

Skema: Ansøgning om resultatkontraktmidler 2019-2020

Institut(ter): DFM	Aktivitetsplan (titel): Kvantemetrologi Idéforslags titel på bedreinnovation.dk: Kvantemetrologi	Aktivitetsplan nr.: 3	FoU
1) Manchettekst (kort resumé)			
Aktiviteten udfylder et behov for udvikling af metrologikompetencer og -ydelser til kvantemetrologianvendelser og vil væsentligt styrke udviklingen af dansk kvanteteknologi fra universitetsforskning til praktiske anvendelser.			
2) Aktiviteten kort (resumé)			
Kvanteteknologi fokuserer på at udnytte fundamentale kvantefysiske egenskaber i forbindelse med udvikling af morgendagens teknologier. Kvanteteknologien har potentiale til at revolutionere en række vigtige industriområder fx IT branchen, og der er i øjeblikket en intens global konkurrence på området. Kvantemetrologi omhandler udvikling af nye målemetoder, hvor nøjagtighed og følsomhed kun er begrænset af kvantefysikkens fundamentale naturlove. Hertil kommer måleteknologi, som understøtter den kvanteteknologiske udvikling inden for fx kvantecomputing, kvantekryptering og kvantematerialer. DFM vil etablere en række ydelser inden for kvantemetrologi målrettet danske universiteter og startup virksomheder. Der forventes en begyndende afsætning af ydelserne ved periodens afslutning, men voksende afsætning i takt med at kvanteteknologi-baserede produkter kommer commercialiseres. De udviklede kompetencer og ydelser har fokus på kvalitetssikring og kalibrering af nye kvanteteknologibaserede produkter. Det er kompetencer, som bliver kritiske når nye kvanteprodukter skal kommercialiseres, men som ingen andre danske aktører har mulighed for at udvikle. Kompetencerne skal være til rådighed tæt på de aktive danske forskningsmiljøer, således at kompetencerne kan integreres i udviklingen af de nye produkter. DFM vil udvikle kvantelyskilder, ultra-stabile frekvensnormaler, karakterisere kvantematerialer og kalibrere enkelt-foton detektorer. Vidensspredningsaktiviteterne omfatter publikationer, konferencer og møder med forskningsgrupper og startups med aktiviteter inden for kvanteteknologi. Herudover planlægges afholdelse af seminarer for virksomheder og universiteter.			
3) Markedsbehov, erhvervs- og samfundsmæssige potentialer			
Kvanteteknologi har potentiale til at revolutionere en række vigtige industriområder, i første omgang inden for kvantecomputing og IT sikkerhed¹. Teknologien vil blive afgørende for fremtidens industri og der ses en stærkt stigende interesse og en intens global konkurrence på området. Multinationale firmaer som Google² IBM og Microsoft³ investerer nu kraftigt i kvanteteknologi, også i Danmark. Desuden er store offentlige forskningsprogrammer de seneste år etableret på området. EU har netop lanceret sit 1 mia. EUR FET Flagship on Quantum Technologies, og på nationalt plan kan nævnes store satsninger i			

¹ FORSK2025, side 30

² www.ft.com/content/4b40be6c-0181-11e8-9650-9c0ad2d7c5b5

³ www.microsoft.com/da-dk/mdcc/stationq.aspx

Holland og i Storbritannien samt danske Qubiz/PlatformQ. Nationale metrologiinstitutter i bl.a. Storbritannien, Holland og Italien har ligeledes igangsat aktiviteter inden for kvanteteknologi og –metrologi. Danske universiteter har opbygget en solid forskningsposition inden for kvanteteknologi, og de første danske kvanteteknologi startup selskaber er blevet etableret⁴.

FORSK2025 identificerer et ”behov for at få de kvantefysiske systemer fra skrivebordet og laboratoriet ’ud i virkeligheden’”⁵. Dette kræver, jfr. FORSK2025, ”forskning og udvikling af alle dele af fødekæden omkring kvanteteknologier”⁵, herunder udvikling af nye materialer, komponenter og kvantelyskilder. DFM har en unik rolle i at udvikle metrologi, kvalitetssikring og kalibrering til nævnte områder; en rolle som ingen andre danske organisationer har kompetencer og faciliteter til at kunne udfylde.

