med hjelp av energi-tid-uskarpheten

Uskarphetene beskrives matematisk i ERGOs definisjon av Heisenbergs uskarphetsrelasjoner, som vist i Figur 5:1. I forkant av denne definisjonen blir det beskrevet at en uskarphet er noe grunnleggende ved naturen og at det innebærer tilfeldigheter. Til de matematiske modelleringene fremgår det ikke hvordan man måler en uskarphet, eller hva eventuelle numeriske verdier til en uskarphet forteller.

Delkapittelet om uskarphetsrelasjonene presenterer to gode eksempler på uskarphetsrelasjonenes fundamentale usikkerheter. Det først eksempel forteller at vi ikke kan si nøyaktig hvor et elektron befinner seg, men at vi kan beregne sannsynligheten for å finne den i et visst område. Det andre eksempelet forteller oss at vi ikke kan fortelle nøyaktig når et eksitert atom faller ned til grunntilstanden, men at det er mulig å beregne sannsynligheten for at det skjer i løpet av et visst tidsintervall. Eksemplene beskriver med dette hvordan begge uskarphetene kan tolkes. Hensikten med eksemplene er å poengtere at uskarphetene ikke kommer av mangel på informasjon, men er en del av selve naturen. I ERGO defineres begrepet «determinisme», og læreboka forklarer at kvantefysikken bryter med vår intuitive forståelse av en deterministisk verden. Argumentet for dette bruddet er her at vi ikke kan kjenne til alle startverdiene til et system. Vi kan kun fortelle om sannsynlighetene for ulike verdier. Denne argumentasjonen er tilnærmet identisk med den opprinnelige tolkningen til Heisenberg (1927/1983). Avslutningsvis forteller ERGO at Einstein ikke likte denne tolkningen og at han mente at det måtte finnes en fysikkteori med skarpe tilstander. Med et slikt avsnitt referer ERGO til tankeeksperimenter som for eksempel Einsteins fotonboks og striden mellom Einstein og Bohrs tolkninger av kvantefysikken.

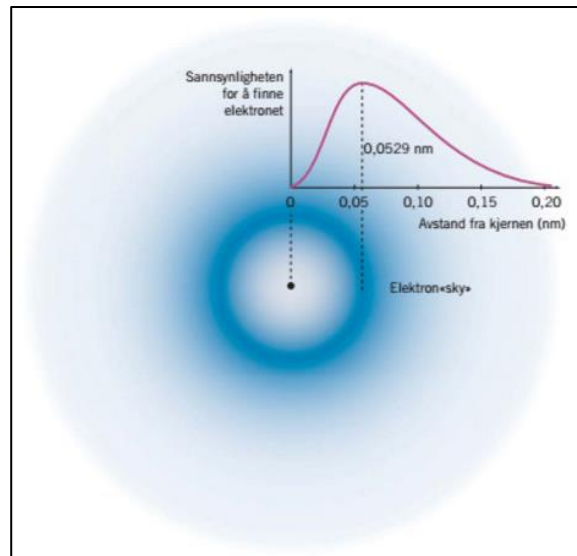
5.4 Sannsynlighetsfordeling i lærebøkene

Begge lærebøkene tar ut sannsynlighetsfordeling som egne temaer innenfor kvantefysikk. Det er ikke direkte relatert til læreplanmålene, men kan ses på som en nødvendighet for å kunne forstå hva det vil si at en fysisk egenskap er uskarp. Det er også viktig å kjenne til sannsynligheters rolle i fotoners vekselvirkninger med polarisasjonsfiltre.

5.4.1 Sannsynlighetsfordeling i RST

Som med uskarphetsrelasjonene er denne delen av analysen satt av til RSTs beskrivelse av sannsynlighetsfordelinger i kvantefysikk. Omfanget er på omtrent to sider.

RST har valgt å presentere kvantemekanikkens sannsynligheter i etterkant av uskarphetsrelasjonene. Her blir det sagt at man ikke kan vite hvor et elektron omkring et hydrogenatom befinner seg, men at man kan beregne sannsynligheter for hvor elektronet befinner seg i forhold til atomkjernen. For å forklare dette blir det brukt en figur med skravert blått felt som viser sannsynligheten for å finne elektronet i ulike områder omkring atomkjernen, som vist i Figur 5:3. Dette er i og for seg en delvis korrekt beskrivelse, men RST bruker her en semi-klassisk fremstilling som ikke gir et korrekt bilde av virkeligheten. Ifølge kvantemekanikken har elektronet en udefinert posisjon, noe som vil si at den ikke har en bestemt posisjon før det blir utført en måling av den. I RST blir det derimot fremstilt som at elektronet har en posisjon, men vi kan bare ikke si hvor uten å måle. Etter denne tolkningen er sannsynlighetsfordelingen kun et hjelpemiddel for å kunne forutsi hvor det er mest sannsynlig å finne elektronet.



Figur 5:3: RST sin fremstilling av sannsynligheten for hvor elektronet befinner seg i forhold til hydrogenkjernen

I et annet eksempel beskriver RST hva som skjer når elektroner blir skutt mot en dobbeltpalte. Her benytter læreboka den samme tolkningen av sannsynligheter som ble beskrevet i forrige avsnitt. Et eksempel på dette er påstanden «Vi kan ikke forutsi hvilken spalte partikkelen kommer til å gå gjennom eller hvor elektronet treffer skjermen bak spaltene.» Sitatet viser at RST mener et bestemt elektron vil gå gjennom en bestemt spalte. Dette stemmer ikke overens med vår tolkning av kvantefysikken som forteller oss at det er meningsløst å diskutere hvilken spalte elektronene går gjennom. De vil være i en superposisjon av å gå gjennom begge spaltene (Dunningham & Vedral, 2011; Hemmer, 2005).

5.4.2 Sannsynlighetsfordeling i ERGO

Analysen her er tar opp den delen av ERGO som beskriver sannsynlighetsfordelinger i kvantefysikk. Omfanget er opprinnelig på én lærebokside.

I ERGO starter kapittelet om sannsynligheter i kvantefysikk med å repetere det som ble fortalt i kapittelet med uskarphetsrelasjonene, nemlig at kvanteverdenen er uskarp. Derfor må man i kvanteverdenen beskrive verden med sannsynligheten for ulike utfall. For å utdype dette tar læreboka i bruk et eksempel som skal forklare hva kvantemekanisk sannsynlighet er, et eksempel som tar opp nesten hele kapittelet om sannsynlighet.

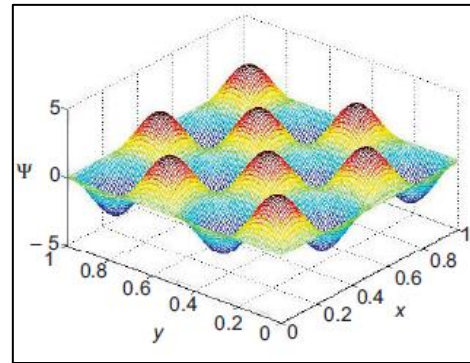
I «Eksempel 10: Ekte sannsynlighet» blir eleven først presentert for et fiktivt veikryss. I veikrysset vil noen biler kjøre rett frem, andre vil svinge til høyre eller til venstre. Hvis du nå er en trafikkplanlegger trenger du ikke vite hvorfor bilene kjører bestemte veier. Eksempelet

antar at du gjennomfører en måling og finner ut hvor stor andel som velger de ulike kjøreretningene. Eksempelen forteller at du kan bruke andelene for å bestemme sannsynligheten for at en bil kjører i en bestemt retning, men at dette ikke er ekte sannsynlighet. Hadde du spurt sjåføren på forhånd hadde du visst at resultatet er forutbestemt for deg. Det du observerer er bare en tilsynelatende sannsynlighet, en statistisk sannsynlighet. Når eksempelet så erstatter bilene med «partikler som kan befinne seg i tre forskjellige kvantetilstander» og antar at vi har samme sannsynlighetsfordeling vil situasjonen være omtrentlig samme som med bilene. Forskjellen er at partiklene, i motsetning til sjåførene av bilene, ikke har bestemt hvilken vei de skal ta i krysset på forhånd. Eksempelen fortsetter så med å fortelle at «i kvanteverdenen er det også mulig for hver enkelt partikkel å befinne seg i en *blandingstilstand*, der vi bare kan beregne *sannsynligheten* for at partikkelen gir et bestemt utslag i måleapparatet». Denne blandingstilstanden blir omtalt som en «*superposisjon*» av alle tre mulige tilstander. ERGO mener at det kun er ved måling av partikler som befinner seg i en superposisjon at det finnes «ekte tilfeldighet».

Eksempelen som ble beskrevet i forrige avsnitt sammenligner statistisk sannsynlighet med kvantemekanisk sannsynlighet. Ved å fortelle hva som er likt når man ser på sannsynligheten for ulike utfall for bilene og partiklene, samtidig som man tydeliggjør hvordan kvantefysikken skiller seg fra den makroskopiske verden, blir skillet mellom den makroskopiske analogien og kvantefysikken tydeliggjort (Angell et al., 2011).

I løpet av eksempelet med ekte sannsynlighet blir det introdusert to nye, viktige begreper fra kvantefysikken. Det første er «kvantetilstand». I eksempelet er det tre kvantetilstander som vil gi tre ulike resultater ved måling. Foruten å fortelle at vi kan måle ulike verdier som tilsvarer ulike kvantetilstander blir ikke begrepet forklart mer utdypende. Indirekte kan dette tolkes som at en kvantetilstand inneholder informasjon om partikkelens egenskaper, men det blir ikke fortalt eksplisitt i teksten. Det andre begrepet som introduseres i eksempelet er «superposisjon». I teksten blir det forklart at når en partikkel befinner seg i en blandingstilstand av flere kvantetilstander vil den befinne seg i en superposisjon. Ved måling av en partikkel i superposisjon vil et måleapparat kun gi en bestemt verdi, hvor verdien blir tilfeldig bestemt utfra en sannsynlighetsfordeling. Dette er en ganske enkel og presis forklaring av superposisjonsprinsippet, en forklaring som ligner den Dirac (1947) benytter i sin berømte lærebok i kvantefysikk.

I margen ved siden av eksempelet med ekte sannsynlighet er det en figur som skal illustrere sannsynlighetsfordeling med hjelp av tredimensjonal graf vist i Figur 5:4. I den tilhørende bildeteksten stilles spørsmålet «Hva vil det si at at posisjonen til en partikkel er uskarp?». Det står skrevet at vi kan beskrive posisjonen til partikler med en bølgefunksjon, og at figuren beskriver posisjonen til et elektron som er fanget i en boks. I grafen betyr stor amplitude at sannsynligheten for å finne elektronet er høy. I figurteksten kommer det avslutningsvis frem at et elektron ikke er en kule med entydig posisjon, og at det er meningsløst å forsøke å snakke om at elektronet har en bestemt posisjon før det utføres en måling.



Figur 5:4: ERGOs fremstilling av bølgefunksjonen til et elektron i en boks

Figuren og den tilhørende figurteksten har ikke direkte tilknytning til innholdet som blir gjennomgått i

eksempelet, men de gir nyttig tilleggsinformasjon. Denne figuren er med å tydeliggjøre at uskarpheter i realiteten beskriver sannsynlighetsfordelinger, samtidig som den gjør leserne oppmerksomme på at det er meningsløst å snakke om skarpt definerte verdier før det faktisk er gjennomført en måling. Dette er en komprimert og presis beskrivelse som inneholder viktige sider av kvantemekanikken beskrevet i kapittel 2.4.

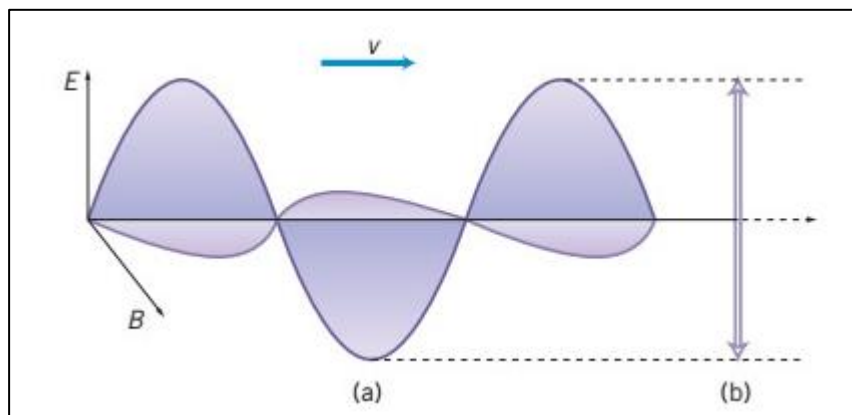
5.5 Polarisering i lærebøkene

Polarisering er ikke nevnt direkte i læreplanmålene (Utdanningsdirektoratet, 2006). Men ettersom sammenfiltrede fotoner er med i læreplanen vil også det være nødvendig for lærebøkene å forklare hva fotoners polarisasjon er. På grunn av polariseringens viktige rolle har den i denne analysen blitt skilt ut fra delen av lærebøkene som omhandler sammenfiltrede fotoner.

5.5.1 Polarisering i RST

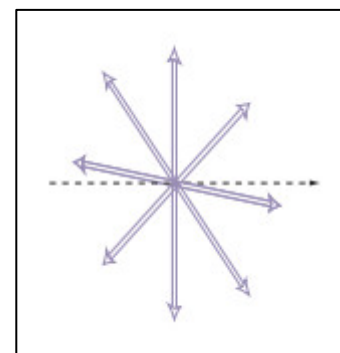
Denne delen av analysen dekker den delen av RST som beskriver polarisasjon. Omfanget i læreboka er på omtrent halvannen læreboksider.

