

Indsatsområde (titel): Metrologi for kvanteteknologi**Indsatsområde (nr.):** 3**Indsatsen kort (resumé)**Resumeet bruges også ved offentliggørelsen af forslaget på www.bedreinnovation.dk

Indsatsområdet vil understøtte det nationale initiativ Quantum Denmark med hensyn til etablering af en national testfacilitet for kvanteteknologi. Indsatsområdet bidrager til udvikling af specialiseret testudstyr, opbygning af kvante-relaterede metrologikompetencer, udarbejdelse af test- og måleprotokoller samt til standardiseringsarbejde. Aktiviteterne i indsatsområdet indgår ikke i planerne for Quantum Denmark, men er nødvendige for at opnå fuldt udbytte af Quantum Denmark.

Indsatsområdet vil udvikle ny kvanteteknologi på forkant af markedet i samarbejde med danske universiteter, virksomheder samt internationalt ledende forskningsinstitutioner og herved bidrage til dansk forskning og iværksætteri inden for kvanteteknologi, fremme anvendelsen af kvanteteknologi i dansk erhvervsliv og facilitere afsætning af danske kvanteprodukter på et internationalt marked.

Indsatsområdet søges af DFM og FORCE Technology og vil adressere følgende teknologiområder: Kvantematerialer og -komponenter, optiske ure, kvantekryptering, kvantesensorer samt test af elektronik og elektrooptik til qubit-manipulation.

1. Målsætninger, aktiviteter og indikatorer

De Nationale Metrologiinstitutter (NMI'er), 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 stærke kompetencer inden for kvanteteknologi. De seneste 5-10 år har vist, at kvanteteknologi i fremtiden vil revolutionere samfundet og skabe nye markedsmuligheder. For at udnytte disse muligheder er det afgørende, at aktørerne i det danske kvanteøkosystem arbejder tæt sammen. DFM og FORCE Technology vil bidrage til økosystemet gennem videreudvikling af test- og demonstrationsfaciliteter samt opbygning af relaterede faglige kompetencer. Indsatsområdet vil herved understøtte forskning og iværksætteri inden for kvanteteknologi og bidrage til, at idéer fra danske forskningsmiljøer bliver anvendt i dansk erhvervsliv og kan afsættes på et internationalt marked.

Det er DFM's vision, at der i Danmark etableres et internationalt førende center for test og validering af kvantematerialer, kvantekomponenter, kvantesystemer og understøttende teknologier. Nærværende forslag til indsatsområde vil bidrage til, at visionen kan indfries gennem et tæt samarbejde med aktiviteterne i Quantum Denmark (QD) initiativet, herunder Quantum Test Center Denmark (QTD). QTD vil etablere testfaciliteter i form af kommercielt tilgængeligt udstyr og stille teknisk support til rådighed for virksomheder og forskere. QD-bevillingen omfatter ikke udvikling af specialiseret testudstyr, opbygning af særlige kvante-relaterede målekompetencer, udarbejdelse af nye måle- og testprotokoller eller bidrag til standardisering. Nærværende indsatsområde er derfor nødvendigt for at Danmark får fuldt udbytte af QTD.

Væsentligste aktiviteter samt nye kompetencer og ydelser er beskrevet nedenfor. Forventet RK-finansiering er angivet i parentes efter hver titel. Målgruppe for indsatsen er yderligere beskrevet i afsnit 2.

Kvantematerialer og -komponenter (DFM)

Flere kvantecomputer-teknologier er baseret på udviklingen inden for halvlederindustrien. Det inkluderer kvantepunkter samt superledende qubits, spin-qubits og fotoniske qubits. Kvanteegenskaberne opstår i nanoskala strukturer af ultra-rene materialer. Qubit-kvaliteten begrænses bl.a. af strukturenes 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 og herved bidrage til forbedring af næste generations kvantematerialer og -komponenter¹. I det omfang test af kvantematerialer kan drage nytte af adgang til ESS og MAX IV forskningsanlæggene i Lund vil DFM søge samarbejde med Teknologisk Institut.

Mål år 2: Deterministisk fremstilling af kvantedot enkeltfoton-kilde (DFM).

Mål år 4: "Round Robin" sammenligning igangsat baseret på DFM's kvante-referencemateriale, fx superledende transmon qubit (DFM).

