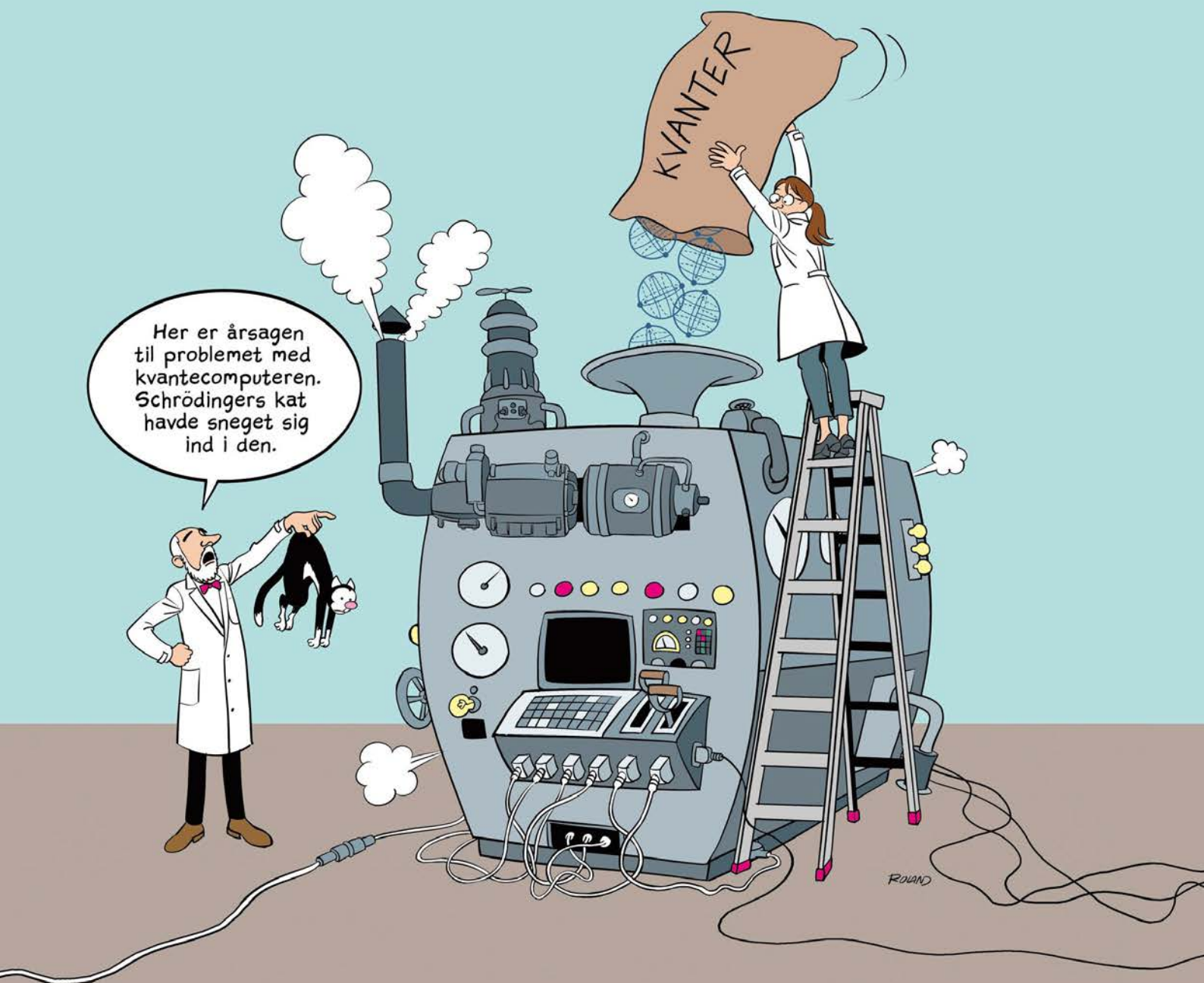


# KVANT December 4 2023

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 34. årgang



STORT TEMANUMMER OM  
KVANTECOMPUTEREN

Løssalgspris: 50 kr.

# KVANT

## Tidsskrift for Fysik og Astronomi

c/o DTU Space, Centrifugevej 356  
DK-2800 Kgs. Lyngby

Hjemmeside : [www.kvant.dk](http://www.kvant.dk)

E-mail : [kvant@kvant.dk](mailto:kvant@kvant.dk)

Facebook  : KVANT.fysiktidsskrift

ISSN (trykt) : 0905-8893

ISSN (web) : 2245-4942

### Udgives af

Astronomisk Selskab (AS)

Dansk Fysisk Selskab (DFS)

Selskabet for Naturlærens Udbredelse  
(SNU)

### Redaktion

Jens Olaf Pepke Pedersen (ansv. red.),  
DTU Space

Michael Cramer Andersen,

Christianshavns Gymnasium

Christine Pepke Gunnarsson (nyheds-  
redaktør), DTU Electro

Ole Mørk Lauridsen, SNU

Steen Lærke, AS

Maren Malling, DFS

John Rosendal Nielsen

Lars Occhionero, AS

Dorte Olesen, SNU

Finn Berg Rasmussen,

Niels Bohr Institutet, KU

Svend Erik Rugh

**Abonnementspris** : 185 kr./år.

Kvant udkommer 4 gange årligt og er med-  
lemsblad for de udgivende selskaber.

Abonnement tegnes på [www.kvant.dk](http://www.kvant.dk).

Øvrige henvendelser vedr. abonnement til  
Christine Pepke Gunnarsson:

[christine@kvant.dk](mailto:christine@kvant.dk) (tlf. 27 51 01 76).

### Annoncepriser

1/1 side: 3600 kr., 1/2 side: 2300 kr.

1/4 side: 1600 kr.

Priserne er excl. moms og for reproklart  
materiale i farver. Henvendelser om annon-  
cer til redaktøren på: [kvant@kvant.dk](mailto:kvant@kvant.dk)

### Tryk

Vestergaards Bogtrykkeri A/S.

Oplag: 2.500.



### Produktionsplan

Nr. 1-2024 udkommer ca. 15. marts

Nr. 2-2024 udkommer ca. 15. juni

Deadline for mindre bidrag og annoncer  
er ca. en måned før, længere artikler skal  
modtages to måneder før.

## Indhold:

Men hvad er en kvantecomputer egentlig?

*Christian Steenberg Norre* . . . . . 3

Kvantecomputeren og dens beregningsmetoder

*Ulrik Lund Andersen, Jonatan Bohr Brask og Jonas Schou  
Neergaard-Nielsen* . . . . . 8

En kvantecomputer baseret på lys

*Carlos Faurby og Peter Lodahl* . . . . . 14

Kvantealgoritmer

*Ulrich B. Hoff* . . . . . 18

Ambitiøst kvantecomputerprogram etableres på Niels Bohr Institutet

*Kim Splittorff og Marie Mathiesen* . . . . . 25

Sparrow Quantum sætter fotonerne fri

*Sofie Lindskov Hansen og Maria Genckel* . . . . . 29

Kvant-nyheder

*Christine Pepke Gunnarsson* . . . . . 31

Peter Faber (1810-1877), teleteknisk foregangsmand og elsket sangskri-  
ver

*Ole Mørk Lauridsen* . . . . . 33

Tycho Brahe – breddeopgave 106

*Jens Højgaard Jensen* . . . . . 39

Aktuelle bøger

*Michael Cramer Andersen* . . . . . 41

Nyt fra Dansk Fysisk Selskab

*Maren Malling* . . . . . 42

Ørstedmedaljen i bronze

*Cecilie Pedersen* . . . . . 43

KIF-prisen 2023

*Maren Malling* . . . . . 43

Kommende foredrag . . . . . Bagsiden



### Temanummer om kvantecomputeren

Dette nummer af Kvant har kvantecompu-  
teren som tema, og tegneren Niels Roland  
har i den anledning tegnet bladets forside.  
Roland har siden 2005 tegnet for Week-  
endavisen, især om videnskab i striben  
"Kloge Hoveder". Lige nu arbejder han  
bl.a. på en tegneserie om Niels Bohr og  
kvantefysikken, som skal udkomme i 2024.

Vi er meget taknemmelige for, at en lang række kvantefysikere har  
været villige til at bidrage til dette temanummer. Vi håber, at læserne  
af de mange gode artikler i bladet vil få en bedre forståelse af, hvad  
en kvantecomputer egentlig er, og samtidig få et indtryk af den enorme  
indsats, der i disse år bliver lagt i at realisere konstruktionen af en sådan  
computer.

*Finn Berg Rasmussen og Jens Olaf Pepke Pedersen*

Kvant udsendes gratis, i ét eksemplar, til alle gymnasier, seminarier og HTX-  
kurser i Danmark, på Færøerne og i Grønland med velvillig økonomisk støtte  
fra Niels Bohr Institutet (KU), Institut for Fysik og Astronomi (AU), Institut  
for Fysik, Kemi og Farmaci (SDU), DTU Fysik og DTU Electro samt Institut  
for Naturvidenskab og Miljø (RUC). Kvant omdeles med PostNord. Såfremt  
bladet udebliver, opfordres du til at kontakte PostNords kundeservice på telefon  
70707030 samt orientere Kvant på e-mail [kvant@kvant.dk](mailto:kvant@kvant.dk).

# Men hvad er en kvantecomputer egentlig?

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

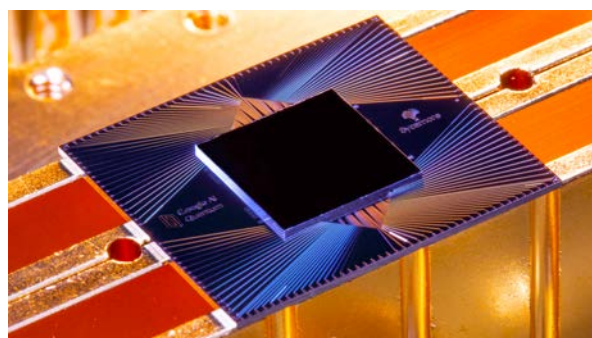
En kvantecomputer er *ikke* bare en ny supercomputer. Den fungerer på en helt anden måde, og kan gøre nogle helt andre ting. Det er svært at udvikle effektive programmer til en kvantecomputer, men også svært at bygge selve maskinen. På nuværende tidspunkt er der kun bygget nogle ganske få og ganske små 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 formodentlig 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 effek-

ter, 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].

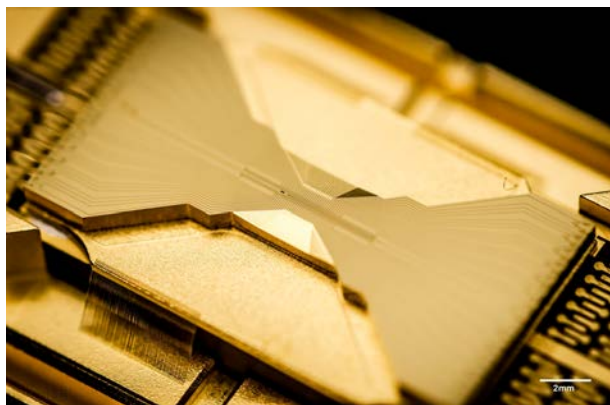
Shors faktoriseringsalgoritme er så meget hurtigere, at fremgangsmåden med at bruge primtalsfaktorisering til kryptering vil uddø, så snart den første kvantecomputer af fornuftig størrelse bliver bygget. Der er heldigvis en masse aktiv forskning i den næste generation af krypteringsalgoritmer, som er 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 sammenfiltrering. 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

$$|q\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle. \quad (1)$$

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

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

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

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

$$c_k = |c_k|e^{i\theta_k}, \quad (4)$$

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

$$(e^{i0}|0\rangle + e^{i0}|1\rangle) / 2 + (e^{i0}|0\rangle + e^{i\pi}|1\rangle) / 2 \quad (5)$$

$$= (|0\rangle + |1\rangle) / 2 + (|0\rangle - |1\rangle) / 2 = |0\rangle, \quad (6)$$

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 *sammenfiltrering*. 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

$$|q_A q_B\rangle = |q_A\rangle \cdot |q_B\rangle. \quad (7)$$

Et eksempel på sammenfiltrering kan være

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

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

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

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



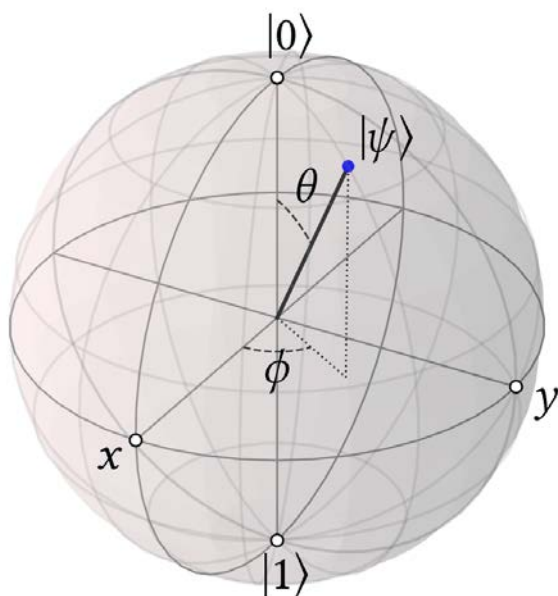
en effekt på de mulige udfald for den anden. Vi kan også sige det som, at vi fik information om kvantebit  $B$  uden at måle på den. Hvis vi i stedet havde fået resultatet 1 ved måling af kvantebit  $A$ , så havde den nye tilstand bestået af to led

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

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.

### Blochsferen

En enkel kvantebit er ofte repræsenteret på Blochsferen, 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 Blochsferen. Polerne svarer til tilstandene  $|0\rangle$  og  $|1\rangle$ . Resten af overfladen repræsenterer alle mulige tilstande  $|\psi\rangle$  for en enkel kvantebit. Vinklen  $\theta$  er et mål for vinklen mellem  $z$ -aksen og vores tilstand  $|\psi\rangle$ . Vinklen  $\phi$  er målt som vinklen mellem  $x$ -aksen og projektionen af  $|\psi\rangle$  ned på  $xy$ -planet. Hvis denne sfære var Jorden, så ville  $\phi$  være et mål for længdegrader, og  $\theta$  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

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

hvor  $\theta$  er den polære vinkel, som antager værdier mellem 0 og  $\pi$ , og  $\phi$  er den azimutale vinkel, som antager

værdier mellem 0 og  $2\pi$ . 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  $\phi$ .

En klassisk bit i denne repræsentation vil blot være nord- og sydpolspunkterne, så vi kan allerede med Blochsferen 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.

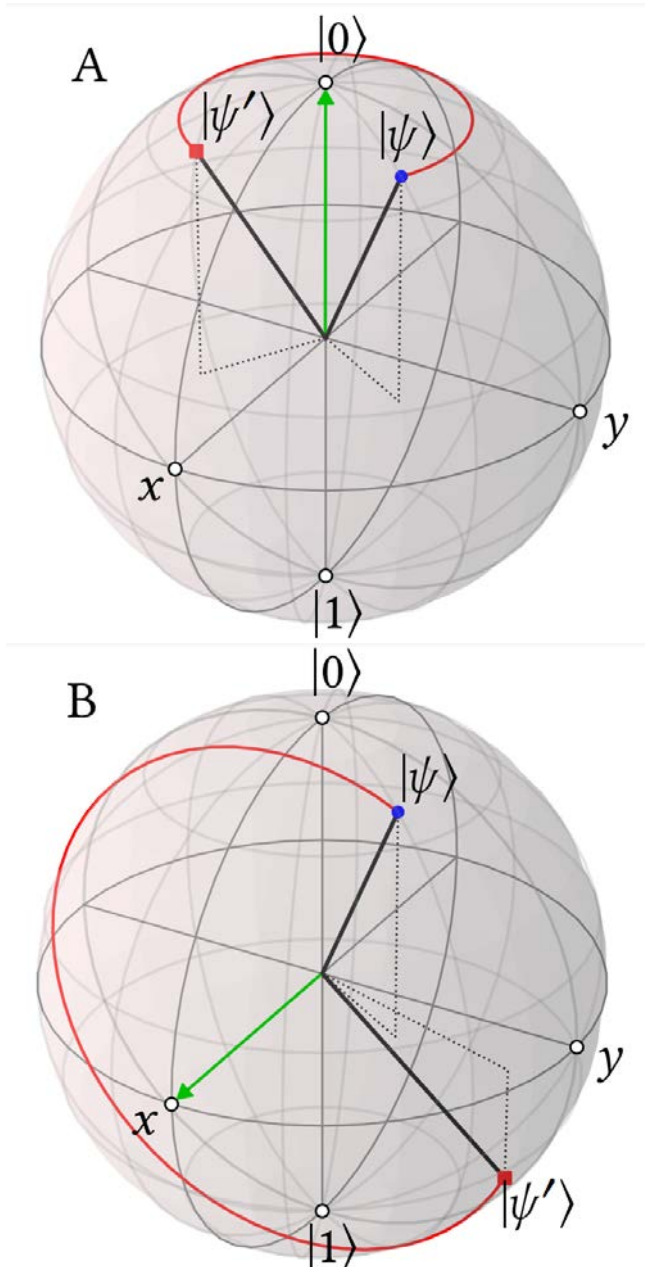
En operation vil da være en ændring af tilstanden for en kvantebit til en ny tilstand. På Blochsferen vil dette svare til at flytte et givent punkt langs med overfladen til et nyt punkt. Sættet af operationer, der opfylder dette, kaldes for enkelt-kvantebitgates, da de indtil videre kun involverer ændringen af tilstanden for en enkel kvantebit. Hvis vi gerne vil have en systematisk måde at lave vilkårlige operationer på Blochsferen, 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

$$|\psi\rangle \rightarrow |\psi'\rangle = U(\alpha, \beta, \gamma)|\psi\rangle, \quad (12)$$

skal derfor kunne skrives som

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

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 Blochsfer. 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 (Blochsferen), 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 sammenfildrede 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 sammenfildringssgate, 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,  $H = R_x(\pi/2)R_y(\pi/4)$
- Fase gate,  $S = R_z(\pi/2)$
- $\pi/8$  gate,  $T = R_z(\pi/4)$
- Kontrolleret-NOT gate,  $CNOT = \text{kontrolleret-}R_x(\pi)$ .

### 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  $|00000 \dots\rangle$ .

## 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 langlevende, 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 langlevende 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](http://snu.dk) under menu-punktet "Foredrag". Det er også muligt at abonnere på kanalen, så du får direkte besked, når en ny video bliver tilgængelig.





# Kvantecomputeren og dens beregningsmetoder

Ulrik Lund Andersen, Jonatan Bohr Brask og Jonas Schou Neergaard-Nielsen, Center for Macroscopic Quantum States (bigQ), DTU Fysik

Kvantecomputere forventes at kunne løse problemer, der ligger uden for rækkevidden af dagens mest kraftfulde supercomputere. I denne artikel introducerer vi de generelle principper bag kvantecomputeren og dykker ned i de forskellige kvanteberegningsmetoder, der i dag benyttes til implementering af forskellige kvantealgoritmer. Desuden belyses de særlige udfordringer ved kvantecomputeren, herunder deres skrøbelighed overfor dekohærens, samt de seneste fremskridt, der er foretaget indenfor kvantefejlkorrigerende koder.

Da Max Planck en sen oktoberaften i 1900 præsenterede sine teoretiske overvejelser omkring beskrivelsen af et sort legemes udstråling (black-body radiation), havde han sikkert ikke i sin vildeste fantasi forestillet sig hvad han havde igangsat. Det var nemlig startskuddet til udviklingen af en helt ny fysik – kvantefysikken – som beskriver den dynamiske opførsel af fysiske systemer helt ned til elementarpartikelniveau, og som gennem de sidste 100 år har ført til en sand teknologisk revolution. Teoriens evne til at beskrive atomare og optiske systemer førte til udvikling af mange nye vigtige apparater og teknologier, blandt andet transistoren og laseren, som har lagt grundlaget for udviklingen af computeren og mobiltelefonen, samt optisk kommunikation og internettet. Med andre ord har kvantefysikken i store træk formet den verden, vi lever i i dag. Denne transformative æra kaldes ofte den første kvanterevolution.

Lige nu står vi midt i en ny teknologisk omvæltning – den anden kvanterevolution. Takket være ekstreme teknologiske landvindinger formår vi i dag at kontrollere og måle enkelte partikler – atomer, elektroner, fotoner, m.v. – præcist nok til at bevare og manipulere deres kvantemekaniske egenskaber. Dette har åbnet en hel ny horisont af banebrydende anvendelser. Nogle af de vigtigste er sikker kommunikation med kvantekrypterede koder, måling af svage signaler med uhørt nøjagtighed ved brug af kvantesensorer og ekstrem hurtig udregning af visse matematiske problemer ved hjælp af en kvantecomputer. I denne artikel vil vi koncentrere os om kvantecomputeren med fokus på dens forskellige beregningsmodeller.

Den mobiltelefon, som du sikkert snart igen sidder med i hånden, behandler information kodet i en sekvens af bits, som hver kan antage værdierne 0 eller 1. En kvantecomputer opererer derimod med kvantebits eller qubits. Qubits har også to tilstande, 0 eller 1, men kvantefysikken tillader desuden et kontinuum af andre tilstande, nemlig alle såkaldte superpositioner af de to basistilstande. En enkelt qubit har således uendelig mange tilstande, og med en lidt unøjagtig formulering kan man sige, at den kan antage værdierne 0 og 1 samtidig. Mere præcist skriver man en qubits tilstand som  $c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$ , hvor  $|0\rangle$  og  $|1\rangle$  kaldes “ket’er” og angiver qubitens basistilstande. De to koefficienter  $c_0$  og  $c_1$  er komplekse tal, der er relateret til sandsynligheden for at få henholdsvis 0 eller 1 når man foretager en måling af qubiten via  $P(0) = |c_0|^2$  og  $P(1) = |c_1|^2$ .

Når der er flere qubits involveret kan en kvanteprocessor desuden behandle sammenfiltrede (*entangled*) tilstande af mange partikler på én gang, som om det var ét enkelt kvantesystem. Det vil med andre ord sige, at en streng af  $N$  qubits kan indeholde en sammenfiltret superposition af alle de  $2^N$  mulige klassiske bittilstande:  $|0\rangle, |1\rangle, |2\rangle, \dots, |2^N - 1\rangle$ . Alle disse eksponentielt mange muligheder kan i en kvantealgoritme i princippet processeres i parallel.

Det lyder jo rigtig godt, men vi kan desværre ikke altid gøre brug af denne eksponentielle fordel. Udgangen af kvanteprocessoren er også i en superpositionstilstand, og indeholder derfor en superposition af mange svarmuligheder. For at vi mennesker skal kunne forstå svaret bliver vi nødt til at omsætte denne superposition til klassiske værdier, hvilket gøres ved at foretage en måling, der kolliderer den skrøbelige superpositionstilstand ned i en klassisk værdi. Kun én af svarmulighederne realiseres således og når vores hjerner. Den eksponentielle fordel ser derfor ud til at gå tabt i målingen! Det er dog heldigvis ikke det fulde billede. Det er nemlig muligt at arrangere udviklingen af tilstanden og foretage specielle, snu, målinger, således at det med meget høj sandsynlighed er det korrekte svar, der kommer ud. Det er faktisk det, der er “humlen” (og udfordringen!) ved at designe en god kvantealgoritme. Når det lykkes, kan sådanne algoritmer løse visse problemer langt mere effektivt end på en klassisk computer. I princippet kan en kvantecomputer godt simuleres nøjagtigt på en klassisk computer, og alt hvad der kan beregnes af en kvantecomputer kan derfor også beregnes af en klassisk. Men der er helt afgørende forskel på *effektiviteten*. Ved at udnytte den eksponentielle fordel kan kvantecomputere i praksis løse komplekse matematiske problemer, som på en klassisk computer, så vidt vides, ville tage længere end universets levealder at besvare.

Ikke alle problemer kan løses eksponentielt hurtigere. Indtil videre kender vi en begrænset række af eksempler, hvoraf primtalsfaktoriserings (dvs. opdeling af et naturligt tal i dets primtalsfaktorer) af store tal er det meste berømte, med vigtige anvendelser indenfor kryptering. Klassen af problemer med eksponentiel fordel er potentielt stor, men dens grænser er ikke præcist kendte i dag. Man har faktisk identificeret en række problemer, som vil kunne løses med en kvantefordel, omend ikke altid eksponentielt hurtigere. Dette inkluderer blandt andet simulering af komplekse systemer (brændstoffer,

lægemidler, biosystemer, materialer osv.), optimering, databehandling og maskinlæring.

At bygge en fuldblods kvantecomputer, som er i stand til at implementere ovenstående anvendelser, er dog en kæmpe stor udfordring. Hvis det lykkes, vil det være blandt de største teknologiske bedrifter udført af mennesket. Udfordringen skyldes, at qubits, og især deres sammenfiltrede tilstande, er uhyre skrøbelige, og at enhver lille interaktion med omgivelserne derfor vil lede til støj (eller dekohærens), som er fatalt for kvanteinformation og den efterfølgende databehandling. Denne støj er hovedårsagen til, at vi endnu ikke endegyldigt har demonstreret kvantecomputerens fordel ved løsning af praktisk relevante problemer. Der arbejdes derfor hårdt i diverse laboratorier rundt om i verden på at komme dekohærens til livs ved på den ene side at forbedre eksisterende teknologi og opfinde nye teknologiske platforme, som bedre isolerer qubits fra omgivelserne, og på den anden side at udvikle såkaldte kvantefejlkorrigerende koder, som algoritmisk beskytter qubits fra omgivelserne. Der er indenfor de seneste år blevet forsket en del i udviklingen af sådanne koder, og et par eksperimenter har netop i år påvist korrektion af fejl hurtigere end de opstår. Der er dog stadig rigtig lang vej til det endelige mål: Den universelle, fejlkorrigerende kvantecomputer.

## Kvanteberegningsmetoder

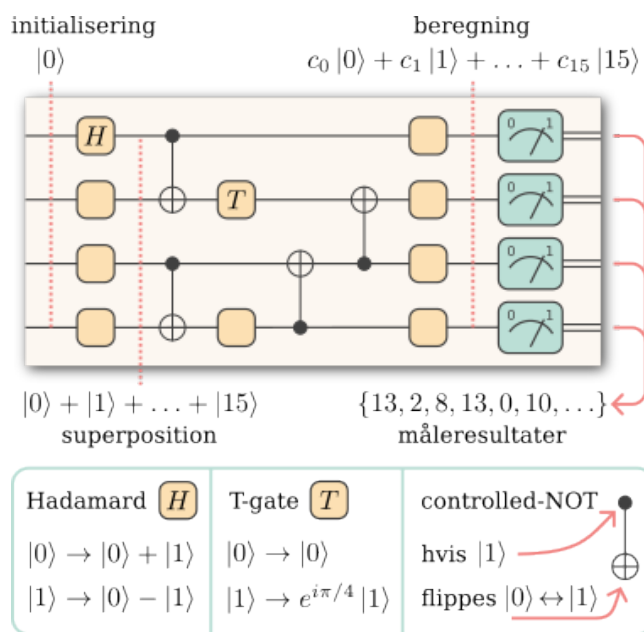
I løbet af de sidste fire årtier har forskere udviklet en mangfoldighed af kvanteberegningsmetoder til at udføre kvantealgoritmer. Vi fokuserer her på såkaldte universelle modeller, som er i stand til at foretage enhver transformation af kvantetilstande, hvilket betyder, at de kan implementere alle tænkelige kvantealgoritmer. Selvom disse modeller således i princippet alle kan det samme, har de varierende fordele og ulemper i forhold til at realisere dem på forskellige fysiske platforme. I det følgende vil vi gennemgå fire forskellige modeller.

