



Inspirationskatalog til SRP/SOP med kvanteteknologi

Introduktion

Dette er et inspirationskatalog til de større skriftlige opgaver på de gymnasiale uddannelser (SRP på STX og SOP på HTX). Kataloget har til formål at inspirere til flere projekter, hvor kvanteteknologi indgår.

For at gøre projektidéerne lettilgængelige er de hver forsynet med en kort beskrivelse, forslag til relevante kilder og en mulig opgaveformulering. Til nogle projekter foreslås der også et eller flere eksperimenter, der kan udføres i forbindelse med projektet.

Projektforslagene er sorteret efter hvilket andet fag end fysik, de kan skrives i. Det andet fag er ikke nødvendigvis entydigt bestemt for alle projekter. Projekter under dansk kunne måske også stå under engelsk, ligesom projekter under matematik kunne have stået under informatik/programmering og omvendt.

Nogle kilder kan generelt anbefales for alle projekterne. De er oplistet her:

[Perimeter Institute: Quantum 101 – Quantum Science Explained](#)

10 korte videoer, der introducerer hvert deres emne inden for kvantemekanik.

[Dagbladet Information: Kvantemekanikkens gåde](#)

Podcast i 5 afsnit der introducerer kvantemekanik med en historisk vinkel.

[Klaus Mølmer – Kvantemekanikken: Atomernes vilde verden](#)

Video af foredrag i Selskabet for Naturlærens Udbredelse.

[The Quantum Mechanics Visualisation Project \(QuVis\)](#)

Simuleringer fra University of St Andrews.

Indhold

Introduktion.....	2
Biologi/Bioteknologi.....	4
Proteinfoldning og kvantecomputere.....	4
Dansk.....	4
Populærvidenskabelig artikel om BB84 (kvantekryptografi).....	4
Teknomagi – Hvordan præsenteres kvantemekanik i populærkulturen?	5
Kvantemekanik og virkelighedsopfattelse i moderne litteratur og film	5
Kvantespring – metaforer fra kvantemekanikken, der har bevæget sig over i daglig tale	6
Engelsk.....	6
Copenhagen – skuespil af Michael Frayn om Heisenbergs og Bohrs møde under 2. verdenskrig.....	6
Fysik (enkeltfaglig)	7
Detektering af gravitationsbølger.....	7
Historie	8
Alain Aspects forsøg og dets modtagelse i Danmark	8
Informatik/programmering	8



Deutsch-Josza bokse – hvornår er kvantecomputere bedre?.....	8
Fejltolerante kvantecomputere set i forhold til Hamming-kode.....	9
Generering af tilfældige tal.....	9
Kemi.....	10
Nitrogen Vacancy-centre i diamant	10
He ₂ – hvad skal der til for at identificere et molekyle?	10
Køling med brug af faseovergange	11
Laserkøling	12
Matematik	12
Bells teorem.....	12
Kvantenøgledistribution.....	13
Grovers algoritme.....	13
Shors algoritme.....	13
Naturgeografi/Geovidenskab.....	14
Kvantesensorer til monitorering	14
Psykologi	14
MR-scanning.....	14
Samfundsfag	15
Krypterings betydning i det moderne samfund	15
Teknologisk ulighed og kvanteteknologi	16
Investeringer i kvanteteknologi – Rumkapløb, boble eller nødvendighed?.....	16
Yderligere forslag	18
Tilbagemeldinger modtages gerne	19



Biologi/Bioteknologi

Proteinfoldning og kvantecomputere

Beskrivelse: Proteiner er lange kæder af aminosyrer. De befinder sig dog ikke i en lang udstrakt tilstand. De er derimod foldet sammen i en tredimensionel tilstand. Hvordan de er foldet, er afgørende for, hvor godt de binder sig til andre molekyler og katalyserer forskellige processer. Derfor er man meget interesseret i at finde en måde til at beregne, hvordan proteinerne folder sig. Proteiner, der er forkert foldet, kan lede til sygdomme som Creutzfeldt-Jakob.

Det forventes, at en kvantecomputer vil være velegnet til at lave beregninger på hvordan proteiner folder sig sammen, fordi regnemetoderne og de processer, der leder til foldningen, på en måde minder om hinanden ved at de begge dybest set er kvantemekaniske processer.

Kilder: [Quantum Insider: Researchers Use Trapped-Ion Quantum Computer to Tackle Tricky Protein Folding Problems](#), [Anton Robert et al, Nature: Resource-efficient quantum algorithm for protein folding](#), [ScienceDirect \(AI-genereret\): Protein folding](#)

Forslag til opgaveformulering:

Redegør for proteiners struktur og hvordan denne dannes.

Gennemgå eksempler på hvad der kan ske, når foldningen går galt og hvad man kan bruge/har brugt kendskab til et proteins tredimensionale struktur til.

Redegør for centrale fysiske principper bag kvantecomputeren, herunder sammenfiltring (entanglement), superposition og forskellige typer af qubits.

Undersøg hvad de nuværende udfordringer i udviklingen af en fejltolerant kvantecomputer er.

Diskutér hvilken betydning en fungerende kvantecomputer vil have for forskningen i proteinfoldning og de afledte effekter heraf.

Dansk

Populærvidenskabelig artikel om BB84 (kvantekryptografi)

Beskrivelse: BB84 er en metode til at kryptere beskeder ved hjælp af kvantemekanik. Metoden er i modsætning til nuværende krypteringsmetoder umulig at bryde. I en populærvidenskabelig artikel kan man beskrive hvordan metoden virker, hvorfor det kan blive relevant at benytte kvantekryptering i fremtiden, hvad kryptering i det hele taget er eller hvordan vi gennem tiden har skjult vores beskeder.

Kilder: [Anna L P Bjerregaard, NQCP: Kvantenøgledistribution](#), [LIFE: Unbreakable](#), [U Waterloo, IQC: Quantum cryptography \(og tilhørende aktiviteter\)](#)

Mulige eksperimenter: [Øvelser fra QuVis](#), [simulering fra Unbreakable](#)

Forslag til opgaveformulering:

Der ønskes en redegørelse for BB84-metoden med fokus på de kvantemekaniske aspekter.