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), som sikres international anerkendelse gennem månedlig indrapportering af data til *Bureau international des poids et mesures* (BIPM). DFM opbygger fortsat kompetencer inden for tid og frekvens metrologi, herunder kalibrering af ure, men der eksisterer i dag ikke en jordbaseret infrastrukturløsning 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 situation². Når den frekvensstabiliserede laser, som DFM har udviklet, kombineres med en optisk frekvenskam, fås et optisk ur med performance svarende til de bedste kommercielle atomure³. DFM vil udvikle ny lasertechnologi til bedre og billigere optiske ure, til kvantecomputere og til metrologi-anvendelser. Ved resultatkontraktperiodens afslutning vil dette ur bidrage til redundans i UTC(DFM), øge resiliens og præcision af dansk PNT-infrastruktur samt understøtte dansk kvanteforskning⁴.

Mål år 1: Prototype til en ny optisk frekvensreference med to gange mindre temperaturfølsomhed end nuværende Stabilaser 1542 design (DFM).

Mål år 3: Data fra DFM-udviklet optisk ur indrapporteret til BIPM (DFM).

¹ Se kommentar på BedreInnovation.dk fra Alixlabs, Beamfox Technologies ApS, NQCP, Quantum Foundry Copenhagen, DTU Nanolab, Topsil GlobalWafers, Maybell Quantum Industries ApS, Catalan Institute of Nanoscience and Nanotechnology, Newtec Engineering A/S, ConScience AB, ConScience ApS, University of Oxford, Synopsys Denmark, Riverlane ApS, Sparrow Quantum.

² HE-ESA-023 - STAGE 1 – Next generation ground reference clocks for EGNSS, <https://esastar-publication-ext.sso.esa.int/ESATenderActions/details/76311>

³ <https://finance.yahoo.com/news/vescent-brings-optical-clocks-market-002300670.html>

⁴ Se kommentar på BedreInnovation.dk fra Telia Mobile Denmark (Norlys A/S), Nokia/AAU, NORDUnet, Styrelsen for Dataforsyning og Infrastruktur, GOMeasure, National Institute of Information and Communications Technology (NICT Japan), RISE Research Institutes of Sweden, Swabian Instruments GmbH, European Space Agency, Dansk IT's Fagråd for Informationssikkerhed, Aarhus Universitet.

Kvantekryptering (DFM; FORCE Technology)

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 systemer⁵. DFM har i igangværende periode etableret en testfacilitet for kvantekryptering med kontinuerte variable. Faciliteten udvides til krypteringsteknologier baseret på bl.a. enkeltfoton lyskilder, kryogent kølede detektorer, kvantelyskilder, kvantebaserede generatorer af tilfældige tal samt tidssynkron delokaliseret dataopsamling. Udvidelsen vil være gennemført ved afslutningen af resultatkontraktperioden.

Mål år 2: Rapport om implementeringsmuligheder af kvantekryptering ift. Cybersecurity (FT).

Mål år 3: Facilitet til kalibrering af kryogent kølede enkeltfoton detektorers kvanteeffektivitet med en usikkerhed bedre end 2 % (DFM).

Mål år 4: Etablering af facilitet og protokol til validering af kvantelyskilder til kvantekryptering (DFM).

Kvantesensorer (DFM; FORCE Technology)

Kvantesensorer udnytter kvantefænomener som ”superposition” og ”sammenfiltrering” (*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 metrologiinstitutioner som DFM. DFM vil samarbejde med danske universiteter og virksomheder omkring udvikling og karakterisering af kvantesensorer og relevante *enabling technologies*⁶. Teknologierne forventes at inkludere: Måling af magnetfelter med nanometer opløsning ved hjælp af *Nitrogen-Vacancy* centre i mikro-diamanter, kvante-forstærket Raman spektroskopi⁷ til kemisk analyse og afbildning, enkeltfoton super-højopløselig mikroskopi samt 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.

Mål år 1: Demonstration af mikroskopi med kvantelys på biologisk prøve med forbedret følsomhed i forhold til tilsvarende klassisk mikroskopi (DFM).

Mål år 3: Etablering af metode for evaluering af kvantemikroskopers performance med sporbarhed til SI-enhederne (DFM).

