

Forskning på kvanteområdet

Herunder samspillet mellem
universiteter og virksomheder

Juni 2022



Udgivet af Uddannelses- og Forskningsstyrelsen
Haraldsgade 53
2100 København Ø
Tel.: 7231 7800
ufs@ufm.dk
www.ufm.dk

Publikationen kan hentes på ufm.dk/publikationer

ISBN (elektronisk publikation): 978-87-94128-46-9

Forskning på kvanteområdet

Herunder samspillet mellem
universiteter og virksomheder

Juni 2022

Indhold

1. Resume	8
1.1 Formål og baggrund for kortlægningen	8
1.2 Metode og datagrundlag kort fortalt	8
1.3 Hovedkonklusioner fra kortlægningen	9
1.3.1 Dansk forskning inden for kvanteområdet er på en række områder i verdensklasse og nyder stor international anerkendelse	10
1.3.2 Finansiering fra offentlige og private fonde samt EU har spillet en stor rolle for udviklingen af dansk forskning på kvanteområdet	11
1.3.3 Der er fortsat behov for grundforskning, men også i stigende grad for strategisk forskning	11
1.3.4 Universiteternes samarbejde med virksomheder er præget af samarbejde med store – især internationale virksomheder eller meget små specialiserede virksomheder – bl.a. universiteternes egne spin-outs	12
1.3.5 Manglende viden og opmærksomhed om potentialerne blandt almindelige virksomheder samt et manglende innovations- og start-up-miljø kan være en udfordring fremadrettet	13
1.3.6 Den fortsatte udvikling af forsknings- og testinfrastruktur er vigtig for et fortsat stærkt dansk forsknings- og innovationsmiljø inden for kvanteområdet – det gælder både for universiteter, GTS'er og virksomheder	13
2. Indledning og metode	15
2.1 Indledning	15
2.2 Baggrund for kortlægningen	16
2.3 Kortlægningens afgrænsning af "forskning på kvanteområdet"	17
2.4 Kortlægningens metode, kilder og struktur	18
2.4.1 Spørgeramme med fokus på respondenternes vurderinger af dansk forskning på kvanteområdet generelt	19
2.4.2 Spørgeramme til institutter på universiteterne med forskningsaktiviteter inden for kvanteområdet	19
2.4.3 Spørgeramme til forskningsfonde, der har medfinansieret forskning på kvanteområdet	19
2.4.4 Egen kortlægning af internationale aktiviteter	20
2.4.5 Bibliometrisk analyse	20

2.5 Opmærksomhedspunkter i forhold til kortlægningens resultater	20
2.5.1 Opmærksomhedspunkter i forhold til de tre spørgeundersøgelser	20
2.5.2 Opmærksomhedspunkter i forhold til den bibliometriske analyse	21

3. Respondenternes vurderinger **22**

3.1 Indledning og metode	25
3.2 Respondenternes vurdering af forskning inden for kvanteområdet i Danmark	26
3.2.1 Status og kendetegn ved dansk forskning på kvanteområdet i dag	26
3.2.2 Styrker og potentialer i dansk forskning på kvanteområdet	27
3.2.3 Svagheder og udfordringer for dansk forskning på kvanteområdet	29
3.2.4 Status for dansk forskning på kvanteområdet inden for forskellige fagområder	29
3.3 Respondenternes vurdering af det nationale og internationale forskningssamarbejde inden for kvanteområdet	34
3.3.1 Det nationale samarbejde mellem de danske forskningsmiljøer inden for forskning på kvanteområdet	35
3.3.2 Det internationale samarbejde i forhold til forskning på kvanteområdet	35
3.4 Respondenternes vurdering af infrastruktur til brug for forskning og test	38
3.4.1 Status for relevant forsknings- og testinfrastruktur inden for kvanteområdet i en dansk sammenhæng	38
3.5 Respondenternes vurdering af finansiering af forskning på kvanteområdet	42
3.5.1 Finansiering af forskning på kvanteområdet	42
3.6 Respondenternes vurdering af samarbejdet mellem universiteter og virksomheder på kvanteområdet	45
3.6.1 Samarbejdet mellem danske universiteter og virksomheder i Danmark inden for forskning på kvanteområdet	45
3.6.2 Kommmercialisering og iværksættere på baggrund af forskningen inden for kvanteområdet i Danmark	46
3.7 Respondenternes vurdering af danske anvendelsespotentialer af kvanteforskning og kvanteteknologier	49
3.7.1 Potentialerne for anvendelse af kvanteforskning og kvanteteknologier i Danmark	49
3.8 Respondenternes vurderinger af forskerkompetencer og uddannelser inden for kvanteforskning	51
3.8.1 Den danske forskerbestand og talentmasse inden for kvanteforskningsområdet	51
3.8.2 Uddannelser inden for kvanteområdet i Danmark	53

4. Universiteternes forskning på kvanteområdet **55**

4.1 Indledning og metode	57
4.2 Omfanget og karakteren af forskning på kvanteområdet på de danske universiteter	59
4.2.1 Ansatte og årsværk inden for forskning på kvanteområdet	59
4.2.2 Typen af forskning inden for kvanteområdet	61
4.2.3 Forskningen fordelt på fagområder	63
4.2.4 Intern eller ekstern finansiering af forskning på kvanteområdet	64
4.2.5 Eksterne finansieringskilder til forskning på kvanteområdet	65
4.3 Universiteternes samarbejde med andre parter	66
4.3.1 Universiteternes samarbejdspartnere	66
4.3.2 Universiteternes type af samarbejde med virksomheder	67
4.4 Kommercialisering af universiteternes forskning – patenter og spin-outs	70
4.5 Uddannelser på bachelor-, kandidat og ph.d.-niveau samt efteruddannelse baseret på forskning inden for kvanteområdet	73
4.5.1 Uddannelser med undervisning i kvanteforskning	73
4.5.2 Nye uddannelser baseret på forskning inden for kvanteområdet	73
4.5.3 Planer om at øge indholdet af kvanteelementer i nuværende uddannelser	74
4.5.4 Ph.d.-uddannelser inden for kvanteområdet	75
4.5.5 Kvanterelateret efter- og videreuddannelse	76

5. Bevillinger til forskning inden for kvanteområdet 77

5.1 Indledning og metode	79
5.2 Bevillinger til kvanteforskning 2014-2021 fra offentlige og private fonde	79
5.2.1 Fondenes hidtidige og fremtidige overvejelser vedr. forskning på kvanteområdet	81
5.2.2 Bevillinger til forskning på kvanteområdet fra offentlige og private fonde	82
5.2.3 Bevillingsmodtagere	89
5.3 Dansk hjemtag fra EU's rammeprogram – Horizon 2020	92
5.3.1 Danske bevillinger fra EU's rammeprogram	93
5.3.2 Hovedkilder til dansk hjemtag af kvanteforskningsmidler fra EU	94
5.3.3 Danske bevillingsmodtagere	96
5.4 Bevillinger fra den nationale pulje til forskningsinfrastruktur	97

6. Internationalt udsyn 99

6.1 Indledning	100
6.2 Indsatsen i EU	101
6.2.1 EU's Quantum Flagship	101
6.2.2 Horizon Europe og Klyngeprogrammet "Det digitale område, industrien og rummet", Cluster 4	101
6.2.3 EuroHPC	102

6.2.4 EuroQCI	103
6.3 Kvanteteknologi i det europæiske rumsamarbejde	104
6.3.1 Viden om klimaforandringer	104
6.3.2 Sikker kommunikation og overvågning af trafikken i rummet	104
6.3.3 Grøn omstilling fra rummet	105
6.4 Internationale forskningsinfrastrukturer	105
6.4.1 ESS – European Spallation Source	105
6.4.2 CERN	106
6.5 NATO Center for Quantum Technologies	106
6.6 Kvanteteorrådet i andre lande	107
6.7 Internationalt samarbejde og kommerialisering	110
6.7.1 Bilaterale samarbejder	110
6.7.2 Fælleserklæring mellem Danmark og USA	111
6.7.3 Innovationscentre	111
6.7.4 Invest in Denmark, Trade Council og Techplomacy	112

7. Bibliometrisk analyse 114

7.1 Metode og afgrænsning	116
7.1.1 Sammenligningslande	117
7.1.2 Indikatorer	117
7.2 Kvanteforskningen i dansk perspektiv	118
7.2.1 Kvanteforskning sammenlignet med dansk forskning generelt	118
7.2.2 Karakteristik af dansk kvanteforskning	119
7.3 Kvanteforskningen i internationalt perspektiv	125
7.3.1 Publiceringsvolumen i internationalt perspektiv	125
7.3.2 Specialiseringsgraden inden for kvanteforskning hos udvalgte lande	126
7.3.3 Andel af højt citerede publikationer	127
7.3.4 Internationalt samarbejde	128
7.3.5 Offentlig-privat sampublicering	129

8. Bilag 131

8.1 Besvarelser på spørgeramme med fokus på respondenters vurdering af dansk forskning på kvanteområdet	131
8.2 Besvarelser på spørgeramme med fokus på universiteternes aktiviteter inden for dansk forskning på kvanteområdet	133
8.3 Besvarelser på spørgeramme med fokus på uddelinger af forskningsmidler til dansk forskning på kvanteområdet	134
8.4 Søgestreng til den bibliometriske analyse	135

1. Resume

Som opfølgning på den politiske aftale om fordeling af forskningsreserven for 2022 er der gennemført en kortlægning af forskning på kvanteområdet i Danmark – især med fokus på samspillet mellem universiteter og virksomheder.

Kortlægningen vil danne udgangspunkt for udviklingen af en kommende strategi for kvanteforskningen i Danmark.

Kortlægningen er baseret på indsamling af data fra en lang række delanalyser og hovedresultaterne herfra præsenteres i dette kapitel.

1.1 Formål og baggrund for kortlægningen

Som opfølgning på den politiske aftale om fordeling af forskningsreserven for 2022 er der gennemført en kortlægning af forskning på kvanteområdet i Danmark – herunder især med fokus på samspillet mellem universiteter og virksomheder.

Kortlægningen vil danne grundlag for en kommende kvanteforskningsstrategi og drøftelser i forbindelse med forhandlinger i efteråret 2022 om fordelingen af forskningsreserven for 2023.

Samlet afdækker kortlægningen blandt andet omfanget og karakteren af forskningen på området, styrker og svagheder for udviklingen, universiteternes samspil med virksomheder, kommercialiseringen af forskningen, opbygningen af kompetencer og Danmarks internationale samarbejde inden for kvanteområdet.

1.2 Metode og datagrundlag kort fortalt

Kortlægningen er baseret på indsamling af data fra en lang række delanalyser. Det drejer sig om:

- En spørgeundersøgelse blandt relevante interessenter med henblik på at afdække deres vurdering af dansk forskning inden for kvanteområdet fra en række forskellige vinkler

- En spørgeundersøgelse målrettet de institutter på universiteterne, der har forskningsaktiviteter inden for kvanteområdet vedr. deres aktiviteter på kvanteområdet
- En spørgeundersøgelse målrettet de private og offentlige forskningsfonde med henblik på at afdække deres bevillinger og øvrige overvejelser omkring forskning på kvanteområdet
- En kortlægning af internationale aktiviteter på kvanteområdet
- En bibliometrisk analyse af forskningspublikationer på kvanteområdet

Læs mere om baggrund for udviklingen inden for kvanteteknologi, kortlægningens afgrænsning af forskning på kvanteområdet, metode og struktur i rapporten samt forhold i forhold til tolkningen af kortlægningens resultater i kapitel 2.

1.3 Hovedkonklusioner fra kortlægningen

Den gennemførte kortlægning har gennem en række forskellige delanalyser belyst dansk forskning inden for kvanteområdet fra mange forskellige vinkler og indeholder derfor mange delresultater.

I dette afsnit er de overordnede hovedlinjer på tværs af kortlægningens forskellige delanalyser trukket op. En mere omfattende gennemgang af alle kortlægningens hovedresultater kan ses kortlægningens enkelte kapitler, der hver især præsenterer resultaterne af kortlægningens enkelte delanalyser.

Boks 1.1 Kortlægningens hovedkonklusioner

1. Dansk forskning inden for kvanteområdet er på en række områder i verdensklasse og nyder stor international anerkendelse
 2. Finansiering fra offentlige og private fonde samt EU har spillet en stor rolle for udviklingen af dansk forskning på kvanteområdet
 3. Der er fortsat behov for grundforskning, men også i stigende grad for strategisk forskning
 4. Universiteternes samarbejde med virksomheder er præget af samarbejde med store – især internationale virksomheder eller meget små specialiserede virksomheder – bl.a. universiteternes egne spin-outs
 5. Manglende viden og opmærksomhed om potentialerne blandt almindelige virksomheder samt et manglende innovations- og start-up-miljø kan være en udfordring fremadrettet
 6. Den fortsatte udvikling af forsknings- og testinfrastruktur er vigtig for et fortsat stærkt dansk forsknings- og innovationsmiljø inden for kvanteområdet – det gælder både for universiteter, GTS'er og virksomheder
-

Hovedkonklusionerne fra kortlægningen er:

1.3.1 Dansk forskning inden for kvanteområdet er på en række områder i verdensklasse og nyder stor international anerkendelse

Dansk forskning på kvanteområdet står generelt stærkt og vurderes af de adspurgte interessenter (herefter kaldet respondenterne) til på en række fagområder (bl.a. inden for kvantefotonik, kvantematerialer og kvantefysik) at være i verdensklasse.

Den bibliometriske analyse sammenligner Danmark med 11 lande. Sammenligningen viser, at Danmark – sammen med Schweiz – har en høj publikationsvolumen per mio. indbyggere inden for forskning på kvanteområdet, en relativt høj specialiseringsgrad, og en høj andel af publikationer blandt de 10 procent mest citerede publikationer. Danmark ligger dermed generelt højt på alle disse tre parametre – dog med Schweiz et stykke foran Danmark samlet set.

I en dansk sammenligning viser den bibliometriske analyse, at kvanteforskningen i Danmark har en endnu højere gennemslagskraft (målt på antal citationer), end den generelt høje gennemslagskraft dansk forskning har som helhed. Københavns Universitets kvanteforskning udmærker sig i den forbindelse ved at have en citationsgrad blandt andre forskere, der er særligt høj (feltvægtet gennemsnit).

Flere af kortlægningens delanalyser viser, at stort set al forskning inden for kvanteområdet i Danmark i dag sker på Københavns Universitet, Aarhus Universitet, Danmarks Tekniske Universitet og Syddansk Universitet – heraf alene 49 procent på Københavns Universitet målt på antal årsværk (især på Niels Bohr Institutet).

Universitetsinstitutter med forskningsaktiviteter på kvanteområdet peger på, at samarbejde med udenlandske universiteter og videninstitutioner spiller en stor rolle for deres forskning på området. Respondenterne peger på, at dansk kvanteforskning nyder stor international anerkendelse, og danske kvanteforskningsmiljøer anses for at være attraktive og ledende internationale samarbejdspartnere. Der peges dog også på, at det internationale samarbejde i stigende grad kompliceres af den geopolitiske udvikling.

Også samarbejdet de danske universiteter imellem er udbredt og vurderes af respondenterne til at være konsolideret og udbygget gennem de seneste år. Der peges dog også på et behov for, at forskning på kvanteområdet udbredes til flere typer af forskningsmiljøer, og at der er et uforløst potentiale inden for tværdisciplinært forsknings-samarbejde – hvilket især vil være relevant i forhold til den videre udvikling af kvanteteknologi.

Forskningsmiljøerne anses for at have været gode til at tiltrække talentfulde forskere fra hele verden, og Danmark har gode uddannelser på området, men der peges på, at der fremadrettet kan forventes stigende konkurrence om forskertalenterne internationalt.

Respondenterne peger også på, at udviklingen af forskning og teknologi inden for kvanteområdet på mange måder fortsat er afhængig af grundforskning, og det præger også de danske universiteters forskning på området. Universiteternes forskning sker derfor i høj grad inden for brede generelle fagområder med mange potentielle anvendelsesmu-

ligheder og i knap så høj grad endnu inden for specifikke teknologirettede forskningsområder. Det gælder dog ikke i forhold til kvantecomputere – der dog i sig selv også er et bredt teknologiområde med behov for mange forskellige forskningsinput.

1.3.2 Finansiering fra offentlige og private fonde samt EU har spillet en stor rolle for udviklingen af dansk forskning på kvanteområdet

Respondenterne peger på, at offentlige og private fonde har spillet en helt afgørende rolle i at skabe den styrkeposition, Danmark har i dag. Der peges især på betydningen af Grundforskningsfonden, VILLUM FONDEN, Carlsbergfondet og i stigende grad Novo Nordisk Fonden, som endvidere fremadrettet forventes at spille en stadig større strategisk rolle inden for kvanteområdet. Bevillingerne fra offentlige og private fonde har siden 2014 og frem til i dag beløbet sig til mere end 1,2 mia. kr. (faste priser).

Uddelingerne fra fondene er både præget af et stort antal forholdsvis små bevillinger (under 1 mio. kr.) men også af en række endog meget store bevillinger. Samlet udgør 7 bevillinger på mere end 50 mio. kr. hver mere end en tredjedel af det samlede bevilgede beløb.

Københavns Universitet har været den største bevillingsmodtager efterfulgt af DTU og Aarhus Universitet. Set i forhold til de enkelte bevillingsmodtagere går hovedparten af bevillingerne til professorer og lektorer, lidt over halvdelen af bevillingerne til forskere fra Danmark, mens resten er til forskere fra udlandet – primært fra det øvrige Europa, og langt hovedparten af bevillingsmodtagerne er mænd.

Også hjemtag fra EU's rammeprogrammer for forskning har spillet en stor rolle for udviklingen. Inden for European Research Council (ERC) har Danmark været meget succesfuld, og bevillinger herfra er af respondenterne vurderet til at have været af meget stor betydning for flere af de eksisterende miljøer på området. Danmark er endvidere godt placeret i forhold til hjemtag og engagement i EU's Quantum Flagship, som blev igangsat i 2018. Danmark har hjemtaget bevillinger fra rammeprogrammet Horizon 2020 for godt 0,5 mia. kr. i perioden 2014-2020.

1.3.3 Der er fortsat behov for grundforskning, men også i stigende grad for strategisk forskning

I forhold til det fremadrettede behov for forskningsfinansiering peger en bred kreds af respondenter på, at det høje danske niveau inden for grundforskning bør fastholdes for at opretholde den danske position på området – og gerne udbredes til flere forskningsmiljøer.

Respondenterne peger samtidig på, at en mangel på langsigtede midler og stabil finansiering til strategisk forskning kan blive en udfordring fremadrettet, og at der derfor fremadrettet bør findes en god balance mellem understøttelse af grundforskning, anvendt forskning og kommerialisering. Både universiteter, erhvervsorganisationer og private fonde peger på et behov for mere fokus på forskningsfinansiering rettet mod anvendt forskning og innovation.

En række respondenterne understreger dog samtidig, at man skal huske på, at kvanteområdet stadig er i en tidlig udviklingsfase, og at de store kvanteteknologiske gennembrud, der på sigt må forventes, stadig er afhængige af fundamentale grundvidenskabelige fremskridt. Der peges endvidere på, at det er for tidligt at sige, hvilke teknologier der vil vise sig mest levedygtige, og der bør derfor fortsat sættes bredt både i forhold til forskning og teknologiudvikling.

En række respondenter peger også på at, "business casen" for forretninger baseret på kvanteteknologi kun så småt er ved at folde sig ud, og der kan derfor være potentiale i, at der – ud over midler til grundforskning – afsættes flere midler til strategisk forskning, forstået som midler med en tematisk binding, men uden krav om tung industriinvolvement.

Der efterspørges generelt en bred palet af virkemidler. Særlig erhvervsorganisationerne peger på behovet for større indsatser og specifikke anvendelsesorienterede flagskibsprojekter, mens universiteterne især nævner behov for flere midler til yngre forskere.

1.3.4 Universiteternes samarbejde med virksomheder er præget af samarbejde med store – især internationale virksomheder eller meget små specialiserede virksomheder – bl.a. universiteternes egne spin-outs

Undersøgelsen blandt universitetsinstitutter med forskningsaktiviteter inden for kvanteområdet peger på, at ca. halvdelen af institutterne angiver at samarbejde med danske eller udenlandske virksomheder. Næsten alle institutterne indgår i et formelt eller uformelt netværkssamarbejde med virksomheder, og ca. halvdelen har direkte forsknings-samarbejde med virksomheder. Knap en tredjedel samarbejder med virksomheder omkring uddannelse, mens meget få institutter har fået direkte støtte fra virksomheder (henholdsvis KPMG og Microsoft) til gennemførelse af forskningsprojekter, finansiering af forskerstillinger, bygninger, indkøb af forskningsudstyr mv.

Universiteternes samarbejde med virksomheder er generelt præget af samarbejde med store – især internationale virksomheder som f.eks. IBM, Microsoft og KPMG eller meget små specialiserede virksomheder – herunder især universiteternes egne spin-outs som f.eks. Qdevil og Quantum Sparrow.

Den bibliometriske analyse viser, at universiteterne kun i begrænset omfang sampublicerer med erhvervslivet inden for kvanteområdet. Sampubliceringen med virksomheder er således væsentlig mindre, end hvad der er tilfældet for den samlede danske forskning og i forhold til de udvalgte sammenligningslande. Det skyldes sandsynligvis det store danske fokus på grundforskning inden for kvanteområdet. Jo mere anvendelsesorienteret og markedsnært forskningen er, desto højere vil andelen af virksomheder, der deltager i publikationen, typisk være.

Den bibliometriske analyse viser også, at danske forskere især sampublicerer med virksomheder inden for it- og telebranchen – hvoriblandt Microsoft fra USA er den primære samarbejdspartner i forhold til publikationer. Generelt er billedet dog kendetegnet ved, at universiteternes samarbejde omkring publikationer sker med mange forskellige virksomheder (40) i stedet for få, store samarbejdspartnere.

Det skal bemærkes, at et begrænset publikationssamarbejde ikke i sig selv behøver at betyde, at virksomhedssamarbejde ikke finder sted. Virksomheder kan være tilknyttet kvanteprojekter eller være aftagere af projektsresultater uden at optræde som medforfatter på publikationerne.

1.3.5 Manglende viden og opmærksomhed om potentialerne blandt almindelige virksomheder samt et manglende innovations- og start-up-miljø kan være en udfordring fremadrettet

Respondenterne peger på, at der er en stigende opmærksomhed omkring teknologiske anvendelser af forskning på kvanteområdet i Danmark. Der peges endvidere på en række erhvervsområder, som rummer særligt oplagte muligheder for at drage nytte af fremtidig kvanteteknologi. Det gælder ikke mindst inden for medicinalindustrien, optimering af logistik, finans- og fintech-sektoren, IT-sikkerhed samt grøn omstilling.

Respondenterne peger dog samtidig over en bred kam på, at manglende viden og opmærksomhed i erhvervslivet om potentialerne samt fraværet af et egentligt innovations- og start-up-miljø på området udgør en udfordring for at realisere potentialerne.

Respondenterne peger på, at universiteterne i dag især samarbejder med de relativt få virksomheder, der allerede arbejder med eller udvikler kvanteteknologi, og der peges på et behov for at få flere fremtidige aftagervirksomheder inddraget. Der peges dog på, at det vanskeliggøres af, at en række af potentialerne inden for området for mange virksomheder ikke står klart eller stadig synes at ligge et stykke ud i fremtiden, da der på mange områder fortsat er tale om forholdsvis umodne teknologier.

Dette spiller også ind i potentialerne for kommercialisering af forskning og understøttelse af start-ups og iværksættere på baggrund af forskning inden for kvanteområdet i Danmark. Respondenterne peger på, at både kvanteindustrien og markedet for kvanteteknologi i dag er relativt umodent, og at der er behov for bedre adgang til kapital samt kvante-incubator-miljøer til at understøtte sparring omkring forretningsudvikling mv.

NATO's nye kvantecenter, der etableres i Danmark, forventes at kunne bidrage til at øge den erhvervsmæssige nyttiggørelse af dansk grundforskning i kvanteteknologi. Formålet med kvantecenteret er at bringe forskere, entreprenører og investorer sammen med henblik på at udvikle løsninger baseret på dual-use. Centeret vil bestå af en accelerator, der er et konkurrencepræget forløb for udvalgte start-ups, som strækker sig over 12-18 måneder samt et testcenter og fabrikationsenhed, der består af flere fysiske laboratorier og testfaciliteter, hvor nye innovative idéer kan udvikles og testes.

1.3.6 Den fortsatte udvikling af forsknings- og testinfrastruktur er vigtig for et fortsat stærkt dansk forsknings- og innovationsmiljø inden for kvanteområdet – det gælder både for universiteter, GTS'er og virksomheder

Respondenterne peger på, at adgangen til forsknings- og testinfrastruktur er vigtig for et godt forsknings- og innovationsmiljø i Danmark. Det gælder både i forhold til universiteternes muligheder for forskning og rekruttering og i forhold til at understøtte virksomheder i udviklingen og anvendelsen af kvanteteknologi og nye produkter.

Det fremhæves, at Danmark har et godt udgangspunkt i den allerede eksisterende forsknings- og testinfrastruktur. Det gælder blandt andet i kraft af infrastrukturer på universiteterne (som f.eks. renrumsfaciliteten Nanolab på DTU) og nationale infrastrukturer finansieret via den nationale pulje for forskningsinfrastruktur. Det gælder også i kraft af dansk deltagelse i en række internationale infrastrukturer som bl.a. det danske medværtskab af materialeforskningsfaciliteten ESS, som forventes at få en direkte effekt på kvanteforskningen i Danmark.

Samtidig peges på, at for fortsat at være konkurrencedygtig er det afgørende, at infrastrukturen udbygges i takt med udviklingen inden for forskningen og teknologien. Der peges i den forbindelse især på et øget fremtidig behov for forsknings- og testinfrastruktur inden for supercomputere (HPC, High Performance Computing), kvantecomputere, kvantekommunikationsnetværk og faciliteter til materialeforskning.

En række respondenter efterspørger i forlængelse heraf strategiske investeringer til store europæiske initiativer som EuroHPC til fremme af anvendelsen af super- og kvantecomputere og EuroQCI til opbygningen af kommunikation baseret på kvanteteknologi, hvor Danmark allerede har et gryende engagement. Samtidig efterspørges også bedre muligheder for finansiering af nationale forsknings- og testinfrastrukturer, der fremsynet kan understøtte den hastige udvikling af kvanteteknologi.

2. Indledning og metode

I denne kortlægning af forskning på kvanteområdet i Danmark sættes fokus på status og fremtidige muligheder for dansk forskning på området.

Kortlægningen afdækker blandt andet omfanget og karakteren af forskningen på området, styrker og svagheder for udviklingen, universiteternes samspil med virksomheder, kommercialiseringen af forskningen, opbygningen af kompetencer og Danmarks internationale samarbejde inden for kvanteområdet.

Kortlægningen bygger primært på en spørgeundersøgelse blandt universiteter, forskningsfonde, organisationer m.fl. Derudover er gennemført en kortlægning af danske internationale aktiviteter på området og en bibliometrisk analyse.

2.1 Indledning

Baseret på den helt nye forståelse af de fysiske love i naturens mindste dele, har den første kvanterevolution siden midten af 1900-tallet i høj grad været med til at forme den verden, vi kender i dag. Den første kvanterevolution resulterede i banebrydende teknologier som f.eks. transistorer og lasere og har dannet baggrund for udviklingen af alt fra computere, telekommunikation, satellitnavigation, smartphones og moderne medicinsk diagnostik.

I dag taler man i stigende grad om den anden kvanterevolution, hvor man udnytter de enorme fremskridt, der er sket de senere år i evnen til at identificere og manipulere enkeltdele på kvanteniveau – som f.eks. fotoner, elektroner, atomer og molekyler.

Udviklingen og udnyttelsen af nye teknologier baseret på viden om kvantefysikken forventes – bl.a. i EU – at have en afgørende betydning for den fremtidige velstand for lande og regioner over hele verden. Kvanteteknologier forventes at have samfundsforandrende potentiale med fundamentale konsekvenser for samfundet og økonomien som helhed.

Brugen af kvanteteknologier forventes fremover at kunne udvikles, så det bliver muligt at løse samfundsproblemer, der i dag anses for at være uløselige. Det gælder f.eks. i forhold til udvikling af helt nye lægemidler, optimering af trafikstrømme eller økonomiske strategier, udvikling af nye materialer, der stadig er utænkelige i dag eller brug af ubrydelig sikker kommunikation.¹

Når man taler om den fremtidige anvendelse og udnyttelse af kvanteforskning, er der især fokus på udviklingen af en praktisk anvendelig kvantecomputer, som vil kunne udføre beregningsopgaver, der ligger langt uden for rækkevidden af den nuværende computerteknologi. Men allerede nu gør andre nye kvanteteknologier på den forholdsvis korte bane os i stand til at opsamle, måle og sende informationer på måder, vi ikke har kunnet før.

Med arven fra Niels Bohrs pionerforskning inden for kvantemekanik og atomets struktur, samt betragtelige investeringer i grundforskning og forskningsinfrastruktur, har Danmark et stærkt forsknings- og uddannelsesmiljø på kvanteområdet. Dette gør, at danske forskere og virksomheder umiddelbart har gode muligheder for at være med helt fremme i den teknologiske udvikling i takt med at fokus hurtigt rykkes fra grundforskning til innovation og anvendelse.

Denne kortlægning har til formål at afdække, hvordan det står til med den danske forskning på kvanteområdet i dag – hvilke styrker der er, og hvilke udfordringer vi står overfor. Kortlægningen skal endvidere lægge grundlaget for en dansk strategi på området, som kan bidrage til, at vi i Danmark kan udnytte de nye potentialer i kvanteforskningen og kvanteteknologierne bedst muligt.

2.2 Baggrund for kortlægningen

Kortlægningen af forskning på kvanteområdet i Danmark er sat i gang som opfølgning på den politiske aftale om fordeling af forskningsreserven for 2022². Heri fremgår følgende:

"Aftalepartierne noterer sig, at uddannelses- og forskningsministeren i løbet af 1. halvår af 2022 vil gennemføre en kortlægning af forskning inden for kvanteområdet i Danmark og samspillet mellem universiteter og virksomheder med henblik på en kvanteforskningsstrategi. Dette vil danne grundlag for en drøftelse ved næste års forskningsforhandlinger."