RST starter under overskriften «Polarisasjon» å beskrive lys som elektromagnetiske bølger. Deretter forteller læreboka at disse bølgene består av elektriske og magnetiske felt som står vinkelrett på hverandre og bølgens fartsretning, der det i hovedteksten blir henvist til en figur «(a)» som er gjengitt her i Figur 5:5. Figuren har også markert polarisasjonsretningen (b). Både figurteksten og hovedteksten forteller leseren at dette er «utslagsretningen til det elektriske feltet» og at det kalles for polarisasjonsretningen til en elektromagnetisk bølge. Dette er en kort og presis definisjon av polarisasjon.



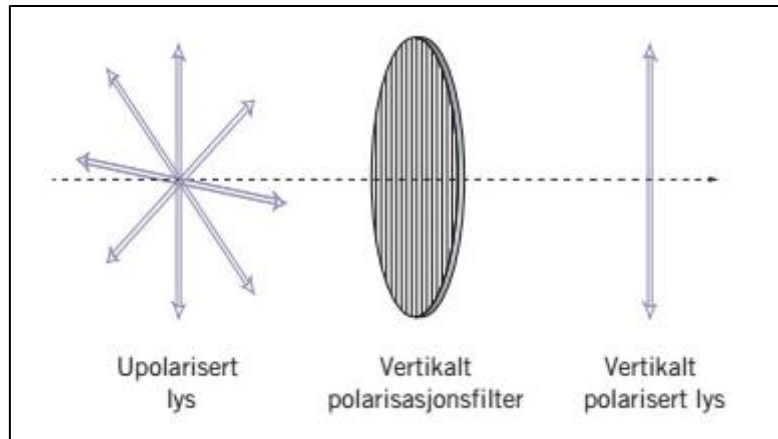
Figur 5:5: RST sin figur som viser sammenheng mellom de elektriske og magnetiske felts retning og bølgens bevegelsesretning.

Etter en kort beskrivelse av hva lysets polarisasjon er blir leserne av RST introdusert for upolarisert lys. Læreboka forteller at lys som kommer fra lyskilder som sola og vanlige lamper «har alle mulige polarisasjoner», og det henvises til en figur i marginen som viser upolarisert lys, se Figur 5:6. Den tilhørende figurteksten forteller at i upolarisert lys kan det elektriske feltet svinge i hvilken som helst retning. En måte å tolke denne beskrivelsen av upolarisert lys er å tenke seg at alle fotonene har en polarisasjon, men at lyset samlet sett er statistisk upolarisert. Alternativt kan figurteksten også gi et inntrykk at lyset har en polarisasjon, men at det varierer hvilken retning polarisasjonen er bestemt til ulike tidspunkt. Dette kan beskrives som en kaotisk polarisasjonsretning. Ingen av disse forklaringene gir en tilfredsstillende forklaring av upolarisert lys. Forklaringen av upolarisert lys i RST er svært kort og mangelfull. Det må kunne forventes bruk av en form for superposisjon for å kunne forklare fenomenet (se kapittel 2.6.3).



Figur 5:6: «Upolarisert lys» i RST

Det siste som blir forklart om polarisert lys i RST er hvordan lys vekselvirker med polarisasjonsfiltre. Læreboka forteller at upolarisert lys kan polariseres med hjelp av et polarisasjonsfilter. I dette tilfellet blir det sagt at filteret «bare slipper igjennom det lyset hvor E -feltet svinger i en bestemt retning». Det blir ikke sagt noe om hvor stor andel av det upolariserte lyset som slippes gjennom. For å illustrere fenomenet blir det brukt en illustrasjon som er gjengitt i Figur 5:7. Denne figuren henvises det til i hovedstoffet.



Figur 5:7: RST sin illustrasjon av hva som skjer når upolarisert lys sendes gjennom et polarisasjonsfilter

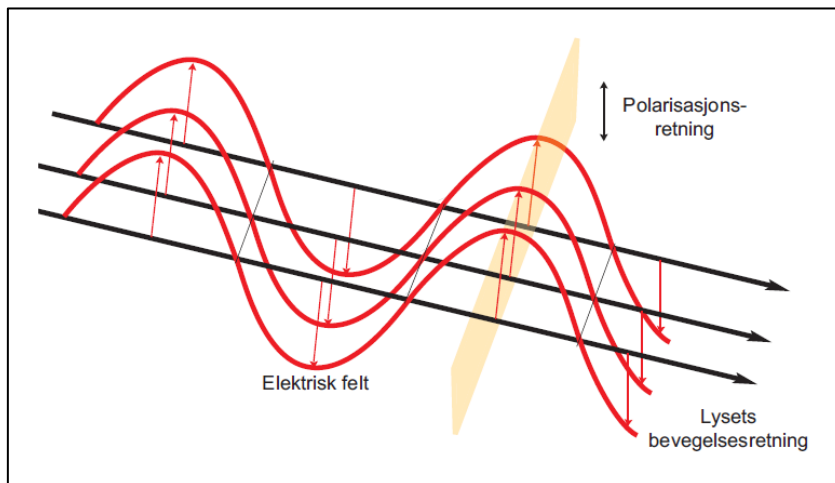
Læreboka fortsetter med å forklare at vertikalt polariserte fotoner slipper gjennom vertikalt polariserte polarisasjonsfiltre og blir blokkert av horisontale polarisasjonsfiltre. Deretter forteller den at et foton som har vinkelen 45° i forhold til polarisasjonsfilteret har 50% sannsynlighet for å slippe gjennom filteret, og at fotoner som slippes igjennom får angitt polarisasjon parallelt med filteret. RST går ikke inn på hvorfor det er slik, men skriver at «Vi kan ikke komme inn på årsaken her». Avslutningsvis gir læreboka to eksempler på hvordan vi bruker polarisasjonsfiltre i hverdagen. Her blir solbriller med polarisasjonsfilter trukket frem som et eksempel, og en tilhørende illustrasjon viser hvordan to polariserte brilleglass lagt 90° i forhold til hverandre ikke slipper gjennom noe lys. I en blå ramme, av typen som markerer ekstrastoff, står det en forklaring på hvordan brilleglass med ulik polarisasjon brukes for å se 3D-film.

5.5.2 Polarisering i ERGO

Analysen her dekker ERGOs beskrivelse av polarisering. Omfanget av polarisering i læreboka er to og en halv læreboksider.

For å kunne lære eleven om sammenfiltrede fotoner starter ERGO sitt delkapittel om sammenfiltrede fotoner med å beskrive elektromagnetiske bølger. I teksten gis det en kort og presis beskrivelse av at lys er svingninger i det elektriske og magnetiske feltet, der vektorene til de elektriske og magnetiske svingningene står vinkelrett på hverandre og lysets fartsretning. I marginen er det en tilhørende figur som visuelt viser forholdet mellom feltretningene og fartsretningen. Figurteksten beskriver det samme som hovedteksten. Forskjellen er at figurteksten ikke bruker vektorer i forklaringen.

Et annen kriteria for at elevene skal lære om fotoners sammenfildrede polarisasjon er at de er kjent med hva det vil si at et foton er polarisert. ERGO definerer lysets polarisasjon som retningen til svingningene til det elektriske feltet, noe som betyr at polariseringen er vinkelrett med de magnetiske svingningene og lysets fartsretning. For å visualisere dette blir det brukt en figur med tilhørende tekst som forteller at figuren viser sammenhengen til lysets bevegelsesretning, det elektriske feltets retning og polarisasjonsretningen. Lærebokas figur er her gjengitt i er Figur 5:8. Figuren er enkel oppbygd og tilbyr en enkel visualisering av det som står i teksten.

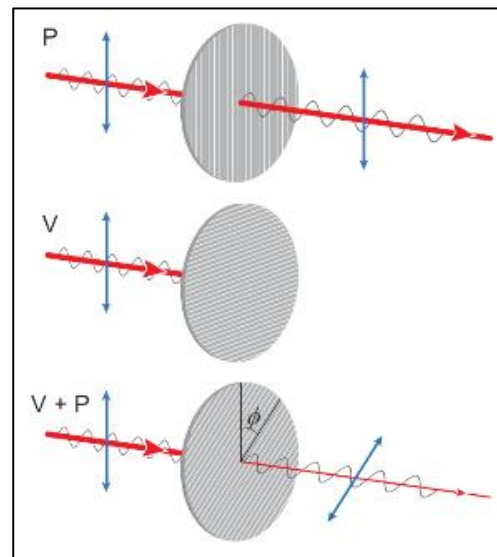


Figur 5:8: ERGOs figur som viser sammenhengen til lysets bevegelsesretning, det elektriske feltets retning og polarisasjonsretningen

Læreboka forteller så at de fleste lyskilder sender ut upolarisert lys. Upolarisert lys beskrives som lys hvor «det elektriske feltet svinger i alle retninger». Denne forklaringen kan minne om Dirac (1947) sin beskrivelse som forteller at upolariserte fotoner er i en superposisjon av alle mulige retninger. Forskjellen mellom disse beskrivelsene av upolarisert lys er at ERGO ikke forteller at polarisasjonen er udefinert. At elevene har lite kjennskap til superposisjonsbegrepet fra før av gjør det lite sannsynlig at de tolker ERGOs beskrivelse som identisk med Diracs. Derimot kan det virke som om ERGO beskriver lys i form av klassiske elektromagnetiske bølger med kaotisk polarisasjon i alle retninger. Dette inntrykket forsterkes av at det på et senere tidspunkt i lærebokteksten står: «Nå vil vi tenke på lyset som en strøm av fotoner», et sitat som forteller at det ikke har blitt tatt hensyn til lys som fotoner tidligere. Det er kjent at når først en misforståelse har blitt innarbeidet kan det være utfordrende å gjøre om på tolkningen (Olsen, 1999). Det er derfor problematisk med ufullstendige beskrivelser som ERGOs beskrivelse av upolarisert lys, ettersom ufullstendige forklaringer har lett for å føre til at elever misforstår innholdet (Ayene et al., 2011). For å gi en tydelig fremstilling er det hensiktsmessig å bruke en beskrivelse som inneholder begrepet superposisjon. Læreboka har tidligere benyttet dette begrepet, og den benytter det også senere. Det er derfor vanskelig å argumentere for at superposisjon ikke skal benyttes til å forklare upolarisert lys.

Etter å ha redegjort for både polarisert og upolarisert lys bytter fokuset over til enkelte fotoner og deres interaksjon med polarisasjonsfiltre. ERGO beskriver at upolarisert lys som blir sendt gjennom et polarisasjonsfilter vil få halvert intensitet, noe som betyr at det er halvparten så mange fotoner igjen. Det fortelles også at de fotonene som slippes gjennom filteret vil bli polarisert i polarisasjonsfilterets retning. Lærebokteksten gir ingen begrunnelse av hvorfor det er slik. Boka inneholder ingen presis beskrivelse av upolarisert lys. Det er derfor ikke overraskende at det mangler en beskrivelse av et enkelt upolarisert fotonets vekselvirkning med polarisasjonsfiltre.

Til sist gjør læreboka rede for hvordan fotoner med bestemt polarisasjon vekselvirker med polarisasjonsfiltre. ERGO forteller at fotoner som er polarisert i polarisasjonsfilterets retning slippes gjennom filteret, og deretter at fotoner som er vinkelrett polarisert relativt filteret blir blokkert. Diskusjonen fortsetter med å beskrive hva som skjer dersom fotoner med en vilkårlig vinkel i forhold til filteret blir sendt mot det. For å forklare dette definerer læreboka to polarisasjonstilstander, P og V. Fotoner med polarisasjonstilstand P har parallell polarisasjon med filteret og tilstand V er vinkelrett på filteret. Deretter setter læreboka opp en tilstand V+P. I lærebokteksten står det en henvisning til en illustrasjon der tilstanden V+P blir vist sammen med P og V, her gjengitt i Figur 5:9. ERGO forteller at fotoner som befinner seg i tilstanden V+P kan ses på som at de er «i en tilstand av *superposisjon*. Det betyr at hvert foton er i en *blanding* av de to tilstandene P og V». Ifølge læreboka betyr dette at vi ikke kan forutsi om et foton i tilstand V+P slippes gjennom, det er kun mulig å beregne en sannsynlighet for at det kommer til å hende. Sannsynligheten er gitt av vinkelen mellom fotonet og filterets polarisasjonsakse og kan beregnes med formelen « $P(\text{slipper gjennom}) = \cos^2 \phi$ ». Læreboka beskriver polarisasjon i V+P som en superposisjon av V og P, en forklaring som gir en god fremstilling (Gasiorowicz, 2003). ERGO avslutter med å beskrive hvordan sannsynlighetene denne forklaringen inneholder bryter med determinisme: Til tross for at vi kjenner til alle fysiske verdier for et foton er det umulig å forutsi hva som skjer når fotonet treffer filteret. Det står ikke eksplisitt at dette er et brudd med prinsippene som ligger til grunn for klassisk fysikk. Poengteringen av bruddet med determinisme er likevel i tråd Angell et al. (2011) sine anbefalinger om å tydeliggjøre kvantefysikkens særegenhet.



Figur 5:9: Illustrasjon av polarisert lys som møter polarisasjonsfiltre i ERGO.

