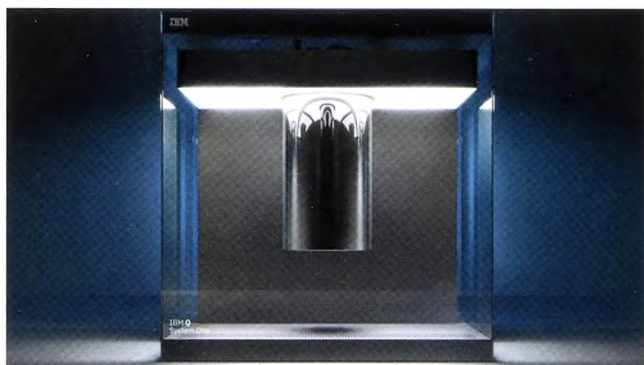


Kvanteteknologisk revolution – Den største udfordring er at uddanne nok

Kim Splittorff, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Den måske største flaskehals, for at Danmark kan spille en afgørende rolle i det igangværende kvanteteknologiske kapløb, er, om vi formår at uddanne tilstrækkeligt med kvalificeret arbejdskraft, med andre ord om vi kan opbygge en kvante-klar arbejdsstyrke. En af løsningerne kan være selv samme kvanteteknologi: Jeg argumenterer her for og giver eksempler på, hvordan kvantecomputere med fordel kan bruges i undervisningen på skoler, gymnasier og universiteter samt til efteruddannelse.

Den amerikanske udenrigsminister Anthony Blinken, den danske statsminister Mette Frederiksen og NATO's generalsekretær Jens Stoltenberg har alle besøgt Niels Bohr Institutet inden for det seneste år for at diskutere udviklingen af kvanteteknologier. Et af de brændende spørgsmål er uden tvivl: Hvornår vil kvantecomputere kunne opnå "quantum advantage", dvs. hvornår vil de kunne løse problemer, som selv de hurtigste supercomputere må give op over for?



Figur 1. IBM har i dag en række fungerende kvantecomputere, der kan tilgås online af alle: du kan selv over aftenkaffen afprøve Heisenbergs ubestemthedsprincip! Antallet af qubits vokser støt, og allerede nu er de perfekte redskaber til at formidle og undervise kvanteteknologi. Undervisnings-eksperimenter og -materiale på alle uddannelsesniveauer er under udarbejdelse på Niels Bohr Institutet. (Foto: IBM.)

Et spørgsmål, jeg personligt er lige så brændende optaget af, er: Hvordan får vi uddannet en kvante-klar arbejdsstyrke? Uanset om der går 5 eller 10 år [1], inden de nye kvanteteknologier vil revolutionere vores samfund, så afhænger Danmarks rolle heri af, om vi får uddannet tilstrækkeligt med kvalificeret arbejdskraft. Hvis vi i Danmark skal spille en afgørende rolle i det internationale kapløb om udviklingen af kvanteteknologier, og hvis danske virksomheder skal være i stand til at høste frugterne af den teknologiske udvikling, er det afgørende, at vi får uddannet tilstrækkeligt med unge og efteruddannet tilstrækkeligt af de etablerede i kvanteteknologi. I sommeren 2023 tager Københavns Universitet og DTU i fælleskab et vigtigt skridt i denne retning med en ny fælles kandidatuddannelse i Quantum Information Science [2]. Men den helt store udfordring er, at de årgange, der om 5–10 år kommer gennem universiteterne, er hele 15% [3] mindre end de årgange,

der netop nu får deres kandidatgrad. Det er derfor altafgørende ikke kun at tænke i kandidatuddannelser, men også at indtænke hele "fødekæden", så Danmark kan blive kvanteteknologiernes svar på Silicon Valley [4].

De muligheder, som kvanteteknologier potentielt åbner for, er så brede og vidtgående, at jeg ikke et sekund er i tvivl om, at dette i sig selv kan inspirere unge til at studere dem og inspirere de etablerede til at efteruddanne sig. Men det kræver, at den udvikling, der foregår netop nu, bliver formidlet på en måde, der er tilgængelig for andre end eksperter i kvanteteknologi.