Med udgangspunkt i ovenstående arbejde skal du udarbejde en populært formidlende artikel på 3-4 sider om kvantenøgledistribution. Artiklens målgruppe skal være en typisk læser af Illustreret Videnskab.

Opgaven skal indeholde en metadel, hvor du redegør for dine formidlingsmæssige overvejelser i forbindelse med artiklens indhold og udformning.



Diskutér vigtigheden af at formidle fremtidige perspektiver på teknologi og vanskelighederne ved at gøre det.

Teknomagi – Hvordan præsenteres kvantemekanik i populærkulturen?

Beskrivelse: Kvanteteknologi eller blot ordet quantum (mis)bruges ofte til at fremstille en reelt set magisk løsning som en teknologisk løsning i populærkulturen. Eksempler på dette er Marvel-filmene, hvor særligt Ant man og Thor benytter dette greb og The three-body Problem, hvor kvantesammenfiltring (entanglement) kan bruges til øjeblikkelig kommunikation. Teleportation er et eksempel, hvor indflydelsen er gået den anden vej. Her er fysikkens kvanteteleportation nemlig kommet efter fiktionens teleportation og har en lidt anderledes betydning, da det kun er informationen om en kvantetilstand, der transporteres.

Science fiction-forfatteren Arthur C Clarke har skrevet, at ”enhver tilstrækkelig avanceret teknologi er umulig at skelne fra magi”. Ved at lade kvantemekanik stå for den avancerede del kan magiske elementer introduceres i medier.

Kilder: Eksempler på brug i Ant man, Thor, The Three-body Problem, Arthur C Clarke: Profiles of the Future: An Inquiry into the Limits of the Possible

Mulige eksperimenter: [Øvelser ved Aarhus Universitet](#), [øvelser ved Niels Bohr Institutet](#)

Forslag til opgaveformulering:

Der ønskes en behandling af hvordan kvantemekanikkens begreber spiller sammen med populærkulturen.

Redegør for hvordan kvantemekanikken præsenteres og benyttes i udvalgt populærkulturelt materiale. Redegør for relevante kvantemekaniske begreber (afhænger af det valgte populærkulturelle materiale). Diskutér hvor langt den populærkulturelle beskrivelse og anvendelse af begreberne holder og hvor de ikke gør.

Kvantemekanik og virkelighedsopfattelse i moderne litteratur og film

Beskrivelse: Tolkninger af kvantemekanikken som mange-verdenfortolkningen anvendes af og til som et element i moderne litteratur og film. Handlingsforløb kan splittes op, så historien fortælles i to udgaver, hvor resultatet af en begivenhed er den eneste forskel. Nogle gange blandes kvantemekanik og kaosteori sammen i forklaringen.

Hvilken effekt har det på historiefortællingen, at man har to konkurrerende eller supplerende virkeligheder i en fortælling? Hvordan kan det bidrage til indholdet?

Kvantemekanikken giver os en måde at regne på verden, men ikke en måde at fortolke resultaterne. Det har ledt til en række forskellige fortolkninger, hvor københavnerfortolkningen lader til at være den mest populære, men på ingen måde står alene. Kan der skelnes mellem fortolkningerne og kan de overhovedet bruges til at sige noget om vores opfattede virkelighed?

Kilder: Blake Crouch: Dark Matter, Ted Chiang: Anxiety Is the Dizziness of Freedom, Mr. Nobody (film), Everything Everywhere All At Once (film), Thomas mot Thomas (norsk film), [Videnskab.dk: Lever vi i et multivers?](#), [Videnskab.dk: Parallelle verdener påvirker muligvis vores egen](#), [Elizabeth Gibney, Nature: What does Quantum Mechanics Say About Reality?](#)

Mulige eksperimenter: [Bells ulighed ved Aarhus Universitet](#), [simuleringer fra QuVis](#)



Forslag til opgaveformulering:

Der ønskes en behandling af hvordan mange-verdenfortolkningen anvendes i et eller flere værker. Redegør for mange-verdenfortolkningen og mindst to andre fortolkninger af kvantemekanikken. Diskutér hvordan hver af fortolkningerne forklarer tankeeksperimentet Schrödingers kat, dobbeltspalteeksperimentet og/eller Einstein-Podolski-Rosen paradokset. Analysér værket/værkerne med fokus på hvordan mange-verdenfortolkningen indgår som plotelement. Diskutér om fremstillingen af mange-verdenfortolkningen er vellykket.

Kvantespring – metaforer fra kvantemekanikken, der har bevæget sig over i daglig tale

Beskrivelse: Det er ikke unormalt at høre i nyhederne om hvordan en udvikling er et kvantespring inden for sit felt. Vi taler også om at være på bølgelængde med hinanden, men nogle gange går sammenligningerne mellem kvantemekanik og dagligdagen for vidt og bliver vildledende. Hvor går grænserne og hvordan undgår man at blive snydt?

Kilder: [Sofie M Hansen, Uniavisen: Da humanisterne stjal kvantefysikken](#), [Henrik Isaksen og Rune Mikkelsen, Videnskab.dk: Lad dig ikke fuppe med kvantefysik](#), [Linda Greve, Videnskab.dk: 'Vi er i krig mod Corona': Sådan kan metaforer påvirke og manipulere](#)

Mulige eksperimenter: [Simuleringer fra QuVis](#)

Forslag til opgaveformulering:

Der ønskes en redegørelse for eksempler på anvendelser af metaforer fra kvantefysikken i det danske sprog.

Redegør for den fysikfaglige betydning af de relevante kvantefysiske begreber og hvordan de kan eller ikke kan anvendes i de relevante kontekster.

Analyser, hvordan disse metaforer fungerer kommunikativt og æstetisk i forskellige teksttyper (f.eks. journalistik, reklame, litteratur eller sociale medier).

