Men hvad er en kvantecomputer egentlig?

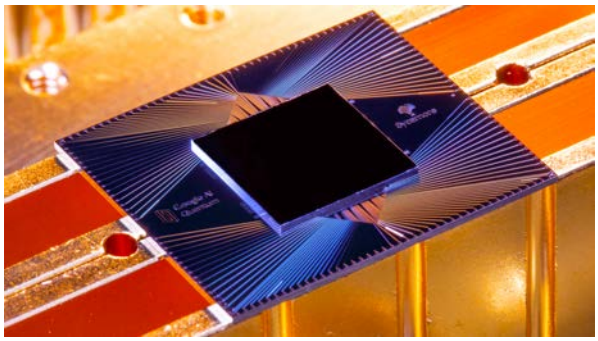
Christian Steenberg Norre, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

En kvantecomputer er *ikke* bare en ny supercomputer. Den fungerer på en helt anden måde, og kan gøre nogle helt andre ting. Det er svært at udvikle effektive programmer til en kvantecomputer, men også svært at bygge selve maskinen. På nuværende tidspunkt er der kun bygget nogle ganske få og ganske små kvantecomputere, som kan udføre simple kvanteprogrammer, men som ikke er store nok til at lave spændende udregninger. For at forstå hvorfor en kvantecomputer kan noget andet end en supercomputer, skal man have en forståelse for, hvordan en kvantecomputer er bygget, og specifikt hvad "kvant"-delen af navnet omhandler. Når man har styr på dette, kan man værdsætte de udfordringer og krav, der ligger i at bygge en stor kvantecomputer.

Kvantecomputeren er en ny teknologi i hurtig udvikling og med mange anvendelser. De fleste har formodentligt kun hørt om kvantecomputere i konteksten af nyhedsoverskrifter. De lyder ofte som: "Kvantecomputere kan give hackere adgang til alle dine følsomme oplysninger!". Dette burde ikke alarmere læseren, da moderne kryptering ikke engang er beskyttet mod den type computere, vi alle allerede ejer, og som vi kan kalde klassiske computere. Som med alle andre låse så opstår sikkerheden, fordi den afskrækker hackere med det enorme mængde arbejde, der skal til for at bryde krypteringen. De, som alligevel forsøger, kan forvente, at det vil tage flere millioner år at bryde krypteringen med klassiske computere. Andre og simplere krypteringsmetoder blev benyttet før i tiden og er hver især erstattet med stærkere versioner i takt med, at computere blev hurtige nok til at bryde krypteringen på en fornuftig mængde tid. Det mest oplagte eksempel på dette fænomen er enigmakoden fra anden verdenskrig, som Alan Turing brød ved at bygge en maskine, der var meget hurtigere, end hvad man kunne opnå med menneskekraft.

Krypteringer formuleres ofte som en matematisk udregning, som er nem og hurtig at udføre i én retning, men svær i den modsatte. En af de mest anvendte typer kryptering i moderne computere kaldes RSA og er baseret på primtalsfaktorisering, såsom $17 \times 23 = 391$. At gange to tal sammen er trivielt, men at deducere de to faktorer ved udelukkende at kigge på resultatet er utroligt svært. I praksis bruger RSA primtal, som er mange hundrede cifre lange, hvilket gør faktoriseringen, og dermed brydningen af krypteringen, praktisk talt umulig.

Kvantecomputere er dog ikke bare det næste skridt i hurtige computere, men noget helt andet. Kvantecomputere kan køre kvantealgoritmer (læs kvanteprogrammer), som kan være eksponentielt meget hurtigere end deres klassiske analoger. Peter Shors faktoriseringsalgoritme er den kvantealgoritme, som vil bryde RSA ved at lave superhurtig primtalsfaktorisering. Hvis man forsøger at køre dette kvanteprogram på en klassisk computer, vil den være meget langsommere end konventionelle programmer, netop fordi et kvanteprogram benytter kvantemekaniske effekter, som ikke er tilgængelige på en klassisk computer. For at kunne opnå den lovede eksponentielt hurtigere hastighed, skal man bygge en computer, som kan inkorporere kvantemekaniske effekter, og dette er, hvad vi kalder en kvantecomputer.