Det centrale spørgsmål er altså: Hvordan får vi den kvanteteknologiske udvikling ind i undervisningen på skoler, gymnasier, B.Sc.-niveau og i efteruddannelse, så de unge og etablerede kan blive inspireret til se de muligheder, de har for at kunne gøre en forskel. Artiklen her giver et muligt svar: Brug kvantecomputeren!

Fra tørsvømning til live eksperimenter

Forestil dig at skulle undervise klassisk mekanik, emnet er det frie fald. Det er noget, som mange af Kvants læsere vil have prøvet før, men denne gang må du ikke tage en bold og lade den falde. Ja, du må ikke engang tage en bold med i undervisningen. Forestil dig yderligere, at dem, du underviser, aldrig har set en bold eller for den sags skyld noget som helst andet falde. Sådan har det i høj grad været at undervise i kvantemekanik. Den pædagogiske luksus det er, at dem, man underviser, ved, hvad en bold er og har en intuition for, hvad der vil ske, når man slipper den, har man ikke i kvantemekanik. Det ville være til at leve med, hvis man blot havde muligheden for at kunne lave kontrollerede eksperimenter (fx at lade bolden falde og måle sammenhæng mellem faldhøjde og hastighed), men indtil nu har dette heller ikke været muligt, når vi underviser i kvantemekanik. Vi har selvfølgelig forsøg som fx spektroskopi, men her har vi ikke kontrol over den tilstand, systemet starter i. Vi exciterer simpelthen så mange tilstande som muligt og observerer, hvad der efterfølgende sker. Undervisning i kvantemekanik har derfor haft visse ligheder med tørsvømning. Det ideelle ville være, hvis man i undervisningen kunne sætte netop den kvantemekaniske tilstand op, som vi ønsker, udsætte den for præcis de påvirkninger, vi kunne tænke os, og afslutte med at lave en vilkårlig måling.

Kvantecomputere er ekstremt velkontrollerede kvanteeksperimenter, hvor man netop kan sætte en vilkårlig kvantetilstand op og gøre med den, hvad man ønsker. Dvs. at vi med en kvantecomputer live kan lave netop de eksperimenter, der skal til for at give indsigt i kvantefænomener. Derfor er kvantecomputere ideelle redskaber til at undervise i kvanteteknologier.

Kvantecomputere er ikke en fremtidsdrøm, de eksisterer allerede. Rundt om i verdenen har flere konkurrerende firmaer udviklet fungerende kvantecomputere, der netop nu udfører beregninger på stadig voksende antal af qubits. Et af disse firmaer er IBM. IBM er ikke blot med i det internationale kapløb om at skabe den største og bedst fungerende kvantecomputer, de har samtidigt udviklet det førende interface, Qiskit, til at kommunikere med selve kvantecomputeren. Kommunikationen foregår online, og via Qiskit giver man en række instruktioner til kvantecomputeren, der derefter udfører eksperimenter svarende til instruktionen og sender resultaterne retur.

P.t. er der selvfølgelig en vis begrænsning i antallet af qubits, og hvor godt de er kontrollerede, men IBM's kvantecomputere (IBM Q) kan i dag med høj præcision lave netop de simple, eksemplariske eksperimenter, der egner sig bedst i undervisningssammenhæng. Derfor kan vi bruge de eksisterende kvantecomputere til at undervise i fremtidens kvanteteknologier! De åbner muligheden for, at man kan eksperimentere sig frem til en forståelse af forskellen på kvantemekanik og klassisk fysik, uden at skulle løse differentiaalligninger.

Superposition og sammenfiltrering

I studieåret 2021/22 introducerede vi eksperimentelle øvelser på IBM Q i kvantemekanik-kurserne på Niels Bohr Institutet, og vi er p.t. i færd med at videreudvikle øvelserne og gøre dem til en fuldt integreret del af undervisningen. Vi har også positive erfaringer med at benytte øvelserne på IBM Q i SRP-projekter (større opgave i 3.g. på STX-gymnasier) ved Niels Bohr Institutet. Nedenfor giver vi eksempler på, hvordan vi benytter kvantecomputere til at forstå de to helt centrale kvantemekaniske fænomener: superposition og sammenfiltrering.