Eugene Polzik, professor ved Niels Bohr Institutet og medlem af EU’s Commission Expert Group on Quantum Technology - High Level Steering Committee udtaler⁶:

“Det er essentielt for kommercialisering af fremtidens kvanteprodukter, at deres specifikationer kan dokumenteres ved internationalt anerkendte målinger. Metrologi bliver således en central del af værdikæden for de kvanteprodukter, som bl.a. udvikles ved KU. Eksistensen af de rigtige metrologi-kompetencer tæt på danske forskningsmiljøer og startups er afgørende for, at nye produkter kan udvikles og afsættes på det globale marked.”

Denne udtalelse fra en af Danmarks førende eksperter inden for kvanteteknologi underbygger, at de kvantemetrologiske kompetencer og ydelser etableret i denne ansøgning bliver vigtige for at udvikle hele kvanteteknologiområdet og understøtte etableringen af nye virksomheder.

Behovet for at inddrage DFM’s kompetencer i udvikling af kvanteteknologiområdet underbygges ligeledes af Cathal J. Mahoon, Interim CEO, Qubiz - Quantum Innovation Center⁷, som på BedreInnovation skriver:

“The primary objective of Qubiz is to facilitate bringing quantum technologies to market. ... DFM possesses indispensable skills and knowledge that complement those of the quantum physics researchers and which are essential if Qubiz is to meet its objectives.”

Potentialet i nærværende ansøgning bekræftes af kommentarerne på BedreInnovation.dk, hvor i alt har 10 virksomheder og 19 uddannelses- og forskningsinstitutioner har givet positive tilbagemeldinger. Betydningen af de planlagte aktiviteter inden for kvantemetrologi bliver især fremhævet i kommentarerne fra NKT Photonics A/S (Sr Scientist Jens Engholm Pedersen), Sparrow Quantum A/S (CEO Henning Hersoug) samt Menlo Systems GmbH (Dr. Benjamin Springer).

Det forventes, at der kan gå op mod 5 år før de første kvanteteknologier bliver fuldt kommercialiseret, men med den stærke internationale konkurrence på området er det vigtigt at ’være på forkant’ og udvikle de nødvendige metrologiløsninger parallelt med at universiteternes forskningsresultater kommer-cialiseres.

⁴ BedreInnovation.dk kommentar fra Sparrow Quantum A/S og QDevil ApS

⁵ FORSK2025, side 59

⁶ Email korrespondance i forbindelse med opfølgning på BedreInnovation.dk kommentarer.

⁷ <http://qubiz.dk/>

DFM har i løbet af de seneste 2 år igangsat initiativer med henblik på at afklare muligheder og behov inden for kvantemetrologi. Dette inkluderer deltagelse i nye forskningsprojekter inden for kvanteteknologi i samarbejde med private danske virksomheder (Qubiz under Innovationsfonden, Q-GWD under Eureka Turbo programmet, BeCOME under EMPIR programmet) samt deltagelse i Center for Quantum Technologies (QuantumDTU⁸, et DTU netværk). De planlagte aktiviteter i denne ansøgning er bl.a. fastlagt på baggrund af workshops arrangeret af Qubiz og QuantumDTU samt ved individuelle møder med potentielle samarbejdspartnere og kunder. De identificerede behov understøttes af kommentarerne på BedreInnovation.dk.

Den primære målgruppe er virksomheder inden for kvanteteknologi (bl.a. startups) samt universiteter, der arbejder mod kommercialisering af kvanteteknologi eller leverer kritiske komponenter til området (fx lyskilder og detektorer). Da den primære målgruppe endnu har et begrænset omfang, er det vigtigt at deltage aktivt i nationale og internationale netværk, seminarer og konferencer for her igennem at identificere fremtidige behov og nye potentielle aftagere til kvantemetrologiydelser. Det forventes, at der 5 år efter aktiviteternes begyndelse vil være mindst 20 direkte aftagere af ydelser etableret på baggrund af denne ansøgning.