Diskutér, hvordan brugen af naturvidenskabelige begreber som metaforer påvirker vores forståelse af både sproget og den videnskabelige virkelighed og giv en vurdering af hvilke muligheder og begrænsninger, der ligger i at bruge kvantefysiske metaforer i almindelig kommunikation.

Engelsk

Copenhagen – skuespil af Michael Frayn om Heisenbergs og Bohrs møde under 2. verdenskrig

Beskrivelse: I 1941 kom den tyske fysiker Werner Heisenberg til København. Her mødtes han med Niels Bohr for at diskutere muligheden for at udvikle en atombombe. Hvad, de konkret diskuterede, og hvem, der sagde hvad, har sidenhen været et mysterium. Resultatet var, at de to fysikers venskab var brudt.

Dette er udgangspunktet for skuespillet *Copenhagen* skrevet af Michael Frayn, der er opført utallige gange i en lang række af lande og filmatiseret i 2002.

Skuespillet benytter fortolkninger af flere koncepter fra kvantemekanikken i dialogerne og gennemgående virkemidler.



Kilder: [Niels Bohr Arkivet: Release of documents relating to 1941 Bohr-Heisenberg meeting](#), [Niels Bohr Arkivet/Michael Frayn: Postscript to Copenhagen](#), [Drama on 3: Michael Frayn: Copenhagen](#) (Lydfil med radioindspilning af stykket)

Forslag til opgaveformulering:

Redegør for relevante kvantemekaniske begreber, der anvendes i skuespillet Copenhagen, herunder Heisenbergs ubestemthedsrelation og Bohrs komplementaritetsprincip.

Lav en analyse og fortolkning af skuespillet Copenhagen med særlig fokus på brugen af metaforer fra kvantemekanikken.

Diskutér, hvordan skuespillet forbinder naturvidenskaben med det historiske drama.

Diskutér, hvordan Frayn balancerer faktuelle historiske begivenheder med spekulative samtaler og hypotetiske scenarier.

Fysik (enkeltfaglig)

Detektering af gravitationsbølger

Beskrivelse: Gravitationsbølger er bølger i længden af tid og rum, som i princippet opstår hver gang to masser bevæger sig i forhold til hinanden, men især når store masser bevæger sig hurtigt rundt om hinanden. Eksistensen af gravitationsbølger blev forudsagt af Albert Einstein, som dog var overbevist om, at de aldrig ville blive detekteret, fordi de ville være så svage.

I september 2015 blev de første gravitationsbølger dog detekteret. Det skete ved de to LIGO-instrumenter i USA. Her målte man gravitationsbølgerne fra to sorte huller der kolliderede 1,3 milliarder lysår herfra. Hvert af de to instrumenter består af to fire kilometer lange arme, der peger vinkelret i forhold til hinanden. For enden af hver arm sidder et spejl, mens der hvor armene mødes er en mekanisme, der ved at sende lys frem og tilbage i armene kan detektere ændringer i længden af armene på $1/10000$ af bredden af en proton – omtrent 10^{-19} meter.

LIGO og de senere Virgo og KAGRA er alle eksempler på instrumenter, der måler de mindste ændringer for at sige noget om de største fænomener.

Kilder: [LIGO Scientific Collaboration: Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger](#), [LIGO: Educational resources](#), [LIGO: LIGO Surpasses the Quantum Limit](#), [Bernhard Schistad: Sorte huller Tyngdebølger Tidsrejser](#)

Forslag til opgaveformulering:

Redegør for gravitationsbølger. Kom herunder ind på hvordan de opstår og hvad der er afgørende for deres egenskaber.

Redegør for opbygningen af LIGO-instrumenterne. Kom herunder ind på hvilke metoder, der benyttes til at øge nøjagtigheden af målingerne specielt "quantum squeezing".

Forklar hvordan man beregner masserne af de involverede legemer ved detektering af gravitationsbølger.

Diskutér med udgangspunkt i GW170817 hvordan målinger af gravitationsbølger kan spille sammen med klassiske teleskoper i astronomiens videre udvikling.



Historie

Alain Aspects forsøg og dets modtagelse i Danmark

Beskrivelse: Da resultaterne af Alain Aspects forsøg i 1982 kom frem kommenterede fysikeren John Wheeler det med at "Der er nu eksperimentelt bevis for det mest revolutionerende princip i videnskabens historie". På Niels Bohr Institutet var holdningen, at forsøget var uinteressant. Fyrre år senere modtog Aspect Nobelprisen sammen med John Clauser og Anton Zeilinger for eksperimenter med sammenfiltrede fotoner. I løbet af det 20. århundrede skete der et paradigmeskifte i fysikken med opdagelsen af kvantemekanikken, men hvornår blev det fuldbyrdet og sker den slags lige hurtigt alle steder?

Kilder: [Tor Nørretranders: Det udelelige](#), [Dagbladet Information: Kvantemekanikkens gåde](#), [Tor Nørretranders, Dagbladet Information 1982-10-15: Epokegørende opdagelse afgør strid mellem Einstein og Bohr](#)

Mulige eksperimenter: [Bells ulighed ved Aarhus Universitet](#), Malus lov

Forslag til opgaveformulering:

Der ønskes en behandling af paradigmeskiftet i fysik som følge af kvantemekanikkens udvikling. Redegør for centrale fysiske principper bag kvanteteknologi, herunder sammenfiltring (entanglement), superposition og målinger på kvantemekaniske systemer. Redegør for begrebet paradigmeskift, som det blev introduceret af Kuhn. Forklar hvordan aspekter af kvantemekanikken måtte lede til et paradigmeskift i fysikken. Redegør for centrale begivenheder, artikler og forsøg i kvantemekanikkens udvikling. Forklar Alain Aspects eksperiment og resultaternes betydning. Diskutér med udgangspunkt i Tor Nørretranders artikel fra 1982-10-15 og andre kilder, hvilken rolle Aspects forsøg spillede i et paradigmeskift.

Informatik/programmering

Deutsch-Josza bokse – hvornår er kvantecomputere bedre?