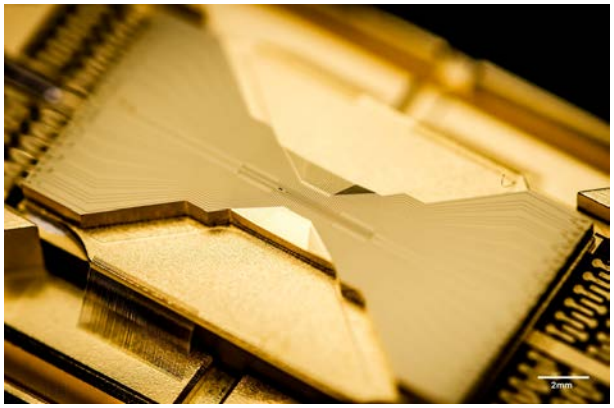
Figur 1. Foto af Googles Sycamore processor fra 2021. Den består af 53 kvantebits implementeret med superledende kredsløb. Google påstår selv, at denne er både stor og stabil nok til at være hurtigere end klassiske supercomputere til meget specifikke anvendelser [1].

Shors faktoriseringsalgoritme er så meget hurtigere, at fremgangsmåden med at bruge primtalsfaktorisering til kryptering vil uddø, så snart den første kvantecomputer af fornuftig størrelse bliver bygget. Der er heldigvis en masse aktiv forskning i den næste generation af krypteringsalgoritmer, som er robuste selv over for kvantecomputere. Nyhedsoverskrifterne er derfor ikke helt forkerte, men det er lidt mere nuanceret. En kvantecomputer er ikke universelt hurtigere, og en af de store udfordringer ligger i at finde den type anvendelser, hvor kvantecomputeren har en fordel over en klassisk computer. Den nuværende liste af kvantealgoritmer, som man ved er hurtigere, end hvad man kan opnå på en klassisk computer, er begrænset, men der forskes aktivt i at finde nye kvantealgoritmer til at løse forskellige typer problemer.

Eftersom vi stadig bruger RSA-kryptering i dag, kan læseren hurtigt deducere, at vi endnu ikke har bygget en ordentlig kvantecomputer. Grunden til det er, at det er meget svært at bygge et system, der er stabilt nok til at udvise kvantemekaniske effekter og samtidigt stort nok til at udføre udregninger på det. Man kunne argumentere for, at det er spild af penge, at der forskes i anvendelserne af en kvantecomputer, når vi ikke engang ved, om vi kan bygge én, ligesom man også kan spørge: "Hvorfor bygge en kvantecomputer, hvis vi ikke ved, hvad den kan bruges til?".

For at forstå hvad udfordringen er, skal man først forstå *hvad* en kvantecomputer er, og hvordan den er

forskellig fra en klassisk computer.



Figur 2. Foto af IonQ's Forte processor fra 2022. Den kan indeholde op til 32 kvantebits implementeret med fangede ioner i en lineær fælde. Kilde: Kai Hudek, IonQ [2].

Kvantebit

Vi har alle hørt, at en computer består af en masse 0'er og 1'er. Hvis vi følger den model, så er byggestenen for en klassisk computer et eller andet objekt, der kan antage to skelnelige værdier, som vi kan kalde 0 og 1. Et sådant objekt kaldes en *bit*, og vi bygger en computer ved at sætte en masse bits sammen. Vi kan da intuitivt sige, at man bygger en kvantecomputer ved at sætte en masse kvantemekaniske bits sammen. Forståelsen for, hvordan man bygger en kvantecomputer, starter derfor ved at forstå, hvordan disse individuelle kvantebits fungerer.