Mål år 4: Demonstration af kvantesensorer til hurtig identifikation af mikroorganismer via kvante-Raman-spektroskopi assisteret af AI og ML (FT).

⁵ Se kommentar på BedreInnovation.dk fra Dansk IT's Fagråd for Informationssikkerhed, Cryptomathic, QTI s.r.l., Ørsted Wind Power A/S, DTU, Aarhus Universitet, Alea Quantum Technologies, BlueCloud, Sparrow Quantum.

⁶ Se kommentarer på BedreInnovation.dk fra NLIR ApS, Niels Bohr Institutet, Noisy Labs GmbH, NKT Photonics A/S, Aarhus Universitet.

⁷ Se kommentar på BedreInnovation.dk fra Lightnovo ApS, NORBLIS ApS, SHUTE Sensing Solutions A/S, Danish Optical Fiber Innovation, Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering, Odense University Hospital, Rapp Optoelectronic GmbH.

Test og validering af elektronik til qubit manipulation (FORCE Technology)

Uanset typen af 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 standardiseringsrelateret arbejde med henblik på opbygning af relevante testfaciliteter.

- Mål år 2: Rapport til afdækning af behov for opgraderinger og fremtidige krav ift. eksisterende EMC- og EMI-testfaciliteter (FT).
- Mål år 3: Opgradering af testfacilitet til validering og inkorporering i avanceret elektronik, med fokus på compliance regler (FT).
- Mål år 4: Test af kvanteteknologiers følsomhed overfor temperatur- og fugtighedsvariationer. Der laves en rapport om krav til QT temperatur- og klimakamre (FT).

Standardisering og videnspredning (DFM; FORCE Technology)

DFM er i dag aktiv inden for standardisering og har formandsposten i Dansk Standards udvalg ”Quantum Technologies (S-874)”. Antallet af medlemmer i udvalget er de sidste to år vokset fra 4 til 20. DFM er endvidere *Convenor* i den internationale standardiseringsgruppe *ahG7 Quantum Enabling Technologies* med 51 medlemmer under IEC/ISO JTC3. FORCE Technology, DFM og Dansk Standard har gennemført en undersøgelse af kvanteteknologi-behov blandt 37 danske virksomheder og institutioner⁸. Foreløbige resultater viser, at 29 % har et ”højt” eller ”meget højt” behov for standardisering i dag, men at det tal vokser til 65 % og 76 % for vurderet behov om henholdsvis 5 og 10 år. Kommentarerne på BedreInnovation.dk viser også behov for standardisering⁹. På denne baggrund vil DFM og FORCE Technology øge standardiseringsaktiviteter i kommende resultatkontraktperiode med fokus på de konkrete områder, som målgruppen efterspørger.

For at undgå mange danske videnspredningsarrangementer med begrænset deltagelse vil FORCE Technology og DFM i høj grad søge at bidrage med resultater fra indsatsområdet til arrangementer sammen med andre nationale initiativer, herunder Quantum Denmark, Danish Quantum Community, DIANA-Q og NQCP.

Indsatsens værdi og succes kvantificeres ved følgende indikatorer og tilhørende mål:

	Indikatorer (måltal er for hele perioden medmindre andet er angivet)	Mål
1	Nye ydelser	19
2	Møder med målgruppen om nye emner	75
3	Møder og sparring med brancheorganisationer, klynger, myndigheder m.v.	32
4	Videnspredningsaktiviteter i form af bidrag ved fx nationale konferencer, seminarer, workshops, webinarer, videomaterialer m.v.	18
5	(Med)arrangør af afholdte konferencer, workshops, messer, webinarer o. lign.	8
6	Publicerede beretninger om cases med målgruppen (antal)	12

⁸ En analyse af kvanteteknologi-behov i 37 danske virksomheder og institutioner er under udarbejdelse i et samarbejde mellem FORCE Technology, DFM og Dansk Standard. Foreløbige resultater er præsenteret på en workshop afholdt 2024-08-21. Endelig rapport udkommer i efteråret 2024.

⁹ Se kommentarer på BedreInnovation.dk fra TOPTICA Photonics AG, Quantum Machines - QDevil ApS, Dansk Standard, Kvantify.