5.6 Sammenfiltrede fotoner i lærebøkene

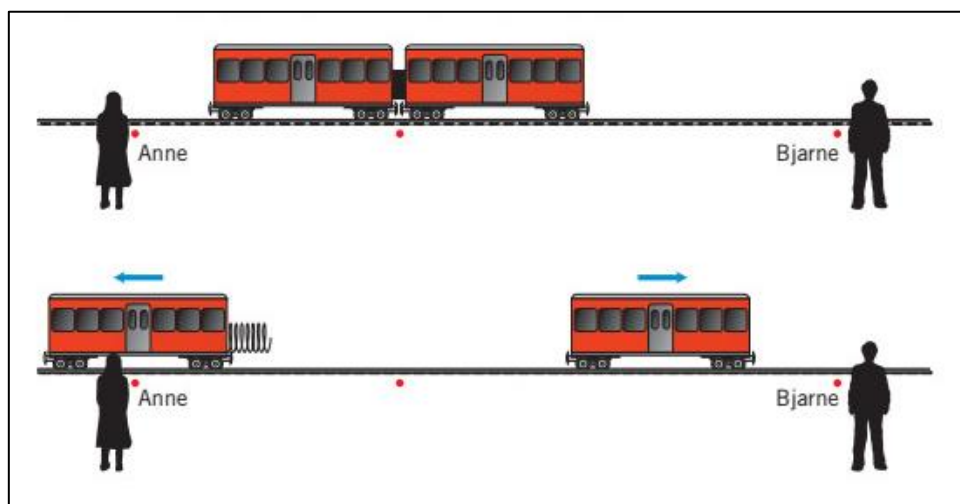
Analysen avsluttes med sammenfiltrede fotoner. Funnene fra disse kapitlene kommer frem i de neste delkapitlene.

5.6.1 Sammenfiltrede fotoner i RST

Denne delen av analysen dekker RSTs beskrivelse av sammenfiltrede fotoner. Omfanget i læreboka er på tre og en halv læreboksider.

I starten av sitt kapittel om sammenfiltrede fotoner står det i RST at boka først vil fortelle om debatten som førte til fysikernes forståelse av fenomenet sammenfiltrede fotoner. Diskusjonen i læreboka tar utgangspunkt i Einsteins syn på uskarphetsrelasjonene, og forteller at han mente at verden måtte beskrives uten uskarpheter og sannsynligheter. Bohr blir av RST presentert som motpolen til Einstein ettersom Bohr mente at blant annet posisjon og fart ikke kan bestemmes samtidig med skarpe verdier. RST skriver så at «Bohr mente også at en bestemt tilstand til en partikkel, f. eks. posisjon og fart, ikke eksisterer før man faktisk gjør en måling på partikkelen». Læreboka forteller at Einstein flere ganger forsøkte å fremsette tankeeksperimenter for å vise at kvantefysikken ikke kunne beskrive virkeligheten, men at Bohr klarte å finne feil i tankeeksperimentene hver gang.

Etter å ha forklart hva den vitenskapelige striden mellom Einstein og Bohr dreide seg om presenterer læreboka EPR-artikkelen som et tankeeksperiment som skulle vise at vi kan si noe sikkert om en partikkels posisjon og bevegelse uten å påvirke den. I utredningen av hva eksperimentet gikk ut på brukes en analogi fra klassisk fysikk, noe læreboka selv påpeker at den skal gjøre. Analogien tar for seg to identiske jernbanevogner som står i ro på en rett strekning, som vist i lærebokas illustrasjon gjengitt her i Figur 5:10. Mellom vognene er det en fjær som er trykt sammen, og denne fjæra dytter vognene fra hverandre slik at de går i hver sin retning. Anne og Bjarne står langs jernbanelinja slik at Anne står nærmere vognenes startposisjon enn Bjarne. Når Anne ser den ene vogna passere vil hun ifølge RST umiddelbart kunne si hvor Bjarnes vogn befinner seg. Hun kan også måle farten og bestemme farten til den andre vogna. Poenget med analogien er at vi kan vite hvor Bjarnes vogn er uten å ha

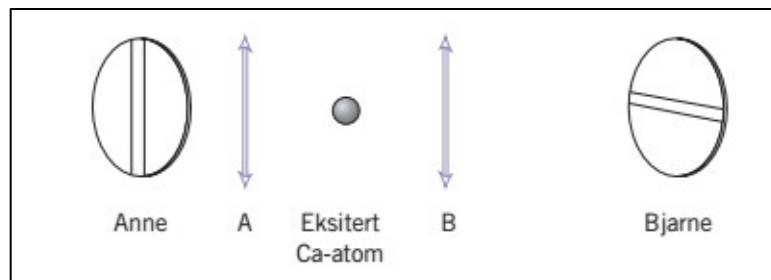


Figur 5:10: RST sin klassiske analogi av EPR-artikkelens innhold

kunnet påvirket den på noen måte når vi opererer med klassisk fysikk. RST forteller så at dersom vi byttet ut vognene med to atomer ville man i kvantefysikken si at atomene ikke har noen posisjon før den har blitt målt. Læreboka setter med denne analogien opp et paradoks som tilsier at vi vet posisjonen til den andre partikkelen til tross for at det ikke er mulig ifølge kvantefysikken. Dette tilsynelatende paradokset benyttes til å vise at det manglet noe i kvantefysikk. Boka diskuterer altså ikke brudd på uskarphetsrelasjonene slik som den originale EPR-artikkelen gjør. Til tross for at analogien tar ikke tar utgangspunkt i den utledningen som vi finner i Einstein et al. (1935) sin originale artikkel, har den samme konklusjon: Kvantefysikken er tilsynelatende ufullstendig. Undersøkelser tyder på at elever ofte blir mer motivert når de møter på noe som kan virke mystisk og tilsynelatende uforklarlig (Bungum et al., 2015). De kan da bli interessert i å undersøke og forstå hvorfor det er slik. Læreboka bruker dette som motivasjon til å starte en diskusjon omkring sammenfiltring.

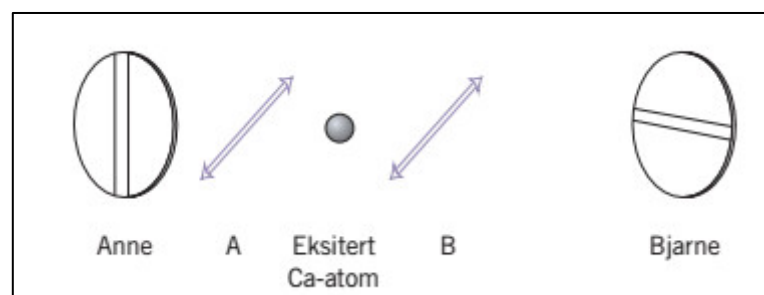
RST tar så utgangspunkt i et kalsiumatom som er preparert slik at det sender ut par av fotoner. Disse fotonparene blir ifølge læreboka sendt i motsatt retning og vil ha samme polarisasjon. Både retning og polarisasjon varierer fra fotonpar til fotonpar. Innfører så begrepet «*sammenfiltrede*» for å beskrive fotonene. Sammenfiltring beskrives som «at egenskapene er sterkt knyttet til begge fotonene samtidig, og at vi må tenke på fotonene som ett system, ikke som to separate fotoner». Denne definisjonen av sammenfiltring stemmer godt overens med Schrödinger (1935) sin definisjon i artikkelen hvor begrepet ble innført. Denne definisjonen blir oppfulgt av utsagnet: «Hvis noe skjer med det ene fotonet, sier kvantefysikken at det umiddelbart også vil skje noe med det andre». Leseren blir fortalt at en hendelse på det ene fotonet vil påvirke det andre. Det blir ikke nevnt noe om når et eventuelt brudd av sammenfiltring skjer i RST.

Læreboka henviser så til den tidligere brukte analogien med jernbanevognene. Vognene byttes ut med to sammenfiltrede fotoner som blir produsert av et kalsiumatom. For å gjennomføre målinger har Anne og Bjarne har nå hvert sitt polarisasjonsfilter som står vinkelrett på hverandre, henholdsvis vertikalt og horisontalt. RST forteller at dersom det sendes et vertikalt polarisert fotonpar mot filterne vil det ene fotonet passere Anne, og det andre fotonet blir blokkert av Bjarne. Boka forteller at med horisontal polarisasjon vil det motsatte skje. Det blir brukt en kombinasjon av tekst og bilde for å tydeliggjøre eksemplene som nevnes. Figuren som tilhører dette avsnittet i boka er vist i Figur 5:11.



Figur 5:11: RST sin illustrasjon av kalsium som sender to vertikalt polariserte fotoner mot to polarisasjonsfiltre.

RST stiller så spørsmålet: «Men hva skjer hvis fotonparet i utgangspunktet har en polarisering som er midt imellom, altså dreid 45° på begge filterne?» Spørsmålet blir oppfulgt av en illustrasjon som ligner Figur 5:11, bare at pilene som indikerer polarisasjonsretning er dreid 45° i illustrasjonen som vist i Figur 5:12.



Figur 5:12: RST sin illustrasjon av kalsium som sender to polariserte fotoner med 45° vinkel relativt polarisasjonsfiltrene.

Læreboka forklarer at kvantefysikken forutsier at hvis det første fotonet, A, passerer Anne så vet hun med en gang at foton B ikke vil passere Bjarne. RST forteller at årsaken til det er at i det foton A får vertikal polarisasjon av filteret vil også foton B få samme polarisasjon siden de er sammenfiltrede.



















Det er ikke mulig å beskrive sammenfiltrede fotoners vekselvirkninger med polarisasjonsfiltre slik som det blir gjort i RST. Forklaringen, oppsummert i forrige avsnitt, benytter fotoner med gitt definert polarisasjon. For at polarisasjonen til fotonet skal være definert må man ha gjennomført en måling, og en slik måling vil påvirke systemet slik at den sammenfiltrede tilstanden blir kollapset (Schrödinger, 1935). Det er ikke slik at et foton med

en definert polarisasjon kan forandres på avstand slik som RST forteller. Schrödinger (1935) forteller i sin forklaring av sammenfiltring at en udefinert polarisasjon, et upolarisert foton, kan få verdien skarpt definert når et sammenfiltret foton får sin verdi skarpt definert. Hvorvidt dette er beviste forenklinger gjort av forfatterne eller at konfliktene mellom RST og kvantefysikken er forårsaket av feiltolkninger av kvantefysikken vil det ikke spekuleres i her. Læreboka formidler at sammenfiltring innebærer at en hendelse en plass i rommet kan påvirke noe en helt annen plass, men forklaringen som skal vise hvorfor det er slik er mangelfull og til dels direkte feil.

At læreboka har vanskelig for å forklare hva sammenfiltring innebærer blir tydeligere om man med lærebokas syn på hva «Einstein mente». RST forteller at Einstein mente at de to sammenfildrede fotonene som blir sendt med 45° i forhold til filtrene vil ha 50% sannsynlighet for å passere filtrene, og hvilket foton som går gjennom når skjer uavhengig av hverandre. RST påstår altså at Einstein mente at noen ganger vil kun et av fotonene passere, og noen ganger vil begge passere og noen ganger vil ingen av fotonene slippes gjennom filtrene. Dette står som kontrast til den kvantemekaniske beskrivelsen av fenomenet. Denne beskrivelsen av Einsteins meninger er lite korrekt etter Pais (1991) syn. Einstein mente at verden er deterministisk, der skulte variabler gir fotonene en skarp definert tilstand fra øyeblikket de sendes ut fra kalsiumatomet. Ut fra denne beskrivelsen ville man observert de samme vekselvirkningene med polarisasjonsfiltrene som av RST blir beskrevet som særegen for kvantemekanikken. Skulte variabler kan forutse at kun et av fotonene vil komme igjennom i hvert tilfelle som er brukt i RST på lik linje som kvantemekanikken kan. Etter å ha beskrevet Einsteins mening om sammenfiltring forteller RST om den eksperimentelle bekreftelsen av sammenfildrede fotoner. Boka forteller at Bell presenterte den matematiske bakgrunnen i 1964 og at det først i 1972 var teknisk mulig å gjennomføre et forsøk. Videre forteller RST at forsøket viste at Aspects forsøk bekreftet sammenhengen mellom de to sammenfildrede fotonene, noe som vil si at om det ene fotonet kommer gjennom vet man at det andre ikke slippes gjennom. De eksperimentelle resultatene brukes til å fortelle at Bohr hadde rett, og at Einsteins syn på kvantefysikk var feil. I likhet med forrige avsnitt er det vanskelig å avgjøre om RST sin beskrivelse av kvantefysikken er bevisst fremstilt slik for å få frem et poeng, eller om det er mangel på forståelse av kvantefysikken som ligger bak. Fremstillingen er godt egnet til å formidle at det er et skille mellom klassisk fysikk og kvantefysikk. Dette tydeliggjør særegenheten til kvantefysikk sett i et historisk perspektiv, noe som kan gi en bedre forståelse av kvantefysikken. Problemet er at læreboka her presenterer ukorrekt informasjon for å tydeliggjøre dette.