En kvantebit er et objekt, som er ækvivalent til en bit, men som også kan udvise kvantemekaniske egenskaber såsom superposition, interferens, og sammenfiltring. For at gøre det tydeligt, at vi nu arbejder med kvantemekanik, plejer vi at skrive $|0\rangle$ og $|1\rangle$ i stedet for 0 og 1. En kvantebit $|q\rangle$ i en *superposition* kan skrives som

$$|q\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle. \tag{1}$$

Det kan tolkes, som at en kvantebit kan være i begge tilstande samtidigt. En spøjs egenskab er, at når man laver en måling af vores kvantebit, så opdager man, at den *enten* er $|0\rangle$ eller $|1\rangle$; vi kan altså ikke måle selve superpositionen. Yderligere, så er det tilfældigt, hvilket resultat vi får ved en måling. Amplituderne c_k er komplekse tal, hvis normkvadrat, $|c_k|^2$, giver sandsynligheden for at se en given tilstand $|k\rangle$ ved måling. Hvis vi har to kvantebits, A og B, som hver især er i en superposition med vilkårlige amplituder, så kan de samlet skrives som

$$|q_A\rangle|q_B\rangle = (c_0|0_A\rangle + c_1|1_A\rangle) \cdot (c_0|0_B\rangle + c_1|1_B\rangle) \tag{2}$$

$$= c_{00}|0_A\rangle|0_B\rangle + c_{01}|0_A\rangle|1_B\rangle + c_{10}|1_A\rangle|0_B\rangle + c_{11}|1_A\rangle|1_B\rangle. \tag{3}$$

Vi ser her, at to kvantebits kan være i en superposition af alle kombinationer af to klassiske bits: 00, 01, 10, 11. Generaliseringen er, at N kvantebits kan være i en superposition af alle 2^N kombinationer af N klassiske bits. Et kvanteprogram bruger den samme mængde arbejde på at udføre en opgave, uanset om kvantecomputeren er i en superposition eller ej. Det betyder, at en kvantecomputer kan udføre en udregning på samtlige inputværdier samtidigt. Et klassisk program skal udføres 2^N gange – én gang per mulig inputværdi. En kvantecomputers evne til at lave alle udregninger på samme tid kaldes kvanteparallelisme.

Dette er en klar fordel ved kvantecomputere, men som sagt, så får man et tilfældigt led fra superpositionen, når man laver en måling, og dermed ikke nødvendigvis det ønskede resultat. *Interferens* kan hjælpe os med dette målingsproblem. Interferens udnytter, at amplituderne i en superposition er komplekse tal og derfor kan have en kompleks fase. Vi skriver ofte komplekse tal i polær form som

$$c_k = |c_k|e^{i\theta_k}, \tag{4}$$

hvor $|c_k|^2$ angiver sandsynligheden for en given tilstand, og θ_k er den komplekse fase, som ligger mellem 0 og 2π. Denne fase kan give forskellige led i en superposition forskelligt fortegn. Hvis man lægger to superpositioner sammen, men med forskellige faser, kan man få

$$\left(e^{i\,0}|0\rangle + e^{i\,0}|1\rangle\right)/2 + \left(e^{i\,0}|0\rangle + e^{i\,\pi}|1\rangle\right)/2 \tag{5}$$

$$= \left(|0\rangle + |1\rangle\right)/2 + \left(|0\rangle - |1\rangle\right)/2 = |0\rangle, \tag{6}$$

hvor vi ser, vi helt kan miste muligheden for at måle tilstanden $|1\rangle$ grundet fortegnsskift. Dette er en essentiel del af, hvordan man bruger en kvantecomputer effektivt. Efter det nemme trin, hvilket er at konstruere en total superposition og udføre en udregning på den, så kommer det indviklede trin, hvor vi skal have alle de uønskede resultater til at interferere med hinanden. Dette vil efterlade kvantecomputeren i en superposition udelukkende af de ønskede resultater. I så fald vil en måling, dog stadig tilfældig, altid give et godt resultat. Dette er den primære udfordring i at lave et godt kvanteprogram.