7	Nye F&U ansøgninger (antal)	48
8	-heraf internationale (e.g. Horizon Europe, Eurostars, m.v.)	24
9	Nye F&U projektmidler til DFM (mio. kr)	25
10	Standardiseringsudvalg og arbejdsgrupper med DFM-deltagelse (antal/år)	4
11	Publikationer i internationale 'peer-review' tidsskrifter, resultater fra sammenligninger, patenter og nye standarder.	30
12	International videnhjemtagning i form af gæsteophold (dage)	80

2. Relevans og potentiale

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 kvanteområdet¹⁰ 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 kvanteteknologi-virksomheder 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".¹¹ Test- og demonstration indgår som et væsentligt element af de nationale strategier, både som et selvstændigt element i Danmarks Innovationsfonds strategiske program¹⁰ samt ved etableringen af et nationalt testcenter i tilknytning til *Quantum Denmark* (QD)^{11,12}. Aktiviteterne i nærværende RK-ansøgning komplementerer og understøtter QD og er nødvendige for at få det fulde udbytte af QD. Det omfatter bl.a. udvikling af specialiseret testudstyr, opbygning af særlige kvante-relaterede målekompetencer, udarbejdelse af nye måle- og testprotokoller samt bidrag til standardisering.

Målgruppen for indsatsområdet omfatter virksomheder og institutioner, som arbejder direkte med kvanteteknologiske produkter eller med understøttende teknologier. Indsatsens teknologiområder vil primært være inden for prototypefabrikation og test af kvantematerialer, nanoskala karakterisering, kvanteoptik samt nøjagtig tidsbestemmelse. På længere sigt vil resultater fra nærværende indsatsområde understøtte slutbrugere af kvantecomputere, hvilket omfatter virksomheder inden for¹³ finansiering, logistik, energi, nye materialer og farma.

Afdækning af behov er sket gennem 1-1 møder med interessenter (45 registrerede møder om kvanteteknologi i indeværende RK-periode), feedback fra projektpartnere (16 eksternt finansierede kvanteprojekter i indeværende RK-periode), undersøgelse af kvanteteknologi-behov blandt 37 danske virksomheder og institutioner⁸, feedback på følgegruppemøder for indeværende RK samt kommentarer på BedreInnovation.dk.

Værdiskabelsen for målgruppen kommer gennem adgang til relevante testfaciliteter og -ydelser, faglige kompetencer og bidrag til standardisering. Det forventede fremtidige behov for standardisering er beskrevet ovenfor. Samme undersøgelse⁸ viser, at 59 % af de adspurgte virksomheder og institutioner i "høj

¹⁰ Uddannelses- og Forskningsministeriet, *Strategi for Kvanteteknologi Del 1 – Forskning og innovation i verdensklasse*.

¹¹ Erhvervsministeriet, *National Strategi for Kvanteteknologi Del 2 – Kommercialisering, sikkerhed og internationalt samarbejde*.

¹² Aktstykke nr. 187, *Aktstykke om Quantum Denmark*, 2023-2024

¹³ Se kommentar på BedreInnovation.dk fra BEC Technologies, Frogne A/S, Ørsted Wind Power A/S, Danish Quantum Community, Dansk Industri.

grad” eller ”meget høj grad” har behov for eller kan drage nytte af adgang til eksterne test-, demonstrations- eller udviklingsfaciliteter inden for kvanteteknologi. Dette tal vokser til 65 % og 68 % for vurderet behov om henholdsvis 5 og 10 år.

DFM’s aktiviteter inden for udvikling af frekvensstabile lasere og optiske ure har anvendelser inden for rumteknologi, og DFM har i dag et samarbejde med DTU-Space om udvikling af en frekvensstabil laser for *European Space Agency* (ESA). De planlagte aktiviteter inden for kvantekryptering vil medvirke til at imødegå cyberkriminalitet (”National strategi for cyber- og informationssikkerhed 2022-2024”) og kan på sigt bidrage til mere sikker satellitbaseret kommunikation og dermed understøtte ”Danmarks nationale strategi for rummet 2021”.

