

Titel: **Metrologi for kvanteteknologi**

Institut: DFM & FORCE Technology

Kontaktperson: Jan Hald, Teamleder kvantemetrologi, jha@dfm.dk

Manchettekst: Kvanteteknologi har potentiale til at løse globale udfordringer som grøn omstilling, sundhed, og nye materialer. Udvikling af metrologikompetencer og -faciliteter til test af kvanteprodukter er nødvendigt for at sikre Danmarks position på området.

1. Kort introduktion:

De Nationale Metrologiinstitutter, herunder DFM, har gennem de seneste 40-50 år anvendt fundamental kvanteteknologi i udviklingen af de mest nøjagtige realiseringer af SI-enhederne for bl.a. elektrisk spænding, længde og tid. På den baggrund er der ved DFM opbygget kompetencer inden for kvanteteknologi. DFM og FORCE Technology vil med nærværende forslag til indsatsområde videreudvikle test- og demonstrationsfaciliteter med henblik på at understøtte forskning og iværksætter i inden for kvanteteknologi.

2. Markeds- og samfundsbehov:

Der er de seneste 4 år investeret markant i forskning og innovation inden for kvanteteknologi. I Danmark inkluderer det bl.a. Innovationsfondens strategiske program for forskning og innovation på kvanteområdet¹ samt etableringen af *The Novo Nordisk Foundation Quantum Computing Programme* (NQCP). Ligeledes er antallet af nye danske startup virksomheder vokset markant de seneste 4 år, og flere udenlandske kvantevirksomheder har nu etableret sig i Danmark. Cirka halvdelen af de danske kvanteteknologivirksomheder er SMV'er eller startups. Det er regeringens målsætning, at "Danmark skal udnytte det kommercielle potentiale i kvanteteknologien til gavn for dansk erhvervsliv og Danmarks sikkerhed gennem styrkelse af kvanteøkosystemet".² Test- og demonstration indgår som et væsentligt element af de nationale strategier, både som et selvstændigt element i Danmarks Innovationsfonds strategiske program¹ samt ved etableringen af et nationalt testcenter i tilknytning til *Quantum House Denmark*².

Indsatsområdet vil adressere behov hos virksomheder og institutioner, som arbejder direkte med kvanteteknologiske produkter eller med *enabling technologies*. Teknologiområderne vil typisk være inden for prototypefabrikation og test af kvantematerialer, nanoskala karakterisering, kvanteoptik samt nøjagtig tidsbestemmelse. Kvanteteknologiområdet har i dag et begrænset kommercielt marked, og den kommercielle udvikling af området kan kun ske med adgang til specialiserede testfaciliteter og metrologiekspertise. Det er denne markedsfejl indsatsområdet adresserer. De første virksomheder inden for hardware til kvantekommunikation, kvantesensorer og *enabling technologies*, vil begynde at efterspørge ydelser allerede midt i resultatkontraktperioden. Efter periodens afslutning forventes efterspørgslen fortsat at vokse betydeligt, men det skal tages i betragtning, at de første anvendelige kvantecomputere først forventes at blive tilgængelige 10-20 år ude i fremtiden¹.

¹ Uddannelses- og Forskningsministeriet, *Strategi for Kvanteteknologi Del 1 – Forskning og innovation i verdensklasse*.

² Erhvervsministeriet, *National Strategi for Kvanteteknologi Del 2 – Kommercialisering, sikkerhed og internationalt samarbejde*.

3. Ny teknologisk serviceydelse, kompetence og teknologi

I den kommende resultatkontraktperiode etableres nedenstående kompetencer og ydelser.

Kvantematerialer og -komponenter (DFM)

Flere kvantecomputer-teknologier er baseret på udviklingen inden for halvlederindustrien. Det inkluderer kvantepunkter samt superledende, spin og fotoniske qubits. Kvanteegenskaberne opstår i nanoskala strukturer af ultra-rene materialer. Qubit-kvaliteten begrænses bl.a. af strukturernes geometriske nøjagtighed, kvantematerialernes renhed og egenskaber i grænsefladerne mellem materialerne. DFM vil optimere fremstilling og karakterisering af kvantematerialer, qubits, og kvantedots med henblik på at opnå emner af høj kvalitet, der kan fungere som "referencematerialer" eller "reference-qubits" for forskningsgrupper og kvanteteknologivirksomheder. Ved periodens afslutning forventes referenceemnerne anvendt i "Round Robin" sammenligninger mellem nationale og internationale aktører, hvilket vil give data til videreudvikling og forbedring af næste generations kvantematerialer og -komponenter.

Optiske ure (DFM)

Atomuret er måske det mest succesfulde eksempel på en kvantesensor – en sensor, som måler tid. Atomurerne er uundværlige for den globale tidssynkronisering og en forudsætning for bl.a. GPS positionsbestemmelse, telekommunikation og internationale finansielle transaktioner. Nøjagtig tid er let tilgængelig fra GPS satellitter, men signalerne er lette at *jamme*. DFM har i seneste periode etableret en realisering af UTC tidsskalaen i Danmark: UTC(DFM). Der er dog endnu ikke en jordbaseret løsning til distribution af UTC(DFM) til kritisk dansk infrastruktur. Hertil kommer, at DFM kun har ét atomur, og adgangen til nye atomure er udfordret af den geopolitiske situation³. Når den frekvensstabiliserede laser, som DFM har udviklet, kombineres med en optisk frekvenskam, fås et optisk ur med performance svarende til de bedste kommercielle atomure⁴. Udviklingen af et optisk ur vil ved resultatkontraktperiodens afslutning sikre redundans i UTC(DFM), øge resiliens og præcision af dansk PNT infrastruktur samt understøtte dansk kvanteforskning.