En tredje kvantemekanisk effekt som kvantebits skal kunne udvise er *sammenfiltring*. Et sæt af kvantemekaniske systemer siges at være sammenfiltrede, hvis de ikke kan beskrives hver for sig, men kun samlet. Dette kan tolkes på den måde, at systemerne holder information om hinanden. Matematisk kan det beskrives som, at tilstanden for et samlet system *ikke* kan faktoriseres til separate faktorer for hver kvantebit. Et eksempel på to kvantebits, der ikke er sammenfiltrede, er ligning (2), da den kan skrives som

$$|q_A\, q_B\rangle = |q_A\rangle \cdot |q_B\rangle. \tag{7}$$

Et eksempel på sammenfiltring kan være

$$|q_A\, q_B\rangle = c_{00}|0_A\rangle|0_B\rangle + c_{10}|1_A\rangle|0_B\rangle + c_{11}|1_A\rangle|1_B\rangle. \tag{8}$$

Lad os sige, vi laver en måling af kvantebit A og får resultatet 0. I så fald vil tilstanden kollapse til de led, som overholder vores målingsresultat

$$|0_A\, q_B\rangle = c'_{00}|0_A\rangle|0_B\rangle, \tag{9}$$

hvoraf vi med det samme kan deducere, at kvantebit B også er i tilstand $|0\rangle$. Fordi disse kvantebits var sammenfiltrede, så havde en måling på den ene kvantebit

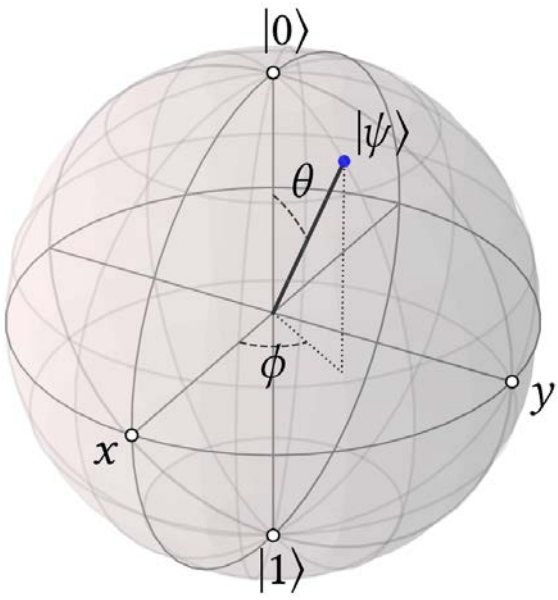
en effekt på de mulige udfald for den anden. Vi kan også sige det som, at vi fik information om kvantebit B uden at måle på den. Hvis vi i stedet havde fået resultatet 1 ved måling af kvantebit A, så havde den nye tilstand bestået af to led

$$|1_A\, q_B\rangle = c'_{10}|1_A\rangle|0_B\rangle + c'_{11}|1_A\rangle|1_B\rangle. \qquad (10)$$

Her ser vi at kvantebit B stadig er i en superposition. Vi har dog stadig fået information om B, da amplituderne, c_k, ændrer sig efter en måling, hvilket betyder, at sandsynligheden for at måle kvantebit B i tilstand $|1\rangle$ ændrer sig fra $|c_{11}|^2$ før målingen af kvantebit A, til $|c'_{11}|^2$ efter målingen. Hvis vi manipulerer en kvantebit, uanset om det er via en måling eller en anden operation, så vil det have en effekt på alle de kvantebits, der er sammenfiltret med denne.

Blochsfæren

En enkel kvantebit er ofte repræsenteret på Blochsfæren, hvis overflade svarer til forskellige tilstande. Nord- og sydpolen er specielle, da de svarer til tilstandene $|0\rangle$ og $|1\rangle$ hver især. En arbitrær tilstand på overfladen af denne sfære kan da beskrives ved to vinkler som vist i figur 3. Det er ækvivalent til, hvordan vi kun skal bruge to koordinater (længde- og breddegrad) til at beskrive et vilkårligt punkt på jorden.