3. Markedssvigt og konkurrencesituation

Markedsfejlen består i, at Danmark har brug for et sammenhængende økosystem inden for kvanteteknologi for at opnå succes på området. Det kommercielle marked er endnu meget begrænset og vil i sig selv ikke kunne supportere den nødvendige indsats. Adgang til specialiserede testfaciliteter og metrologiekspertise er en væsentlig del af dette økosystem⁸. Desuden adresserer indsatsområdet en samfundsmæssig udfordring omkring kritisk infrastruktur for tidsreferencer. QD’s planlagte testcenter giver virksomheder og forskere adgang til testfaciliteter baseret på kommercielt tilgængeligt udstyr. Planerne for QD inkluderer ikke udvikling af specialiseret testudstyr, opbygning af grundlæggende kvantemetrologividen, udarbejdelse af nye måle- og testprotokoller samt bidrag til standardisering. Nærværende forslag til indsatsområde vil således komplementere og understøtte QD.

DFM samarbejder med udenlandske metrologiinstitutioner i USA, UK og EU omkring udvikling af kompetencer inden for kvantemetrologi. Det er dog væsentligt, at ydelser etableres tæt på aftagerne af hensyn til den hastige globale udvikling inden for kvanteteknologi, for at imødekomme særlige danske behov i et komplekst teknologiområde samt af hensyn til områdets geopolitiske og sikkerhedsmæssige betydning.

Ydelser udviklet under indsatsområdet vil typiske leveres til slutbrugerne direkte eller via QD. Der er meget lav risiko for konkurrenceforvridning, idet indsatsområdet fokuserer på metrologi for kvanteteknologi, og der er ikke andre danske markedsaktører med tilsvarende kompetencer på området¹².

DFM er medlem af regeringens Nationalt Forum for Kvanteteknologi, har formandsposten i DS’s standardiseringsudvalg for kvanteteknologi, er bestyrelsesmedlem i Danish Quantum Community og er udset til at blive bevillingsmodtager og forperson i QD. DFM sidder således centralt i det danske kvanteøkosystem og vil herigennem sikre, at aktiviteter igangsat inden for indsatsområdet ikke vil konkurrere med andre danske markedsaktører.

4. Videnspredning og inddragelse i indsatsområdet

Indsatsen vil inddrage målgruppen gennem en række tiltag, hvor de vigtigste er eksternt finansierede projektsamarbejder og virksomhedscases. Resultater fra indsatsområdet formidles gennem publikationer, conferencebidrag, gæsteforelæsninger, videoer og webinarer. Virksomheder og institutioner fra målgruppen inviteres til at bidrage til videnspredningen, hvilket vil resultere i fælles publikationer og conferencebidrag. Videnspredning i form af afholdelse af konferencer, workshops, seminarer og tilsvarende arrangementer vil primært blive gennemført i samarbejde med Quantum Denmark. Herudover vil DFM benytte eksisterende netværk som Danish Quantum Community og Quantum DTU til udbredelse af indsatsområdets resultater.

DFM vil fortsætte dialogen med aktører og interessenter for at sikre, at udviklede ydelser og kompetencer matcher målgruppens behov. Mere konkret vil DFM deltage i en "Round Robin" sammenligning på kvantechips med deltagelse fra både udenlandske forskningsinstitutioner og kommercielle aktører. Derudover vil DFM opretholde et højt niveau af eksternt finansierede projektsamarbejder via projektansøgninger til programmer under European Partnership on Metrology, Horizon Europe, Innovationsfonden og Eureka-programmerne. Projektsamarbejdet bidrager i høj grad til afklaring af målgruppens fremtidige behov for kvantemetrologi.

Indsatsområdets følgegruppe vil få bred deltagelse fra virksomheder, forskningsgrupper og øvrige aktører inden for kvanteteknologi. Gruppen vil tage udgangspunkt i følgegruppen for nuværende indsatsområde "Testcenter for kvanteteknologi" med 11 deltagere fra KU, DTU, AU, RISE, Styrelsen for Dataforsyning og Infrastruktur, Sparrow Quantum, Alea Quantum Technologies samt BEC Financial Technologies. Gruppen justeres løbende efter behov og vil bidrage med faglig sparring og input til optimering af aktiviteterne. DFM vil mødes med følgegruppen 1-2 gange årligt. Herudover vil DFM spare med individuelle medlemmer af følgegruppen om mere specifikke emner.