## Gatebaseret kvantecomputing

En gatebaseret kvantecomputer er den direkte kvante-analoge til den almindelige digitale computer. I denne computer starter man med at initialisere en sekvens af bit-værdier, der efterfølgende undergår en række enkelt-bit- og to-bit-operationer og slutteligt giver en ny sekvens af bit-værdier, der er svaret på udregningen. I kvantecomputeren starter man med at initialisere qubits i en starttilstand, som efterfølgende bliver manipuleret i en serie af kvantegates, som er særlige operationer, der ændrer på qubit'enes tilstande. Til sidst måler man tilstandene, hvilket giver os et resultat i form af en række almindelige bits. Som nævnt tidligere, så skal målingen foretages med en vis portion kreativitet for at trække det relevante resultat ud af kvantetilstanden.

Ligesom i traditionelle computere, der bygger på simple logiske operationer som OG og ELLER, har kvantecomputeren kvantegates, der udfører grundlæggende operationer på qubits. Det er interessant at bemærke at enhver operation på et vilkårligt antal qubits (dvs. universel kvantecomputing) kan brydes ned til en kombination af simple operationer på blot én eller

to qubits. Det betyder at enhver kvantealgoritme kan dekomponeres til en lang, og til tider kompleks, række af enkelt- og to-qubit-operationer, som illustreret i figur 1.



**Figur 1.** Kredsløbs- eller gatemodellen for kvantecomputere er den mest kendte og anvendte model. Et antal qubits (her 4) initialiseres i en bestemt tilstand, typisk  $|0\rangle$ . Derefter udføres en serie af operationer, eller gates, enkeltvis eller parvis på de forskellige qubits. I mange tilfælde starter man med at udføre en Hadamardgate på hver qubit, hvilket ændrer dens tilstand fra  $|0\rangle$  til  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$ , hvormed den samlede tilstand af de  $N$  qubits bliver en superposition af  $2^N$  forskellige basistilstande, som kan repræsentere tallene  $i$  fra 0 til  $2^N - 1$ . De følgende gates i kredsløbet udfører nu operationer parallelt på alle komponenter i denne superposition, hvilket ændrer deres relative vægt, angivet ved deres komplekse amplituder  $c_i$ . Til sidst udføres en måling af hver enkelt qubit i  $|0\rangle/|1\rangle$  basen. Tilsammen giver disse målinger nu et tilfældigt svar  $i$  med sandsynligheden  $|c_i|^2$ . Ved at køre det fulde kredsløb et antal gange opbygger man en fordeling af måleresultater som – hvis kredsløbet er snedigt konstrueret – giver svaret på ens problem.

Nederst ses et eksempel på to enkelt-qubit-gates, H og T, og en to-qubit-gate, CNOT, og deres funktion. Disse tre gates er universelle, dvs. at ethvert kredsløb i princippet kan konstrueres ved kombinationer af dem. I praksis vil en kvantecomputer have adgang til flere eller andre typer af gates.

Et eksempel på et sæt af operationer, som giver anledning til universel kvantecomputing, er de to enkelt-qubit-gates; Hadamardgate og T-gate, samt en enkel to-qubitgate; CNOT-gate. Hadamard- og CNOT-gaten (se figuren) muliggør etableringen af sammenfiltring (som er det "brændstof", som driver computeren), men er dog ikke nok til at give en kvantefordel ifølge det såkaldte Gottesman-Knill-teorem. For at kunne demonstrere en kvantefordel, dvs. foretage bestemte udregninger eksponentielt hurtigere end på en klassisk computer, skal en T-gate (eller lignende) tilføjes. Der findes andre sæt af gates, som kan føre til universel kvantecomputing, og det valgte sæt afhænger tit af, hvilken hardware der bruges til realisering af gatene, da nogle gates er nemmere at implementere på en given maskine end de er på andre.

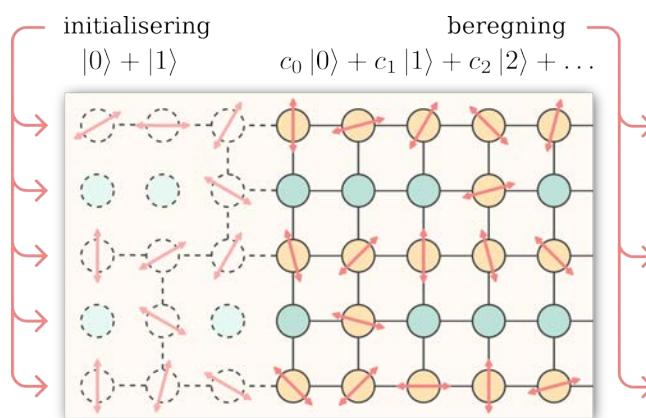
De grundlæggende principper bag gatebaseret kvantecomputing er blevet demonstreret i en lang række meget forskellige fysiske systemer de sidste 20–30 år: optiske fotoner, atom- og ion-fælder, magnetisk resonans i molekyler, superledende kredsløb, halvledere, diamant-farvecentre, m.m. Mens de første mange demonstrationer blev foretaget af forskergrupper ved universiteter, så er udviklingen de senere år i højere og højere grad blevet drevet af private virksomheder; både giganter som Google, IBM, Microsoft, Amazon m.fl., og mindre startups i mange forskellige afskygninger. Blandt disse kan især nævnes de to børsnoterede startups Rigetti, der p.t. har 80 superledende qubits, og IonQ, med 32 ion-qubits. IBM er længst fremme med at tilbyde adgang til deres kvantecomputere. I skrivende stund har de 17 maskiner online med enten 27 eller 127 qubits. Disse kan i begrænset omfang tilgås gratis via skyen. Flere andre virksomheder tilbyder også adgang til deres kvantecomputere for betalende kunder, typisk via kendte cloud platforme som AWS og Microsoft Azure. Selvom man således allerede nu kan køre kredsløb på kvantecomputere med flere end 100 qubits, så er der stadig lang vej til, at vi kan opnå ægte kvantefordele med de traditionelle kredsløbs-algoritmer. Det skyldes støj og fejl i qubits, gates og målinger. Uden kvantefejlkorrektion vil disse i høj grad begrænse antallet af operationer, man kan udføre i træk, og dermed længden af kredsløb og kompleksiteten af algoritmer.

## Målebaseret kvantecomputing

En gatebaseret kvantealgoritme vil typisk involvere mange to-qubit-gates, som generelt er de mest krævende at implementere. Dette omgås elegant i den målebaserede kvanteberegningsmodel, hvor hele beregningen kan realiseres gennem målinger på enkelte qubits, ved til gengæld at udnytte en sammenfiltret starttilstand. Processen, der vises i figur 2, indledes med at generere en omfattende sammenfiltret tilstand blandt et netværk af qubits, kendt som en klyngetilstand. Det er først efter at denne sammenfiltrede tilstand er etableret, at beregninger kan påbegyndes, hvilket gøres ved trinvist at måle qubit'ene. Disse målinger forårsager ændringer i de resterende, umålte qubits inden for klyngetilstanden, hvilket effektivt simulerer udførelsen af en gateoperation. Den specifikke gateoperation, der udføres, afhænger helt af de udførte målinger. Ved at udføre disse målinger sekventielt på klyngetilstanden, kan man realisere en sekvens af gateoperationer, både enkelt- og to-qubit-gates, hvilket muliggør konstruktionen af en kvantealgoritme.

Målebaseret kvantecomputing er specielt relevant i systemer, hvor det er svært at gemme qubits i en kvantehukommelse. Det er for eksempel tilfældet med optiske systemer, hvor fotoner farer afsted med lysets hastighed og kun kan stoppes, dvs. lagres, gennem en stærk vekselvirkning med et materialesystem, hvilket i dag ikke er særligt effektivt. Benyttes derimod en målebaseret model, er det ikke nødvendigt at lagre fotonerne, men blot at detektere dem umiddelbart efter, at de er skabt i en klyngetilstand. Disse fotonmålinger udfører således gateoperationer på de efterfølgende

fotoner, der et splitsekund senere detekteres og udfører gateoperationer på de efterfølgende fotoner osv. Sådanne klyngetilstande er genereret af en række forskningsgrupper rundt om i verden, heriblandt på DTU, hvor vi har formået at skabe en sammenfiltret klyngetilstand af cirka 30.000 optiske modes og eftervist en række gates gennem optiske målinger.



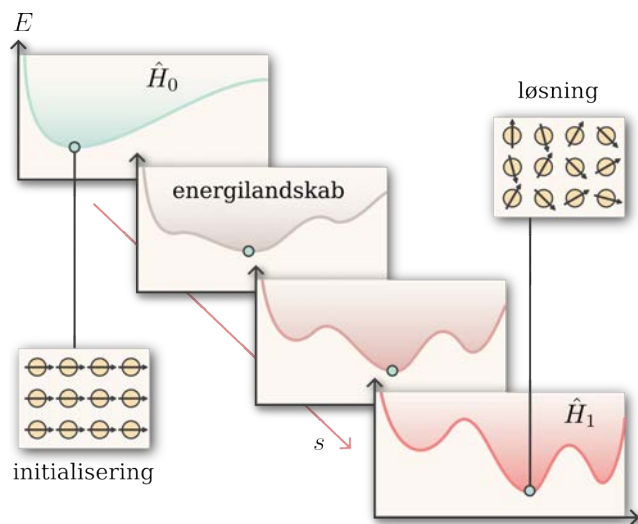
**Figur 2.** Målebaseret kvantecomputing er væsensforskellig fra kredsløbsmodellen, men de to modeller er teoretisk set fuldt ækvivalente i forhold til hvilke kvanteberegninger, de kan foretage. I stedet for et vist antal qubits hvorpå man opererer mange gange med en række gates, starter man i målebaseret kvantecomputing med et langt større antal qubits som præpareres i en stor sammenfiltret tilstand – en klynge- eller graf-tilstand. Det er her illustreret med qubits forbundet i en gittergraf via sammenfiltring med deres nærmeste naboer. Herefter måles hver qubit én gang i et variabelt målebasis. Måles den i  $|0\rangle/|1\rangle$  basen (de blå cirkler) fjernes den og dens forbindelser til naboerne fra grafen. Måles den derimod i et komplementært basis (repræsenteret ved røde pile), så forplanter informationen i qubit'en sig til naboen under påvirkning af en transformation, der afhænger af den specifikke base. Sættes flere af disse transformationer sammen, kan man effektivt udføre én- og to-qubit-gates på kvanteinformation der propagerer ned gennem gitteret. Figuren viser et snapshot af en beregning, hvor qubits til venstre i grafen allerede er blevet målt (og grafen dermed også blevet brudt op), mens qubits til højre endnu ikke er målt – deres målebaser er dog forudbestemt baseret på det ønskede program. En vigtig detalje, der ikke er illustreret her, er, at de ønskede målebaser i nogle tilfælde skal ændres på baggrund af udfaldet af tidligere målinger.

Målebaseret kvantecomputing er også det grundlæggende princip bag de kvantecomputere som to store kvante-startups i Nordamerika, Xanadu og PsiQuantum, forsøger at bygge. PsiQuantums model er baseret på enkelt-foton- og tre-foton-tilstande mens Xanadus model, ligesom DTUs, er baseret på såkaldte “klemte” (*squeezed*) og Gottesman-Kitaev-Preskill-(GKP)-tilstande. Designs for den komplette arkitektur for målebaserede kvantecomputere er udarbejdet af både PsiQuantum reference [1], Xanadu [2] og DTU[3]. Der er dog stadig store udfordringer at overkomme: For den foton-baserede arkitektur er det vanskeligt at skabe de store sammenfiltrede tilstande på deterministisk vis. For den squeezing-baserede arkitektur mangler vi endnu at kunne skabe GKP-tilstande, som skal bruges til at kode kvanteinformation som qubits og gøre beregningerne fejlsistente. Meget forskning er derfor rettet mod disse udfordringer.



## Adiabatisk kvantecomputing

Den adiabatisk kvantecomputermodel udfører beregninger på en radikalt anderledes måde end den gate-baserede eller målebaserede model. Mens den stadig benytter sig af et mange-qubit sammenfiltret system, som de to tidligere modeller, er den ikke baseret på kontrollerede enkelt-qubit eller to-qubit gateoperationer men derimod en adiabatisk ændring af energilandskabet, hvis minimum repræsenterer løsningen på det givne problem. Tanken bag adiabatisk kvantecomputing er således effektivt at finde denne minimumsenergi, dvs. grundtilstanden for systemet. Det svarer til at befinde sig i et landskab af bakker og dale, hvor den laveste dal repræsenterer løsningen.



**Figur 3.** Adiabatisk kvantecomputing er et helt andet koncept end de tidligere omtalte modeller. Selvom en adiabatisk kvantecomputer er universel og derfor i princippet kan udføre de samme beregninger, som en gate eller målebaseret kvantecomputer, så vil de forskellige modeller i praksis have forskellige anvendelsesområder. For den adiabatisk model vil målet typisk være at finde grundtilstanden for et komplekst system, repræsenteret ved dets Hamiltonian,  $\hat{H}_1$ . For en given tilstand af systemet,  $|\psi\rangle$ , er energien  $E = \langle\psi|\hat{H}_1|\psi\rangle$ , og det gælder altså om at finde den  $|\psi\rangle$ , der minimerer denne energi. På figuren er energien for forskellige tilstande illustreret som et simplificeret én-dimensionelt energilandskab – i virkeligheden vil det være et meget komplekst, multi-dimensionelt landskab, der kan være næsten umuligt at optimere over. I den adiabatisk kvantecomputer løser man dette optimeringsproblem ved at initialisere sine qubits i grundtilstanden for et enkelt, kendt system, givet ved  $\hat{H}_0$ . Derefter ændrer man gradvist systemets Hamiltonian til  $(1-s)\hat{H}_0 + s\hat{H}_1$ , hvor den skalerede tidsparameter  $s$  går fra 0 til 1. Gøres dette tilstrækkelig langsomt, vil systemet hele tiden forblive i grundtilstanden, som så til slut,  $s = 1$ , kan udlæses.

Men hvordan findes denne laveste energi i et komplekst energilandskab? Som vist i figur 3 starter man med at initialisere et simpelt kvantesystem, der er let at styre, og som er indstillet på en sådan måde, at det allerede befinder sig i sin laveste dal – ligesom et fladt, jævnt landskab. Forestil dig nu, at dette landskab langsomt begynder at ændres til et mere komplekst et, med mange flere bakker og dale – det, som repræsenterer det svære problem, du vil løse. Kunsten er at ændre landskabet så langsomt, at systemet ikke engang indser,

at det bevæger sig, og dermed forbliver i den laveste dal. Dette er muligt ifølge det såkaldte adiabatisk teorem, der garanterer, at hvis vi gør tingene langsomt nok, vil vores kvantesystem forblive i grundtilstanden, og vi ender med det rigtige svar. Den hastighed, hvormed vi sikkert kan ændre vores kvantelandskab, afhænger af energiforskellen mellem den laveste dal og den næstlaveste. Hvis denne forskel er stor, kan vi foretage ændringen hurtigere. Hvis den er lille, skal vi være ekstra langsomme.

Den adiabatisk kvantemodel repræsenterer således en helt anderledes måde at bygge en kvantecomputer på; de traditionelle kvantecomputere beror på qubits der indgår i en kontrolleret sekvens af gates, som at følge en given opskrift, hvorimod adiabatisk kvantecomputing lidt svarer til at putte alle ingredienser i en gryde, opvarme det forsigtigt og lade dem transformere over tid.

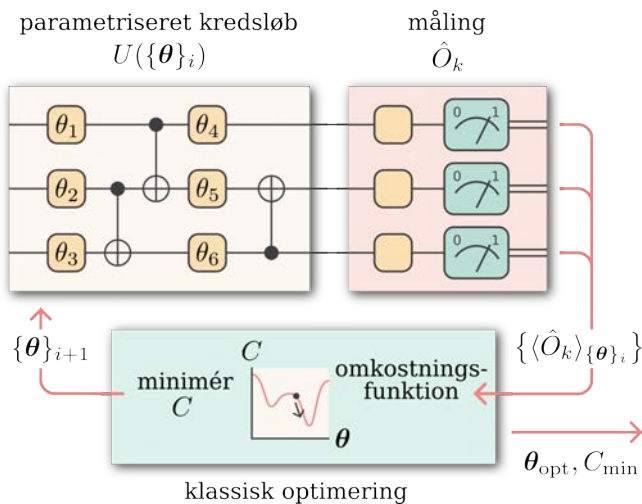
Det er også vigtigt at bemærke, at eftersom ethvert energilandskab (dvs. Hamiltonian) for systemet i princippet kan skabes, er den adiabatisk model, ligesom de gate- og målebaserede modeller, universel. En sådan universel adiabatisk processor er dog endnu ikke blevet realiseret i laboratoriet. Det nærmeste, man er kommet dette mål, er implementering af en kvante-annealer, der kan ses som det første skridt mod den universelle maskine. Det canadiske firma D-Wave har arbejdet på dette gennem de sidste 20 år, og er det første firma i verden, som har kommercialiseret og solgt en computer baseret på kvanteprincipper. Selvom firmaet er kommet langt med udviklingen af en kvante-annealer, bliver det stadig diskuteret hvorvidt deres maskine opfylder det adiabatisk teorem, hvilket er vigtigt for at kunne demonstrere en kvantefordel.

## Variationel kvantecomputing

Den variationelle kvanteberegningsmetode, som blev udviklet for få år siden, har vakt stor interesse, idet det menes, at man vil kunne opnå en kvantefordel med denne metode uden fejlkorrigerende, dvs. ved brug af et relativt støjende system. Den kan betragtes som en hybrid mellem den gatebaserede og den adiabatisk beregningsmetode: Ligesom for den adiabatisk metode, er målet at finde den laveste energitilstand, grundtilstanden, for et system, men dette gøres ved hjælp af et gatebaseret kvantekredsløb, der løbende bliver justeret på en sådan måde, at systemet bringes ned i den ønskede grundtilstand, der rummer svaret på udregningen. Denne justering af kvantegatene, der får systemet til at konvergere mod grundtilstanden, opnås ved iterativt at måle systemet, bruge måleresultaterne til at udregne systemets energi på en almindelig computer og slutteligt benytte denne værdi til at ændre en smule på gateindstillingerne, sådan at gate transformationerne bringer systemet mod en lavere energi. Denne proces gentages igen og igen, og får til sidst systemet til at havne i den ønskede energitilstand, grundtilstanden. Metoden, som er illustreret i figur 4, involverer altså en klassisk optimering af et kvantekredsløb, og er derfor et eksempel på en hybrid kvante-klassisk beregningsmetode.

Selvom den variationelle metode også er universel,

dvs. at enhver kvanteberegning kan udføres, er det alligevel nogle helt specifikke kvantealgoritmer, som har givet anledning til den største interesse. Det drejer sig for eksempel om den såkaldte “variational quantum eigensolver”, der blandt andet kan bruges til at findes grundtilstanden af elektronerne i et komplekst molekyle, samt algoritmer, der hurtigere kan finde en løsning på komplekse kombinatoriske optimeringsproblemer som det klassiske Traveling Salesman-problem. Dette problem går ud på at finde den kortest mulige rute mellem en række byer, der skal besøges præcis én gang af en sælger, og kompleksiteten af løsningen øges hurtigt med antallet af byer.



**Figur 4.** En variationel kvantecomputer er en slags kvanteklassisk hybrid, da den benytter sig af en løkke, hvori der skiftevis 1) udføres et kvantekredsløb  $U$ , hvis gates har variable parametre  $\{\theta\}$ , 2) foretages en måling af en given observabel  $\hat{O}_k$ , og 3) køres en klassisk algoritme, der bruger måleresultat til at opdatere kredsløbets parametre i næste skridt, baseret på beregning af en omkostningsfunktion  $C$  der skal minimeres. Ligesom en adiabatisk kvantecomputer er den variationelle særligt egnet til at løse optimeringsproblemer, men den er baseret på et standard kvante-kredsløb af gates. Dette kredsløb er typisk meget kortere end for konventionelle algoritmer, hvilket gør det mere realistisk at køre en variationel algoritme på de nuværende støjende kvantecomputere.

Selvom en kvantefordel endnu ikke er påvist, har man afprøvet den variationelle beregningsmetode i en række anvendelser på kvantecomputere baseret på ioner og superledende elektronik.

### Kvantefejlkorrektionskoder

Den største udfordring, vi står overfor i forhold til konstruktionen af en skalerbar kvantecomputer, er måske håndteringen af beregningsfejl. På grund af den utrolig skrøbelige natur af kvantetilstande vil enhver påvirkning fra omgivelserne give anledning til støj og dermed beregningsfejl. I modsætning til almindelig informationsteknologi, som bruger bit-redundans til fejldetektion og -korrektion fx på harddiske og i internetkommunikation, står kvantecomputere over for nogle helt specielle begrænsninger. Tilstanden af en qubit kan hverken kopieres eller måles uden at forstyrre den, i modsætning til den klassiske bit som nemt kan kopieres for at skabe redundans og nemt kan måles

for at finde og korrigere en eventuel opstået fejl. Men den går altså ikke i den kvantemekaniske verden, hvorfor traditionelle fejlkorrektionsmetoder er uegnede til kvantecomputeren.

Løsningen ligger i de sofistikerede kvantefejlkorrektionskoder, som benytter sig af et større antal fysiske qubits (for eksempel atomer eller fotoner) til at repræsentere en enkelt logisk qubit. Man “smører” sin logiske qubit ud over et større antal fysiske qubits på en sådan måde, at fejl vil kunne observeres ved at måle et begrænset sæt af de fysiske qubits, og det uden at den logiske qubit kollapse. I mere korrekte termer kodes den logiske qubit i et underrum af et stort Hilbertrum, som udspændes af egenvektorerne for de fysiske qubits. En fejl vil skubbe den logiske qubit ind i et andet underrum i det samme Hilbertrum, og dette nye underrum kan skelnes fra det oprindelige underrum, hvorfor en fejl kan detekteres. Dette bruges efterfølgende til at korrigere den logiske qubit. En af de tidligste fejlkorrigierende koder, som var med til at kickstarte hele kvantecomputereventyret, er den meget kendte Shors fejlkorrigierende kode, opkaldt efter dens opfinder, Peter Shor. Koden benytter sig af ni fysiske qubits til at kode én logisk qubit, og er kun i stand til at korrigere fejl, der optræder med meget lille sandsynlighed. Er fejlraten for stor, kan fejlene ikke detekteres og korrigeres. Men hvor store fejlrater kan man mon tolerere? Svaret på dette spørgsmål findes i det såkaldte kvantetærskelteorem (“Quantum threshold theorem”), der giver den maksimalt tilladte værdi for den fysiske fejlrater for at koden vil kunne undertrykke en logisk fejl. Denne værdi afhænger af den benyttede kode, og der er således en verdensomspændende jagt på at finde nye koder, som tillader højere værdier for den fysiske fejlrater, og som samtidig kan implementeres på de kvanteprocessor-arkitekturer, der er mulige at konstruere.

Som nævnt dannes fejlkorrektionskoderne ved at kombinere en række fysiske qubits, hvilket realiseres via qubit-qubit-vekselvirkninger. Det er dog ikke altid nemt at udføre sådanne vekselvirkninger, idet de forskellige qubits kan ligge langt fra hinanden. Det er derfor vigtigt at bygge computerens arkitektur på en sådan måde, at det er praktisk muligt at skabe de ønskede koder. Shors kode kræver for eksempel et komplekst netværk af forbindelser mellem qubits, som ikke nemt lader sig implementere i mange computerarkitekturer. Man har dog indenfor de seneste år udviklet en ny kodetype, som kun kræver forbindelser på en overflade mellem en qubit og dens nærmeste naboer – de såkaldte overfladekoder. Udover at være meget nemmere at implementere end de traditionelle koder, har disse koder også en meget højere fejltærskelværdi. Overfladekoden er derfor i øjeblikket den mest lovende kode til fejltolerant kvantecomputing. Dette kan dog hurtigt ændre sig. Udvikling af nye koder med endnu bedre fejltærskel er et brandvarmt forskningsfelt, og hvem ved, måske man en skønne dag opdager en kode, som kan håndtere rigtig meget støj – det ville være et ægte gennembrud.

En anden stor udfordring er det meget store antal fysiske qubits der skal til for at skabe bare en enkel

logisk qubit. Det vurderes at man med de mest lovende koder skal bruge cirka 1.000–10.000 fysiske qubits for at beskytte en enkel logisk qubit, og for at lave virkelig spændende beregninger skal vi altså bruge 100–1.000 logiske qubits, dvs. ca. 1 million qubits i alt. De fylder rigtig meget, og det forventes derfor at de første fejltolerante kvantecomputere vil komme til at optage det meste af pladsen i et datacenter. Det vil derfor være godt at udvikle nye koder, som ikke kræver så mange fysiske qubits. Vi forsøger at gå i den retning på DTU. Her studerer vi de såkaldte Gottesman-Kitaev-Preskill-(GKP)-koder, som er en helt speciel kode, der kan korrigere fejl med bare en enkelt fysisk qubit! Det lyder jo næsten for godt til at være sandt. Og ja, intet kommer gratis. GKP-koden er nemlig ikke så nem at skabe. Selvom koden er blevet realiseret i to fysiske opstillinger – den ene baseret på ion-fælder og den anden på superledende elektronik – bliver det først for alvor spændende, når det kan lade sig gøre i skalerbare optiske systemer. Vi har på DTU fremsat en ny metode til skabelsen af GKP-koder i optiske systemer [4], og har derudover realiseret egnede klyngetilstande [5], som tidligere beskrevet i Kvant [6], samt demonstreret implementering af de relevante gates [7].

## Afrunding

Kvantecomputing er kommet en meget lang vej fra de første teoretiske idéer og algoritmer i 1980'erne og 1990'erne og de første spæde eksperimenter. Vi har nu et højt udviklet sæt af matematiske metoder til at beskrive og analysere kvantecomputere fra flere forskellige perspektiver, som vi har beskrevet her. Alle de nødvendige grundlæggende elementer er blevet demonstreret med høj effektivitet i talrige eksperimenter på forskellige fysiske platforme, og bliver nu sat sammen i mere og mere avancerede kombinationer. Store og små firmaer verden over tager del i udviklingen, og de første kvantecomputersystemer er allerede tilgængelige online, både for offentligheden og kommercielt. Der er stadigvæk meget store teknologiske udfordringer, som skal overvindes, før vi får en universel fejlkorrigeret kvantecomputer, som kan realisere en eksponentiel fordel i praksis. Men udviklingen af kvanteteknologi går i disse år rivende hurtigt. Danmark er med i allerforreste række. Det bliver spændende at se, hvad de kommende år bringer!

## Litteratur

- [1] S. Bartolucci, P. Birchall, H. Bombin, H. Cable, C. Dawson, M. Gimeno-Segovia, E. Johnston, K. Kieling, N. Nickerson, M. Pant, F. Pastawski, T. Rudolph og C. Sparrow (2023) "Fusion-based quantum computation", *Nature Communications*, bind 14, side 912.
- [2] I. Tzitrin, T. Matsuura, R.N. Alexander, G. Dauphinais, J.E. Bourassa, K.K. Sabapathy, N.C. Menicucci og I. Dhand (2021) "Fault-tolerant quantum computation with static linear optics", *PRX Quantum*, bind 2, side 040353.
- [3] M. V. Larsen, C. Chamberland, K. Noh, J. S. Neergaard-Nielsen og U. L. Andersen (2021) "Fault-tolerant continuous-variable measurement-based quantum computation architecture", *PRX Quantum*, bind 2, side 030325.
- [4] J. Hastrup, U. L. Andersen (2022) "Protocol for generating optical Gottesman-Kitaev-Preskill states with cavity QED", *Physical Review Letters*, bind 128, side 170503.
- [5] M. V. Larsen, X. Guo, C.R. Breum, J. S. Neergaard-Nielsen og U.L. Andersen (2019) "Deterministic generation of a two-dimensional cluster state", *Science*, bind 366, side 369.
- [6] U. Hoff, J. S. Neergaard-Nielsen, M. V. Larsen og U. L. Andersen (2020) "Kvantecomputere og grafteori", *KVANT*, bind 31, nr. 4, side 21.
- [7] M. V. Larsen, X. Guo, C. R. Breum, J. S. Neergaard-Nielsen og U. L. Andersen (2021) "Deterministic multi-mode gates on a scalable photonic quantum computing platform", *Nature Physics*, bind 17, side 1018.