En kvantitativ undersøgelse viser, at der i dag er kvanteteknologiforskningsaktiviteter på 4 danske universiteter med samlet ca. 350 fuldtidsforskere på området. Endvidere vurderes, at der er ca. 50 fuldtidsforskere inden for kvanteteknologi ved danske private virksomheder⁹ (i høj grad SMV'er). Under antagelse af at ressourceanvendelsen udgør ca. 1,5 mio.kr./år/forsker udgør de samlede forskningsaktiviteter ca. 600 mio.kr./år i Danmark, og aktiviteten forventes at stige kraftigt de kommende år. DFM vurderer, at succespotentialet fra Danmarks kvanteforskningsaktivitet markant øges ved etablering af nærværende forslag.

De planlagte aktiviteter til etablering af en enkelt-foton kalibreringsfacilitet adresserer behov, der er identificeret i National strategi for cyber- og informationssikkerhed¹⁰, initiativ ”2.3 Forskning i ny teknologi”, specielt med hensyn til ”... viden til at styrke infrastrukturen imod angreb...”. Som beskrevet i afsnit 5 nedenfor er kalibrering af enkelt-foton detektorer en forudsætning for fremtidens etablering af sikre kvantekrypterede transmissionslinjer.

4) Videnspredning og inddragelse

DFM deltager i det nationale netværk QuantumDTU og vil søge styrket deltagelse i Quantum Innovation Center (Qubiz/PlatformQ, finansieret af Innovationsfonden). Videnspredning til danske virksomheder og universiteter vil bl.a. ske gennem foredrag og workshops inden for disse netværk. Der afholdes et åbent seminar omkring kvanteteknologi og -metrologi i DFM's faciliteter. Seminaret vil om muligt blive arrangeret i samarbejde med eksisterende netværk. Herudover vil DFM inddrage danske virksomheder og universiteter gennem demonstrationsprojekter (se afsnit 9) ligesom DFM vil søge yderligere eksterne forskningsmidler i samarbejde med danske interessenter. Der planlægges projektansøgninger inden for kvantemetrologi med inddragelse af mindst 5 danske virksomheder i perioden. Projekterne søges finansieret fx via EU's FET Flagship on Quantum Technologies og via EMPIR programmet.

⁸ Se støtteerklæring fra QuantumDTU i appendiks.

⁹ Vurderet på baggrund af bl.a. virksomhedskommentarer på BedreInnovation.dk og industrielle partnere i Qubiz, <http://qubiz.dk/partners/>

¹⁰ <https://www.fm.dk/publikationer/2018/national-strategi-for-cyber-og-informationssikkerhed>

DFM vil etablere en følgegruppe med deltagere fra mindst 4 virksomheder og 3 forskningsgrupper ved danske universiteter. Følgegruppen etableres inden for RK periodens første 4 måneder, og første følgegruppemøde afholdes inden 6 måneder. Følgegruppen vil bidrage til at aktivitetens fokus og specifikationer for udviklede ydelser tilpasses markedets fremtidige behov. På møderne præsenteres bl.a. fremdrift i udvikling af nye ydelser, og feedback fra gruppen inddrages i prioritering af det videre arbejde. På nuværende tidspunkt er der tilsagn til deltagelse fra følgende interessenter: NKT Photonics A/S, Therkildsen Development ApS, Professor Eugene Polzik (KU-NBI) samt Professor Ulrik Andersen (DTU).

Yderligere formidling omkring kvantemetrologi vil foregå i samarbejde med Københavns Erhvervsakademi (KEA). KEA er netop ved at etablere et valgfag inden for quantum computing (QC) i erkendelse af, at de IT medarbejdere som uddannes i dag kan forventes at få brug for QC kompetencer inden for perioden af deres kommende arbejdsliv¹¹. I samarbejde med KEA vil DFM udvikle undervisningsmateriale til 1-2 forelæsninger med fokus på kvanteteknologiens metrologiaspekter. Inden for RK perioden vil DFM medarbejdere fungere som gæsteforelæsere og bidrage med eksperimentelle øvelser, men med henblik på at KEA selv på sigt kan overtage denne opgave.