5. Nyhedsværdi og ambitionsniveau

Indsatsområdet har en ambitiøs målsætning med et markant fokus på forskning på et internationalt topniveau, hvilket underbygges af de 35 universitetskommentarer på BedreInnovation.dk. DFM's eksisterende kompetencer og faciliteter inden for kvanteteknologi efterspørges i høj grad af samarbejdspartnere, herunder danske virksomheder, universiteter og udenlandske metrologiinstitutioner. Dette ses bl.a. af de igangværende 13 eksternt finansierede forskningsprojekter inden for kvanteteknologi, hvor DFM er partner. I den kommende periode bygges til dels videre på eksisterende kompetencer og faciliteter, men som eksempel på noget helt nyt har DFM i sommeren 2024 fået leveret et specialdesignet avanceret MBE anlæg (*Molecular-Beam Epitaxy*). MBE anlægget vil i den kommende periode anvendes til fremstilling af kvante-referencematerialer og kvante-chips (bl.a. fotoniske chips til enkelt-foton kilder og superledende reference-qubits). Anlægget er specialdesignet af DFM til at være meget fleksibelt og samtidig muliggøre produktion i state-of-the-art kvalitet men i lille volumen og dermed med relativt lave driftsomkostninger. Flexibiliteten gør det muligt at integrere og teste nye typer af metrologiudstyr til in-situ karakterisering af kvantematerialerne under dyrkning. DFM's anlæg vil således komplementere de MBE anlæg, der installeres ved NQCP, som er rettet mod meget højere volumen og andre typer af materialer. DFM og NQCP har indgået en samarbejdsaftale, som bl.a. sikrer maksimal synergi mellem de forskellige faciliteter, så den viden der opbygges på DFM's mindre anlæg også kan komme NQCP til gavn.

I et teknisk ambitiøst indsatsområde er der en naturlig risiko for, at forskningsmål ikke opnås som planlagt, eller at markedsbehov forandres. Risikoen herfor minimeres gennem strategisk vidensdeling og samarbejde med universiteter og udenlandske NMI'er, hvilket sikrer en optimal ressourceudnyttelse. Derudover sikrer kompetenceoverlap blandt nøglemedarbejdere, at de nødvendige faglige kvalifikationer altid er tilgængelige. Samarbejdet mellem DFM og FORCE Technology styrker kontakten til relevante virksomheder og bidrager til bedre tilpasning af ydelser til markedsbehov. Tæt samarbejde i kvanteøkosystemet er en forudsætning for at opnå optimal synergi mellem de aktuelle initiativer til at fremme kvanteteknologi. Indsatsens succes afhænger således af fortsat bred opbakning fra alle aktører på området, og af at de fortsat ser en værdi i et tæt samarbejde.

Alle aktivitetsplaner vil indeholde løbende evalueringer af forskningsfremskridt og skiftende markedsf forhold, og aktiviteterne justeres for at opnå størst mulig effekt. Nye ydelser vil blive introduceret løbende i

kontraktperioden. DFM har i dag enkelte ydelser inden for kvanteteknologi, specielt omkring frekvens-stabile lasere og test af kvantematerialer, som vil blive videreudviklet i RK perioden. Generelt vil nye ydelser inden for kvanteteknologi ligge på forkant af markedet, og væsentlig efterspørgsel forventes først 3-5 år efter introduktion.

6. Kobling til forsknings- innovations- og erhvervsfremmesystemerne

DFM vil i 12 vundne forskningsprojekter¹⁴ samarbejde med Lightnovo ApS, NKT Photonics A/S, Sparrow Quantum A/S, Atlant 3d Nanosystems ApS, SiPhotonIC ApS, Dencrypt A/S, Global Connect A/S, Alea Quantum Technologies ApS, DTU-Fysik, DTU-Electro, Aarhus Universitet, Københavns Universitet (NQCP) samt en række udenlandske virksomheder og institutioner. DFM vil i den kommende periode søge yderligere projekter i samarbejde med målgruppen, primært inden for samme programmer¹⁴. I samarbejder med danske aktører står DFM typisk for test og validering af teknologi, metoder og produkter udviklet i samarbejdet. I internationale projekter samarbejder de nationale metrologiinstitutter ofte om udvikling af måleprotokoller og validering af måleresultater.