Beskrivelse: Deutsch-Josza algoritmen var den første algoritme, der viste, at en kvantecomputer kan være hurtigere til at løse opgaver end en klassisk computer. Selve algoritmen er ubrugelig (man har i hvert fald ikke fundet en anvendelse endnu). Det er princippet i at kunne løse en opgave hurtigere, der er det centrale.

Hvad vil det sige at kunne løse en opgave hurtigt? Hvordan kan man være sikker på, at man har fundet den mest effektive algoritme?

Mulige eksperimenter: Kvanteoptiske eksperimenter ved [Niels Bohr Institutet](#) eller [Aarhus Universitet](#), [simuleringer fra QuVis](#)

Kilder: [U Waterloo, IQC: Quantum computing with interferometers](#), [Cleve et al., arXiv: Quantum Algorithms Revisited](#), [Cambridge University: Quantum computing Lecture 7: Deutsch-Josza algorithm](#)

Forslag til opgaveformulering:

Der ønskes en behandling af begrebet kvantefordel belyst med Deutsch-Josza bokse. Redegør for forskellen på en klassisk computer og en kvantecomputer.



Redegør for Deutsch-Josza algoritmen og forklar dens betydning.
Demonstrer, at Deutsch-Josza algoritmen er hurtigere end enhver algoritme på en klassisk computer.
Diskutér hvilke typer af problemer det forventes kvantecomputere vil være bedre til at løse end klassiske computere.

Fejltolerante kvantecomputere set i forhold til Hamming-kode

Beskrivelse: En af de største udfordringer ved at bygge en kvantecomputer er, at der opstår fejl undervejs i beregningerne. Hvis man "kigger" undervejs i beregningen, henfalder kvantetilstanden, så hvad kan man gøre for at rette de fejl, der måtte opstå undervejs?

En løsning er at tjekke for paritet. Det er nemlig ikke alle målinger, der får kvantetilstanden til at henfalde. Ved et paritetstjek spørger man til, om to ting er i den samme tilstand. Med denne information kan man rette nogle fejl.

Klassiske computere laver også fejl. Der findes flere metoder til at fjerne disse fejl igen og fortsætte beregningerne. Et af de første forslag til, hvordan man kan rette fejl i en klassisk computer, er den såkaldte Hamming-kode. Her benytter man også paritet, til at rette fejl i beregningerne.

Kilder: [Q-CTRL: What is quantum error correction?](#), [Microsoft: Quantum error correction](#), [Qiskit: Correcting Quantum Errors](#), [3Blue1Brown: But what are Hamming codes? The origin of error correction](#)

Mulige eksperimenter: [Målinger på qubits ved Niels Bohr Institutet](#), selvudviklet program til demonstration af Hamming-kode

Forslag til opgaveformulering:

Der ønskes en redegørelse for fejltolerance i klassiske og kvantecomputere.
Redegør for begreberne paritet og fejltolerance. Kom herunder ind på begrebet *Noisy intermediate-scale quantum computing*.
Redegør for hvordan Hamming-kode virker.
Diskutér, hvad der leder til fejl i kvantecomputere, og beskriv hvordan man i dag forsøger at begrænse mængden af fejl.

Generering af tilfældige tal

Beskrivelse: Tilfældige tal bruges til overraskende mange ting – lige fra kryptering over simulering til gambling. Men hvornår er et tal egentlig tilfældigt? Er 7 f.eks. et godt tilfældigt tal mellem 1 og 10? computere har indbyggede funktioner til at generere såkaldt pseudotilfældige tal, men de er ikke ægte tilfældige. Med kvantemekanik kan man generere ægte tilfældige tal, men er det virkelig besværet værd og hvordan gør man?

Kilder: [Random.org: Randomness](#), [Kaas-Mason et al., RUC: Comparison of Pseudo, Chaotic and Quantum Random Number Generators and their use in Cyber Security](#), [Vegard Flovik, Medium: A gentle introduction to Monte Carlo methods](#)

Mulige eksperimenter: Lav en Monte Carlo-simulering baseret på forskellige typer tilfældige tal

Forslag til opgaveformulering:

Der ønskes en behandling af udfordringerne ved generering af tilfældige tal og brugen af tallene.
Redegør for tilfældige tal og pseudotilfældige tal samt forskellen på de to begreber.



Redegør for en metode til generering af ægte tilfældige tal ved hjælp af kvantemekanik og en metode til generering af pseudotilfældige tal på anden vis.

Vis ved hjælp af en Monte Carlo simulering hvilken betydning det kan have, hvis der ikke anvendes tilstrækkeligt tilfældige tal.

Diskutér, hvornår der er behov for ægte tilfældige tal.

Kemi

Nitrogen Vacancy-centre i diamant

Beskrivelse: NV-centre er defekter i diamanter, hvor et kulstofatom er skiftet ud med et kvælstofatom. Det leder til, at der mangler yderligere et kulstofatom på en naboplads i krystalstrukturen. De overskydende elektroner vil fortsat være til stede på denne plads. Det giver mulighed for at måle meget små ændringer i magnetfelter.

Når NV-centrene exciteres af en laser til en bestemt tilstand vil der være to mulige spin-tilstande for elektronerne. Hvor stor energiforskel, der er på disse tilstande, afhænger af magnetfeltet. Dette kaldes Zeeman-effekten. Energiforskellen svarer til energien i en mikrobølge med en bestemt frekvens. Hvis man derfor scanner (dvs. sender bølger med stigende frekvens mod) NV-centeret med mikrobølger, vil man ved en given frekvens ramme en energi, der svarer til magnetfeltet.

Når elektronerne henfalder fra deres exciterede tilstand til grundtilstanden, udsender de lys. Hvor meget, der udsendes med frekvensen svarende til overgangen til grundtilstanden, afhænger af hvorvidt mikrobølgerne, der er blevet sendt mod NV-centeret, har haft den rigtige frekvens til at ændre spinnet. Man vil derfor kunne se et dyk i det udsendte lys, når mikrobølgerne har den rigtige frekvens. Den frekvens kan så via en energiforskel omregnes til størrelsen på magnetfeltet.