DFM vil etablere og vedligeholde en hjemmeside om kvantemetrologi. Hjemmesiden vil blive brugt til formidling af generel viden om kvantemetrologi samt formidling af fremdrift i aktiviteterne i nærværende ansøgning. Hjemmesiden vil desuden blive brugt til at annoncere ovennævnte åbne seminarer samt programmer herfor, den vil linke til relevante publikationer og den anvendes i forbindelse med det planlagte undervisningssamarbejde med KEA.

Konkret vil der blive samarbejdet med Therkildsen Development ApS, DTU Fotonik og KU omkring udvikling og anvendelser af kvantelyskilder, og der samarbejdes med KU og DTU Danship om karakterisering af kvantematerialer. Det eksisterende samarbejde med KU, AU og NKT Photonics omkring videreudvikling af ultra-stabile optiske frekvensnormaler vil blive styrket, og DFM vil søge samarbejde med KU, DTU og SMV'et Sparrow Quantum A/S omkring enkelt-foton kalibrering. Yderligere samarbejder med nye danske virksomheder og forskningsgrupper søges etableret i perioden. Inden for projektperioden forventes vidensdeling til 30 danske virksomheder med aktiviteter inden for kvanteteknologi og 8 danske forskningsgrupper, enten gennem deltagelse i seminarer, projektinddragelse eller køb af ydelser.

Yderligere vidensspredning vil ske via publikationer, konferencer og møder med forskningsgrupper og startups. Der planlægges publicering af mindst 6 artikler i internationale videnskabelige tidsskrifter og afholdelse af mindst 3 indlæg på konferencer/workshops inden for perioden.

5) Konkrete aktiviteter

Forskning inden for kvantemetrologi omhandler udvikling af nye målemetoder, hvor nøjagtighed og følsomhed er på så højt et niveau, at de begrænses af kvantefysikkens fundamentale naturlove. Hertil kommer måleteknologi, som understøtter den kvanteteknologiske udvikling inden for fx kvantecomputing, kvantekryptering og kvantematerialer. Kvantemetrologi er således et ganske bredt forskningsområde, og med en to-årig tidshorisont er det nødvendigt at fokusere på enkelte konkrete aktiviteter inden for forskningsområdet. De forskningsaktiviteter, DFM i den kommende 2-årige periode vil iværksætte,

¹¹ Se kommentar på BedreInnovation.dk fra Københavns Erhvervsakademi

er primært rettet mod eller gør anvendelse af optiske kvanteteknologier. De konkrete aktiviteter er angivet nedenfor, og efter hver titel angives i parentes den samlede resultatkontraktaktivitet (mio. kr) allokeret til aktiviteten over 2 år.

Enkelt-foton kalibreringsfacilitet

Flere kvanteteknologier forudsætter detektion af individuelle fotoner. Som eksempel baseres flere krypteringsmetoder på transmission af enkelte fotoner gennem lysledere. Kvantefysikkens naturlove gør det umuligt at aflytte sådan en kvantekrypteret transmissionslinje uden at blive opdaget, men det kræver fuld kontrol over foton kilden og foton-detektorernes effektivitet. Udvikling af enkelt-foton kvantelyskilder forudsætter også kalibrering af enkelt-foton detektorer. Det fremtidige behov for denne facilitet understøttes af kommentarer på BedreInnovation.dk fra DTU Fotonik (Søren Stobbe, Jonas Neergaard-Nielsen), AU (Jan Arlt) og Sparrow Quantum A/S. Desuden beskrives behovet i EURAMET's *Strategic Research Agenda for Metrology in Europe* (SRA, s. 43)¹².