Figur 3. Illustration af Blochsfæren. Polerne svarer til tilstandene $|0\rangle$ og $|1\rangle$. Resten af overfladen repræsenterer alle mulige tilstande $|\psi\rangle$ for en enkel kvantebit. Vinklen θ er et mål for vinklen mellem z-aksen og vores tilstand $|\psi\rangle$. Vinklen ϕ er målt som vinklen mellem x-aksen og projektionen af $|\psi\rangle$ ned på xy-planet. Hvis denne sfære var Jorden, så ville ϕ være et mål for længdegrader, og θ et mål for breddegrader (dog målt fra Nordpolen og ned i stedet for at måle fra Ækvator og op).

Tilstanden vil da blive skrevet som

$$|\psi\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)|0\rangle + e^{i\phi}\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)|1\rangle, \qquad (11)$$

hvor θ er den polære vinkel, som antager værdier mellem 0 og π, og ϕ er den azimutale vinkel, som antager værdier mellem 0 og 2π. Den komplekse fase for et givent led er ikke observerbar, da den forsvinder under normkvadratet. Den eneste effekt fasen kan have er ved interferens, hvilket kun afhænger af den komplekse faseforskel mellem forskellige led. Da én kvantebit har to tilstande, så har den kun én faseforskel, og vi vælger arbitrært at sætte denne på $|1\rangle$. Man kan hurtigt tjekke, at denne form overholder de forventede grænser i sfærens nordpol ($\theta = 0$) og sydpol ($\theta = \pi$), men vi ser også at ækvator ($\theta = \pi/2$) giver amplituderne $|c_0| = |c_1| = 1/\sqrt{2}$. Da kvadratet af disse giver sandsynligheden for hver tilstand, konkluderer vi, at ækvator svarer til alle de lige superpositioner; altså $50\%\,|0\rangle$ og $50\%\,|1\rangle$, med alle relative faser ϕ.

En klassisk bit i denne repræsentation vil blot være nord- og sydpolspunkterne, så vi kan allerede med Blochsfæren se, at en enkel kvantebit kan meget mere end en enkel klassisk bit.

Gateoperationer

At få en kvantecomputer til at udføre en udregning kræver, at vi kan lave en serie af operationer på individuelle kvantebits. Som nævnt kan en klassisk bit være enten 0 eller 1, så den eneste mulige operation på disse er at skifte mellem 0 og 1, hvilket er en diskret operation. Udover at kvantebitoperationer er kontinuere, så er der også flere af dem. I analogi til klassiske logiske operationer, såsom `AND`-gates og `NOT`-gates, så kalder vi kvantebitoperationer for gateoperationer.