Kilder: [Integrated optics: Nitrogen-vacancy Magnetometry](#), [Degen et al., arXiv: Quantum sensing](#), [James Dargan, Quantum insider: 5 companies working with diamond NV quantum computing technology](#), [Castelletto et al., Nanophotonics: Frontiers in diffraction unlimited optical methods for spin manipulation, magnetic field sensing and imaging using diamond nitrogen vacancy defects](#),

Forslag til opgaveformulering:

Der ønskes en behandling af nitrogen vacancy-centre i diamanter.

Redegør for opbygningen af et nitrogen vacancy-center (NV-center) i diamant og hvordan de kan benyttes til nøjagtige målinger af magnetfelter.

Redegør for Zeeman-effekten og spin-tilstande.

Præsenter og diskutér en potentiel anvendelse af NV-centre.

Diskutér fordele og ulemper ved at bruge NV-centre til målinger.

He₂ – hvad skal der til for at identificere et molekyle?

Beskrivelse: Helium er en ædelgas og binder sig derfor ikke til andre atomer – eller gør det? Der findes faktisk målinger, der viser, at helium kan lave He₂ (og He₃) molekyler. Bindingerne mellem atomerne er dog meget svage.

Dette blev først vist ved at lave diffraktion på en stråle af He. Dette svarer til det klassiske eksperiment med gitterligningen. He-atomerne har en bølgelængde (de Broigle-bølgelængden), der kan beregnes ud fra Plancks konstant, massen af atomet og farten. Hvis der eksisterer He₂-molekyler vil de have den



dobbelte masse af atomet og derfor den halve bølgelængde. I eksperimentet vil dette komme til udtryk ved prikker fra He_2 mellem prikkerne fra He-atomer.

Kilder: [Urja Nandivada and Jim Martin, University of Waterloo: Wavicles and the weakest bond](#), [Brainiac75: the issue with green laser pointers](#), [Schöllkopf og Toennies: The nondestructive detection of the helium dimer and trimer](#)

Mulige eksperimenter: Test af grønne lasere for infrarødt lys (se videoen The issue with green laser pointers af Brainiac75)

Forslag til opgaveformulering:

Der ønskes en gennemgang af hvordan helium dimeren og trimeren blev opdaget.

Redegør for bindinger mellem atomer ud fra et energiperspektiv.

Redegør for de Broglie-bølgelængden og Heisenbergs ubestemthedsrelation.

Forklar Schöllkopf og Toennies eksperiment til detektering af He_2 og He_3 .

Undersøg om en grøn laser udsender infrarød stråling og brug dette forsøg som analogi til Schöllkopf og Toennies eksperiment.

Diskutér, hvad der skal til for at identificere et molekyle og hvornår en binding er stærk nok til at kunne siges at eksistere.

Køling med brug af faseovergange

Beskrivelse: For at få en kvantecomputer til at virke skal den køles ned til nogle få millikelvin. Det skal der mere end en ualmindeligt stor fryser til for at klare. For at komme ned på så lave temperaturer er vores bedste metode på nuværende tidspunkt at udnytte nogle specielle tilstande helium kan være i.

Med en normal fryser lader man et kølemiddel skiftevis fordampe og kondensere på hver sin side af fryseren. Fordampningen er en endoterm proces og fjerner derfor varme fra omgivelserne, mens kondenseringen er en exoterm proces og kan opvarme luften bagved fryseren. I en cryostat, der skal kunne køle ned til millikelvin benytter man flydende helium som kølemiddel. Det kan få temperaturen ned på nogle få kelvin. For at køle resten af vejen udnytter man, at helium har superflydende egenskaber og to isotoper med forskellige fasediagrammer samt varierende opløselighed i hinanden.

Kilder: [Acephysics: Clear Explanation of the Physics Behind \$^3\text{He}/^4\text{He}\$ Dilution Refrigerators: Reaching Absolute Zero](#), [2Veritasium: Quantum cooling to \(near\) absolute zero](#), [Britannica: Superfluidity](#),

Mulige eksperimenter: [Øvelse med cryostater ved Niels Bohr Institutet](#)

Forslag til opgaveformulering:

Der ønskes en behandling af, hvordan faseovergange for heliumisotoper kan benyttes til at opnå temperaturer på millikelvin.

Redegør for temperaturbegrebet ved ultralave temperaturer og superflydende væsker.

Redegør for heliumisotopernes faseovergange, mulige blandingsforhold og tilstandsformer.

Forklar hvordan egenskaberne ved helium-3 og helium-4 udnyttes til at opnå temperaturer på millikelvin i en cryostat.

Diskutér metoden ud fra et perspektiv om tilgængelighed af helium og muligheden for at anvende andre metoder til køling.



Laserkøling

Beskrivelse: Når man i kemilaboratoriet vil undersøge en reaktion, ser man altid på et enormt antal molekyler, der gennemgår reaktionen, og måler på makroskopiske effekter. Hvad der sker med de enkelte molekyler, må man så efterfølgende regne ud derfra. Kunne man se en enkelt reaktion foregå med alle dens delprocesser, så ville det give masser af værdifuld viden om hvordan reaktionen kunne optimeres og hvilke dele af molekylerne, der er afgørende for processen.

Med laserkøling kan man køle enkelte molekyler ned til så lave temperaturer, at det er muligt at følge med i de kemiske reaktioner, mens de sker.

Laserkøling virker som en selvmodsigende metode. Hvordan kan man køle noget ned ved at tilføje energi i form af lys

Kilder: [Quantum Chemistry: Inside the Universe's Coldest Test Tube](#), [Klaus Mølmer: Kolde atomer, Sixty symbols: Laser cooling](#)

Forslag til opgaveformulering:

Hvordan kan laserkøling anvendes til at undersøge kemiske reaktioner, og hvilke fysiske og kemiske principper ligger bag denne proces?

Redegør for principperne bag laserkøling, herunder dopplereffekt og impulsoverførsel.

Redegør for atomers spin og hvordan det kan have indflydelse på hvilke kemiske forbindelser de kan indgå i.