Siste del av kapittelet om sammenfildrede fotoner blir brukt til å gi et eksempel på anvendelse av sammenfildrede fotoner. Bruksområdet som trekkes frem er kryptering. Læreboka presenterer et forenklet eksempel av hvor to agenter har hvert sitt polarisasjonsfilter som kan være montert loddrett eller vannrett, hvor polarisasjonen til agentenes filtre varierer uavhengig av hverandre. Boka forteller at agentene først foretar en

test med seks fotoner uten å fortelle hverandre hvilken retning polarisasjonsfilteret står vendt. Resultatene fra de fiktive målingene blir vist i en tabell gjengitt i Figur 5:13.

| Fotonpar nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------------------------|---|---|---|---|---|---|
| Polarisasjon til sendt foton |  |  |  |  |  |  |
| Filter til agent 1 |  |  |  |  |  |  |
| Foton slipper igjennom? | Ja | Ja | Nei | Ja | Nei | Ja |
| Filter til agent 2 |  |  |  |  |  |  |
| Foton slipper igjennom? | Ja | Nei | Nei | Nei | Ja | Ja |
| Ok til kode? | OK (likt) | Ulikt | OK (likt) | Ulikt | Ulikt | OK (likt) |

Figur 5:13: Tabellen som blir brukt av RST til å vise når det er trykt å bruke kodeoverføring sendt med sammenfiltrede fotoner.

Ifølge RST forteller tabellen hvilken polarisasjon det utsendte fotonparet har, hvilken retning polarisasjonsfiltrene til «agent 1» og «agent 2» har og om fotonene slipper gjennom. Den eneste informasjonen agentene utveksler med hjelp av tradisjonell dataoverføring er hvorvidt fotonene slipper gjennom eller ikke. Læreboka sier at likt resultat på begge filtrene betyr at det kan brukes til koding, men det forklares ikke hvorfor det er slik. RST forteller at det kun er fotonpar 1, 3 og 6 i Figur 5:13 som betyr at polarisasjonen kan benyttes til koden. Det fortelles at dersom noen avlytter overføringen vil fotonenes polarisasjon påvirkes og forandres for agent 2, og på den måten vil alle parter sitte med ulike kodesekvenser. Det man derimot ser i det simple eksempelet brukt i RST er at ettersom det kun er to polariseringsretninger som måles vil en spion kunne gjennomføre en konstant måling av fotonene fra agent 1 i én av disse retningene, for så å sende ut fotoner med den målte polariseringen til agent 2. Agent 2 får fotoner med samme polarisasjon som spionen som avlytter, og dermed også samme polarisasjon som agent 1. Ved å avlytte informasjonen som blir sendt med tradisjonell dataoverføring vil derfor en uvedkommen ha mulighet til kjenne til den fullstendige koden, uten at agentene registrerer dette.

Det er rimelig å anta at noen av elevene som forsøker å forstå RST sitt eksempel på kryptering vil bli frustrerte etter hvert. For det første er forklaringen relativt kompleks og krever nøye lesing av den tilgjengelige informasjonen for å kunne forstås. For det andre beskriver ikke lærebokteksten en kode som er umulig å knekke for uvedkommende, slik den selv hevder at den gjør. Forklaringen i seg selv er derfor overflødig, men det er ikke nødvendigvis den som er viktig. Poenget er å formidle at vi kan sende krypteringsnøkler med hjelp av sammenfiltrede fotoner, og på den måten har vi vist at selv så abstrakte fenomener som sammenfiltrede fotoner kan ha praktisk nytteverdi.

I kapittelet om sammenfiltrede fotoner er det en blå boks av typen RST omtaler som tilleggsstoff, som vist i Figur 5:14. Innholdet i den er ikke direkte relatert til sammenfiltrede fotoner, men er interessant å se på i den sammenhengen. Her blir det sagt at det egentlig ikke gir mening å si at et foton har en gitt polarisasjon før en måling. Dette blir begrunnet med at fotonet har alle polarisasjoner på en gang, noe som kalles for superposisjon. Denne beskrivelsen inneholder beskrivelser av upolarisert lys som ble etterspurt i diskusjonen i kapittel 5.5.1. Upolarisert lys slik som det beskrives her forteller også at lærebokas beskrivelse av sammenfiltrede fotoner med definert polarisering er umulig.



Figur 5:14: RSTs blå boks med tilleggsinformasjon om superposisjon og Schrödingers katt

Et annet element i den blå boksen med tilleggsinformasjon som må kommenteres er hvordan den beskriver Schrödingers katt. Den forteller at tankeeksperimentets hensikt er å forklare hva en superposisjon er. Dette kan sies å være langt ifra tankeeksperimentets opprinnelige funksjon som var å vise hvor problematisk det er å akseptere en modell som gir uskarpe og udefinerte beskrivelser av virkeligheten (se kapittel 2.4.3). Etter en kort beskrivelse av metallboksens innhold forteller RST at kvantefysikken beskriver katten som død og levende på en gang, noe som er en forenklet måte å beskrive en superposisjon på (Dunningham & Vedral, 2011). Læreboka forteller at dersom vi utfører en måling, altså undersøker hvilken tilstand katten er i ved å åpne boksen, vil superposisjonen kollapse. Her ser læreboka bort fra Bohrs tolkning. Han mente at katten til enhver tid er død eller levende ettersom geigertelleren gjennomfører en måling uavhengig av om noen åpner boksen eller ikke (Pais, 1991). Resultatet er at tankeeksperimentet fremstilles som mystisk og uforklarlig.

5.6.2 Sammenfiltrede fotoner i ERGO

Analysen her dekker det området i ERGO som omhandler sammenfiltrede fotoner. Omfanget av temaet er tre og en halv læreboksider.

Kapittelet om sammenfiltrede fotoner starter i ERGO med å definere hva sammenfiltrede fotoner er: «To fotoner er sammenfiltret når de befinner seg i én felles

kvantetilstand.» Læreboka ønsker først å gi en definisjon av sammenfiltrede fotoner, for så å forklare med hjelp av eksempel.

Læreboka fortsetter så med å forklare sammenfiltrede fotoner med hjelp av et eksempel. I margin ved siden av teksten står det at vi kan produsere sammenfiltrede fotoner med hjelp av visse typer krystaller med hjelp av en laser. I hovedteksten står det at vi vet at de sammenfiltrede fotonene beveger seg i motsatt retning med samme frekvens og polarisasjonsretning. ERGO forteller så at polarisasjonsfiltre som er vinkelrett på polarisasjonsretningen (V) til fotonene vil blokkere begge fotonene, og at polarisasjonsfiltre som er parallelle (P) slipper dem gjennom. Deretter fortsetter boka å spørre leserne hva de tror vil skje dersom vi sender et foton med 60° forskyvning mellom de sammenfiltrede fotonenes og filterets polarisasjonsakser. ERGO forteller at i et slikt tilfelle «skulle man tro at sannsynligheten for at hvert enkelt foton slapp gjennom var $1/4$, og at sannsynligheten for at begge fotonene slapp gjennom derfor var $(1/4)^2 = 1/16$. *Men slik er det ikke.*» Læreboka påstår at hvis det ene fotonet slipper gjennom så er sannsynligheten 100% for at det andre slipper gjennom siden fotonene er sammenfiltrede.

ERGO forteller selv at «Dette er svært merkelig», noe det er vanskelig å komme unna. Forklaringen tar nemlig ikke hensyn til at fotonene er sammenfiltrede, slik lærebokteksten selv hevder at den gjør. ERGO forteller om fotoner med polarisasjon i definerte retninger. Lyskilden sender ut upolarisert lys, noe som betyr at vi ikke kan kjenne til polarisasjonen til fotonene uten å ha gjennomført en måling (Dirac, 1947). ERGOs forklaring av sammenfiltrede fotoner bryter derfor sammen siden det er umulig å kjenne til fotonenes polarisasjon uten å ha brutt den sammenfiltrede tilstanden (Schrödinger, 1935). Selv om det blir gjort med feil grunnlag får eksempelet frem et viktig hovedpoeng: «*I samme øyeblikk som det første fotonet passerer et filter, får begge fotonene forandret tilstanden sin*». Dette gjelder uansett avstand mellom dem. Uavhengig av hvor mye leseren forstod av ERGOs definisjon av sammenfiltrede fotoner og forklaringen i etterkant så får leseren forklart en følge av fenomenet.

For å gjøre tydelig hvor merkelig sammenfiltrering er tar ERGO i bruk en makroskopisk sammenligning i en eksempelboks med overskriften «Eksempel 11: Sammenfiltrede kjærestepar». I eksempelet er elevene isolert fra hverandre og har ingen anelse om hva slags spørsmål som skal stilles. Elevene får tilfeldig valgt et bilde av et rødt eller blått interiør og skal svare på om de liker det med ja eller nei. Personen som utfører den fiktive undersøkelsen oppdager at kjærestepar alltid svarer det samme når de får gitt det samme spørsmålet, selv om de ikke hadde diskutert dette på forhånd. De hadde heller ingen individuell formening på forhånd av hva slags interiør de liker, altså bestemte de seg i det de fikk se bildet. Eksempelet oppsummerer fenomenet med tre punkter:

1. Før er kjærestepar får spørsmålet har ingen av de to en formening av hva de skulle svare.

2. I det tidspunktet én av dem hadde svart på spørsmålet blir svaret til den andre bestemt, selv om de ikke har mulighet til å kommunisere
3. Enigheten oppstod samtidig

Eksempelet bruker en analogimodell som viser hvordan sammenfiltring teoretisk sett kunne blitt observert som et makroskopisk fenomen. Ved bruk av analogier er det viktig å fokusere på likheter og ulikheter mellom modellen og virkeligheten (Angell et al., 2011). Dette blir i liten grad gjort i dette tilfellet. ERGO forteller at det er en «makroskopisk sammenligning», men det legges ikke vekt på hvilke likheter og ulikheter det er mellom analogien og kvantefysisk sammenfiltring. Dette er det opp til leseren selv å finne ut.

Den siste delen av ERGOs fremstilling av sammenfiltring benytter et mer historisk perspektiv. Boka starter med å omtale «EPR-forsøket» som et berømt tankeeksperiment fremsatt i 1934 av Einstein, Podolsky og Rosen. Ifølge ERGO gir EPR-artikkelen to mulige forklaringer for hvordan to sammenfildrede fotonene vekselvirker med polarisasjonsfiltrene. Den første muligheten er at de har med seg fullstendige instruksjoner for hvordan de skal vekselvirke med filtrene fra starten av, som betyr at kvantefysikken er ufullstendig. Det andre alternativet er at fotonene kan kommunisere med hverandre på lang avstand. ERGO omtaler det andre alternativet som «*ikke-lokalitet*», noe som betyr at en hendelse et sted umiddelbart kan påvirke noe et helt annet sted. Lærebokteksten forteller at Einstein og hans medforfattere mente at dette var en absurd tanke og at de derfor konkluderte med at kvantefysikken var ufullstendig. Det er sannsynlig at fremstillingen av EPR-artikkelen i ERGO er tatt med for å tydeliggjøre skillet mellom kvantefysikk og tidligere fysikkteorier, noe historiske fremstillinger skal være spesielt egnet til å tydeliggjøre (Angell et al., 2011). Problemet i dette tilfellet er at den ikke klarer å formidle en korrekt historie. Konklusjonen i ERGO er den samme som den i EPR-artikkelen, men fremgangsmåten er ulik den til Einstein et al. (1935). ERGO nevner for eksempel ikke noe om uskarphetsrelasjonenes essensielle rolle i artikkelen, men setter istedenfor større fokus på «*ikke-lokalitet*». «*Ikke-lokalitet*» blir originalt ikke engang diskutert som en mulighet, slik som ERGO påstår. EPR-artikkelen blir fremstilt som en forklaring av sammenfiltring, noe den ikke er. Historisk sett var det Schrödinger (1935) sin utforskning av EPR-artikkelen som førte til hans teori om sammenfiltring. Det læreboka formidler til leseren er at Einstein og medforfatterne mente at kvantefysikken var ufullstendig ettersom «*ikke-lokalitet*» var umulig, ikke at kvantefysikken var ufullstendig fordi de mente at uskarphetsrelasjonene kunne brytes.


EPR-artikkelen gjorde ifølge ERGO stort inntrykk på Bohr og de andre fysikerne som var interessert i kvantefysikkens filosofiske sider. Fysikere flest var ikke nevneverdig interessert, og brukte kvantefysikken i beregninger uavhengig av hvilken løsning til tankeeksperimentet som var korrekt. Læreboka forteller at det var først i 1964 at Bell utledet en måte å teste «EPR-forsøket» i praksis. Dette ble så gjennomført i 1982 av Aspect. ERGO mener at dette bekreftet at «*ikke-lokalitet*» er en realitet i kvantefysikken. Det er tydelig at læreboka ønsker å formidle hvor abstrakt bruddet med lokal virkelighet kan oppleves. ERGO velger også her å benytte en historisk vinkling for å vise hvordan en historisk

uenighet innen kvantefysikken ble avgjort av eksperimentelle resultater mange år etter at konflikten oppstod. Boka klarer å tydeliggjøre et viktig skille mellom kvantefysikk og klassisk fysikk med å diskutere konflikten det medførte.

Avslutningsvis i kapittelet om sammenfildrede fotoner er det to eksempelbokser hvor det diskuteres mulige bruksområder for sammenfiltring. Det første, «Eksempel 12: Rask kommunikasjon», beskriver hvorfor det ikke er mulig å sende informasjon raskere enn lyset. Eksempelen tar for seg to personer med hvert sitt filter, A og B. Det forklarer så at person A vrir filteret frem og tilbake for å kommunisere med B, men person B kan ikke tolke sine observasjoner uten å kjenne til retningen til filter A i hvert tilfelle. Man blir derfor nødt til å sende informasjon på tradisjonelt vis. I eksempelet, eller resten av lærebokteksten i ERGO, nevnes det noe om når sammenfiltringen brytes. Denne informasjonen er viktig for å kunne forstå at det er umulig å sende informasjon raskere enn lyset.