Ulrik L. Andersen er kvantefysiker og leder af Danmarks Grundforskningsfonds center for makroskopiske kvantetilstande (bigQ) på DTU Fysik. Hans forskning er centreret om kvante-informationssystemer.



Jonatan Bohr Brask er lektor ved DTU Fysik og arbejder med teoretisk kvanteinformation, ikke-lokalitet, og kvantetermodynamik.



Jonas S. Neergaard-Nielsen er lektor ved DTU Fysik med speciale i ikke-klassisk lys og dets anvendelse indenfor kvanteinformation.



# En kvantecomputer baseret på lys

*Carlos Faurby og Peter Lodahl, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet*

Lys er elektromagnetiske bølger og spiller en afgørende rolle i fysik og teknologi: lys er fundamentet for liv på Jorden, og fotonik har givet os teknologiske landvindinger som lasere eller et globalt internet. Den kvantemekaniske beskrivelse af lys rummer et dybere lag: lys er opbygget af fotoner – udelelige kvanter af lys, som har både partikel- og bølgeegenskaber (partikel-bølge dualitet) – og netop fotonerne kan være en del af løsningen på en af de helt store teknologiske udfordringer i dag: hvordan bygger man en tilstrækkelig stor kvantecomputer, så man kan udnytte den til at løse vigtige problemer.

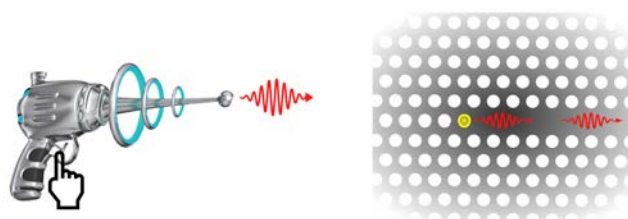
Ideen om en kvantecomputer, der udnytter kvantekompleksitet til at løse problemer umulige for almindelige computere, har skabt meget store forventninger og i disse år investeres der massivt i forskning og udvikling af teknologien bag. Kvantecomputere findes allerede i dag, men den store udfordring er, om man kan bygge dem tilstrækkeligt store og komplekse til, at de kan løse problemer, som nuværende computere aldrig vil kunne tackle. Opskaleringen af kvantecomputerteknologi er en stor og kompleks udfordring, og det er endnu ikke oplagt hvilken basal kvanteteknologi, som vil vise sig mest velegnet. Dette har ført til en meget stor interesse for forskellige kvanteteknologiplatforme, da de hver især har deres fordele og ulemper, og da en “vinder teknologi” endnu ikke er identificeret. På Niels Bohr Institutet arbejder vi intenst med kvantecomputere baseret på lys, hvor fotoner anvendes som kvantebits. I denne artikel vil vi forklare, hvordan sådan en fotonisk kvantecomputer fungerer, og hvorfor de kan vise sig at være løsningen på den store udfordring om, hvordan man opskalerer kvantecomputere.

## Det svageste glimt i universet som byggeklods

I science fiction-genren elsker man at spekulere over, hvor kraftige lysstråler man kan skabe, og hvad det kunne bruges til. Alt fra en gigantisk laserstråle, der bruges til at ødelægge en meteor og redde planeten, til lyset fra en hel stjerne samlet igennem en Dysonkugle. Der er nok færre, der har tænkt over hvad, man kunne bruge de svageste lysstråler til, men det er faktisk her, at nøglen til kvanteteknologiens store udfordringer måske ligger gemt. For over 100 år siden forudsagde Max Planck og Albert Einstein, at energien for en lysstråle har en mindste størrelse. Denne størrelse kalder vi for et lyskvant eller en foton. Det betyder, at for en given bølgelængde findes der en minimum-energi, som lyset udgør ifølge fysikkens love. Den svageste lysstråle vil derfor bestå af en stråle af lyskvanter, som kommer en ad gangen. Tænk på det som en “fotonpistol” – når man trykker på aftrækkeren, udsendes én og kun én foton, se figur 1. Og nu, 100 år efter at tanken opstod, har vi faktisk formået at bygge en sådan lyskilde.

Ifølge Niels Bohrs atommodel bliver en foton udsendt, når en elektron i et atom henfalder fra en højere-liggende orbital til en lavere-liggende. Vores fotonkilde er baseret på netop dette princip, men i stedet for et atom, bruger vi et såkaldt kvantepunkt, som er et “designatom”

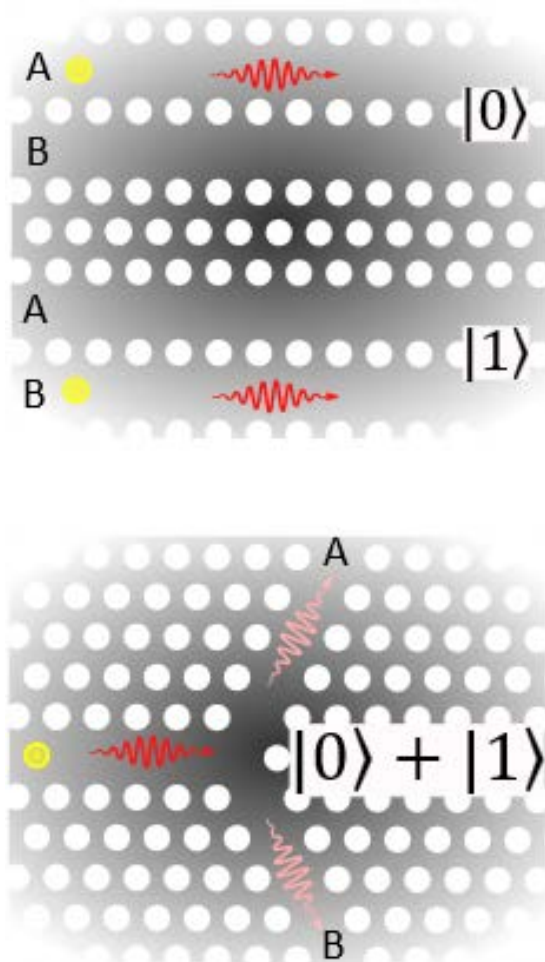
indlejret i et halvledermateriale. Fotonerne kan vi opfange med en fotonisk “chip”, en såkaldt fotonisk krystalbølgeleder, se figur 1. Baseret på denne metode har vi bygget verdens bedste en-fotonlyskilde – eller en “foton pistol”, som udsender én og kun én foton hver gang vi trykker på aftrækkeren. I vores eksperimenter gøres dette ved at anslå kvantepunktet med en meget kort laserpuls. En-fotonlyskilden er efter mange års intens forskning faktisk blevet så god, at den er blevet til et kommercielt produkt. Du kan læse mere om kvantepunkter og fotoniske krystaller i artiklen fra det danske startup Sparrow Quantum side 29.



**Figur 1.** Venstre: Det svageste “lysvåben” i universet er en pistol, som når man trykker på aftrækkeren udsender én og kun én foton. Højre: Et kvantepunkt (gul prik) udsender én foton ad gangen, når det anslås. Disse fotoner opfanges med stor effektivitet i en såkaldt fotonisk krystalbølgeleder, hvorved fotonen udsendes i kun en retning.

Det faktum, at vi kan generere én og kun én foton, åbner op for muligheden for at skabe en lysbaseret kvantecomputer. Der er to fundamentale egenskaber i kvanteverdenen, som giver kvantecomputere en stærk fordel overfor deres klassiske modpart: superposition og entanglement. En partikel siges at være i en superposition, hvis den er i flere tilstande på én gang. En tilstand kunne for eksempel være positionen, så hvis en partikel kan være i punkt *A* eller punkt *B*, så kan den også være i en superposition, hvor den er begge steder samtidigt. Dette er en af særhederne i kvantemekanikken. Superpositionstilstande findes kun så længe, kvanteobjektet ikke bliver observeret. Efter en måling vil superpositionen kollapse, og partiklens tilstand vil ændre sig til kun at være ét sted. Det kan sammenlignes med en tryllekunstner, der altid har en kugle i den hånd, vi peger på, men når først den er åbnet, ligger den kun ét sted. Tryllekunstneren benytter sig formentlig af forskellige illusionstrick, men næppe af kvantesuperpositions tilstande – disse er nemlig meget

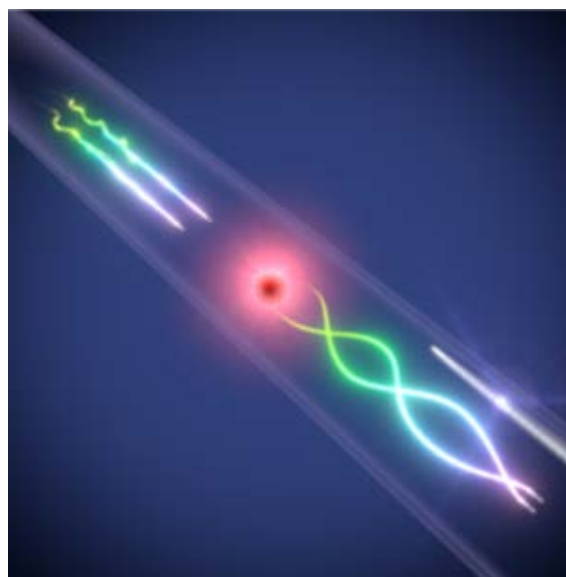
skrøbelige, og jo større objekterne bliver, desto skrøbeligere bliver de. Den næste egenskab er entanglement, som er et flerpartikel-fænomen. To partikler siges at være entangled (eller på dansk, sammenfiltrede), hvis deres kvantetilstande er afhængige af hinanden. Hvis to partikler er entangled, vil en måling på den ene partikel øjeblikkeligt kollapser ikke alene egen, men også entanglement-partnerens tilstand. En kvantecomputer udnytter superposition og entanglement til at lave beregninger, som vil være umulige med selv verdens største klassiske computer. I det følgende vil vi forklare, hvordan begge egenskaber kan opnås, hvis man har adgang til én foton ad gangen. Dette er princippet bag en lysbaseret kvantecomputer.



**Figur 2.** Øverst: En foton, som rejser i bane A, udgør en qubit i tilstand 0, hvorimod én, der rejser i bane B, udgør tilstand 1. Nederst: Når en foton møder et vejkryds, så tager den ikke enten A eller B men BÅDE A og B. Dette udgør en qubit i en superposition af 0 og 1.

En klassisk computers mindste regneenhed er en bit, som fremkommer af et fysisk system, der kan have to forskellige tilstande. Moderne computere bruger transistorer til at processere bits. Transistorer er små elektroniske enheder, som enten ikke gør noget (tilstand 0) eller lader en strøm køre igennem sig (tilstand 1). En kvantecomputer har ligeledes en mindste bestanddel, som hedder en qubit, og den minder meget om en bit, bortset fra at den også kan være i en superposition mellem dens to tilstande 0 og 1. En fotonisk qubit tager udgangspunkt i den bane, som fotonen følger.

Hvis fotonen bevæger sig i bane A, er tilstanden 0, og tager den bane B, er den 1. Da fotonen er den mindste bestanddel af lys, kan den ikke deles, så hvis vi forsøger at skille den ad på en "forgrening", kan det forstås således, at fotonen kommer i en superpositionstilstand, hvor den går op og ned samtidigt, som illustreret i figur 2. Sådant en forgrening kalder vi for en beamsplitter, og den sætter en fotonisk qubit i en superposition mellem 0 og 1. Her er det vigtigt, at der kun er én foton: normalt lys med mange fotoner vil ikke komme i en superpositionstilstand, men blot deles i to efter passagen af en beamsplitter.



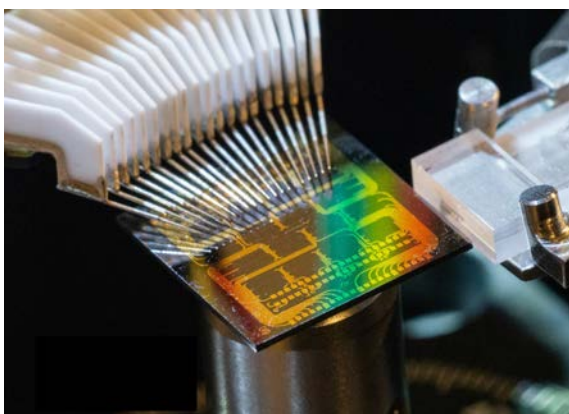
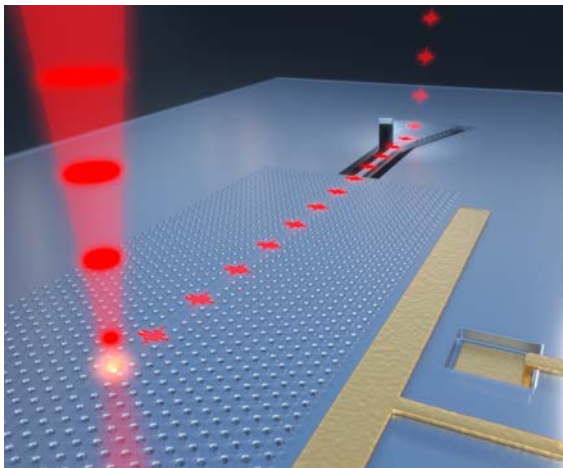
**Figur 3.** To fotoner møder hinanden og vekselsvirker med et kvantepunkt. Vekselsvirkningen betyder, at de to fotoners kvantetilstande sammenfiltres.

Hvis man har mere end én qubit, kan man begynde at skabe entanglement imellem dem. Dette gøres ved at få partiklerne til at vekselsvirke, således at deres kvantetilstande bliver afhængige af hinanden. Desværre er det et velkendt fysisk fænomen, at to fotoner, der møder hinanden, også hurtigt "glemmer" hinanden igen – foton-foton-vekselsvirkninger er meget svage. Det er dog muligt at få fotoner til påvirke hinanden, hvis der er en tredje part som facilitator. Dette kunne for eksempel være en elektron eller et atom, som begge fotoner vekselsvirker med. Det har dog været rigtig svært for fysikere at finde sådan en facilitator i praksis, og det har været en af de fundamentale begrænsninger i kvantefotonik. Heldigvis har vi for nyligt opdaget, at de selv samme kvantepunkter, som bruges til at skabe fotonerne, også kan bruges til at opnå foton-fotonvekselsvirkning [1]. Som en mor eller far, der er dygtig til at få sine børn til at være gode venner, kan et kvantepunkt skabe samhørighed (entanglement) mellem de fotoner, den selv har skabt.

### Fordele ved lys

Det ser ud til, at det er muligt at lave en lysbaseret kvantecomputer, men er det en god idé? Her vil vi prøve at forklare fordelene ved en lysbaseret kvantecomputer, samt nogle af de udfordringer, som skal løses i fremtiden. Der er to vigtige fysiske egenskaber, som vi vil tage

udgangspunkt i: At lys rejser med lysets hastighed, og at fotoner er svagt vekselvirkende partikler.



**Figur 4.** Øverst: Et kvantepunkt aktiveres med en laserpuls og udsender derefter én foton ad gangen, der opfanges af en fotonisk krystalbølgeleder. Selve udsendelsen af fotonen fra kvantepunktet foregår ved meget lav temperatur for at undgå dekohærens, men så snart fotonerne er udsendt, kan de processeres ved stuetemperatur. Nederst: Eksempel på en fotonisk mikrochip – baseret på lys – der fungerer ved stuetemperatur og som kan udføre kvantecomputeroperationer.

Ud fra vores hverdags erfaring med lyset er det muligt at observere, at fotoner er svagt vekselvirkende partikler. Når vi lyser med en laser på en væg, ser vi, at laserstrålen stopper på væggen, mens vi overser, at laserstrålen rejste uberørt igennem billioner af luftmolekyler uden at kollidere. Faktisk er det langt over 99.99% af fotonerne, der når hen til væggen (hvis den er et par meter væk). Havde vi i stedet skudt elektroner afsted med samme energi, ville succesraten være markant lavere. En af de største udfordringer ved at bygge en kvantecomputer baseret på elektroner ligger i dekohærens, der opstår, når elektronerne vekselvirker med omgivelserne, og derigennem mister kvanteinformation. Problemet bliver ofte imødegået ved at køle elektroner ned til temperaturer, der er meget tæt på det absolutte nulpunkt, og selv dér er dekohærens en udfordring. Nedkølingen kræver en kæmpe stor og højteknologisk fryser, som er en af grundene til at nutidens kvantecomputere er ekstremt dyre og endnu ret primitive maskiner. Hvis man brugte fotoner i stedet for, ville man slet ikke have brug for at køle ned, da fotonerne ikke påvirkes af dekohærens selv ved stuetemperatur. Dette giver mulighed for at forarbejde lyset i mikrochips, som den vist i figur 4, der er

udviklet af telekomindustrien og kan masseproduceres [2].



**Figur 5.** Fotoniske qubits kan bruges til at forbinde kvantecomputere på meget lange afstande, hvilket åbner op for muligheden for kvanteinternettet.

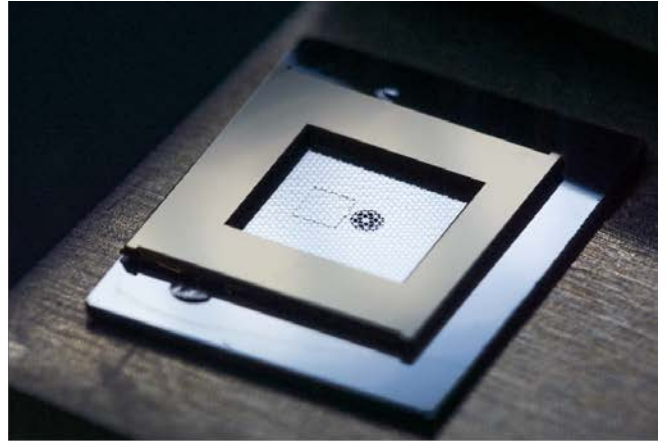
At lys bevæger sig med lysets hastighed, viser sig at være både den største fordel og den største ulempe ved lysbaserede kvantecomputere. Man kunne tro, at den ultimative hastighed vil gøre en kvantecomputer baseret på lys ekstremt hurtig, men faktisk er dette ikke direkte relateret til beregningshastigheden. Grunden til, at hastigheden er en fordel, er, at fotoner kan rejse lange afstande på meget kort tid, så en kvantebit fra en fotonisk kvantecomputer nemt og hurtigt kan sendes til en anden kvantecomputer. Det betyder at fotoner kan bruges til at koble kvantecomputere igennem det, vi kalder for kvanteinternettet [3].

At fotoner bevæger sig hurtigt kommer dog med en pris, da de netop altid er i bevægelse. Det skaber den udfordring, at hvis man prøver at lave en lang udregning, vil fotonerne løbe væk, før udregningen er færdig. En elektronisk kvantecomputer kan derimod, så længe den befinder sig i en meget kold fryser, holde på kvanteinformation længe nok til at gennemføre lange udregninger. Problemet kan dog omgås på snedig vis i en optisk kvantecomputer, da man blot deler de lange udregninger op i mange små udregninger. Små udregninger kan gennemføres med fotoner på meget kort tid, og nye fotoner kan derefter anvendes til nye udregninger. Så længe man har masser af fotoner til rådighed, kan en lysbaseret kvantecomputer stadig bruges til at løse komplekse problemer. Bemærk, at kravet om rigtig mange fotoner ikke er i modstrid med kravet om én foton ad gangen, man skal blot sørge for at generere lyskilder med tilstrækkelig høj en-fotonflux – én-foton-maskingeværer i stedet for én-foton-pistoler. Dette er forskning, vi i øjeblikket arbejder intenst på!

### Hvad fremtiden bringer

Som vi har set, har lysbaserede kvantecomputere den fordel, at de kan fungere ved stuetemperatur og at de nemt kan forbindes til hinanden ved hjælp af kvanteinternettet. Elektroniske kvantecomputere kommer også med fordele og ulemper, men det behøver dog ikke at være et enten-eller, hybride kvantecomputere er også en mulighed. Ny forskning i mekaniske mikromembraner, som dem vist i figur 6, viser, at det er muligt at omdanne informationen fra en elektronisk qubit til en fotonisk qu-





**Figur 6.** Venstre: En mikrochip med en membran, der kan bruges til at koble elektroniske qubits til fotoniske qubits Højre: Nærbillede af membranen, hvor der yderligere kan ses en capacitor, der kobler til et elektronisk kredsløb (firkant) og en kavititet, der kan oscillere og koble til lys (cirkel).

bit, igennem det man kalder for en kvante-transducer [4]. Det vil åbne muligheden for at forbinde elektroniske kvantecomputere til kvanteinternettet ved hjælp af fotoner, og omvendt at forbinde fotoniske kvantecomputere til et andet system, der kan lagre deres kvanteinformation over længere tid.

## Litteratur

- [1] H. Le Jeannic, A. Tiranov, J. Carolan, T. Ramos, Y. Wang, M. H. Appel, S. Scholz, A. D. Wieck, A. Ludwig, N. Rotenberg, L. Midolo, J. J. García-Ripoll, A. S. Sørensen og P. Lodahl (2022) "Dynamical photon-photon interaction mediated by a quantum emitter," *Nature Physics*, bind **18**, side 1191–1195.
- [2] Y. Wang, C. F. Faurby, F. Ruf, P. I. Sund, K. Nielsen, N. Volet, M. J. Heck, N. Bart, A. D. Wieck, A. Ludwig, L. Midolo, S. Paesani og P. Lodahl (2023) "Deterministic photon source interfaced with a programmable silicon-nitride integrated circuit," *npj Quantum Information*, bind **9**, side 94.
- [3] Th. J. Kimble (2008) "The quantum internet," *Nature*, bind **453**, side 1023–1030.
- [4] P. Seidler, E. Verhagen, A. Schliesser og A. Xue-reb (2021) "Shining a hot light on optomechanics," *IEEE Spectrum*, [spectrum.ieee.org/shining-a-hot-light-on-optomechanics](https://spectrum.ieee.org/shining-a-hot-light-on-optomechanics).



Peter Lodahl er professor i kvantefysik på Niels Bohr Institutet og leder af Grundforskningsfondens center "Hybrid Quantum Networks" (Hy-Q). Han er også grundlægger af virksomheden Sparrow Quantum, som kommerialiserer enfotonlyskilder.



Carlos Faurby er ph.d.-studerende i fysik på Niels Bohr Institutet. Hans arbejde går ud på at lave praktiske eksperimenter med forskellige teknologier, der kunne muliggøre lysbaserede kvantecomputere. Et af hans eksperimenter involverer den mikrochip, der kan ses på figur 4.

**PFEIFFER VACUUM**

**Nyhed**

**Oliefri vacuumpumpe - HiScroll (6-20 m<sup>3</sup>/t)**  
**Ekstrem lyd- og vibrationssvag**  
**pumpe med kompakt design**



Tlf. 3166 8708  
[Lars.Scholte@pfeiffer-vacuum.dk](mailto:Lars.Scholte@pfeiffer-vacuum.dk)  
[www.pfeiffer-vacuum.com](http://www.pfeiffer-vacuum.com)

# Kvantealgoritmer

Ulrich B. Hoff, *Kvantify*

Kvantecomputeren er en spirende teknologi mange efterhånden har hørt om. Mindre udbredt er kendskabet til, hvordan de opnår deres potentiale til at løse beregningsproblemer, der hidtil har været uden for vores rækkevidde. Hardwaren er naturligvis en stor del af forklaringen, idet den funktionaliserer kvantefysikkens fænomener og gør dem til en kontrollerbar ressource, men derefter er det kvantealgoritmerne, der tager over og omsætter de ressourcer til effektive løsninger – i bedste fald med en eksponentiel speed-up over klassiske computere, men sandsynligvis kun for en afgrænset mængde af problemer.

“Ingen arme, ingen kage!” Denne essentielle læresætning gælder i høj grad også inden for kvantecomputing. Vi vil så umådeligt gerne have fingrene ned i kagedåsen med alle de gode løsninger på de allersværeste beregningsproblemer, som i den grad vil kunne forsøde vores tilværelse, men dåsen er desværre gemt godt af vejen et sted højt oppe på øverste hylde. Vi skal derfor virkelig yde en indsats; vi skal udvikle den nødvendige hardware, der kan få os op i højden, og vi skal på en krævende rekognosceringsmission rundt i de mørke strabadserende afkroge af matematikken og datalogien for at identificere og analysere de eftertragtede hårde problemer. Derefter venter arbejdet med at få lirket dåsen op, og det er her kvantealgoritmerne kommer i spil.

## Beregnelighed

Hele computerbegrebet og den fundamentale forståelse af dens funktion og formåen skylder vi den britiske matematiker Alan Turing. I 1930'erne udviklede han en model for, hvad en beregning er i termer af nogle helt basale processer og operationer – en konstruktion, der senere er blevet kendt som en *Turingmaskine*. Med andre ord, så formaliserede Turing altså, hvad de grundlæggende ingredienser i en algoritme er. Sammen med den amerikanske matematiker Alonzo Church gik han endda så vidt som at opstille en hypotese om, at alt hvad der er realistisk beregneligt kan brydes ned i operationer udført af en Turingmaskine. Den påstand er kendt som *Church-Turing tesen*.

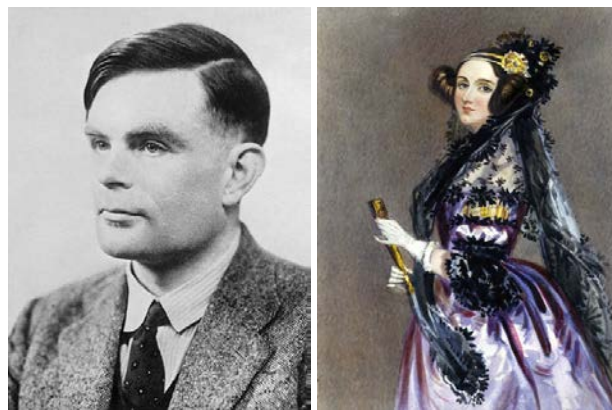
Idéen om at få maskiner til at udføre beregninger går dog noget længere tilbage end Alan Turings formalisering. Et af de tidlige eksempler er den engelske polyhistor Charles Babbages mekaniske computer “the analytical engine”, og det var netop til denne maskine, at Ada Lovelace i 1848 skrev verdenshistoriens første computerprogram til udregning af Bernoullital. Lovelace grundlagde dermed computerprogrammering og softwareudvikling, og hun havde store visioner for, hvad der kunne opnås i samspillet mellem algoritme, programmering og maskine [1]:

“Supposing that the fundamental relations of pitched sounds in the science of harmony and of musical composition were susceptible of such expression and adaptations, the engine might compose elaborate and

scientific pieces of music of any degree of complexity or extent.”

—Ada Lovelace

Det med kompleksiteten skal vi se nærmere på, for selvom det kan synes som om computere er i stand til at simulere og beregne hvad som helst, så vokser træerne ikke ind i himlen.



**Figur 1.** Alan Turing (t.v.) lagde ikke blot fundamentet for computeren, men spillede også en central rolle for de allieredes arbejde med at bryde tyskernes Enigmakryptering. Ada Lovelace (t.h.), datter af Lord Byron, arbejdede i midten af 1800-tallet sammen med Charles Babbage og skrev verdens første computerprogram til hans maskine.

## Kompleksitet

Efter udviklingen af den transistorbaserede computer er udviklingen af regnekraft gået stærkt. I 1965 forudsagde Gordon Moore at antallet af transistorer i CPUer ville blive fordoblet ca. hvert andet år, og den forudsigelse har holdt stik med bemærkelsesværdig præcision. Siden 1999 har CPUer kunnet processere data med mere end en milliard operationer i sekundet og de bliver kun hurtigere. Det ville iøvrigt ikke have overrasket Alan Turing, da han allerede i 1950 forudsagde, at computerteknologien 50 år senere ville være på netop det niveau.