DFM's forskere vil bidrage til Quantum Denmark initiativet med deres metrologikompetencer inden for specifikke teknologiområder i forbindelse med opbygning og drift af testfaciliteter samt ved seminarer, workshops og tilsvarende events i QD regi.

Kompetencer og faciliteter opbygget under indsatsområdet vil ligeledes indgå som en del af DFM's bidrag i Defence Innovation Accelerator for the North Atlantic (DIANA-Q), hvor DFM er en af fire danske lokationer for test og fabrikation af kvanteteknologi.

Videnhjemtagning sker i høj grad gennem deltagelse i internationale forskningsprojekter med udenlandske Nationale Metrologiinstitutter, specielt fra USA, UK og EU, samt ved deltagelse i internationale konferencer og ved gæsteophold. DFM vil fortsætte medlemskab af de udenlandske netværk *The Quantum Economic Development Consortium* (QED-C, USA), *European Quantum Industry Consortium* (QuIC) og *European Metrology Network for Quantum Technologies* (EMN-Q)¹⁵.

Yderligere samarbejdspartnere inkluderer danske myndigheder og GTS-institutter. DFM koordinerer GTS indsatsen på kvanteområdet og arrangerer to årlige koordineringsmøder med de øvrige GTS'er der har aktiviteter på området herunder FORCE Technology og Alexandra's hhv. "Styrket Life science, fødevarer- og vandindustri via kritiske teknologier" og "Robuste og bæredygtige digitale infrastrukturer". Koordinationen skal stimulere fælles FoU-aktiviteter, etablere samarbejde om virksomhedsrettede events, styrke Danmarks internationale profil på området og forhindre opbygning af parallelle udbud af Test, Demonstrations- og Udviklingsfaciliteter (TDU) inden for kvanteteknologi samt koordinere indsatsen indenfor standardisering af denne.

7. Sammenhæng med instituttets strategi og afsæt i instituttets ressourcer

Indsatsområdets aktiviteter og planerne for Quantum Denmark indgår som de centrale elementer i det prioriterede område "Kvanteteknologi" i DFM's strategi for perioden 2025-2028. Herudover er "Chip-teknologi" prioriteret i strategien, og indsatsområdets aktiviteter omkring udvikling og test af kvantechips

¹⁴ Finansieret af henholdsvis Innovationsfonden, QuantERA, European Partnership on Metrology, Eurostars og Nationalt Forsvarsteknologisk Center. Quantum Denmark er ikke inkluderet i denne optælling.

¹⁵ Se kommentar på BedreInnovation.dk fra INRIM (EMN-Q chair)

indgår som centrale elementer i dette prioritetsområde. DFM's strategi har i alt 4 prioriterede områder, og nærværende indsatsområde dækker således en betydelig del af DFM's samlede strategi.

DFM har i 2023 tilpasset organisationen ved oprettelse af en selvstændig afdeling for kvantemetrologi, der i dag har 11 forskere. Herudover har DFM forskere med relevante kvantekompetencer i afdelingerne Fotonik og Nanometrologi, og de forskere inddrages efter behov i kvantemetrologiafdelingens aktiviteter. Kvantemetrologiafdelingen råder over en række laboratorier ved DFM. To laboratorier etableret i indeværende RK-periode vil få en afgørende rolle i flere planlagte aktiviteter: Tid & frekvens-laboratorium for realisering af den nationale tidsskala UTC(DFM) og karakterisering af frekvensnormaler samt kvantemateriale-laboratoriet med det ny MBE-anlæg. Herudover kan DFM-medarbejdere få adgang til Quantum Denmark test faciliteten på lige fod med andre forskere.

Den kvanteteknologi, der udvikles i dette indsatsområde, vil på sigt blive anvendt i DFM's øvrige indsatsområder. Indsatsområdet "Metrologisk infrastruktur" vil gøre brug af nye optiske ure for at øge redundans i realiseringen af den nationale tidsskala UTC(DFM). Indsatsområdet "Metrologisk forskning og udvikling" kan udnytte kvanteteknologi til at forbedre følsomhed i spektroskopi-teknikker med life-science anvendelser, og der er et teknologioverlap i områderne kvantechips og fotoniske chips, hvor sidstnævnte har en række anvendelser uden for kvanteteknologi (fx high-performance computing). Udvikling af bedre ure, redundant distribution af tid samt teknologi til kvantekryptering kan bidrage til styrket resiliens i kritisk dansk infrastruktur, og de tilhørende aktiviteter kan bidrage med teknisk viden til indsatsområdet "Resilienscenter Danmark (RC-D)".