Nærværende kortlægning vil dermed skulle danne baggrund for udviklingen af en dansk kvanteforskningsstrategi. Med henblik på at danne grundlag for målsætninger og konkrete indsatsområder i strategien identificerer kortlægningen derfor status og fremtidige muligheder for udvikling af dansk forskning og innovation på kvanteområdet. Kortlægningen bidrager bl.a. til at skabe et overblik over omfanget og karakteren af forskningen på området, styrker og svagheder for den fremtidige udvikling, universiteternes

¹ Strategic Research Agenda, EUs Quantum Flagship, 2020

² Aftale mellem regeringen (Socialdemokratiet), Venstre, Dansk Folkeparti, Socialistisk Folkeparti, Radikale Venstre, Enhedslisten, Det Konservative Folkeparti, Nye Borgerlige, Fri Grønne, Liberal Alliance, Alternativet og Kristendemokraterne om: Et grønnere, sundere og teknologisk stærkere Danmark - Fordeling af forskningsreserven mv. i 2022 indgået 28. oktober 2021.

samspil med virksomheder, kommercialiseringen af forskningen, opbygningen af kompetencer og Danmarks internationale samarbejde inden for kvanteområdet.

2.3 Kortlægningens afgrænsning af ”forskning på kvanteområdet”

I forhold til kortlægningen af forskning på kvanteområdet i Danmark har det ikke været muligt at tage udgangspunkt i en på forhånd defineret fælles forståelse af, hvad der er omfattet af begrebet kvanteforskning. Det betyder også, at det ikke er muligt at samle viden om forskningens omfang mv. fra Danmarks Statistik, Uddannelses- og Forskningsstyrelsen forskningsbarometre, offentlige og private fondens bevillingsdatabaser, årsrapporter fra universiteter mv.

Gennem desk research samt dialog med universiteter og øvrige interessenter er der derfor som led i kortlægningen etableret en afgrænsning af begrebet, som kortlægningen har kunnet tage udgangspunkt i. Afgrænsningen er også meldt ud til de respondenter, der har skulle besvare spørgerammer mv. (se afsnit 2.4). Afgrænsningen har også i et vist omfang dannet udgangspunkt for afgrænsningen af kvanteområdet i forbindelse med den gennemførte bibliometriske analyse, om end det har været nødvendigt at supplere afgrænsningen til dette specifikke formål.

Arbejdet omkring afgrænsningen af forskning på kvanteområdet har betydet, at der i denne kortlægning særlig er sat fokus på den forskning, som relaterer sig til ”den anden kvanterevolution”, og som gennem grundforskning eller anvendt forskning evt. på sigt kan danne grundlag for videre udvikling og anvendelse af 2. generations-kvanteteknologi i samfundet.

Kortlægningens nærmere forståelse af, hvad forskning på kvanteområdet indeholder, kan ses i Boks 2.1.

Boks 2.1 Kortlægningens forståelse af forskning på kvanteområdet

"Den første kvanterevolution" opstod i midten af 1900-tallet ud af den viden om de fysiske love for naturens mindste dele, som blev opdaget i 1920'erne og 1930'erne – ikke mindst på Niels Bohrs Institut for Teoretisk Fysik på Københavns Universitet. Første generations-quanteteknologi blev baseret på den dengang helt nye forståelse af, hvordan for eksempel elektroner og fotoner opfører sig efter kvantefysiske regler (grundlæggende kvantemekanik). Denne nye viden gav os f.eks. transistoren i 1947 og laseren i 1960 – komponenter, der banede vejen for hurtige og billige computere og et globalt internet, der kan transportere enorme datamængder lynhurtigt rundt på kloden. Også atomkraft og atomure – og dermed GPS-systemet – er baseret på denne nye viden, ligesom grundlæggende processer i kemien, biologien og medicin er kvantemekaniske i natur, og viden herom har bidraget til udviklingen af f.eks. avanceret elektronik og katalysatorer. Disse teknologier kan samlet betegnes *1. generations-quanteteknologier*.

I USA, EU, Kina og andre af verdens store økonomier investeres i disse år store beløb i kvanterelateret forskning, som skal lede til nye quanteteknologier baseret på kontrol med enkelte atomare partikler, avancerede nye materialer og kvantemekaniske fænomener som superposition, interferens og entanglement. Denne udvikling kan populært betegnes som "*den anden kvanterevolution*" og de nye teknologier, som udspringer heraf som *2. generations-quanteteknologi*.

I denne kortlægning har vi valgt, at der ved "*forskning på kvanteområdet*" forstås forskning, som relaterer sig til den anden kvanterevolution, og som gennem grundforskning eller anvendt forskning evt. på sigt kan danne grundlag for videre teknologiudvikling og -anvendelse af *2. generations-quanteteknologi* i samfundet.

Dette kan omfatte forskningsemner som f.eks. grundforskning i kvantemekaniske fænomener inden for f.eks. kvantefysik, kvantekemi, og den matematik, der beskriver disse. Det kan også være forskning inden for f.eks. kvantecomputing; kvantefotonik, kvantesimulering; kvantematerialer; kvantekommunikation og kryptering; kvantesensing og -metrologi; kvantealgoritmer og programmering af kvantecomputere. Det kan endvidere bl.a. være forskning, der retter sig mod anvendelse af de nye quanteteknologier inden for områder, som f.eks. life science, kunstig intelligens eller den grønne omstilling.

Denne tilgang indebærer, at forskningsemner (eksempelvis højenergifysik eller kosmologi), som umiddelbart ikke forbindes med den anden kvanterevolution, ikke er omfattet af kortlægningen.

2.4 Kortlægningens metode, kilder og struktur

Kortlægningen er baseret på indsamling af data fra en lang række kilder. Det gælder ikke mindst tre spørgerammer udviklet til brug for indsamling af relevante vurderinger og data fra universiteter, offentlige og private forskningsfinansierende fonde, GTS-in-

stitutter, erhvervs- og brancheorganisationer, faglige organisationer, viden og erhvervs-klynger, samt relevante ministerier m.fl. Derudover er der gennemført en intern kortlægning af internationale aktiviteter på området og en bibliometrisk analyse.

2.4.1 Spørgeramme med fokus på respondenternes vurderinger af dansk forskning på kvanteområdet generelt

For at afdække status for dansk forskning på kvanteområdet i bred forstand blev der udsendt en spørgerramme til en lang række interessenter blandt universiteter, GTS'er, innovationsnetværk, erhvervsorganisationer, offentlige og private fonde m.fl.

Spørgerammen indeholdte en række brede spørgsmål med henblik på at indsamle alle respondenters vurdering af status og fremtidige potentialer og udfordringer for dansk forskning på kvanteområdet i bred forstand på en lang række områder. Spørgsmålene handlede bl.a. om dansk forsknings styrkepositioner, nationalt og internationalt forskningssamarbejde, infrastruktur, finansiering af forskningen, samarbejdet mellem virksomheder og universiteter, anvendelsespotentialer samt kompetencer og uddannelse. Resultaterne fra spørgerammen er primært afspejlet i kortlægningens kapitel 3.³

Respondenter, hvorfra der er modtaget svar, kan ses i afsnit 8.1.

2.4.2 Spørgeramme til institutter på universiteterne med forskningsaktiviteter inden for kvanteområdet

For at afdække omfanget og karakteren af forskningen på de danske universiteter inden for forskning på kvanteområdet blev der udsendt en spørgeramme til alle danske universiteter.

Spørgerammen indeholdt en række specifikke spørgsmål målrettet de enkelte institutter på universiteterne med forskningsaktiviteter inden for kvanteområdet. Spørgsmålene rettede sig mod institutternes forskningsaktiviteter, samarbejds mønstre, kommercialiseringsaktiviteter og uddannelser. Resultaterne fra spørgerammen er primært afspejlet i kortlægningens kapitel 4.

Institutter, hvorfra der er modtaget svar, og som har angivet forskningsaktiviteter inden for kvanteområdet, kan ses i afsnit 8.2.

2.4.3 Spørgeramme til forskningsfonde, der har medfinansieret forskning på kvanteområdet

For at afdække omfanget og karakteren af medfinansiering fra de danske offentlige og private forskningsfinansierende fonde blev der udsendt en spørgeramme til en lang række fonde med potentielle aktiviteter inden for området.

³ Respondenterne er også blevet bedt om at besvare en række spørgsmål med relation til udviklingen af den kommende strategi for kvanteforskning i Danmark. Respondenternes besvarelser og input fra denne del af spørgerammen vil blive anvendt i forbindelse med udviklingen af strategien.

Spørgerammen indeholdte en række specifikke spørgsmål vedrørende fondenes konkrete bevillinger og deres øvrige overvejelser omkring forskning på kvanteområdet. Resultaterne fra spørgerammen er primært afspejlet i kortlægningens kapitel 5.

Forskningsfonde, hvorfra der er modtaget svar, og som har angivet at have uddelt bevillinger til forskning på kvanteområdet, kan ses i afsnit 8.3.

2.4.4 Egen kortlægning af internationale aktiviteter

For at tegne et billede af Danmark i et internationalt perspektiv er der gennemført en intern kortlægning af en lang række danske aktiviteter på det internationale område – herunder også en indsamling af data om en række andre landes kvantestrategier. Resultaterne fra den interne kortlægning er primært afspejlet i kortlægningens kapitel 6.

2.4.5 Bibliometrisk analyse

For at vurdere dansk forskning på kvanteområdet ud fra en bibliometrisk vinkel er der gennemført en bibliometrisk analyse, der belyser omfanget af danske forskningspublikationer, indhold, specialisering og gennemslagskraft i såvel en national som international kontekst. Samtidig analyseres samarbejdsmønstre på tværs af lande, virksomheder og institutioner. Resultaterne fra den bibliometriske analyse er primært afspejlet i kortlægningens kapitel 7.

2.5 Opmærksomhedspunkter i forhold til kortlægningens resultater

Læsningen af kortlægningen bør ske med en række *forbehold* for øje. Det gælder både de spørgebaserede analyser og den bibliometriske analyse.

2.5.1 Opmærksomhedspunkter i forhold til de tre spørgeundersøgelser

I forhold til de dele af kortlægningen, der er baseret på de tre spørgerammer, gælder det følgende forhold:

- Der har ikke på forhånd ligget en bredt accepteret definition eller fælles forståelse af, hvad ”forskning inden for kvanteområdet” dækker. Det har derfor været nødvendigt som en del af kortlægningen at udvikle en forståelse og afgrænsningen af, hvad der forstås som ”Forskning inden for kvanteområdet” jf. ovenfor. Den manglende entydige afgrænsning af området kan give en usikkerhed i indmeldingerne.
- Med afsæt i afgrænsningen, som giver et vist fortolkningsrum, har respondenterne selv foretaget omtrentlige skøn og vurderinger ift., hvad der er talt med, når data for f.eks. forskerårsværk og forskningsbevillinger er blevet indrapporteret til kortlægningsarbejdet. Eftersom opgørelsestilgange kan variere på tværs af respondenter er data i kortlægningen behæftet med en række usikkerheder.
- Der er kun i meget lille omfang taget kontakt til respondenter, hvorfra der ikke er modtaget svar inden for svarfristen eller taget kontakt for at kvalitetssikre de indberettede besvarelser og data.

- Det er i vidt omfang gjort muligt for respondenterne at indberette et skøn over deres indsats inden for kvanteforskning. En meget præcis og dybdegående kortlægning af området ville indebære et ganske stort ressourceforbrug blandt de respondenter, som er omfattet af kortlægningsarbejdet, herunder ikke mindst universiteterne. På grund af den korte tidsfrist for kortlægningen har det været prioriteret at få så mange svar ind i stedet for – også selvom der derved i et vist omfang bliver tale om skøn.
- Det har ikke været stillet som krav eller været forventet, at alle respondenter ville svare på alle spørgsmål. I stedet er respondenterne blevet opfordret til at svare på de spørgsmål, de kunne, eller som var relevante for dem. Det kan i visse tilfælde gøre det vanskeligt at afgøre, om et ubesvaret spørgsmål skal tolkes som et nej eller blot som ikke besvaret/ved ikke.

2.5.2 Opmærksomhedspunkter i forhold til den bibliometriske analyse

I forhold til den bibliometriske analyse skal man være opmærksom på følgende:

- Til brug for den bibliometriske analyse har det været nødvendigt at udvikle en særlig søgestreng til brug for analysen. Søgestrengen tager så vidt muligt udgangspunkt i den samme afgrænsning af forskning på kvanteområdet, der er anvendt i forbindelse med de tre spørgeundersøgelser jf. Boks 2.1. For at skabe et datasæt, der bedst muligt identificerer publikationer fra anden generation og færrest mulige fra første, baseres den bibliometriske analyse derfor på en søgestreng med søgeord, der specifikt relaterer til anden generation kvanteforskning, frem for en generel søgning alene på den overordnede term "Quantum". Ligeledes afgrænses perioden til 2011-2020, så det alene er den seneste forskning, der er inkluderet.

3. Respondenternes vurderinger

Dansk forskning på kvanteområdet står generelt stærkt, og der er en stigende opmærksomhed omkring teknologiske anvendelser af forskning på kvanteområdet i Danmark. Dansk forskning har samtidig en række muligheder og udfordringer i forhold til udviklingen på længere sigt.

En lang række respondenter er blevet bedt om at give deres vurdering af status for dansk forskning på kvanteområdet. Respondenterne er blandt andet universiteter, offentlige og private forskningsfinansierende fonde, GTS-institutter, erhvervs- og brancheorganisationer, faglige organisationer, viden og erhvervsklynger, ministerier m.fl.

Dette kapitel præsenterer respondenternes vurdering af bl.a. dansk forsknings styrkepositioner, nationalt og internationalt forskningssamarbejde, infrastruktur, finansiering af forskningen, samarbejdet mellem virksomheder og universiteter, anvendelsespotentialer samt kompetencer og uddannelse.

Kapitlets hovedkonklusioner

Dansk forskning står generelt stærkt, og der bør være fokus på at bevare det høje danske niveau inden for grundforskning

Respondenterne peger i deres besvarelser på, at dansk forskning på kvanteområdet generelt står stærkt og er i vækst. For at fastholde den danske position peger respondenterne på, at det høje danske niveau inden for grundforskning bør fastholdes, og gerne udbredes til flere forskningsmiljøer.

Særlig inden for kvantematerialer, kvantefotonik og kvantefysik er dansk kvanteforskning i verdensklasse

Der er et overvejende flertal af respondenterne, der peger på, at dansk forskning inden for kvantefotonik, kvantematerialer, og kvantefysik/kvantemekanik er i verdensklasse. Det er også tilfældet med kvantecomputere, kvantesensorer og kvantekemi, om end spredningen i besvarelserne er lidt større på disse områder.

Der er også et overvejende flertal, der peger på, at dansk forskning inden for kvantekommunikation, kvantekryptering, kvantesimulering og kvantemetrologi er stærk og veludviklet. Endelig er der et overvejende flertal, der peger på, at Danmark har et mindre, men ikke så veludviklet forskningsmiljø inden for kvantealgoritmer og –programmering.

Styrket samarbejde mellem en række af de danske forskningsmiljøer, men fortsat potentiale i forhold til mere tværdisciplinært samarbejde

Respondenterne peger på, at samarbejdet mellem de danske forskningsmiljøer inden for forskning på kvanteområdet er konsolideret og udbygget gennem de seneste år. Der peges dog samtidig på, at der fortsat er potentialer inden for udviklingen af det tværdisciplinære samarbejde – særlig i forhold til den videre udvikling af kvanteteknologier. Der peges bl.a. på, at der er behov for bedre inddragelse af det datalogiske område og de datalogiske institutter, men også af kemi, farmakologi, biologi og sundhed. Samtidig nævner flere respondenter, at der er brug for en stærkere inddragelse af forskere med baggrund i ingeniørvidenskab.

Dansk kvanteforskning nyder stor international anerkendelse, men internationalt samarbejde kompliceres i stigende grad af den geopolitiske udvikling

Respondenterne peger på, at forskning på kvanteområdet i høj grad er globalt orienteret. Dansk kvanteforskning nyder stor international anerkendelse og danske kvanteforskningsmiljøer anses for at være attraktive og ledende internationale samarbejdspartnere. Respondenterne betoner dog samtidig, at kvanteteknologiens stigende geopolitiske betydning komplicerer det internationale forsknings-samarbejde og tiltrækningen af udenlandske investeringer på området.

Der er en stigende opmærksomhed på teknologiske anvendelser af forskningen på kvanteområdet

Respondenterne peger på, at der er en stigende opmærksomhed omkring teknologiske anvendelser af forskning på kvanteområdet i Danmark. Respondenterne pointerer, at kvanteteknologi, og ikke mindst kommende kvantecomputere, vil udgøre ”enabling” teknologier, som vil have brede anvendelsesperspektiver, lige som det er tilfældet med digitale teknologier i dag.

Samtidig peges på en række erhvervsområder, som rummer særligt oplagte muligheder for at drage nytte af fremtidig kvanteteknologi. Det gælder ikke mindst inden for medicinalindustrien, optimering af logistik, finans- og fintech-sektoren, IT-sikkerhed samt grøn omstilling.

Manglende viden og opmærksomhed om potentialerne blandt virksomheder samt et manglende innovations- og start-up-miljø er en udfordring

Respondenterne peger på, at manglende viden og opmærksomhed om potentialerne blandt virksomheder, samt et manglende innovations- og start-up-miljø, er en udfordring for den fremtidige udnyttelse og udvikling af kvanteteknologier i Danmark.

Respondenterne peger bredt set på, at universiteternes samarbejde med erhvervslivet p.t. er koncentreret omkring de relativt få virksomheder, der allerede arbejder med og/eller udvikler kvanteteknologi, og at der er behov for at få flere fremtidige aftagervirksomheder inddraget. Det vanskeliggøres dog af, at en række af potentialerne inden for området for mange virksomheder stadig synes at ligge et stykke ude i fremtiden.

Respondenterne anfører endvidere, at den danske kvanteforskning i dag primært er grundforskning, og at der ofte er lang vej fra grundforskningen til kommercialisering. Der er endvidere en række udfordringer i forhold til kommercialisering af forskning og understøttelse af start-up-virksomheder og iværksættere på baggrund af forskning inden for kvanteområdet i Danmark. Der peges på, at både kvanteindustrien og markedet for kvanteteknologi i dag er relativt umodent, og at der er behov for bedre adgang til kapital samt kvante-incubator-miljøer til at understøtte sparring omkring forretningsudvikling mv.

Der er behov for bedre adgang til forsknings- og testinfrastruktur inden for bl.a. kvantecomputere og faciliteter til materialeforskning

Respondenterne anfører, at adgangen til forsknings- og testinfrastruktur er vigtig for et godt forsknings- og innovationsmiljø i Danmark. Det gælder både i forhold til universiteternes muligheder for rekruttering, og i forhold til at understøtte virksomheder i udviklingen og anvendelsen af kvanteteknologi og nye produkter.

Der efterspørges især forsknings- og testinfrastruktur inden for supercomputere (HPC, High Performance Computing), kvantecomputere, kvantekommunikationsnetværk og faciliteter til materialeforskning. I den sammenhæng betones de store internationale samarbejder om forskningsinfrastruktur som vigtige for at understøtte danske forskning. Det er vigtigt, at Danmark fortsat udvikler sit engagement i de internationale samarbejder som EuroHPC, EuroQCI og ESS, samt det kommende NATO Center for Quantum Technologies ved Niels Bohr Institutet på Københavns Universitet. Der efterlyses dog også fremsynethed i forhold til midler til nye investeringer af national karakter, så den hjemlige forsknings- og testinfrastruktur kan følge med i den hastige teknologiske udvikling og stigende internationale konkurrence.

Der efterspørges langsigtede midler og stabil finansiering inden for en bred palet af virkemidler

I forhold til finansiering af forskning på kvanteområdet peges på, at der indtil videre ikke har været målrettede forskningsmidler til kvanteområdet, men at en række forskningsmidler fra forskellige kilder alligevel tilsammen har sikret en dansk styrkeposition på området. I forhold til EU-finansiering har særlig ERC-bevillinger været væsentlige.

Respondenterne peger på, at en mangel på langsigtede midler og stabil finansiering til strategisk forskning kan blive en udfordring fremadrettet. Der peges på, at der fremadrettet bør findes en god balance mellem understøttelse af grundforskning, anvendt forskning og kommerialisering, men også på, at det er for tidligt at sige, hvilke teknologier der vil vise sig mest levedygtige, og at der derfor fortsat bør sættes bredt.

”Business casen” for forretninger baseret på kvanteteknologi er dermed kun så småt ved at folde sig ud, og der kan derfor være potentiale i, at der – ud over midler til grundforskning – afsættes flere midler til strategisk forskning, forstået som midler med en tematisk binding, men uden krav om tung industriinvolvering.

Generelt peges også på, at der er brug for en bred palet af virkemidler. Særlig erhvervsorganisationerne peger på behovet for større indsatser og specifikke anvendelsesorienterede flagskibsprojekter, mens universiteterne især nævner behov for flere midler til yngre forskere.

Danmark tiltrækker talentfulde forskere og har gode uddannelser, men der bliver stadig stigende konkurrence om forskertalenterne

I forhold til forskere og talentmasse peges på, at der er en god talentmasse i dag, men at der også er behov for videre udvikling. Der peges på, at der er en god international spredning blandt forskerne på området, men behov for bedre kønsbalance og mere tværfaglighed. Der peges endvidere på, at Danmark indtil videre ikke har haft problemer med at tiltrække og fastholde talenter, men at der fremadrettet er stigende risiko for hjerneflugt på grund af stigende konkurrence på området.

I forhold til kompetencer og uddannelser på kvanteområder nævnes, at Danmark har stærke uddannelser på området, som det er vigtigt løbende at udvikle og vedligeholde. Der peges endvidere på et behov for at udbrede viden om kvanteforskning til flere eksisterende uddannelser i grænselandet til de nuværende, samt evt. oprette nye.

3.1 Indledning og metode

Til brug for kortlægningen af forskningen inden for kvanteområdet, herunder samspillet mellem universiteter og virksomheder, har Uddannelses- og Forskningsstyrelsen bedt en lang række respondenter blandt universiteter, offentlige og private forskningsfinansie-

rende fonde, GTS-institutter, erhvervs- og brancheorganisationer, faglige organisationer, viden og erhvervsklynger, ministerier m.fl., om at give deres vurdering af status, muligheder, potentialer, udfordringer og svagheder for dansk forskning på kvanteområdet.

Respondenterne er med afsæt i en spørgeramme, blevet bedt om at angive deres vurdering af dansk forsknings styrkepositioner, nationalt og internationalt forskningssamarbejde, test- og forskningsinfrastruktur, finansiering af forskningen, samarbejdet mellem virksomheder og universiteter, anvendelsespotentialer samt kompetencer og uddannelse.

Spørgsmålene i spørgerammen var formuleret som brede, kvalitative spørgsmål, og det har således ikke været forventningen, at svarene skulle understøttes af kvantitative data. En oversigt over de respondenter, hvorfra der er modtaget svar kan ses i afsnit 8.1

Kapitlet er udarbejdet som en sammenfatning af respondenternes svar til de enkelte spørgsmål i spørgerammen, og der kan således være overlappende pointer på tværs af de forskellige afsnit.

3.2 Respondenternes vurdering af forskning inden for kvanteområdet i Danmark

I dette afsnit redegøres for respondenternes vurderinger af status og kendetegn ved dansk forskning på kvanteområdet samt styrker, potentialer, svagheder og udfordringer.

3.2.1 Status og kendetegn ved dansk forskning på kvanteområdet i dag

Respondenterne blev bedt om at svare på, hvordan de kort fortalt vurderer status og kendetegn for dansk forskning på kvanteområdet i dag, og hvilke udviklingstendenser de ser for dansk forskning inden for kvanteområdet fremadrettet.

Dansk forskning på kvanteområdet står generelt stærkt og er i vækst

Respondenterne peger på, at dansk forskning på kvanteområdet generelt står meget stærkt, og at der i Danmark er udviklet nogle meget stærke forskningsmiljøer, både teoretisk og eksperimentelt. Danmark er derfor på en række områder verdensførende, og blandt de allerbedste globalt set. Det giver dansk forskning en markant styrkeposition og international synlighed, og dansk forskning på området nyder stor international anerkendelse.

Vækstfondens peger f.eks. på, at dansk forskning på kvanteområdet udmærker sig ved at være velrenommeret internationalt. Vækstfonden oplever særlig interesse fra amerikanske og europæiske venture og growth fonde på området, som har en positiv opfattelse af dansk forskning. Både centre som KU (kvantecomputing) og DTU Fotonik nævnes i positive vendinger af interessenter i internationale deeptech og hardtech miljøer, om end den danske sektor er mindre udviklet end f.eks. i USA.

Respondenterne peger samtidig på, at graden af konsolidering varierer meget mellem de forskellige forskningsfelter. Danmark har således en international førende position på nogle områder med adskillige grupper i den absolutte internationale elite. Andre aktiviteter er derimod spirende, baseret på nye ansættelser eller allerede ansatte forskere,

der skifter fokus til kvanteforskning. Se mere om vurderingen af enkelte fagområder i afsnit 3.2.4.

Respondenterne peger endvidere på, at dansk kvanteforskning generelt vurderes at være i vækst. Over de seneste ti år har Danmark oplevet et intensiveret fokus på kvanteforskning. Der er etableret flere forskningsgrupper, og det er lykkedes at rekruttere flere internationale topforskere. Allerede nu er der mange veluddannede kandidater og ph.d'ere, og Danmark er ifølge både Københavns Universitet og Aarhus Universitet det land i verden, der uddanner flest kvantefysikere i verden pr. indbygger. Der er endvidere et gryende start-up miljø.

Der er almindelig enighed blandt respondenterne i, at hovedparten af den danske kvanteforskning foregår på Københavns Universitet, Danmarks Tekniske Universitet og Aarhus Universitet. Desuden peges på spirende aktivitet på SDU – særlig inden for kvantematematik.

Stigende opmærksomhed omkring teknologiske anvendelser af forskning på kvanteområdet

I forhold til udviklingen på længere sigt peger respondenterne på, at i takt med at den internationale forskning er drejet i retningen af udvikling af kvanteteknologier, er der også i Danmark kommet et øget fokus på at transformere grundforskning til teknologiske anvendelser.

Respondenterne peger i den forbindelse på, at Danmark står i en gunstig position i forhold til at høste frugten af de seneste 10 års investeringer i grundforskning, og at udnytte denne som basis for nye højteknologiske løsninger til industrien. For at det skal lykkes, er der behov for en ambitiøs strategisk satsning med det formål – udover fortsat at styrke forskningsmiljøerne – også at modne de spirende danske kvanteteknologier og bringe dem på et niveau, hvor store internationale markedsdrevne investeringer kan tiltrækkes. Der peges på, at den type strategiske satsninger gennem de seneste år er set i en lang række nabolande, bl.a. i England, Holland, Tyskland og Frankrig.

Der peges således på, at forskning i kvanteområdet er et område med stort potentiale for skabelse og fastholdelse af danske styrkepositioner. Men også at der er tale om et forskningsområde i sin vorden, som bør understøttes målrettet for at nå sit fulde kommercielle potentiale.

3.2.2 Styrker og potentialer i dansk forskning på kvanteområdet

Respondenterne er blevet bedt om at angive, hvilke styrker og potentialer dansk forskning har på kvanteområdet.

Det høje niveau inden for grundforskning bør fastholdes og udbredes til flere forskningsmiljøer

For at fastholde og udnytte de potentialer kvanteområdet rummer, angiver respondenterne (universiteter og forskere), at det er vigtigt, at styrken i de danske miljøer inden for grundforskning fastholdes. I kraft af den brede forskningsekspertise, der er til stede i Danmark, er der også potentiale for, at dansk forskning på kvanteområdet på sigt vil excellere på en lang række områder. Der er endvidere behov for, at de nuværende styrkepositioner breddes ud til tilstødende miljøer og uddannelser, samt behov for at bringe

dem videre til konkrete anvendelser. Det betyder også, at uddannelse inden for fagområder som f.eks. fysik, kemi, matematik og datalogi, og på tværs af faggrænser, er af afgørende betydning. Der er dermed både behov for, at området udvikler sig i bredden og i dybden.

Det er for tidligt at sige, hvilke teknologier der vil vise sig mest levedygtige, og der bør derfor fortsat sættes bredt

Respondenterne peger på, at den konkrete udnyttelse af viden omkring kvanteområdet til kvanteteknologiske løsninger endnu er i et meget tidligt stadium. Det er derfor på nuværende tidspunkt vanskeligt at udpege enkelte områder som særlige styrkepositioner, der specifikt bør sættes på. Der er i stedet brug for bredt at videreudvikle og styrke danske kompetencer, så vi kan opretholde en position som forskningsmæssigt toneangivende nation på kvanteområdet.

Kvanteteknologi er ikke én teknologi, men snarere en vifte af mulige teknologier baseret på forskellige fysiske og teknologiske kvantesystemer og rettet mod vidt forskellige udfordringer. Hvilke af disse der bliver kommercielt relevante, kan vi ikke endeligt svare på i dag. Udover at styrke de eksperimentelle kvanteplatforme, som udforskes i Danmark på nuværende tidspunkt, er det derfor vigtigt også at sætte på nye platforme samt nye algoritmer, protokoller og anvendelser.

Efterhånden som den globale udvikling demonstrerer konkrete anvendelser af kvanteteknologi med potentiel stor impact, og der identificeres særlig fordelagtige områder og teknologier, vil der over tid sandsynligvis etableres et fokus på mere specifikke og perspektivrige områder. Det er imidlertid for tidligt at gisne om, hvilke der vil blive tale om, og det vil være med stor risiko for at miste forskningsmæssig konkurrenceevne, hvis der på nuværende tidspunkt sættes for snævert.

Der bør findes en god balance mellem understøttelse af grundforskning, anvendt forskning og kommercialisering

Respondenterne peger samtidig på, at det fremadrettet er vigtigt, at der findes en god balance mellem understøttelse af grundforskning, anvendt forskning og kommercialisering. Respondenterne understreger, at man skal huske på, at kvanteområdet som nævnt stadig er i en tidlig udviklingsfase, og at de store kvanteteknologiske gennembrud, der på sigt må forventes, stadig er afhængige af fundamentale grundvidenskabelige fremskridt.

"Business casen" for forretninger baseret på kvanteteknologi er dermed kun så småt ved at folde sig ud, og der kan derfor være potentiale i, at der – ud over midler til grundforskning – afsættes flere midler til strategisk forskning, forstået som midler med en tematisk binding, men uden krav om tung industriinvolvering, samt til forsknings- og testinfrastruktur.

Potentialerne bør anskueliggøres for virksomhederne

Dansk Industri (DI) giver udtryk for, at dansk grundforskning inden for kvanteteknologi generelt er af høj kvalitet, og at der i flere forskningsmiljøer indimellem er perspektivrige gennembrud. Samtidig er forskningen generelt på et meget lavt TRL-niveau (Technology Readiness Level), uden tilstrækkeligt fokus på modning med henblik på kommerciel anvendelse. Samtidig mangler virksomhederne en anskueliggørelse af anvendelsespotentialer af kvanteforskning og -teknologi. DI anbefaler derfor, at der som led i strategien udarbejdes roadmaps på strategisk udvalgte og lovende områder. De bør udvikles i

et samarbejde mellem forskere i virksomheder, på universiteter og GTS'er, med henblik på at identificere, hvor potentialerne er, og hvordan de kan understøttes bedst muligt.