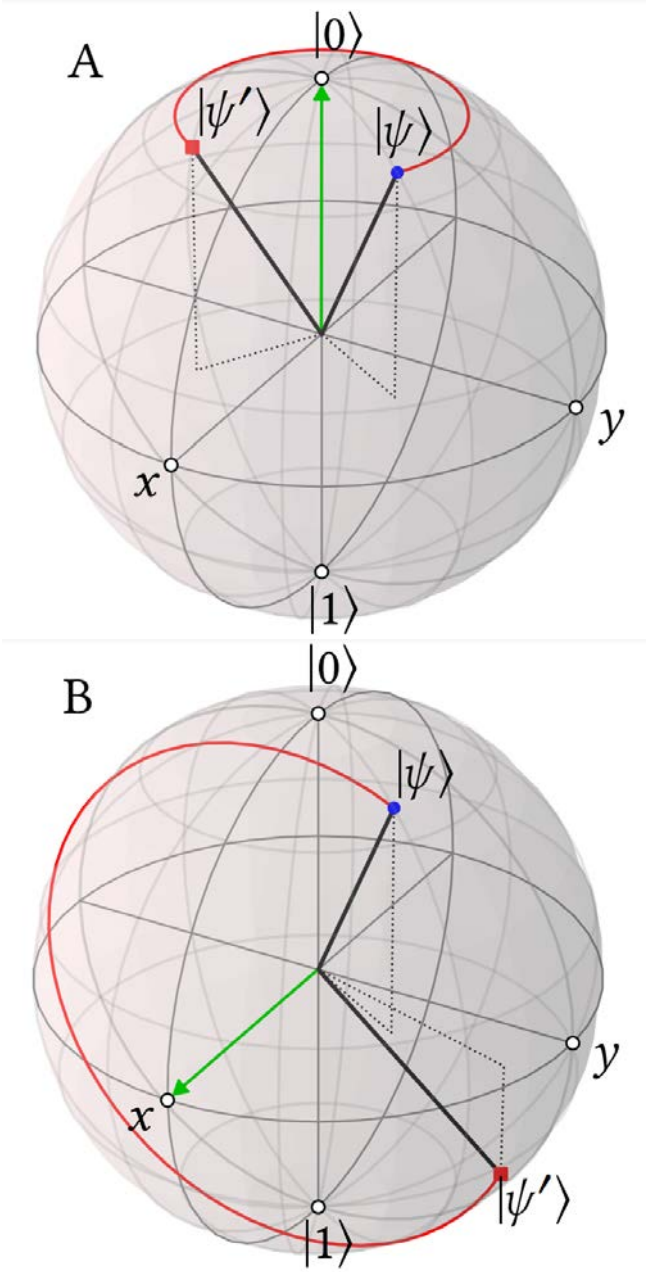
En operation vil da være en ændring af tilstanden for en kvantebit til en ny tilstand. På Blochsfæren vil dette svare til at flytte et givent punkt langs med overfladen til et nyt punkt. Sættet af operationer, der opfylder dette, kaldes for enkelt-kvantebitgates, da de indtil videre kun involverer ændringen af tilstanden for en enkel kvantebit. Hvis vi gerne vil have en systematisk måde at lave vilkårlige operationer på Blochsfæren, så kan vi beskrive hver operation som en kombination af rotationer. Da en kombination af rotationer om de kartesiske akser, x, y, z, kan flytte et vilkårligt punkt til et vilkårligt andet punkt, så kan vi repræsentere enhver enkelt-kvantebitgate som et produkt af rotationsoperatorerne, R_x, R_y, R_z, med passende rotationsvinkler på hver. Den nødvendige operator, U, der kan opnå

$$|\psi\rangle \to |\psi'\rangle = U(\alpha,\beta,\gamma)|\psi\rangle, \qquad (12)$$

skal derfor kunne skrives som

$$U(\alpha,\beta,\gamma) = R_x(\alpha)R_y(\beta)R_z(\gamma). \qquad (13)$$

To af disse rotationer er illustreret i figur 4. Vi kan lægge mærke til, at R_x- og R_y-rotationer bevæger vores tilstand mellem nord- og sydpol. Dette kan tolkes som en kontinuert version af den klassiske operation, som var diskret; altså et gradvist skift mellem tilstanden $|0\rangle$ og $|1\rangle$. R_z-rotation er anderledes. En rotation om denne vil udelukkende ændre den relative fase uden at ændre på de relative sandsynligheder for $|0\rangle$ og $|1\rangle$. $|c_0|$ og $|c_1|$ er altså uændret under rotationen. Dette er en ny type operation, som ikke har nogen klassisk analog.



Figur 4. Eksempler på simple operationer på en tilstand $|\psi\rangle$ repræsenteret på en Blochsfære. Der bliver udført en rotation om den grønne pil, som ligger langs z-aksen i A og x-aksen i B. De er begge roteret med vinklen $3\pi/2$, og deres bevægelse undervejs for rotationen er markeret med det røde spor. Sluttilstanden efter rotationen er noteret $|\psi'\rangle$.

To-kvantebitgates

Det ovenstående var udelukkende enkelt-kvantebitgates, men disse er ikke nok til at bygge en kvantecomputer. Problemet er, at en serie af enkelt-kvantebitgates aldrig kan anbringe vores kvantecomputer i en sammenfiltret tilstand. Til at opnå dette skal vi bruge en gate, der agerer på flere kvantebits ad gangen. I det simple tilfælde hvor to kvantebits interagerer, kalder vi dem for to-kvantebitgates. Siden operationer på en enkelt-kvantebit allerede kræver tre dimensioner at visualisere (Blochsfæren), så må to-kvantebitgates nødvendigvis kræve flere dimensioner, end vi har adgang til. De er derfor ofte beskrevet matematisk som matricer.