Det andre eksempelet som tar for seg bruksområder til sammenfildrede fotoner heter «Eksempel 13: Sikker kryptering». Eksempelen forklarer først hva kryptering er og hvorfor vi trenger kryptering. Deretter forklares det hvordan vi trygt kan sende informasjon med hjelp av sammenfildrede fotoner. Argumentet som brukes er at dersom noen avlytter informasjon som blir sendt med fotoner, så vil polarisasjonen forandres. Forskjell i polarisasjon mellom avsenders kontrollfoton og mottakers foton kan registreres slik at overføringen avsluttes.

Til slutt er det verdt å nevne at sammen med de to eksempelboksene nevnt ovenfor er det et bilde av en katt i margin som vist i Figur 5:15. I den tilhørende figurteksten fortelles det at Schrödingers katt er en fiktiv katt som befinner seg i en superposisjon av vå være død og levende. Dette blir ikke utdypet mer eller nevnt noen andre steder enn i figurteksten.

| | |
|---|---|
|  | <p>Nå tenker du sikkert at vi bare må være litt smartere når vi planlegger forsøket. Men det går faktisk an å bevise generelt at det er <i>umulig</i> å kommunisere med overlysfart ved hjelp av sammenfildrede fotoner. Uansett hvordan vi går fram, er forsøket dømt til å mislykkes på tilsvarende måte som i dette eksemplet.</p> |
| <p>9-24 Har du hørt om Schrödingers katt? Det er en fiktiv katt som befinner seg i en superposisjon av levende og død tilstand, som konsekvens av et kvanteforsøk.</p> | <p>Eksempel 13: Sikker kryptering Kan sammenfildrede fotoner «brukes» til noe? Forskerne har håp om at fenomenet kan bli brukt til å lage koder som det er umulig å knekke. Det er det mange som har forsøkt tidligere, men uten å lykkes. Hvorfor det som er uttalt med sammenfildrede fotoner?</p> |

Figur 5:15: Schrödingers katt plassert i margin ved siden av eksempel 12 og 13 i ERGO

6. Drøfting

Resultatene fra analysen blir i dette kapitlet drøftet. Formålet med drøftingen er i hovedsak å besvare forskningsspørsmålene, for så å kunne trekke en konklusjon. Lærebøkene vil først behandles separat. Kapitlet vil avsluttes med en sammenligning av lærebøkene med å oppsummere de viktigste funnene.

I drøftingen skal relevante argumenter tas med i begrunnelsene for de ulike konklusjonene som trekkes. Det gjelder argumenter som taler for og imot. Målet med å gjøre drøftingen transparent er å gjøre det enklere for lesere av oppgaven å kunne ta stilling til hvorvidt de er enige eller uenige i argumentene som benyttes. Metoden som er brukt i oppgaven, lærebokanalyse, har som største svakhet at den er subjektiv (Pingel, 2010). Det er viktig at jeg, som forfatter av oppgaven, er klar over dette.

6.1 Fysikkfaglig korrekthet i lærebøkene

Det første spørsmålet som skal besvares for å kunne trekke en konklusjon er hvorvidt lærebøkene benytter korrekte forklaringer av kvantefysikk. Resultatene fra kapittel 5.3 til 5.6 vil gi svar på hvor stor grad lærebøkene klarer dette.

6.1.1 Fysikkfaglig korrekthet i RST

RST beskriver posisjon-bevegelsesmengde-uskarpheten som en fundamental usikkerhet som forteller at dersom vi bestemmer bevegelsesmengde med stor nøyaktighet vil posisjonen bli ubestemt. Dette stemmer i stor grad overens med Hemmer (2005) sin beskrivelse av uskarpheten. Inkonsekvent begrepsbruk skaper likevel noen problemer i RST og vil bli diskutert i kapittel 6.2.1. Lærebokas beskrivelse av energi-tid-uskarpheten er et eksempel på en vanlig feiltolkning (Griffiths, 1994). Årsaken til det er at RST beskriver tid som en målbar egenskap av systemets tilstand som har en uskarphet på lik linje med systemets energi, posisjon og bevegelsesmengde, noe tid ikke er (se kapittel 2.5.2). Avslutningsvis viser RST hvordan uskarphetsrelasjonene forteller at det er umulig å forutbestemme bevegelsesbanene til kvantemekaniske partikler, noe Heisenberg (1927/1983) poengterte i sin egen beskrivelse av uskarphetsrelasjonene.

RST følger opp uskarphetsrelasjonene med en kort beskrivelse av sannsynlighetsfordelinger i kvantemekanikk. I resultatene fra analysen blir det argumentert for hvorfor læreboka har problemer med å forklare fenomenet (se kapittel 5.4.1): Læreboka bruker en semi-klassisk tolkning av partiklers posisjon hvor partikler har en posisjon, men vi kan ikke forutsi hvor den er og er avhengig av å gjennomføre en måling for å kunne avgjøre det. Forklaringen er en feilaktig beskrivelse av kvantemekanikk. I realiteten har ikke partiklene en definert posisjon før det gjennomføres en måling (Dunningham & Vedral, 2011). Det er interessant at det i kapitlet om sammenfildrede fotoner står at Bohr mente at en bestemt posisjon og fart ikke eksisterer før man faktisk gjør en måling (se kapittel 5.6.1). Det blir også fortalt i en blå boks med ekstrastoff at det ikke gir mening å snakke om en bestemt verdi før det har blitt gjennomført en måling. Læreboka har altså en blanding av to

beskrivelser av sannsynligheter i kvantefysikk, en semi-klassisk og en ren kvantemekanisk og korrekt. Læreboka fokuserer i all hovedsak på den semi-klassiske beskrivelsen, som altså er en feilbeskrivelse av kvantemekanikken.

I forklaringen sin av polarisert lys har RST en god forklaring av hva polarisasjon er (se kapittel 5.5.1). Læreboka gir også en presis beskrivelse av hva som skjer når polariserte fotoner treffer et polarisasjonsfilter. Forklaringen av upolarisert lys er derimot mangelfull. Det er ikke lett å vite hva læreboka egentlig forteller leseren om upolarisert lys. En slik ufullstendig forklaring som RST sin forklaring av upolarisert lys kan føre til misforståelser blant elever (Ayene et al., 2011). Det må likevel nevnes her at læreboka faktisk har en ganske presis beskrivelse av upolarisert lys i en blå boks med tilleggsinformasjon om Schrödingers katt (se kapittel 5.6.1). Her fortelles det at det ikke gir mening å snakke om polarisasjon før det er gjennomført en måling siden polarisasjonsretningen er en superposisjon av alle retninger. Ettersom denne forklaringen er tilleggsstoff er det rimelig å konkludere med at læreboka har en ukorrekt forklaring av upolarisert lys.

I starten av sitt delkapittel om sammenfiltrede fotoner benytter RST den historiske uenigheten som var mellom Einstein og Bohr. Læreboka gir et bilde av konflikten mellom determinisme mot kvantefysikk som stemmer godt overens med historiske kilder (Pais, 1991). Definisjonen av sammenfiltring er i tråd med Schrödinger (1935) sin beskrivelse, men læreboka mangler informasjon om når en sammenfiltret tilstand brytes. Eksempelet som brukes til å forklare hvordan sammenfiltrede fotoner vekselvirker med polarisasjonsfiltere benytter fotoner med definert polarisasjon, noe som er umulig med sammenfiltring (se kapittel 5.6.1). RST benytter også en ukorrekt forklaring om Einsteins alternativ til sammenfiltring. Læreboken forteller at Einstein mente at det ikke var noen sammenheng mellom to sammenfiltrede fotoners vekselvirkninger med polarisasjonsfiltere, mens han i realiteten mente at det var det (Pais, 1991). Einsteins reelle syn på sammenfiltring var at det var «skjulte variabler» som vi ikke kunne måle som forutbestemmer vekselvirkningene.

6.1.2 Fysikkfaglig korrekthet i ERGO

ERGO beskriver uskarphetsrelasjonene som grunnleggende prinsipper ved naturen.

Læreboka forteller at posisjon-bevegelsesmengde-uskarpheten innebærer at en partikkel ikke kan ha veldefinert posisjon og bevegelsesmengde samtidig. Beskrivelsen er presis og korrekt etter Hemmer (2005) og Griffiths (1994) sine beskrivelser av uskarpheten. Læreboka forteller også at energi-tid-uskarpheten innebærer at det er umulig å gjøre en nøyaktig energimåling i løpet av et kort tidsrom. Denne tolkningen er ifølge Griffiths (1994) en feiltolkning. Et tilhørende eksempel til energi-tid-uskarpheten forteller at man kan låne en energimengde ΔE ut av ingenting så lenge den tilbakebetales i løpet et kort tidsrom Δt . Dette eksempelet nevnes eksplisitt av Griffiths (1994) som en vanlig følge av feiltolkningen ovenfor (se kapittel 2.5.2). ERGO legger avslutningsvis vekt på at uskarphetsrelasjonene innebærer et brudd med determinisme ettersom man kun kan beregne sannsynligheter for

ulike fysiske verdier. Argumentasjonen for at dette bryter med determinisme er tilnærmet identisk med den opprinnelige tolkningen til Heisenberg (1927/1983).

Kapittelet om sannsynlighet i ERGO forklarer at kvanteverden må beskrives med sannsynligheter. Nesten hele sannsynlighetssegmentet består av et eksempel. Eksempelet beskriver forskjellen mellom statistisk, tilsynelatende sannsynlighet og kvantemekanisk sannsynlighet med hjelp av superposisjonsprinsippet. Forklaringen kan ses på som en simplifisert versjon av den som ble beskrevet i kapittel 2.4.3. En figur, gjengitt her i Figur 5:4, supplerer ERGOs beskrivelse av hvorfor vi må benytte sannsynligheter i kvantefysikk. Figurteksten forteller at uskarphetene i uskarphetsrelasjonene er sannsynlighetsfordelinger, og at det ikke gir mening å snakke om en bestemt posisjon før det er gjennomført en måling. Så lenge leseren av læreboken leser eksempelet og figuren ved siden av har ERGO en god beskrivelse av sannsynlighetenes rolle innenfor kvantefysikk.

I ERGOs forklaring av polarisert lys gis det en god definisjon av hva polarisert lys er (kapittel 5.5.2). Beskrivelsen av upolarisert lys er derimot mangelfull. Upolarisert lys blir av ERGO beskrevet som lys med polarisasjon i alle retninger, men mangel av beskrivelse av hva dette innebærer gjør at dette vil bli ansett som en ufullstendig beskrivelse. Beskrivelsen av upolarisert lys vekselvirkninger med polarisasjonsfiltre forteller kun hva som skjer med store mengder fotoner, og ikke med enkeltfotoner. ERGO har derimot en mer omfattende beskrivelse av polariserte fotoners vekselvirkninger med polarisasjonsfiltre. Boka gjengir godt hva som skjer med fotoner med polarisasjon parallelt og vinkelrett med polarisasjonsfiltre. Den forklarer også hva som skjer med polarisasjon i en vilkårlig vinkel relativt filteret. En beskrivelse som stemmer overens med forklaringen som ble brukt her i kapittel 2.6.3.

ERGO starter opp delkapittelet om sammenfiltrede fotoner med å definere fenomenet: «To fotoner er sammenfiltret når de befinner seg i én felles kvantetilstand». Dette er en kort og presis definisjon som stemmer med Schrödinger (1935) sin definisjon, og den vil bli diskutert mer i kapittel 6.2.2. Eksempelet som så brukes til å forklare hvordan sammenfiltrede fotoner vil vekselvirke med polarisasjonsfiltre benytter fotoner med definert polarisasjon, noe som er umulig (se kapittel 5.6.2). Læreboken klarer likevel å få frem poenget om at en måling på det ene filteret vil føre til en forandring av polarisasjonen til det andre. Det benyttes også en historisk fremstilling i etterkant av at fenomenet har blitt forklart. I lærebokas oppsummering av EPR-artikkelen fortelles det at tanken på at en hendelse en plass kunne påvirke noe et helt annet sted var absurd, og at kvantefysikken derfor var ufullstendig. I virkeligheten er EPR-artikkelen et tankeeksperiment som tilsynelatende viste at det er mulig å bryte uskarphetsrelasjonene (Einstein et al., 1935). Bruddet med lokal virkelighet ble ikke nevnt som et alternativ slik som ERGO påstår.

6.2 Fagbegreper i lærebokteksten

Innledningsvis ble det kapittel 1.2 formulert et forskningsspørsmål relatert til bruk av fagbegreper i lærebøkene. Det er dette som skal undersøkes i de kommende delkapitlene.

6.2.1 Fagbegreper i RST

«Uskarphet» er et viktig begrep relatert til uskarphetsrelasjonene. RST velger bort dette begrepet til fordel for «ubestemt» og «usikkerhet». Alle tre begrepene blir nevnt i starten av kapitlet, men i det meste av teksten er det kun «usikkerhet» som benyttes. Det er ikke lett å vite hvorfor dette byttet bort fra «uskarphet» blir gjort uten å spørre forfatterne selv. En av årsakene kan være et ønske om å knytte andre assosiasjoner til «uskarphet». I sin hovedfagsoppgave forteller Olsen (1999) at den vanligste misforståelsen av uskarphetsrelasjonene kommer av at ordet «usikkerhet» blir tolket som måleusikkerheter. Av den grunn er det vanskelig å argumentere for valget i læreboken om å benytte «usikkerhet». «Uskarp» er et begrep som brukes innen optikk for å beskrive et uklart bilde hvor fysiske objekter har udefinerte grenser, og som derfor er godt egnet til å gi et bilde av hva en uskarphet i kvantemekanikken er. Læreboken forteller at «usikkerhetene» forteller hvor stor nøyaktighet vi bestemmer fysiske egenskaper med. RST har ikke noen klar definisjon av hva «usikkerhetene» i posisjon Δx og bevegelsesmasse Δp er. Uten en presis definisjon som fundament vil det bli utfordrende for elever å få en god begrepsforståelse (Ringnes & Hannisdal, 2006). Til gjengjeld benyttes dette i et regneeksempel slik at leserne kan knytte assosiasjoner til begrepet.