Ultra-stabil optisk frekvensnormal

DFM's udvikling af frekvensstabile lasere har hidtil været rettet mod længdemetrologi, hvor laserens bølgelængde benyttes som reference ved kalibrering af sekundære længdenormaler. DFM's acetylen-stabiliserede laser nærmer sig imidlertid en performance, som muliggør kvanteteknologiske anvendelser. Laserens smalle linjebredde og høje frekvensstabilitet gør den interessant fx i eksperimenter, hvor atomer fanges i 'fælder' og deres kvantetilstande manipuleres med laserlys. FORSK2025 s. 59 nævner specifikt et kvanteteknologisk forskningsbehov inden for "robuste lyskilder og atomare fælder". Konkret vil vi inden for RK perioden forbedre laseren, således at performance alene begrænses af såkaldt kvantestøj og laserens frekvensstabilitet derved maksimeres. Den forbedrede laser videreudvikles efterfølgende til et kommercielt produkt. Herudover vil laseren blive anvendt i en ydelse til karakterisering af frekvensstøj i sekundære lasere anvendt til fx kvantekryptografi. Interessen for DFM's arbejde inden for dette område er stor, både fra danske og udenlandske interessenter. Dette ses bl.a. fra kommentarer på BedreInnovation.dk fra AU (Michael Drewsen, Jan Arlt), Menlo Systems GmbH (verdens førende producent af optiske frequency combs med anvendelser inden for kvantemetrologi), NKT Photonics, DTU (Ulrich Hoff), Kongsberg Defence & Aerospace og KU (Martin Romme Henriksen). Behov for optiske frekvensnormaler i et kompakt og robust design er desuden angivet i EURAMET's *Strategic Research Agenda for Metrology in Europe* (SRA, s. 48)¹².

Kvantelyskilder

DFM vil udvikle kvantelyskilder baseret på konventionelle lasere, hvor kvantefluktuationer i lysets egenskaber (fx intensitet eller fase) bliver manipuleret i såkaldte optiske parametriske oscillatorer. Kvantelyskildernes særlige egenskaber kan kun beskrives ved kvantefysikkens love, og de har stort potentiale inden for ultra-følsomme optiske målinger. Som eksempel kan et højt signal-støj forhold oprettholdes ved målinger med meget lav optisk effekt. Dette er bl.a. betydningsfuldt ved optiske målinger på biologiske prøver, idet optisk inducerede skader reduceres ved lavere effekt. Endvidere kan kvantelyskilder bidrage til skarpere afbildning af emner på mikro- og nanoskala, idet kvantelyset gør det muligt at overvinde de klassiske diffraktionsbegrænsninger i mikroskopi. Tilsvarende kan kvantelyskilder forbedre optiske interferometre, som fx anvendes til afstandsmålinger. Robuste kvantelyskilder med en høj grad af "kvanteindhold" er ganske komplekse, og udvikling heraf vil tage det meste af 2 år. Den første anvendelse, hvor kvantelyset integreres med et mikroskop, forventes demonstreret ved afslutningen af perioden. Kvantelyskilder indgår som en central del af de optiske systemer, der omtales i forbindelse

¹² https://www.euramet.org/Media/news/G-GNP-STR-003_SRA_web.pdf

med forskningsbehov i FORSK2025 s. 59. Behovet for forskning i udvikling af kvantelyskilder og metrologianvendelser heraf underbygges af specifikke kommentarer på BedreInnovation.dk fra DTU Fotonik (Jesper Mørk) og DTU Fysik (Jonas Neergaard-Nielsen & Ulrich Hoff).

Karakterisering af kvantematerialer under produktion

Produktion af kvantematerialer er tidskrævende, omkostningstungt og involverer mange procestrin. Hurtige og berøringsfri teknikker til karakterisering af kvantematerialer under produktion kan tidligt identificere fejlbehæftede produkter og bidrage til at optimere procesparametre, hvorved produktionsomkostninger reduceres. Nanotråde er et kvantemateriale, der antageligt kan videreudvikles til at udgøre en kvantecomputers mindste hukommelsesenhed (qubit). Vi vil udvikle en facilitet til karakterisering af nanotråde ved at belyse nanotrådene og måle på det spredte lys herfra. Udover det fysiske setup til målingerne, kræves der udvikling af nye algoritmer til at kvantificere nanotrådenes geometri på baggrund af målinger på det spredte lys. Aktiviteten bidrager til, at universiteterne får succes med deres forskning i nye kvantematerialer, og aktiviteten støttes på BedreInnovation.dk af KU (Jesper Nygaard), DTU Compute (Mirza Karamahmedovic) samt Bergen Universitet (Bodil Holst). Behovet for forskning i nye kvantematerialer er identificeret i FORSK2025 s. 59.