Nogle problemer er imidlertid af en sådan karakter, at ligegyldig, hvor hurtige vi gør processorerne, så vil det tage eksponentielt lang tid at nå en løsning og derfor være praktisk umuligt. Hvis computeren først leverer sit output efter flere år eller årtier, så vil svaret nok være af meget beskeden praktisk relevans. I de tilfælde må man ty til heuristiske løsningsmetoder, som gør det muligt at

finde en tilnærmet løsning inden for overskuelig tid – men uden garanti for, at den er optimal.

I datalogien klassificeres problemerne efter deres kompleksitet, dvs. hvordan det nødvendige antal resourcer/operationer skalerer med størrelsen af problemet. Det er netop skaleringen der afgør, om vi kan løse problemet, og det element er flettet ind i den såkaldte *stærke Church-Turing tese*, også kendt som den kompleksitetsteoretiske Church-Turing tese (her i John Preskills udlægning) [2]:

“A problem can be solved efficiently if the number of steps on a Turing machine scales like a polynomial in the size of the input to the problem”.

Med “effektiv løsning” menes altså, at den tid det tager, maksimalt vokser polynomisk med størrelsen af problemet, og det er de problemer vi kan håndtere med nuværende computere. De er indeholdt i kompleksitetsklassen P. Blandt disse findes nogle, som alle de andre problemer i klassen kan reduceres til. De betegnes som P-komplette problemer, og en løsning til et af dem, vil automatisk også give en løsning til alle andre problemer i P. Men der findes et helt *polynomisk hierarki* af kompleksitetsklasser, og udfordringen er, at rigtig mange af de hårde problemer vi meget gerne vil kunne løse ligger uden for P og dermed uden for vores nuværende rækkevidde. Og det vil de blive ved med, så længe den stærke Church-Turing tese står ved magt. En af de kompleksitetsklasser der er meget fokus på, er NP. Det er de problemer for hvilke man med en Turingmaskine effektivt kan verificere en løsning, når den er fundet. Der er derimod ingen kendte effektive algoritmer til at finde løsningerne. Det er fortsat et stort åbent problem at afklare om P er lig med NP. Den amerikanske datalog Scott Aaronson formulerer det således [3]:

“Look, this P versus NP question, what can I say? People like to describe it as “probably the central unsolved problem in theoretical computer science.” That’s a comical understatement. P vs. NP is one of the deepest questions that human beings have ever asked.”

I NP findes der ligeledes en hård kerne af NP-komplette problemer. De omfatter bla. kombinatoriske optimeringsproblemer som *travelling salesman problemet*, og det er nogle af de problemer, det virkelig vil gøre en kæmpe forskel for både forskning og industri at finde effektive løsninger på. Men det er nok for meget at bede om, og mindre kan også gøre det. Selvom det som sagt er et åbent uafklaret spørgsmål, så er der en generel overbevisning om, at der i NP findes problemer, som ikke er indeholdt i P og dermed at  $P \neq NP$ . Og derudover, så er der en formodning om, at nogle af de problemer ikke er NP-komplette, det gælder eksempelvis *faktoriseringsproblemet*, der omhandler primtalsfaktorisering af heltal. Som vi skal se om et øjeblik, så er netop det problem blevet helt centralt for kvantecomputere.

## Kvantecomputeren

Der eksisterer ikke en entydig definition af, hvad en kvantecomputer er. Der findes nemlig flere fysisk mulige modeller for, hvordan kvanteberegninger kan realiseres. Den dominerende model er på nuværende tidspunkt kredsløbsmodellen, men derudover findes fx også topologiske, målingsbaserede og adiabatisk modeller. Arbejder man inden for kredsløbsmodellen, så giver DiVincenzos tjekliste [7] nogle retningslinjer for, hvilke elementer kvantecomputeren skal rumme: (1) en fysisk implementering af mange qubits, (2) som skal kunne initialiseres i bestemte starttilstande og (3) manipuleres hhv. et universelt sæt af en- og to-qubitgates. Derudover skal der være (4) en effektiv oversættelse af beregningsproblemet til et kvantekredsløb og (5) de enkelte qubits sluttillstande skal kunne udlæses og omformes til klassiske bitværdier.

Lad os derefter få slået fast, at der med kvantecomputeren *ikke* ændres på, hvilke beregningsproblemer det helt fundamentalt er muligt at løse. Alt hvad kvantecomputeren kan, kan også simuleres af en sædvanlig computer udstyret med en tilfældighedsgenerator til at håndtere kvantefysikkens ikke-deterministiske aspekter, og derfor er den oprindelige Church-Turing tese ikke truet. Men hvorfor så overhovedet bruge kræfter på at udvikle en kvantecomputer? Fordi den i nogle tilfælde kan rykke grænserne markant for, hvad der er *praktisk muligt* og *praktisk umuligt*. Eller med andre ord, hvilke problemer vi kan løse effektivt og hvilke vi ikke kan. Kvantecomputeren er nemlig ikke bare en ny kraftigere variant af den computer vi allerede kender. Den udnytter nogle ganske andre fysiske principper og opnår derfor sin *universalitet* – evnen til i princippet at kunne udføre en vilkårlig beregning – ad andre veje end den klassiske computer. Information er i sidste ende noget fysisk, og enhver processering af information vil derfor også nødvendigvis involvere fysiske vekselvirkninger i henhold til fysikkens love. Den klassiske computers halvlederteknologi er grundlæggende set kvantefysisk, og Moores lov ville uden tvivl være blevet overtruffet af Murphys lov langt tidligere, uden den forståelse. Men til forskel fra den klassiske computer, så funktionaliserer kvantecomputerens hardware kvantemekanikkens fænomener og udnytter dem aktivt. Vi ved fra mange og utvetydige eksperimentelle tests af Bells ulighed [4, 5], at kvantefysikken rummer fænomener, der ikke kan reduceres til en klassisk fysisk beskrivelse, og ved at bringe dem i spil, gør kvantecomputeren det muligt at indkode og processere information på helt nye måder. Dermed opstår også nye grænser mellem let og svært i kompleksitetslandskabet af beregningsproblemer. I 1997 definerede Bernstein og Vazirani [6] således den kompleksitetsklasse af problemer, som kvantecomputeren kan løse effektivt. Den hedder BQP – Bounded-Error Quantum Polynomial-Time. Præcis hvordan BQP passer ind i det polynomiske hierarki, hvis overhovedet, er endnu et åbent spørgsmål. Der er derfor heller ikke en klar forståelse af, hvilke typer af problemer kvantecomputeren kan løse effektivt.



## Ud i krogene af Hilbertrummet

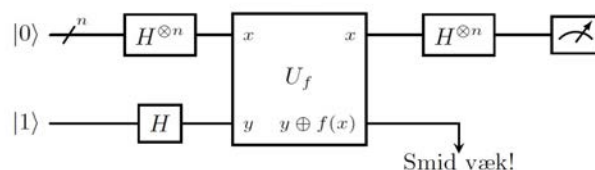
For at vende tilbage til billedsprogets verden, så kan man med nogen ret sige, at vi med kvantecomputeren er ved at udvikle en meget specialiseret og kraftfuld form for slagværktøj, men vi har endnu langt fra det fulde billede af, hvilke søm den kan anvendes på. Men vi har trods alt en klar fornemmelse af, at der i BQP findes problemer som ikke er indeholdt i P, og det er i sig selv interessant, da effektive kvantealgoritmer til de problemer udfordrer den stærke Church-Turing tese. Selvom vi endnu ikke entydigt kan sige, hvad der gør et problem til et godt kvante-problem – ét hvor en kvantealgoritme vil kunne levere en bedre løsning – så kan vi prøve at danne os et billede af de ønskede karakteristika.

Et generelt træk er, at algoritmen skal udnytte den eksponentielle skalering af det vektorrum, kaldet et Hilbert-rum, de kvantefysiske qubits er beskrevet i. Tilstandsvektoren for en qubit lever i et sådan vektorrum af dimension 2, udspændt af basisvektorerne  $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ , og alle normaliserede linearkombinationer af basisvektorerne af formen  $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ , hvor  $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$  og  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ , er gyldige tilstande for qubitten. Til sammenligning er mulighederne for en sædvanlig bit givet ved det 1-dimensionale tilstandsrum  $\mathcal{S} = \{0, 1\}$ . Allerede her ser vi en forskel mellem de to grundlæggende informationsenheder, men det bliver for alvor tydeligt, når vi sammenligner systemer af flere bits og qubits. For  $n$  bits er det samlede tilstandsrum af dimension  $n$  og givet ved det *cartesiske* produkt af de individuelle udfaldsrum, og rummer i alt  $2^n$  forskellige muligheder,  $\mathcal{S}_n = \{(0, 0, \dots, 0, 0), (0, 0, \dots, 0, 1), (0, 0, \dots, 1, 0), \dots, (1, 1, \dots, 1, 1)\}$ . For et system af  $n$  qubits er den samlede kvantetilstand beskrevet i et Hilbertrum givet ved *tensorproduktet* af de individuelle rum,  $\mathcal{H} = \mathcal{H}_1 \otimes \mathcal{H}_2 \otimes \dots \otimes \mathcal{H}_n$ . Det er et vektorrum med dimension  $2^n$  udspændt af basisvektorerne  $\{|x\rangle\} = \{|00 \dots 00\rangle, |00 \dots 01\rangle, |00 \dots 10\rangle, \dots, |11 \dots 11\rangle\}$ , og den samlede tilstand for de  $n$  qubits er generelt givet ved  $|\psi\rangle = \sum_{i=1}^{2^n} \alpha_i |x_i\rangle$ . Tilstanden er en superposition af alle Hilbertrumets basisvektorer, og hvis  $\alpha_i \neq 0$  for alle  $i$ , vil den rumme en komponent af hver af de klassiske mulige bit-tilstande på én gang. Men endnu vigtigere, så rummer en tilstand af den form *entanglement* og kan derfor ikke skrives som et produkt af uafhængige tilstande for hver af de  $n$  qubits. Ved at udnytte korrelationer på tværs af qubits, som entanglement repræsenterer, kan kvantealgoritmer nå ud i alle krogene af Hilbertrummet, og ikke kun de isolerede rum for hver enkelt qubit. En entangled tilstand kan naturligvis indkodes i sædvanlige bits og i princippet simuleres på en klassisk computer, men en repræsentation af den generelle kvantetilstand ovenfor kræver specificering af  $2^{2^n}-1$  reelle parametre (der fratrækkes én pga. normaliseringskravet), og den eksponentielle skalering gør, at det *ikke* kan gøres effektivt.

## Deutsch-Jozsa-algoritmen

En af de første kvantealgoritmer der blev udviklet, og som udnytter kvante-parallelisme til at løse et problem hurtigere end den bedste klassiske løsning er *Deutsch-Jozsa algoritmen* fra 1992, udviklet af briterne David

Deutsch og Richard Jozsa. Problemet algoritmen løser er følgende: Vi har en "black box", som udregner funktionen  $f : \{0, 1\}^n \rightarrow \{0, 1\}$ .  $f$  tager altså et heltalligt input  $x$  i intervallet  $[0, 2^n - 1]$ , repræsenteret ved  $n$  bits, og giver en funktionsværdi  $f(x)$ , som enten er 0 eller 1. Funktionen  $f$  har én af to mulige egenskaber; enten er den konstant og giver samme funktionsværdi for alle  $x$ , eller den er balanceret og giver 0 for halvdelen af  $x$ -værdierne og 1 for den anden halvdel. Opgaven er nu at afgøre om  $f$  er konstant eller balanceret ved brug af færrest mulige ressourcer. Figur 2 viser kredsløbet for den kvantealgoritme, som Deutsch og Jozsa udviklede til at klare opgaven.



**Figur 2.** En af de tidligste kvantealgoritmer, der demonstrerer kvantecomputerens potentiale til at udføre beregninger mere effektivt end klassiske computere er Deutsch-Jozsa algoritmen fra 1992.

Algoritmen bruger  $n + 1$  qubits, som starter i tilstanden  $|\psi_1\rangle = |00 \dots 1\rangle$ , og som hver bringes i en superpositionstilstand vha.  $n$  Hadamardgates,  $H$ . Hadamardgaten har den egenskab, at  $H|0\rangle = (|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$  og  $H|1\rangle = (|0\rangle - |1\rangle)/\sqrt{2}$ , og derfor vil de første  $n$  qubits blive bragt i en superposition af alle  $2^n$  mulige værdier for  $x$ . Alle mulige input fødes dermed samtidigt ind i den unitære operator  $U_f$ , som implementerer funktionen  $f$  gennem transformationen  $|x, y\rangle \rightarrow |x, y \oplus f(x)\rangle$ , og pga. lineariteten af kvantemekanikken udregnes alle funktionsværdierne  $f(x)$  parallelt. Resultatet er, at funktionsværdierne bliver indkodet i amplituderne for superpositionstilstanden af de første  $n$  qubits:

$$|\psi_2\rangle = \sum_{x=0}^{2^n-1} \frac{(-1)^{f(x)} |x\rangle}{\sqrt{2^n}} \left( \frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \right)$$

Selvom det ikke altid er tilfældet – det afhænger bla. af værdien af  $n$  – så vil der generelt være en grad af entanglement i tilstanden  $|\psi_2\rangle$ , og algoritmen bevæger sig derved ud i den interessante del af Hilbertrummet.

I næste trin af algoritmen anvendes igen Hadamardgates på hver af de  $n$  første qubits, og derved kommer endnu en central komponent af stort set alle kvantealgoritmer i spil. I første omgang brugte vi Hadamardgates for at skabe superpositionstilstande, og efter at have indkodet funktionsværdierne i superpositionernes komplekse amplituder, så *interfereres* amplituderne nu ved at anvende Hadamardgates endnu en gang. For at forstå effekten af dette, starter vi med at se på en enkelt af de  $2^n$  bitstreng, der indgår i  $|\psi_2\rangle$  og hvordan den transformeres, dvs.  $H^{\otimes n}|x\rangle$ . For hver Hadamard vi anvender, får vi en faktor  $1/\sqrt{2}$  og i hvert tilfælde får vi en superposition af  $|0\rangle$  og  $|1\rangle$ , dvs. i alt en

sum over de  $2^n$  mulige bitstrenges  $|x\rangle$ :

$$H^{\otimes n}|x\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{j=0}^{2^n-1} (?) \cdot |j\rangle$$

Vi mangler altså bare at bestemme amplituden for hvert led i superpositionen. Hvis der er et 1-tal på den  $k$ 'te plads i  $|x\rangle$  fører Hadamard transformationen til et bidrag til den resulterende superpositionstilstand med  $-|1\rangle$  på den  $k$ 'te plads – husk, at  $H|1\rangle = (|0\rangle - |1\rangle)/\sqrt{2}$ . Fortegnet på det  $j$ 'te led i superpositionen afhænger af antallet af 1-taller på positioner der overlapper med 1-taller i  $|x\rangle$  og er derfor givet ved  $(-1)^{x \cdot j}$ , hvor  $x \cdot j = x_0j_0 \oplus x_1j_1 \oplus \dots \oplus x_{n-1}j_{n-1}$ . Vi får derfor, at

$$H^{\otimes n}|x\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{j=0}^{2^n-1} (-1)^{x \cdot j} |j\rangle,$$

og kombineres dette med udtrykket for  $|\psi_2\rangle$  ser vi, at den samlede tilstand for de  $n+1$  qubits efter anden blok af Hadamardgates er,

$$|\psi_3\rangle = \frac{1}{2^n} \sum_{j=0}^{2^n-1} \left[ \sum_{x=0}^{2^n-1} (-1)^{x \cdot j + f(x)} |j\rangle \right] \left( \frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \right).$$

Det kan vi nu oversætte til sandsynligheder,  $p_i = |\langle i|\psi_3\rangle|^2$ , for udfald af de målinger, der i sidste ende foretages på de første  $n$  qubits. Specielt er vi interesseret i udfaldet  $|00 \dots 0\rangle$ , hvor alle qubits altså måles i tilstanden  $|0\rangle$ . Amplituden for dette udfald er  $\langle 00 \dots 0|\psi_3\rangle = \sum_x (-1)^{f(x)}/2^n$ . Hvis  $f$  er konstant (0 eller 1 for alle  $x$ ), så antager amplituden værdien  $\pm 1$ , svarende til en sandsynlighed  $p = 1$ . Hvis  $f$  i stedet er balanceret, så vil de positive og negative bidrag til amplituden for resultatet  $|00 \dots 0\rangle$  præcist udligne hinanden, og vi får  $p = 0$ . Det betyder, at i det tilfælde vil mindst én af de  $n$  målinger give et resultat forskellig fra 0. Konklusionen er altså, at vi med blot en enkelt måling af de  $n$  qubits kan løse opgaven og afklare, om funktionen  $f$  er konstant eller balanceret. Til sammenligning, så kan man i en klassisk løsning af opgaven kun evaluere  $f$  for én  $x$ -værdi ad gangen. Da der er  $2^n$  forskellige  $x$ -værdier skal vi i værste tilfælde udregne  $f$  for  $2^n/2 + 1$  af dem, for at afgøre om funktionen er konstant eller balanceret.

Deutsch-Jozsa-algoritmen er en af de absolut simpleste kvantealgoritmer, og det problem den løser har ingen praktisk relevans overhovedet. Ikke desto mindre, så illustrerer den nogle af de grundlæggende ingredienser, der gør det muligt at konstruere effektive kvantealgoritmer.

## Fourier, fase og faktorisering

En række af langt mere kraftfulde – og tilsvarende mere komplicerede – algoritmer, relaterer sig til periodicitet og det at finde og udnytte periodiske egenskaber ved funktioner eller talfølger. En del af nøglen til løsningerne er netop at drage nytte af en underliggende struktur i problemerne, og som John Preskill beskriver det i sine forelæsningsnoter: “[W]hile finding needles in a

haystack may be difficult, finding *periodically* spaced needles in a haystack can be far easier.” [11].

En absolut hjørnesten for disse algoritmer er muligheden for effektivt at implementere den diskrete Fourier transformation (*Quantum Fourier Transform*) på en kvantecomputer. Kredsløbsimplementeringen af kvante-Fourier transformationen på  $n$  qubits forbruger et antal af gates, der skalerer som  $n^2$ . Til sammenligning skalerer antallet af gates der kræves for en klassisk Fast Fourier Transformation (FFT) som  $n2^n$ , og kvantealgoritmen giver derfor en eksponentiel speed-up i forhold til klassiske beregninger.

Som vi tidligere har været inde på, så er interferens af qubit-tilstandenes sandsynlighedsamplituder et af de elementer, der spiller en afgørende rolle for kvantealgoritmerne potentiale. Interferensen hænger direkte sammen med muligheden for at bringe qubits i kohærente superpositionstilstande og dermed eksistensen af en relative fase mellem sandsynlighedsamplituderne for superpositionens komponenter. Centralt for mange kvantealgoritmer er derfor også muligheden for effektivt at estimere sådanne relative faser for ukendte qubit-tilstande. Det lader sig gøre takket være *Phase Estimation* algoritmen, som igen henter sin styrke fra kvante-Fourier transformationen.

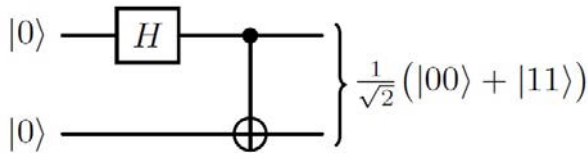
Sidst men ikke mindst, så spiller periodicitet en helt afgørende rolle for den ubetinget mest omtalte af alle kvantealgoritmer – *Shors algoritme*, der gør det muligt at bestemme primtalsfaktoriseringen for heltal (*heltalsfaktoriseringsproblemet*) med en eksponentiel speed-up. Også i dette tilfælde er det kvante-Fourier transformationen, der er den egentlige motor bag algoritmen. (Et par gode og pædagogiske fremstillinger af Shors algoritme findes i [9, 10]). Primtalsfaktorisering kan måske synes som et problem med beskeden relevans, men sikkerheden i såkaldt public key kryptografi, som anvendes i mere end 90% af alle digitale transaktioner (netbank, handel på nettet osv.) hænger på, at der ikke findes en effektiv løsning af netop det problem for klassiske computere. Shors algoritme, og muligheden for at kunne eksekvere den på kommende kvantecomputere, har derfor skabt meget stor global opmærksomhed omkring teknologien, og det er fortsat en af de helt store drivkræfter bag nationale så vel som private investeringer i udviklingen af kvantecomputere.

Ud over løsning af matematiske problemer, så har kvantecomputeren også et enormt potentiale i forhold til fysiske simuleringer af materialer, molekyler, kemiske processor osv. Kvantefysiske systemer bliver meget hurtigt praktisk umulige at simulere på klassiske computere pga. det eksponentielt store Hilbertrum, som tilstandene og processerne er beskrevet i. Med kvantecomputeren lader det sig imidlertid gøre at indkode processerne én-til-én og simulere naturens processer præcist som de foregår.

## Hvad giver kvantealgoritmer speed-up?

Entanglement er som nævnt et entydigt kvantemekanisk fænomen, som ikke lader sig rumme i den klassiske fysik. Derfor anses entanglement også ofte som en essentiel ingrediens i kvantealgoritmer og for kvante-

teknologi generelt. Tilstedeværelsen af entanglement i et problem giver ofte en pejling om, at vi har at gøre med noget, der ikke lader sig beregne eller simulere effektivt på en sædvanlig computer. I 2002 viste Jozsa og Linden [12], at det er en *nødvendig* betingelse for enhver kvantealgoritme, at den involverer entanglement på tværs af ubegrænset mange af de involverede qubits, hvis den skal kunne levere en eksponentiel speed-up i forhold til klassiske beregninger.



**Figur 3.** En maksimalt entangled to-qubit tilstand kan genereres ved brug af en Hadamardgate og to-qubitgaten “controlled-NOT”, der flipper tilstanden af *target* qubitten (nederst), hvis *control* qubitten (øverst) er i tilstanden  $|1\rangle$ .

Men, som de også skrev i artiklen, så er det ikke den fulde fortælling i forhold til, hvad der gør et problem hårdt og dermed potentielt interessant at anvende en kvantecomputer på.

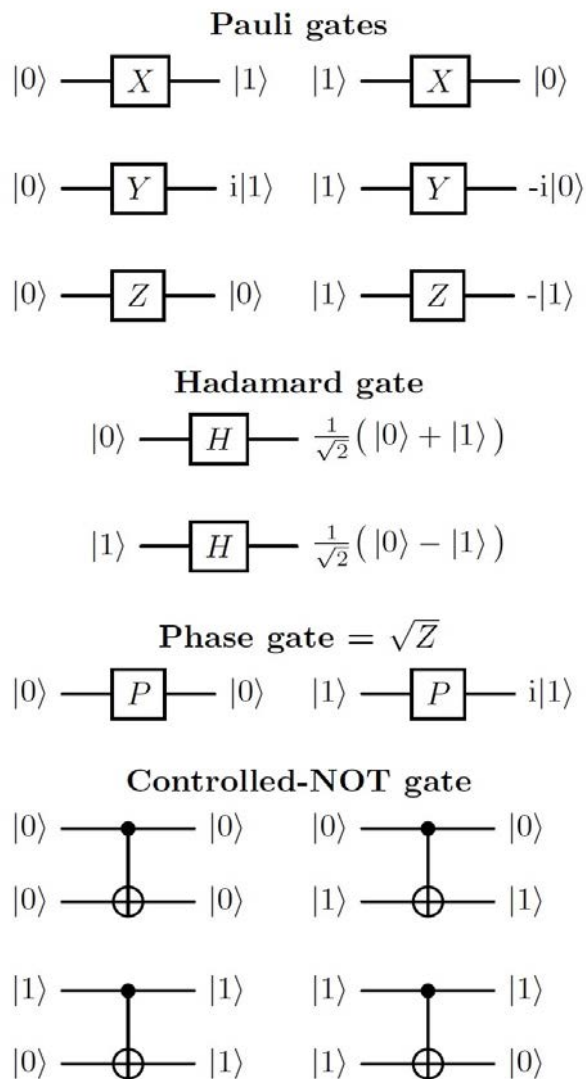
“According to our main results above we can say that entanglement is necessary in a quantum algorithm (on pure states) if the algorithm is to offer an exponential speed-up over classical computation. Does this mean that entanglement can be identified as an essential resource for quantum computational power? [...] we will suggest (perhaps somewhat surprisingly) that this is *not* a good conclusion to draw from our results!” [12]

Et andet teoretisk resultat, som hjælper med at indkredse, hvornår en kvantealgoritme kan levere den eftertragtede eksponentielle speed-up er *Gottesman-Knill teoremet* [14] (her som det er gengivet af Nielsen & Chuang i [13]:

“Suppose a quantum computation is performed which involves only the following elements: state preparations in the computational basis, Hadamard gates, phase gates, controlled-NOT gates, Pauli gates, and measurements of observables in the Pauli group, together with the possibility of classical control conditioned on the outcome of such measurements. Such a computation may be efficiently simulated on a classical computer.”

De gates der refereres til i Gottesman-Knill teoremet kaldes også for Cliffordgates (se figur 4), og det er altså nødvendigt at anvende gates uden for det sæt, for at opnå en virkelig interessant kvantealgoritme. Eksempler på sådanne gates er bla. *T* gaten, der giver en faserotation på  $\pi/4$  på en enkelt qubit, og *Toffoli*-gaten, der er en 3-qubit version af controlled-NOT-gaten (se figur 5). Tilføjelse

af mindst én ikke-Cliffordgate er nødvendig for at opnå et universelt sæt af gates, således at alle operationer kan implementeres. Desværre – men måske nok forventeligt – så er disse gates også nogle af de allersværeste at realisere. Og det bliver ikke bedre af, at Aaronson og Gottesman i 2004 viste, at det ikke er nok bare med et par enkelte af disse gates, faktisk skal algoritmen benytte et antal, der skalerer polynomisk med antallet af qubits i algoritmen for ikke at kunne simuleres effektivt med en klassisk computer [15, 16].



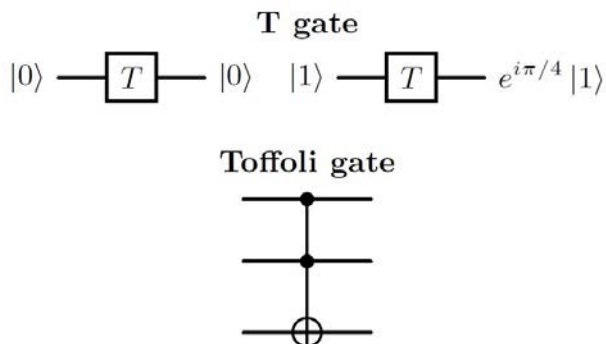
**Figur 4.** En kvantealgoritme, der udelukkende anvender gates fra Clifford sættet ovenfor, kan simuleres effektivt af en klassisk computer og vil derfor aldrig levere eksponentiel speed-up.

En måde at frembringe disse noget drilske gates er via såkaldte “magic states” (nogle gange er videnskabsfolk ikke så videnskabelige i deres navngivning) og bruge disse meget specifikke kvantetilstande som en ressource til at realisere ikke-Cliffordgates. Magic states er selvfølgelig heller ikke lette at skabe, men der findes en metode, hvorved tilstande af højere og højere kvalitet kan destilleres ud fra en lille smule “magic” til at begynde med.