Et annet viktig begrep som innføres er «polarisasjon». Dette defineres enkelt og greit som retningen til svingningene til det elektriske feltet til elektromagnetiske bølger. Det blir brukt en figur som bygger opp om det som står i lærebokteksten. Kombinasjonen av tekst og bilde er fornuftig ettersom det kan styrke elevens forståelse av begrepet (Angell et al., 2011). «Polarisasjon» er fra introduksjonen av et sentralt begrep utover i læreboka hvor det benyttes til å forklare sammenfiltrede fotoner.

Blant de viktigste fagbegrepene i læreboka finner vi «sammenfiltrede fotoner», eller bare «sammenfiltrering». Fenomenet blir presist definert i tråd med Schrödinger (1935) sin originale beskrivelse, som poengtert i kapittel 6.1.1. Det kan ikke forventes at elever får en forståelse av hva sammenfiltrering er utfra kun denne definisjonen, men den legger et grundig fundament for en videre begrepsbygging (Ringnes & Hannisdal, 2006) En stor del av læreboken er satt av til å diskutere følgende av sammenfiltrering, noe som skal legge til rette for at elevene kan knytte mange ulike assosiasjoner til begrepet (Ringnes & Hannisdal, 2006).

Det siste begrepet som er verdt å nevne i RST er «superposisjon». Begrepet brukes kun i en blå boks med tilleggsstoff i slutten av kapitlet. Læreboken regner begrepet for å ligge utenfor pensum, og av den grunn har det ikke blitt benyttet til å beskrive andre fenomener tidligere i kapitlet. Dette gjelder spesielt begrepets relevans til upolarisert lys og derfor også sammenfiltrede fotoner (se kapittel 2.6.3). I beskrivelsen av polarisert lys med vinkelen 45° i forhold til polarisasjonsfilteret forteller RST at fotonene har 50% sannsynlighet for å slippe gjennom filteret, men skriver at «Vi kan ikke komme inn på

årsaken her». Det er tydelig at RST ikke ønsker å benytte superposisjonsprinsippet i den generelle lærebokteksten.

6.2.2 Fagbegreper i ERGO

Det første begrepet som innføres er «uskarphet». ERGO påpeker i en definisjon av begrepet at boka bruker «uskarphet» istedenfor «usikkerhet» siden uskarphetene ikke kommer fra måleteknikk. Senere utvider den begrepet med å fortelle uskarphetene i uskarphetsrelasjonene er sannsynlighetsfordelinger. «Uskarphet» benyttes konsekvent i ERGO, og det gis eksempler i analogier på ting som ikke er kvantefysiske uskarpheter. Elever får da mulighet til å utvide forståelsen av begrepet med hjelp av nyttige assosiasjoner (Ringnes & Hannisdal, 2006).

I kapitlet om sannsynlighet blir leseren av ERGO introdusert for et av kvantefysikkens viktigste trekk, superposisjon. Dunningham og Vedral (2011) omtaler det som fenomenet som skiller kvantemekanikken fra tidligere fysikkteorier. I teksten blir det forklart at når en partikkel befinner seg i en blandingstilstand av flere kvantetilstander vil den befinne seg i en superposisjon. Det er verdt å nevne her at begrepet «kvantetilstand» ikke blir redegjort for, men det er rimelig å anta utfra situasjonen at leseren forstår hva det innebærer (se kapittel 5.4.2). I likhet med Dunningham og Vedral (2011) forteller ERGO at ved måling av en partikkel i superposisjon vil partikkelen få en bestemt tilstand. Superposisjonsbegrepet brukes også senere til å forklare lys med en vilkårlig polarisasjonsvinkel (se kapittel 5.5.2). Med å bruke begreper flere steder økes elevenes assosiasjoner til begrepet (Ringnes & Hannisdal, 2006). Superposisjon blir innført og benyttet i to anledninger. Det er derfor underlig at det ikke benyttes til å beskrive upolarisert lys. Da ville det også vært mulig å beskrive sammenfiltrede fotoner med hjelp av superposisjonsprinsippet.

For å kunne diskutere sammenfiltrede fotoner blir begrepet «polarisasjon» innført av ERGO. «Polarisasjon» defineres som retningen til svingningene til det elektriske feltet til elektromagnetiske bølger, og denne definisjonen blir forsterket av en figur som viser polarisasjonsretningen (Figur 5:8).

«Sammenfiltrede fotoner» blir i ERGO definert tidlig. Problemet i dette tilfellet oppstår når det i definisjonen av et begrep blir brukt et annet begrep, «kvantetilstand», som læreboken ikke redegjør betydningen av. Som nevnt ovenfor benyttes kvantetilstand til å beskrive superposisjon, men det er usikkert hvorvidt denne forklaringen er tilstrekkelig. Etter at sammenfiltring har blitt gjort rede for gis det et eksempel og en analogi som beskriver en lignende situasjon. Begrepet diskuteres så i et historisk perspektiv, slik at det ligger til rette for at elever kan knytte ulike assosiasjoner til begrepet og forstå hva begrepet innebærer (Ringnes & Hannisdal, 2006).

6.3 Modeller og illustrasjoner i lærebøkene

I dette kapitlet skal det komme frem hvordan lærebøkene benytter matematiske modeller, illustrasjoner og analogier. Det viktigste aspektet som blir redegjort er hvorvidt bruken av modeller og illustrasjoner bidrar til å gi en korrekt forståelse av kvantefysikk.

6.3.1 Modeller og illustrasjoner i RST

Temaene som er analysert i denne lærebokanalysen inneholder i liten grad matematiske modeller. I RST er det kun uskarphetsrelasjonene som er vist matematisk. Dette er et godt verktøy til å forklare elevene hva uskarphetsrelasjonene er, men det mangler konkrete forklaringer av variablene som inngår ulikhetene. Forklaringer av de ulike variablene er viktig for at elevene skal få godt utbytte av matematiske modeller (Angell et al., 2011).

Illustrasjonene som benyttes i RST er i stor grad tilknyttet teksten. Dette blir enten gjort med referering til illustrasjoner i hovedteksten, eller med at lærebokteksten splittes av en illustrasjon av innholdet i teksten. Eksempler på sistnevnte er Figur 5:11 og Figur 5:12. Et eksempel på velfungerende figur er Figur 5:3 som viser sannsynlighetsfordelingen for et hydrogens elektrons posisjon. De fleste illustrasjonene er kun brukt som visuelle hjelpemidler til de tilstandene som blir beskrevet i teksten og det klarer de godt ettersom teksten ikke inneholder beskrivelser av så abstrakte fenomener som superposisjon. Det nærmeste læreboka kommer til å illustrere kvantemekaniske fenomen er upolarisert lys med Figur 5:6. Som det kommer frem i kapittel 5.5.1 er det vanskelig å tolke hva denne analogien av upolarisert lys betyr. Dersom den tilhørende teksten hadde vært mer utfyllende og forklart likheter og ulikheter mellom illustrasjonen og virkeligheten kunne problemet ha vært unngått (Angell et al., 2011).

RST har en spesifikk analogi i lærebokteksten som det poengteres at tilhører klassisk fysikk. Læreboka presenterer EPR-artikkelen med en analogi av to jernbanevogner (se kapittel 5.6.1). Til tross for at analogien ikke tar direkte utgangspunkt i Einstein et al. (1935) sin originale artikkel, har den samme konklusjon: Kvantefysikken er tilsynelatende ufullstendig. Dette blir gjort med å poengtere paradokset som oppstår dersom man overfører den klassiske analogien til kvantefysikk. Læreboka klarer med dette å tydeliggjøre gyldighetsområdet til analogien.

6.3.2 Modeller og illustrasjoner i ERGO

Det eneste tilfellet av matematiske modeller i ERGO er presentasjonen av uskarphetsrelasjonene, og variablene i ulikhetene har svært enkle forklaringer. Det kommer ikke frem hvordan man måler en uskarphet, eller hva eventuelle numeriske verdier til en uskarphet forteller. Denne bruken av matematiske modeller strider med Angell et al. (2011) sin anbefaling av at slike modellers oppfølging. Læreboken lite beskrivelse av denne modellen i etterkant av den blir innført og velger istedenfor en mer kvalitativ beskrivelse av uskarphetsrelasjonene. Det blir da gitt mer nøyaktige beskrivelser av de variablene som

inngår i modellen, men disse beskrivelsene blir i liten grad koblet opp mot den matematiske modellen av læreboka.

Illustrasjonene som brukes av ERGO er i varierende grad tilknyttet teksten. Det finnes figurer som ikke har spesiell tilhørighet til teksten den er plassert ved. Eksempler på dette er illustrasjonen som viser bølgefunksjonen til et elektron i en boks, som vist i Figur 5:4, og Schrödingers katt som ble vist i Figur 5:15. Disse to figurene med tilhørende figurtekst har omtrent samme funksjon som eksempelboksene som ERGO ellers benytter. De resterende illustrasjonene blir for det meste brukt som visuelle hjelpemidler til hovedstoffet, selv om det ikke alltid refereres til dem.

Læreboka inneholder flere analogier som skal hjelpe leseren til å lettere forstå kvantefysikk. Felles for analogiene som benyttes er at de er plassert i egne eksempelbokser. Den første analogien benyttes i til å sammenligne posisjon-bevegelsesmengde-uskarpheten med en bil som kjører forbi et kamera med gitt lukketid (se kapittel 5.3.2). Analogien blir oppfulgt med en presisering av at årsaken til uskarphetene i analogien er dårlig måleutstyr, og at det ikke er dette som gir uskarpheter i kvantefysikk. En slik poengtering av både likheter og ulikheter er viktig for å forhindre misforståelser ved bruk av analogier (Angell et al., 2011). I et annet eksempel benytter ERGO et eksempel der biler i et veikryss benyttes til å forklare sannsynlighet (se kapittel 5.4.2). I dette eksempelet påpekes det også likheter og ulikheter mellom analogien og kvantefysikk. Læreboka inneholder også et eksempel som benytter et sammenfiltret kjærestepar til å forklare sammenfiltrering (se kapittel 5.6.2). Analogien oppsummeres med tre punkter, men det sammenfiltrede kjæresteparenes situasjon blir ikke sammenlignet med sammenfiltrede fotoner slik som Angell et al. (2011) anbefaler at man gjør med bruk av analogier. Dersom man ser nærmere på de tre punktene som oppsummerer det sammenfiltrede kjæresteparet kan man skrive dem om til å gjelde sammenfiltrede fotoner:

1. Før fotonenes polarisasjon måles er polarisasjonsretningen udefinert.
2. I det tidspunktet et av fotonenes polarisasjon måles vil også polarisasjonen til den andre bli bestemt, selv om de ikke har mulighet til å kommunisere.
3. Fotonenes polarisasjonsretning ble angitt samtidig.

Det er her tydelig at denne analogien med sammenfiltrede kjærestepar er bygd på en faglig korrekt tolkning av sammenfiltrering. Problemet med analogien er at eleven selv er nødt til å finne ut sammenhengen, noe som ikke kan forventes av elever som nettopp har blitt introdusert for en ukorrekt tolkning av fenomenet.

6.4 Lærebøkene innhold sammenlignet med kompetansemålet

I kapittel 5.1 ble det aktuelle kompetansemålet delt inn i fire delmål hvor det kom frem at de analyserte delene av lærebøkene skal gjøre elever i stand til å:

1. gjøre rede for Heisenbergs uskarphetsrelasjoner
2. gjøre rede for erkjennelsesmessige konsekvenser av Heisenbergs uskarphetsrelasjoner
3. beskrive fenomener sammenfiltrede fotoner
4. gjøre rede for erkjennelsesmessige konsekvenser av fenomenet sammenfiltrede fotoner

De kommende kapitlene skal vise hvorvidt lærebøkene er i stand til å gjøre dette.

6.4.1 RSTs dekning av kompetansemålene

Det første delmålet som undersøkes er i hvilken grad RST klarer å gjøre rede for Heisenbergs uskarphetsrelasjoner. Læreboka forteller at uskarphetsrelasjonene beskriver fundamentale uskarpheter i naturen. Den presenterer uskarphetsrelasjonene matematisk og forklarer til en viss grad hva de ulike variablene og konstantene betyr, både i læreboktekst og i et regneeksempel. Det er kjent at elever ofte å bruke formlene i kvantefysikk, men ofte har problemer med å gi en kvalitativ beskrivelse av hva svaret innebærer (Ayene et al., 2011). Det er derfor positivt at læreboka gir en beskrivelse av svarene i regneeksempelen (se kapittel 5.3.1). Et spørsmål som må stilles er hvorvidt det er nok å beskrive «usikkerheten» i posisjon Δx , uten å snakke om sannsynlighetene som uskarphetene representerer. Uten å ha definert dette kan man heller ikke forvente at elevene selv kan tolke hva svarene fra utregninger faktisk beskriver. En faktor som også må tas med i vurderingen er at forklaringen som gis av energi-tid-uskarpheten er ukorrekt (kapittel 6.1.1). I kapittel 5.1 argumenteres det for at læreplanmålet forventer at eleven skal kunne gi en enkel beskrivelse av de ulike variablene og konstantene i uskarphetsrelasjonene, i tillegg til å kunne gjøre enkle beregninger med ulikhetene og tolke resultatene. Ved å sammenligne faktorene ovenfor med tolkningen av læreplanmålet vil det her påstås at RST delvis dekker delmålet.