3.2.3 Svagheder og udfordringer for dansk forskning på kvanteområdet

Respondenterne er bedt om at belyse, hvad der efter deres mening er svagheder og udfordringer for den danske forskning på kvanteområdet.

Behov for bedre inddragelse af det datalogiske område og datalogiske institutter

Når der skal peges på svagheder og udfordringer for dansk forskning på kvanteområdet, er der flere respondenter, der peger på potentialer i at intensivere den datalogiske forskning og i at øge fokus på de datalogiske institutter i Danmark i forhold til kvante-computerteknologi – herunder udvikling af algoritmer og protokoller mv. Det måtte gerne være f.eks. i samarbejde med de stærke miljøer inden for kvanteteori og kvante-algoritmer ved matematiske institutter, eller mere generelt i tværinstitutionelle initiativer.

Mangel på langsigtede midler og stabil finansiering til strategisk forskning

Respondenterne peger endvidere på, at manglen på langsigtede midler og stabil finansiering til strategisk forskning i kvanteteknologier er en stor barriere. Den begrænsede aktivitet inden for anvendelsesrettet forskning gør det således vanskeligt for eksisterende virksomheder at udnytte kvanteteknologien. Næsten uanset hvor stor en virksomhed, der er tale om, så skal der meget til, førend man investerer i ny eksperimenterende forskning og udvikling.

Manglende viden og opmærksomhed om potentialerne blandt virksomheder

Respondenterne peger endvidere på, at der generelt er en lav 'awareness' i virksomhederne omkring potentialerne i kvanteområdet. Flere dele af erhvervslivet har været vanskelige at få til at interessere sig for området, og har svært ved at se værdien i kvanteteknologien. Det er generelt vanskeligt for virksomheder at forholde sig til en "ren" generisk *enabler* teknologi, som kvanteteknologien er, og der skal derfor rigtigt meget til, før end man som virksomhed vælger at investere i området. Der er derfor behov for at sætte teknologien i relation til konkrete anvendelsesområder. DI har peget på, at deres foreslåede roadmap proces f.eks. kan være med til at ændre på det. Andre efterspørger statslige investeringer, som kan bringe teknologien tættere på egentlig anvendelse.

Manglende innovations- og start-up-miljø

Der peges også på, at der i Danmark ikke er et veludviklet innovations- og start-up-miljø, der kan drive kvanteteknologi til kommercialisering af produkter og services. Der er i Danmark generelt en lav risikovillighed og få virksomheder, der går all-in på nye teknologier og metoder. Der peges på, at det naturligt hænger sammen med den begrænsede tilgængelighed til risikovillig kapital.

3.2.4 Status for dansk forskning på kvanteområdet inden for forskellige fagområder

Respondenterne er blevet bedt om at angive, hvilken status dansk forskning på kvanteområdet efter deres mening har inden for en lang række udvalgte fagområder. Respondenterne har på tværs af universiteter, forskningsfinansierende råd og fonde samt interessenter i øvrig kunnet angive, hvorvidt de finder, at dansk forskning inden for de givne

fagområde var i verdensklasse, stærkt og velkonsolideret, mindre men ikke særlig veludviklet, eller at der kun er lidt eller ingen dansk forskning inden for området.⁴

De udvalgte fagområder dækker en række temaer med fokus på fremtidige teknologier, som de bl.a. er udpeget i EUs European Quantum Flagship. Det drejer sig om: Kvantecomputere, kvantesimulatorer, kvantekommunikation samt kvantesensorer og kvantemetrologi.

De udvalgte fagområder dækker endvidere en række generelle mere eller mindre specialiserede emner. Det drejer sig bl.a. om kvantefysik/mekanik, kvantekemi, kvantefotonik, kvantematerialer samt kvantealgoritmer og -programmering. Fagområderne har ikke mindst fokus på grundforskning, men spiller også en afgørende rolle i forhold til udvikling og udnyttelse af de fremtidige teknologiområder – f.eks. i forhold til udvikling af kvantecomputere, kvantesimulering mv.

Se nærmere præsentation af de forskellige teknologi – og fagområder på kvanteområdet i boksene nedenfor.⁵

⁴ Det skal bemærkes, at nogle respondenter ikke har angivet en vurdering i alle fagområder – heraf har nogle kun angivet vurderinger for de områder, de finder er i verdensklasse. Endvidere har nogle universiteter givet en fælles samlet tilbagemelding på tværs af universitetet, mens andre universiteter har ladet de enkelte institutter melde ind hver for sig. Nogle respondenter har endvidere koordineret deres indmelding, og den samme vurdering er dermed indsendt af flere.

⁵ Det skal bemærkes, at beskrivelserne af de udvalgte teknologi- og fagområder ikke var en del af spørgerammen. Spørgerammen indeholdt kun overskrifterne for de nævnte teknologi- og fagområder.

Boks 3.1 Teknologi- og fagområder på kvanteområdet – del 1

Kvantecomputere

I en kvantecomputer udnyttes kvantemekaniske principper til løsning af computeropgaver. Herved kan en kvantecomputer løse krævende computeropgaver med langt færre ressourcer, end nuværende klassiske supercomputere har mulighed for. Kvantecomputere forventes ved hjælp af deres enorme mængde computerkraft at gøre det muligt at løse særlige typer af problemer. Kvantecomputere forventes for eksempel at kunne behandle enorme mængder data hurtigere end nogensinde før, løse ligninger og hurtigt at lave mønstergenkendelse, hvilket kan udnyttes på en lang række områder. Der arbejdes i øjeblikket på at udvikle kvantecomputere ved hjælp af flere forskellige teknologier. Kvantecomputere, der bruger forskellige platforme, er blevet demonstreret i løbet af de sidste to årtier.

Kvantesimulatorer

Kvantesimulatorer er nært relaterede til kvantecomputere. De kan komme til at spille en nøglerolle i designet af f.eks. nye lægemidler, nye materialer som f.eks. højtemperatur-superledere, der kan distribuere energi uden spild. Nogle kvantesimulatorer er specialiserede kvantecomputere, mens andre f.eks. imiterer idéen bag vindtunneller, hvor små modeller bruges til at forstå biler og flys aerodynamik.

Kvantekommunikation

Kvantekommunikation vil hjælpe med at beskytte den stadigt stigende mængde af borgerdata, som overføres digitalt – herunder f.eks. sundhedsdata og data fra finansielle transaktioner. Kvantenetværk benytter sig typisk af enkeltfotoner, hvor det vil kunne bemærkes, hvis de påvirkes udefra. Det betyder, at man ved at bruge kvanteteknologi kan opnå en meget sikker form for digital kommunikation. Inden for nogle typer af kommunikation er teknologien allerede på markedet og vil blive yderligere udviklet til et egentligt kvanteinternet.

Kvantesensorer og kvantemetrologi

Ud over kvantekommunikation er kvantesensorer også et af de nye anvendelser af kvanteteknologier. Kvantesensorer forventes at give mere sikre og korrekte målinger, og vil drastisk øge ydeevnen hos forskelligt udstyr, vi bruger i dag. Det gælder f.eks. medicinsk diagnostik og billeddannelse, samt højpræcisions navigationsudstyr. Teknologien forventes også at kunne anvendes til nye fremtidige anvendelsesområder. Kvantemetrologi benytter kvantesensorer til at definere standarder for blandt andet tidstælling og elektriske målinger.

Kilde: Præsentation af kvanteområdet på European Quantum Flagships hjemmeside

Boks 3.2 Teknologi – og fagområder på kvanteområdet – del 2

Kvantefysik/kvantemekanik

Kvantemekanik er en gren af fysikken, oprindeligt udviklet til at beskrive lys og atomer. Sammen med den klassiske fysik og relativitetsteorien udgør den grundlaget for fysikkens naturbeskrivelse. Kvantemekanikken er nødvendig for forståelsen af naturen ved meget små afstande. Atomernes stabilitet — deres blotte eksistens — er således uforklarlig ud fra den klassiske fysik, men kvantemekanikken gør det muligt at nå til en meget detaljeret forståelse af atomernes struktur og lysudsendelse.

Kvantekemi

For at kunne forstå kemi, er man nødt til at beskrive verden på atomart niveau. Kvantekemi er derfor et område af kemien, som beskæftiger sig med anvendelsen af kvantemekanikken på problemer af kemisk interesse. Kvantekemien omfatter emner som molekylers elektronstruktur, beskrivelse af kemisk reaktivitet, molekylers relative stabilitet (*molecular modelling*) og beregninger af elektriske og magnetiske egenskaber ved molekyler.

Kvanteeoptik og kvantefotonik

Kvanteeoptik har fokus på kvantemekaniske egenskaber af lys. Den mindste bestanddel af lys er fotoner, dvs. lyspartikler. Lys beskrives i visse forhold bedre som en partikel end som en bølge, hvor bølgebeskrivelsen normalt findes i den klassiske fysik. Hvordan fotoner vekselvirker med forskellige kvantesystemer, bl.a. kvantepunkter (quantum dots), enkelte atomer, grupper af atomer mv. og viden om, hvordan man styrer vekselvirkningen, kan bl.a. bruges til kvantesimulering, -måling og -kommunikation.

Kvantematerialer

Begrebet kvantematerialer ("quantum materials") er opstået inden for de seneste ca. 10 år som en samlet betegnelse for materialer, hvor kvantemekaniske effekter spiller en stor rolle for deres egenskaber. Kvantematerialer dækker blandt andet udvikling af materialer til topologiske qubits til kvantecomputere, men også en række andre materialer som kan understøtte en specifik kvanteteknologisk anvendelse.

Kvantealgoritmer og -programmering

Kvantealgoritmer er algoritmer, der kører på en kvantecomputer og opnår en fremskynning eller anden effektivitetsforbedring i forhold til enhver mulig klassisk algoritme. Forskning i kvanteteori, algoritmer og software er nødvendig for at udvikle nye kvantealgoritmer og udvikle muligheden for at anvende kvantealgoritmer på forskellige områder.

Kilde: *lex.dk, European Quantum Flagships m.fl.*

Dansk forskning inden for kvantefotonik, kvantematerialer og kvantefysik/kvantemekanik vurderes i særlig grad som værende i verdensklasse

Figur 3.1 viser antallet af alle indmeldinger på de enkelte områder på tværs af universiteter, forskningsfinansierende råd og fonde samt interessenter i øvrigt. Figuren viser, at

et overvejende flertal peger på, at dansk forskning inden for kvantefotonik, kvantematerialer og kvantefysik/kvantemekanik er i verdensklasse. Det er vurderingen fra henholdsvis 94, 81 og 80 procent af respondenterne inden for disse tre fagområder.

Mere end halvdelen af respondenterne peger også på, at dansk forskning inden for kvantecomputere, kvantesensorer og kvantekemi er i verdensklasse, om end spredningen i besvarelsene er lidt større på disse områder. Henholdsvis 60, 56 og 50 procent af respondenterne vurderer, at dansk forskning på disse tre fagområder er i verdensklasse.

Mere end halvdelen af respondenterne peger på, at Danmark har en stærk og veludviklet forskning inden for kvantekommunikation og – kvantekryptering; kvantemetrologi og kvantesimulering. Henholdsvis 63, 57 og 54 procent af respondenterne vurderer, at dansk forskning på disse tre fagområder er stærk og veludviklet.

Endelig viser figuren, at et overvejende flertal på 60 procent peger på, at Danmark har et mindre, men ikke så veludviklet forskningsmiljø inden for kvantealgoritmer og –programmering.

Samlet indikerer figuren dermed, at dansk forskning inden for kvanteområdet vurderes til at være stærkest inden for rækken af de generelle mere eller mindre specialiserede forskningsområder. Det gælder særligt kvantefotonik, kvantematerialer og kvantefysik/kvantemekanik.

I forhold til kvantematerialer skal det bemærkes, at begrebet ”kvantematerialer” dækker et bredt område. DTU bemærker f.eks. at:

”Begrebet ”kvantematerialer” er meget bredt. Det dækker blandt andet udvikling af materialer til topologiske qubits som foregår i samarbejde mellem Niels Bohr Institutet og Microsoft, men dette er blot ét eksempel på en ny form for materiale som kan understøtte en specifik kvanteteknologisk anvendelse. Dansk forskning har desuden styrkepositioner inden for udvikling af materialer til kvantedots (kilder til enkeltfotoner eller atomarskala magnetisering), kvantefysisk modellering og fabrikation/syntetisering og karakterisering af 2-dimensionelle materialer, herunder grafen, samt materialer til ultrafølsomme biosensorer”.

Inden for kvanteteknologierne vurderes dansk forskning at være længst fremme i forhold til kvantecomputere og kvantesensorer

I forhold til de mere teknologirettede fagområder, som de bl.a. er fastsat i European Quantum Flagship (dvs. kvantecomputere, kvantesimulatorer, kvantekommunikation samt kvantesensorer og kvantemetrologi) er dansk forskning fortsat vurderet højt, men andelen af respondenter, der finder, at dansk forskning er i verdensklasse, er mindre end på de ovenfor nævnte områder.

I forhold til de teknologirettede fagområder vurderes dansk forskning at stå stærkest inden for kvantecomputere og kvantesensorer, hvor henholdsvis 60 procent og 56 procent vurderer, at dansk forskning er i verdensklasse. I forhold til kvantecomputere skal det dog bemærkes, at dansk forskning ikke nødvendigvis er i verdensklasse inden for alle elementer af forskning omkring kvantecomputere. DTU bemærker f.eks. at:

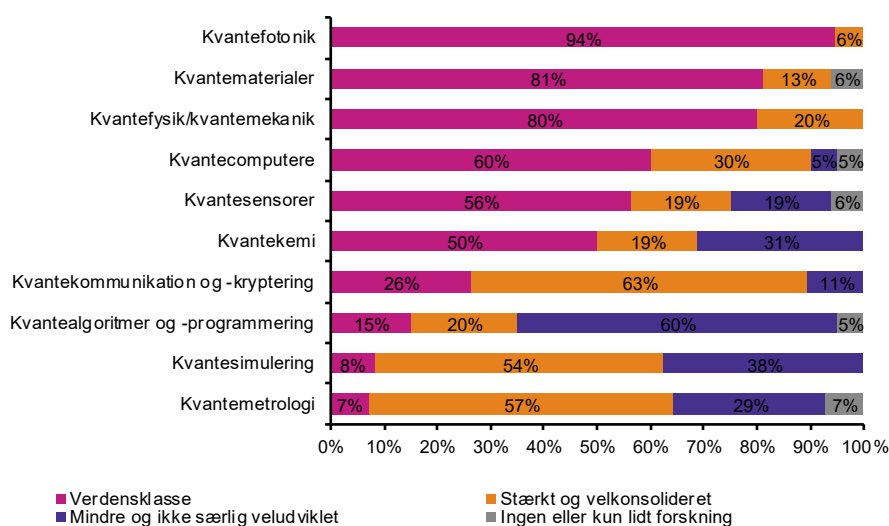
””Kvantecomputer” er et bredt begreb, som favner en række forskellige fysiske platforme. Danmark er ikke førende på udviklingen af full-stack

systemer f.eks. baseret på superledende transmon qubits (som IBM og Google benytter), men vi har en førende position inden for udviklingen af skalerbare fotoniske kvantecomputerplatforme. Derudover er dansk forskning førende inden for udviklingen af materialer, der kan understøtte såkaldte topologiske qubits, som kan være et vigtigt skridt i retningen af en skalerbar kvantecomputer baseret på superledende teknologi.”

Ud over kvantecomputere og kvantesensorer vurderer henholdsvis 63, 57 og 54 procent af respondenterne, at dansk forskning er stærk og veludviklet inden for kvantekommunikation og – kvantekryptering; kvantemetrologi samt kvantesimulering.

Figur 3.1

Respondenternes vurdering af en række fagområder inden for dansk forskning på kvanteområdet, procent



Anm.: Respondenterne har kunnet angive, hvorvidt de fandt, at forskningen inden fagområdet var i verdensklasse, var stærkt og velkonsolideret, var mindre men ikke særlig veludviklet eller at der kun er lidt eller ingen forskning inden for området.

Kilde: Uddannelses- og Forskningsstyrelsen på baggrund af respondenternes besvarelse af spørgeskemaet

3.3 Respondenternes vurdering af det nationale og internationale forskningssamarbejde inden for kvanteområdet

I dette afsnit redegøres for respondenternes vurderinger af henholdsvis det nationale og det internationale forskningssamarbejde inden for kvanteområdet.

3.3.1 Det nationale samarbejde mellem de danske forskningsmiljøer inden for forskning på kvanteområdet

Respondenterne er blevet bedt om give deres vurdering af det nationale samarbejde mellem de danske forskningsmiljøer inden for forskning på kvanteområdet.

Stigende grad af samarbejde mellem kvantemiljøer på tværs af universiteter

Novo Nordisk Fonden peger på, at det danske kvantemiljø traditionelt har været fragmenteret og manglet nationalt samarbejde. Gennem de seneste år har universiteterne imidlertid arbejdet målrettet på at konsolidere og udbygge samarbejdet på området. Det har bl.a. resulteret i stiftelsen af foreningen Danish Quantum Community, der ud over forskningsmiljøerne også favner brancheorganisationer og virksomheder.

Universiteterne peger på, at der i dag er et veletableret samarbejde på tværs af de danske forskningsmiljøer, særligt mellem Aarhus Universitet, Danmarks Tekniske Universitet og Københavns Universitet, og at der er stærke samarbejder mellem eksperimentelle og teoretiske miljøer – både internt på universiteterne og universiteterne imellem.

Fortsat potentiale ift. mere tværdisciplinært samarbejde – særlig ift. den videre udvikling af kvanteteknologi

En lang række respondenter peger på, at der er behov for og muligheder i at styrke tværdisciplinære netværk og samarbejdsprojekter – særlig i forhold til udviklingen af kvanteteknologiske løsninger. Det kunne f.eks. være samarbejde med forskningsledere fra forskellige fagområder, som er nødvendige for, at kvanteteknologier kan løse problemer på særlige områder.

Novo Nordisk Fonden bemærker bl.a., at samarbejder primært tiltrækker forskere med en baggrund i fysik, og flere respondenter anfører, at der er brug for stærkere inddragelse af forskere med baggrund inden for andre områder, som f.eks. datalogi, ingeniørvidenskaberne, kvantekemi, biologi, medicin eller andre områder, som kan øge omfanget af aktiviteter rettet imod kvanteområdets forventede anvendelser inden for eksempelvis det farmakologiske område.

VILLUM FONDEN bemærker, at tværvidenskabelig forskning altid er godt, men at initiativet bør komme fra forskerne selv.

3.3.2 Det internationale samarbejde i forhold til forskning på kvanteområdet

Respondenterne er blevet bedt om deres vurdering af, hvordan Danmark står som international samarbejdspartner i forhold til forskning på kvanteområdet, og hvilke udfordringer og muligheder der er for internationalt samarbejde på området.

Danmark er attraktiv som partner i internationale samarbejder inden for kvanteforskning

Respondenterne peger på, at kvanteforskningsområdet i høj grad er globalt orienteret. Danske kvanteforskningsmiljøer anses for at være attraktive internationale samarbejdspartnere, og dansk kvanteforskning er netop kendetegnet ved deltagelse i og ledelse af stærke internationale samarbejder. Dansk kvanteforskning nyder stor international anerkendelse, og Danmark har som tidligere nævnt kunnet tiltrække en lang

række meget stærke forskere på internationalt niveau, både etablerede topforskere og mange unge lovende talenter. Ifølge respondenterne er det afgørende, at de forskningsbaserede uddannelser opretholder deres høje niveau, hvis Danmark fortsat skal være attraktiv som international samarbejdspartner. De finder, at der ligger et stort potentiale i et tættere samarbejde med internationale partnere ift. uddannelse af kandidater.

Der eksisterer tætte samarbejdsrelationer med institutioner fra en række lande inden for og uden for Europa

Der eksisterer i dag tætte samarbejdsrelationer mellem danske og førende amerikanske, andre engelsktalende, israelske og japanske universiteter. Der er også nære forbindelser til en række europæiske universiteter i for eksempel Frankrig, Nederlandene, Schweiz, Tyskland, Storbritannien og Østrig. Respondenterne mener, at Danmark fortsat bør prioritere et bredt internationalt forskningssamarbejde for at kunne fastholde det høje forskningsniveau. Respondenterne vurderer derudover, at et øget samarbejde med større 'quantum hubs' i blandt andet Nederlandene, Frankrig og Tyskland kunne styrke dansk forskning.

Fra amerikansk side er der aktuelt en stor interesse for at styrke og formalisere samarbejdet med blandt andet Danmark og etablere et såkaldt "trusted community" for kvanteteknologi. Respondenterne peger på, at det er en relation, der kan åbne mange forskningsmæssigt interessante relationer, men hvor man samtidig skal sikre sig, at den ikke medfører uhensigtsmæssige bindinger og begrænsninger. DFM, Danmarks Nationale Metrologiinstitut, gør opmærksom på, at EU's Quantum Flagship og delprogrammet QuantERA giver finansieringsmuligheder for forskningssamarbejde inden for EU, men at der i dag er et stort problem med at finansiere forskningssamarbejde med USA og Storbritannien.

Danske institutioner nyder godt af internationale bevillinger og er aktive inden for rammerne af EU's kvanterelaterede indsatser

Danmark har nydt godt af markant støtte fra internationale bevillinger, især EU's rammeprogram for forskning. Der er enighed blandt respondenterne om, at Danmark overordnet set er solidt repræsenteret i EU's kvanterelaterede indsatser, såsom European Quantum Flagship og QuantERA. Inden for European Research Council (ERC) har Danmark været meget succesfuld, og disse bevillinger har været med til at bære flere af de eksisterende miljøer, og har i det hele taget været af enorm betydning for disse.

Kvanteteknologier er særlig nævnt i European Chips Act, og eksempelvis har Danmark med DTU Nanolab en unik infrastruktur til at forske i og fremstille "kvantechips". Det er DTU's mål og ambition at spille en rolle i den kommende realisering af denne del af European Chips Act.

Enkelte af respondenterne finder, at det er et problem, at QuantERA – det primære ERA-net på kvanteområdet – i Danmark kun administreres af Innovationsfonden. Dette medfører, at forskere i Danmark, i modsætning til forskere i de andre deltagende lande, ikke kan modtage støtte til grundlagsskabende projekter under denne indsats.

Dansk Industri anbefaler, at universiteterne bør undersøge nærmere, hvorledes relevante fagmiljøer og ekspertise kan bidrage til anvendelsesorienterede fremskridt i forskningen, f.eks. gennem tværnationale ansøgninger til Horizon Europe. DeiC (Dansk e-Infrastruktur Konsortium) anslår, at der med fordel kunne arbejdes på en koordineret dansk deltagelse i f. eks. EuroHPC-projekterne.

En videreudvikling af kvanteteknologi og investeringer på området er nødvendige for, at Danmark kan forblive internationalt konkurrencedygtig og attraktiv

Flere af respondenterne vurderer, at selv om danske forskningsmiljøer er i international særklasse, har satsningen på kvanteområdet og den offentlige investering i Danmark generelt været mindre end i lande, vi normalt sammenligner os med. Danmark står, ifølge DTU, i en gunstig position i forhold til at profitere af de seneste 10 års investeringer i grundforskning, og til at udnytte denne som basis for nye højteknologiske løsninger til industrien. En videreudvikling af kvanteteknologi kræver dog både en fortsat styrkelse af forskningsmiljøerne, og en modning af de spirende danske kvanteteknologier, for at kunne bringe teknologierne på et niveau, der kan tiltrække store internationale markedsdrevne investeringer. Det er netop denne type strategiske satsninger, man gennem de seneste år har set fra en lang række lande som blandt andre England, Nederlandene, Tyskland og Frankrig.

Den kommercielle udnyttelse af kvanteteknologiens potentialer skal udbygges og Danmark skal profileres som 'super-power' inden for kvanteforskning

Dansk Industri peger på, at der i Danmark er et ønske om kommerciel udnyttelse af kvanteteknologiens potentialer, men at de rette betingelser herfor endnu ikke er til stede. Danmark vurderes til at være langt efter f.eks. Nederlandene, Tyskland og Storbritannien, når det kommer til en reel satsning på anvendt forskning, der skal gøre det lettere at tage næste skridt til innovation og forretning. Novo Nordisk Fonden understreger vigtigheden af at sende et signal til omverden om, at Danmark er blandt de absolut førerende nationer inden for kvanteområdet for at tiltrække investeringer og internationale aktiviteter til Danmark. Dette vil også yderligere kunne styrke Danmarks position som samarbejdspartner og dansk konkurrenceevne. En udvikling af den danske styrkeposition inden for kvanteforskning er nødvendig for, at Danmark kan forblive konkurrencedygtig inden for en række af områder. Derudover vil forskning i anvendelse af kvanteteknologiske løsninger inden for områder, hvor Danmark allerede står stærkt, kunne udbygge Danmarks førerposition på disse områder yderligere. Se også afsnit 3.6.2.

Det er vigtigt at arbejde for internationale standarder som ikke begrænser teknologi udviklet i Danmark

Respondenterne angiver behovet for international standardisering som en unik specifikation af grænseflader mellem forskellige kvanteprodukter. DFM, Danmarks Nationale Metrologiinstitut anfører, at en aktiv deltagelse i internationale standardiseringsfællesskaber er vigtig for at opnå ny viden og få indflydelse på standardiseringsprocessen. Der er f.eks. behov for dansk repræsentation i internationale standardiseringsudvalg for at sikre, at fremtidige standarder ikke begrænser accepten af teknologi og produkter udviklet på danske universiteter og i danske virksomheder. Derudover har Danmark brug for nationale testfaciliteter inden for kvanteforskning, for at forblive konkurrencedygtig, idet testinfrastruktur allerede er etableret eller er under etablering i vores nabolande.

Den geopolitiske situation komplicerer det internationale forskningssamarbejde

Respondenterne betoner, at kvanteteknologiens stigende geopolitiske betydning komplicerer det internationale forskningssamarbejde og tiltrækningen af udenlandske investeringer. Respondenterne efterspørger, at regeringen og relevante myndigheder forholder sig til, hvem man fra dansk eller europæisk side ønsker at samarbejde og handle med. Der er et "våbenkapløb" i gang mellem øst og vest på kvanteområdet, og Danmark bør

derfor nøje overveje, hvordan man bedst håndterer det med optimalt udbytte. Respondenterne nævner, at samarbejdet inden for EU som regel er smidigt, men at samarbejdet med USA og Storbritannien byder på nogle udfordringer i termer af lovgivning, eksempelvis i forhold til opfindelser og udveksling af personale og viden.

Respondenterne påpeger, at det sikkerhedspolitisk er vigtigt, at Danmark samarbejder med allierede, der har fokus på kvanteteknologi (kryptering, kvantekommunikation) og også i regi af NATO. Foruden et stærkt samarbejde i EU og NATO, understreger Udenrigsministeriet, at Danmark bør samarbejde bilateralt med ligesindede lande, såsom USA, Nederlandene, Sverige, Finland, Australien og Storbritannien. Det internationale samarbejde kunne omhandle udveksling af forskere, metoder og data, projektsamarbejde, samt netværksskabende aktiviteter.

Der gøres opmærksom på den geopolitiske situation og det følsomme samarbejde med visse lande, særligt i forhold til dual-use teknologier. I lyset af et øget fokus på et tæt forhold til USA og NATO, kan der være en udfordring, idet dette ikke er hverdag for forskere og kræver vejledning fra myndighederne. Det nævnes, at internationale organisationer efterspørger effektive og retfærdige forvaltningsrammer, for at udnytte forskellige teknologiers muligheder på bedste vis, og for at imødegå deres risici. Respondenterne finder derfor, at Danmark bør have en klar strategi for, hvad der deles med hvem og hvorfor, og bør have et klart øje for potentielle forretningsmuligheder, og i videst mulig omfang beskytte den viden – uden at gå på kompromis med 'Open Science'.

Kina er meget langt fremme med hensyn til udvikling og anvendelse af kvanteteknologier og fra et forskningsmæssigt synspunkt er der mange interessante samarbejdsmuligheder, som ikke er mulige at udnytte pga. den aktuelle geopolitiske situation. På den lidt længere bane vil de massive investeringer i kvanteforskning og -udvikling i Kina kunne udfordre det gode danske og europæiske udgangspunkt.

3.4 Respondenternes vurdering af infrastruktur til brug for forskning og test

I dette afsnit redegøres for respondenternes vurderinger af status for adgangen til infrastruktur til brug for forskning og test inden for kvanteområdet.

3.4.1 Status for relevant forsknings- og testinfrastruktur inden for kvanteområdet i en dansk sammenhæng

Respondenterne er blevet bedt om deres vurdering af status for relevant forsknings- og testinfrastruktur i Danmark – herunder identificerede behov og barrierer for adgangen, og hvilke danske og internationale forsknings- og testfaciliteter der er vigtigst i forhold til forskning inden for kvanteområdet.

Forsknings- og testinfrastruktur som forudsætning for dansk forskning

Respondenterne peger bl.a. på, at adgang til forsknings- og testinfrastruktur er vigtig i forhold til Danmarks forskningsmæssige styrke, da adgangen er vigtig for et godt forsknings- og innovationsmiljø. Universiteterne betoner, at verdensførende forsknings- og testinfrastruktur giver et godt potentiale for rekruttering, mens manglende infrastruktur trækker i den modsatte retning.

Samtidig peges på, at infrastrukturen gradvist skal udbygges i takt med, at forskningen og teknologien udvikler sig. Udviklingen af infrastrukturen skal generelt være "bottom-up", i den forstand at den skal understøtte de konkrete forskningsaktiviteter blandt forskere og virksomheder, og den skal integreres i de respektive kvantemiljøer. Der er dog samtidig også et ønske om yderligere koordinering af infrastruktur for at opnå bedre udnyttelse af mulighederne og skabe synergi mellem de forskellige forskningsmiljøer.

I forhold til at understøtte virksomheder i udviklingen og anvendelsen af kvanteteknologi, og i udviklingen af nye produkter, påpeges behovet for infrastruktur til eksempelvis fremstilling eller test, samt at målings- og kalibreringsteknikker skal kunne understøtte globale standarder for nye kvanteprodukter. Så snart der foreligger relevante og tilgængelige metoder for testfaciliteter, bør virksomhedernes adgang fremmes – evt. i et samarbejde mellem virksomheder og universiteterne. Derigennem kan danske virksomheder få et indblik i, hvordan teknologien kan anvendes, og dermed hvordan virksomhederne kan investere i teknologien. Samtidig kan relevante arbejdspladser oprettes og medarbejdere efteruddannes. Respondenterne finder derfor, at test- og demonstrationsfaciliteter til kvanteteknologi bør prioriteres.