Eksempel 1: Superposition

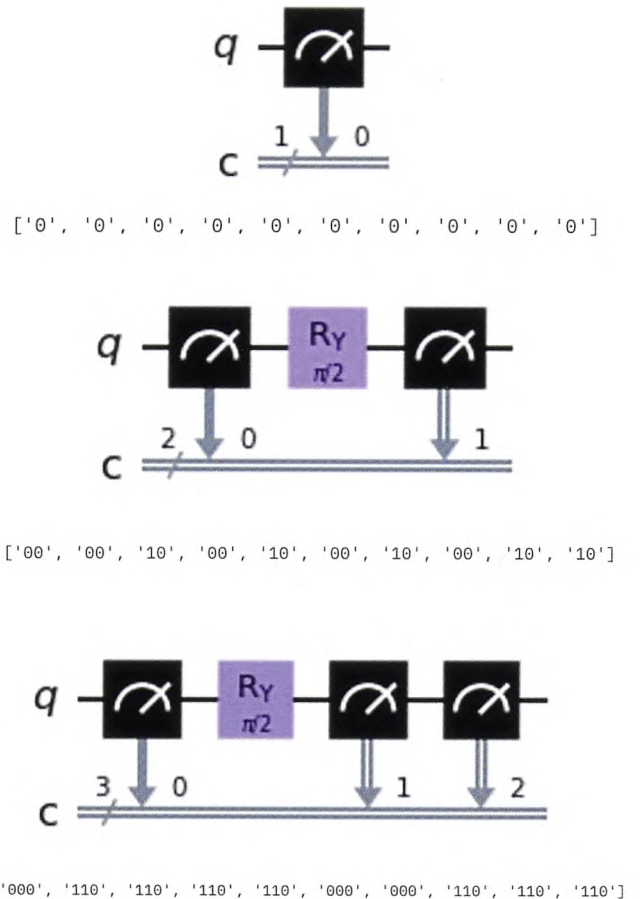
Grundelementet i en kvantecomputer er en qubit, dvs. et kvantemekanisk system med to tilstande. I lighed med en klassisk bit i en almindelig computer benævnes de to tilstande $|0\rangle$ og $|1\rangle$ og de mulige udfald¹, når man måler, er 0 og 1. Men her hører ligheden med den klassiske bit også op. For mens en klassisk bit enten er 0 eller 1, så kan en qubit være i en vilkårlig (normaliseret) superposition af $|0\rangle$ og $|1\rangle$, f.eks

$$|\psi_+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle) . \quad (1)$$

Vi siger, at den nye tilstand $|\psi_+\rangle$ er en *superposition* af de to tilstande $|0\rangle$ og $|1\rangle$. Tilstanden er hverken $|0\rangle$ og $|1\rangle$, den er en superposition, d.v.s. en sum $|0\rangle + |1\rangle$, og

¹Hvis dette minder dig om spin-tilstandene, $|\uparrow\rangle$ og $|\downarrow\rangle$, af fx elektroner, er du helt på rette spor. Det er fuldstændigt ækvivalent, det er alene notationen, der er lidt anderledes.

vi kan ikke forudsige med sikkerhed, om udfaldet bliver 0 eller 1, hvis vi udfører en måling. Superpositioner udfordrer derfor i den grad vores klassiske opfattelse af verden; og vores klassiske intuition for, hvordan den hænger sammen, spænder derfor ben, når man de første (mange) gange arbejder med superpositioner.



Figur 2. Visualisering af kvantekredsløb med en enkelt qubit (den vandrette sorte streger) og klassiske bits (de vandrette grå streger) til at læse resultatet af målinger ned i. Kvantecomputeren udfører eksperimentet 10 gange og sender resultatet tilbage. Øverst: Qubit-tilstand $|0\rangle$ og måling giver 0 hver gang. Midt: En rotation på 90° fører til superpositionen $1/\sqrt{2}(|0\rangle + |1\rangle)$, og resultatet af målingen kan ikke forudsiges med sikkerhed. Nederst: Efter målingen er superpositionen kollapset til enten $|0\rangle$ eller $|1\rangle$ afhængig af det målte. Dette testes ved at gentage målingen.