Det andre delmålet er å forklare erkjennelsesmessige konsekvenser av Heisenbergs uskarphetsrelasjoner. Det ble i kapittel 5.1 tolket som at elevene skal kunne beskrive hvordan uskarphetsrelasjonene bryter med virkelighetsbildet som er gjellende fra klassisk fysikk. Dette blir påpekt flere ganger i RST (kapittel 5.3.1). Den viktigste av disse er at læreboka påpeker at siden vi ikke kan kjenne både posisjon og fart til partikler kan vi ikke beregne banen til partikler. Det er ifølge flere didaktikere viktig å gjøre eleven klar over et

slikt skille mellom klassisk fysikk og kvantefysikk tidlig (Angell et al., 2011; Olsen, 1999). RST har med dette en tilfredsstillende dekning av delmålet.

I kapittel 5.1 blir det argumentert for at det tredje delmålet innebærer at elevene skal kunne beskrive hva en sammenfiltret tilstand er og hva utfallet blir dersom to sammenfiltrede fotoner sendt mot to polarisasjonsfiltre. RST gir en enkel definisjon av hva sammenfiltring er, men det mangler informasjon om når sammenfiltringen brytes (kapittel 5.6.1). Sammenfiltring blir utdypet med et eksempel hvor to «sammenfiltrede fotoner» sendes mot to polarisasjonsfiltre. Som nevnt i kapittel 5.6.1 er ikke dette eksempelet teoretisk mulig ettersom det benytter fotoner med bestemt polarisasjon. Til tross for at eksempelet er feil klarer det likevel å formidle at en måling av det ene fotonet vil bestemme om det andre fotonet slippes gjennom polarisasjonsfilteret eller ikke. Siden RST mangler beskrivelse av når en sammenfiltring brytes, samt at det ikke blir forklart hva som skjer når to sammenfiltrede, *upolariserte* fotoner sendes mot polarisasjonsfiltre er konklusjonen her at RST har en ufullstendig forklaring av sammenfiltrede fotoner.

Det siste delmålet er å kunne gjøre rede for erkjennelsesmessige konsekvenser av fenomenet sammenfiltrede fotoner. At RST legger mye vekt på dette er tydelig. Kapittelet om sammenfiltrede fotoner starter med diskusjonen mellom Einsteins og hans syn på en deterministisk verden og Bohr som representant for kvantemekanikk. Denne beskrivelsen av Einsteins syn på at verden er deterministisk og Bohr som tilhenger av kvantefysikkens brudd med klassisk fysikk er med på å tydeliggjøre særegenheten til kvantefysikk (Angell et al., 2011). Diskusjonen blir tatt opp igjen mot slutten av kapittelet i læreboken. Det blir da nevnt at Aspects forsøk bekreftet sammenhengen mellom de to sammenfiltrede fotonene, altså at en måling på et sted kan påvirke noe et helt annet sted. RST har stor vekt på kvantefysikkens brudd med lokal virkelighet, og dermed også de erkjennelsesmessige følgene det medfører.

6.4.2 ERGOs dekning av kompetansemålene

ERGO starter sin gjennomgang av uskarphetsrelasjonene med å definere hva en uskarphet er, og påpekes også senere at uskarphetene i realiteten beskriver sannsynligheter (se kapittel 5.3.2). Læreboka viser den matematiske beskrivelsen, men gir ikke videre forklaringer av hvordan de benyttes til å utføre beregninger. I kapittel 5.1 blir det argumentert for at elever skal kunne gi en enkel beskrivelse av de ulike variablene og konstantene i uskarphetsrelasjonene, samt kunne gjøre enkle beregninger med ulikhetene og tolke resultatene. Utfra denne tolkningen av læreplanmålet ville en litt mer grundig gjennomgang av den matematiske modellen vært ønsket. Som nevnt i kapittel 6.1.2 inneholder kapittelet en feiltolkning av energi-tid-uskarpheten, så denne blir heller ikke dekket av ERGO. Dette tatt i betraktning er konklusjonen at ERGO ikke dekker læreplanmålet fullstendig.

I kapittel 5.1 blir læreplanmålet tolket til at elevene skal kunne beskrive hvordan uskarphetsrelasjonene bryter med klassisk fysikk. ERGO har stor vekt på å tydeliggjøre dette. Dette blir gjort i et eksempel med å innføre begrepet determinisme for så å fortelle hvordan

uskarphetsrelasjonene bryter med dette prinsippet (se kapittel 5.3.2). Ved å forklare at uskarphetene beskriver sannsynligheter blir dette tydeligere.

Sammenfiltrede fotoner blir i ERGO beskrevet med hjelp av en definisjon som forteller hva det vil si at to fotoner er sammenfiltrede, men uten informasjon om når denne sammenfiltringen brytes. Læreboka beskriver to tilsynelatende sammenfiltrede fotoner som sendes mot to polarisasjonsfiltre, men ettersom disse fotonene har en definert polarisasjon kan de ikke benyttes til å faktisk beskrive fenomenet på en korrekt måte (se kapittel 5.6.2). At læreboka ikke gir en korrekt beskrivelse av sammenfiltrede fotoner er et sterkt argument for at læreplanmålet ikke dekkes av ERGO. Læreboka klarer imidlertid å delvis formidle at det er sammenheng mellom to sammenfiltrede fotoners vekselvirkninger med polarisasjonsfiltre. Av den grunn vil det sies her at læreplanmålet blir delvis dekket.

ERGO bruker en historisk vinkling for å fortelle hvordan sammenfiltring bryter med klassisk fysikk. En viktig del er hvordan fenomenet sammenfiltring tillater påvirkning mellom avskilte fotoner og at Einstein var motstander av dette (se kapittel 5.6.2). Diskusjonen inneholder også en beskrivelse av rollene til Bell og Aspect i avgjørelsen om at sammenfiltring er en realitet. På bakgrunn av dette konkluderes det her med at ERGO har en tilfredsstillende dekning av erkjennelsesmessige konsekvenser av sammenfiltring.

6.5 Oppsummering og sammenligning av lærebøkene

Lærebøkene har ulik vektlegging av temaene. Totalt sett er antallet læreboksider som diskuterer de aktuelle temaene det samme i begge bøkene. Lærebøkene benytter omtrent samme antall sider til å diskutere Heisenbergs uskarphetsrelasjoner og sammenfiltrede fotoner. Forskjellene i prioriteringer ligger i RSTs to læreboksider med beskrivelser av sannsynlighet mot ERGOs ene side. RST bruker halvannen side til å beskrive polarisasjon, én hel side mindre enn det ERGO gjør. Dersom man ser på hva disse ekstra sidene i hvert sitt tema utnyttes til ser man at RST benytter en ekstra side til å beskrive sannsynlighet på en måte som tidligere har blitt beskrevet som ukorrekt (se kapittel 5.4.1). ERGO har en mer utfyllende og teknisk komplisert beskrivelse av polarisasjon hvor blant annet superposisjonsbegrepet er brukt, men ettersom den ikke beskriver upolarisert lys tilfredsstillende vil utbyttet for elevene være minimalt. Dette gjelder særlig om man stiller som krav at det skal være relevant til læreplanmålene, noe generell kunnskap om polarisering ikke er (Utdanningsdirektoratet, 2006).

Ved å sammenligne den fysikkfaglige korrektheten i RST og ERGO er det tydelig at lærebøkene har problemer innenfor flere av de samme temaene. Begge lærebøkene feiltolker energi-tid-uskarpheten, noe som Griffiths (1994) mener er vanlig. Felles for lærebøkene er også de svake, uklare beskrivelsene av upolarisert lys. De har også til felles at beskrivelsene av sammenfiltrede fotoner ikke inneholder upolarisert lys, og dermed er teoretisk umulige. Begge lærebøkene benytter en historisk setting for å kunne formidle erkjennelsesmessige konsekvenser av sammenfiltrede fotoner. De har ulikt fokus, men det viser seg at det er gjort forenklinger i begge lærebøkene slik at de historiske fremstillingene

er ukorrekt fremstilt. Den eneste viktige forskjellen mellom lærebøkernes faglige korrektheter er relatert til sannsynlighetsfordelinger i kvantefysikk. Her gir RST gir en ukorrekt beskrivelse av kvantefysikk (se kapittel 5.4.1). ERGO innfører superposisjon og sammenligner statistiske sannsynligheter med sannsynligheter i kvantefysikk og klarer med dette å gi en faglig presis forklaring.

I kapittel 6.4 kommer det frem at begge lærebøkene har problemer med å dekke læreplanmålet når det gjelder å gjøre rede for uskarphetsrelasjonene og å beskrive sammenfiltrede fotoner. Dette kommer hovedsakelig av fysikkfaglige ukorrektheter som begge lærebøkene inneholder. Hovedforskjellene mellom lærebøkernes dekning av læreplanmålet er relatert til redegjørelsene av Heisenbergs uskarphetsrelasjoner: ERGO har lite fokus på uskarphetsrelasjonenes matematiske aspekt, og RST mangler en god beskrivelse av hva uskarphetene faktisk er. Begge lærebøkene klarer å formidle de erkjennelsesmessige aspektene som nevnes i læreplanmålet, men de har også til felles at det benyttes en delvis ukorrekt skildring av fysikkhistorie til å formidle dette. Dette er et kjent fenomen i lærebøker (Renstrøm, 2011).

Begrepsbruken er ulik mellom bøkene. Det gjelder ikke bare hvordan begreper innføres og beskrives, men også hvilke fagbegreper fra kvantefysikken som benyttes. Den viktigste forskjellen er at ERGO innfører begrepet «superposisjon» og bruker dette til å beskrive både sannsynlighet og polarisasjon med kjent vinkel relativt et polarisasjonsfilter (se kapittel 5.5.2). RST velger å kun omtale begrepet i en egen boks med tilleggsstoff mot slutten av kapittelet. Dette er med å bekrefte Halsan (2009) sin påstand om at RST tar læreplanen mer bokstavelig. Et fagbegrep som kun ERGO inneholder er «kvantetilstand». Begrepet blir ikke definert på noen måte i ERGO, men kan som argumentert for i kapittel 5.4.2 tolkes ut fra omstendighetene det benyttes.

I læreboktekstene benyttes det i liten grad analogier til å forklare kvantefysiske fenomener. Dette kan tyde på at lærebokforfatterne er klar over de problematiske beskrivelsene bilder og begreper fra klassisk fysikk kan medføre. Når det er tatt i bruk analogier fra klassisk fysikk blir lesere av begge bøker i stor grad gjort oppmerksom på likheter og ulikheter mellom analogiene og den kvantefysiske realiteten. Dette er viktig for å forhindre at elever tar til seg de klassiske analogiene som reelle forklaringer av kvantefysiske fenomen (Angell et al., 2011; Ayene et al., 2011). Så lenge analogier benyttes med varsomhet, slik som RST og ERGO gjør i de undersøkte kapitlene, kan bruken av dem være til stor hjelp for å forklare nye og ukjente tema.

Et annet aspekt som har blitt undersøkt er hvordan illustrasjoner blir benyttet i lærebøkene. En generell regel er at det skal være samsvar mellom læreboktekst og de tilhørende figurene (Bjørndal, 1967). Resultatene viser at dette har blitt gjort i større grad i RST enn i ERGO. De fleste illustrasjonene blir benyttet til å illustrere fagstoffet som presenteres i lærebokteksten. En slik kombinasjon av tekst og bilde er fornuftig. En

kombinasjon av visuelle virkemidler og tekstbasert informasjon utnytter ulike mentale prosesser, og kan potensielt forenkle læreprosessen (Sætre, 2015).

Avslutningsvis vil det her poengteres at selv om det i løpet av drøftingen har blitt argumentert for at lærebøkene er mangelfulle i beskrivelsene av flere deler av kvantefysikken, så blir de fleste av disse ukorrekthetene beskrevet tilfredsstillende minst én gang i løpet av lærebøkene. I kapittel 6.1.1 blir det påpekt at RST har en utilfredsstillende beskrivelse av sannsynlighetsfordelinger og upolarisert lys, selv om det faktisk eksisterer gode forklaringer i læreboka. En lignende situasjon ble funnet i ERGOs kapittel om sammenfiltrede fotoner. Læreboka gir en utilfredsstillende beskrivelse av fenomenet, men som vist i kapittel 6.3.2 inneholder faktisk læreboka en korrekt beskrivelse. Den er bortgjemt i en analogi og blir dessverre ikke formidlet. Det er ikke mulig å slå fast noen årsak til at en slik blanding av korrekte og ukorrekte beskrivelser finnes i bøkene ut fra resultatene fra analysen. Det kan godt være dette kommer av et ønske om å forenkle fagstoffet. I så fall er det et godt eksempel på at forsøk på å forenkle kvantefysikken ofte fører til en snodig blanding av klassisk og kvantemekanisk fysikk (Ayene et al., 2011). Det er på ingen måte noen enkel oppgave å skulle skrive lærebøker i kvantefysikk.