Se i øvrigt også afsnittet om det kommende danske NATO Center for Quantum Technologies, som flere besvarelser henviser til, i afsnit 6.5.

Adgang til forsknings- og testinfrastruktur

Respondenterne giver forskellige bud på, hvilken type infrastruktur der er behov for. Overordnet kan behovet opdeles i følgende typer:

- Supercomputere (HPC, High Performance Computing)
- Kvantecomputere
- Kvantekommunikationsnetværk
- Faciliteter til materialeforskning

Supercomputere (HPC, High Performance Computing)

I forholdet mellem klassiske supercomputere og kvantecomputere påpeger universiteterne, at en klassisk computer med tilføjelse af en kvantecomputer-komponent forventes at være en central faktor i at lykkes med den anden kvanterevolution.

Behovet for at styrke den danske adgang og anvendelse af supercomputere fremhæves i relation til den tidlige anvendelse af kvantecomputere, herunder forskning og udvikling af software og algoritmer. Desuden er supercomputere vigtige ift. at understøtte forskningen i kvantematerialer, hvilket netop DeiC (Dansk e-infrastruktur Konsortium) arbejder for. Flere respondenter peger på EuroHPC som en mulighed for at understøtte dansk forskning, i takt med at supercomputere bliver større og større, og det bliver vanskeligere for universiteterne selv at etablere adgange til store computere, både finansielt og teknisk/driftsmæssigt.

For danske virksomheder peges på, at såfremt Danmark har endnu større ambitioner inden for it-forskningsinfrastrukturområdet, så skal der f.eks. arbejdes for virksomhedernes adgang til en professionel it-infrastruktur i Danmark.

Kvantecomputere⁶

Respondenterne angiver, at adgangen til kvantecomputere er essentiel for universiteternes uddannelser, så de studerende kender til muligheder og udfordringer med at anvende kvantecomputere, og så de er parate til en bredere anvendelse, når kvantecomputere bliver mere tilgængelige (læs evt. mere herom i Boks 4.4). Også til forskningsbrug er adgangen til kvantecomputere vigtig, f.eks. for forskere der arbejder med svære optimeringsproblemer, som kun kan løses på kvantecomputere, samt til test og afprøvning af software.

Respondenterne peger på, at der i dag mangler denne brede adgang til kvantecomputere. Kvantecomputerne behøver ikke nødvendigvis at være geografisk placerede i Danmark. Dog vil en mindre national kvantecomputer, som ikke findes i dag, give de danske forskere mulighed for at afprøve og teste deres kode, inden de søger ind på de europæiske computere. Det omtales som vigtigt, at de mange forskellige typer kvantecomputere bliver vel repræsenterede i adgangsmulighederne. EuroHPC fremhæves som en afgørende platform for at fremme adgangen til, og dermed anvendelsen af, kvantecomputere i Danmark. (Læs mere om EuroHPC og deres opslag i foråret 2022 om indkøb af adgang til 3 kvantecomputere i afsnit 6.2.3).

Også uden for forskningsverdenen påpeges behovet for nem adgang til kvantecomputere, f.eks. inden for life science og den grønne omstilling, hvor en nem adgang vil være en stor hjælp for danske virksomheder, der udvikler kvantedalgoritmer og -software. Der nævnes generelt, at kvantecomputere (og de dertil nødvendige teknologier inden for kvantekommunikation og -kryptering), potentielt har en meget direkte anvendelse inden for sundhedsområdet og life science, f.eks. i forhold til at høste viden af store datamængder baseret på komplekse og omfattende analyser.

Kvantekommunikationsnetværk

Universiteterne beskriver behovet for at udvikle kvanteteknologi for sikker kommunikation, f.eks. til myndighedsanvendelse, jf. også afsnit 6.2.4 om EuroQCI. Det fremhæves som meget vigtigt, at der opbygges et solidt og stabilt kvanteinternet, både nationalt og i EU. Endvidere vil det være af stor betydning, at der er finansiering til at hjælpe med denne opbygning, som også bør gå hånd i hånd med en opbygning af kvantecomputere på landets universiteter.

Et nationalt kvantekommunikationsnetværk fremhæves som vigtigt for at understøtte den teknologiske udvikling, f.eks. i form af kommunikationsudstyr, protokoller, og ultra-præcise tids- og frekvenssignaler.

Faciliteter til materialeforskning

Respondenterne fremhæver samstemmende, at Danmark har en særlig styrkeposition til forskning i kvantematerialer via de investeringer, der allerede foretages i forskningsinfrastruktur, som også kan anvendes erhvervsrettet. Det danske engagement i ESS, MAX4, ILL, EuXFEL m.m. giver forskere og erhvervsliv adgang til unikke verdensførende forskningsinfrastrukturer, der i udstrakt grad understøtter forskningen i kvantemateria-

⁶ De første eksperimentelle kvantecomputere findes allerede, og adgang til en kvantecomputer udbydes af flere forskellige private og offentlige aktører, både i Europa og i andre lande. Adgangene udbydes generelt som online adgange, dvs. uden behovet for at købe hele kvantecomputersystemer. Udviklingen går meget stærkt, og kvantecomputerne forbedres hele tiden i konkurrence mellem de mange forskellige teknologier. Selvom disse tidlige kvantecomputere er eksperimentelle, så er det allerede muligt nu at udføre de første, simple programmer på kvantecomputere og at forske i algoritmer og i anvendelsen (Kilde: Danish Quantum Community og EuroHPC).

ler. ESS giver danske forskere nye unikke muligheder, og der ligger et spændende potentiale i at koble forskningsgrupperne endnu stærkere til både ESS, og til ESS Data Management Center placeret i København.

Barrierer for anvendelsen

Respondenterne påpeger nogle strukturelle barrierer ift. adgangen til test- og forskningsinfrastruktur. Det anføres, at det på nuværende tidspunkt er svært at finde tilstrækkelig finansiering til større infrastrukturer, særligt ift. driften. Der er endvidere en kritisk mangel på testinfrastruktur, som bliver relevant, når kvanteteknologierne er modnede.

Endvidere peges der på behovet for investeringer i laboratorieudstyr, som ikke har national strategisk karakter, men som alligevel har en anskaffelsespris, der overstiger de almindelige bevillingsrammer. Den manglende infrastruktur har en stor negativ indflydelse på udviklingsmuligheder for dansk forskning inden for kvanteområdet og ikke mindst på udvikling af relevante anvendelser. Desuden efterlyses en robust driftsmodel, med nem adgang til infrastrukturene ift. forskning, innovation, test og standardisering.

Respondenterne peger på, at mulighederne for at søge støtte til infrastruktur generelt er ret begrænsede. En respondent ser det som en svaghed, at infrastrukturen skal opbygges *bottom-up*, og at der ikke er en strategisk understøttelse. Andre finder, at der mangler dedikerede virkemidler til etablering og koordinering af tekniske faciliteter.

Respondenterne efterspørger strategisk fremsynethed ift. at kunne tilvejebringe infrastruktur af national og strategisk karakter, der kan fremme og understøtte den hastige udvikling af kvanteteknologi. Forskningen kræver, at man tør investere i *state of the art*, både for at bedrive forskning og for at kunne rekruttere og fastholde de bedste forskere. Respondenterne beskriver ikke nærmere, om der konkret mangler national forsknings- og testinfrastruktur, men betoner vigtigheden af et dansk engagement i de internationale initiativer EuroHPC, EuroQCI og ESS samt det nye NATO Center for Quantum Technologies.

De vigtigste danske og internationale forsknings- og testinfrastrukturer til brug for forskning på kvanteområdet

I forhold til den allerede eksisterende forsknings- og testinfrastruktur, som Danmark har eller har adgang til, fremhæves en række infrastrukturer som de vigtigste og af strategisk betydning – se Tabel 3.1.

Tabel 3.1

De vigtigste danske og internationale forsknings- og testfaciliteter ifølge respondenterne

Forsknings-og testinfrastruktur	Anvendelsesområde	Dansk status
Laserlab.dk	Avancerede laserlysilder	Finansiering fra det nationale roadmap i 2014
Quantech	Fremstilling og karakterisering af fotoniske og elektroniske kvantekomponenter.	Finansiering fra det nationale roadmap i 2016

Forsknings-og testinfrastruktur	Anvendelsesområde	Dansk status
DTU Nanolab	Renrumsfacilitet	En central laboratoriefacilitet, placeret på DTU.
ESS – European Spallation Source	Materialeforskning, bl.a. i kvantematerialer	Danmark er sammen med Sverige medvært for ESS, som er et internationalt samarbejde med placering i Lund.
EuroHPC	Supercomputere / High Performance Computing (HPC). I 2022 har EuroHPC til hensigt at købe et antal kvantecomputere tilknyttet eksisterende HPC-anlæg med henblik på at øge og udbrede den europæiske adgang til kvantecomputere.	Danmark deltager i forordningen om EuroHPC. De danske aktiviteter koordineres af DeIC (Dansk e-infrastruktur Konsortium).
NordQuest	Et nystartet projekt under NeIC (Nordic e-infrastructure Collaboration) skal give dansk forskning adgang til et nordisk kvantecomputer-netværk.	De danske aktiviteter koordineres af DeIC (Dansk e-infrastruktur Konsortium).
EuroQCI	Et europæisk netværk for kvantekommunikation i erhvervslivet og mellem myndigheder.	DTU sammen med Forskningsnettet under DeIC, har indsendt forslag til dansk deltagelse, med opbakning fra flere danske ministerier.
NATO Center for Quantum Technologies	Fire test-centre og et accelerator-initiativ i Danmark til at fremme anvendelsen af kvanteteknologi	Danmark deltager aktivt – herunder med et lasercenter på AU, et nanolab på DTU og højteknologiske måleapparater på Danmarks Nationale Metrologiinstitut. Her skal nye teknologier prøves af og overføres til virksomheder.

3.5 Respondenternes vurdering af finansiering af forskning på kvanteområdet

I dette afsnit redegøres for respondenternes vurderinger af status for finansiering af forskning på kvanteområdet og det fremtidige behov.

3.5.1 Finansiering af forskning på kvanteområdet

Respondenterne er blevet bedt om at vurdere, hvordan status er for finansiering af forskning på kvanteområdet – herunder hvad der kendetegner finansieringen af den danske forskning på kvanteområdet i dag, og hvilke virkemidler der fremadrettet særlig er behov for.

Der har indtil videre ikke været målrettet forskningsmidler til kvanteområdet

Respondenterne peger på, at forskning på kvanteområdet hidtil primært har været finansieret gennem direkte konkurrence med forskning inden for alle øvrige områder, uden øremærkede midler til kvanteteknologi.

En række forskningsmidler fra forskellige kilder har alligevel tilsammen sikret dansk styrkeposition på området

Der peges dog samtidig på, at både de private og offentlige fonde har spillet en helt afgørende rolle i at skabe den styrkeposition, Danmark har i dag. Der peges på, at især Grundforskningsfonden, private fonde, enkelte virksomheder (Microsoft, IBM) og universiteternes egne basismidler har sikret den danske styrkeposition på grundforskningen.

Det anføres, at kvanteområdet gennem mange år har været finansieret via større satsninger inden for nanoscience eller inden for beslægtede områder som fotonik, samt inden for den generelle satsning på grundforskning, som f.eks. Grundforskningsfonden har varetaget. Også VILLUM FONDEN og Carlsbergfondet har spillet en væsentlig rolle i finansieringen af kvanteområdet. Siden 2019 har Novo Nordisk Fonden endvidere bidraget med væsentlige midler målrettet kvanteområdet, og må forventes fremover at spille en stadig stigende rolle gennem åben konkurrence og strategiske midler.

Derudover peges der på, at med undtagelse af navnlig Qubiz, så har midler fra Innovationsfonden til anvendt forskning spillet en mindre rolle.

I forhold til EU-finansiering har særlig ERC-bevillinger været væsentlige

Respondenterne peger på, at international finansiering har været meget vigtig, og har i høj grad understøttet de danske fremskridt på området, f.eks. gennem ERC-bevillinger. European Research Council (ERC) har støttet mange af de eksisterende miljøer og været af enorm betydning for disse.

Respondenterne peger også på, at internationalt samarbejde og synlighed er vigtigt, og derfor spiller international finansiering en stor rolle. International finansiering kan dog alene ikke bære en satsning i Danmark. Det skal udelukkende ses som et supplement.

Der er brug for en bred palet af virkemidler fremadrettet

De fleste respondenter peger på, at der fremadrettet er brug for en bred vifte af virkemidler, og at et bredspektret udbud af virkemidler er nødvendig for at favne alsidigheden i forskningsområdet. Der peges dog samtidig især på et fremtidigt behov for forskningsmidler rettet mod anvendt forskning og innovation baseret på kvanteforskning, samt forskningsmidler rettet mod yngre forskere.

Der mangler særlige virkemidler rettet mod anvendt forskning og innovation

Både universiteter, erhvervsorganisationer og private fonde peger på et behov for mere fokus på forskningsfinansiering rettet mod anvendt forskning og innovation.

DTU peger således på, at en længerevarende (5 til 20 år) modningsproces er nødvendig, før teknologier baseret på kvanteforskning kan komme på markedet. Når teknologien er klar til anvendelse og indtjening, dækker Innovationsfonden og tilsvarende kilder værdikæden til fulde, men der mangler finansiering i den forudgående modningsproces.

Der er ifølge flere af respondenterne helt generelt i Danmark et gab mellem den excellence-drevne grundforskning finansieret af Grundforskningsfonden og Danmarks Frie Forskningsfond (DFF) på den ene side og den industrirettede forskning finansieret af Innovationsfonden, UDP'erne m.m. på en anden side.

Aarhus Universitet peger på, at der er behov for flere strategiske midler, som kan udnyttes i både mindre og i meget store satsninger. Samtidig er det helt afgørende, at finansieringen af en grundlagsskabende forskning på grænsefladen mellem teori og teknologiudvikling øges. I det hele taget kan et snævert fokus på kommercialisering med en meget kort tidshorisont stå i vejen for at lykkes med den anden kvanterevolution.

Også de private fonde efterspørger udvikling af innovation inden for kvanteområdet. Novo Nordisk Fonden peger på, at de statslige midler hertil ofte har været for kortsigtede, og at området ikke rigtigt passer til 'Innomissions'. Generelt bør innovationsområdet gentænkes, gerne sammentænkt med etablering af det nye NATO-center i Danmark. VILLUM FONDEN peger også på, at finansiering af innovationsdelen er underudviklet i forhold til forskningsdelen, og at vi derfor ikke udnytter det potentiale, der er.

Særlig erhvervsorganisationerne peger på behovet for større indsatser og specifikke anvendelsesorienterede flagskibsprojekter

DI fraråder i deres tilbagemelding kraftigt, at den fremtidige indsats præges af mange små forskningsbevillinger. Dertil er eksisterende forskning alt for langt fra markedet. Det koster penge at modne grundforskning til markedet.

Både DI og Lif peger på, at der er brug for store bevillinger til anvendelsesorienterede flagskibsprojekter (det kunne f.eks. være via Grand Solutions som virkemiddel), f.eks. inden for cybersikkerhed, grøn omstilling, life science, transportsektoren, forsvar mv. Ellers kommer virksomhederne ikke til at indgå i samarbejder. DI peger endvidere på, at virkemidler som f.eks. Innoexplorer kan være relevante, for så vidt angår start-ups på kvanteområdet, lige som virkemidler i Vækstfonden også kunne være det.

Derudover anbefaler DI også midler til større forskningscentre, dog kun såfremt disse har et tværdisciplinært og anvendelsesorienteret fokus, også gerne på tværs af universiteter.

Der er endvidere behov for flere midler til yngre forskere

Respondenterne (særlig universiteterne) peger endvidere på, at der bør være særlig opmærksomhed på finansieringsmuligheder særlig for yngre forskere, fordi der forventes at være stor rift om internationale forskningstalenter inden for området fremadrettet.

En bred vifte af virkemidler bør derfor være til stede for både at understøtte de helt unge forskere i starten af deres karriere, og samtidig også give de internationale anerkendte og mere etablerede forskere i Danmark mulighed for at udbygge deres position og indgå i forpligtende samarbejder med universiteter og virksomheder.

Der mangler eksempelvis offentlige midler til individuelle postdoc-projekter på universiteterne, der vil gøre det muligt for unge talenter at søge deres egne projekter inden for kvanteteknologi.

Eftersom det ikke vides, hvilke kvanteteknologier der vil vise sig mest levedygtige, bør der sættes på en bred gruppe af forskningstalenter. Talentmassen findes i vidt omfang i Danmark, men tiltrækning af udenlandske talenter er også nødvendig.

3.6 Respondenternes vurdering af samarbejdet mellem universiteter og virksomheder på kvanteområdet

I dette afsnit redegøres for respondenternes vurderinger af samarbejdet mellem danske universiteter og virksomheder i Danmark, såvel som dansk kommerialisering og iværksætteri på området.

3.6.1 Samarbejdet mellem danske universiteter og virksomheder i Danmark inden for forskning på kvanteområdet

Respondenterne er blevet bedt om deres vurdering af, hvordan samarbejdet er mellem de danske universiteter og virksomheder – herunder hvad der kendetegner samarbejdet, om der er fag- eller teknologiområder, hvor samarbejdet er særligt godt, eller hvor der er et uudnyttet potentiale.

Universiteternes erhvervssamarbejde er koncentreret omkring få virksomheder ...

Respondenterne peger samstemmende på, at samarbejdet i dag er koncentreret omkring de relativt få virksomheder, der allerede arbejder med kvanteteknologi. Generelt samarbejder danske universiteter mest med danske virksomheder, men omkring kvanteteknologi er der frugtbare samarbejder med internationale førende virksomheder såsom IBM og Microsoft. Microsoft, der satser på hardware- og softwareudvikling inden for kvanteteknologi, indtager en særstatus, da virksomheden har lagt sit globale center for udvikling af kvantematerialer i Danmark. Microsoft har et tæt samarbejde med både Niels Bohr Institutet på Københavns Universitet, og med Nanolab på DTU.

IBM har et samarbejde med Niels Bohr Institutet, hvor der stilles kvantecomputere til rådighed for undervisningen. IBM samarbejder også med SDU, AU og DTU omkring forskningsprojekter. IBM stiller også kvantecomputere til rådighed for start-ups.

... og særligt virksomheder, der udvikler kvanteteknologi

Også fra universitetssiden peges der på, at samarbejdet primært foregår med virksomheder, der udvikler kvanteteknologi, og i mindre grad med aftagervirksomheder, idet aftagervirksomhederne endnu ikke forstår eller værdsætter kvanteteknologiernes potentiale og industrielle anvendelsesmuligheder, samt at kvanteteknologiernes modenhedsniveau endnu er lavt.

Der er af helt naturlige årsager et tæt samarbejde imellem de universitetsinstitutter, der har været medvirkende til at skabe spin-out virksomheder, og de pågældende virksomheder. Det gælder bl.a. for forholdet imellem Niels Bohr Institutet og virksomhederne Sparrow Quantum og QDevil, mellem Institut for Fysik og Astronomi ved Aarhus Universitet og virksomheden Kvantify samt imellem DTU Institut for Kemiteknik og virksomheden MQS.

Flere virksomheder ser potentialer...

Men flere virksomheder ser potentialer, og f.eks. har Novo Nordisk A/S nedsat en decideret "kvante taskforce". Endvidere er NKT Photonics inden for fotonik-relateret kvanteteknologi en vigtig teknologi-provider, og der er en lille skov af små kvantebaserede virksomheder på vej. Der er endvidere samarbejde omkring kvantekommunikation (med f.eks. Danske Bank) og om kvantesensorer. Det skal bemærkes, at næsten alle de stiftende medlemmer af brancheorganisationen Danish Quantum Community er på "quantum service"-siden.

... men der er stadig lang vej ift. engagering af det brede erhvervsliv

Når det er sagt, så peger erhvervsorganisationer som DI, Dansk Erhverv og Lif samt Danish Quantum Community på, at der kun i meget begrænset omfang er samarbejde mellem det bredere erhvervsliv og forskningsmiljøer, og at der er behov for at få flere virksomheder inddraget i samarbejde med forskere. Der peges på, at man for at udnytte potentialer i kvanteteknologien fuldt ud skal skabe mere opmærksomhed i danske virksomheder omkring de nye muligheder, som kvanteteknologien skaber. Specielt anføres behov for, at en række af de store traditionelle danske virksomheder gøres opmærksomme på de nye muligheder, da udnyttelse af kvanteteknologien kan blive afgørende for at opretholde og/eller styrke disse virksomheders konkurrenceevne på sigt. Samtidig peges også på, at der på sigt bør skabes større interesse blandt SMV'er, så der kan blive udviklet use cases med også mindre virksomheder og understøtte tidlig optagelse af de nye teknologier hos flest muligt.

Både nationalt og internationalt samarbejde mellem universiteter og virksomheder

På spørgsmål om, hvorvidt danske universiteter i højere grad samarbejder med udenlandske end danske virksomheder, og danske virksomheder med udenlandske universiteter, peger respondenterne svar på, at der er et fint samarbejdsklima imellem danske universiteter og danske virksomheder, og at der i øvrigt ikke er nogen klar tendens til, at danske universiteter fortrinsvist samarbejder med enten danske eller udenlandske virksomheder. Der peges på mange eksempler på begge typer af samarbejde, samt på at store forskningsintensive virksomheder har kapacitet til at samarbejde med universiteter over hele verden, mens det kan forholde sig anderledes for mindre virksomheder. Universiteternes samarbejde med danske virksomheder sker i overvejende grad gennem nationalt finansierede projekter, f.eks. Innovationsfondens Grand Solutions-projekter, mens samarbejde med udenlandske virksomheder ofte sker i forbindelse med EU-finansierede projekter. Generelt set er kvanteteknologiområdet kendetegnet ved et bredt internationalt samarbejde. Den geopolitiske situation har dog for nylig ændret sig, hvilket også har haft konsekvenser for universiteternes internationale samarbejde.

3.6.2 Kommercialisering og iværksættere på baggrund af forskningen inden for kvanteområdet i Danmark

Respondenterne er blevet spurgt til deres vurdering af mulighederne for kommercialisering af forskning og understøttelse af start-ups og iværksættere på baggrund af forskning inden for kvanteområdet i Danmark.

Der mangler anvendt forskning for at kunne omsætte grundforskning til kommercialisering ...

Respondenterne anfører, at den danske kvanteforskning i dag primært er grundforskning, og at der ofte er lang vej fra grundforskningen til kommercialisering.

Det anføres som tidligere nævnt, at en række andre vestlige lande netop i disse år satser massivt på en udvidelse af kvanteforskningen, således, at grundforskningen suppleres med anvendt forskning, der gør det lettere at tage skridtet til innovation og forretning. I Danmark er der behov for at stimulere samarbejder mellem forskere/institutter der har en stærk tradition for grundforskning og forskere/institutter med en mere ingeniørmæssig tradition.

Kvanteindustrien og markedet for kvanteteknologi er umodent

Der peges på, at både kvanteindustrien og markedet for kvanteteknologi i dag er relativt umodent, og at hovedparten af salget sker til forskningsinstitutioner eller avancerede udviklingsafdelinger. I denne fase er der behov for højt kvalificerede medarbejdere, typisk kandidater på ph.d.-niveau. I takt med at det kommercielle fokus skifter fra salg til forskningsinstitutioner i lavt volumen mod salg til industrielle anvendelser med højere volumen, ventes behovet for kandidater på master-niveau at stige.

Brug for lettere adgang til kvantecomputere

En lettere adgang til kvantecomputere til udvikling af algoritmer og applikationer, f.eks. til life science og den grønne omstilling vil være en stor hjælp for danske virksomheder, der udvikler kvantealgoritmer og -software. Erfaringer fra Tyskland viser, at etablering af et nationalt datacenter for kvantecomputere (i Jülich) skaber et højt niveau af opmærksomhed hos både universiteter, start-ups og i industrien, fordi barrieren for adgang til at arbejde med teknologierne sænkes betydeligt. En næsten tilsvarende effekt peger Danish Quantum Community på, at man kunne opnå ved at give danske virksomheder let adgang til kvante-computer ressourcer 'i skyen' – for en væsentlig lavere pris.

Der er betydelige udfordringer med at etablere og udvikle nye kvanteteknologiske virksomheder inden for kvanteområdet – herunder mangel på adgang til kapital

Når det kommer til mulighederne for at etablere og udvikle nye kvanteteknologivirksomheder, start-ups, peger respondenterne på en række udfordringer.

Vækstfonden peger på, at forskning i kvanteområdet falder bredt ind under området 'deeptech' (eller 'frontier tech') i finansieringsverdenen. Start-ups inden for dette område er generelt præget af langvarige udviklingshorisonter, med høj cash-burn rate (til højtuddannet personale, specialiserede laboratorier, adgang til ekstern infrastruktur, patentering, mv.), før selskaberne begynder at generere en omsætning. Bl.a. er IP-beskyttelse af kvanteteknologi udfordret af den lange time-to-market-tid, og den lange tid før indtjeningen sker.

Patenterne tjener sig typisk ikke ind på den korte (<10 års) bane. Processen herfor er ikke ulig den for biotech start-ups, som er en veludviklet sektor med et stærkt dansk økosystem. I udviklingsperioden er adgang til soft funding (forskningsbevillinger målrettet start-ups), tålmodig/langvarige egenkapitalsinvesteringer, samt partnerskaber med engagerede industrivirksomheder, alt sammen forudsætninger for succes. Et sådant miljø vil på kvanteområdet kunne skabes i Danmark, i symbiose med relevante miljøer, men det forudsætter bl.a. målrettede politikker og allokering af ressourcer (menneskelige og finansielle).

Adgang til kapital er afgørende for at skabe et stærkt økosystem med spirende start-ups. Kvantemarkedet er pt. i en relativt tidlig fase, med forholdsvis lang 'time-to-market'. Det resulterer i store behov for investeringer i forskning og udvikling i virksomhederne. Det er afgørende for etablering og udviklingen af et dansk kvante-økosystem, at der

sikres adgang til kapital fra både offentlige fonde og private investorer. De offentlige fonde kan være med til at hjælpe virksomhederne i de tidlige faser. Kapital fra private investorer, der kan bringe deres viden ind i virksomhederne i forhold til produktudvikling, salg, internationalisering mv., kan komme i spil, når virksomhederne er blevet lidt mere modne. DTU peger på, at den store opmærksomhed/hype omkring kvanteteknologi, betyder, er det ikke så vanskeligt at tiltrække indledende investeringer i spinouts, men at udfordringen består i, at investorerne forventer afkast på kort (<5 år) sigt, mens end-user-markedet stadig må forventes at være ganske beskedent. Danmark mangler venture kapital og "business angels" med dybere indsigt i kvanteteknologiernes anvendelsesmuligheder og modenhed til at identificere gode cases og udvikle forretningsmodeller.

Danske startups sælges ofte til udlandet

Danske startups sælges ofte til udlandet, efter den første succes er opnået, og senest er den danske kvanteteknologivirksomhed QDevil solgt til den amerikansk-israelske kvanteteknologiske vækstkomet Quantum Machines for et trecifret millionbeløb⁷. Respondenterne peger på behovet for incitament til at få virksomhederne til at blive og vokse i Danmark, for at sikre et levedygtigt økosystem. Det samme gælder incitament til at få udenlandske kvante-virksomheder til at flytte til Danmark.

Behov for kvante-incubator-miljø ...

Blandt respondenternes besvarelser er der også fokus på behovet for etablering af sparringsmuligheder omkring forretningsudvikling i form af en kvante-incubator, hvor start-up-virksomheder får støtte til at håndtere de meget store risici, der er forbundet med at etablere en virksomhed baseret på kvanteteknologi. Virksomheder af denne type skal håndtere kombinationen af nye produkter og et nyt marked, en notorisk vanskelig opgave. Der peges på, at en kvante-incubator med fordel kan etableres i samspil med andre eksisterende tilbud.

... og kandidater med tværfaglige kvantekompetencer ...

Blandt respondenterne peges også på behovet for at sikre, at både kvanteteknologiske start-up-virksomheder og det eksisterende erhvervsliv vil skabe en øget efterspørgsel efter kandidater med tværfaglige kvante-kompetencer, som kan udbrede anvendelsen af kvanteteknologi til andre forskningsområder og i virksomhederne, og derved fremme udviklingen af nye kvante-applikationer.

... samt for at gøre det attraktivt at arbejde i Danmark ...

De hurtigste ansættelser er af folk allerede bosat i Danmark, men i takt med at man kigger længere fra Danmark, øges vanskelighederne ift. ansættelser. Kombineret med at landene tættest på Danmark har lav ledighed blandt de samme ingeniører og forsker-profiler, udgør dette en udfordring.

... og for at gøre Danmark til en international hub for offentlig-privat kvantesamarbejde

Der peges på, at der for både at understøtte eksporten af danske løsninger og tiltrække investeringer til Danmark med fordel kan arbejdes på et narrativ om Danmark som 'super-power' inden for kvanteteknologi og førende kvantenation. Det vil tiltrække både forskere og virksomheder til Danmark og hjælpe til at gøre Danmark til et Hub for kvanteteknologi, hvis det danske økosystem konsolideres og udbygges. En tiltrækning af

⁷ 30. marts 2022: <https://borsen.dk/nyheder/virksomheder/dansk-kvantestartup-solgt-for-stort-millionbelob-vi-staar-midt-i-en-revolution>

udenlandske virksomheder og investeringer vil kunne bidrage til at skabe beskæftigelse i Danmark til unge kvanteforskere og dermed holde kompetencerne i Danmark. Det danske kvanteøkosystem vil kunne styrkes markant, hvis der er gode muligheder for samarbejde mellem universiteterne og den private sektor, således at evnen til at kommercialisere kvanteløsninger øges, og der kan skabes strategisk sammenhæng mellem forsknings-, innovations- og erhvervspolitik.

3.7 Respondenternes vurdering af danske anvendelsespotentialer af kvanteforskning og kvanteteknologier

I dette afsnit redegøres for respondenternes vurderinger af potentialerne for anvendelse af kvanteforskning og kvanteteknologier i Danmark.

3.7.1 Potentialerne for anvendelse af kvanteforskning og kvanteteknologier i Danmark

Respondenterne er blevet bedt om at vurdere, hvordan dansk og udenlandsk forskning og teknologiudvikling på kvanteområdet kan anvendes i Danmark i dag, og hvor der er særlige perspektiver for anvendelse i Danmark i fremtiden.

Der er meget brede fremtidige anvendelsespotentialer i kvanteteknologier i dansk erhvervsliv

Respondenterne pointerer, at kvanteteknologi skal ses om en 'enabling technology', i lighed med f.eks. IT og AI (kunstig intelligens). Ligesom IT i dag indgår i stort set alle samfunds- og forretningsprocesser, ventes kvanteteknologien på sigt at gøre det samme. Danmark er et højteknologisk samfund, og et af verdens mest digitaliserede samfund. Dette giver ideelle betingelser for at udnytte kvanteteknologien meget bredt, fra at øge cybersikkerheden ved hjælp af kvantekryptering, til udvikling af nye lægemidler og understøttelse af den grønne omstilling ved brug af kvantesimulatorer og kvantecomputere. I de kommende årtier kan 2. generations-kvanteteknologi skabe gennemgribende forandringer af samfundet, ligesom digitale teknologier har gjort det de seneste årtier, og der peges på behov for allerede nu at forberede forskning, erhvervsliv og samfund på denne en sådan udvikling.