Diskuter, hvorfor det kan være interessant at undersøge kemiske reaktioner ved ultralave temperaturer.

Matematik

Bells teorem

Beskrivelse: I 2022 gik Nobelprisen i fysik til Alain Aspect, John Clauser og Anton Zeilinger for deres forsøg med sammenfiltrede (entangled) partikler. Formålet med forsøgene var at undersøge, hvordan den slags partikler opfører sig når de bringes langt væk fra hinanden og der måles på dem. Bells teorem (også kendt som Bells ulighed) fortæller hvilke resultater man bør få, afhængigt af om partiklerne følger kvantemekanikkens love eller kun påvirkes af lokale begivenheder. Denne problematik blev først opstillet i det, der kendes som Einstein-Podolsky-Rosen paradokset eller Spooky action at a distance.

Kilder: [Anders Sørensen, NBI Fysikleksikon: Bells ulighed](#), [NobelPrize.org: How entanglement has become a powerful tool](#), [J S Bell: On the Einstein Podolsky Rosen Paradox](#)

Mulige eksperimenter: [Øvelser på Aarhus Universitet](#), Malus lov

Forslag til opgaveformulering:

Der ønskes en behandling af Bells teorem og forsøgene der ledte til Nobelprisen i fysik i 2022. Redegør for grundlæggende begreber inden for kvantemekanikken, herunder superposition og sammenfiltrering.

Redegør for begrebet korrelation og hvordan det indgår i Bell's teorem.

Beskriv forsøgene der ledte til Nobelprisen i fysik i 2022. Kom herunder ind på hvordan de adskiller sig fra hinanden.



Diskutér konsekvenserne af resultaterne. Kom herunder ind på ikke-lokalitet og determinisme.

Kvantenøgledistribution

Beskrivelse: Kvantenøgledistribution er en metode til at bruge kvantemekaniske principper til at sende information sikkert mellem to personer. Ved at bruge fænomener som polarisering, superposition og partikel-bølge dualitet fra fysikken kan man sende informationer krypteret over et netværk. Fra matematikkens side anvender man vektorer, sandsynlighedsregning til at vise sikkerheden i metoden.

Kilder: [Anna L P Bjerregaard, NQCP: Kvantenøgledistribution](#), [LIFE: Unbreakable](#), [U Waterloo, IQC: Quantum cryptography \(og tilhørende aktiviteter\)](#)

Mulige eksperimenter: [Simulering i Unbreakable](#), [Simuleringer fra QuVis](#), Malus lov

Forslag til opgaveformulering:

Der ønskes en behandling af emnet kvantenøgledistribution.

Redegør for grundlæggende begreber inden for kvantemekanikken, herunder superposition, polarisering, enkelt-foton kilder og ikke-kloning.

Redegør for BB84-metoden og de underliggende matematiske og fysiske betragtninger, herunder basisvalg, projektion af vektorer og anvendelse af krypteringsnøglen.

Diskutér potentielle anvendelser af kvantenøgledistribution og forskellen til traditionelle/klassiske krypteringsmetoder.

Grovers algoritme

Beskrivelse: Grovers algoritme er en kvantealgoritme beregnet til f.eks. at sortere datasæt. Grovers algoritme er et eksempel på hvordan nogle kvantealgoritmer kan være hurtigere end klassiske algoritmer. Ved at påvirke en kvantetilstand ad flere omgange øger man sandsynligheden for at algoritmen giver et korrekt svar. Det virker lidt underligt, men fordi sandsynligheden stiger hurtigt og man har mulighed for at teste om svaret er korrekt, giver det et betydeligt hurtigere resultat. Fra matematikkens side anvender man vektorer, komplekse tal og sandsynlighedsregning til denne opgave.

Kilder: [3Blue1Brown: But what is quantum computing?](#), [Qiskit: Fundamentals of quantum algorithms \(online forløb\)](#),

Mulige eksperimenter: [Implementering i Qiskit på ægte kvantecomputer](#), ["Search for the stars" – spil udviklet af Institute for Quantum Computing ved University of Waterloo](#)

Forslag til opgaveformulering:

Der ønskes en behandling af Grovers algoritme.

Redegør for de kvantemekaniske principper, der ligger til grund for implementeringen af Grovers algoritme, herunder superposition, interferens, sammenfiltrering og måling.

Gør rede for Grovers algoritme og dens potentielle anvendelse til søgning i usorterede databaser.

Analysér opbygningen af Grovers algoritme og sammenlign med tilsvarende klassiske algoritmer.

Diskutér algoritmens betydning i forhold til kvantecomputerens potentiale og begrænsninger.

Shors algoritme

Beskrivelse: Shors algoritme er en kvantealgoritme, der kan bruges til at primtalsfaktoriser tal. Algoritmen er særligt interessant i et sikkerhedsmæssigt perspektiv, da primtalsfaktorisering er



centralt i næsten al moderne kryptering. På nuværende tidspunkt kan den bedste kvantecomputer kun faktorisere tallet 21, hvilket ikke er så imponerende, men på sigt forventes kvantecomputerne at kunne bryde al moderne RSA-kryptering. Opgaven kan evt. perspektiveres til post-quantum encryption.

Kilder: [Qiskit: Fundamentals of quantum algorithms \(online forløb\)](#),

Mulige eksperimenter: Faktorisering på egen computer af store tal

Forslag til opgaveformulering:

Der ønskes en behandling af Shors algoritme.

Redegør for de kvantemekaniske principper, der ligger til grund for implementeringen af Shors algoritme, herunder superposition, interferens, sammenfiltrering og måling.

Gør rede for Shors algoritme og dens potentielle anvendelser. Kom herunder ind på periodiske funktioner og fouriertransformationer.

Giv en fysikfaglig redegørelse for hvordan kvantemekaniske fænomener anvendes på en form for kvantecomputer.

Diskutér algoritmens betydning i forhold til kvantecomputerens potentiale og begrænsninger.