Et generelt eksempel på en to-kvantebitgate er en kontrolleret-U-gate. Her bruger vi tilstanden for en kontrol-kvantebit til at bestemme om enkelt-kvantebitgaten, U, skal anvendes på en mål-kvantebit eller ej. Hvis kontrol-kvantebitten er i tilstand $|1\rangle$, så anvendes U, og hvis den er i tilstand $|0\rangle$, så sker der ingenting. Eftersom kontrol-kvantebitten selv kan være i en superposition af $|0\rangle$ og $|1\rangle$, så kan mål-kvantebitten efter denne gate også være i en superposition af U som henholdsvis anvendt og ikke anvendt. Hvis vi laver en måling på kontrol-kvantebitten og ser, at den er i tilstand $|1\rangle$, så ved vi med det samme, at mål-kvantebitten er i tilstanden, hvor U blev anvendt. Dette betyder, at vi får information om mål-kvantebitten uden direkte at måle den, hvilket vi genkender som opførslen af sammenfiltrede kvantebits. En kontrolleret-U gate kan derfor bruges til at gøre forskellige kvantebits sammenfiltret.

Universelt gatesæt

Det er et klassisk resultat, at man kan bygge samtlige klassiske gates udelukkende ved brug af en masse `NAND`-gates. Grundet denne egenskab kalder man `NAND`-gate for en universel gate. Vi ønsker at opnå noget tilsvarende for en kvantecomputer, men eftersom kvantebits kan gøre så meget mere, så forventer vi, at vi skal bruge mere end én type gate for at opbygge samtlige operationer. Der er mange forskellige universelle gatesæt for kvantecomputere. Det viser sig, at vores U-operator fra ligning (13) sammen med en sammenfiltringsgate, såsom en kontrolleret-U-gate, tilsammen udgør et universelt gatesæt (op til en global fase). Man skal dog huske, at rotationsoperatorerne og kvantebittilstandene er kontinuere, så dette sæt er uendeligt stort.

Det er vist, at man til en god approksimation kan nøjes med et endeligt sæt af gates. Et universelt gatesæt (op til globale faser), man ofte ser anvendt til kvantealgoritmer, er:

- Hadamard gate, $\texttt{H} = R_x(\pi/2)R_y(\pi/4)$
- Fase gate, $\texttt{S} = R_z(\pi/2)$
- $\pi/8$ gate, $\texttt{T} = R_z(\pi/4)$
- Kontrolleret-`NOT` gate, `CNOT` = kontrolleret-$R_x(\pi)$.

DiVincenzos fem kriterier

På nuværende tidspunkt har vi en forståelse for, hvad en kvantecomputer er. Hvis vi gerne vil bygge en fysisk kvantecomputer, så er der diverse krav vi skal opfylde for at demonstrere, at vores kvantecomputer kan bruges til at køre kvantealgoritmer. David P. DiVincenzo formulerede fem kriterier, som enhver fysisk implementation skal opfylde:

1. **Et skalerbart fysisk system med "gode" kvantebits:**
   Vores kvantesystem skal have to skelnelige tilstande, som vi kan bruge som $|0\rangle$ og $|1\rangle$. For at bygge en kvantecomputer skal vi bruge mange kvantebits, så systemet skal være skalerbart.

2. **Evnen til at forberede vores kvantecomputer i en reproducerbar tilstand:**
   For at udføre et kvanteprogram skal vi vide, hvad starttilstanden er. Vi skal derfor have en reproducerbar måde at anbringe vores kvantecomputer i en velkendt starttilstand på, ofte grundtilstanden $|00000\ldots\rangle$.

3. **Lang levetid for hver kvantebit:**
   Kvantemekaniske systemer er skrøbelige over for støj. Det er derfor vigtigt, at vi isolerer vores kvantebits godt fra omgivelserne. De behøver ikke leve uendeligt, blot længe nok til at udføre gateoperationer på dem.