Der er særlig potential inden for optimering af logistik, medicinalindustrien, finans- og fintech-sektoren, IT-sikkerhed samt grøn omstilling

Hvad angår kvanteteknologiens potentialer i erhvervslivet peges der blandt respondenterne på, at kommende kvantecomputere vil udgøre en "enabling" teknologi med stor betydning på tværs af brancher. Samtidig peges på en række erhvervsområder som rummer særligt oplagte muligheder for at drage nytte af fremtidig kvanteteknologi. Det gælder ikke mindst inden for optimering af logistik, medicinalindustrien, finans- og fintech-sektoren, IT-sikkerhed samt, grøn omstilling.

Danmark er allerede et meget digitaliseret samfund, og vores kritiske infrastruktur er knyttet op herpå, hvilket stiller stadig større krav til beskyttelse mod cyberangreb for både erhvervsliv, offentlig sektor og borgere.

Alle virksomheder har kritisk interesse i at kvantekryptering kan give beskyttelse for netop deres data og af data fra de offentlige systemer, som de er afhængige af (registerdata, offentlige målere mv.)

Flere respondenter peger på, at det er oplagt at udnytte den styrkeposition, Danmark har inden for medicinal- og life science industrien, og koble den op på kvanteteknologier, især kvantesimulering og kvantecomputere. Anvendelser inden for life science området ventes således at indebære et særdeles stort potentiale, der også er udpeget internationalt til at virke som et "pull" for udvikling af kvantecomputer-hardwaren – et potentiale der i de kommende år ventes at krystallisere sig, og som kan give den kvante-baserede life science industri en væsentlig konkurrencefordel. I dag tager det mellem ti og femten år fra et potentielt molekyle bliver opdaget, til et lægemiddel kan komme på markedet. Kvantecomputer-baseret simulering af biomolekyler, proteinsystemer mv. ventes at fremskynde processen betragteligt og har samtidig potentialet til at gøre det billigere. Kemi og biokemi er også relevante områder, og udvikling af kvante-baseret sensing vil åbne muligheder inden for medtech.

Finansbranchen håndterer hver dag mange transaktioner fra kunders ind- og udlån. Det er forventningen, at kvantecomputere i kan give hurtigere indblik i bankernes likviditet og derved kan bankerne bedre forrente egenkapitalen.

Danmark har en relativt stor klynge af transport- og logistikvirksomheder, for hvem den klasse af optimeringsproblemer, som netop kvantecomputere forventes at kunne løse, har en central betydning.

Energisystemer bliver mere og mere komplekse og indeholder dermed flere og flere variable – også over tid – som skal simuleres ift. energieffektivitet, forsyningssikkerhed med videre. Her kan regnekraften i en kvantecomputer være af stor værdi.

Der er også store samfundsmæssige potentialer – særlig inden for fortsat digitalisering, grøn omstilling og sundhedsvæsenet

I en bredere samfundsmæssig sammenhæng peges der blandt respondenterne på, at Danmarks høje grad af digitalisering giver muligheder for tidligt at høste muligheder fra kvanteteknologien. Også Danmarks fremtrædende position inden for grøn omstilling vil kunne udnyttes, når anden-generations kvanteteknologier bringes i spil. Også ift. sundhedsvæsenets udfordringer peges på potentialer ved anvendelse af kvanteteknologi.

Kvantebaseret kommunikation/kryptografi kan blive fuldstændigt essentielle i forhold til Danmarks forsvar, både geopolitisk og i forhold til finansielle interesser

På spørgsmålet om, hvorvidt der er særlige teknologier inden for kvanteområdet, som det danske samfund og danske virksomheder har særlige potentialer for at kunne udnytte, peges der inden for en række områder på forskellige muligheder med varierende tidshorisonter. Inden for en overskuelig tidshorisont ventes kvantebaseret kommunikation/kryptografi at blive fuldstændigt essentielle i forhold til Danmarks forsvar, både geopolitisk og i forhold til finansielle interesser.

Kvantesimulatorer og kvantecomputere forventes kunne få stor betydning inden f.eks. energisektoren og den grønne omstilling, logistik og medicinaludvikling

Transport, forsikring, energisektoren og logistik vil også med fordel kunne udnytte quantum annealers/simulatorer, og naturligvis den fulde kvantecomputer, når den kommer. IT branchen vil kunne udnytte nye områder inden for kvantebaseret kunstig intelligens,

som quantum machine learning, quantum natural language processing etc. Energisektoren og den grønne omstilling ventes at drage væsentlig nytte af en helt ny størrelsesorden af regnekraft, og vil kunne udnytte teknologierne til at opnå en dybere forståelse af fundamentale processer som nitrogenase og overfladekatalyse, og vil kunne bruge kvanteteknologier til at designe nye materialer.

På mellemlang sigt vil kvantesimulatorer og tidlige versioner af kvantecomputere kunne bidrage til optimering inden for logistik og optimering af et elnet baseret på mange vedvarende energikilder. Tilsvarende vurderes potentialerne i forbindelse med drug discovery (forskning i ny medicin) at være meget store, ligesom udvikling af lægemidler forventes at ske hurtigere og billigere. Udvikling af kvantebaseret sensing vil åbne muligheder inden for medtech.

3.8 Respondenternes vurderinger af forskerkompetencer og uddannelser inden for kvanteforskning

I dette afsnit redegøres for respondenternes vurderinger af den danske forskerbestand og talentmasse inden for kvanteforskningsområdet såvel som uddannelser på området.

3.8.1 Den danske forskerbestand og talentmasse inden for kvanteforskningsområdet

Respondenterne er blevet bedt om deres vurdering af den danske forskerbestand og talentmasse inden for kvanteforskningsområdet – herunder om der er tilstrækkelig volumen og kritisk masse af forskere i de danske forskningsmiljøer inden for kvanteområdet, og om hvor Danmark står i forhold til at tiltrække og fastholde danske og udenlandske talenter.

God talentmasse i dag

Respondenterne peger på, at der er en god og tilstrækkelig talentmasse inden for dansk forskning i kvanteområdet i dag. Det vurderes, at den danske forskerbestand og talentmasse er af høj kvalitet, og at der generelt er en tilstrækkeligt volumen og kritisk masse på området.

Generelt set har de danske forskningsmiljøer tiltrukket verdensførende forskere, og Danmark har på mange måder været i stand til at rekruttere "fra øverste hylde" på forskningsområdet. Overordnet set lykkes det i dag at tiltrække unge talenter både fra Danmark og udlandet, og der uddannes mange kandidater og forskere i kvanteteknologi. Kvantekomiteen inden for Videnskabernes selskab påpeger at det er vigtigt at holde fokus på at bevare den situation, og peger på at det f.eks. kunne være efter samme model som VILLUM Young Investigator programme.⁸

... men også behov for videre udvikling

AU peger på, at inden for kvantefysik er der både mange topforskere, yngre forskere på vej frem, og mange unge talenter der uddannes. Aktiviteterne inden for f.eks. kvantekemi er derimod stadig mere i opstartsfasen, og der er stort potentiale for nye og gerne tværfaglige aktiviteter, f.eks. i forbindelse med forskning i kvantematerialer. Støtte til

⁸ Det fremgår af Villum Fondens hjemmeside, at Villum Young Investigator-programmet har fokus på at tiltrække og fastholde dygtige yngre danske og udenlandske forskere på danske universiteter, og at målet er at understøtte universiteternes udvikling af internationale forskningsmiljøer på højt niveau.

de nuværende netværk og ESS-fyrtårne på området bør derfor sikres, også mht. uddannelse.

Novo Nordisk Fonden peger på, at i forhold til den nuværende fordeling af ekspertise, vil det være specielt oplagt at rekruttere yderligere inden for software og algoritmer, samt inden for kvantekommunikation. Endvidere anbefaler de at de danske universiteter op-prioriterer eksperimentel forskning og tilhørende teknisk infrastruktur og ekspertise.

Særlig erhvervsorganisationerne (DI og Lif) peger endvidere på, at der fremadrettet vil være behov for at uddanne flere ph.d'er, der kan få ansættelse i private virksomheder. Industrien ansætter og efterspørger i højere grad ph.d'er i takt med, at det teknologiske niveau kræver et sådant uddannelsesniveau. De påpeger, at hvis kvanteteknologien skal i anvendelse i industrien, vil det ganske givet forudsætte flere uddannede med en ph.d. inden området, som samtidig er i stand til at "oversætte" den til virksomhedens behov. Iværksættelsen af et målrettet ErhvervsPhD-program, der kunne bidrage til at løfte opgaven, nævnes som en mulighed.

Behov for mere tværfaglighed

En række respondenter efterspørger mere fokus på tværfaglighed. Der er god synergi mellem miljøerne, men der er behov for flere stabile midler til langsigtet samarbejde mellem de forskellige danske miljøer. F.eks. kræver forståelse af kvantematerialer kendskab til kvantemekanik, og der kan derfor være behov for en styrkelse af f.eks. kemistuderernes kompetencer inden for fysisk kemi, da der er en udfordring i forhold til rekruttering af ph.d. studerende med disse kompetencer.

Hvis et interdisciplinært samarbejde ikke realiseres, vil Danmark gå glip af en meget stor del af kvanteteknologiernes potentiale. De danske universiteter bør derfor i højere grad samarbejde på kvanteområdet, samtidig med at de hver især identificerer og gør deres styrkeområder.

Risiko for hjerneflugt på grund af stigende konkurrence på området

På trods af det høje danske kompetenceniveau påpeger respondenterne dog samtidig, at der fremadrettet er behov for at styrke rekrutteringsindsatsen og være sig bevidst, at de største talenter inden for kvanteområdet i dag har mange spændende jobtilbud både fra universiteter og industri.

Derfor opleves desværre en stigende 'hjerneflugt', enten ud af landet mod de store internationale forskningsmiljøer, eller mod industrien. Bl.a. bevæger store tech-virksomheder sig nu ind i kvanteteknologi med meget store ressourcer, som kan udfordre Danmark i konkurrencen om de allerbedste talenter.

Respondenterne peger på, at udfordringen med at fastholde talent bl.a. skyldes et meget begrænset antal faste stillinger på de danske universiteter i forhold til den talentmasse og videnakkumulation, der er behov for. For at fastholde og tiltrække talenter til dansk forskning er der derfor behov for at oprette flere permanente stillinger. De danske universiteter har dog snævre økonomiske rammer og deraf begrænsede muligheder for rekruttering til flere forskerstillinger.

Respondenterne peger samtidig på, at klare karriereplaner/muligheder for unge forskere er afgørende. Der mangler ofte mulighed for at tilbyde en "startpakke" for unge forskere til at etablere nye forskningsaktiviteter, hvilket er specielt kritisk for eksperimentelle

aktiviteter. Tidlig rekruttering med gode startpakker er således helt nødvendige for at kunne konkurrere om de bedste unge talenter på området.

Vækstfonden peger endvidere på, at dele af forskerbestanden og talentmassen er udfordret ift. migrering mellem det akademiske miljø og den private sektor, da det kan være vanskeligt for forskere at træde tilbage i det akademiske miljø efter at have været ansat i industrien – herunder også i start-ups. Dette grundet høje krav til publikationsaktivitet, vedvarende relevante grundforskningsaktiviteter, mv. For udenlandske ph.d.'er og postdocs kan det desuden være udfordrende at finde arbejde i dansk industri efter endt ansættelse i universitetsregi, fordi løbetiden på opholdstilladelser for arbejdsløse forskere er kort, og krav fra jobcentre er komplekse og ikke altid let gennemskuelige.

God international spredning blandt forskerne, men behov for bedre kønsbalance

Respondenterne peger på, at der er en fin international sammensætning blandt forskere på kvanteområdet generelt i Danmark med rigtig mange forskere på alle niveauer, som kommer fra andre lande end Danmark.

Der er derimod også bred enighed om, at der er et stort problem med kønsfordelingen blandt forskerne, som der skal arbejdes med. Der er således brug for en målrettet indsats for at tiltrække flere kvindelige forskere til kvanteområdet, så der kan opnås en mere balanceret kønsmæssig fordeling af forskermassen.

Novo Nordisk Fonden peger på, at de forskellige fysikdiscipliner inden for kvanteområdet oplever den største mangel på kvindelige forskere, og at der er ekstremt få kvindelige forskere på lektor- eller professorniveau i Danmark, hvilket desværre er en tendens, der også ses internationalt. Dog er der lidt flere kvindelige forskere inden for kvantekemi – både på lektor- og professorniveau. Denne mangel på diversitet vil på sigt skade kvanteområdet, som i meget høj grad har behov for en divers tilgang til problemløsning og kreativ tænkning.

Betydningen af offentlige og private fondes finansiering har været særdeles vigtig

Respondenterne peger på, at finansiering fra statslige såvel som private fonde har spillet en væsentlig og afgørende rolle for den danske kompetenceudvikling inden for kvanteområdet. Der peges således på, at investeringer fra private fonde, direkte virksomhedsfinansiering i samarbejdsaftaler med universiteter, Grundforskningsfonden og universiteternes grundbevillinger har alt at sige i forhold til, hvor godt Danmark står i dag. Det nævnes bl.a. at Charles Marcus f.eks. er ansat i et Villum Kann Rasmussen-professorat, startede Center for Quantum Devices med en bevilling fra Grundforskningsfonden og tidligere var tilknyttet Microsoft Quantum Lab.

3.8.2 Uddannelser inden for kvanteområdet i Danmark

Respondenterne er blevet bedt om at vurdere de eksisterende kvanterelaterede uddannelser i Danmark, samt det forventede fremtidige behov på området.

Danmark har stærke uddannelser på området, som det er vigtigt løbende at udvikle

Respondenterne peger på, at Danmark har et meget stærkt uddannelsesmiljø inden for kvanteområdet og uddanner kandidater på højeste internationale niveau. Der peges på, at det særligt er uddannelser inden for fysik, kemi, nanoscience, matematik, datalogi, elektronik mv. der i dag er centrale for at uddanne de nødvendige kandidater med kendskab til kvanteområdet. Respondenterne peger derfor på, at det særlig er vigtigt, at de

allerede eksisterende forskningsbaserede uddannelser inden for kvanteområdet opretholder deres høje niveau gennem løbende udvikling.

Behov for at udbrede viden om kvanteforskning til flere uddannelser samt evt. oprette nye uddannelser

Respondenterne peger endvidere på, at der også bør være opmærksomhed på behovet for evt. at udvikle nye uddannelser på kvanteområdet. Her nævner KU og DTU, at de sammen har ansøgt Uddannelses og Forskningsministeriet om oprettelse af en nye kandidatuddannelse inden for kvanteinformationsvidenskab (Master of Science in Quantum Information Science).

På grund af udviklingen inden for forskning på kvanteområdet ventes der dog også yderligere vækstpotentiale inden for uddannelsesområdet. Respondenterne peger på, at der fremadrettet må forventes at blive brug for at øge og udbrede opmærksomheden omkring mulighederne i kvanteområdet til en bredere gruppe af eksisterende uddannelser, der ikke hidtil har haft fokus eller opmærksomhed rettet mod kvanteområdet. Der ligger endvidere et stort potentiale i et tættere samarbejde med internationale partnere i forhold til uddannelse af kandidater inden for kvanteområdet.

I forlængelse heraf kan der også være et øget fremtidigt behov for uddannelser med et interdisciplinært fokus, så andre fagdiscipliner end de nuværende sættes i spil i forhold til at adoptere kvanteområdet og anvende teknologierne. Det kunne f.eks. være inden for det biologiske eller biokemiske område. Det kan også være et øget fokus inden for datalogi og data science på de nye muligheder, som kvantecomputeren og kvantesimulering vil bringe fremadrettet.

Danmark har ikke haft problemer med at tiltrække og fastholde talenter ind til videre

Respondenterne peger på, at Danmark generelt ikke har problemer med at tiltrække de bedste kandidater til Danmark. Det nævnes dog af flere, at begrænsningen af engelsksprogede uddannelser kan begrænse tiltrækningen af udenlandske kandidatstuderende. IDA peger endvidere på, at der burde iværksættes initiativer, som styrker fastholdelsen af internationale studerende efter endt uddannelse, f.eks. gennem jobgaranti i samarbejde med virksomheder.

På længere sigt kan der blive behov for efteruddannelse rettet mod virksomheder

Nogle respondenter peger endvidere på, at der også på efteruddannelsesområdet på lidt længere sigt evt. vil være behov for at opruste kompetenceniveauet. Behovet vil evt. opstå efterhånden som nye teknologier baseret på viden om kvanteområdet vil brede sig til brancher, hvor brugen af kvanteteknologi indtil videre på det nuværende udviklingsstade ikke har haft nogen relevans.

4. Universiteternes forskning på kvanteområdet

Stort set al forskning inden for kvanteområdet sker på Københavns Universitet, Aarhus Universitet, DTU og Syddansk Universitet – heraf alene 49 procent på Københavns Universitet, hvor især Niels Bohr Institutet spiller en stor rolle.

Dette kapitel sætter fokus på omfanget og karakteren af forskning på kvanteområdet på de danske universiteter. Herunder også fordelingen på fagområder samt finansieringen af forskningen.

Endvidere sættes fokus på universiteternes samarbejde med eksterne parter – herunder særlig deres samarbejde med virksomheder samt på universiteternes kommercialisering af deres forskning på området.

Kapitlet kortlægger endvidere omfanget af uddannelser på kvanteområdet, nye planer for uddannelser samt udbuddet af efter- og videreuddannelser.

Kapitlets hovedkonklusioner

Stort set al forskning inden for kvanteområdet sker på Københavns Universitet, Aarhus Universitet, DTU og Syddansk Universitet

I alt havde universiteterne 537 årsværk, som brugte mere end 50 procent af deres forskningstid inden for forskning på kvanteområdet i 2021. Groft omsat svarer det til ca. 3 procent af de samlede forskningsårsværk i Danmark på de højere læreranstalter. Stort set al forskning inden for kvanteområdet sker på Københavns Universitet, Aarhus Universitet, DTU og Syddansk Universitet – heraf alene 49 procent på Københavns Universitet (og herunder især Niels Bohr Institutet).

Forskningen er overvejende grundforskning og kvantematerialer er det største fagområde

65 procent af den samlede forskning inden for kvanteområdet er grundforskning. Knap halvdelen af den danske forskning sker inden for kvantematerialer (22 procent), kvantefotonik (14 procent) og kvantecomputere (12 procent). 80 procent af forskningen på kvanteområdet er finansieret af eksterne kilder – herunder især private fonde, offentlige fonde og EU.

Universiteterne samarbejder især med virksomheder gennem formelle og uformelle netværk

Langt de fleste institutter med forskning på kvanteområdet har samarbejde med udenlandske universiteter og videncenter, men også andre universiteter i Danmark. Ca. halvdelen samarbejder med danske virksomheder eller udenlandske virksomheder.

Næsten alle institutter indgår i et formelt eller uformelt netværkssamarbejde med virksomheder, og ca. halvdelen har direkte forskningssamarbejde med virksomheder. Knap en tredjedel samarbejder med virksomheder omkring uddannelse, mens meget få institutter får direkte støtte fra virksomheder til gennemførelse af forskningsprojekter, finansiering af forskerstillinger, bygninger, indkøb af forskningsudstyr mv.

En række universitetsinstitutter peger på stort fokus på patentering og etablering af spin-outs

8 ud af de 21 universitetsinstitutter med forskning inden for kvanteområdet angiver at have udtaget patenter, og 8 ud af 21 universitetsinstitutter angiver at have etableret virksomheder på baggrund af deres forskning på kvanteområdet. Det er – på nær en enkelt undtagelse – de samme institutter, der angiver at have udtaget patenter og etableret virksomheder. Alle institutterne er placeret på enten Københavns Universitet, Aarhus Universitet, DTU eller Syddansk Universitet.

Der er flest uddannelser med undervisning inden for kvanteområdet på fysik og kemi

Institutterne angiver tilsammen at have i alt 28 individuelle uddannelser, hvor der undervises inden for kvanteforskning. Antallet af enkeltuddannelser er størst inden for fysik og kemi, og det er også på disse uddannelser, at undervisningen på kvanteområdet er størst. Københavns Universitet og DTU har i april 2022 fået godkendt en ny fælles uddannelse inden for kvanteinformationsvidenskab.

Der uddannes ca. 100 ph.d.er om året inden for kvanteområdet

Der uddannes ca. 100 ph.d.er inden for forskning på kvanteområdet om året – heraf ca. halvdelen inden for fysik.

Udbuddet af efter- og videreuddannelse er generelt begrænset bortset fra hos Niels Bohr Institutet på Københavns Universitet

Nogle få universitetsinstitutter angiver at have efter- og videreuddannelse primært rettet mod gymnasielærere. Det gælder også Københavns Universitets Niels Bohr Institut, som derudover også har forløb rettet mod elever, virksomheder m.fl.

4.1 Indledning og metode

Dette kapitel sætter fokus på en række forskellige aspekter omkring forskningen på kvanteområdet på de danske universiteter.

Kapitlet belyser bl.a. omfanget og karakteren af forskning på kvanteområdet på de danske universiteter i dag.

Kapitlet sætter endvidere fokus på, hvor meget samarbejde universiteterne har med eksterne parter omkring forskning på kvanteområdet, hvem de samarbejder med, og hvad de samarbejder om. Det gælder især i forhold til deres samarbejde med danske og udenlandske virksomheder.

Kapitlet sætter også fokus på universiteternes kommerialisering af deres forskning på kvanteområdet for at belyse, hvordan forskningen omsættes til nye teknologier og nye virksomheder.

Endelig sætter kapitlet fokus på opbygning af fremtidige kompetencer inden for kvanteområdet. Kapitlet kortlægger derfor bl.a. omfanget af bachelor-, kandidat- og ph.d.-uddannelser på kvanteområdet.

Kortlægningen af universiteternes forskning på kvanteområdet er sket gennem udsendelse af en spørgeramme til universiteterne målrettet universiteternes institutter med forskning inden for kvanteområdet. Boks 4.1 præsenterer nærmere, hvordan indsamlingen af data er foregået.

Boks 4.1 Metode bag kortlægningen af universiteternes forskning på kvanteområdet

Danmarks Statistiks forsknings- og udviklingsstatistik (FoU-statistik) indsamler ikke data vedr. forskning på kvanteområdet isoleret set. Kortlægningen af kvanteforskningen på de danske universiteter er derfor baseret på udsendelse af en særlig spørgeskræmme til relevante institutter på universiteterne.

I spørgerammen er universitetsinstitutterne indledningsvist blevet bedt om at opgøre (evt. i form af et skøn) antallet af ansatte og antallet af årsværk for henholdsvis videnskabeligt personale samt teknisk og administrativt personale, som bruger mere end 50 procent af deres samlede forskningstid på forskning inden for kvanteområdet.

I efterbehandlingen af en række af de indberettede data er der foretaget omregning og vægtning af institutternes besvarelser med udgangspunkt i det antal forskningsårsværk, institutterne har indberettet. Formålet er at sikre det mest retvisende billede af typen og karakteren af forskning på kvanteområdet ved at tage højde for, at der er meget stor forskel på institutternes størrelse målt i årsværk inden for forskning på kvanteområdet.

Omregning og vægtning af institutternes besvarelser er sket i forhold til de indberettede data, der vedrører typen og karakteren af forskning på kvanteområdet, og hvor institutterne er blevet bedt om at angive deres besvarelse i procent af deres samlede forskning. Institutterne er således blevet spurgt om, hvor stor en procentdel af deres forskning, der er grundforskning, anvendt forskning eller udviklingsarbejde (typen af forskning), hvor stor en procentdel af deres forskning, der er sket inden for en række angivne fagområder, hvor stor en procentdel af deres forskning, der er internt og eksternt finansieret, og hvor stor en andel af deres eksternt finansierede forskning, der er finansieret af en række forskellige typer af finansieringskilder. Metoden med omregning og vægtning af institutternes besvarelser er derfor anvendt if. forhold til kapitlets afsnit 4.2, hvor institutternes besvarelse på disse spørgsmål er behandlet.

I alt er der modtaget besvarelser fra 26 universitetsinstitutter på den spørgeramme, der er udsendt til universiteterne. Nogle institutter har besvaret alle spørgsmål, mens andre kun har besvaret meget få. Ud af de 26 indsendte besvarelser havde fem institutter ikke angivet antal ansatte og antal årsværk for hverken videnskabeligt personale eller teknisk/administrativt personale. Deres besvarelse er ikke medregnet/medtaget, da det er taget som et udtryk for, at der ikke er forskningsaktiviteter på det pågældende institut. Der indgår dermed besvarelser fra 21 institutter i den samlede database. Se en oversigt over de 21 institutter i afsnit 8.2.

Det er vigtigt at være opmærksom på, at der er store usikkerheder forbundet med opgørelserne. For det første kan der være tale om skønnede tal fra institutternes side. For det andet inkluderes ikke andre forhold end årsværk i opgørelserne (dvs. der indgår ikke overhead mv.). Det antages dermed implicit, at overhead mv. vil være ens på tværs af universiteterne og institutterne.

4.2 Omfanget og karakteren af forskning på kvanteområdet på de danske universiteter

4.2.1 Ansatte og årsværk inden for forskning på kvanteområdet

Universitetsinstitutterne er blevet bedt om at angive (evt. i form af et skøn), hvor mange ansatte de havde blandt henholdsvis det videnskabelige personale (VIP) og blandt det teknisk/administrativt personale (TAP) pr. 31. december 2021, som brugte mere end 50 procent af deres forskningstid inden for forskning på kvanteområdet. Institutterne blev endvidere bedt om at omstætte antallet af ansatte til årsværk.

Tabel 4.1 viser, at universitetsinstitutterne har indmeldt, at de i alt havde 616 ansatte pr. 31. december 2021, som brugte mere end 50 procent af deres forskningstid inden for forskning på kvanteområdet. Heraf var 569 ansatte blandt det videnskabelige personale (VIP) og 47 blandt det teknisk/administrative personale (TAP). Tabellen viser endvidere, at det svarer til i alt 537 årsværk – heraf 501 årsværk for VIP og 37 årsværk for TAP.⁹

Tabel 4.1 viser også, at Københavns Universitet med 263 årsværk er det største universitet på området. Det skyldes i høj grad Niels Bohr Institutet, hvor 220 (heraf 200 VIP og 20 TAP-årsværk) er ansat. Niels Bohr Institutet er dermed også langt det største enkeltinstitut på området – svarende til 41 procent af alle oplyste årsværk for alle institutter tilsammen.

Tabel 4.1

Antal ansatte (VIP og TAP) og antal årsværk (VIP og TAP) inden for forskning i kvanteområdet på de danske universiteter i 2021, antal

Universitet	Antal ansatte			Antal årsværk		
	VIP	TAP	I alt	VIP	TAP	I alt
Københavns Universitet	257	27	284	241	22	263
Aarhus Universitet	145	13	158	112	9	121
Danmarks Tekniske Universitet	98	4	102	87	3	90
Syddansk Universitet	59	2	61	56	2	58
Aalborg Universitet	7	0	7	4	0	4
Copenhagen Business School	3	1	4	1	1	2
I alt	569	47	616	501	37	537

Anm.: I alt har 21 institutter på tværs af de danske universiteter besvaret denne del af spørgerammen. Antallet af ansatte og antallet af årsværk for henholdsvis videnskabeligt personale samt teknisk og administrativt personale omfatter ansatte som bruger mere end 50 procent af deres samlede forskningstid på forskning inden for kvanteområdet.

Kilde: Uddannelses- og Forskningsstyrelsen p.b.a. indberetninger fra institutter på de danske universiteter

⁹ Data fra Danmarks Statistiks forsknings- og udviklingsstatistik viser, at andelen af TAP blandt det samlede antal forskningsårsværk på de danske højere læreanstalter i 2020 var 22 procent. I de indberettede data fra spørgerammen svarer andelen af TAP-årsværk derimod kun til 7 procent af det samlede antal indberettede forskningsårsværk. Det kunne indikere, at der i kortlægningen systematisk er indmeldt for få TAP i forhold til antal VIP, og at det reelle antal TAP inden for kvanteområdet derfor må forventes at være højere.

Boks 4.2 Forskning på kvanteområdet i forhold til dansk forskning i alt

I alt har institutterne på de danske universiteter indmeldt, at der er 537 årsværk, der anvender mere end 50 procent af deres forskningstid på forskning inden for kvanteområdet i 2021.

I 2020 blev der ifølge Danmarks Statistik anvendt 17.109 årsværk på forskning på de danske højere læreranstalter i alt. Heraf var de 8.571 årsværk inden for det natur- og tekniskvidenskabelige hovedområde.

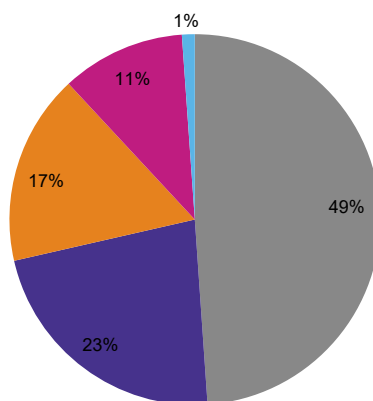
Det betyder, at forskning på kvanteområdet udgør ca. 3 procent af den samlede danske forskning på de højere læreranstalter og ca. 6 procent af den samlede danske forskning inden for det natur- og tekniskvidenskabelige hovedområde, hvor hovedparten af den danske forskning på kvanteområdet sker. Sammenligningen skal tages med store forbehold på grund af usikkerheden i forbindelse med opgørelsen af antallet af årsværk inden for kvanteområdet.

Kilde: Danmarks Statistiks FoU-statistik for 2020, tabel 22 (foreløbige tal)

Figur 4.1 viser andelen af årsværk i 2021 inden for forskning på kvanteområdet fordelt på universiteter. Figuren viser, at stort set al forskning inden for kvanteområdet sker på Københavns Universitet, Aarhus Universitet, DTU og Syddansk Universitet - heraf alene 49 procent på Københavns Universitet.

Figur 4.1

Andelen af årsværk i 2021 inden for forskning på kvanteområdet fordelt på universiteter, procent



■ Københavns Universitet ■ Aarhus Universitet ■ Danmarks Tekniske Universitet ■ Syddansk Universitet ■ Øvrige

Anm.: Antallet af årsværk omfatter ansatte (VIP og TAP i alt), som bruger mere end 50 procent af deres samlede forskningstid på forskning inden for kvanteområdet.