Barrierer, uvisheder og risici

De planlagte aktiviteter baseres på de generelle kompetencer og faciliteter DFM tidligere har opbygget inden for fotonik og nanometrologi. Flere af DFM's forskere har tidligere arbejdet med grundforskning inden for kvanteoptik, og DFM har derfor de faglige kompetencer til at gå ind i et nyt område som kvantometrologi. Aktivitetsplanen baseres på en række ambitiøse aktiviteter inden for forskellige anvendelsesområder. Det muliggør en justering af aktiviteterne i løbet af perioden og målrette indsatsen mod de mest lovende. Aktivitetens samspil med eksternt finansierede projekter er beskrevet i afsnit 7.

6) Nyhedsværdi og ambitionsniveau

DFM har som målsætning at være blandt de 5 bedste i Verden inden for igangsatte aktiviteter¹³, og de planlagte kompetencer og ydelser har nyhedsværdi og ambitionsniveau til at realisere målsætningen. Kvanteteknologi vil på sigt revolutionere en række industrisektorer¹⁴ og nærværende aktivitet vil være unik i Danmark og opfylde et dansk behov, som ikke på andre måder kan løses. Alle udviklede ydelser vil være "state of the art" på globalt niveau og vil sikre danske forskningsmiljøer et stærkt udgangspunkt for at etablere nye kvanteteknologi-baserede virksomheder. Danske forskningsmiljøer kan ikke alene basere sig på adgang til viden i udlandet. De nye kompetencer skal udvikles og integreres i (og tæt på) de miljøer hvor nye virksomheder skal opstå således at de fra begyndelsen indtænkes i nye kvanteprodukter. DFM er med sit tætte samarbejde med de primære forskningsmiljøer i en stærk position til at udvikle og integrere de manglende kompetencer og ydelser i forskningsmiljøerne.

DFM samarbejder med en række udenlandske metrologiinstitutter, som i disse år opbygger nye kompetencer inden for kvantometrologi, og EURAMET's SRA¹² omtaler en række kvanteteknologier i forbindelse med fremtidige metrologibehov.

Der forventes afsætning af de nye ydelser til universiteter og startups ved periodens afslutning, primært ydelserne i relation til ultra-præcise optiske frekvensnormaler. Afsætningen forventes at vokse i takt

¹³ Se DFM's Strategiplan s. 15

¹⁴ FORSK 2025 s 30

med den kvanteteknologiske udvikling. Det forventes, at der kan gå op mod 5 år før kvanteteknologierne bliver fuldt kommercialiseret, og afsætning af ydelserne forventes først på det tidspunkt at vise kraftig vækst.

De konkrete ydelser og kompetencer, som udvikles i den kommende 2-årige periode, er specificeret som milepæle i afsnit 9.

Det vurderes, at DFM på længere sigt vil kunne sikre en meget markant værdiskabelse til gavn for nye danske virksomheder ved etablering af aktiviteter på området.

7) Vidensamarbejde og -hjemtagning

DFM har de seneste 2 år etableret samarbejder med danske og udenlandske videninstitutioner i forbindelse med nye eksternt finansierede projekter inden for kvantemetrologi. Dette inkluderer samarbejde med AU og KU omkring frekvensstabile lasere (Qubiz), samarbejde med KU omkring kvantelyskilder til øget følsomhed ved måling af gravitationsbølger (Q-GWD) samt samarbejde med DTU og metrologiinstitutionerne i Storbritanien, Italien og Holland vedrørende kvantelyskilder til forbedret opløsning bl.a. *Atomic Force Microscopes* (BeCOMe). I forbindelse med BeCOMe projektet, planlægges en udstationering af en DFM seniorforsker i 2 måneder ved det hollandske NMI i 2020 med henblik på videnhjemtagning.

Gennemførelse af aktiviteterne i denne ansøgning vil naturligt styrke de nævnte samarbejder, men herudover er der blandt danske universiteter stor interesse for nye samarbejder med DFM, hvilket fremgår specifikt af flere kommentarer på BedreInnovation.dk¹⁵. Som eksempel er der inden for udvikling og anvendelser af kvantelyskilder planlagt samarbejde med DTU Fysik omkring udnyttelse af hinandens faciliteter. Det forventes, at mindst 50 % af de videnskabelige publikationer udgives i samarbejde med danske universiteter.