4. **Et universelt gatesæt:**
   For at have en garanti for, at vi kan udføre et vilkårligt kvanteprogram, skal vi demonstrere, at vores kvantecomputer kan implementere et universelt gatesæt.

5. **Evnen til at måle individuelle kvantebits:**
   Efter udførelsen af et kvanteprogram skal vi læse resultatet. Dette gøres ved at måle på tilstanden af kvantecomputeren. Nogle procedurer og algoritmer benytter måling af individuelle kvantebits midt i udførelsen af programmet, så vi skal vise, hvordan dette gøres.

Fysisk implementation

Der er rigtig mange forslag til at bygge en fysisk kvantecomputer, og de har hver især deres udfordring med at opfylde DiVincenzos kriterier.

Individuelle atomer eller ioner kan hver især repræsentere en kvantebit, enten med deres elektroniske energiniveauer eller deres spinretning. Disse kan være meget langtlevende, hvis de er fanget i en optisk fælde. Problemet er dog, at den samme isolering fra omgivelserne også isolerer dem fra hinanden, så denne implementering har udfordringer med skalerbarheden, hvis den samtidigt skal kunne lave gode sammenfiltringsgates.

Superledende kredsløb har det modsatte problem. Det er relativt simpelt at skalere, men det er en udfordring at lave langtlevende kvantebits på dem.

På trods af disse udfordringer er det allerede lykkedes forskellige forskningsgrupper og private selskaber at bygge små kvantecomputere bestående af nogle få "gode" kvantebits eller op til tusinde "dårlige" kvantebits. En klassisk computer kan bestå af mange milliarder bits i form af transistorer, men eftersom hver kvantebit kan så meget mere, så behøver vi kun et par hundrede til et par tusinde "gode" kvantebits for at have en konkurrencedygtig kvantecomputer.

Denne artikel var blot et kort overblik over, hvad en kvantecomputer er. Byggestenen for en kvantecomputer er kvantebits, som hver især kan udvise kvantemekaniske effekter. Disse kvantebits er svære at bygge i en fysik implementation, da kvantemekaniske tilstande nemt ødelægges af støj. For et overblik over de forskellige fysiske implementationer kan man læse Nature-artiklen [3]. Til introduktion og flere detaljer om superledende kredsløb anbefales [4]. En kvantealgoritme involverer manipulationen af disse kvantebits på diverse måder, og grundet den komplekse faseforskel findes der nye typer operationer. Dette gør, at udviklingen af et kvanteprogram kræver en helt anden tankegang end udviklingen af et program på en klassisk computer. For mere om kvantealgoritmer henvises der til lærebogen [5]. Konklusionen er, at det er svært at bygge en kvantecomputer, men de er på vej!

Litteratur

[1] "Hardware | google quantum AI." (2023) https://quantumai.google/hardware (hentet 17.11.2023).

[2] IonQ (2023) "IonQ forte", https: //ionq.com/quantum-systems/forte (hentet 17.11.2023).

[3] T. D. Ladd m.fl. (2010) "Quantum computers", *Nature*, bind **464**, side 45—53.

[4] S. E. Rasmussen m.fl. (2021) "The superconducting circuit companion – an introduction with worked examples", *PRX Quantum*, bind **2**, nr. 4, side 040 204.

[5] M. A. Nielsen og I. L. Chuang (2010) "Quantum computation and quantum information: 10th Anniversary Edition", Cambridge University Press.

Christian Steenberg Norre er kandidatstuderende på Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet. Hans speciale omhandlede en analyse af en ny kvantebit inspireret af et Kapitza-pendul og implementeret i et superledende kredsløb.

Foredrag på YouTube

Hvis du vil se eller gense et af foredragene i Selskabet for Naturlærens Udbredelse, så er de tilgængelige på SNUs YouTube-kanal. Kanalen kan findes via hjemmesiden snu.dk under menupunktet "Foredrag". Det er også muligt at abonnere på kanalen, så du får direkte besked, når en ny video bliver tilgængelig.