Kilde: Uddannelses- og Forskningsstyrelsen p.b.a. indberetninger fra institutter på de danske universiteter

4.2.2 Typen af forskning inden for kvanteområdet

Universitetsinstitutterne er blevet bedt om at angive, i hvilket omfang deres forskning inden for kvanteområdet er henholdsvis grundforskning, anvendt forskning eller udviklingsarbejde (evt. i form af et skøn). Boks 4.3 præsenterer de forskellige typer af forskning.

Figur 4.2 viser, at 65 procent af den samlede forskning inden for kvanteområdet er grundforskning, 28 procent er anvendt forskning, mens 7 procent er udviklingsarbejde. Langt hovedparten af den danske forskning på kvanteområdet er dermed grundforskning.

Sammenlignet med dansk forskning på de højere læreranstalter i alt indikerer det også, at andelen af grundforskning på kvanteområdet er højere end i dansk forskning samlet set, hvor grundforskning udgjorde 48 procent af den samlede forskning.¹⁰ Sammenligningen skal dog tages med forbehold på grund af de store usikkerheder i opgørelserne over antallet af årsværk inden for forskning på kvanteområdet.

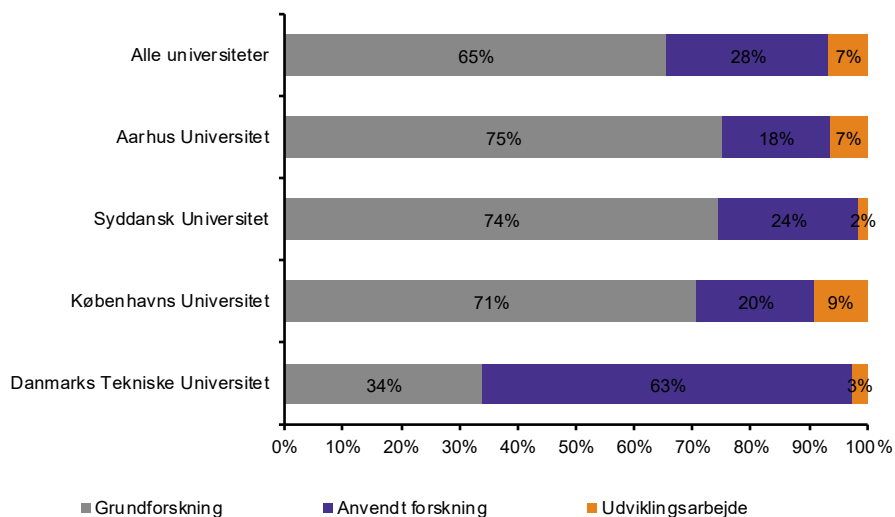
Figuren viser også, at fordelingen af grundforskning, anvendt forskning og udviklingsarbejde er nogenlunde ens på Aarhus Universitet, Syddansk Universitet og Københavns Universitet, og på alle tre universiteter udgør andelen af grundforskning over 70 procent.

¹⁰ I 2020 udgjorde grundforskning 48 procent af forskningen på de højere danske læreranstalter i alt, mens andelen af anvendt forskning udgjorde 40 procent og udviklingsarbejde udgjorde 12 procent (Danmarks Statistik, FoU-statistik 2020 – tabel 22 (foreløbige tal)).

Ved Danmarks Tekniske Universitet er den største del af forskningen derimod anvendt forskning (63 procent).

Figur 4.2

Typen af forskning på de danske universiteter inden for kvanteområdet, procent



Anm.: "Alle universiteter" inkluderer også Aalborg Universitet og CBS. Data er vægtet ift. årsværk.

Kilde: Uddannelses- og Forskningsstyrelsen pba. indberetninger fra institutter på de danske universiteter

Boks 4.3 Grundforskning, anvendt forskning og udviklingsarbejde

Grundforskning defineres som eksperimenterende eller teoretisk arbejde med det primære formål at opnå ny viden og forståelse uden nogen bestemt anvendelse i sigte.

Anvendt forskning defineres som eksperimenterende eller teoretisk arbejde med det primære formål at opnå ny viden og forståelse. Arbejdet er dog primært rettet mod bestemte anvendelsesområder.

Udviklingsarbejde defineres som systematisk arbejde baseret på anvendelsen af viden opnået gennem forskning eller praktisk erfaring med det formål at frembringe nye eller forbedrede materialer, produkter, processer, systemer eller tjenesteydelser.

Kilde: Danmarks Statistik

4.2.3 Forskningen fordelt på fagområder

For at kunne kortlægge hvilke områder der fylder mest i universiteternes samlede forskning på kvanteområdet, er universitetsinstitutterne blevet bedt om at angive, hvor stor en del af deres forskning på kvanteområdet, der falder inden for en lang række udvalgte fagområder (evt. i form af et skøn). I tilfælde af overlap mellem de enkelt fagområder er institutterne blevet bedt om at angive deres forskning i det fagområde, der kommer tættest på.

De udvalgte fagområder dækker en række områder med fokus på fremtidige teknologi-områder, som de bl.a. er udpeget i EUs European Quantum Flagship. Det drejer sig om: Kvantecomputere, kvantesimulatorer, kvantekommunikation samt kvantesensorer og kvantemetrologi.

De udvalgte fagområder dækker endvidere en række generelle mere eller mindre specialiserede fagområder. Det drejer sig bl.a. om kvantefysik/kvantemekanik, kvantekemi, kvantefotonik, kvantematerialer samt kvantealgoritmer og -programmering. Fagområderne har ikke mindst fokus på grundforskning, men spiller også en afgørende rolle i forhold til udvikling og udnyttelse af de fremtidige teknologiområder – f.eks. i forhold til udvikling af kvantecomputere, kvantesimulering mv.

Se nærmere præsentation af de forskellige teknologi- og fagområder på kvanteområdet i Boks 3.1 og Boks 3.1.¹¹

Figur 4.3 viser, at godt en femtedel (22 procent) af den danske forskning inden for kvanteområdet sker inden for kvantematerialer, og området er dermed langt det største af de udvalgte fagområder. Også kvantefotonik og kvantecomputere er relativt store fagområder og udgør henholdsvis 14 og 12 procent af den samlede forskning på kvanteområdet. De øvrige områder – bort set fra kvantemetrologi – er stort set lige store – omkring 7-9 procent af den samlede forskning på kvanteområdet.

Figuren viser også, at samlet udgør de generelle fagområder (dvs. kvantefysik/mekanik, kvantekemi, kvantefotonik, kvantematerialer samt kvantealgoritmer og -programmering), tilsammen 65 procent af den samlede forskning, mens de mere teknologirettede områder (dvs. kvantecomputere, kvantesimulatorer, kvantekommunikation samt kvantesensorer og kvantemetrologi) udgør 35 procent af den samlede forskning.

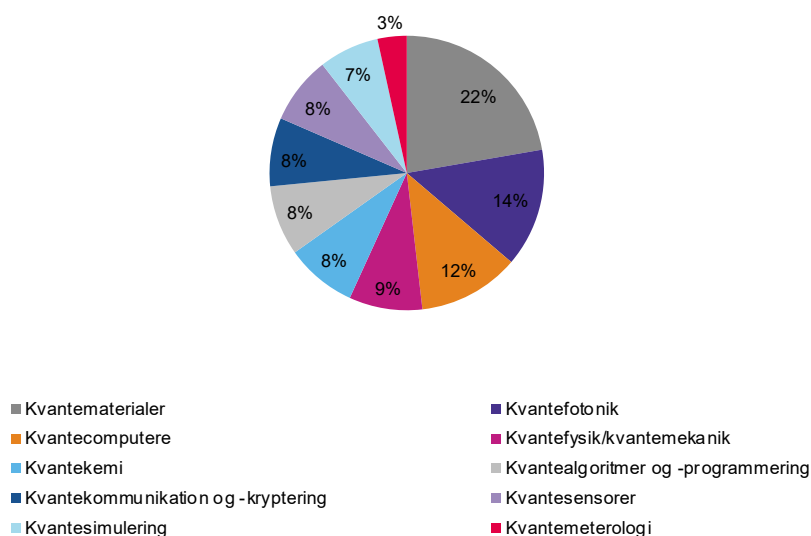
Samlet indikerer figuren dermed, at omfanget af dansk forskning inden for kvanteområdet er størst inden for rækken af de generelle forskningsområder, mens forskningen rettet specifikt mod de mere teknologirettede forskningsområder er mindre. Opdelingen skal dog tages med forbehold, da der ikke kan sættes så klare skel mellem fagområderne. Der kan både gemme sig grundforskning inden for de teknologirettede områder og anvendt forskning inden for de generelle fagområder.

Alligevel indikerer figuren dog, at universiteterne i højere grad tænker deres forskning ind i rammerne af de generelle forskningsområder og i knap så høj grad i retning af de specifikke kvanteteknologiske anvendelsesområder. Det gælder dog ikke kvantecomputere, der dog også er det mest umodne af de fire teknologiområder.

¹¹ Det skal bemærkes, at beskrivelserne af de udvalgte teknologi- og fagområderne ikke var en del af spørgerammen. Spørgerammen indeholdt kun overskrifterne for de nævnte teknologi- og fagområder.

Figur 4.3

Forskning fordelt på fagområder i procent af al forskning inden for kvanteområdet, procent



Anm.: Data er vægtet ift. årsværk

Kilde: Uddannelses- og Forskningsstyrelsen p.b.a. indberetninger fra institutter på de danske universiteter

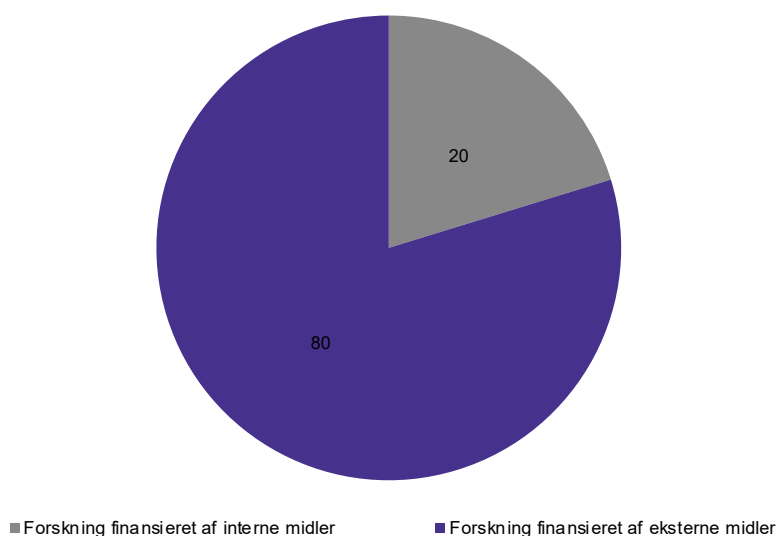
4.2.4 Intern eller ekstern finansiering af forskning på kvanteområdet

For at kunne belyse betydningen af eksterne midler for finansieringen af universiteter-
nes forskning inden for kvanteområdet er universitetsinstitutterne blevet bedt om at
angive, hvor stor en del af deres forskning på kvanteområdet i 2021, der er finansieret af
henholdsvis interne og eksterne midler (evt. i form af et skøn).

Indberetningerne fra institutterne viser, at 20 procent af forskningen angives til at være finansieret af interne midler, mens 80 procent – og dermed langt hovedparten – af forskningen er finansieret af eksterne kilder. Figuren indikerer dermed, at eksterne kilder har spillet en væsentlig rolle i opbygningen af forskningen inden for kvanteområdet.

Figur 4.4

Universiteternes forskning på kvanteområdet finansieret af interne eller eksterne midler 2021, procent



Anm.: Data er vægtet ift. årsværk

Kilde: Uddannelses- og Forskningsstyrelsen p.b.a. indberetninger fra institutter på de danske universiteter

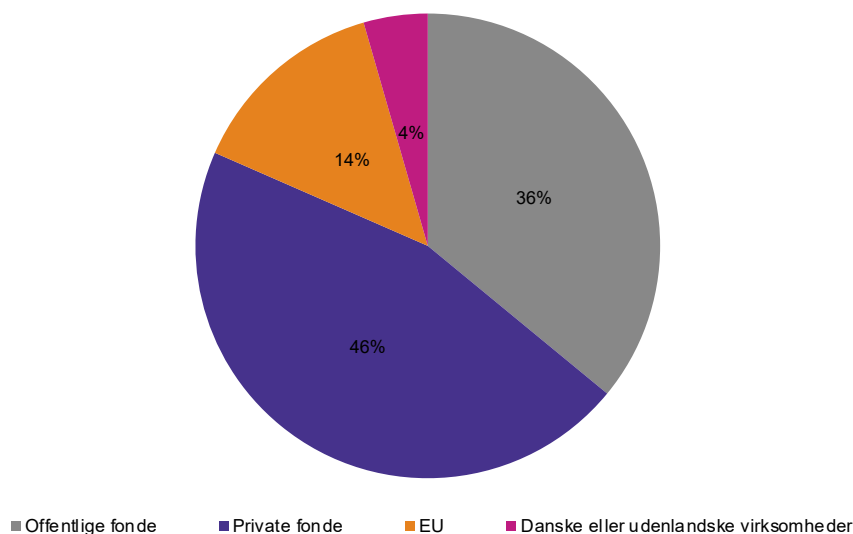
4.2.5 Eksterne finansieringskilder til forskning på kvanteområdet

For at kunne belyse, hvilke eksterne finansieringskilder der spiller den største rolle for kvanteforskningen, er universitetsinstitutterne blevet bedt om at angive (evt. i form af et skøn), hvor stor en del af deres eksterne finansiering, der stammer fra henholdsvis offentlige fonde, private fonde, EU, danske/udenlandske virksomheder eller andre kilder.

Figur 4.5 viser, at de private fonde, offentlige fonde og EU er langt de største bidragsydere til finansieringen af danske forskning på kvanteområdet, mens virksomheder spiller en meget lille rolle. Private fonde er med 46 procent af den samlede eksterne finansiering langt den vigtigste enkeltkilde til finansiering af forskning på kvanteområdet.

Figur 4.5

Universiteternes eksterne finansieringskilder til forskning på kvanteområdet 2021, procent



Anm.: Data er vægtet ift. årsværk.

Kilde: Uddannelses- og Forskningsstyrelsen p.b.a. indberetninger fra institutter på de danske universiteter

4.3 Universiteternes samarbejde med andre parter

4.3.1 Universiteternes samarbejdspartnere

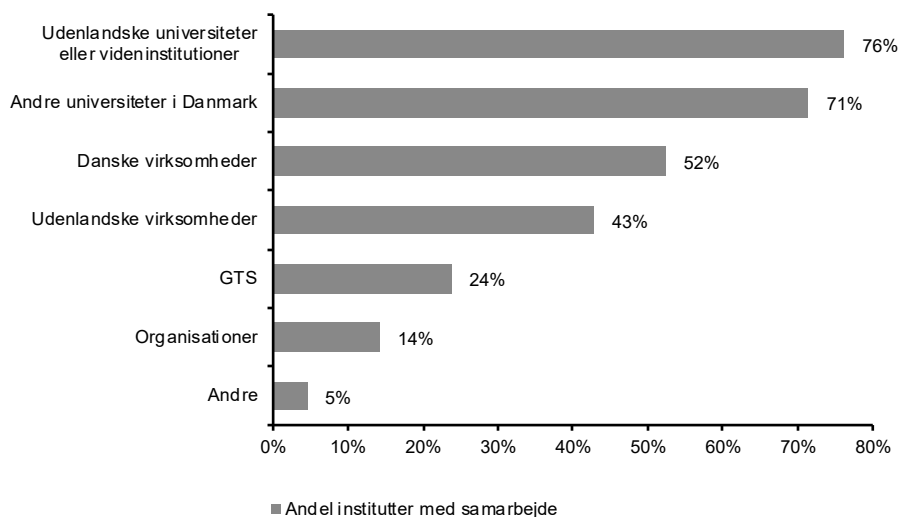
Universiteterne er på institutniveau blevet bedt om at angive, hvorvidt de har samarbejde med eksterne parter omkring forskning på kvanteområdet. De er blevet bedt om at angive, om de samarbejder med danske virksomheder, udenlandske virksomheder, GTS-institutter, andre universiteter i Danmark, udenlandske universiteter eller videninstitutioner, organisationer eller andre.

Figur 4.6 viser, at der er flest, der har angivet, at de samarbejder med udenlandske universiteter eller videninstitutioner (76 procent) eller andre universiteter i Danmark (71 procent). Godt halvdelen af institutterne (52 procent) angiver at samarbejde med danske virksomheder, mens lidt færre (43 procent) angiver at samarbejde med udenlandske virksomheder. 24 procent samarbejder med GTS-institutter (primært DFM, men også Alexandra Instituttet og Teknologisk Institut).

Det indikerer, at de fleste institutter har en eller anden form for samarbejde med enten danske eller udenlandske parter, og at særlig samarbejde med andre videnmiljøer – både danske og udenlandske, spiller en stor rolle på forskning inden for kvanteområdet.

Figur 4.6

Universitetsinstitutter, der samarbejder med eksterne parter fordelt på type af samarbejdspartner, procent



Anm.: N=21 institutter. Procentdel af antallet af institutter, der har svaret ja til spørgsmålet

Kilde: Uddannelses- og Forskningsstyrelsen p.b.a. indberetninger fra institutter på de danske universiteter

4.3.2 Universiteternes type af samarbejde med virksomheder

Universiteterne er på institutniveau også blevet bedt om at uddybe, hvilke typer af samarbejde de har med danske eller udenlandske virksomheder. Institutterne er blevet bedt om at angive, om de indgår i formelle eller uformelle netværk med virksomheder, om de har direkte forskningssamarbejde med virksomheder, om der er virksomheder, der støtter forskningsprojekter hos dem, finansierer forskerstillinger, finansierer f.eks. bygninger, indkøb/støtte til forskningsudstyr mv. og endelig om de samarbejder med virksomheder omkring uddannelse (f.eks. bachelor-, kandidat-, eller ph.d.-uddannelse).¹²

Figur 4.7 viser, at næsten alle institutter (81 procent – svarende til 17 ud af 21 institutter) angiver at have et formelt eller uformelt netværkssamarbejde med virksomheder. Netværkene kan være finansieret af enten egne eller eksterne midler fra offentlige fonde, private fonde, EU eller andre.

Figuren viser også, at lidt under halvdelen (48 procent – svarende til 10 ud af 21 institutter) angiver at have et direkte forskningssamarbejde med virksomheder, som evt. også inkluderer andre universiteter eller videninstitutioner.

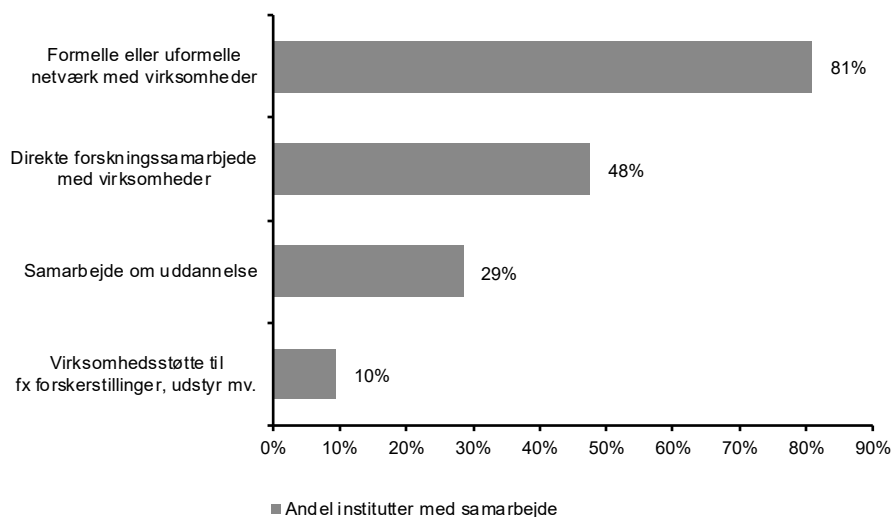
6 ud af de 21 institutter – svarende til 29 procent – angiver endvidere at samarbejde med virksomheder omkring uddannelse på enten bachelor-, kandidat- eller ph.d.-niveau.

¹² Det skal bemærkes, at det ikke er alle institutter, der har angivet en type af samarbejde med virksomheder, der samtidig har angivet danske eller udenlandske virksomheder som en samarbejdspartner i det foregående spørgsmål.

Færrest institutter (10 procent svarende til 2 ud af 21 institutter) angiver, at der er virksomheder, der direkte støtter forskningsprojekter hos dem, finansierer forskerstillinger, forskerbygninger støtter indkøb af forskningsudstyr mv. Det drejer sig om Københavns Universitets Niels Bohr Institut og DTU's Institut for Fysik.

Figur 4.7

Universitetsinstitutternes type af samarbejde med virksomheder, procent



Anm.: N=21 institutter. Procentdel af antallet af institutter, der har svaret ja til spørgsmålet

Kilde: Uddannelses- og Forskningsstyrelsen p.b.a. indberetninger fra institutter på de danske universiteter

Boks 4.4 præsenterer eksempler på forskellige typer af samarbejder med virksomheder i forhold til formelle eller uformelle netværk, forskningssamarbejde med virksomheder, virksomheders direkte finansiering af forskningsaktivitet og af samarbejde med virksomheder omkring uddannelse.

Boks 4.4 Eksempler på samarbejde med virksomheder

Universiteter og virksomheder i formelle eller uformelle netværk

I forhold til samarbejde med virksomheder i formelle og uformelle netværk peger bl.a. Københavns Universitet og DTU på deres medlemskab af netværket Danish Quantum Community (DQC), der forener en række af universiteter, virksomheder, interesseorganisationer og erhvervsklynger.

Aarhus Universitet og Syddansk universitet fremhæver deres deltagelse i ESS -fyrtårnet SMART og de øvrige ESS-fyrtårne.

DTU Fysik angiver, at de er medlem i det europæiske "Quantum Community Network (QCN)" som en del af EU's European Quantum Flagship.

AU angiver at lede den nationale laser-forskningsinfrastruktur Laser.lab, som har medlemmer fra alle universiteter i Danmark samt virksomheder.

Endvidere nævnes netværk/samarbejde med en række navngivne enkeltvirksomheder samt de danske bilaterale aftaler med andre lande.

Direkte forskningssamarbejde med virksomheder

Institutterne peger på en lang række virksomheder, de samarbejder med. Det gælder både store og små virksomheder samt spin-outs fra universiteterne.

DTU-Energy nævner f.eks., at de samarbejder med en tysk virksomhed – Thewa – omkring udvikling af superledere. DTU-Kemi nævner, at de samarbejder med Q-Chem vedr. kvantekemisk teori og algoritmer. KU-institut for matematiske fag nævner, at de samarbejder med Amazon Web Services (AWS) om kvantesoftwareprogrammering på deres kvantehardware i skyen.

Derudover peges på samarbejde med en lang række virksomheder. Det gælder en række store danske og udenlandske virksomheder som f.eks. NKT Photonics, Danske Bank, GTS-instituttet DFM, KPMG, IBM, Microsoft, Ørsted, ATP, Google, Bruker m.fl. Derudover peges på en række mindre virksomheder, hvoraf nogle er spin-outs fra universiteterne selv. Der nævnes f.eks. CryptQ, Zybersafe, Cryptomathic, Weibel Scientific, Quantum Sparrow, Quantum Machines, Quantum Motion, Qdevil, Trifork, D-wave, TEGnology, Nanonord m.fl.

Samarbejde om uddannelse

I forhold til samarbejdet med virksomheder omkring uddannelser nævner flere institutter at have løbende samarbejde med større og mindre virksomheder omkring f.eks. specialer eller som bidragsyder på særlige kurser i undervisningen. Der nævnes bl.a. KPMG, virksomheden Synopsis samt egne spin-outs.

Københavns Universitet – Niels Bohr Institutet – peger endvidere på et tæt samarbejde med Microsoft omkring uddannelse på kvanteområdet, og nævner endvidere at have et tæt samarbejde med IBM omkring undervisning i kvantefysik på alle niveauer ved brug af IBM's kvantecomputerplatform. Også Københavns Universitets Institut for matematiske fag nævner, at de bruger IBM's kvantecomputer i deres undervisning.

Virksomheders direkte finansiering af forskning på universiteterne

Københavns Universitet – Niels Bohr Institutet – angiver, at en række virksomheder har støttet dem substantielt. Det gælder særlig Microsoft, der har lagt et trecifret millionbeløb på instituttet til brug for stillinger, udstyr, mv. i forbindelse med deres udviklingsprojekt omkring kvantematerialer.

DTU Institut for Fysik peger på, at KPMG har medfinansieret en teknologidemonstration i samarbejde med Danske Bank. Samarbejdet omhandler udviklingen af sikker kvantekommunikation.

Kilde: Universiteternes indberetninger

4.4 Kommercialisering af universiteternes forskning – patenter og spin-outs

For at belyse omfanget af kommercialisering af universiteternes forskning på kvanteområdet er institutterne blevet bedt om at angive, om de har udtaget patenter på baggrund af deres forskning på kvanteområdet, og om der tidligere er etableret virksomheder/spin-outs eller andre iværksætteraktiviteter fra deres forskere eller forskning.

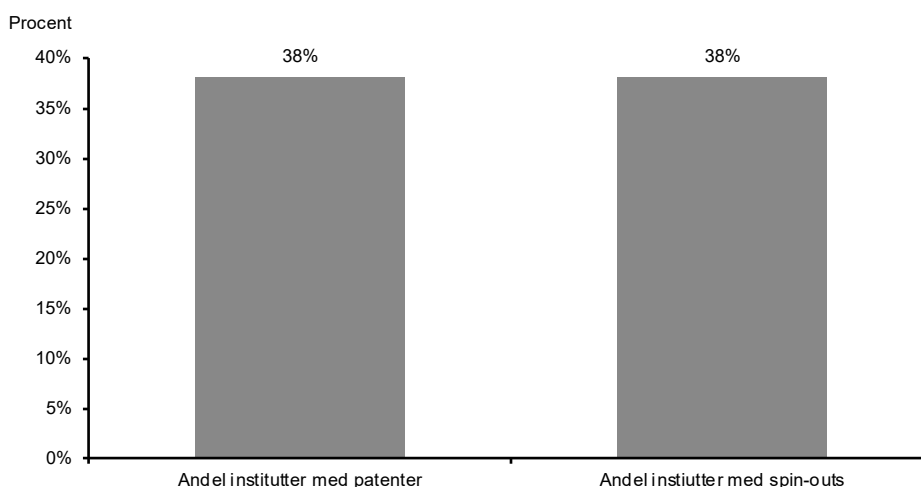
Figur 4.8 viser, at 38 procent af institutterne (svarende til 8 ud af 21 institutter) har angivet at have udtaget patenter, og 38 procent af institutterne (svarende til 8 ud af 21 institutter) angiver at have etableret virksomheder eller anden iværksætteraktiviteter på baggrund af deres forskning. Det skal dog bemærkes, at det ikke er alle institutter, der nødvendigvis har svaret på spørgsmålene.

Det er – på nær en enkelt undtagelse – de samme institutter, der angiver at have udtaget patenter og har etableret spin-outs. Det er desværre ikke muligt at opgøre, hvor mange patenter og spin-outs der er etableret på baggrund af de indsamlede data.

Boks 4.5 og Boks 4.6 præsenterer eksempler på udtagne patenter og spin-outs fra de danske universiteter.

Figur 4.8

Universitetsinstitutter, der har udtaget patenter eller etableret virksomheder på baggrund af deres forskning på kvanteområdet, procent



Anm.: N=21 institutter. Procentdel af antallet af institutter, der har svaret ja til spørgsmålet

Kilde: Uddannelses- og Forskningsstyrelsen p.b.a. indberetninger fra institutter på de danske universiteter

Boks 4.5 Eksempler på udtagne patenter

DTU nævner bl.a., at der er udtaget patenter relateret til produktion af superledere, kvantecomputer, kvantekryptografi, quantum random number generator, kvantesensorer og mikromekaniske strukturer.

Københavns Universitet nævner bl.a., at Niels Bohr Institutet har udtaget et stort antal patenter inden for kvanteområdet – heraf mere end 25 patenter den seneste tid. Typisk har de fremtrædende forskere (omkring 12 forskere) 6-8 patenter hver.

Aarhus Universitet nævner, at de flere gange har udtaget patenter på området – bl.a. inden for termoelektriske og magnetiske materialer.

SDU nævner at have nye patenter på vej inden for Digital Quantum Holography.

Kilde: Universiteternes indberetninger

Boks 4.6 Eksempler på spinout-virksomheder på baggrund af universiteternes forskning på kvanteområdet**Qdevil**

QDevil er et spin-out fra Københavns Universitets Niels Bohr Institut - Center for Quantum Devices. QDevil blev stiftet i 2016 og er en international kvanteteknologivirksomhed med fokus på at udvikle og fremstille hjælpeelektronik og specialiserede komponenter med det formål at accelerere forskning og udvikling i kvanteelektroniklaboratorier. QDevil har hovedkontor i København, og har etableret datterselskabet QDevil Inc. i USA. Virksomheden er netop blevet solgt til det amerikansk-israelske firma Quantum Machines.

SUBRA A/S

SUBRA A/S blev grundlagt i 2014 som et spin-out fra Danmarks Tekniske Universitet. Virksomheden er baseret på innovation og forskning inden for superlederteknologi og overfladevidenskab. Virksomheden fokuserer på industriel produktion af nanopolerede metalliske substratløsninger til superledere ved hjælp af patenteret overflademodifikationsteknologi.

SiPhotonIC

SiPhotonIC blev etableret i 2018 som en spin-out fra Danmarks Tekniske Universitet. SiPhotonic bygger integrerede kredse baseret på siliciumfotonikteknologi bl.a. til brug for kvanteteknologi.

Sparrow Quantum

Sparrow Quantum er en spin-out, som har til huse på Københavns Universitets Niels Bohr Institut. Sparrow Quantum er en kvanteteknologivirksomhed, der designer, udvikler og fremstiller enkeltfotonkilder til fotoniske kvanteapplikationer og -teknologier.

TEGnology

TEGnology blev oprindeligt etableret i 2010 af forskere ved Aarhus Universitet, men var en "sovende virksomhed" indtil slutningen af 2019. TEGnology har sammen med forskere fra Aarhus Universitet og andre forskningsinstitutter i Europa udviklet en teknik til energihøst baseret på nye og unikke materialer, der omdanner spildvarme til elektricitet.

Kilde: De enkelte virksomheders hjemmesider

4.5 Uddannelser på bachelor-, kandidat og ph.d.-niveau samt efteruddannelse baseret på forskning inden for kvanteområdet

4.5.1 Uddannelser med undervisning i kvanteforskning

Institutterne er blevet bedt om at oplyse, hvilke uddannelser de i dag udbyder, hvor der i større eller mindre omfang undervises i kvanteforskning. I alt har 11 af de 21 institutter besvaret spørgsmålet. Enkelte institutter har dog angivet at bidrage til uddannelser, som er indberettet af andre.