Superpositioner af tilstande er på en gang en af de helt grundlæggende egenskaber ved kvantemekanik og et af de afgørende elementer i kvantecomputere, hvor superpositioner er afgørende for at kunne lave beregninger, der ikke er mulige på en klassisk computer. I undervisningen kan vi udnytte kvantecomputeren til at studere, hvad der sker, når vi udfører målinger på en tilstand, der er en superposition af $|0\rangle$ og $|1\rangle$. Forsøgene på kvantecomputeren giver os mulighed for at opbygge en intuition for kvantemekaniske systemer.

I figur 2 er givet et eksempel på et kvantekredsløb med en enkelt qubit repræsenteret ved den vandrette sorte streger. Diagrammet er en visualisering af de instruktioner, vi beder kvantecomputeren udføre, og læses fra

venstre mod højre. I den øverste figur starter vores qubit i tilstanden $|0\rangle$. Derefter udfører vi en måling, illustreret ved den sorte box med meteret på. Da vores qubit starter i tilstanden $|0\rangle$, er der 100% sandsynlighed for at målingen giver 0, og efter målingen vil tilstanden igen være $|0\rangle$. Vi gennemfører forsøget på kvantecomputeren 10 gange, og resultatet af målingen er alle 10 gange 0. Så langt er alt helt analogt til en klassisk bit.

I den midterste del af figuren beder vi nu kvantecomputeren rotere tilstanden 90° (illustreret ved den lilla box), så den bliver $|\psi_+\rangle$. Derefter beder vi den udføre en måling. Spørgsmålet er, hvad vi kan forudsige om denne måling? Efter rotationen er vores qubit nu i superpositionen $|\psi_+\rangle$, og det er derfor ikke muligt at forudsige svaret af målingen. Det eneste, vi kan sige, er, at der er 50% sandsynlighed for at målingen giver 0 og tilsvarende 50% sandsynlighed² for at få 1.

Målepostulatet for kvantemekanik fortæller os yderligere (den nederste del af figuren), at hvis målingen giver resultatet 0, så er tilstanden efter målingen $|0\rangle$, og hvis vi måler 1, er tilstanden umiddelbart herefter $|1\rangle$. For at teste dette laver vi en måling mere og ser om resultatet stemmer hermed. Resultatet af 10 identiske forsøg (med 3 målinger og en rotation i hver) er opsummeret nederst i figur 2: Som forventet er alle resultater af den første måling 0, derefter har den anden måling givet ca. lige mange gange 0 og 1, og endelig har den afsluttende måling givet det samme som den forrige. Bemærk at resultaterne af målingerne kan læses fra højre, fx betyder 110, at den første måling gav 0, og de to efterfølgende gav 1.

Selv om dette er et simpelt eksempel med blot en enkelt qubit, involverer vores eksperiment på kvantecomputeren både den ikke-deterministiske natur af kvantemekanik og kollapset af tilstanden! Vores erfaring er, at eksperimenterne på kvantecomputeren i høj grad hjælper elever og studerende med til at konkretisere disse abstrakte regler.

Eksempel 2: Sammenfiltrering

Den anden helt grundlæggende egenskab ved kvantemekanik og helt afgørende egenskab for en kvantecomputer er sammenfiltrering (på engelsk entanglement). For at kunne opnå kvantemekanisk sammenfiltrering skal vi have minimum to qubits. Hvis de to qubits er sammenfiltrede, kan en måling på den ene qubit påvirke den anden. I de algoritmer, der kører på en kvantecomputer, sammenfiltres mange qubits, og man udnytter, at en måling på en enkelt qubit kan påvirke mange qubits *instantant*. I undervisningssammenhæng er det tilstrækkeligt at se på to qubits for at begynde at opbygge en intuition for kvantemekanisk sammenfiltrering.