I Q-GWD projektet, som finansieres under EUREKA TURBO, vil DFM udvikle kvantelyskilder, der skal integreres med KU's særlige atomar-spin detektionssystem. Det samlede system planlægges implementeret ved en af de store internationale forskningsfaciliteter til detektion af gravitationsbølger, fx GEO600 i Hannover. Målet er, at udstyret, som udvikles i samarbejde mellem DFM og KU, vil resultere i forbedret følsomhed ved detektion af gravitationsbølger. Dette Q-GWD projekt vil blive medfinansieret med resultatkontraktmidler. Der er et væsentligt overlap mellem de kvantelyskilder som udvikles til i Q-GWD og de kvantelyskilder som planlægges i nærværende ansøgning. Anvendelserne er dog forskellige, idet vi i her har fokus på kvantelyskilder til Raman mikroskopi med forhøjet opløsning og følsomhed.

Styrelsen for Forskning og Innovation har i *Dansk Roadmap for Forskningsinfrastruktur 2015* identificeret 22 forslag til konkrete forskningsinfrastrukturer af national betydning¹⁶. DFM er eksplicit angivet som potentiel interesseret partner til forslaget *Quantum Technology Infrastructure Proposal* (QUANTECH). I 2016 blev der bevilget 20 mio. kr til QUANTECH i form af en række avancerede instrumenter, som skal bruges til udvikling og fabrikation af komponenter til fremtidens teknologi. Nærværende aktivitet vil styrke QUANTECH ved at udvikle ydelser til kvalitetskontrol af kvanteprodukter.

¹⁵ Se fx kommentarer fra Jan Arlt (AU), Ulrich Hoff (DTU), Jesper Nygård (KU), Peter Lodahl (KU), Cathal J. Mahon (Qubiz)

¹⁶ <https://ufm.dk/publikationer/2015/filer/dansk-roadmap-for-forskningsinfrastruktur-2015.pdf>

Deltagelse i EURAMET's European Metrology Network (EMN) for quantum technologies¹⁷, hvor DFM er medansøger, vil yderligere styrke videnhjemtagning fra udenlandske metrologiinstitutioner. Det internationale samarbejde udvides bl.a. gennem projektansøgninger under EMPIR og FET Flagship on Quantum Technologies. En ansøgning i samarbejde med 8 udenlandske universiteter fra Østrig, Tyskland, Frankrig og Storbritannien planlægges indsendt i den kommende periode. Herudover er European Space Agency (ESA) fra 2018 begyndt at udbyde projekter inden for udvikling af kvante-baserede sensorer¹⁸, og DFM vil i relevant omfang byde herpå i konsortier med danske og udenlandske partnere.

Som beskrevet herover er der et stort potentiale for videnhjemtagning. Den hjemtagne viden forankres og dissemineres via nye ydelser og projektsamarbejde. I forbindelse med realisering af ydelserne opbygges de nødvendige fysiske faciliteter, måleprocedurer og faglige kompetencer til opretholdelse af ydelserne så længe de efterspørges. Da kommerialisering af kvanteteknologi har en forholdsvis lang tidshorisont (se afsnit 3), er det DFM's intention at søge midler til at fortsætte forskningsaktiviteter inden for kvantemetrologi i tiden efter den kommende resultatkontraktperiode.

8) Sammenhæng med instituttets strategi og afsæt i instituttets ressourcer

Etablering af kvantemetrologiaktiviteter vurderes at have strategisk betydning for DFM's opfyldelse af sin mission¹⁹ og udgør 1 af 3 strategiske målsætninger for den kommende periode²⁰.

DFM har i indeværende periode gennemført en analyse af fremtidige metrologibehov i Danmark og vurderer at udvikling af "kvantemetrologi" har signifikant potentiale for værdiskabelse og afhjælper en "markedsfejl" idet området vil blive en kritisk del for kvanteteknologifødekæden i Danmark, men ikke kan udvikles af universiteter eller opstå på kommerciel basis.