Tabel 4.2 viser, at institutterne tilsammen angiver at have i alt 28 individuelle uddannelser med undervisning inden for kvanteforskning. Heraf er 11 uddannelser på bachelorniveau, 16 på kandidatniveau og 1 diplomingeniøruddannelse.

Tabellen viser også, at antallet af enkeltuddannelser er størst inden for fysik og kemi. Det gælder både på bachelor- og kandidatniveauet. Også når det gælder omfanget af undervisning i kvanteforskning (målt i ECTS-point), er det inden for uddannelser i fysik og kemi, at uddannelse i på kvanteområdet fylder mest – om end opgørelser heraf er præget af stor usikkerhed.

Tabel 4.2

Uddannelser med undervisning i kvanteforskning på de danske universiteter, antal

Fagområde	Bachelor	Kandidat	Diplom-ingeniør	I alt	Uddannelsesnavn
Fysik	4	5		9	Fysik Fysik og teknologi Fysik og nanoteknologi
Kemi	4	5		9	Kemi Kemi og teknologi Medicinalkemi Anvendt kemi
Datalogi		1		1	Datalogi
Matematik	1	2		3	Matematik
Nanoscience	2	2		4	Nanoscience
Mechatronics		1	1	2	Mechatronics
i alt	11	16	1	28	

Anm.: 11 ud af 21 institutter har indberettet uddannelser, mens andre institutter har angivet at bidrage til andre institutters uddannelser.

Kilde: Universiteternes besvarelse af spørgeramme fra Uddannelses- og Forskningsstyrelsen

4.5.2 Nye uddannelser baseret på forskning inden for kvanteområdet

Universitetsinstitutterne er blevet bedt om at angive, om de har planer om at igangsætte nye uddannelser på kvanteområdet.

Der peges i den forbindelse især på en nye kandidatuddannelse i Kvanteinformationsvidenskab (Master of Science in Quantum Information Science (QIS-MSc)), som oprettes i et samarbejde mellem DTU og Københavns Universitet. Uddannelsen er godkendt af uddannelses- og forskningsministeren i april 2022. Uddannelsen forventes at starte i 2023 og få et sted mellem 25-50 studerende. Se nærmere i Boks 4.7.

Derudover oplyser Aarhus Universitet, at de har planer om en integreret kvanteuddannelse med fokus på nyeste forskning gennem et samarbejde mellem fysik, kemi, matematik og datalogi. Aarhus Universitet peger også på en overvejelse omkring en samlet uddannelse inden for materialer.

Boks 4.7 Ny kandidatuddannelse i Kvanteinformationsvidenskab

En ny kandidatuddannelse i Kvanteinformationsvidenskab (Master of Science in Quantum Information Science (QIS-MSc)) oprettes i et samarbejde mellem DTU og Københavns Universitet. Uddannelsen er godkendt af uddannelses- og forskningsministeren i april 2022.

Ifølge ansøgningen om den nye uddannelse er formålet med uddannelsen at uddanne kandidater med ekspertise i kvantevidenskab funderet i matematik, fysik og datalogi, som har både teoretiske, teknologiske og eksperimentelle kompetencer. Uddannelsesprofilen vil adskille sig fra eksisterende uddannelser ved at uddanne tværfaglige kandidater i kvantecomputere, informationsteori og kommunikation. Uddannelsen vil danne bro mellem på den ene side det teknologiske og eksperimentelle, og på den anden side det teoretiske og analytiske beregningsaspekt af kvanteinformation.

Ansøgningen om den nye uddannelse begrundes med, at der er en rivende udvikling i gang inden for kvanteinformation, ny kvanteteknologi og innovation, og det er nødvendigt at sikre kvalificeret arbejdskraft i Danmark inden for området. EU har investeret en milliard euro i kvanteområdet, og mange internationale og danske virksomheder har stort fokus på, hvad kvanterevolutionen kan føre til – både inden for kryptering, beregninger, kommunikation og simulering. Med uddannelsen sikres tværfaglige kandidater, der kan udnytte mulighederne i den nye kvanteteknologi. Kandidater i Quantum Information Science vil få stærke tværfaglige kompetencer inden for kvanteinformationsteori, -teknologi, -algoritmer, -beregninger og -simuleringer.

Kilde: Ansøgningen om den nye uddannelse (kan findes på hjemmesiden for prækvalifikation af uddannelser: <http://pkf.ufm.dk/>)

4.5.3 Planer om at øge indholdet af kvanteelementer i nuværende uddannelser

Universitetsinstitutterne er blevet bedt om at angive, om de har planer om at øge indholdet af kvanteelementer i de nuværende uddannelser – det gælder både i forhold til de allerede eksisterende uddannelser, hvor der undervises i temaer inden for kvanteområdet, men også i uddannelser, der ikke i dag har undervisning inden for kvanteområdet.

En række af institutterne peger på, at der planlægges øget fokus på kvanteområdet inden for deres uddannelser i fysik, kemi, matematik og datalogi. Se nærmere i Boks 4.8.

Boks 4.8 Øget fokus på kvanteområdet i eksisterende uddannelser

Uddannelser i fysik

I forhold til uddannelser inden for fysik angiver DTU bl.a., at de i forbindelse med etablering af den nye uddannelse i kvanteinformationsvidenskab vil udvikle nye eksperimentelle øvelser inden for kvanteinformation. Aarhus Universitet angiver, at de allerede har et stort udvalg af kurser med berøring i kvanteforskningen, men at der kan komme yderligere kurser i nærmeste fremtid. SDU angiver, at de, udover i Odense - også vil etablere Civilingeniøruddannelsen i fysik og teknologi i Sønderborg.

Uddannelser i kemi

I forhold til uddannelser inden for kemi oplyser DTU, at de har planer om at profilere kvantekemi i kandidatuddannelsen "Anvendt Kemi". Københavns Universitet vil udbyde et kursus i kvantedynamik, mens Aarhus Universitet ikke vil øge de obligatoriske elementer i deres kemiuddannelse, men give flere muligheder for valgfrie elementer.

Uddannelser i matematik

I forhold til uddannelser inden for matematik oplyser Københavns Universitet, at de arbejder på at lave kvanteforløb i matematikbacheloren, der leder op til den nye kandidatuddannelse i kvanteinformationsvidenskab. SDU oplyser, at de ønsker at lave en kandidatprofil på matematikuddannelsen inden for kvantematematik, som evt. med tiden kan blive en selvstændig kandidatuddannelse.

Uddannelser i datalogi

I forhold til uddannelser inden for datalogi oplyser Aarhus Universitet, at de - afhængig af forskerressourcerne - overvejer at udbyde en specialiseringssøjle på kandidatuddannelsen i datalogi inden for kvantecomputing.

Kilde: Universiteternes indberetninger

4.5.4 Ph.d.-uddannelser inden for kvanteområdet

Universitetsinstitutterne er blevet bedt om at opgøre, hvor mange ph.d.-studerende de ca. uddanner om året inden for kvanteområdet.

I alt har 15 af de 21 institutter angivet at have uddannet ph.d.-studerende inden for kvanteområdet. Opgørelserne er præget af en vis usikkerhed, men samlet er indmeldt, at der uddannes ca. 100 ph.d.er årligt inden for kvanteområdet - heraf uddannes ca. halvdelen (ca. 50) på institutter inden for fysik.

Samlet uddannes omkring 2.000 ph.d.er om året i Danmark (2.086 ph.d.er i 2019) og ca. halvdelen af alle nye ph.d.er uddannes inden for natur- og teknisk videnskab (1.012 ph.d.er i 2019). Andelen af ph.d.er inden for kvanteområdet svarer dermed groft sagt til ca. 5 procent af alle færdige ph.d.-studerende og til ca. 10 procent af alle færdige ph.d.

inden for natur- og teknisk videnskab. Sammenligningen skal dog tages med store forbehold på grund af usikkerheden omkring opgørelsen af antallet af ph.d'er inden for kvanteområdet.

4.5.5 Kvanterelateret efter- og videreuddannelse

Universitetsinstitutterne er blevet bedt om at opgøre, om de udbyder kvanterelateret efter- og videreuddannelse, og hvem målgruppen i givet fald er. 3 ud af de 21 institutter angiver, at de udbyder efter og videreuddannelse. Det skal dog bemærkes, at det ikke er alle institutter, der nødvendigvis har svaret på spørgsmålet.

Det er Københavns Universitets Niels Bohr Institut samt Institut for matematiske fag og Syddansk Universitets Institut for Fysik, Kemi og Farmaci, der angiver at tilbyde efter- og videreuddannelse jf. Boks 4.9.

Boks 4.9 Efter- og videreuddannelse på universiteterne inden for kvanteområdet

Institut for Fysik, Kemi og Farmaci på Syddansk Universitet angiver, at kemi har et enkelt efteruddannelseskursus målrettet gymnasielærere.

Institut for matematiske fag på Københavns Universitet angiver at tilbyde videreuddannelse af gymnasielærere ca. 1-2 dage pr. år.

Niels Bohr Institutet på Københavns Universitet angiver at have et samarbejde med bl.a. KPMG om efter- og videreuddannelse på kvanteområdet. Samtidigt har de et tæt samarbejde med gymnasielærerne og folkeskolelærerne, hvilket de ser et potentiale for at udvide. Der arbejdes endvidere på at række ud til elever med særlige talenter i både folkeskole og gymnasiet. Der er også et program, der sigter på efter- og videreuddannelse i forhold til virksomheder, ligesom der har været en del forløb for ministerier, og her forventes også en øget aktivitet. Der arbejdes endvidere på at etablere et særlig uddannelses kvante-laboratorium (med state-of-the-art udstyr) for unge mennesker og folk på efter- og videreuddannelse.

Kilde: Universiteternes indberetninger

5. Bevillinger til forskning inden for kvanteområdet

Offentlige og private forskningsfinansierende fonde spiller sammen med EU en stor rolle for finansieringen af forskning på kvanteområdet i Danmark.

Dette kapitel sætter fokus på uddelingen af bevillinger til forskning inden for kvanteområdet fra 2014 og frem fra henholdsvis offentlige og private fonde, samt fra EU's rammeprogram Horizon 2020.

Kapitlet sætter endvidere fokus på uddelingen af midler fra den nationale pulje fra forskningsinfrastruktur til finansiering af infrastruktur med relevans for forskning på kvanteområdet.

Kapitlets hovedkonklusioner

De danske offentlige og private fonde har investeret store midler i dansk kvanteforskning

De tre offentlige fonde: Danmarks Grundforskningsfond, Danmarks Frie Forskningsfond (DFF) og Danmarks Innovationsfond har alle givet bevillinger til forskning på kvanteområdet. Det samme har de private fonde: VILLUM FONDEN, Novo Nordisk Fonden, Carlsbergfondet og i begrænset omfang Augustinusfonden.

Samlet har de offentlige og private forskningsfinansierende fonde i perioden 2014 – 2021 uddelt 1,2 mia. kr. til forskning inden for kvanteområdet.

Uddelingerne fra fondene er både præget af et stort antal forholdsvis små bevillinger (under 1 mio. kr.), men også af en række endog meget store bevillinger. Samlet udgør 7 bevillinger på mere end 50 mio. kr. hver mere end en tredjedel af det samlede bevilgede beløb.

Københavns Universitet er med 523 mio. kr. (svarende til 43 procent af de samlede bevillinger) langt den største hovedbevillingshaver (målt på mio. kr.). DTU og Aarhus Universitet har som hovedbevillingshaver modtaget henholdsvis 327 og 242 mio. kr.

Oplysningerne om de enkelte bevillingsmodtagere viser, at professorer og lektorer tilsammen modtager 78 procent af alle bevillingerne (målt på antal), at lidt over halvdelen af bevillingerne er til forskere fra Danmark, mens resten er til forskere fra udlandet – primært fra det øvrige Europa – og at langt hovedparten (93 procent) af bevillingsmodtagerne er mænd. Det skal bemærkes, at det ikke er alle fondene, der har oplyst detaljer om bevillingsmodtageren, og opgørelserne skal dermed tages med forbehold herfor.

Novo Nordisk fonden planlægger markant satsning på forskning inden for kvanteområdet fremadrettet

Langt den største del af bevillingerne er sket gennem brede åbne opslag og ikke via opslag direkte målrettet forskning på kvanteområdet. Det er kun Innovationsfonden og Novo Nordisk Fonden, der angiver at have uddelt midler via opslag direkte målrettet forskning inden for kvanteområdet.

Novo Nordisk Fonden planlægger – som den eneste fond, en markant og strategisk fremadrettet indsats målrettet forskning og innovation på kvanteområder, og fonden arbejder bl.a. på at etablere et forskningscenter for kvantecomputing i Københavnsområdet med et samlet budget i milliardklassen.

Danske aktører har også hentet mange midler hjem fra EU's rammeprogram Horizon 2020

Sammenlagt hjemtog danske bevillingsmodtagere tilsammen 520 mio. kr. til forskning inden for kvanteområdet fra EU's rammeprogram for forskning – Horizon 2020 i perioden 2014-2020. Bevillingerne er især hentet hjem inden for delprogrammet European Research Council (ERC), men også fra Future and Emerging Technologies (FET) og Marie Skłodowska-Curie actions.

Der er givet to bevillinger fra den nationale pulje til forskningsinfrastruktur med relevans for forskning på kvanteområdet

Fra Uddannelses- og Forskningsministeriets nationale pulje til forskningsinfrastruktur er der uddelt to bevillinger på hver 20 mio. kr. til national, strategisk og langsigtet finansiering af forskningsinfrastruktur – henholdsvis Laserlab.dk og Quantech.

5.1 Indledning og metode

Dette kapitel sætter fokus på bevillinger til forskning og forskningsinfrastruktur inden for kvanteområdet.

Kapitlet kortlægger omfanget af bevillinger fra offentlige og private forskningsfinansierende fonde, samt fondenes overvejelser og planer for bevillinger til forskning på kvanteområdet fremadrettet.

Kapitlet kortlægger endvidere det danske hjemtag fra EU's seneste rammeprogram Horizon 2020, der løb i perioden 2014-2020, samt bevillingerne fra den nationale pulje for forskningsinfrastruktur til infrastruktur med relevans for kvanteområdet.

Kapitlet baserer sig på en spørgeundersøgelse foretaget blandt en lang række offentlige og private forskningsfonde, udtræk fra EU-kommissionens database over EU-bevillinger (eCORDA) vedr. bevillinger fra Horizon 2020 samt bevillingsoversigter fra den nationale pulje til forskningsinfrastruktur.

5.2 Bevillinger til kvanteforskning 2014-2021 fra offentlige og private fonde

I dette afsnit præsenteres resultatet af kortlægningen af bevillinger fra offentlige og private forskningsfinansierende fonde samt fondenes overvejelser og planer for bevillinger til forskning på kvanteområdet fremadrettet. Metoden bag indsamlingen af data er præsenteret i Boks 5.1

Der er modtaget oplysninger om bevillinger til forskning på kvanteområdet fra de offentlige fonde: Danmarks Grundforskningsfond, Danmarks Frie Forskningsfond (DFF) og Danmarks Innovationsfond; og fra de private fonde: VILLUM FONDEN, Novo Nordisk Fonden, Carlsbergfondet og Augustinusfonden. Herudover har en række andre fonde meddelt, at de ikke har aktiviteter eller bevillinger inden for kvanteområdet.

Boks 5.1 Metode bag kortlægningen af bevillinger til forskning og forskningsinfrastruktur inden for kvanteområdet fra offentlige og private fonde

Til brug for kortlægningen af bevillinger fra de danske offentlige og private forskningsfinansierende fonde er der udsendt en spørgeramme til en bred kreds af fonde, hvori fondene bl.a. er opfordret til at redegøre for, hvilke enkeltbevillingerne de har afgivet til forskning på kvanteområdet. Fondene er blevet bedt om at tage udgangspunkt i den afgrænsning af forskning inden for kvanteområdet, som er præsenteret i Boks 2.1.

Fondene blev opfordret til at opgøre bevillinger fra 2014 og frem. Hvis det ikke var muligt at gå så mange år tilbage, blev de bedt om at prioritere de seneste år først.

Fondene er endvidere opfordret til at tage udgangspunkt i deres egne eksisterende databaser over bevillinger, men så vidt muligt for hver enkelt bevilling belyse:

- Årstal for bevillingen
- Hvilket virkemiddel eller opslag bevillingen er uddelt under
- Projekt navn
- Bevilget beløb
- Projektperiode
- Eventuelle faglige identifikationskoder, som fonden selv anvender
- Oplysninger om hovedansøger – f.eks. ansættelsessted, stillingstitel (professor, lektor, adjunkt osv.), køn og nationalitet
- Projektets udførelsessted
- Hvis muligt – et overblik over projektets evt. samarbejdspartnere
- Projektabstract eller link til projektpræsentation eller hjemmeside for større bevillinger/centre mv.

Der er modtaget oplysninger om bevillinger til forskning på kvanteområdet fra følgende offentlige fonde: Danmarks Grundforskningsfond, Danmarks Frie Forskningsfond (DFF) og Danmarks Innovationsfond; og fra følgende private fonde: VILLUM FONDEN, Novo Nordisk Fonden, Carlsbergfondet og Augustinusfonden. Herudover har en række andre private fonde meddelt, at de ikke har aktiviteter eller bevillinger inden for kvanteområdet.

Det er vigtigt at være opmærksom på, at der kan være usikkerheder forbundet med opgørelserne af forskningsbevillingerne. Der er en risiko for, at kortlægningen ikke fanger alle relevante bevillinger i perioden 2014–2021, særlig i den første del af perioden, da det ikke er alle fondene, der har kunnet opgøre deres bevillinger helt tilbage til 2014. Det gælder f.eks. DFF, der har indmeldt bevillinger fra 2016 og frem. Andre fonde har opgjort bevillinger længere tilbage end 2014. Det gælder Danmarks Grundforskningsfond og Innovationsfonden. Disse bevillinger er dog ikke talt med i de samlede opgørelser.

Det skal endvidere bemærkes, at der er forskelle på, hvilke oplysninger de enkelte fonde har haft mulighed for at oplyse om deres bevillinger. Det gælder f.eks., oplysninger om bevillingsmodtagernes køn, nationalitet mv. I disse tilfælde er opgørelserne baseret på data fra de fonde, der har indmeldt oplysninger på området.

5.2.1 Fondenes hidtidige og fremtidige overvejelser vedr. forskning på kvanteområdet

5.2.1.1 Hidtidige satsninger, programmer eller opslag

De offentlige og private fonde er blevet bedt om at oplyse, om de har eller har haft særlige satsninger, programmer eller opslag målrettet kvanteforskning.

Flere af både de offentlige og private forskningsfinansierende fonde har uddelt ganske store bevillinger til forskning på kvanteområdet (samlet ca. 1,2 mia. kr. i perioden 2014-2021 jf. afsnit 5.2.2). Det er imidlertid kun Innovationsfonden og Novo Nordisk Fonden, der angiver at have uddelt midler gennem satsninger, programmer eller opslag direkte målrettet forskning inden for kvanteområdet – se Boks 5.2.

Tilbagemeldingerne tyder på, at langt den største del af de midler, der er bevilget til forskning inden for kvanteområdet er bevilget gennem brede åbne opslag mv. og ikke opslag direkte målrettet forskning på kvanteområdet.

Boks 5.2 Særlige programmer målrettet forskning på kvanteområdet hidtil

Innovationsfonden

Innovationsfonden oplyser bl.a., at de deltager som dansk partner i ERA-nettet "Quantum ERA", som i dag er relateret til EU's European Quantum Flagship. Der har været uddelinger under programmet i både 2017, 2019 og 2021, og Innovationsfonden har under programmet afgivet bevillinger til danske parter for samlet 21,5 mio. kr.

Novo Nordisk Fonden

Novo Nordisk Fonden oplyser bl.a., at have opslået et såkaldt "Challenge-call" omkring kvantesimulatorer for life science i 2020. Det resulterede i to bevillinger til henholdsvis "Quantum for life" og "Solid-state quantum simulators for biochemistry (SolidQ)" med et samlet budget på ca. 110 mio. kr.

5.2.1.2 Planer om særlige indsatser på kvanteområdet fremadrettet

Fondene er blevet bedt om at svare på, om de planlægger særlige indsatser med fokus på forskning inden for kvanteområdet fremadrettet, eller om de har understøttet forskning inden for kvanteområdet på anden måde end gennem enkeltbevillinger til forskningsprojekter mv. Det er kun Novo Nordisk Fonden, der har svaret ja til det – jf. Boks 5.3.

Tilbagemeldingerne fra fondene – bortset fra Novo Nordisk Fonden, tyder derfor ikke på, at der fremadrettet i øget omfang end i dag vil blive etableret særlige programmer mv. specifikt målrettet forskning på kvanteområdet.

Boks 5.3 Planer om særlige indsatser på kvanteområdet fremadrettet

Novo Nordisk fonden

Novo Nordisk Fonden oplyser at have to større strategiske initiativer i pipelinen inden for forskning på kvanteområdet. Det drejer sig om et forskningsprojekt med det formål at anvende kvantecomputere til kvantekemi, samt et stort initiativ, der søger at etablere et forskningscenter for kvantecomputing i Københavns området.

Novo Nordisk Fonden oplyser endvidere at være i dialog med kræfterne bag Danish Quantum Community om at etablere QuantumDK, et forskerdrevet netværk for forskere om kvanteaktiviteter.

Dertil kommer, at fonden har støttet de danske bestræbelser på at få NATO Center for Quantum Technologies etableret i Danmark, idet fonden vurderer, at denne accelerator vil kunne få en kritisk rolle inden for kvanteinnovation (se mere om centeret i afsnit 6.5).

5.2.2 Bevillinger til forskning på kvanteområdet fra offentlige og private fonde

Til brug for kortlægningen af bevillinger fra de danske offentlige og private forskningsfinansierende fonde er der udsendt en spørgeramme til en bred kreds af fonde, hvori fondene bl.a. er opfordret til at redegøre for, hvilke enkeltbevillingerne de har afgivet til forskning på kvanteområdet. Resultatet af denne del af kortlægningen præsenteres i dette afsnit.

Jf. Boks 5.1 er der modtaget oplysninger om bevillinger til forskning på kvanteområdet fra følgende offentlige fonde: Danmarks Grundforskningsfond, Danmarks Frie Forskningsfond (DFF) og Danmarks Innovationsfond; og fra følgende private fonde: VILLUM FONDEN, Novo Nordisk Fonden, Carlsbergfondet og Augustinusfonden. Herudover har en række andre fonde meddelt, at de ikke har aktiviteter eller bevillinger inden for kvanteområdet.

5.2.2.1 Bevillinger fra de offentlige og private fonde

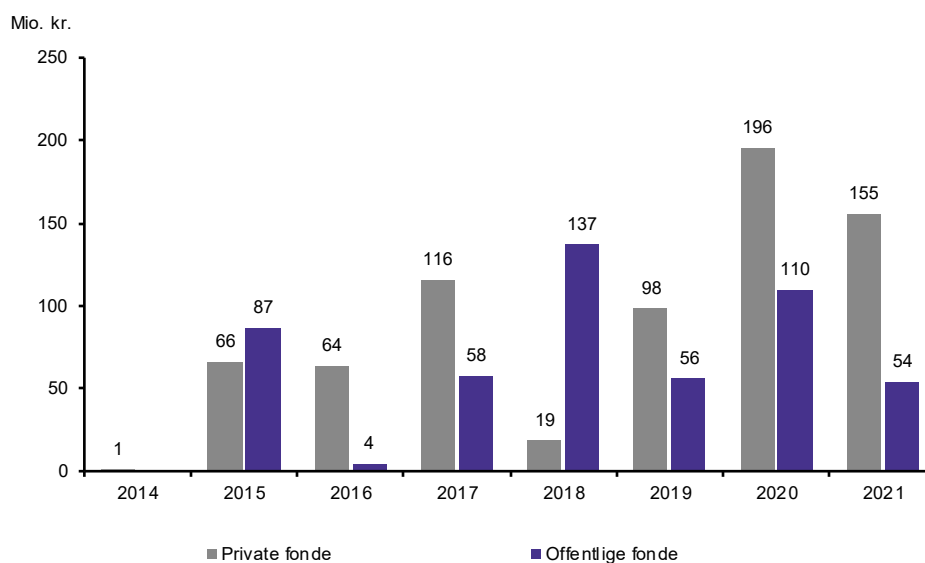
De offentlige og de private fonde har tilsammen bevilget mere end 1,2 mia. kr. i perioden 2014-2021 til forskning inden for kvanteområdet. Heraf bevilgede de private fonde 715 mio. kr. og de offentlige 506 mio. kr.

Det skal dog i den forbindelse bemærkes, at Danmarks Frie Forskningsfond (DFF) ikke har indsendt oversigter over bevillinger i perioden 2014-2015, og at bevillinger fra de offentlige fonde dermed godt kan være underestimeret i den periode. Det skal endvidere bemærkes, at Danmarks Grundforskningsfond i 2012 afgav en bevilling på 111,3 mio. kr. til grundforskningscenteret "Center for Quantum Devices" på Københavns Universitet. Centeret modtager en årlig bevilling frem til 2023, men er ikke talt med i det bevilgede beløb, idet bevillingen er afgivet før 2014. Sammenligningen mellem offentlige og private bevillinger skal dermed tages med forbehold.

Figur 5.1 viser bevillinger til forskning inden for kvanteområdet fordelt på offentlige og private fonde i alt i perioden 2014-2021. Figuren viser, at der er store udsving i bevillingerne de enkelte år imellem. Det svinger endvidere fra år til år, om det er de offentlige eller de private fonde, der har afgivet de største bevillinger målt på mio. kr. i alt. Der er dog i perioden 2016-2021 bevilget flest midler fra de private fonde – bortset fra i 2018.

Figur 5.1

Bevillinger til forskning inden for kvanteområdet fordelt på offentlige og private fonde i perioden 2014-2021, mio. kr. (faste priser)



Anm.: Økonomistyrelessens generelle pris- og lønindeks er anvendt til omregning fra løbende til faste 2021-priser. Det skal bemærkes, at Danmarks Frie Forskningsfond ikke har meldt bevillinger ind for årene 2014-2015.

Kilde: Uddannelses- og Forskningsstyrelsen på baggrund af indmeldinger fra offentlige og private fonde

5.2.2.2 Bevillinger fordelt på bevillingsstørrelser

Tabel 5.1 viser det samlede antal indmeldte bevillinger fra de offentlige og private fonde i perioden 2014-2021 fordelt på bevillingsstørrelser. Tabellen viser, at der er indberettet 154 enkeltbevillinger fra de offentlige og private fonde i alt. Tabellen viser også, at der er tale om et meget varieret billede i forhold til bevillingsstørrelser. Knap en tredjedel af bevillingerne er under 1 mio. kr., men der er til gengæld også et betydeligt antal meget store bevillinger – henholdsvis 7 bevillinger over 50 mio. kr. og 5 bevillinger på mellem 30 og 50 mio. kr.

Tabel 5.1

Bevillinger fordelt på bevillingsstørrelser i perioden 2014-2021 i alt, antal

Bevillingsstørrelse	Antal bevillinger
Under 1 mio. kr.	50
1-5 mio. kr.	54
5-10 mio. kr.	24
10-30 mio. kr.	14
30-50 mio. kr.	5
Over 50 mio. kr.	7
i alt	154

Anm.: De internationale bevillinger fra Innovationsfonden afgives som bevillinger til hver enkelt danske projektdeltager. I fald der er flere danske projektparter med i det samme internationale projekt, vil bevillingen til det givne projekt derfor blive talt med mere end en gang. Opgørelsen på bevillingsstørrelser er sket med udgangspunkt i den afgivne bevillingsstørrelse på det tidspunkt bevillingen er givet (der er dermed ikke sket en PL-regulering af bevillingerne inden optællingen).

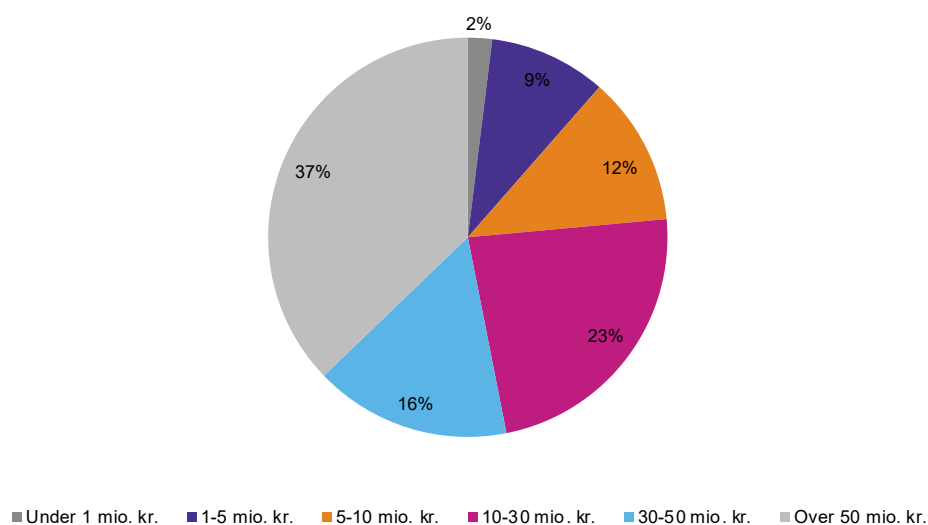
Kilde: Uddannelses- og Forskningsstyrelsen på baggrund af indmeldinger fra offentlige og private fonde

Figur 5.2 viser bevillingerne fordelt på bevillingsstørrelse som andel af det samlede bevilgede beløb. Figuren viser, at de 7 bevillinger på mere end 50 mio. kr. samlet udgør mere end en tredjedel (37 procent) af det samlede bevilgede beløb til forskning inden for kvanteområdet, og knap en femtedel (16 procent) af det bevilgede beløb er givet via de fem bevillinger på mellem 30 og 50 mio. kr. Samlet set er mere end halvdelen af det bevilgede beløb til forskning inden for kvanteområdet således givet via tilsammen 12 enkeltbevillinger. Se en kort oversigt over de syv bevillinger på mere end 50 mio. kr. i Boks 5.4.

Samlet tegner det et billede af, at der er afgivet mange mindre bevillinger (målt på antal bevillinger), men at den største del af de bevilgede midler (målt i mio. kr.) gives via meget store enkeltbevillinger.

Figur 5.2

Bevilget beløb fordelt på bevillingsstørrelse i perioden 2014-2021 i alt, procent



Anm.: De internationale bevillinger fra Innovationsfonden afgives som bevillinger til hver enkelt danske projektdeltager. I fald der er flere danske projektparter med i det samme internationale projekt, vil bevillingen til det givne projekt derfor blive talt med mere end en gang. Opgørelsen på bevillingsstørrelser er sket med udgangspunkt i den afgivne bevillingsstørrelse på det tidspunkt bevillingen er givet (der er dermed ikke sket en PL-regulering af bevillingerne inden optællingen).