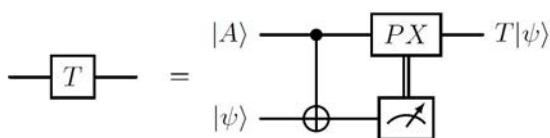
Et eksempel på en magic state er tilstanden

$$|A\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + e^{i\pi/4}|1\rangle),$$



**Figur 5.** To eksempler på ikke-Cliffordgates. T-gaten virker på en enkelt qubit og introducerer en faserotation på  $\pi/4$ . Toffoligaten er en controlled-controlled-NOT-gate, der flipper tilstanden for target-qubitten, hvis og kun hvis begge control-qubits er i tilstanden  $|1\rangle$ .

og med den til rådighed kan man med kredsløbet i figur 6 implementere en T-gate [13]: Først “mikses” qubit 1 i magic-tilstanden med qubit 2 i input tilstanden  $|\psi\rangle$  vha. en controlled-NOT-gate, og derefter udføres en måling på qubit 2. Hvis resultatet af målingen er 0 gøres ingenting, og hvis det er 1 udføres en kombineret  $PX$ -gate på den tilbageværende qubit. Resultatet er transformationen  $|\psi\rangle \rightarrow T|\psi\rangle$ .

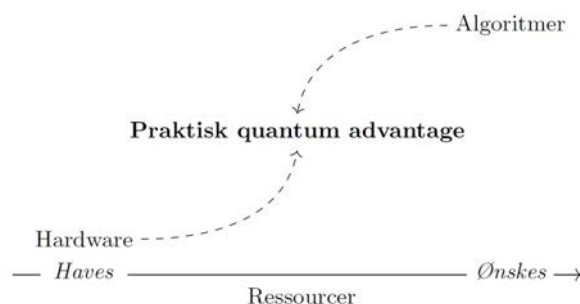


**Figur 6.** Med magic-tilstanden  $|A\rangle$  som ressource kan en T-gate realiseres på en qubit ved hjælp af et ækvivalent kredsløb.

## Quantum advantage

Lad os afslutningsvist vende blikket lidt udad. Som vi har set, så er den grundlæggende motivation for udviklingen af kvantecomputeren at tilvejebringe den hardware, der vil sætte os i stand til at afvikle kvantealgoritmer, som kan løse beregningsproblemer og simulationer, der er praktisk umulige at håndtere med klassiske computere. Det mål betegnes ofte som opnåelse af “quantum advantage”. Allerede i 2019 annoncerede Google Quantum AI at have nået den milepæl [17], men dog for et problem uden real praktisk anvendelighed. Og selvom der siden er blevet opnået lignende quantum advantage resultater på andre hardware-platforme, så har vi stadig til gode at se praktisk quantum advantage demonstreret utvetydigt. Hvornår det kommer til at ske er svært at gisne om, men vi nærmer os stødt gennem kombinationen af to parallelle udviklingsprocesser.

Hardwareudviklingen er den del, der oftest er størst bevågenhed omkring, og der annonceres hyppigt nye landvindinger på tværs af forskellige qubit-modaliteter (superledende transmons, ioner, neutrale atomer, spins, fotonik m.fl.), som hver har deres fordele og ulemper. Udviklingen i antallet af qubits er vokset støt og fideliteten af de gates der kan eksekveres er i nogle tilfælde så høj som 99,9955%. Mere interessant end blot at fylde flere qubits på kvanteprocessorerne er realiseringen af den første logiske qubit. Der skelnes mellem fysiske og logiske qubits, hvor førstnævnte er bruttoantallet af qubits, mens den logiske er en qubit, der er indkodet gennem et større antal fysiske qubits, og som via fejlkorrektion gøres robust over for dekohærens. Netop i den sammenhæng spiller ovennævnte *magic states* en helt afgørende rolle. Realiseringen af logiske qubits er en absolut forudsætning for at kunne køre komplekse kvantealgoritmer og opnå praktisk quantum advantage.



**Figur 7.** Den praktiske anvendelighed af kvantecomputeren er en kombination af modenheten af hardwaren og i hvilken grad algoritmerne formår at udnytte den tilgængelige hardware. Hardwaremodningen foregår relativt langsomt og vokser op fra bunden i takt med at nye teknologiske og mere skalerbare løsninger udvikles. På algoritmesiden findes løsninger med quantum advantage allerede, men de er hardwaremæssigt for ressourcekrævende til at have praktisk relevans. Men ressourcekravene reduceres hastigt i kraft af algoritmiske udviklinger, og det gør at de to udviklingsfronter af teknologien fra hver sin side nærmer sig det punkt, hvor praktisk quantum advantage bliver en realitet.

Den anden front af udviklingen er algoritmerne, og her sker der ligeledes hastige fremskridt. Der kommer hele tiden nye algoritmer til, og der har i de seneste år været et stort fokus på såkaldte variationelle kvantealgoritmer som *Variational Quantum Eigensolver* (VQE) [19] og *Quantum Approximate Optimization Algorithm* (QAOA) [18]. VQE er en hybridalgoritme, der kombinerer klassisk og kvantecomputing til at løse optimeringsproblemer, fx at bestemme grundtilstandsenergien for et molekyle. Givet en kvanteindkodning af cost-funktionen  $H$  og en parametriseret tilstandsfunktion  $|\psi(p)\rangle$  bestemmes forventningsværdien  $E = \langle\psi(p)|H|\psi(p)\rangle$  på kvantecomputeren og denne minimeres iterativt gennem klassisk optimering af parametrene  $p$  mellem hver evaluering af  $E$ . QAOA er ligeledes en hybrid iterativ algoritme, men er målrettet løsning af kombinatoriske optimeringsproblemer. Trods interessante og lovende anvendelser af de variationelle algoritmer, så er deres relevans nok af midlertidig

karakter og begrænset til den nuværende NISQ-æra, da de ikke kan levere den ønskede eksponentielle speed-up.

På sigt må man forvente, at fokus rykkes i retning af de kvantealgoritmer, der indtil videre er begrænset af manglen på logiske qubits, men har potentialet til at give en eksponentiel gevinst. Men også inden for den type algoritmer sker der nybrud, og det gør, at ressourcekravene til den kommende fejltolerante hardware hele tiden reduceres. Netop den optimering og modning af algoritmerne vil være helt afgørende for at fremrykke tidspunktet for opnåelsen af praktisk quantum advantage.

Ambitionen om at udvikle en kvantecomputer bliver ofte sammenlignet med Apolloprojektets “putting a man on the moon” målsætning, og der er da heller ingen tvivl om, at det er en virkelig krævende videnskabelig og teknologisk bedrift. Kvantecalgoritmerne er helt essentielle for projektets succes, og som vi har forsøgt at illustrere, så er der også på den front store ubesvarede spørgsmål. Men så meget desto mere grund er der til at fokusere på de hårde matematiske problemer – på at identificere og analysere dem, optimere de klassiske løsninger og presse udviklingen forbi nuværende heuristikker og brute force-metoder. Den indsigt er helt afgørende for at forstå, hvilke problemer eller delproblemer, der på sigt skal uddelegeres til kvanteprocessorer, og hvordan vi på sigt optimerer samspillet mellem klassisk high-performance computing og kvantecomputere.

En lille fun fact perspektivering: Dåseåbneren (patenteret af Ezra J. Warner i 1858) blev først udviklet 50 år efter konservesdåsen. Indtil da var den foretrukne løsningsmodel hammer og mejsel.

## Litteratur

- [1] A. Lovelace, fra [blogs.bodleian.ox.ac.uk/adalovelace/about-ada-lovelace/](https://blogs.bodleian.ox.ac.uk/adalovelace/about-ada-lovelace/) “Ada Lovelace – celebrating 200 years of a computer visionary,” Bodleian Libraries.
- [2] J. Preskill (2022) “The Physics of Quantum Information”, [arxiv.org/abs/2208.08064v1](https://arxiv.org/abs/2208.08064v1).
- [3] S. Aaronson (2013) “Quantum Computing since Democritus”, Cambridge University Press.
- [4] J. S. Bell (1964) “On the Einstein Podolsky Rosen paradox”, *Physics*, bind 1, side 195.
- [5] The Nobel Prize in Physics 2022, Popular science background, “How entanglement has become a powerful tool”. [www.nobelprize.org/uploads/2022/10/popular-physicsprize2022-3.pdf](https://www.nobelprize.org/uploads/2022/10/popular-physicsprize2022-3.pdf)
- [6] E. Bernstein og U. Vazirani (1997) “Quantum complexity theory”, *SIAM J. Comput.*, bind 26, side 1411–1473.
- [7] D. P. DiVincenzo (2000) “The physical implementation of quantum computation”, *Fortschritte der Physik: Progress of Physics*, bind 48, side 771.
- [8] R. Jozsa (1997) “Entanglement and quantum computation”, [arxiv.org/abs/quant-ph/9707034](https://arxiv.org/abs/quant-ph/9707034).
- [9] P. W. Shor (2001) “Introduction to quantum algorithms”, [arxiv.org/pdf/quant-ph/0005003.pdf](https://arxiv.org/pdf/quant-ph/0005003.pdf).
- [10] S. Aaronson (2007) “Shor, I’ll do it”, [scottaaronson.blog/?p=208](https://scottaaronson.blog/?p=208) (blogindlæg).
- [11] J. Preskill, “Lecture Notes for Physics 229: Quantum Computation”, [theory.caltech.edu/~preskill/ph229/notes/chap6.pdf](https://theory.caltech.edu/~preskill/ph229/notes/chap6.pdf).
- [12] R. Jozsa og N. Linden (2002) “On the role of entanglement in quantum computational speed-up”, [arxiv.org/pdf/quant-ph/0201143.pdf](https://arxiv.org/pdf/quant-ph/0201143.pdf).
- [13] M. A. Nielsen og I. L. Chuang (2000) “Quantum Computation and Quantum Information”, Cambridge University Press.
- [14] D. Gottesman (1998) “The Heisenberg representation of quantum computers”, [arxiv.org/pdf/quant-ph/9807006.pdf](https://arxiv.org/pdf/quant-ph/9807006.pdf).
- [15] S. Aaronson og D. Gottesman (2004) “Improved simulation of stabilizer circuits”, *Phys. Rev. Lett.*, bind 70, side 052328. [arxiv.org/abs/quant-ph/0406196](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0406196).
- [16] S. Aaronson, “Stabilizer Formalism”, [www.scottaaronson.com/qclec/28.pdf](https://www.scottaaronson.com/qclec/28.pdf) (forelæsningsnoter).
- [17] F. Arute m.fl. (2019) “Quantum supremacy using a programmable superconducting processor”, *Nature*, bind 574, side 505.
- [18] E. Farhi, J. Goldstone og S. Gutmann (2014) “A quantum approximate optimization algorithm”, [arxiv.org/abs/1411.4028](https://arxiv.org/abs/1411.4028).
- [19] A. Peruzzo m.fl. (2014) “A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor”, *Nature Commun.*, bind 5, side 4213, [arxiv.org/abs/1304.3061](https://arxiv.org/abs/1304.3061).



Ulrich Busk Hoff ph.d. i fysik og arbejder med udvikling og anvendelse af kvantealgoritmer som Quantum Engagement Specialist hos Kvantify. Han er desuden en ivrig videnskabsformidler.

# Ambitiøst kvantecomputerprogram etableres på Niels Bohr Institutet

Kim Splittorff og Marie Mathiesen, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Indenfor de sidste par år er interessen for kvanteteknologi rykket fra universiteterne og ud i det bredere samfund. Her i år har vi blandt andet for første gang fået en National Strategi for Kvanteteknologi i Danmark [1]. Strategien optegner en ambition om, at Danmark også i fremtiden har et af verdens førende kvanteforskningsmiljøer, samt at vi effektivt kan omsætte forskningen til ny, anvendelig viden. Regeringen tilfører i strategien betydelige midler til forskning, udvikling og opstart af nye virksomheder. Private erhvervsfonde bidrager også i høj grad til dette felt. I særdeleshed Novo Nordisk Fonden. I denne artikel vil vi fortælle om det nyetablerede og ambitiøse kvantecomputer flagskibsprogram på Niels Bohr Institutet: Novo Nordisk Foundation Quantum Computing Programme (NQCP).

## Mission

Missionen for NQCP er at muliggøre udviklingen af fejltolerant kvantecomputerhardware og kvantealgoritmer, der løser biovidenskabelige og kemiske problemer, der ellers ville være uløselige.

Programmet på Niels Bohr Institutet er et 12-årigt program, hvor vi nu står halvvejs inde i den 2-årige forberedelsesfase. Programmet ledes af professor Peter Krogstrup. Holdet af medarbejdere og tilknyttede studerende er i de sidste 10 måneder vokset fra 3 til 57, og vi arbejder hårdt på at få etableret de nødvendige forskningslaboratorier, kvantechipfabrikations- og karakteriseringsfaciliteter, datainfrastruktur og uddannelsesressourcer. Samtidigt er vi i fuld gang med at afsøge teoretiske modeller, samt nye anvendelser af kvantealgoritmer.

Det er en milliardbevilling fra Novo Nordisk Fonden, som understøtter programmet finansielt. Parallelt med forskningsprogrammet er der etableret en virksomhed, Quantum Foundry Copenhagen, der vil være specialiseret i at udvikle de kvantechips, som forskningscenteret har behov for. Quantum Foundry Copenhagen ejes af Novo Nordisk Fonden.

## Et hybridprogram, der kombinerer grundforskning og industriel udvikling

NQCP adskiller sig fra klassiske forskningsprogrammer ved at have en integreret ingeniørenhed i Quantum Foundry Copenhagen. Som det ses på figur 2, så er NQCP og Quantum Foundry Copenhagen to forskellige enheder, som arbejder i tæt partnerskab. Konstruktionen gør det muligt at balancere den fri forskning og åbenhed,

som karakteriserer universitetsprogrammer med den nødvendige beskyttelse af forretningshemmeligheder, som gør en virksomhed konkurrencedygtig.



Figur 2. NQCP og Quantum Foundry Copenhagen er to forskellige enheder, som arbejder i tæt partnerskab.

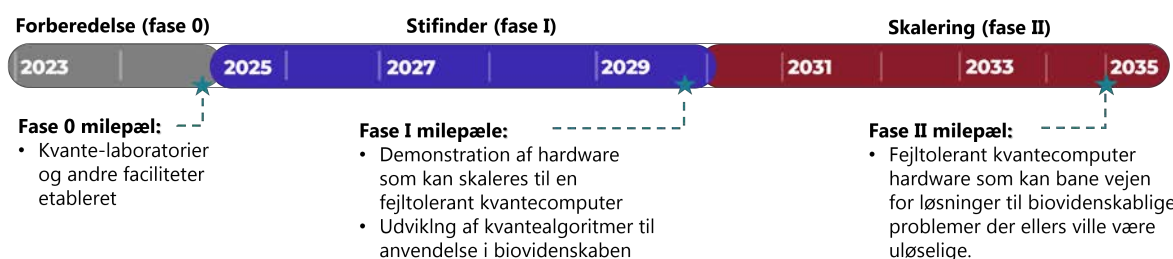
## Forskere og ingeniører arbejder side om side

NQCP-programmet ligger i krydsfeltet mellem den fundamentelle grundforskning, som i mange år er foregået og stadig stortrives på Niels Bohr Institutet, og teknologisk ingeniørdrevet udvikling. For at løse den enorme udfordring, som det er at bygge en fejltolerant kvantecomputer, er vekselvirkningen mellem forskningen og ingeniørarbejdet altafgørende. I programmet arbejder nanoingeniører derfor side om side med kvanteforskere.

## Arven fra Niels Bohr – Danmark som verdens (kvante-)navle

Kvanteteori opstod i miljøet omkring Niels Bohr og hans samarbejdspartnere. Derfor har vi i Danmark, og i særdeleshed på Niels Bohr Institutet, en særlig position i forhold til kvantemekanik. Det er et privilegie at arbejde videre på de teorier, som slog rod for over 100 år siden på Blegdamsvej.

## Kvantecomputerprogram med en 12 års tidslinje



Figur 1. Tidslinje for kvantecomputerprogrammet på NBI.



Men det danske fokus på kvant er ikke kun historisk. Der foregår løbende banebrydende forskning inden for kvantefeltet i Danmark, og som noget nyt kommer der nu hele tiden flere nytænkende danske kvantestartups til. Med NQCP-programmet håber vi også at bidrage til at løfte hele økosystemet i og omkring København.



**Figur 3.** NQCP er rykket ind i de historiske bygninger på Blegdamsvej på København.

### Netværk af satellitter og partnerskaber

Det er dog ikke kun i Danmark, at vi kan finde ud af at arbejde med kvanteteknologier. Verden rundt satses der strategisk på at være på forkant inden for kvanteteknologier. Dygtige forskere og ingeniører på tværs af lande arbejder hårdt på at nå frem til, hvordan vi kan bygge en fejltolerant kvantecomputer. I NQCP arbejder vi sammen med en nøje udvalgt skare af disse, der supplerer vores egen ekspertise. Vi har allerede etableret to formelle satellitter omkring universitetssamarbejde – én på DTU Electro og én på QuTech, Det Tekniske Universitet i Delft – og vi har adskillige flere i støbeskeen. Derudover har vi samarbejder med flere af de førende startups inden for kvanteteknologi.

### Fra forskningslaboratoriets ustabile og langsomme kvantecomputere til fejltolerante kvantecomputere

Allerede i dag findes der en del kvantecomputere rundt omkring i forskningslaboratorier og virksomheder; disse skal dog betragtes som prototyper. I artiklen “Men hvad er en kvantecomputer egentligt?” af Christian Steenberg Norre på side 3 i dette nummer af Kvant beskrives både, hvordan en kvantecomputer adskiller sig fra en klassisk computer, som vi kender den, og hvorfor det er udfordrende at konstruere en kvantecomputer, der effektivt kan løse virkelige problemer.

Inden for kvantecomputerfeltet refereres der til, at vi i øjeblikket befinder os i NISQ-æraen, hvilket står for “Noisy Intermediate Scale Quantum”. Denne betegnelse indikerer, at man ikke kan rette fejl i de nuværende kvantecomputere hurtigere, end de opstår. Med andre ord påvirkes de kvantebits, der anvendes, af forstyrrelser eller “støj” i en sådan grad, at computerne ikke kan udføre større beregninger fejlfrit.

Målet – og NQCPs mission – er at åbne døren til en ny æra, hvor det bliver muligt at konstruere hurtige og fejltolerante kvantecomputere. Det vil sige kvantecomputere, der både kan rette fejl, imens beregningerne

foretages, og gøre det med en hastighed, der gør det muligt at udføre beregninger indenfor en rimelig tid.

### Hvorfor en fejltolerant kvantecomputer?

Kvantecomputere kan potentielt være med til at løse nogle af de store samfundsmæssige udfordringer, fra klimaproblematikken til udviklingen af ny medicin.

Selvom vi på nuværende tidspunkt ikke har det fulde overblik over hvilke udfordringer, en kvantecomputer vil sætte os i stand til at løse, så har vi stærke formodninger om, at vi med en kvantecomputer kan simulere vigtige biorelevante kvantesystemer, som nutidens computerteknologi ikke er i stand til. Formodningen er motiveret af, at der eksisterer kvantealgoritmer, der i polynomiel tid løser opgaver, der på en klassisk computer kræver eksponentielt mange tidsskridt.

Faktisk er potentialet for at simulere komplekse kemiske systemer enormt med kvantecomputere og kan tilvejebringe en fundamentalt ny forståelse for problemer inden for naturvidenskaben og biologien. Disse problemer er af eksponentiel kompleksitet (hvis vi prøver at løse dem med en klassisk computer), netop fordi deres grundnatur er kvantemekanisk. Et eksempel er simulering af proteinfolding [2] hvorved man vil kunne forudsige et proteins tredimensionelle struktur. Dette vil være banebrydende for biologisk videnskab, og også for bioteknologien. Et andet eksempel er modellering af komplekse kemiske reaktioner, hvor antagelsen er at man med en kvantecomputer vil kunne “regne sig frem” til bedre materialer til fx batterier og til mere bæredygtige brændstoffer. Gennembrud, der vil have potentiale til at accelerere den grønne omstilling.

Hvis det store potentiale skal realiseres, kræver det at vi kan bygge en kvantecomputer, der kan gennemføre operationerne i en algoritme uden fejl og inden for en overskuelig tid. Det sidste betyder, at hvis en kvantealgoritme kræver  $N$  logiske operationer, så skal tiden, det tager for en logisk operation ( $t$ ), være kort nok til, at tiden, det tager for at løse problemet ( $N \times t$ ), er indenfor en “menneskelig” tid. De mest realistiske estimater for kvantealgoritmer af virkelige problemer forudsiger, at vi skal bruge mindst  $10^{12}$  logiske operationer for at løse et problem. Det vil sige, at de fejlkorrigerede operationer skal udføres på en tidsskala under  $10^{-6}$  sekunder for at kvantecomputeren kan gennemføre beregningen på ca. et døgn.

Så der skal nogle grundlæggende forskningsgennembrud, kombineret med ingeniørkunst på højeste niveau til, før vi kan nå målet. Dette vil kræve samarbejde koordineret på tværs af store teams med fælles fokus på at løse missionen om at muliggøre kvantecomputeren.

### Kvantecomputer-stakken fra kvantebit til applikation

Ligesom en klassisk computer består en kvantecomputer af forskellige dele, der dækker spændet fra kvantebits til det interface, som en bruger vil arbejde i. Figur 4 viser hvilke elementer, den tilsvarende grundstak i en kvantecomputer består af. I NQCP-programmet på Niels Bohr Institutet arbejder vi hen over hele stakken.



Figur 4. Kvantecomputerstakken.

### En kvantebit er ikke bare en kvantebit

Beregningerne i en kvantecomputer udføres af kvantebits. En kvantebit er et kvantesystem med to niveauer. De tre mest etablerede kvantesystemer man arbejder på for at realisere kvantebits er: superledende-, spin- og fotoniske kvantebits (som fx beskrevet i dette nummer af Kvant i artiklen "Sparrow Quantum sætter fotonerne fri" af Sofie Lindskov Hansen og Maria Genckel). Hver af de tre typer har forskellige fordele og ulemper, og på nuværende tidspunkt er det ikke klart hvilken type kvantebit, der vil kunne skaleres op til de mange tusind kvantebits, der kræves for at lave en fejltolerant kvantecomputer. Derfor forsker vi i NQCP-programmet i alle tre kvantebittyper. Vores mål er, at vi inden udgangen af 2029 ved nok til, at vi kan vurdere hvilken type (eller hvilke typer) af kvantebits, der egner sig bedst til at skalere op.

### Strengt krav til kvanteprocessor-chips

Udviklingen af halvledermicrochips til klassiske computere har gennemgået en rivende udvikling over de sidste 50 år, hvor industrien omkring fabrikationen af disse chips, som indgår i stort set alle elektroniske apparater i dag, nærmer sig en omsætning på en trillion dollar om året.

En af de primære drivkræfter for den fremdrift er en utrolig innovation i udviklingen af bedre udstyr og processer til at realisere mindre og mindre transistorer og dermed mere kraftige processorer. Kvalitetskravene til fejltolerante kvanteprocessorer er dog strengere, da kvantebits er mere fintfølede end bits, og derfor ser det ikke ud til, at man uden videre kan bruge den eksisterende industris udstyr til at bygge kvantebits. Kravene til atomar renhed og præcision er ganske enkelt højere, og derfor er en af grundstenene i NQCP/Quantum Foundry programmet at udvikle fabrikationsprocesser, der kan opfylde de krav, som kvantecomputere kræver for at skalere uden fejl.

Quantum Foundrys primære rolle bliver at udvikle udstyr, der skal gøre det muligt at bygge chips med

atomar præcision og en ultrahøj renhed, og på måder der vil gøre det muligt at bygge flere forskellige typer af kvante-platforme til "stifinder"-fasen.

Det skal ske i tæt samarbejde med forskerne i NQCP og samarbejdsgrupper, sådan at systemudviklingen er drevet af de specifikke krav til teknologierne. Indtil de nye fabrikationssystemer bliver udviklet, vil NQCP bygge kvantebits med konventionelle metoder, forfine dem og teste deres egenskaber såsom operation fidelitet og hastighed.

### Forskellen på algoritmer, som vi kender dem, og kvantealgoritmer

Som en konsekvens af at grundenheden, en kvantebit, i en kvantecomputer er helt anderledes end en bit i en klassisk computer, er de algoritmer, som kvantecomputeren skal køre, også fundamentalt anderledes end en klassisk algoritme. I en kvantealgoritme er selve beregningen en kvanteinterferens, der sker mellem de  $2^n$  tilstande, der er udspændt af  $n$ -kvantebits således at der er konstruktiv interferens omkring løsningen. Resultatet som den konstruktive interferens i kvantealgoritmen peger på, betyder, at en måling på de  $n$ -kvantebits med stor sandsynlighed vil være den løsning, man søger.

### Uddannelse af næste generation af kvantekyndige folk

Den kvanteteknologiske revolution, som NQCP er med til at realisere, vil med sikkerhed skabe et helt nyt kvantearbejdsmarked [3]. Det er tidligere her i Kvant blevet understreget, hvordan manglen på kvalificerede kvantehænder kan blive en flaskehals for udviklingen både nationalt og internationalt [4]. Også i dette perspektiv står Danmark stærkt: Vi er i Danmark det land, der uddanner flest kandidater pr. indbygger med en kandidatgrad inden for kvanteområdet [3], og der er her til sommer yderligere startet en ny kandidatuddannelse dedikeret til Quantum Information Science [5] på Københavns Universitet. Men der er allerede nu mangel på kvalificeret kvantearbejdskraft, og set i det 12-årige perspektiv, som vi opererer med i NQCP, er det afgørende også at tage med, at der er betydeligt mindre årgange på vej op gennem uddannelsessystemet. Det er en integreret del af NQCP-programmet også at adressere dette aspekt, og vi har allerede etableret flere nationale samarbejder bl.a. med de danske talentprogrammer. Desuden er vi i samarbejde med vores kollegaer fra de andre kvanteforskningsgrupper på Niels Bohr Institutet i fuld gang med at etablere et større kvantetræningslaboratorie, hvor de kommende generationer kan arbejde hands-on med den seneste kvanteteknologi [6]. Vi ser meget frem til at kunne åbne dørene for dette i løbet af det kommende år og har lovet Kvant-redaktionen, at vi vil beskrive dette undervisningsinitiativ i detaljer i forbindelse med åbningen.

### Danmarks fremtid vil blive præget af kvanteteknologien

Vi er ikke i tvivl om, at kvanteteknologien vil have stor indflydelse på vores allesammens fremtid, og at vi i Danmark har en unik mulighed for at være førende

indenfor området. Vores opgave er først og fremmest at bygge en fejltolerant kvantecomputer, men med til opgaven hører også, at vi skal løfte det potentiale, vi har arvet fra Niels Bohr og hans samarbejdspartnere, så vores kvantekosystem fortsætter med at understøtte banebrydende forskning, udvikling og samarbejder.

### Referencer og ressourcer

Programmets hjemmeside findes på hjemmesiden [nqcp.ku.dk](http://nqcp.ku.dk), hvor der også kan findes noter udarbejdet med henblik på undervisning i gymnasiet, se [nqcp.ku.dk/teaching](http://nqcp.ku.dk/teaching).

Alle er også velkomne til at følge med på vores LinkedIn profil: [www.linkedin.com/company/nnf-quantum-computing-programme-nqcp/](https://www.linkedin.com/company/nnf-quantum-computing-programme-nqcp/)

### Litteratur

- [1] Strategi for Kvanteteknologi: [ufm.dk/publikationer/2023/strategi-for-kvanteteknologi-del-1-forskning-og-innovation-i-verdensklasse](https://ufm.dk/publikationer/2023/strategi-for-kvanteteknologi-del-1-forskning-og-innovation-i-verdensklasse)
- [2] [www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/en-us/report/quantum-life-sciences](https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/en-us/report/quantum-life-sciences)
- [3] KPMG rapporten "Quantum technologies in Denmark": [kpmg.com/dk/en/home/insights/2020/11/quantum-technology-could-be-denmark-s-next-business-adventure.html](https://kpmg.com/dk/en/home/insights/2020/11/quantum-technology-could-be-denmark-s-next-business-adventure.html)
- [4] K. Splittorff (2022) "Kvanteteknologisk revolution – Den største udfordring er at uddanne nok", *Kvant*, bind 33, nr. 3, side 3–6.