Naturgeografi/Geovidenskab

Kvantesensorer til monitorering

Beskrivelse: Nitrogen Vacancy (NV) Center-sensorer er en ny type sensorer, der baserer sig på kvantemekaniske principper til at måle magnetfelter ekstremt nøjagtigt.

Opmåling og monitorering af Jordens magnetfelt har længe været af stor videnskabelig og økonomisk interesse. Kortlægningen bruges bl.a. til kalibrering af navigationssystemer og til at finde mineralforekomster under Jordens overflade. Derudover kan målingerne bruges til at give os en forståelse af bevægelserne i Jordens flydende jernkerne.

Kilder: [Integrated optics: Nitrogen-vacancy Magnetometry](#), [Britannica: Geomagnetic field](#), [DTU Space: Geomagnetism and Geospace](#),

Forslag til opgaveformulering:

Redegør for de processer, der giver anledning til Jordens magnetfelt.

Redegør for, hvordan en Nitrogen Vacancy Center-sensor fungerer.

Analysér, hvordan magnetfeltmålinger benyttes i to selvvalgte anvendelser.

Diskutér perspektiverne ved at kunne lave mere nøjagtige lokale og globale målinger af Jordens magnetfelt.

Psykologi

MR-scanning

Beskrivelse: I en MR-scanner kan man måle en lang række ting ved hjælp af kraftige magneter. Det er en proces, der larmer en del og også kan vare relativt længe, mens man skal ligge fuldstændig stille.

Det kan selvsagt give nogle psykologiske udfordringer for patienterne, som i øvrigt ofte vil være nervøse for den resulterende diagnose.



De nuværende MR-scannere bruger meget kraftige superledende elektromagneter til at generere et stabilt magnetfelt, som ensretter en egenskab ved protonerne i kroppens vandmolekyler kaldet spin.

Ved hjælp af moderne kvantesensorer håber man på i fremtiden at kunne gøre teknologien meget mere nøjagtig ved at forbedre magnetfelterne. Med en anden tilgang forventer man at kunne lave maskinen om til f.eks. en maske eller hue ved at bruge sensorer, der kan måle hjernens naturlige elektriske processer.

Kilder: [Københavns Universitet: Young researcher has created a sensor that detects errors in MRI scans](#), [Daniele Faccio: The future of quantum technologies for brain imaging](#), [Rodrigo da Motta Cabral-Carvalho: Introduction to MRI: Forget the classical explanations, let's go quantum](#), [Chad D Jensen et al: Topical Review: Unique Contributions of Magnetic Resonance Imaging to Pediatric Psychology Research](#), [NVISION \(firma der tilbyder løsning\)](#)

Forslag til opgaveformulering:

Redegør for hvordan en MR-scanner virker.

Identificér og analysér psykologiske problemstillinger ved de nuværende MR-scanninger.

Undersøg et selvvalgt bud på hvordan MR-scanninger kan forbedres med kvantesensorer.

Diskutér perspektiverne ved at benytte kvantesensorer i fremtidige MR-scanninger i forhold til de psykologiske problemstillinger tidligere identificeret.

Samfunds-fag

Krypterings betydning i det moderne samfund

Beskrivelse: Kryptering af data er gået fra at være et nicheområde, der primært var interessant for dataloger og sikkerhedsfolk til i dag at være noget, der lever i manges bevidsthed i form af MitID, krypterede beskedtjenester, læk af informationer om brugeres oplysninger fra hjemmesider og længden og kompleksiteten af adgangskoder.

Meget af denne kryptering baserer sig på metoder, der med en funktionel kvantecomputer vil kunne brydes relativt hurtigt. Teknologien ligger stadig en del år ude i fremtiden, men den er tæt nok på til, at man så småt er begyndt at se på, hvordan man kan omstille sig til kvantesikker kryptering også kaldet postkvantekryptografi.

EU-kommissionen har i 2024 offentliggjort en henstilling til, at man allerede nu begynder "at udvikle og gennemføre en harmoniseret tilgang i takt med EU's overgang til postkvantekryptografi". I en rapport fra 2021 skriver EU's agentur for cybersikkerhed, at hvis man har data, der skal holdes fortroligt i mere end 10 år og en "angriber" kan få adgang til den krypterede tekst, bør man handle allerede nu.

Kilder: [Europa-kommissionen: Kommissionen offentliggør henstilling om post-Quantum Cryptography](#), [ENISA: Post-Quantum Cryptography](#), [Niels Bohr Institutet: Kvantecomputer, Quantum Internet Alliance](#)

Mulige eksperimenter: [Øvelser fra QuVis](#), [simulering fra Unbreakable](#)

Forslag til opgaveformulering:

Redegør for relevante aspekter af krypteringens betydning i det moderne samfund, herunder dens rolle i cybersikkerhed, kommunikation og beskyttelse af kritisk infrastruktur.



Redegør for centrale fysiske principper bag kvantecomputere og kvanteinternet, herunder sammenfiltring (entanglement), superposition og målinger på kvantemekaniske systemer. Analysér, hvordan kvantecomputere truer eksisterende krypteringsmetoder, og hvordan postkvantekryptering forsøger at imødegå disse trusler. Inddrag relevante samfunds-faglige teorier om teknologisk sikkerhed, innovation og politisk regulering, herunder Collingridge dilemmaet. Diskutér, hvordan investeringer i postkvantekryptering indgår i et digitalt kapløb og hvilke aktører det kan ses som en forsvarsmekanisme mod.

Teknologisk ulighed og kvanteteknologi

Beskrivelse: Brain drain – hvor højtuddannede søger mod lande med bedre arbejdsvilkår – har historisk været et problem for mindre nationer. I lyset af politiske forandringer under Trump-administrationen har en del amerikanske forskere valgt at søge mod europæiske forskningsmiljøer. I et studie fra marts 2025 angav 75 % af de adspurgte forskere, at de overvejede at forlade landet som følge af Trump administrationens adfærd.