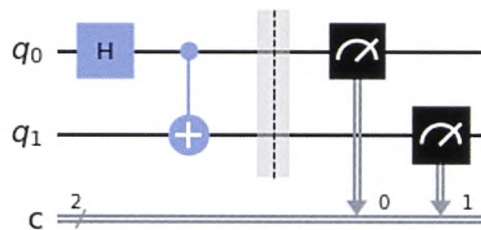
I eksemplet, der er givet på figur 3, instruerer vi kvantecomputeren i at sammenfiltrere to qubits i tilstanden

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) . \quad (2)$$

²Vi har positive erfaringer med, at elever selv udleder dette ud fra regnereglerne $\langle 0|0\rangle = \langle 1|1\rangle = 1$ og $\langle 0|1\rangle = \langle 1|0\rangle = 0$ samt at sandsynligheden er givet ved (absolut) kvadratet på hhv. $\langle 0|\psi_+\rangle$ og $\langle 1|\psi_+\rangle$.

³Vi kan ikke forudsige, hvad resultatet præcis vil være, når vi måler på den første qubit, kun at det igen er lige sandsynligt at måle 0 og 1. Men hvis vi fx måler 0, så vil tilstanden efter målingen være kollapset til $|00\rangle$. Derfor vil en efterfølgende måling på den anden qubit med sikkerhed give 0. Tilsvarende hvis vi ved at måle på den første qubit havde fået 1, så ville den anden måling give det samme, nemlig 1.

En måling på det ene af de to qubits vil nu bestemme udfaldet af målingen på det andet!³ Igen er dette imod vores klassiske intuition for, hvordan verdenen opfører sig, og forsøgene på kvantecomputeren kan hjælpe os med at acceptere, at denne klassiske intuition ikke virker her og i stedet begynde at opbygge en kvanteintuition.



Figur 3. Visualisering af kvantekredsløb med to sammenfiltrede qubits. De to vandrette sorte streger illustrerer 2 qubits, der bliver sammenfiltret via en CNOT-gate, illustreret med den lodrette blå gate. Når to qubits er sammenfiltrede, vil en måling på den ene påvirke tilstanden af den anden. Målingerne er illustreret ved de sorte metre.

Det er også lige til for elever/studerende/kursister selv at udtænke andre forsøg, lynhurtigt sætte disse forsøg op og udføre dem på IBM's kvantecomputer. Dette giver dem en unik mulighed for at optræne en kvanteintuition. De kan fx udfordre deres forståelse ved at gentage forsøget med tilstanden

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |11\rangle) , \quad (3)$$

og se om de kan forklare resultatet. Dette kræver blot, at de indsætter en enkelt operation i diagrammet og kører forsøget på kvantecomputeren igen!

Træner mere end bare kvantemekanik

Siden 2015 er antallet af fysikere, der arbejder med computermodellering og -programmering efter endt kandidatuddannelse steget markant [5], og efterspørgslen efter kandidater med disse kompetencer forventes kun at blive øget. I dette lys er det interessant, at kvantemekanik-øvelserne på IBM Q ikke blot træner de studerende i kvantemekanik, det giver dem samtidig lejlighed til at interagere med en af de allermest højteknologiske platforme, der overhovedet eksisterer. Derved får de studerende unik træning i at benytte og udvide programmerings-pakker, samtidig med at de skal bevare overblikket over det system, de eksperimenterer med. Det er netop denne kombination af overblik, matematisk forståelse og programmeringsevner, der gør fysikere så attraktive på arbejdsmarkedet [6].

I øvelser til skoler og gymnasier er det muligt at benytte IBM's Qiskit "composer", hvor den kode, der styrer selve kvanteforsøget alene består af de symbolske blokke, der er vist i figur 2, så eleverne ikke skal forholde sig til python-kode.

Udvikling af undervisningsmateriale

Kvantecomputere er idelle redskaber til at undervise i kvantefænomener fra skoler over universiteter til efteruddannelse, men for at potentialet for alvor kan foldes ud, og denne platform kan blive brugbar bredt, kræver det, at vi udvikler undervisningsmateriale tilpasset den enkelte målgruppe.

Niels Bohr Institutet har allerede startet arbejdet med at udvikle undervisningsmateriale til B.Sc.- og M.Sc.-undervisning, samt til SRP- og SOP-forløb (større projekt i 3.g i hhv. STX- og HTX-gymnasierne). Vi har for nylig modtaget midler fra blandt andet Københavns Universitets pulje til forskningsintegration i undervisningen til at videreudvikle dette undervisningsmateriale og tilpasse det til andre målgrupper.