[5] [studier.ku.dk/kandidat/kvanteinformationsvidenskab/](https://studier.ku.dk/kandidat/kvanteinformationsvidenskab/)

[6] [www.apmollerfonde.dk/nyheder/koebenhavns-universitet-faar-et-kvanteteknologisk-traeningslaboratorium/](https://www.apmollerfonde.dk/nyheder/koebenhavns-universitet-faar-et-kvanteteknologisk-traeningslaboratorium/)



*Kim Splittorff* er lektor ved Niels Bohr Institutet samt Head of Education & Outreach for NQCP.



*Marie Mathiesen* er specialkonsulent på NQCP, hvor hun arbejder med strategisk udvikling og partnerskaber.

## Laserkommunikation over 16 millioner km

*Christine Pepke Gunnarsson, Kvant*

**LASERFYSIK.** Det er lykkedes forskere fra NASA at skabe en kommunikationsforbindelse mellem Jorden og rumfartøjet Psyche, der befinder sig i rummet 16 millioner km væk fra os. NASAs DSOC (Deep Space Optical Communications) eksperiment er lykkedes med at sende data med en laser fra Psyche til Hubbleteleskopet ved Palomarobservatoriet i Californien i USA. Psyche, som er på vej mod Asteroidbæltet mellem Mars og Jupiter og sendte sin besked med en lasertransceiver som infrarødt lys. Det er første gang, at optisk kommunikation er blevet sendt og modtaget over en afstand i den størrelsesorden. Afstanden svarer til 40 gange afstanden mellem Månen og Jorden. På Jorden blev laserbeskeden modtaget, og forskerne var i stand til at sende data tilbage til Psyche, så de fik etableret en fuld kommunikationsforbindelse gennem rummet.

Kommunikation, som vi kender det på Jorden, foregår primært gennem optiske fiberkabler. Mellem Jorden og Psyche var kanalen rummet. Tidligere blev radiobølger anvendt til at kommunikere mellem rumfartøjer, men lys, særligt infrarødt lys, som har højere frekvenser, gør det muligt at sende kommunikation med en større båndbredde, så der kan overføres mere data

pr. tid. DSOC-eksperimentet vil gerne demonstrere data transmissions rater, der er 10–100 gange større end de radiofrekvenssystemer, som rumteknologien bruger i dag.

Det er afgørende for fremtidig kommunikation i rummet, at vi er i stand til at sende og modtage beskeder over lang afstand, især for planerne om at sende mennesker til Mars. Derfor vil Psyche, som skal flyve omkring Mars, sende flere beskeder for at forbedre laserkommunikationen og for at sikre, at den er så sikker og hurtig som det kræves. Det bliver dog sværere at kommunikere, jo længere væk Psyche befinder sig, da der skal kompenseres for den tid, det tager lyset at bevæge sig i rummet fra Psyche til Jorden. Da Psyche sendte sin første besked i november, tog det 50 sekunder for lyset at rejse til Jorden, men når Psyche når sit mål, vil det tage 20 min. I løbet af den tid vil både Psyche og Jorden have bevæget sig, så både afsender- og modtagerlaserne skal justeres for at tilpasse sig ændringen i lokationen.

Psycherumfartøjet blev opsendt den 13. oktober 2023 og er på vej mod en metalrig asteroide også ved navn Psyche, som befinder sig i Asteroidbæltet. Asteroiden er interessant, da forskere mener, at den er kernen af en tidligere planet og har været en af byggestenene i vores solsystem.

Kilde: NASA.



# Sparrow Quantum sætter fotonerne fri

Sofie Lindskov Hansen og Maria Genckel, Sparrow Quantum

Baseret på mere end 20 års erfaring fra forskning på Niels Bohr Institutet har Sparrow Quantum kommercialiseret verdens bedste enkelt-fotonkilde, som kan vise sig at blive en afgørende byggesten i udviklingen af ny kvanteteknologi. Denne artikel beskriver hvordan Sparrow teamet kontrollerer udsendelsen af lys ved hjælp af fotoniske krystaller, samt belyser de mange anvendelsesmuligheder af deres teknologi. For at få realiseret de mange potentialer af teknologien er det vigtigt at få den ud til så mange mennesker som muligt – universitetsforskere såvel som større firmaer.

## Fra underlig teori til vidunderlig teknologi

Kvantemekanik er den gren af fysikken, der beskæftiger sig med verden på atomar skala. Teorien blev udviklet i det 20. århundrede, og den har revolutioneret vores forståelse af den mikroskopiske verden. I kvantemekanik opfører partikler sig anderledes end det, vi er vant til i vores hverdag. De kan være flere steder på én gang, og deres tilstande beskrives ofte ved sandsynligheder i stedet for bestemte positioner og hastigheder. Vi siger at kvantepartikler kan være i en *superpositionstilstand*, og vi beskriver denne tilstand ved en bølgefunktion, hvor amplituden på bølgen er proportionel med sandsynligheden for at finde partiklen et givent sted. Derudover kan kvantepartikler være forbundet med hinanden på en måde der gør, at hvis jeg måler på den ene, så vil den anden partikel mærke det med det samme - også selvom de er rummeligt adskilt. Det kalder vi for *sammenfiltring*.

Den danske fysiker Niels Bohr havde mange diskussioner med Albert Einstein angående fortolkningen af den dengang nye teori om den atomare og subatomare verden. Deres diskussioner og tankeeksperimenter tilbage i 1920'erne og 1930'erne har haft en enorm indflydelse på vores forståelse af naturen. Og så har kvantemekanikken og de teknologiske muligheder den har givet os revolutioneret hele vores samfund. Lasere og transistorer er eksempler på teknologier der bygger på kvantemekanik, og uden disse ville vi ikke have hverken computere eller smartphones. Men kvantemekanikken er ikke færdig med at revolutionere vores samfund med teknologiske landvindinger. Vi står på tærsklen til det man kan kalde *den anden kvanterevolution* [1]. Den teknologi der muliggøres, når vi kan manipulere de allermindste byggesten i naturen, har potentiale til at løse nogle af de allerstørste udfordringer vores samfund står overfor i dag. Hvis vi kan bygge en *kvantecomputer* der bruger kvantemekaniske to-niveausystemer som bits, så kan vi udføre beregninger, man end ikke kan drømme om at udføre på selv de mest kraftfulde supercomputere, og det vil have stor betydning indenfor optimeringsopgaver, udvikling af personlig medicin og meget andet. Der er dog lang vej til at udfolde det enorme potentiale, som teknologien rummer. Det er nemlig ikke nemt at mani-

pulere og kontrollere kvantesystemer. De er ekstremt følsomme. Hvis de vekslevirker med omgivelserne så kolliderer bølgefunktionen, og systemet mister sine kvantemekaniske egenskaber. Så udfordringen ligger i at kontrollere og manipulere et system på en sådan måde, at systemet på intet tidspunkt føler, at det vekslevirker med sine omgivelser.



**Figur 1.** En Sparrow Quantum chip placeret ovenpå hullet i en 2-krone. På denne chip er der 400 små strukturer, der kan udsende og guide enkelte fotoner.

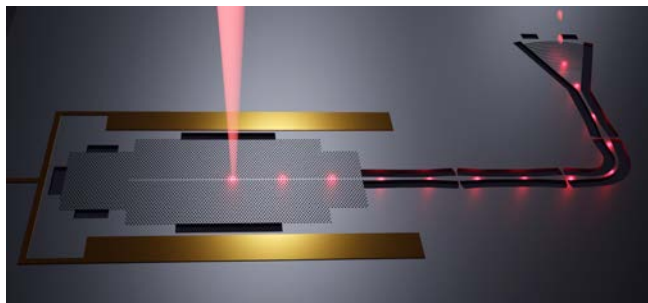
## Sparrows enkelt-fotonkilde

Hos Sparrow Quantum arbejder vi med at kontrollere udsendelsen af enkelte fotoner. En foton er slags udelelig lys-partikel, som indeholder den mindst mulige energi for en given bølgelængde. For at forstå hvor lille en energimængde vi snakker om, så tænk på at hvert sekund rammes dine øjne af omkring 1 milliard fotoner<sup>1</sup>. Så det at kunne kontrollere naturen ned på enkelt-fotonniveau er slet ikke så lige til, og der er blevet forsket i netop dette i professor Peter Lodahls kvantefotonik gruppe på Niels Bohr Institutet i mange år. Netop denne forskning er hjørnesteinen i Sparrow Quantum's teknologi. Tanken bag at kommercialisere en enkelt-fotonkilde er, at tage det vi er rigtig gode til, og stille det til rådighed for andre forskere og virksomheder, så de kan koncentrere sig om alle de vidunderlige ting, man kan bruge de enkelte fotoner til. På denne måde er vi med til at accelerere udviklingen af lysbaseret kvanteteknologi og sørge for, at forskere og virksomheder har de bedst

<sup>1</sup> Dette er et groft estimat baseret på mange antagelser. Følg dette link for udregningen: <https://medium.com/cortically-magnified/estimating-the-number-of-photons-that-hit-the-eye-c0208e7e0b64>

mulige forudsætninger for at gøre en forskel. Det vi sælger i Sparrow Quantum er en lille chip der udsender en strøm af enkelte fotoner når man skinner på den med en laser.

I selve chippen er der indlejret kunstige atomer, eller såkaldte kvantepunkter i et materiale som er specielt designet til at guide lyset. Kvantepunkterne har den egenskab at når de exciteres, så vil de henfalde tilbage til deres grundtilstand og i den proces udsendes der én og kun én foton. På figur 2 kan man se en fotonisk krystal hvori der sidder et lillebitte kvantepunkt. Kvantepunktet exciteres ved hjælp af laseren, og udsender derefter en strøm af enkelte fotoner som guides hen til en særligt gitter som sender fotonerne opad.



**Figur 2.** En fotonisk krystal med indlejrede kvantepunkter. En laserstråle fra toppen exciterer et kvantepunkt, hvorefter det udsender fotoner én ad gangen. De enkelte fotoner rejser langs en bølgeleder, indtil de bliver sendt opad af et specielt fremstillet gitter.

Herefter kan man koble fotonerne ind i en fiber, og herfra er der mange forskellige muligheder for, hvad man kan gøre med dem. Hos Sparrow Quantum er vi eksperter i at fremstille netop denne lille chip, der udsender enkelte fotoner, og vi sælger den til forskningsgrupper på universiteter og til andre virksomheder, der udvikler kvanteteknologi. På denne måde er vi med til at accelerere udviklingen af kvanteteknologi med lys ved at give forskere og virksomheder den bedst mulige teknologi, som de så kan anvende som delkomponent i deres forskning eller produktudvikling.

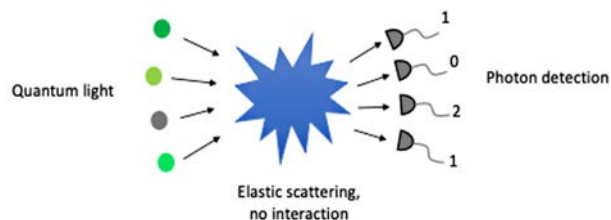
## Anvendelsesmuligheder

Enkelt-fotoner finder anvendelse i en række forskellige teknologier. Herunder vil vi nævne nogle af dem vi finder mest relevante og lovende.

Som vi nævnte i indledningen vil en computer baseret på kvantemekaniske bits eller såkaldte kvantebits have enorm stor betydning for vores samfund. Der forskes for fuld kraft verden over på mange forskellige måder for at udvikle kvantecomputere. Nogle vil bruge neutrale atomer; nogle forsker i at bruge superledende kredsløb, mens andre vil bruge ioner fanget i fælder. Men man kan også bruge fotoner som informationsbærere i en kvantecomputer. Du kan læse meget mere om lysbaserede kvantecomputere, og hvorfor det er så vigtigt at have en god, deterministisk enkelt-fotonkilde i artiklen “En lysbaseret kvantecomputer” af Carlos Faurby og Peter Lodahl i dette nummer af Kvant.

En undergruppe af kvantecomputere, der kaldes “Boson Samplere”, bruger også enkelt-fotoner. Boson

Samplere er mindre krævende at fremstille end universelle kvantecomputere, men deres anvendelser er også begrænset til nogle få typer af opgaver, og der forskes stadig i hvilke opgaver man med fordel kan løse med dem. Grundlæggende er Boson Sampling en metode til at forudsige resultatet af en måling med mange lyspartikler i mange mulige tilstande. Man fremstiller en Boson Sampler som vist på figur 3 ved at tage en masse enkelte fotoner og sende dem ind i et optisk netværk. På grund af fotonernes kvanteegenskaber vil det være ekstremt svært for selv de mest kraftfulde klassiske computere at forudsige hvor fotonerne kommer ud.

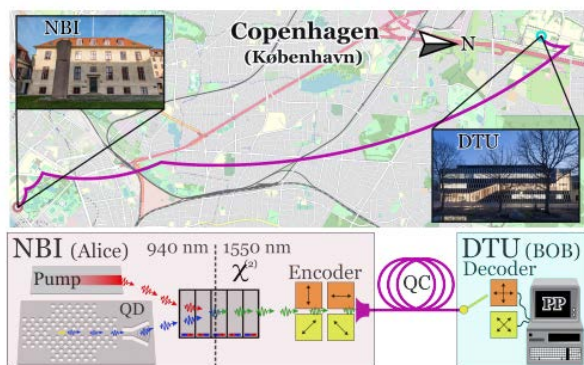


**Figur 3.** Sempel illustration af en Boson Sampler. Enkelte fotoner kommer ind fra venstre, vekselsviker i et optisk netværk (blå figur), og bliver detekteret på måleapparaterne til højre. Figuren er fra [2].

Boson sampling er interessant, fordi det er et problem, hvor kvantecomputeren vil have en meget stor fordel over klassiske computere, og derfor demonstrerer det, vi kalder “kvantefordel”. Men der er indenfor de sidste år dukket interessante mulige anvendelsesmuligheder op. Blandt andet har man fundet ud af, at man kan bruge Bosonsampling i graf-analyse [3], et matematisk problem hvor man undersøger hvordan forskellige enheder er forbundet. Det kan være relevant indenfor optimeringsopgaver indenfor logistik og indenfor molekylesimuleringer [2].

Ud over beregningsopgaver kan man også bruge enkelte fotoner til at forbinde kvantesystemer over store afstande og på denne måde lave et stort netværk - en slags kvanteinternet. Man kan også sende hemmelige eller krypterede beskeder ved hjælp af enkelte fotoner. Det kaldes for kvantekryptering, og benytter enkelte fotoner til at udveksle information mellem afsender og modtager på en måde der gør det fuldstændig umuligt for en tredje part at aflytte forbindelsen. I november 2022 sendte man en kvantekrypteret nøgle fra Niels Bohr Institutet (NBI) på Østerbro i København til Danmarks Tekniske Universitet (DTU) i Lyngby [4,5] – altså over en afstand på 18 km. Figur 4 viser afsender (NBI) og modtager (DTU). Figuren viser også hvordan enkelt-fotoner udsendes fra et kvantepunkt (QD), hvorefter fotonernes bølgelængde ændres<sup>2</sup> fra 940 nm til 1550 nm. Herefter sendes fotonerne igennem en “encoder” og så videre ind i en fiber (QC). Når fotonerne ankommer til Lyngby, bliver de undersøgt af en “decoder”, og der er etableret en hemmelig kode, som kun afsender og modtager kender. Ethvert forsøg på at aflytte forbindelsen vil blive opdaget med det samme, og aflytteren vil derfor ikke kunne få adgang til den hemmelige information.

<sup>2</sup>Bølgelængden ændres for at undgå at for mange fotoner forsvinder på vej fra NBI til Lyngby



**Figur 4.** Kortet viser et kvantekrypteret link mellem NBI og DTU, samt illustration af teknologien hos afsender såvel som modtager. Figur fra [2].

## Konklusion

Der er mange interessante anvendelsesmuligheder for enkelte fotoner – og listen er endnu længere end den vi er kommet ind på her, og den vil højst sandsynlig vokse sig længere og længere i takt med at forskningen på området intensiveres. En ting er i hvert fald sikkert; i Sparrow Quantum arbejder vi på at give så mange som muligt adgang til en enkelt-fotonkilde. En kilde, hvor fotonerne udsendes deterministisk og med meget høj effektivitet, hvilket er afgørende for at realisere de mange muligheder og tage dem fra de første gode ideer, der opstår på universiteterne, og ud i virksomhederne, hvor de kan blive opskaleret og optimeret til et niveau, hvor de virkelig kommer til at spille en transformativ rolle for vores samfund.

## Litteratur

- [1] P. Lodahl, K. Splittorf og A. S. Sørensen (2021) "På tærsklen til en ny kvanteteknologisk revolution", *KVANT*, bind 32, nr. 2, side 26–28.

- [2] I. Walmsley (2023) "Light in quantum computing and simulation: perspective", *Optica Quantum*, bind 1, side 35–40
- [3] J. M. Arrazola og T. R. Bromley (2018) "Using Gaussian Boson Sampling to Find Dense Subgraphs", *Phys. Rev. Lett.*, bind 121, side 030503.
- [4] M. Zahidy m.fl. (2023) "Quantum Key Distribution using Deterministic Single-Photon Sources over a Field-Installed Fibre Link", *arXiv*, ID: 2301.09399.
- [5] Kvant-nyheder (2022) "Kvantekrypteret forbindelse mellem NBI og DTU", *KVANT*, bind 33, nr. 4, side 34.



*Sofie Lindskov Hansen* er forretningsudvikler i Sparrow Quantum. Hun er ph.d. fra Peter Lodahls forskningsgruppe på Niels Bohr Institutet, hvor hun har arbejdet med enkelt-fotonkilder i mange år. Sofie er medlem af "The Young Academy of Technology, Science and Innovation" (YATSI) hvor hun arbejder med at styrke forbindelsen mellem universiteter og virksomheder.



*Maria Genckel* er Chief Marketing Officer i Sparrow Quantum. Hun er uddannet fra Copenhagen Business School indenfor økonomi og business administration. Maria mange års erfaring fra deep-tech-verdenen, hvor hun har arbejdet i både Danmark og USA, og så er hun en del af European Innovation Councils "Women Leadership Programme".

# Kvant-nyheder

*Christine Pepke Gunnarsson, Kvant*

## Andreas Mogensen filmer sjældne lyn fra rummet

**ATMOSFÆREFYSIK.** Det er lykkedes Andreas Mogensen, der befinder sig på den internationale rumstation ISS, at filme og tage billeder af lynfænomenerne med et særligt kamera udviklet på DTU Space. Kameraet har en høj tidsopløsning hvilket er nødvendigt for at kunne se og følge lynenes udvikling.

Det nye kamera fra DTU kaldet IniVation er et "event kamera", der kan tage op til 100.000 billeder i sekundet. Det er monteret oven på et almindeligt Nikon videokamera.

De sjældne fænomener røde feer og blå jets tilhører

gruppen af "Transient luminous events" (TLE), som beskriver flere forskellige typer lyn i den øvre atmosfære.

En rød fe er et kæmpelyn, der forekommer højt over tordenskyer i atmosfæren mellem 40–80 km over jordoverfladen. Røde feer er egentlig ikke lyn, men et koldt plasmafænomen, som skyldes en elektrisk udladning, der inducerer et lysende plasma, ligesom vi kender det fra neonrør.

Blå jets er omvendte lyn, som slår opad fra tordenskyen. Almindelige lyn, som vi kender dem på Jorden, slår nedad fra tordenskyen. Forskere mener, at blå jets bevæger sig opad mod rummet pga. en elektrisk ubalance i toppen af tordenskyen og at der her sker



en kortslutning i tordenskyen, som får lyngnisten til at bevæge sig opad. De blå jets bevæger sig med 360.000 km/timen.

Den flotte blå farve i de blå jets skyldes kvælstofmolekyler, som lynets elektroner exciterer, hvorefter de udsender lys. De røde feers farve skyldes også excitationer i kvælstofmolekyler, og stammer fra overgange ved højere bølgelængder, som giver rødt lys.

De blå jets opstår først, og næsten samtidig dannes de røde feer højere oppe i mesosfæren. Lynene er svære at observere, og de breder sig over store områder – i billedet nedenunder er den røde fe ca.  $14 \times 26$  km.



**Figur 1.** Lyn oplyser en sky, og i atmosfæren over lynet ses en rød fe i 40–80 kilometers højde. (Foto: Andreas Mogensen / DTU / ESA).

Andreas Mogensen finder lynene i samarbejde med bl.a. DMI, der giver vejrprognoser om, hvor og hvornår lynene kan opstå i atmosfæren i forhold til rumstationens placering.

Billederne af lynene skal hjælpe forskerne med at forstå, hvordan lyn påvirker atmosfærens sammensætning særligt i forhold til mængden af drivhusgasser i atmosfæren.

Kilder: DTU Space og videnskab.dk.

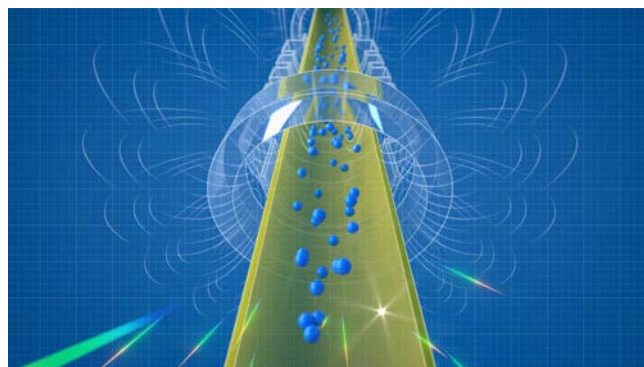
## Antistof falder (også) nedad

**ANTISTOF.** Antistof er et spejlbillede af stof, hvilket betyder, at det har de samme egenskaber: masse, levetid og spin som stof, men at ladningen og nogle kvantetal som fx pariteten (rumkoordinaterne) og tiden er modsat af stof. Lidt kompliceret kan vi forstille os, at antistof bevæger sig bagud i tid. Hver partikel i standardmodellen har en antipartikel, det meste kendte eksempel er nok positronen som er elektronens positivt ladede antipartikel.

Når stof og antistof mødes annihilere de, og der dannes lys, neutrinoer og ioniserende stråling. Fotoner (lyspartikler) kan omvendt kolliderer og danne et stof-antistof-partikelpar. Forskerne mener, at der i universet

er produceret lige meget stof og antistof, men at en asymmetri har gjort, at kun stof har overlevet i annihilationerne. Denne asymmetri er stadig et af de største mysterier i kosmologien.

Det har undret fysikere, om tyngdekraften ville virke på antistof på samme måde, som den virker på stof. Ifølge ækvivalensprincippet i Einsteins relativitetsteori vil tyngdekraften påvirke antistof på samme måde som stof og få det til at falde nedad på Jorden. Men det er muligt, at tyngdekraften virker anderledes på antistof. Hvordan tyngdekraften påvirker antistof, har forskere på CERN nu undersøgt i et forsøg kaldet ALPHA.



**Figur 3.** Tegningen viser, hvordan antibrint falder nedad i tyngdefeltet og annihilere i en magnetisk atomfælde.

Forsøget på CERN gik ud på at sende antiprotoner og positroner (antielektroner) ind i en lodret atomfælde, hvor de kan danne neutralt antihydrogen, når en positron bindes til en antiproton. Da antihydrogen, som hydrogen, har et magnetisk moment, kan det holdes fast i et magnetfelt. Det magnetiske moment er meget lille, så der er brug for stærke magnetfelter for at holde antihydrogen i fælden. Forskerne skruer herefter ned for magnetfeltstyrken og ser, hvilken vej antihydrogen bevæger sig. Når magnetfeltet skrues ned, bevæger antihydrogen sig og kolliderer med væggen i kammeret og annihilere med stof, og da der er flere detektorer i kammeret, kan forskerne måle, hvor annihilationen sker. Forskerne observerede, at det meste antihydrogen bevægede sig nedad præcis som det meste hydrogen gør det. De kunne derfor konkludere, at antihydrogenatomerne påvirkes af en attraktiv tyngdekraft mellem atomerne og Jorden, præcis som hydrogenatomer.

Det er vigtigt, at det er neutralt antistof, de laver eksperimentet med, da tyngdekraften er den svageste kraft og derfor svær at observere. Hvis stoffet er ladet, som fx antiprotoner alene, ville det påvirkes meget mere af de andre kræfter.

Forsøget er første skridt på vej mod præcisionsstudier af størrelsen af tyngdeaccelerationen mellem antistof og Jorden. Måske en dag deres forskning kan forklare asymmetrien mellem stof og antistof i Universet.

Kilde: E. K. Anderson m.fl. (2023) "Observation of the effect of gravity on the motion of antimatter", *Nature*, bind 621, side 716–722.

## Flere Kvant-nyheder

Der er flere nyheder side 28 i bladet.

# Peter Faber (1810-1877), teleteknisk foregangsmand og elsket sangskriver

*Ole Mørk Lauridsen*

Peter Faber er mest kendt for sin sangskrivning, som var formet af samtiden, men stadig synges flittigt i dag. Blandt de mest kendte er "Højt fra træets grønne top", "Sikken voldsom trængsel og alarm" samt "Den tapre Landsoldat". Men Faber var også uddannet som ingeniør og han blev en pionér indenfor dansk telegrafi.<sup>1</sup>

## 1850'erne var en brydningstid i Danmark

Danmarks Riges Grundlov af 5. juni 1849, givet af Frederik VII, hvor man dels afskaffede enevælden, dels forsøgte at inddrage hertugdømmerne i Staten Danmark med fælles grundlov, skabte grobund for megen utilfredshed i Slesvig og Holsten, der var økonomisk, teknisk og kulturelt mere udviklede end "Kongeriget Danmark" nord for Kongeåen. Den løbende udbygning af forbindelsen, mellem Nordsøen og Østersøen fra 1784 og frem til 1853, var et udtryk for den store økonomiske og industrielle udvikling som var på vej i Slesvig og Hertugdømmerne (Holsten og Lauenburg).

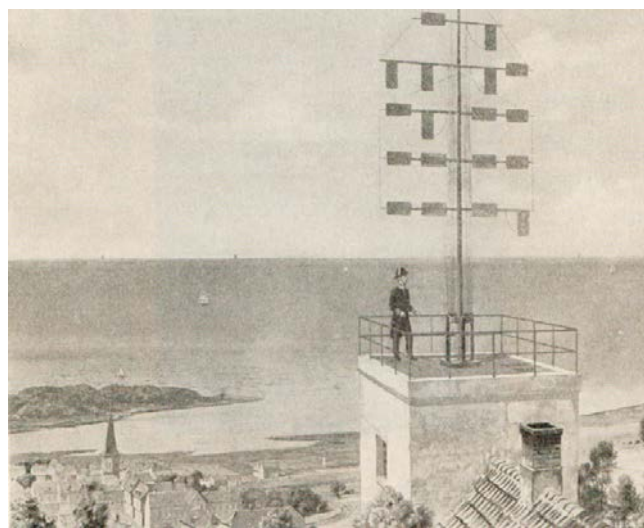


**Figur 1.** Peter Faber (1810–1877).

Åbningen af Danmarks første jernbane mellem Kiel og Altona i 1844 understregede også, at Danmark var fuldt bevidst om udviklingen i området, som gik hurtigt, og at den kunne være svær at styre fremover. Den 24. januar 1851 fik Holsten således en elektrisk telegraf (Wheatstone) langs banen, ejet af jernbaneselskabet, så den ikke kom til at tilhøre staten, da Danmark i 1852 genoprettede regeringen i området. Den netop vundne

1. Slesvigske Krig havde i 1851 skabt en falsk opfattelse af storhed i Danmark, men den klogere del af Riget forstod, at kun ved at stimulere handel og samarbejde mellem alle dele af "Helstaten" kunne man håbe på en forsat sammenhængende helstat bestående af Danmark, Holsten og Slesvig.

En bedre kommunikation mellem landsdelene syntes at være nødvendig for at holde sammen på Riget.