DFM har i dag forskningsressourcer til at adressere området, og har etableret en position som deltager i det globale NMI kvantemetrologiforskningssamarbejde og –videndeling. DFM har endvidere, med investering i nye laboratorier primo 2018, et godt udgangspunkt for at udvikle og forankre aktiviteterne, samt et tæt og forpligtende samarbejde med de danske forskningsmiljøer og SMV'er, der skal anvende de udviklede kompetencer og ydelser.

Aktiviteterne i denne ansøgning anvender kompetencer udviklet i "Metrologisk Forskning og Udvikling" og "Anvendt Ramanspektroskopi".

9) Tidsplan og milepæle

Milepæletyper: Vidensamarbejde, -hjemtagning og kompetenceopbygning (**K**), Udvikling af teknologisk serviceydelse (**Y**), Inddragelse og videnspredning (**V**) og Andet (**A**). Milepælstype indgår i "År & ID".

År & ID	Specifikation
2019-K-01	Stabiliseret laserprodukt forbedres, således at frekvensstabilitet i området 1-100 s bliver kvantestøjsbegrænset.
2019-K-02	Kvantelyskilder udvikles og opstilling etableres baseret på optiske parametriske oscillatorer (OPOer) i samarbejde med KU-NBI. Støjreduktion på 5 dB i forhold til klassisk lyskilde.

¹⁷ https://msu.euramet.org/current_calls/support_for_networks_2018/SNTs/SNT-w04.pdf

¹⁸ Intended ESA tender 2018, Quantum-based sensing for PNT, <https://navisp.esa.int/opportunity/details/22/show>

¹⁹ Afsnit 2.1 i strategiplanen

²⁰ Afsnit 2.3 i strategiplanen

2019-Y-01	Ny ydelse: Kalibrering af enkelt-foton detektorer sporbar til SI enheden for optisk effekt. <i>Count rate</i> : 10^3 /s - 10^6 /s, relativ usikkerhed ≤ 5 %
2019-Y-02	Ny ydelse: Måling af kvantestøjs <i>Relative Intensity Noise</i> (RIN) af lasersystemer i området 400 nm-1800 nm sporbar til SI enheden for optisk effekt, usikkerhed ≤ 2 dBc/Hz ved -160 dBc/Hz niveau.
2019-V-01	Inddragelse af mindst 2 danske virksomheder i nye projekter.
2019-V-02	Mindst 3 publikationer med international bedømmelse og 1 konferencebidrag.
2019-V-03	Oprettelse af en hjemmeside for kvantemetrologi.
2019-V-04	Etablering af følgegruppe med mindst 7 medlemmer.
2019-V-05	Udarbejdelse af undervisningsmateriale, én forelæsning/år samt én eksperimentel øvelse/år i samarbejde med Københavns Erhvervsakademi til valgfaget <i>Quantum Computing</i> .
År & ID	Specifikation
2020-K-01	Kvantelyskilde implementeret i Raman mikroskop i samarbejde med DTU. Demonstreret 2 gange forbedret følsomhed i forhold til klassisk lyskilde.
2020-Y-01	Ny ydelse: Måling af lasers frekvensstøj sporbar til stabiliseret laser. Måleområde: 20 Hz – 5 MHz, følsomhed: 20 Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$.
2020-Y-02	Ny ydelse: Optisk karakterisering af nanotråde. Måleområde: Højde 1 - 10 μm , Usikkerhed < 10 %. Ydelsen demonstreres i samarbejde med KU-NBI.
2020-Y-03	Ny ydelse: Måling af kvanteeffektiviteten af optiske detektorer og fotodioder ved brug af kvantelyskilde. Relativ usikkerhed $\leq 1\%$.
2020-V-01	Inddragelse af mindst 3 danske virksomheder i nye projekter.
2020-V-02	Mindst 3 publikationer med international bedømmelse og 2 konferencebidrag.
2020-V-03	Afholdelse af videnspredningsseminar for danske virksomheder og universiteter. Seminaret afholdes hos DFM, danske netværk inddrages i muligt omfang.