FORCE Technology har som Danmarks elektronik-GTS gode forudsætninger for at understøtte udviklingen af stærke værdikæder inden for kvanteteknologi i Danmark. I første omgang er det strategien for FORCE Technology at udvikle teknologisk kapacitet inden for standardisering og certificering af kvanteteknologiske komponenter og systemer. Det er vigtigt, at viden og ydelser på disse områder er til stede forud for markedet, da det ellers kan udgøre en barriere for en markedsentre. I første omgang har FORCE Technology fokus på områder om sikkerhed, EMC, EMI, klima og bl.a. mekanisk påvirkning, der alle er områder hvor FORCE Technology har kapacitet for klassisk elektronik. FORCE Technology har gode erfaringer med at skabe samarbejder og værdikæder inden for nye teknologiområder, fx IoT og PtX, og har hermed gode forudsætninger for at bidrage til denne del af nærværende indsats.

8. Konkrete aktiviteter

Udover udviklingen af ydelser og kompetencer beskrevet i afsnit 1, 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 NPL¹⁶) for at hjemtage relevant viden.

Konkrete aktiviteter, der forventes at indgå i aktivitetsplanen i starten af RK-perioden, og som vil bidrage til at nå mål fastlagt i afsnit 1:

¹⁶ Se kommentarer på BedreInnovation.dk fra National Physical Laboratory (NPL) og Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB).

-
- Fremstilling af første superledende *Josephson Junction* på DFM's MBE system. En *Josephson Junction* er et fundamentalt element i en *transmon qubit*.
 - Fremstilling af første III-V kvanteprik på DFM's MBE system. Kvanteprikken indgår som et element i planlagte enkeltfotonkilder og fotoniske qubits.
 - Kvantificering og minimering af temperaturfølsomhed i det acetylen spektroskopi-setup, der vil indgå som en del af "pendulet" i et DFM-udviklet optisk ur.
 - Udvikling af kompakt og robust FPGA-baseret elektronik-løsning til styring af "pendulet" i et DFM-udviklet optisk ur.
 - Etablering af QKD-link mellem DFM og DTU.
 - Udarbejde metrologiske målemetoder for fysiske parametre, der er bestemmende for sikkerhedsbeviser for *Quantum Random Number Generators*.
 - Udvikling af kvantelyskilde til anvendelse i et kvantemikroskop i samarbejde med ekstern partner.
 - Karakterisering af *Nitrogen-Vacancy Center* diamantspidser og identifikation af optimale parametre ved anvendelse i en kvantesensor til højopløselig udmåling af magnetfelter i biologiske prøver.
-

Ekstern finansiering af indsatsområdet forventes primært at komme fra European Partnership on Metrology, Horizon Europe, Innovationsfonden, NFC og Eureka forskningsprogrammerne.

Følgende igangværende projekter vil bidrage med ekstern finansiering af indsatsområdet. For hvert projekt er angivet finansieringskilde/forskningsprogram og forventet ekstern finansiering i RK-perioden:

- High speed and precision Direct Atomic Layer Processing for high-resolution micro-/nanofabrication (Gap4DALP), IF/Eureka, 0,42 mio. Kr.
- Metrology for superconducting qubits (MetSuperQ), EPM, 0,80 mio. Kr.
- Normating colour-centre-based quantum sensing technology towards industrial application and standards (NoQTeS), EPM, 0,77 mio. Kr.
- Advancing cybersecurity with continuous variable quantum cryptography (CyberQ), IF, 1,06 mio. Kr.
- Development, test and validation of 3 secure, ultra-fast and low-cost quantum random number generators (TripleQ), IF, 1,50 mio. Kr.
- Deterministic Quantum Dots for Quantum Photonics (DeQD), IF, 4,02 mio. Kr.
- Quantum-enhanced Raman spectroscopy for bioimaging applications (QuRaman), IF/H2020, 0,31 mio. Kr.
- Quantum Computing Barium Ion Demonstrator (QBID), IF, 0,70 mio. Kr.