**Figur 2.** Den optiske telegraf ved Nyborg ca. 1850. Efter maleri på Post- og Telegrafmuseet.

## Øresundslinien

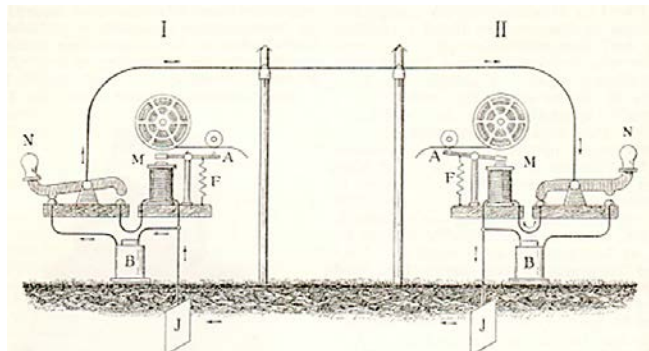
Den første danske telegraflinje blev Øresundslinien, stadfæstet af Kongen den 17. marts 1852, og var et forsøg på at knytte hele Danmark bedre sammen. Man havde siden ca. 1800 haft et optisk telegrafsystem af Chappés system, men det var langsomt og fungerede kun i klart vejr; ofte ankom ordonansryttere før telegrammerne.

I årene 1801–1862 drev posten den optiske telegraf. Man signalerede i kode mellem Korsør og Nyborg via Sprogø med træplader ophængt i høje stativer. I krigstid blev linien udvidet fra Helsingør til Slesvig. I klart vejr gik en kort besked gennem landet på en halv time. I dårligt vejr tog det op til tre dage at få ti ord over Storebælt.

Efter H. C. Ørsteds opdagelse af elektromagnetismen havde signalering med elektriske strømme udviklet sig fra Sömmerings elektrokemiske telegraf (1808) til Morses kombination af en effektiv kode, bestående af

<sup>1</sup> Artiklen er præsenteret den 5. december 2022 i HITEK hos IDA.

prikker og streger, kombineret med et registrerende modtagerapparat og en afsendernøgle. Den Amerikanske Kongres havde i 1843 bevilliget 30.000 dollars til en prøvelinje mellem Washington og Baltimore (1844). Werner Siemens opfandt Guttaperka-isoleringen i 1846, og i 1847 havde Preussen 300 Mil (1 Mil = 7.532 m) nedgravede telegraflinjer. På Europæisk plan var Wheatstones, Steinhells og Morses telegrafsystemer alle udbredte og udviklet til et kommercielt brugbart stade.



**Figur 3.** Skema for Morsetelegraforbindelse.

Militæret i Danmark var med i udviklingen og Premierløjtnant Vilhelm Lehmann (1817–1894), der var udnævnt til direktør for de militære telegrafer, foretog i 1851 en studierejse bl.a. til Preussen for at orientere sig om udviklingen inden for elektriske telegrafer.

### Peter Faber

Peter Faber blev født i 1810 som søn af en dygtig smed, han kom i det Westenske Institut og tog Artium herfra i 1827 og anden eksamen i 1830. Derefter den Polytekniske Læreanstalt, hvorfra han dimitterer i 1840 som kandidat i anvendt naturvidenskab. I 1841 flytter han ind på Borchs Collegium og er blevet inspektør på Læreanstalten. Samtidig forestår han en række af de offentlige fysiske- og kemiske demonstrationer i Selskabet for Naturlærens Udbredelse. I den forløbne tid er han blevet kendt som en elsket "fest-bror" og har skrevet et stort antal viser og forestillinger. Det kulminerer med Julesangen "Højt fra træets grønne top" og endelig "Den tapre Landsoldat", som han og Hornemann tildeles ridderkorset for i 1848. 1842–43 foretog han en udlandsrejse, støttet af den Reiersenske Fond og det Thottske Legat, hvor han særlig studerede galvanismen i industriens tjeneste, dvs. galvanoplastik. Hjemme igen gifter sig i 1844 med Frantzine Petrine Eibye, med hvem han gennem årene får fire sønner og tre døtre. Han udnævnes til fuldmægtig ved Mønten og 1845 til inspektør ved Polyteknisk Læreanstalt, justermester i 1851 for endelig i 1852 at blive konstitueret og i 1853 fastansat som Danmarks første telegrafdirektør. Regeringen er ikke i tvivl om at Faber, med sin store indsigt i elektrokemiske processer og som assistent for H. C. Ørsted, er den rette mand til jobbet. Dog skal der en del diskussion til, før man enes om en løn på 2000 Rigsdaler pr. år.

Hans gode humør og selvironi gør ham meget populær blandt venner og medarbejdere. Han skriver en sang eller et digt til enhver lejlighed; således også til åbningen af Danmarks første telegraflinje i 1854. Denne

var stadfæstet af kongen den 17. marts 1852 efter et projektoplæg hovedsagelig udført af Lehmann med stærk opbakning af finansminister Sponneck. Det fortæller sig i tågerne, hvorfor man valgte underjordiske guttaperka-isolerede 2 mm kobbertråd og med blyomsluttede kabler eftersom Lehmann selv ved besøgene i Preussen havde lært om disses problemer og flere eksperter, bl.a. H. C. Ørsted, havde anbefalet tråde på stangrækker. Ligeledes ser det ikke ud til, at Faber har haft nogen indflydelse på valget af teknologi i de indledende faser.

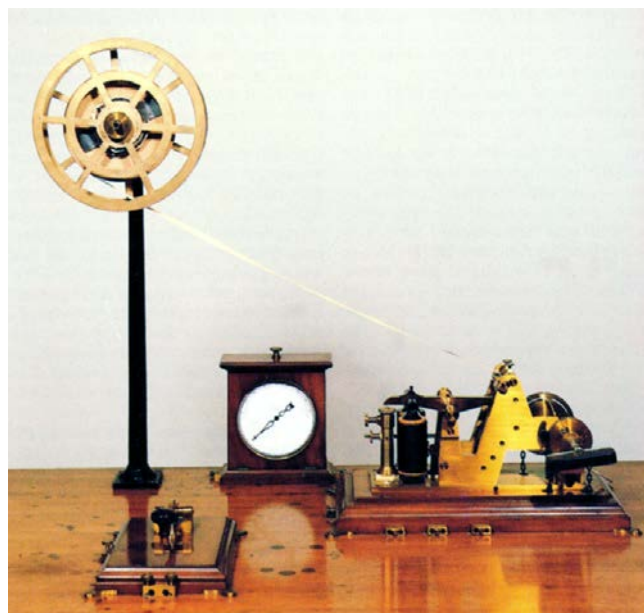
Den første elektromagnetiske telegraflinje i Danmark åbner i 1854 over strækningen Helsingør - København - Korsør - Sprogø - Nyborg - Fredericia - Flensburg - Rendsburg og Altona - Hamburg.



**Figur 4.** Søkabel og landkabel, 1854, Post- og Telegraf-museet.

### Anskaffelse af materiellet

Man havde været i kontakt med den amerikanske ingeniør Charles Robinson, som man ønskede skulle bygge hele linjen. Han blev imidlertid forvekslet med en i London boende Albert Robinson, og kontrakten blev ændret til kun at omfatte leveringen af materialer. Det drejede sig om 55 mil landkabel, 3½ mil søkabel (med tre adskilte ledere), 244 prøvekanister i støbejern samt 9 "Allanske" (Wheatstone) telegrafapparater, senere reduceret til 5, til en samlet pris af 18.580 pund. Dertil kom 14 "Morse-apparater", med loddrevet papirfremføring, der leveredes af "Mecanicus Lohmeier" i Hamburg. Hertil kom diverse måleudstyr. I alt beløb udgiften sig til 228.000 rigsbankdaler.



**Figur 5.** Det første telegrafbord, 1854.



## Bygningen af Øresundslinjen

Lehmann fik overdraget arbejdet med linjens etablering. Han gik i gang sommeren 1852, og til jordarbejdet hyredes fanger fra tugthusene (stokhusslaver), diverse "løse fugle" samt en del militært personale. Der blev opsat prøvekasser for hver ca. 2 km, og den 29. september var linjen klar mellem København og Helsingør. Faber, der var tiltrådt 1. september 1852, fik overdraget linjen og gik i gang med ansætte personale og øve dem og sig selv i at "morse" samt almindelig apparatbetjening. I slutningen af oktober var man nået til Halskov, og den 4. november fik man besked om, at søkablerne var forsinkede og først ville ankomme ultimo april 1853.

Da denne del af opgaven var løst, gik Lehmann hastigt videre fra København til Korsør over Fyn til Fredericia og videre sydpå gennem hertugdømmerne, og hele anlægget var gennemført i løbet af to år. Af problemer stødte projektet i første omgang kun på få. De genstridige embedsmænd i hertugdømmerne, som blev anset for tysksindede, blev flere steder anklaget for at modarbejde forehavendet. Men egentlige genvordigheder gav vel egentlig kun linjeføringen omkring Odense, hvor man kom i karambolage med de omfattende kommunale gravearbejder i forbindelse med etableringen af ledningsnet til den nye gas- og vandforsyning. Til gengæld gik nedlæggelsen af søkablet i bælteerne helt gnidningsfrit, og de kom til at fungere efter hensigten. Den ene af de to overskydende ledere i søkablerne blev sammen med de fem Allanske apparater anvendt af postvæsenet til at oprette telegrafstationer på begge sider af Lillebælt og Storebælt og Sprogø, således at afgangene af post (med både eller isbåde) blev telegraferet til modtagedestinationen i forvejen. Den tredje leder blev holdt i reserve, men blev senere brugt til at telegrafere den modsatte vej.

Med de undersøiske kabler kunne man bygge på de gode erfaringer, der var opnået med søkablet i Den engelske Kanal, som i flere år havde fungeret som et stabilt bindeled i telekommunikationen mellem England og Frankrig. Kun hvis uheldet var ude, når fartøjer ankrede op ved kablet og derefter fiskede det op, kunne der ske nedbrud på linjen, som så skulle splejse af dykkere på bunden. Indtil denne reparation kunne ske, måtte man fortsat lide på den optiske telegraf i kommunikationen over bælteerne.

Til gengæld skabte landanlægget hastigt voksende og stadig mere uoverskuelige problemer med utallige nedbrud på linjen og efterfølgende ledningstab. Det valgte isoleringsmateriale levede slet ikke op til forventningerne, og ved ethvert tab af ledeevnen i nettet måtte det underjordiske kabel graves op, før det kunne repareres og graves ned igen. Det anvendte loddevand, som blev brugt ved splejsningen, ødelagde den isolerende guttaperka, ligesom den megen op- og nedgravning påførte kablet et utal af nye skader, som hurtigt udviklede nye brud på linjen. For at undgå en opgravning af hele linjen ved ethvert ledningstab, havde man været så forudseende at indføre et system med nedsatte prøvekasser i støbejern for hver ca. 2 km, her blev kablet ført ind og lå blottet for isoleringen. På den måde kunne man måle sig frem til hver enkelt brud på

linjen og reparere det, uden at skulle grave mere end højst afstanden mellem to kasser af linjen op og ned igen hver gang.



**Figur 6.** Et eksemplar af den hærværksplagede prøvekasse, som givetvis har udgjort et forskrækkeligt syn og opskræmt mange forbipasserende på chauséen. Illustration fra C. Reiffenstein Hansen: "Tråden fra den røde Gaard", 1919.

En meget praktisk foranstaltning skulle man mene, når man nu ellers havde valgt en så upraktisk løsning fra starten, men publikum kunne af uransagelige årsager ikke lade disse målebokse være i fred. Prøvekasserne blev offer for så omfattende et hærværk, at ingeniørkaptajn Lehmann måtte foranledige Rigsdagen til at vedtage en ny straffelov "Angaaende Straffen for at beskadige de elektriske Telegraphindretninger" med op til tre måneders strengt fængsel som straf for bevidst at forøve hærværk mod disse.

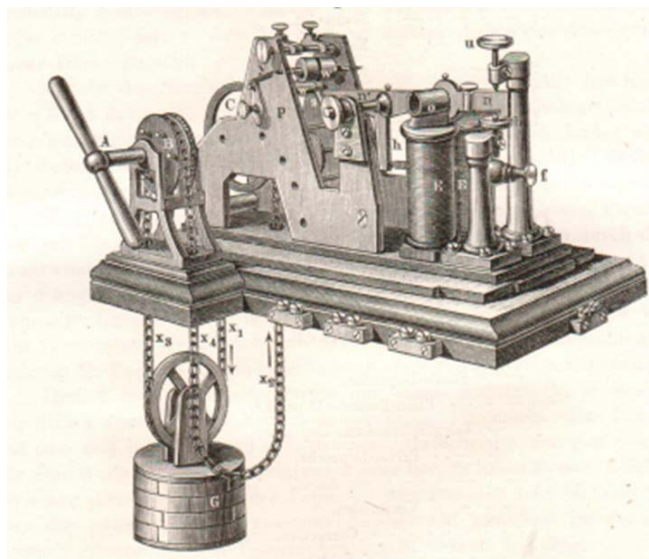
Endelig efter mange uheld, kunne linjen indvies den 2. februar 1854 med afsendelse af telegrammet:

Fra Øresund, hvor bøgen gror, til Elbens gule strande, en spinkel kobbertråd sig snor, trindt gennem hav og lande. At den os tanker tolke kan, derfor en dansk vi ære. Det værk til hæder for vort land og for vor konge være.

Det var Peter Faber, som læste digtet op, som han sikkert selv havde skrevet. Det var ikke bare åbningen af telegraflinjen, men også et vagtskifte, idet Peter Faber overtog ledelsen som telegrafdirektør.

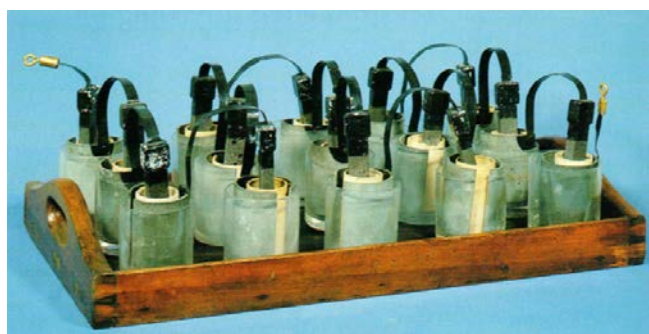
Den nye forordning mod sabotage forbedrede dog ikke situationen synderligt og efter to års forgæves anstrengelser med at få det underjordiske system til at

virke, kunne Peter Faber i en indberetning til ministeriet konstatere, at linjen mellem København og Korsør kun virkede "meget slet", mens linjen fra København til Helsingør overhovedet ikke var egnet til nogen form for drift længere.



Figur 7. Morseapparat.

Samtidig med, at linjen nåede frem til Altona, og dermed var blevet gennemført, opgav myndighederne fuldstændig den underjordiske linjeføring og påbegyndte i stedet etableringen af et overjordisk system, som var fuldt operationelt to år senere. Ingeniørkorpset afstod nok så klædeligt helt fra at deltage i arbejdet med den ny linjeføring. Ledelsen af projektet blev overdraget til Peter Faber, og selve arbejdet udført af civile entreprenører. Det var bare med høj cigar- og linjeføring baseret på den allerhøjeste grad af moral, og det virkede skam! Så var det slut med alt det "lehmannske bras", nu skulle skandalen ikke mere graves ned – hele affæren dækkede immervæk over en eklatant politisk bommert, som kostede statskassen rigtig dyrt, men arrieregarden forstod at holde stand, og hele gildet blev betalt med overskuddet fra Øresundstolden.



Figur 8. Billede af batterier.

### Materiellet

De første 14 Morseapparater fra Lohmeier prægede tegnene i en papirstrimmel, der blev fremdrevet af en rulle trukket af et lod. Trækmagneterne kunne ikke klare det arbejde på linjestrømmen, derfor anvendtes fra starten et telegrafrelæ. På senere Morseapparater fra

Siemens og Store Nordiske Telegraf blev papiret sværetet via en lille rulle, som dyppede i en farvet væske. Disse apparater kunne fungere uden relæ.

Batterierne var til at begynde med "sand-batterier", hvor en kobberplade og en zinkplade var stukket ned i en skål med sand fugtet med fortyndet svovlsyre. Sandbatterierne skulle "sættes om" hver uge, da der afsatte sig kobber på skålens inderside. Senere gik man over til Leclancé med zink, kul og brunsten.



Figur 9. Batterikælderen i hovedtelegrafstationen i Købmagergade omkring 1895, hvor Leclancé-elementerne skulle vedligeholdes.

### Telegrafen og Militæret

Op til 1862 var det Statstelegrafen, som etablerede telegrafi muligheder ved Dannevirke. Gennem hele den 2. Slesvigske krig, hvor hæren selv stod for forbindelsen fra skanserne til Statstelegrafens linje, var der derfor hurtig forbindelse til den danske regering i København. Et særligt historisk øjeblik udspiller sig i april 1864, hvor General de Meza fik telegraferet til København:

Efter at have sammenkaldt et Krigsraad igaar har Overkommandoen besluttet at opgive Dannevirkestillingen, forinden et forestaaende alvorligt Angreb udføres. Armeen marcherer i nat til Flensborg. Materiellet i Skanserne efterlades.



Figur 10. Dannevirke forlades.



Så snart telegrammet var afsendt, blev telegrafforbindelserne afbrudt ved sabelhug, og apparatet optaget. En indgriben fra Krigsministerens side var dermed udelukket. Apparat og morsenøgle var i mange år udstillet på Forsvarets Signaltekniske Skole i Fredericia.

Peter Faber fik selv et upåklageligt eftermæle både som digter og som telegrafdirektør. Den preussiske telegrafdirektør skamroste hans ledelse af det velfungerende danske telegrafsystem efter at de dele af det danske telegrafsystem, der lå i hertugdømmerne, var blevet annekteret af Preussen i 1865.

|                           | 1854  | 1863   |
|---------------------------|-------|--------|
| Antal stationer . . . . . | 9     | 83     |
| » apparater . . . . .     | 14    | 134    |
| » personale . . . . .     | 23    | 144    |
| » telegrammer . . . .     | 20043 | 222653 |
| Længden af linier i mil.  | 71.0  | 279.5  |
| » af ledn. i »            | 77.0  | 725.8  |

**Figur 11.** Oversigt over udviklingen 1854–1863.

Hele to artikler måtte der til i “Dansk biografisk Lexicon” for dækkende at beskrive hans omfattende virksomhed til gavn og glæde for hele den danske nation. Han beskrives som en til tider brysk, men også forstående og loyal chef, der altid bakkede op om sit personale og gav en hånd med ved telegrafbordet, når det kneb med ekspeditionen af telegrammer. Han var tilsyneladende med overalt og var kendt for sine utallige tilsyns- og inspektionsrejser rundt i landet. Det blev også hans skæbne til slut, da han blev fældet af sin uformelle dresscode:

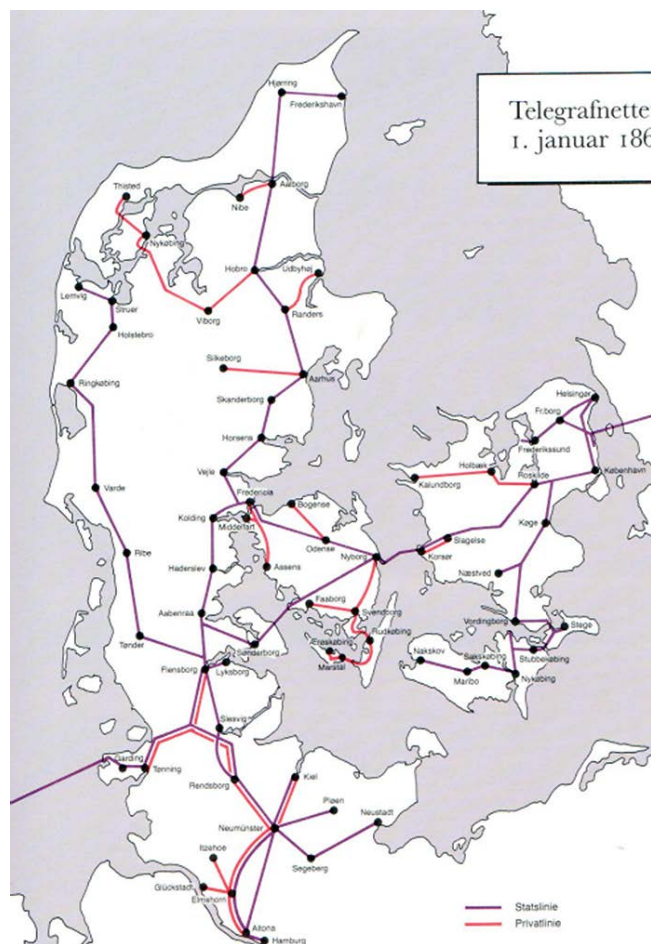
Vor Habit er mere nem – den er saadan  
ligefrem,

som han så spøjende havde digtet engang.

Mangen en punchebolle har Peter Faber beriget med sit nærvær og hans store vid fik mangt et afløb i de talrige poetiske syngespil. Sig selv skånedes han heller ikke, som han engang skrev om sig selv:

Ja, her er just en herlig Plads  
For mig og min Araber:  
Min Hedder “nok et glas”  
Og jeg – jeg hedder Faber.

På en inspektionsrejse til Aalborg i begyndelsen af april 1877 kom han afsted i sommerfrakken og vendte hjem til hovedstaden med en dobbeltsidig lungebetændelse, som selv ikke han kunne digte sig fra. Moralen er af det hele er vel den, at man bør være godt klædt på, når man sådan tager til Aalborg for at inspicere sine undergivne – også selvom ens habit er sådan ligefrem.



**Figur 12.** Telegrafnettet i Danmark 1864.

Ved Peter Fabers død i 1877 var ca. 300 personer ansat i telegrafvæsenet – telefonien var på vej (KTAS 1878). En del af telegrafvæsenets medarbejdere havde nu kundskaber i elektriske forhold som valg af komponenter, installation og måling af spænding og strøm, afledning og modstand; det hele med udgangspunkt i videnskabelig forståelse af elektricitet og dens muligheder. Det blev udgangspunkt for dannelsen af Store Nordiske Telegrafskab i 1869 og KTAS i 1878. Som bekendt præsenterede Edison de første brugbare glødelamper i 1879, i 1892 igangsattes Gothersgade Elværk, og herefter gik det bare slag i slag med elektricitetens anvendelse i det danske samfund.

## Efterskrift

Peter Faber havde sans for at gøre de rigtige ting og med sin videnskabelige forståelse af teknik og telegrajtjeneste blev han et lysende eksempel for sine medarbejdere, der altid kunne få hjælp fra ham. Han var fra en tid, hvor man anså det for klogt, at en leder havde kendskab og forståelse for det, han skulle lede. Peter Faber anskaffede til Telegrafvæsenet såvel: “A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field” af James Clerk Maxwell (1856), såvel som Schellens “Der elektromagnetische Telegraph” (1861) samt meget andet relevant elektroteknisk international litteratur. Det kom til at kendetegne det danske telegrafvæsen helt op til 1998, hvor Staten valgte at sælge TDC til udenlandske investorer, hvorefter teknisk og videnskabelig forståelse blev nedtonet i forhold til økonomi.





Peter har den Gren saa kær,  
hvorpaa Trommen hænger;  
hvergang han den kommer nær,  
vil han ikke længer.  
Hvad du ønsker, skal du faa,  
naar jeg blot tør stole paa,  
at du ej vil tromme,  
før min Sang er omme.

Anna hun har ingen Ro,  
før hun faar sin Pakke:  
fire Alen Merino  
til en Vinterfrakke.  
Barn! du bli'er mig alt for dyr;  
men da du saa propert syr,  
sparer vi det atter,  
ikke sandt, min Datter?

**Figur 13.** Peter Faber skrev i 1848 "Højt fra træets grønne top". Tegning af Ingvar 1938.



**Figur 14.** Peter Faber fotograferet af Peter Most. Det Kongelige Bibliotek.

Inden for Hær og Flåde samlede man alle elektriske aktiviteter, svag- som stærkstrøm, hos Sømnevæsenet på Orlogsværftet. Her havde man, belært af de ubrugelige søminer i Alssund i 1864 allerede i 1869 konstrueret systemer og minesystemer baseret på elektrisk fjernstyring via undervandskabler og vekslerborde. Her gentog

man princippet med en kyndig leder, idet cand.mag. Hanibal Jespersen ansattes som Sømningemester 1880–1904, hvorefter han grundlagde undervisningen i elektricitet på det nye teknikum i Prinsesse Charlottes gade. Han udgav "Elementær Elektroteknik" i 1902, som blev grundlaget for indførelse i elektricitet i hele Danmark. En tradition hans efterfølger, overelektroingeniør ved Orlogsværftet H. Sledermann, der bl.a. bidrog med indførelsen af radioteknik i Danmark, fortsatte med en ny udgave af bogen i 1917.

Peter Faber vil derfor stå som personen, der indførte anvendt elektroteknik i Danmark på et videnskabeligt grundlag i en tid hvor kemiske batterier var den dominerende elektriske kilde. Hans egen søn A. W. Faber (1847–1883) var assistent ved Statstelegrafen og slægtede sin far på og er også kendt som forfatter til sange og viser ("Sange for børn", med melodi af Hornemann, samt Librettoen "Spanske Studenter")

Peter Faber står derfor som "Urfaderen" til danske elektroingeniører.



Ole Mørk Lauritsen er cand.polyt. og medlem af SNU's direktion. Han er tidligere udviklingsdirektør i TDC.

# Tycho Brahe – breddeopgave 106 med didaktisk kommentar

Af Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, INM, RUC.

*Mit formål med artikelserien om breddeopgaver er – udover at gøre opmærksom på RUCs fysikuddannelse – dobbelt: Dels udvælger jeg opgaverne, så de kan have interesse som fysikproblemer i egen ret. Dels udvælger jeg dem med henblik på at kunne knytte didaktiske overvejelser til dem af interesse for fysikundervisere. I første omgang i forhold til universitetsundervisning. Men i anden omgang kunne der måske også trækkes paralleller til andre undervisningsniveauer.*

Her bringes løsning og kommentar til opgaven fra forrige nummer samt fire nye opgaver. Opgaven i sidste nummer af Kvant var denne (nr. 106 her i Kvant):

## Breddeopgave 106. Tycho Brahe

Tycho Brahe havde været død nogle år, da Galilei som den første tog kikkerten i brug ved astronomiske observationer. Tycho Brahes målinger blev udført ved hjælp af sigteinstrumenter og ved brug af det blotte øje. Hans målenøjagtighed var nogle få bueminutter. Er det muligt med hans metode at måle nøjagtigere end han gjorde? Begrund svaret.

### Løsning

Et bueminut er  $2\pi/(360 \cdot 60)$  rad  $\approx 3 \cdot 10^{-4}$  rad. Der er diffraktion af lyset ved passagen gennem øjets pupil. Grænsen for øjets opløsningsevne er derfor givet ved forholdet mellem bølgelængden af synligt lys (ca. 500 nm) og pupillens diameter (ca. 0,5 cm). Grænsen er ca.  $(500 \text{ nm} / 0,5 \text{ cm}) \text{ rad} = 10^{-4} \text{ rad} \approx 1$  bueminut. Tycho Brahes målinger var således i nærheden af det fysisk mulige med den målemetode han anvendte.