7. Avslutning og konklusjon

I dette kapittelet vil oppgavens konklusjon og forslag til videre arbeid presenteres. Jeg ønsker derfor først å understreke at selv om analysen finner svakheter og uriktige forklaringer i lærebøkene, så betyr det ikke at jeg selv ville skrevet en bedre lærebok. Det er enklere å være kritisk til andre personers verk enn å skrive en god lærebok selv. Jeg vil også benytte muligheten til å påpeke at oppgaven ikke på noen måte er ment som personlig kritikk av lærebokforfattere eller andre personer involvert i utviklingen av lærebøkene. Hensikten er å påpeke hvilke svakheter som finnes i formidlingen av kvantefysikk i form av konstruktiv kritikk som kan tas i med i videre utvikling av lærebøker i fysikkfaget.

7.1 Konklusjon

Lærebokanalysen i denne oppgaven har fått frem flere hovedtrekk i lærebøkernes behandling av Heisenbergs uskarphetsrelasjoner og sammenfiltrede fotoner. Lærebøkene er ulikt strukturert og det overordnede fokuset er ulikt. ERGO fokuserer i større grad på en mer tradisjonell, teknisk basert formidling. RST forsøker å forenkle fagstoffet med å holde seg unna fagbegreper som ikke blir ansett som pensum og heller fokusere på å skildre den historiske debatten relatert til følgene av fenomenene. Målet med denne oppgaven var ikke å kunne fortelle hvilken lærebok som best beskriver Heisenbergs uskarphetsrelasjon og sammenfiltrede fotoner for elever i fysikk 2, eller hvilken lærebok som er best egnet til å undervise i temaet. Det forekommer på ingen måte datagrunnlag for å ta stilling til dette spørsmålet.

Ved å kartlegge fysikkbøkernes faglige innhold og sammenligne dette med teorier slik de er omtalt i anerkjente fysikkbøker og originalartikler, er det tydelig at lærebøkene har problemer med å formidle en fysikkfaglig og fysikkhistorisk korrekt fremstilling av kvantefysikken. Dette er spesielt problematisk når det gjelder lærebøkernes behandling av sammenfiltrede fotoner. Verken ERGO eller RST klarer å beskrive fenomenet sammenfiltrede fotoner på en tilfredsstillende måte, selv om det er et sentralt tema i læreplanen. Det samme gjelder også lærebøkernes beskrivelse av Einstein og EPR-artikkelens historiske betydning. Det har også kommet frem at begge lærebøkene benytter en feiltolkning til å beskrive energi-tid-uskarpheten.

En uunngåelig følge av manglene av faglig korrekthet beskrevet i forrige avsnitt, er at elever som benytter lærebøkene heller ikke blir i stand til å gi korrekte forklaringer. Dette er hovedsakelig et problem når det gjelder å gjøre rede for Heisenbergs uskarphetsrelasjoner og sammenfiltrede fotoner. I tillegg til å gjøre rede for fenomenene skal elever være i stand til å gjøre rede for de erkjennelsesmessige konsekvensene av dem, noe det her konkluderes med at lærebøkene klarer å formidle. Dette til tross for at det benyttes til dels ukorrekt fysikkhistorie til å formidle disse konsekvensene.

Det er tydelig at RST og ERGO legger stor vekt på kvalitativ formidling med at det i liten grad blir fokusert på matematisk fremstilling av Heisenbergs uskarphetsrelasjoner.

Dette gjelder spesielt i ERGO. Begge lærebøkene er påpasselige med å ta i bruk analogier fra klassisk fysikk, og de gangene det blir gjort blir det tatt forhåndsregler for å forhindre at det fører til misoppfatninger. Analogiene blir ikke brukt til å presentere nye tema, kun for å gi alternative forklaringer på fenomener som leseren alt har blitt kjent med.

Fagbegrepene som innføres blir generelt sett gitt gode definisjoner. Et viktig unntak fra denne generaliseringen er RSTs behandling av kvantemekaniske uskarpheter, som omtalt tidligere. En av de største forskjellene mellom bøkene er hvilke fagbegreper som benyttes. ERGO innfører begrepene superposisjon og kvantetilstand og benytter dem blant annet til å gi gode beskrivelser av kvantemekaniske sannsynligheter. I RST lar man være å ta i bruk disse begrepene. Resultatet er mindre tekniske og til dels upresise beskrivelser. Analysen kan ikke gi svar på hvilken grad ulike begreper bør innføres for å gi en ideell lærebok for elever på videregående skole.

7.2 Veien videre

Denne oppgaven har fokusert på lærebøkene som for øyeblikket benyttes i fysikkfaget i videregående skole. På bakgrunn av konklusjonen vil jeg derfor si at det eksisterer et forbedringspotensial i både RST og ERGO. Det bør derfor tas hensyn til funnene i denne oppgaven i eventuelle nye utgaver av lærebøkene.

I oppgaven kommer det frem at lærebøkene har flere likhetstrekk som gjør at begge lærebøkene har problemer med å formidle det aktuelle kompetansemålet. Det kunne vært interessant å se om alternative læringsressurser som ReleKvant inneholder noen av de samme utfordringene. I tidlige utkast av denne oppgaven var det planlagt å inkludere ReleKvant i analysen på lik linje som lærebøkene, men dette ble nedprioritert på grunn av oppgavens begrensede omfang.

Til slutt vil jeg her ta opp tråden fra Halsan (2009) og Myhrehagen (2015) som begge vurderer om det er behov for endring av læreplanmålene i kvantefysikk i sine oppgaver. Halsan (2009) mener at åpne læreplanmål, spesielt læreplanmålet diskutert i denne oppgaven, fører til at elever får ulik innføring i fysikkfaget etter hvilken lærebok som benyttes. Resultatene fra analysen i denne oppgaven viser at dette til en viss grad er tilfelle, spesielt når det gjelder hvilke begrep som benyttes. Det kommer ingen forslag til hvordan eventuelt nye læreplanmål bør se ut her, men det blir påpekt at dette er noe som det må arbeides mer med.

Referanser

- Angell, C., Bungum, B., Henriksen, E. K., Kolstø, S. D., Person, J., & Renstrøm, R. (2011). *Fysikkdidaktikk*. Kristiansand: Høyskoleforl.
- Angvik, M. (1982). Skolebokanalyse som tema for lærerutdanning og forskning. *Norsk pedagogisk tidsskrift*, 66(10), 367-379.
- Aspect, A. (2004). Bell's Theorem : The Naive View of an Experimentalist. Hentet 12.05.2017, fra <https://arxiv.org/abs/quant-ph/0402001>
- 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(2), 020113.
- Bachmann, K. E. (2005). *Læreplanens differens: Formidling av læreplanen til skolepraksis*. (Doktorgradsavhandling, NTNU). Hentet 01.04.2017, fra <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/265015>
- Bjørndal, B. (1967). *Om lærebøker : vurderingskriterier : forskningsoppgaver*. Oslo: Universitetsforl.
- Bungum, B., Henriksen, E. K., Angell, C., Tellefsen, C. W., & Bøe, M. V. (2015). ReleQuant - Improving teaching and learning in quantum physics through educational design research. *NorDiNA*, 11(2), 153-168.
- Callin, N. P., Pålsgård, J., Stadsnes, R., & Tellefsen, C. W. (2012). *Ergo Fysikk 2* (Bokmål 2. utgave). Oslo: Aschehoug.
- Dirac, P. A. M. (1947). *The Principles of Quantum Mechanics (Third Edition)*. Oxford, England: Oxford University Press.
- Duit, R., & Treagust, D. F. (1995). Students' conceptions and constructivist teaching approaches. In B. J. Fraser & H. J. Walberg (Red.), *Improving Science Education*. Chicago, Illinois: The University of Chicago Press.
- Dunningham, J., & Vedral, V. (2011). *Introductory quantum physics and relativity*. London; Singapore; Hackensack, NJ: Imperial College Press ; Distributed by World Scientific Pub.
- Einstein, A., Podolsky, B., & Rosen, N. (1935). Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Physical Review*, 47(10), 777-780. doi:10.1103/PhysRev.47.777
- Gasiorowicz, S. (2003). *Quantum Physics Third Edition*: Wiley.
- Griffiths, D. J. (1994). *Introduction To Quantum Mechanics*. Upper Saddle River: Prentice Hall Inc.
- Halsan, H. Ø. (2009). *Lærebøker i fysikk etter Kunnskapsløftet – en analyse av lærebøkernes tekstlige behandling av nye temaer i fysikk i videregående skole*. (Mastergradsavhandling, UiO). Hentet 03.04.2017, fra <https://www.duo.uio.no/handle/10852/11267>
- Heisenberg, W. (1927/1983). The actual content of quantum theoretical kinematics and mechanics. Hentet 15.05.2017 fra <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19840008978.pdf>
- Hemmer, P. C. (2005). *Kvantemekanikk* (5. utg.). Trondheim: Tapir akademisk forl.
- Henriksen, E. K., Bungum, B., Angell, C., Tellefsen, C. W., Frågåt, T., & Bøe, M. V. (2014). Relativity, quantum physics and philosophy in the upper secondary curriculum: challenges, opportunities and proposed approaches. *Physics Education*, 49(6), 678.
- Jerstad, P., Sletbak, B., Grimenes, A. A., Renstrøm, R., Holm, O. B., & Nymo, M. (2014). *Rom Stoff Tid 2* (2. utgave). Oslo: Cappelen Damm.
- Johnsen, E. B., Lorentzen, S., Selander, S., & Skyum-Nielsen, P. (1997). *Kunnskapens tekster : jakten på den gode lærebok*. Oslo: Universitetsforl.
- Knain, E. (2002). *Naturfagboka i praksis: om tolv naturfagelever og deres lærebok*. Tønsberg: Høgskolen i Vestfold.
- Millikan, R. A. (1916). A Direct Photoelectric Determination of Planck's "h". *Physical Review*, 7(3), 355-388. doi:10.1103/PhysRev.7.355

- Myhreagen, H. V. (2015). *Fysikkelevers forståelse av kvantefysikkens erkjennelsesmessige sider og dens prinsipielle brudd med klassisk fysikk*. (Mastergradsavhandling, NTNU). Hentet 30.03.2017, fra <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2353046>
- Nelson, J. (2006). Hur används läroboken av lärare och elever? *NorDiNA*, 2(4), 16-27.
- Olsen, R. V. (1999). *Kvantefysikk i skolen: En undersøkelse av fysikkelevers forståelse av kvantefysikk og en analyse av dette emnets status i skolefysikken*. (Hovedfagsoppgave), Oslo Universitet, Oslo. Hentet 20.03.2017, fra <https://www.duo.uio.no/bitstream/handle/10852/32323/olsen.pdf?sequence=1>
- Pais, A. (1991). *Niels Bohr's times, in physics, philosophy, and polity*. Oxford: Clarendon Press.
- Pingel, F. (2010). *UNESCO Guidebook on Textbook Research and Textbook Revision*: UNESCO.
- Postholm, M. B., & Jacobsen, D. I. (2014). *Læreren med forskerblick : innføring i vitenskapelig metode for lærerstudenter*. Kristiansand: Høyskoleforl.
- Renstrøm, R. (2011). *Kvantefysikkens utvikling i fysikklærebøker, vitenskapshistorien og undervisning*. (Doktoravhandling), Universitetet i Oslo, Oslo. Hentet 28.03.2017, fra <https://www.duo.uio.no/bitstream/handle/10852/11084/dravhandling-renstrom.pdf?sequence=1>
- Ringnes, V., & Hannisdal, M. (2006). *Kjemi fagdidaktikk : kjemi i skolen* (2. utg.). Kristiansand: Høyskoleforl.
- Sakurai, J. J., & Tuan, S. F. (2010). *Modern quantum mechanics*. Reading, Mass: Addison-Wesley Longman.
- Schlosshauer, M., Kofler, J., & Zeilinger, A. (2013). A Snapshot of Foundational Attitudes Toward Quantum Mechanics. *Stud. Hist. Phil. Mod. Phys.*, 44, 222-230. doi:10.1016/j.shpsb.2013.04.004
- Schrödinger, E. (1935). Discussion of Probability Relations between Separated Systems. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 31(04), 555-563. doi:10.1017/S0305004100013554
- Schrödinger, E. (1935/1980). Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik [The Present Situation in Quantum Mechanics: A Translation of Schrödinger's "Cat Paradox" Paper]. *Naturwissenschaften*, 23, 807-812; 823- 828; 844-849. Hentet 15.05.2017, fra <http://www.jstor.org/stable/986572>
- Skjelbred, D. (2003). *Valg, vurdering og kvalitetsutvikling av lærebøker og andre læremidler: sluttrapport*. Tønsberg: Høgskolen i Vestfold.
- Skrunes, N. (2010). *Lærebokforskning : en eksplorerende presentasjon med særlig fokus på kristendomskunnskap, KRL og religion og etikk*. Oslo: Abstrakt forl.
- Sætre, P. J. (2015). Geografididaktikk for klasserommet. In P. J. Sætre & R. Mikkelsen (Red.), (3. utg. ed.). Oslo: Cappelen Damm akademisk.
- Tonomura, A., Endo, J., Matsuda, T., Kawasaki, T., & Ezawa, H. (1989). Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern. *American Journal of Physics*, 57(2), 117-120. doi:10.1119/1.16104
- Utdanningsdirektoratet. (2006). *Læreplan i fysikk - programfag i utdanningsprogram for studiespesialisering*. Hentet 28.03.2017 fra <http://data.udir.no/kl06/FYS1-01.pdf>.