I takt med at nye teknologier udvikler sig til strategiske nøgleområder skaber bevægelserne af højtuddannet arbejdskraft yderligere forskydninger i nationernes teknologiske ulighed. Kvanteteknologien er en af disse nye teknologier. På dette område har NATO placeret sit forskningscenter i Danmark. Det sker samtidig med at der investeres massivt i kvanteforskning og kvanteindustri i Danmark, men også i resten af verden. Quantum Information Science-studiet ved KU og DTU giver også et indtryk af Danmarks evne til at tiltrække sig international interesse. Her er 76 % af de nye studerende fra udlandet i 2025.

Hvad er det ved kvanteteknologien, der gør den til en strategisk nøgleteknologi? Hvorfor er så forskellige aktører som NATO og Novo Nordisk Fonden villige til at investere massivt på området?

Kilder: [Nature: 75 % of US scientists who answered Nature poll consider leaving](#), [Københavns Universitet: NATO DIANA Quantum Centre](#), [NATO Review: Quantum technologies in defence and Security](#), [Politiets Efterretningstjeneste \(PET\): Quantum technology and national security](#), [Mandag morgen: Teknologiske tigerspring øger den globale ulighed](#), [Branko Milanovic: Global ulighed](#)

Forslag til opgaveformulering:

Redegør for begreberne teknologisk ulighed og brain drain, samt deres betydning i en globaliseret forskningsverden.

Redegør for centrale fysiske principper bag kvanteteknologi, herunder sammenfiltring (entanglement), superposition og målinger på kvantemekaniske systemer.

Analysér, hvordan politiske og økonomiske forhold placerer kvanteteknologi i en sikkerhedspolitisk position.

Diskutér, hvorvidt Danmark har en styrkeposition på området og hvad den i så fald kan bruges til.

Investeringer i kvanteteknologi – Rumkapløb, boble eller nødvendighed?

Beskrivelse: I de seneste år er der investeret voldsomt i udviklingen af kvanteteknologi. I Danmark har særligt Novo Nordisk Fonden smidt flere milliarder efter udviklingen af kvanteteknologi. Den danske stat følger også godt med og har lavet en national kvantestrategi i to dele. Man ser lignende tendenser på verdensplan.

Hvad skyldes dette og giver det mening? Under rumkapløbet så man lignende storstilede prestigeprojekter, men blot mellem to nationer. Er investeringerne for store og i virkeligheden et udtryk



for en boble, der kan briste hvert øjeblik? Det har i mange år lydt at kvantecomputeren kun var et par årtier væk, nøjagtig ligesom fusionsenergien, som vi heller ikke har endnu.

Hvordan kan vi bedst beskrive den nuværende situation og hvad er der egentlig sket af nybrud, der kunne retfærdiggøre udviklingen?

Kilder: [UFM: Danmark opruster på kvanteområdet med en styrket talentindsats og nyt testcenter](#), [QURECA: Quantum initiatives worldwide 2025](#), [Ritzau: AU-forskere skal forhindre kvanteboble](#), [Erhvervsministeriet: Verdens største kvantefond åbner i Danmark](#), [Kim Sneppen](#), [Uniavisen: Pengene strømmer til kvant, mens resten af fysik skal fyre](#), [Perimeter Institute: Quantum 101](#), [Gartner Hype Cycle, Explained](#)

Forslag til opgaveformulering:

Redegør for den danske kvantestrategi med fokus på statens rolle i udviklingen af ny viden og industri. Redegør for centrale fysiske principper bag den kvanteteknologi, der søges udviklet i kvantestrategien, herunder sammenfiltring (entanglement), superposition, kvantesensorer og -computere. Analysér Novo Nordisk Fondens samspil med staten i udviklingen af kvanteteknologi i Danmark. Diskutér hvorvidt investeringerne i kvanteteknologi kan sammenlignes med tidligere teknologiske satsninger som rumkapløbet, eller om de bærer præg af en teknologisk boble. Inddrag relevante empiriske data og samfundsaglige teorier om økonomiske bobler og strategisk teknologiudvikling.



Yderligere forslag

Forslagene til større skriftlige projekter beskrevet ovenfor i dette dokument har hver fået en relativt udfoldet beskrivelse. I dette afsnit følger nogle forslag til projekter, der endnu ikke har fået en så omfattende behandling og blot består af en overskrift. De kan tages som yderligere inspiration.

- **Biologi**
 - Quantum Optical Coherence Tomography
- **Filosofi**
 - Hvad er en måling? Epistemologi
 - Partikel-bølge dualitet
 - Ethiske dilemmaer ved kvantekryptering
- **Historie**
 - Bohr og Einsteins diskussioner og deres historiske betydning
 - Overgangen fra klassisk fysik til kvantefysik – den 1. og 2. kvanterevolution
- **Idræt**
 - Hvad kan man måle på en person i bevægelse?
- **Kunstneriske fag**
 - Hvordan visualiserer man det usynlige og ubestemte?
- **Naturgeografi/Geovidenskab**
 - Hvordan finder man vej med en kvantesensor?
- **Samfundsfag**
 - Hvordan finder man en ubåd med en kvantesensor – og hvad gør man, når den er fundet?
 - Kvantecommunikation – hvad skal det bruges til?
 - Kvantestrategier – Alle lande begynder at have en

På flere af de danske universiteter er det muligt at lave eksperimenter relateret til kvanteteknologi i forbindelse med de større skriftlige opgaver. Nedenfor er henvisninger til hvor man finder øvelserne for de respektive universiteter.

- [Københavns Universitet](#)
- [Aalborg Universitet](#)
- [Aarhus Universitet](#)

De øvrige universiteter har også SRP/SOP-øvelser dog ikke om kvanteteknologi på nuværende tidspunkt.



Tilbagemeldinger modtages gerne

Har du eller en du kender brugt dette materiale og har kommentarer eller rettelser til indholdet, så send dem til jeppe.w.petersen@nbi.ku.dk. Første udgave af materialet er lavet i efteråret 2025 og vil blive opdateret løbende de næste år.

Dette materiale er lavet som en del af KVANT21-projektet under Fysiklærerforeningen. Projektet er støttet af Novo Nordisk Fonden.