Kvantekryptering (DFM)

Kvantekryptering spiller en afgørende rolle i at sikre digital infrastruktur og beskytte fortrolige oplysninger mod fremtidige cybertrusler. Kvantemekanikkens fundamentale principper muliggør kvantekryptering med en hidtil uset sikkerhedsstandard. Dette er af afgørende betydning, da traditionelle kryptografiske metoder potentielt kan brydes med en kvantecomputer. Flere danske forskergrupper og startup virksomheder udvikler teknologi til kvantekryptering. Kvantekryptering er en af de nye kvanteteknologier, som forventes at have et kommercielt marked inden for en kortere årrække. Det er derfor nødvendigt, at der nu etableres testfaciliteter, som med sporbarhed kan dokumentere specifikationer for individuelle komponenter såvel som færdige systemer. DFM har i indeværende periode etableret en testfacilitet for CV kvantekryptering. Faciliteten udvides til at omfatte krypteringsteknologier baseret på bl.a. enkeltfoton lyskilder, kryogent kølede detektorer, kvante-lyskilder, kvantebaserede generatorer af tilfældige tal samt tidssynkron de-lokaliseret dataopsamling. Udvidelsen vil være gennemført ved afslutningen af resultatkontraktperioden.

Kvante-sensorer (DFM)

Kvantesensorer udnytter kvantefænomener som "superposition" og "sammenfiltrering"

³ HE-ESA-023 - STAGE 1 – Next generation ground reference clocks for EGNSS, <https://esastar-publication-ext.sso.esa.int/ESATenderActions/details/76311>

⁴ <https://finance.yahoo.com/news/vescent-brings-optical-clocks-market-002300670.html>

(*entanglement*) til at opnå bedre præcision og følsomhed end traditionelle sensorer. Kvantesensorernes nøjagtighed kan dog kun sikres ved kalibrering med sporbarhed til de primære realiseringer af SI-enhederne, hvilket typisk er en opgave for nationale metrologiinstitutter som DFM. DFM vil samarbejde med danske universiteter og virksomheder omkring udvikling og karakterisering af kvantesensorer og relevante *enabling technologies*. Teknologierne forventes at inkludere: Måling af magnetfelter med nanometer opløsning ved hjælp af NV-centre i mikro-diamanter, kvante-forstærket Raman spektroskopi til kemisk analyse og afbildning, enkeltfoton super-højopløselig mikroskopi, sensorer baseret på interferometri med kolde atomer til fx gravimetri. Nogle teknologier forventes at være markedsmodne omkring periodens afslutning, mens andre kan have et længere tidsperspektiv.

Elektronik til qubit manipulation (FORCE Technology)

Uanset qubit teknologi er der behov for elektronik, som hurtigt og præcist kan manipulere alle qubits i en kvantecomputer. Der findes kommercielle løsninger rettet mod nuværende kvantecomputere med relativt få qubits. Det er dog ikke indlysende, hvordan nuværende teknologi kan skaleres til fremtidens millioner af qubits. Helt sikkert er det dog, at det bliver nødvendigt med standardisering på området, og heraf følger et behov for særlige testfaciliteter (fx EMC tests) til at dokumentere overholdelse af standarder. FORCE Technology vil i perioden opbygge faglig ekspertise og indgå i standardiseringsarbejde med henblik på at opbygge relevante testfaciliteter.

4. Centrale aktiviteter

Udover udviklingen af ovennævnte serviceydelser, kompetencer, faciliteter og produkter vil FORCE Technology og DFM samarbejde med virksomheder og/eller forskergrupper om test af udvalgte kvanteprodukter, hvor DFM vil fokusere på bestemmelse af metrologiske karakteristika under påvirkning af forskellige miljøer (fx vibration, EM stråling og temperatur) genereret i FORCE Technology's laboratorier.

Herudover vil aktiviteterne inkludere kortere udstationeringer ved udenlandske vidensinstitutioner (fx NIST og NPL) for at hjemtage relevant viden. Videnspredning gennemføres i samarbejde med danske samarbejdspartnere, og det igangværende arbejde inden for standardisering videreføres.

Forslaget bygger på tidligere indsatsområder "Metrologi til digitalisering og datasikkerhed" samt "Testcenter for kvanteteknologi". Indsatsområdet er nært beslægtet med aktiviteterne i 13 igangværende eksternt finansierede kvante-forskningsprojekter (EU/IFD) i 2024, hvoraf 8 er aktive indtil 2026/2027.

5. Mulige samarbejdspartnere

Indsatsområdet understøtter planlagte aktiviteter i *Quantum House Denmark* og det tilknyttede nationale testcenter². Herudover vil indsatsområdets kompetencer og faciliteter indgå som en del af DFM's bidrag i *Defence Innovation Accelerator for the North Atlantic* (DIANA-Q). Forudgående aktiviteter inkluderer bl.a. ovennævnte 13 projekter med AU, DTU, KU, NQCP samt en række danske virksomheder, udenlandske universiteter, og NMI'er. Yderligere samarbejder involverer Det Europæiske Rumagentur ESA, andre GTS-institutter og danske myndigheder. Netværksaktiviteter gennemføres i samarbejde med Danish Quantum Community, Quantum DTU og udenlandske netværk som The Quantum Economic Development Consortium (USA), European Quantum Industry Consortium (QuIC) og European Metrology Network for Quantum Technologies.