

# 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.

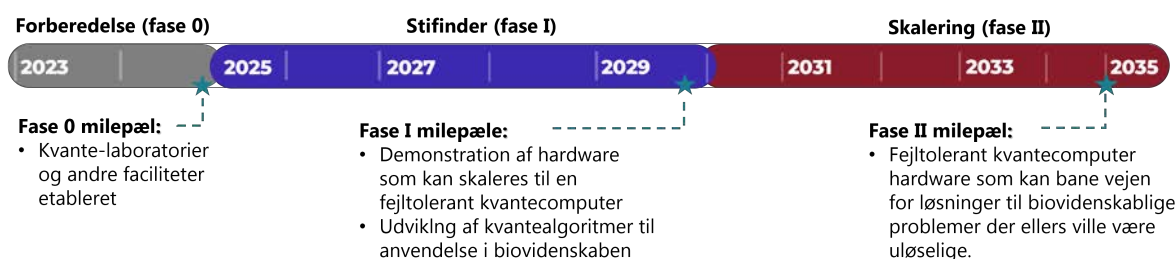
## Forskere og ingeniører arbejder side om side

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 proteinfoldning [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 halvleder-microchips 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 kvantearbejdsstyrke, 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 kvanteøkosystem 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-quantum-technology-del-1-forskning-og-innovation-i-verdensklasse](http://ufm.dk/publikationer/2023/strategi-for-quantum-technology-del-1-forskning-og-innovation-i-verdensklasse)
- [2] [www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/en-us/report/quantum-life-sciences](http://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](http://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/](http://studier.ku.dk/kandidat/kvanteinformationsvidenskab/)

[6] [www.apmollerfonde.dk/nyheder/koebenhavns-universitet-faar-et-kvanteteknologisk-traeningslaboratorium/](http://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 Hales teleskopet ved Palomarobservatoriet i Californien i USA. Psyche, som er på vej mod Asteroidebæltet 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 Asteroidebæltet. 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.