### Kommentar

Ved arbejdet med denne opgave sammen med de studerende på breddekurset plejede jeg, som de fleste andre fysiklærere ville gøre det, at omtale Tycho Brahes parallaksemålinger, hvis negative resultat førte ham til valget mellem:

Enten:

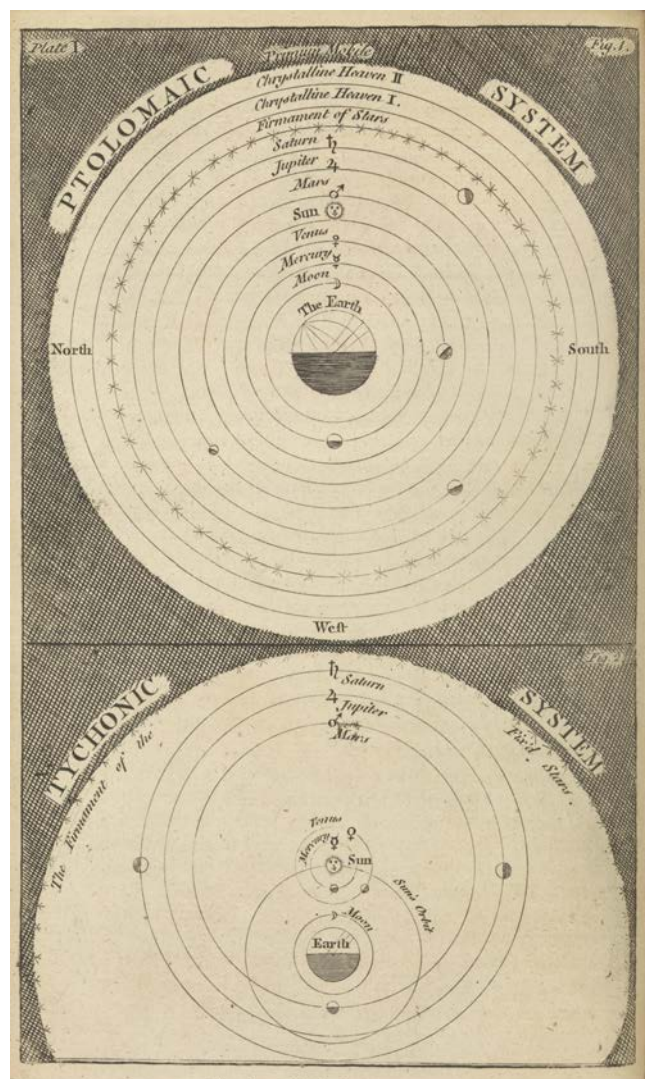
1. Jorden bevæger sig ikke i forhold til fiksstjernehimlen.

Eller:

2. Afstanden til den nærmeste stjerne er så langt væk, at dens parallakse ikke kan måles.

Som bekendt valgte Tycho Brahe den første frem for den anden mulige fortolkning af hans målinger ved at gå ind for et verdensbillede med Solen kredsende omkring en stillestående Jord og med de øvrige planeter i følgeskab med Solen kredsende omkring den. Fraværet af observeret parallakse til nærmeste stjerne betød med hans målenøjagtighed på få bueminutter, at et verdensbillede med Jorden i kredsløb omkring en stillestående Sol i forhold til fiksstjernehimlen ville

betyde en afstand til stjernen, der forekom ham absurd stor.



**Figur 1.** Tycho Brahes kompromis-verdensbillede (nederst) mellem det Ptolemæiske verdensbillede (øverst) og det Kopernikanske verdensbillede. Fra “The Young Gentleman and Lady’s Philosophy, in a Continued Survey of the Works of Nature and Art; By Way of Dialogue.” (1759) af Benjamin Martin (1705–1782) [Wikimedia Commons].

Tycho Brahe havde ret i enten/eller-konklusionen på sine målinger. Men han valgte jo galt mellem de to mulige valg. Parallaksen til den nærmeste stjerne vides nu at være ca. et buesekund. Altså meget mindre end Tycho



Brahes målenøjagtighed på få bueminutter. Der gik et par hundrede år efter Tycho Brahe, før den blev målt. Derfor blev der fx på Københavns Universitet i mere end hundrede år undervist i Tycho Brahes kompromis-verdensbillede mellem det Ptolemæiske verdensbillede og det Kopernikanske verdensbillede.

I Søren Kjørups og min bog "Om fysik", om fysikken i historisk og samfundsmæssig belysning [1] omtaler vi ikke Tycho Brahes verdensbillede. I det hele taget omtaler vi kun Tycho Brahe i en parentes som den, hvis målinger Kepler udviklede sine love ud fra. I bogens historiske gennemgang af fysikken fra Aristoteles til mikroelektronikrevolutionen, betegnelsen for IT revolutionen i 1983, var der ud af bogens 141 sider kun plads til knapt 5 sider om ændringen af forståelsen af "himlens fysik" under den videnskabelige revolution. Og de sider blev da næsten udelukkende brugt til at fokusere på skiftet fra det Ptolemæiske system til det Kopernikanske system.

Kontrasten mellem min og Søren Kjørups sparsomme omtale af Tycho Brahe i vores bog og min mere uddybende omtale af ham i sammenhæng med breddeopgaven er, synes jeg, et godt eksempel på en vanskelighed ved historieskrivning. I sammenhæng med fysikundervisning og i det hele taget. Historieskrivning er spændt ud mellem facts og tolkninger. Skrivningen kan gøres mere og mere facts-nær, jo mere der zoomes ind på detaljer i historiens gang. Medens skrivningen bliver mere og mere afhængig af redaktionelle tolkningsgreb, når der males med den brede pensel, hvor detaljer må vige i takt med stigende grad af fugleperspektiv. I "Om fysik"-bogen blev Tycho Brahes verdensbillede en detalje, der ikke var redaktionel plads til. Hvorimod præsentationer af hans verdensbillede, som et skridt på vejen mellem det Ptolemæiske og det Kopernikanske, i sammenhæng med breddeopgaven her, dels har gjort undervisningen mere levende, dels bidraget til de studerendes opmærksomhed på, at fysik ikke er faldet ned fra himlen som stentavler.

Det er som ved tegning af geografiske kort. Jo større område kortet skal dække, jo flere detaljer forsvinder. Styret af formålet med kortet. I "Om fysik"-bogen er gennemgangen af "Fysikken i Historien" opdelt efter perioderne, Den videnskabelige revolution, Den industrielle revolution og Den videnskabeligt-industrielle revolution, til belysning af fysikkens udvikling som del af den bredere historiske udvikling af sammenhængen mellem videnskab, teknologi og samfund. Til belysning heraf fandt vi ikke plads til Tycho Brahe. Men i en bog om fx fysikkens bidrag til udviklingen af en videnskabelig kultur for metodisk dataindsamling, til forskel fra enkeltstående anekdotisk viden, ville han derimod skulle have en hovedrolle, hvor ovenstående kommentering af breddeopgaven kunne indgå.

Videnskabshistorikere er undertiden frustrerede over historiske myter i fysiklærebøger og blandt os fysikundervisere. Det forstår jeg godt. Alligevel synes jeg ikke, at vi skal holde os tilbage fra at kaste historisk lys på de fysikemner, vi underviser i, selvom vi ikke er

videnskabshistorikere. Selvfølgelig skal vi så vidt muligt holde øje med ikke at levere fejlagtige facts om fysikkens historie. Men på trods af risikoen for at formidle myter skal vi turde bruge fysikhistorien i undervisningen som bidrag til at give elever og studerende oplevelsen af fysik som en levende menneskelig og samfundsmæssig aktivitet. I forordet til "Om fysik"-bogen skrev vi: "Dette er ikke en fysikbog eller en indføring i fysikkens historie, men netop en bog om fysik. Bogen præsenterer et synspunkt på hvad fysik er og på sammenhængen mellem fysik og samfund i et historisk perspektiv." I dag tænker jeg, om ikke også historikere præsenterer synspunkter?

### Breddeopgave 107, 108, 109 og 110. Boltzmannfaktoren

Inden næste nummer af Kvant udkommer, kan læserne eventuelt overveje løsningerne til disse fire opgaver fra breddekurset på RUC (fra eksamen august 2013, eksamen juni 2014, eksamen juni 1992 og eksamen juni 1987, nr. 107, 108, 109 og 110 i rækken her i Kvant):

*Magnetiske såkaldte enkeltomænepartikler til data-lagring har typisk en foretrukken akse, hvor energien er mindst ved magnetisering i de to retninger langs aksen. Det kræver større energi proportionalt med partiklernes volumen at magnetisere dem på tværs af aksen. Hvordan afhænger den tid, man kan regne datalagringen for uforstyrret af termiske fluktuationer, af partiklernes volumen? Begrund svaret.*

*Båndgabets i isolatorer er større end i halvledere. Men ikke størrelsesordenen større. Hvoraf kommer det da, at de specifikke ledningsevner for isolatorer og halvledere afviger mange størrelsesordener fra hinanden? Begrund svaret.*

*Mættede dampes tryk over en væske øges typisk med temperaturen proportionalt med  $\exp(-T_0/T)$ . Forklar dette og angiv hvad  $T_0$  afhænger af.*

*Erfaringsmæssigt varierer viskositeten af væsker typisk som  $\exp(+T_0/T)$  ( $T_0$  er en konstant). Virker det rimeligt ud fra et mikroperspektiv? Begrund svaret.*

Løsninger og kommentar bringes i næste nummer af Kvant.

### Litteratur

- [1] J. H. Jensen og Søren Kjørup (1983) "Om Fysik 1", Hans Reitzels Forlag, København.

### KIF-prisen 2023

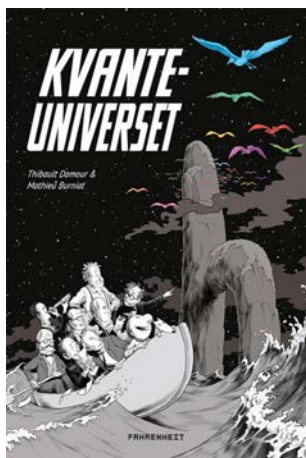
Kvinder i Fysik (KIF) har i år uddelt KIF-prisen for 2023 til Amalie Stokholm. Læs mere på side 43 samt hele interviewet med Amalie på Kvinder i Fysiks hjemmeside: [kvinderifysik.dk/2023/11/13/interview-with-kif-prize-winner-2023-amalie-stokholm/](https://kvinderifysik.dk/2023/11/13/interview-with-kif-prize-winner-2023-amalie-stokholm/)



# Aktuelle bøger

Michael Cramer Andersen, *Kvant*

## Kvanteuniverset



Thibault Damour og Mathieu Burniat, "Kvanteuniverset", 2023, Fahrenheit, 168 sider, 248 kr., Oversat af Poul Henrik Damgaard.

Tegneserier om fysik og andre videnskaber bliver mere og mere populære. Hvis det gøres ordentligt, er det en god måde at formidle videnskab på. Tegneserien "Kvanteuniverset" er forfattet af den franske fysiker Thibault Damour og tegnet af Mathieu Burniat, og den udkom på fransk i 2016. Bogen udkommer nu i dansk oversættelse af teoretisk fysiker Poul Henrik Damgaard.

Kvanteuniverset er en historie om kvantefysik fortalt af forskerne, der udviklede teorien, til et par gennemgående hovedpersoner – eventyreren Pierre og hans talende hund Fax. De oplever de utroligste ting, og inspirationen fra Tintin og Terry er slående.

I begyndelsen dør hunden Fax ved et meteornedfald på en mission til Månen, og Pierre mister livsmodet. Den nu udstoppede hund står på kaminen, og den begynder at tale til Pierre. Hunden fortæller, at Pierre skal løse det største mysterium af alle – et mysterium, som vil vende op og ned på hans opfattelse af virkeligheden. Det er kvanteverdenen, hvor vi ved fra paradokset om Schrødingers kat, at grænsen mellem liv og død ikke er så skarp. Pierre går til en konference om kvantefysik for at blive klogere på emnet. Under et af foredragene bliver han suget ind i stolen og kommer til en parallelverden. Her møder han først Max Planck, som forklarer om oscillatorer i varme legemer og betydningen af strålingskvantet. Pludselig springer Plancks konstant  $h$  ud af et bål. Pierre følger efter det skinnende  $h$  og møder Einstein, der forklarer interferensen i et dobbeltspalteeksperiment med vand og Bohrs atommodel. Derefter fører  $h$ 'et vores helt til Louis de Broglie, der forklarer sine elektronbølger, der guider elektronen. Pierre vil gerne lære mere og finder Werner Heisenberg på øen Helgoland, og på vejen genforenes han med hunden Fax. Heisenberg har lige opdaget matrixmekanikken, som han beskriver ved

nogle uendelige og abstrakte talskemaer. Pierre føres videre til Erwin Schrødingers, der forklarer hvordan hans bølgeligning ser ud og at den beskriver elektroners opførsel.



Pierre og Fax og Schrødingers mødes nu med Einstein, Bohr, Born og Heisenberg til en diskussion om kvantefysikkens syn på virkeligheden. Der opstår uenighed, da Pierre stiller kritiske spørgsmål. Bohr forklarer om komplementaritet og at der ikke findes én objektiv virkelighed. Man kan kun sige noget om det man måler. Einstein kritiserer Schrødingers bølgefunktion for kun at give en sløret beskrivelse af objekter i den makroskopiske verden. Pierre og Fax bliver nu sendt ud i fremtiden og møder Hugh Everett. Han demonstrerer paradokset med Schrødingers kat i en kasse med gift, der udløses af et radioaktivt henfald, men med Fax i kassen. Efter 5 minutter ser Fax ud til både at være levende og død. Everett fortæller, at Fax er i en reel superposition af at være død og levende, men at tilstandene afhænger af omgivelserne, hvem der observerer og virkeligheden opsplitter hele tiden i flere parallelle verdener med forskellig sandsynlighed. Pierre hvirvles ind i en parallel virkelighed og kommer tilbage til den skæbnesvangre mission på Månen. Meteoren styrer mod vores to helte, men denne gang bliver udfaldet et andet.

I bogens appendiks er der korte biografier af de medvirkende fysikere og uddybende forklaringer af nogle af de begreber, der berøres. Det er et godt supplement til læsningen bagefter og kan måske inspirere til videre studier.

Det er en meget spændende historie og en pædagogisk beskrivelse af kvantefysikkens abstrakte begrebsverden. Det fungerer godt, at ophavsmændene til ideerne selv forklarer begreberne. Selve historien er meget surrealistisk, og det er nok svært at undgå med et emne som dette. Tegneren har formået at illustrere de ting, der kan illustreres fx elektronbølger og sandsynligheder ganske glimrende. De parallelle verdener illustreres ved tegninger i forskellige farver, der overlejrer hinanden. Med denne viden får man et ekstra udbytte ved anden gennemlæsning, hvor man bemærker identiske fugle, insekter eller fisk der er fremhævet i forskellige farver i de i øvrigt sort-hvide tegninger.

Målgruppen er alle der er interesserede i tegneserier og videnskab i aldersgruppen fra folkeskolens ældste klasser og op.

# Dansk Fysisk Selskabs årsmøde 2023

Maren Malling

Dansk Fysisk Selskabs årsmøde 2023 blev afholdt på Hotel Nyborg Strand den 13. og 14. november og havde tæt på 100 deltagere. Årsmødet er en mangeårig tradition, som bl.a. har til formål at samle fysikere fra hele landet og give deltagerne mulighed for at høre, hvad der rører sig inden for fysikforskning og undervisning i Danmark. Et særligt fokuspunkt for årsmødet er at give mulighed for, at studerende og yngre forskere kan få erfaring med at præsentere deres projekter til fagfæller i en større forsamling, og i år var ingen undtagelse. En række dygtige, unge fysikere gav korte mundtlige præsentationer i de tematiske parallel-sessioner med emner som partikelfysik, medicinsk fysik, computerfysik, eksperimentelle metoder, quantum light-matter interactions og ultrahurtig fysisk kemi med røntgenlasere.

Om aftenen deltog mange unge forskere og studerende i den traditionelle postersession, hvor de levende fortalte om deres forskning. Prisen for bedste posterpræsentation gik til Simon Peter Slot Jessen fra Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet, for hans poster "Can CdSe nanoplatelets improve the time resolution of PET scanners?". Andenpræmien gik til Michael Iversen, også fra Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet for hans poster "Combining Many-body Localization and Quantum Many-body Scars". Stort tillykke til de to vindere, og mange tak til posterkomiteen bestående af Jørgen Schou (tidligere formand for DFS og seniorforsker emeritus på DTU), Bjarke Jørgensen (Head of Research hos Newtec Engineering A/S) og Josefine Robl (Erhvervs-ph.d. hos Kvantify og ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet).



**Figur 1.** Manuel Meyer fra Syddansk Universitet fortæller om arbejdet med at påvise de hypotetiske elementarpartikler axioner eller axion-lignende partikler.

På mødet blev desuden uddelt KIF-prisen 2023, som gik til Amalie Stokholm, postdoc ved University of Birmingham i Storbritannien. Læs mere om Amalie på næste side.

Den første keynote-præsentation blev holdt af professor Dorte Dahl-Jensen fra Centre for Earth Observation Sciences, University of Manitoba, Canada, og Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet, som levende fortalte om sin banebrydende forskning og viste filmklip fra iskerneboringer på Grønland i et foredrag med titlen "Greenland Ice Cores Tell Tales on Past Sea Level Contributions". Professor Marco van Leeuwen fra the National Institute for Subatomic Physics (NIKHEF) i Amsterdam startede andendagen med et fascinerende indblik i forskningen ved ALICE-eksperimentet ved CERN med foredraget "Understanding the Quark-Gluon Plasma with ALICE at the LHC". Endelig gav lektor Manuel Meyer fra Institut for Fysik, Kemi og Farmaci, Syddansk Universitet, et spændende foredrag om sin forskning, hvor han som en del af et internationalt team forsøger at påvise de hypotetiske elementarpartikler axioner eller axion-lignende partikler. Foredragets titel var "Light on the Other Side of the Wall: A New Era for the Search of Axions and Axion-like Particles".

Som noget nyt var der i år programlagt en diskussionssession efter middagen med temaet "Energy for the Future". Gorm Bruun Andresen, lektor ved Aarhus Universitet, og Hans Peter Beck, professor ved Berns Universitet, fremlagde hver deres synspunkter i forhold til vedvarende energikilder vs. atomkraft som løsningen på verdens energibehov, hvilket førte til en livlig diskussion om dette vigtige emne, hvor der også blev svaret på spørgsmål fra salen.



**Figur 2.** Debat om fremtidens energiforsyning. Gorm Bruun Andresen fra Aarhus Universitet er på talerstolen, mens Hans Peter Beck fra Berns Universitet lytter på.

Stor tak til alle deltagerne, som var med til at gøre årsmødet 2023 levende og inspirerende. Til sidst skal også lyde en stor tak til sponsorerne af årsmødet for deres generøse støtte, som gjorde det muligt at afholde denne vigtige begivenhed: Ticra, DFM – Danmarks Nationale Metrologiinstitut, Vacpro, JJ X-Ray, Kvantify, Newtec Engineering A/S og DSMF – Dansk Selskab for Medicinsk Fysik.



## Ørstedmedaljen i bronze

Selskabet for Naturlærens Udbredelse (SNU) tildelte den 4. december 2023 H. C. Ørstedmedaljen i bronze for fremragende formidling af naturvidenskab til lektor Nicolai Bogø Stabell, H.C. Ørsted Gymnasiet i Lyngby. Med medaljen og æren følger et rejselegat på 25.000 kroner samt 50.000 kroner til et projekt på H. C. Ørsted Gymnasiet sponsoreret af energiselskabet Ørsted.



**Figur 1.** Lektor Nicolai Bogø Stabell (i midten med diplom og medalje) omgivet af flere af hans nuværende og tidligere studerende samt SNUs præsident Anja C. Andersen (yderst t.v.). Foto: Anne Mette Mosekjær Søndergaard.

Nicolai Bogø Stabell har siden 2015 været ansat på H.C. Ørsted Gymnasiet i Lyngby, hvor han underviser i kemi. Nicolai er en fremragende lærer, der har en evne til at engagere sig personligt og skabe et unikt undervisningsmiljø. Han formår at opnå et højt fagligt niveau hos sine elever, samtidig med at bidrage til inklusion af elever med særlige behov. Dette er sket under det særlige SPS-program i en række tekniske og naturvidenskabelige fag. Her bruger han i høj grad sine erfaringer fra sin egen tid som en både ordblind og talentfuld elev, hvilket har givet ham indsigt i de udfordringer og behov, som disse elever står overfor.

Nicolai har skabt "Scienceholdet", hvor elever bliver undervist i at formidle naturvidenskab og kendskab til STEM-uddannelser på folkeskoler og ved åbent hus-arrangementer. Ved sin ansættelse grundlagde Nicolai pilotprojektet Kemi-OL Træningsholdet med det formål at støtte og vejlede elever, der ønsker at deltage i Kemiolympiaden. Holdet har siden haft betydelig succes og gennem årene opnået bemærkelsesværdigt gode resultater. Nicolai har også etableret et Turbo Kemi A-forløb med mulighed for, at elever kan gennemføre kemi A-pensum på ét år, og han har skabt forbindelse til DTU, så disse elever kan optjene ECTS-point på DTU Kemi. Han fungerer som rådgiver for projekter vedrørende "Unge Forskere"-konkurrencen, han er aktiv i arbejdsgruppen Science City i Lyngby med BRO-bygning lokalt, og han rådgiver og bidrager til Novo Nordisk Fondens initiativer inden for LIFE. Også internationalt gør Nicolai sig bemærket, idet han er medstifter af en forening for deltagere i kemiolympiader, CODS, som fremmer de unges interesse for kemi.

*Cecilie Pedersen*

## KIF-prisen 2023

KIF-prisen er en hæderspris, der uddeles årligt for at synliggøre kvindelige fysikere som rollemodeller såvel på universiteter og gymnasier som i samfund og erhvervsliv. Prisen blev uddelt ved årsmødet for Dansk Fysisk Selskab (DFS) den 13. november 2023.



**Figur 1.** Amalie Stokholm med diplom for KIF-prisen. Foto: Maren Malling.

Blandt et meget stærkt felt af nominerede valgte priskomiteen at tildele KIF-prisen 2023 til Amalie Stokholm. Amalie Stokholm færdiggjorde sin ph.d. ved Aarhus Universitet i 2022, hvorefter hun tiltrådte en stilling som Postdoctoral Researcher ved Università di Bologna, Italien, efterfulgt af hendes nuværende stilling ved University of Birmingham i Storbritannien. Hun har allerede i løbet af sin korte forskningskarriere en imponerende publikationsliste på 24 videnskabelige artikler, heraf to som førsteforfatter, i internationalt anerkendte publikationer.

Amalie forsker i Mælkevejens stjerner for at lære mere om vores galaktiske fortid. Stjerner er blevet dannet igennem hele Mælkevejens levetid og bærer på informationer om forholdene i de opgivelser, de blev dannet i og deres efterfølgende historie. Ved at bruge stjernerne i galaksen som tidskapsler kan man rekonstruere tidslinjen for, hvad der skete hvornår og i hvilken skala i Mælkevejen. På denne måde kan man lære om dannelsen og udviklingen af Mælkevejen, såvel som andre galakser.

Ud over sit forskningsarbejde har Amalie været meget engageret i undervisning, vejledning og outreach. Hun har været inviteret som gæst på diverse medier, hvor hun har fortalt om sin forskning og forskellige rummissioner. Hun har holdt adskillige offentlige foredrag og har undervist elever fra 9. klasse og op, og ved at dele sin viden og entusiasme med den bredere befolkning og unge studerende har hun været en rollemodel og inspiration for fremtidige forskere.

Amalie er medlem af en lang række nationale og europæiske videnskabelige konsortier og komiteer og er bl.a. leder af arbejdsgrupper relateret til ESAs kommende mission PLATO, hvor hendes arbejde inkluderer planlægningen af missionens analyse-pipeline.

*Maren Malling*



# Kommende foredrag

| Dato            | Tid   | Foredragstitel                                                                                           | Foredragsholder            | Forening  |
|-----------------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------|
| <b>Jan 2024</b> |       |                                                                                                          |                            |           |
| 29/1            | 19.30 | SNU, 200 års videnskabsformidling – fra enevælden til det moderne Danmark                                | Kristian Hvidtfelt Nielsen | SNU       |
| <b>Feb 2024</b> |       |                                                                                                          |                            |           |
| 5/2             | 18.15 | Gravitationsbølgekilder – LIGO/VIRGO (Foredraget er på engelsk)                                          | Daniele Malesani           | AS (Kbh)  |
| 12/2            | 18.15 | Vera Rubin – Rubin Observatoriet / LSST                                                                  | Christa Gall               | AS (Kbh)  |
| 12/2            | 17.45 | Gravitationsbølgekilder – LIGO/VIRGO (Foredraget er på engelsk)                                          | Daniele Malesani           | AS (Aarh) |
| 19/2            | 18.15 | STEP: det nye danske rumteleskop                                                                         | Mia Lundquist              | AS (Kbh)  |
| 19/2            | 17.45 | Vera Rubin – Rubin Observatoriet / LSST                                                                  | Christa Gall               | AS (Aarh) |
| 19/2            | 19.30 | H. C. Ørsted i rummet med Andreas Mogensen – hvorfor?                                                    | Anja C. Andersen           | SNU       |
| 26/2            | 18.15 | Stjernedød ved sorte huller (Tidal disruption events)                                                    | Giorgious Leloudas         | AS (Kbh)  |
| 26/2            | 17.45 | STEP: det nye danske rumteleskop                                                                         | Mia Lundquist              | AS (Aarh) |
| <b>Mar 2024</b> |       |                                                                                                          |                            |           |
| 4/3             | 18.15 | NOT Transient Explorer: Et nyt instrument til Det Nordiske Optiske Teleskop og hvad vi vil bruge det til | Johan Fynbo                | AS (Kbh)  |
| 4/3             | 17.45 | Stjernedød ved sorte huller (Tidal disruption events)                                                    | Giorgious Leloudas         | AS (Aarh) |
| 11/3            | 17.45 | NOT Transient Explorer: Et nyt instrument til Det Nordiske Optiske Teleskop og hvad vi vil bruge det til | Johan Fynbo                | AS (Aarh) |
| <b>Apr 2024</b> |       |                                                                                                          |                            |           |
| 8/4             | 19.30 | Martin Knudsen – den næsten glemte fysiker og havforsker<br>Efter foredraget er der generalforsamling    | Helge Kragh                | SNU       |
| 29/4            | 19.30 | Foredragsaften i SNU<br>Læs mere i næste nummer af Kvant                                                 |                            | SNU       |
| <b>Maj 2024</b> |       |                                                                                                          |                            |           |
| 27/5            | 19.30 | DMI's stormflodsmodel                                                                                    | Jacob Woge Nielsen         | SNU       |

**AS (Kbh):** City Campus, CSS, Gammeltoftsgade 15, 1355 Kbh. K ([astronomisk.dk](http://astronomisk.dk)).

**AS (Aarh):** Astronomisk Selskab, Aarhus Universitet, Ny Munkegade 118, 8000 Aarhus C (bygning 1530, lokale G122).

Medlemmer af AS får tilsendt et nyhedsbrev før foredragsrækken går i gang med information om tilmelding. Andre interesserede kan tilmelde sig via Folkeuniversitetet i hhv. København og Aarhus.

**Wieth-Knudsen Observatoriet**, Margot Nyholms Vej 1, 3220 Tisvildeleje, har åbent hus-arrangementer med gratis adgang to lørdage om måneden. De kommende datoer er 13/1, 27/1, 10/2, 24/2, 9/3, 30/3, 13/4, 27/4, 11/5 og 25/5. Se nærmere på [astronomisk.dk/wieth-knudsen-observatoriet](http://astronomisk.dk/wieth-knudsen-observatoriet).

**SNU:** Aud. 1, H.C. Ørsted-bygningen, Universitetsparken 5, 2100 København Ø ([snu.dk](http://snu.dk), [facebook.com/SNU1824](https://facebook.com/SNU1824)). Foredragene i SNU er åbne for alle – det er ikke nogen betingelse, at man er medlem.

**OBS:** Der må ikke parkeres ved hovedindgangen til Universitetsparken 5, og kun med særlig p-tilladelse andre steder i Universitetsparken eller på Ole Maaløes Vej 5. Der kan parkeres med Easypark på Nørre Allé.

Foredragene i SNU videooptages med støtte fra Carlsbergs Mindelegat.