Figur 4. Den måske største udfordring i det kvanteteknologiske kapløb er at få uddannet tilstrækkeligt mange med de rette kompetencer. Billederne ovenfor illustrerer nogle af de vigtigste elementer i at uddanne i kvanteteknologier: Kontrollerede eksperimenter på kvantecomputere styret fra almindelige computere, peer-sparring og diskussioner. Fotos af Ola J. Joensen, Niels Bohr Institutet.

Opsummering og et kig fremad

De kvanteteknologier, der netop nu er i rivende udvikling, har potentialet til at være transformative teknologier, dvs. teknologier, der fundamentalt ændrer vores samfund. Der er flere interessante udfordringer, før disse teknologier bliver foldet fuldt ud, både teknologiske, men også i høj grad uddannelsesmæssige. Et af Danmarks stærkeste kort i det internationale kvanteteknologiske kapløb er vores høje uddannelsesniveau på området [7]. For at fastholde denne *educational quantum advantage* er det afgørende, at vi både inspirerer kommende

generationer til at studere på relevante uddannelser og de etablerede, der allerede er i arbejde, til at engagere sig i efteruddannelse.

Her har vi fokuseret på brugen af kvantecomputere til at formidle og undervise i kvanteteknologi, men dette skal selvfølgelig kun ses som ét redskab blandt mange, der skal til for at løfte den samlede opgave. Niels Bohr Institutet har for ganske nyligt fået støtte fra Novo Nordisk Fonden til at opbygge et nyt quantum science teaching laboratory, hvis primære mål er at kunne give gymnasieelever en hands-on eksperimentel indgang til kvanteteknologier. Det afgørende for, at disse indgange til undervisning i kvanteteknologier kan have succes med at formidle og inspirere, er, at der bliver udarbejdet et velafprøvet undervisningsmateriale rettet mod de relevante målgrupper. Niels Bohr Institutet er i fuld gang med dette sammen med en række sparringspartnere på gymnasier og i virksomheder. Hvis I er interesserede i at vide mere eller bidrage, er I meget velkomne til kontakte denne artikels forfatter på split@nbi.ku.dk.⁴

Litteratur

- [1] Roadmap IBM Quantum, <https://research.ibm.com/blog/ibm-quantum-roadmap-2025>.
- [2] Ny kandidatuddannelse i “Quantum Information Science”, <https://studies.ku.dk/masters/quantum-information-science/>.
- [3] Danmarks Statistik, <https://extranet.dst.dk/pyramide/pyramide.htm>.
- [4] “Danmark kan blive “Silicon Valley for kvanteteknologi” med ny NATO-satsning, Institutleder på Niels Bohr Institutet, Jan W. Thomsen <https://videnskab.dk/teknologi-innovation/danmark-kan-blive-silicon-valley-for-quantum-technology-med-ny-nato-satsning>.
- [5] Undersøgelse af fysik-kandidater fra KU’s jobfunktion efter endt uddannelse, Danmarks Statistik.
- [6] Aftagerpanel for Fysik, Kemi og Nanoscience 2020.
- [7] Economic impact of Quantum in The Netherlands, Quantum Delta, Nederland, maj 2020.



Kim Splitteroff er lektor ved Niels Bohr Institutet og N. Zahles Gymnasieskole. Foto: Ola J. Joensen.

⁴Det er en fornøjelse at takke kollegaer og studerende på universiteter og gymnasier for deres store interesse og entusiasme for kvanteteknologier. Særligt Anna Liv Bjerregaard og Victoria Inselmann for deres aktive bidrag til at udvikle øvelser på IBM Q og arbejde med at inkludere dem i undervisningen i kurset kvantemekanik 1 i vinteren 2022; Niels Obers, Jason Koskinen, Anders Sørensen og Markus Ahlers for direkte samarbejde om kvantemekanikkurserne på Niels Bohr Institutet. Også stor tak til IBM for at stille IBM Q til rådighed for undervisning og særligt Jan B. Lillelund samt Lucas Ament for løbende sparring om brugen af IBM Q. Endeligt en stor tak til Niels Bohr Institutet, KU’s pulje for forskningsintegration samt Novo Nordisk Fonden for deres støtte, der har muliggjort arbejdet.