Kilde: Uddannelses- og Forskningsstyrelsen på baggrund af indmeldinger fra offentlige og private fonde

Boks 5.4 Bevillinger til forskning på kvanteområdet på over 50 mio. kr.

Innovationsfonden: 80 mio. kr. i 2015 til Center for Kvanteinnovation – Quantum Innovation Center (Qubiz) forankret på Københavns Universitet

VILLUM FONDEN: 60 mio. kr. i 2015 til Villum Centre of Excellence for the Mathematics of Quantum Theory (QMATH) forankret på Københavns Universitet

VILLUM FONDEN: 50 mio. kr. i 2016 til The Villum Center for the Science of Sustainable Fuels and Chemicals forankret på DTU

Danmarks Grundforskningsfond – Center of Excellence: 62 mio. kr. i 2018 til Center for Hybrid Quantum Networks forankret på Københavns Universitet

Danmarks Grundforskningsfond – Center of Excellence: 63 mio. kr. i 2018 til Center for Macroscopic Quantum States forankret på DTU

Danmarks Grundforskningsfond – Center of Excellence: 66,6 mio. kr. i 2020 til Center for Complex Quantum Systems forankret på Aarhus Universitet

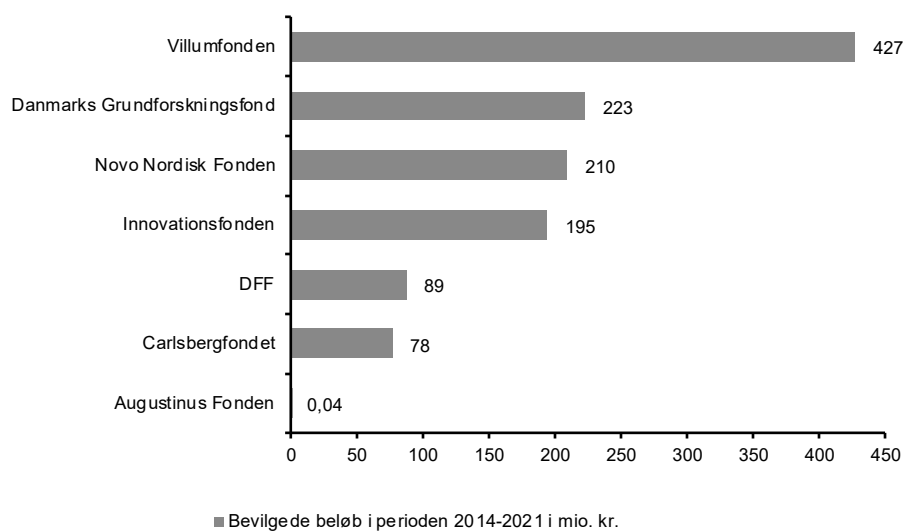
Novo Nordisk Fonden: 60 mio. kr. i 2020 til Solid-state quantum simulators for biochemistry (SolidQ) forankret på Københavns Universitet

5.2.2.3 Bevillinger fordelt på de enkelte fonde

Figur 5.3 viser bevillingerne til forskning på kvanteområdet fordelt på de enkelte fonde. Figuren viser, at VILLUM FONDEN har været den største samlede bidragsyder i perioden 2014-2021 med bevillinger for i alt 427 mio. kr. Danmarks Grundforskningsfond, Novo Nordisk Fonden og Innovationsfonden har hver især bevilliget mellem 195 – 223 mio. kr. til forskning på kvanteområdet i perioden.

Figur 5.3

Bevillinger til forskning på kvanteområdet perioden 2014-2021 i alt fordelt på fonde, mio. kr. (faste priser)



Anm.: Økonomitryrelsens generelle pris- og lønindeks er anvendt til omregning fra løbende til faste 2021-priser.

Kilde: Uddannelses- og Forskningsstyrelsen på baggrund af indmeldinger fra offentlige og private fonde

Boks 5.5 Kort præsentation af fondene og deres bevillinger

Offentlige fonde:

Danmarks Grundforskningsfond er en uafhængig fond, som har til formål at styrke grundforskningen i Danmark inden for alle videnskabsområder. Fondens primære virkemiddel er Centers of Excellence, der etableres i op til 10 år fordelt på to bevillingsperioder af henholdsvis seks og fire år. Fonden har afgivet 4 bevillinger til forskning på kvanteområdet i perioden 2014-2021 for et samlet beløb på 223 mio. kr.

Danmarks Frie Forskningsfond er en uafhængig fond, der har til formål at fremme dansk forskning på højeste internationale niveau. Fonden yder finansiel støtte til konkrete og tidsbegrænsede forskningsaktiviteter baseret på forskernes egne ideer inden for og på tværs af alle videnskabelige områder. Fonden har afgivet 22 bevillinger til forskning på kvanteområdet i perioden 2016-2021 for et samlet beløb på 89 mio. kr.

Innovationsfonden er en uafhængig fond, der har til formål at give tilskud til udvikling af viden og teknologi, herunder højteknologi, der fører til styrkelse af forskning og innovation, der skaber værdi for Danmark og nye løsninger på samfundets største udfordringer. Fonden har afgivet 47 bevillinger til forskning på kvanteområdet i perioden 2014-2021 for et samlet beløb på 195 mio. kr.

Private fonde:

VILLUM FONDEN er en almennyttig fond, der støtter teknisk og naturvidenskabelig forskning samt miljømæssige, sociale og kulturelle formål i ind- og udland. Fonden har afgivet 23 bevillinger til forskning på kvanteområdet i perioden 2014-2021 for et samlet beløb på 427 mio. kr.

Novo Nordisk Fonden uddeler støtte til projekter på baggrund af ansøgninger indsendt til fonden efter opslag i åben konkurrence samt til strategiske projekter, fonden selv har taget initiativ til. Fonden har til formål at forbedre menneskers liv gennem bedre sundhed, uddannelse og udvikling af et videnbaseret, bæredygtigt samfund. Fonden har afgivet 16 bevillinger til forskning på kvanteområdet i perioden 2014-2021 for et samlet beløb på 210 mio. kr.

Carlsbergfondet yder støtte til dansk grundvidenskabelig forskning inden for humanistisk videnskab, samfundsvidenskab og naturvidenskab. Fonden har afgivet 44 bevillinger til forskning på kvanteområdet i perioden 2014-2021 for et samlet beløb på 78 mio. kr.

Augustinus Fondens filantropiske virke er baseret på fondens mangeårige uddelinger med hovedvægt på kunst og kultur i hele Danmark. Fonden har afgivet 1 bevilling til forskning på kvanteområdet i perioden 2014-2021 for et samlet beløb på 0,04 mio. kr.

5.2.3 Bevillingsmodtagere

5.2.3.1 Fondsbevillinger fordelt på universiteter, virksomheder m.fl.

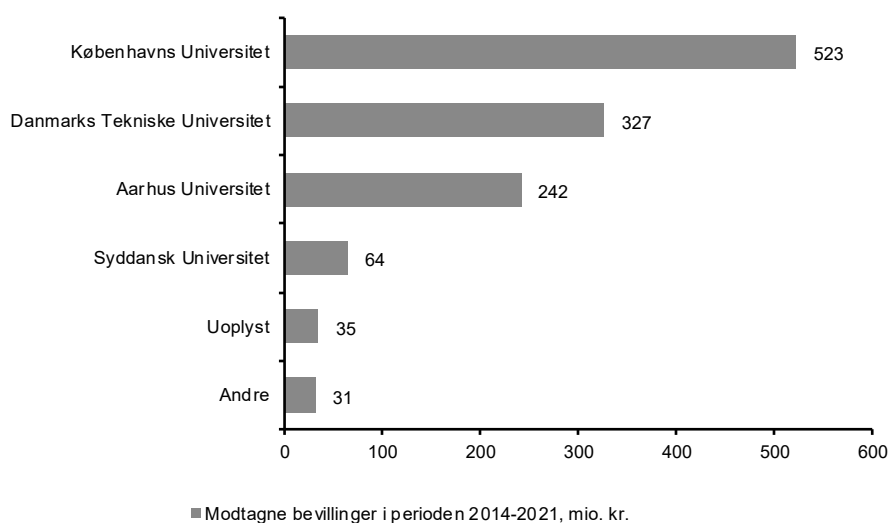
Figur 5.4 viser hovedbevillingshaveren i perioden 2014-2021 i alt fordelt på modtagerinstitution. Figuren viser, at Københavns Universitet med 523 mio. kr. er langt den største hovedbevillingshaver (målt på mio. kr.) svarende til 43 procent af de samlede bevillinger. DTU og Aarhus Universitet har som hovedbevillingshaver e modtaget henholdsvis 327 og 242 mio. kr.

Figuren viser også, at langt hovedparten af bevillingerne har et dansk universitet som hovedbevillingshaver, mens GTS-institutter, private virksomheder m.fl. (kategorien "andre") med 31 mio. kr. udgør en meget lille del af de samlede hovedbevillingshavere.

Man skal dog være opmærksom på, at der – særligt i de store bevillinger, som præger bevillingerne på kvanteområdet – kan være en række andre bevillingsmodtagere i de medfinansierede projekter end blot hovedbevillingshaveren. Det er imidlertid ikke muligt på det foreliggende grundlag at opgøre omfanget og typen af øvrige bevillingsmodtagere ud over hovedbevillingsindehaveren.

Figur 5.4

Hovedbevillingshavere fordelt på institution i perioden 2014-2021 i alt, mio. kr. (faste priser)



Anm.: Økonomitstyrelsens generelle pris- og lønindeks er anvendt til omregning fra løbende til faste 2021-priser. Kategorien "Andre" dækker over GTS, private virksomheder, regioner og udenlandske universiteter. Kategorien "Uoplyst" betyder, at fonden ikke har kunne tilvejebringe oplysninger for institutionsmodtager.

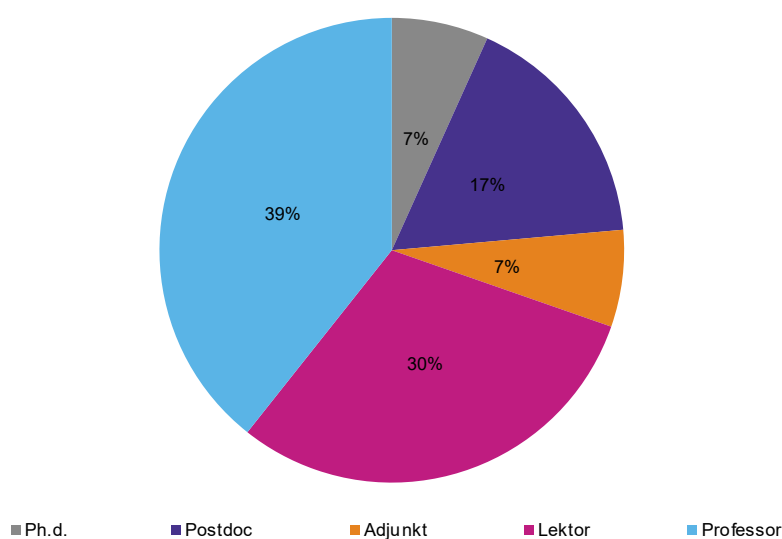
Kilde: Uddannelses- og Forskningsstyrelsen på baggrund af indmeldinger fra offentlige og private fonde

5.2.3.2 Hovedbevillingshavere fordelt på stillingsniveau, nationalitet og køn

Figur 5.5 viser hovedbevillingshavere fordelt på stillingsniveau for de 89 bevillinger i perioden 2014-2021, hvor det er oplyst. Figuren viser, at langt hovedparten af bevillingerne (målt på antal bevillinger) er givet til henholdsvis professorer (39 procent) og lektorer (30 procent), mens yngre forskere i form af ph.d'ere, postdocs og adjunkter var hovedbevillingshavere på tilsammen 31 procent af bevillingerne. Det skal bemærkes, at det ikke er alle fondene, der har oplyst titlen på bevillingsmodtageren, og opgørelsen skal dermed tages med forbehold herfor.

Figur 5.5

Hovedbevillingshavere fordelt på stillingsniveau for udvalgte bevillinger i perioden 2014-2021, procent af antal bevillinger

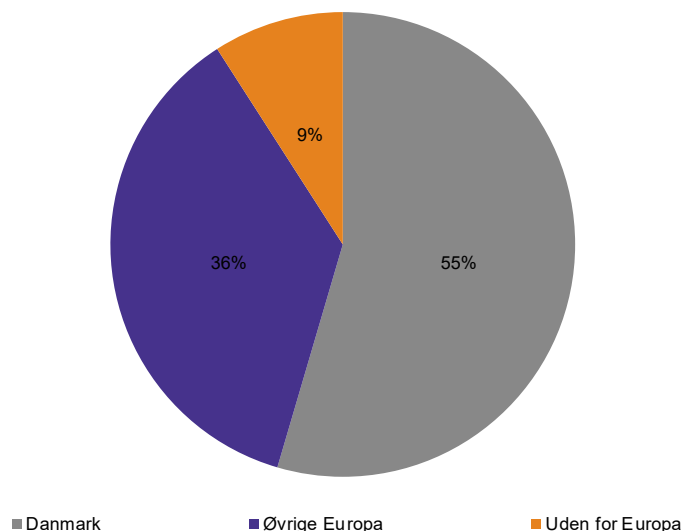


Anm.: N=89 bevillinger. Det er kun Carlsbergfondet, VILLUM FONDEN, Danmarks Grundforskningsfond, Augustinusfonden og Novo Nordisk Fonden, der har oplyst bevillingsmodtagerens titel.
 Kilde: Uddannelses- og Forskningsstyrelsen på baggrund af indmeldinger fra offentlige og private fonde

Figur 5.6 viser hovedbevillingshavere fordelt på nationalitet for de 44 bevillinger i perioden 2014-2021, hvor det er oplyst. Figuren viser, at lidt over halvdelen (55 procent) af bevillingshavere var fra Danmark, mens de øvrige var fra udlandet – primært fra det øvrige Europa. Figuren indikerer dermed, at der er tale om et internationalt forskningsmiljø. Det skal bemærkes, at det ikke er alle fondene, der har oplyst nationalitet på bevillingsmodtageren, og opgørelsen skal dermed tages med forbehold herfor.

Figur 5.6

Hovedbevillingshavere fordelt på nationalitet for udvalgte bevillinger i perioden 2014-2021, procent af antal bevillinger



Anm.: N=44 bevillinger. Det er kun VILLUM FONDEN, Danmarks Grundforskningsfond og Novo Nordisk Fonden, der har oplyst nationalitet på bevillingsmodtageren

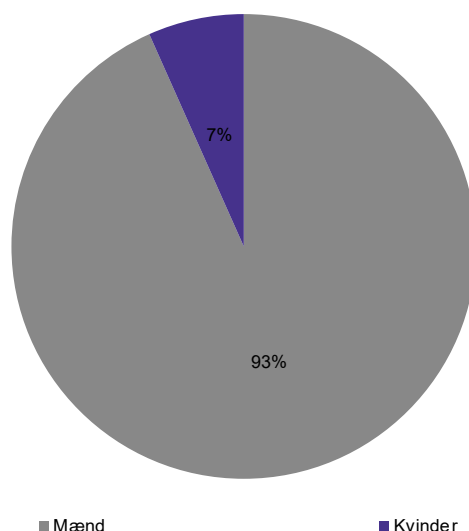
Kilde: Uddannelses- og Forskningsstyrelsen på baggrund af indmeldinger fra offentlige og private fonde

Figur 5.7 viser kønsfordelingen på hovedbevillingshaveren for de 45 bevillinger, hvor det er oplyst, i perioden 2014-2021. Figuren viser, at 93 procent af bevillingsmodtagerne er mænd, og 7 procent er kvinder. Det kan bemærkes, at andelen af kvinder inden for det teknisk- og naturvidenskabelige hovedområde på de danske universiteter i 2020 var henholdsvis 24 procent på lektorniveauet og 16 procent på professorniveauet.¹³ Figuren indikerer dermed, at der er en stor overvægt af mandlige bevillingsmodtagere til forskning inden for kvanteområdet. Det skal bemærkes, at det ikke er alle fondene, der har oplyst køn på bevillingsmodtageren, og opgørelsen skal dermed tages med forbehold herfor.

¹³ Uddannelses- og Forskningsministeriet på baggrund af universiteternes indberetninger til Uddannelses- og Forskningsministeriet. Læs evt. mere om mænd og kvinder på de danske universiteter i publikationerne "Mænd og kvinder på de danske universiteter – Danmarks Talentbarometer"

Figur 5.7

Hovedbevillingshavere fordelt på køn for udvalgte bevillinger i perioden 2014 -2021, procent af antal bevillinger



Anm.: N=45 bevillinger. Det er kun VILLUM FONDEN, Danmarks Grundforskningsfond, Augustinusfonden og Novo Nordisk Fonden, der har oplyst køn på deres bevillingsmodtager.

Kilde: Uddannelses- og Forskningsstyrelsen på baggrund af indmeldinger fra offentlige og private fonde

5.3 Dansk hjemtag fra EU's rammeprogram – Horizon 2020

I dette afsnit præsenteres resultatet af en kortlægning af danske bevillingsmodtagere i projekter, der har modtaget medfinansiering til forskning inden for kvanteområdet fra EU's rammeprogram Horizon 2020. Se Boks 5.6 for en beskrivelse af, hvordan bevillingsmodtagerene er identificeret.

Det skal bemærkes, at der ikke eksisterede et specifikt delprogram i Horizon 2020 målrettet forskning på kvanteområdet. Se mere om fokus på forskning på kvanteområdet i det nuværende rammeprogram "Horizon Europe" i afsnit 6.2.2.

Boks 5.6 Metode bag kortlægningen af dansk hjemtag fra EU's rammeprogram Horizon 2020

For at kortlægge det danske hjemtag fra EU's rammeprogram for forskning og udvikling – Horizon 2020 – er der tages udgangspunkt i EU-kommissionens database eCORDA over alle bevillinger under programmet.

Projekter med danske bevillingsmodtagere er identificeret i databasen. Derefter er der foretaget en søgning på ordet "quantum" i projekternes abstract, som derefter er gennemgået og sorteret med henblik på en individuel vurdering af, om projektet kan siges at vedrøre forskning med fokus på kvanteområdet.

Den konkrete gennemgang og vurdering af, hvorvidt bevillingerne til danske parter er bevillinger til forskning inden for kvanteområdet, er foretaget af Uddannelses- og Forskningsstyrelsen. Styrelsen har taget udgangspunkt i den afgrænsning af forskning inden for kvanteområdet, som er præsenteret i Boks 2.1.

I alt er der identificeret 77 projekter med i alt 84 danske bevillingsmodtagere inden for forskning på kvanteområdet under Horizon 2020.

5.3.1 Danske bevillinger fra EU's rammeprogram

Tabel 5.2

Danske bevillingsmodtagere under Horizon 2020 fordelt på delprogrammer, 2014-2020, antal

Delprogram	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	I alt
European Research Council	2	3	1	6	5	5	2	24
Future and Emerging Technologies	1	1	0	3	10	4	1	20
Marie Skłodowska-Curie actions	3	2	7	6	3	8	3	32
Information and Communication Technologies	1	1	0	0	2	0	0	4
Innovation in SMEs	0	0	0	0	0	2	0	2
Training of research institutions	0	0	0	0	0	1	0	1
Nanotechnologies, Advanced Materials and Production	0	0	1	0	0	0	0	1
I alt	7	7	9	15	20	20	6	84

Anm.:

Kilde: Uddannelses- og Forskningsstyrelsen på baggrund af udtræk fra eCORDA-databasen 7. april 2022

Tabel 5.2 viser, antallet af danske bevillingsmodtagere under Horizon 2020 fordelt på år og delprogrammer. Tabellen viser, at der i alt er identificeret 84 danske bevillingsmodtagere inden for projekter med fokus på forskning inden for kvanteområdet. Tabellen vi-

ser også, at næsten alle bevillinger er givet inden for delprogrammerne European Research Council (ERC), Future and Emerging Technologies (FET) og Marie Skłodowska-Curie actions.

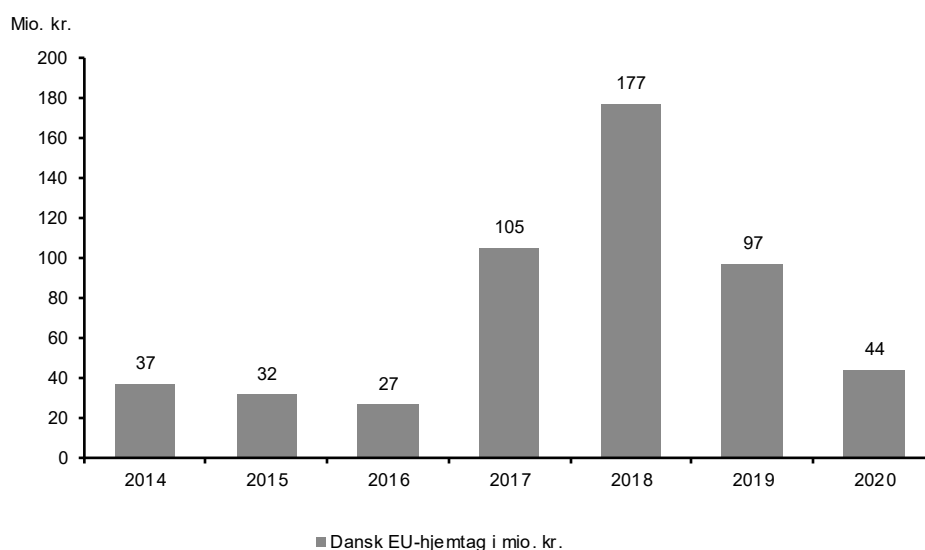
Det har ikke på det foreliggende datagrundlag været muligt at udtrække komparative data for andre EU-medlemslandes deltagelsesniveau på kvanteområdet til brug for en international sammenligning. Ud fra det generelle kendskab til den danske deltagelse i rammeprogrammet er det imidlertid Uddannelses- og Forskningsstyrelsens vurdering, at det i meget høj grad er sandsynligt, at den danske deltagelse per capita på kvanteområdet ligger i den absolutte top på europæisk plan.

Figur 5.8 viser de samlede danske bevillinger fra EU's rammeprogram til forskning inden for kvanteområdet fordelt på år i perioden 2014-2020.

I alt hjemtog 84 danske bevillingsmodtagere tilsammen 520 mio. kr. fra rammeprogrammet til forskning inden for kvanteområdet i perioden 2014-2020. Figuren viser, at det særligt er i årene 2017-2019, at der er givet mange bevillinger (målt i mio. kr.) til de danske bevillingsmodtagere.

Figur 5.8

Kvanteforskning hjemtag fordelt på år i Horizon2020



Anm.: Beløb er omregnet fra Euro til danske kr. efter dagskursen på 7,44 kr. pr. Euro (april 2022).

Kilde: Uddannelses- og Forskningsstyrelsen på baggrund af udtræk fra eCORDA-databasen 7. april 2022

5.3.2 Hovedkilder til dansk hjemtag af kvanteforskningsmidler fra EU

Figur 5.9 viser det danske hjemtag af EU-bevillinger til forskning på kvanteområdet fordelt på delprogrammer under Horizon 2020 i perioden 2014-2020.

5.3.2.1 European Research Council (ERC)

Figuren viser, at med bevillinger for i alt 386 mio. kr. (svarende til 71 procent af de danske EU-bevillinger) har European Research Council (ERC) været langt det største og vigtigste program for dansk forskning inden for kvanteområdet. Der var i alt 24 danske bevillingsmodtagere under ERC – jf. Tabel 5.2

European Research Council (ERC) støtter internationale, banebrydende forskningsprojekter af videnskabelig topkvalitet inden for alle forskningsområder og emner. Det særlige høje danske hjemtag af midler fra dette delprogram indikerer, at dansk forskning på kvanteområdet er grundforskning af meget høj international kvalitet. Forskning på kvanteområdet har ikke været et særligt tema i ERC, og feltet har derfor konkurreret på lige fod med andre forskningsfelter.

5.3.2.2 Programmet for fremtidige og fremspirende teknologier (FET)

Derudover viser figuren, at der er bevillinger på 75 mio. kr. fra programmet Future and Emerging Technologies (FET) – svarende til 14 procent af det danske EU-hjemtag til forskning inden for kvanteområdet. Der var i alt 20 danske bevillingsmodtagere under FET – jf. Tabel 5.2.

Programmet for fremtidige og fremspirende teknologier (FET) støtter europæiske samarbejdsprojekter inden for nye fremspirende teknologifelter, herunder kvanteforskning med et teknologisk fokus. I forhold til FET er det værd at bemærke, at det europæiske kvanteflagskib i 2018 blev etableret med midler fra FET-programmet.

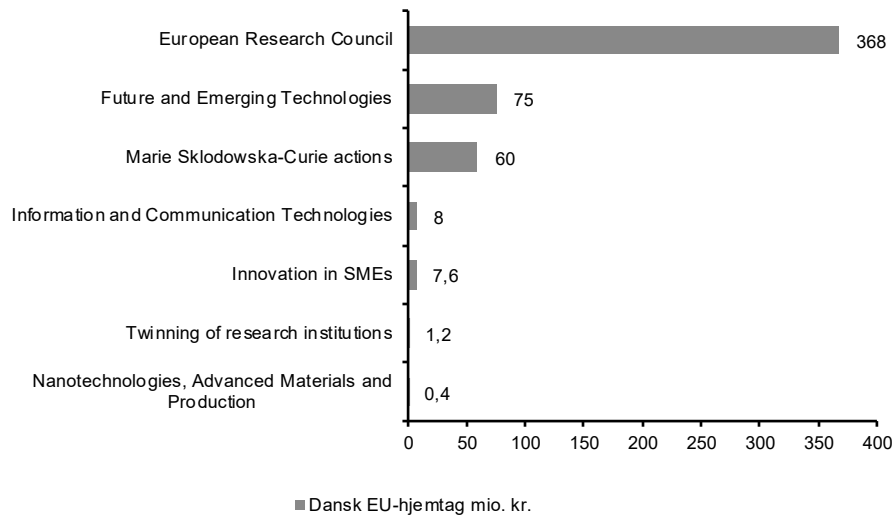
Det opslag, der grundlagde flagskibet (Opslag FET-FLAG 2018), betød dansk deltagelse i 7 større projekter. Københavns Universitet deltog i tre af disse syv projekter, Danmarks Tekniske Universitet deltog i to, og Aarhus Universitet og virksomheden NKT Photonics A/S deltog i hvert et enkelt projekt. Etableringen af det europæiske kvanteflagskib er en betydelig årsag til det høje dansk EU-hjemtag fra FET-programmet og vidner om stort dansk engagement i flagskibet. Læs mere om det europæiske kvanteflagskib/European Quantum Flagship i afsnit 6.2.1.

5.3.2.3 Marie Skłodowska-Curie actions

Figuren viser også, at der er givet bevillinger til danske bevillingsmodtagere for i alt 60 mio. kr. gennem Marie Skłodowska-Curie actions – svarende til 11 procent af det samlede danske hjemtag til forskning på kvanteområdet. Der var i alt 32 danske bevillingsmodtagere under programmet – jf. Tabel 5.2. Marie Skłodowska-Curie-programmet støtter international forskeruddannelse, forskermobilitet og karriereudvikling.

Figur 5.9

Det danske hjemtag til forskning på kvanteområdet fordelt på delprogram i Horizon 2020 i perioden 2014-2020, mio. kr.



Anm.: Beløb er omregnet fra Euro til danske kr. efter dagskursen på 7,44 kr. pr. Euro (april 2022).

Kilde: Uddannelses- og Forskningsstyrelsen på baggrund af udtræk fra eCORDA-databasen 7. april 2022

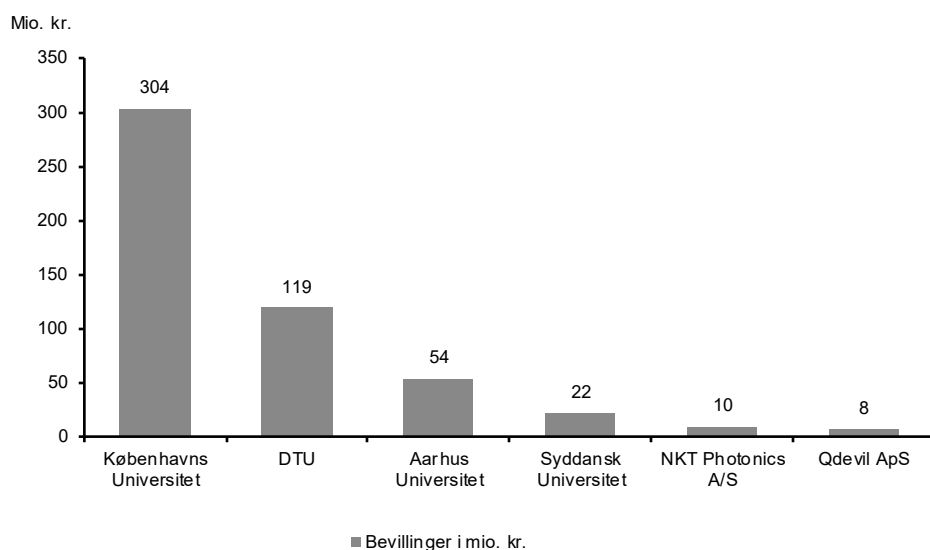
5.3.3 Danske bevillingsmodtagere

Figur 5.10 viser bevillinger fra Horizon 2020 til forskning på kvanteområdet fordelt på de seks største danske bevillingsmodtagere.

Figuren viser, at Københavns Universitet med 304 mio. kr. er langt den største danske bevillingsmodtager af bevillinger fra EU til forskning på kvanteområdet. Derudover har DTU hjemtaget bevillinger for 119 mio. kr. og Aarhus Universitet for 54 mio. kr. Langt hovedparten af de danske bevillinger er dermed hjemtaget af danske universiteter. Dog har de to danske virksomheder NKT Photonics A/S og QDevil ApS tilsammen hjemtaget bevillinger på 18 mio. kr., og de er dermed henholdsvis den 5. og 6. største danske bevillingsmodtager inden for forskning på kvanteområdet.

Figur 5.10

Bevillinger fra Horizon 2020 til forskning på kvanteområdet fordelt på bevillingsmodtagere (de seks største), 2014-2020 i alt, mio. kr.



Anm.: Figuren medtager kun de seks største danske bevillingsmodtagere. Beløb er omregnet fra Euro til danske kr. efter dagskursen på 7,44 kr. pr. Euro (april 2022).

Kilde: Uddannelses- og Forskningsstyrelsen på baggrund af udtræk fra eCORDA-databasen 7. april 2022

5.4 Bevillinger fra den nationale pulje til forskningsinfrastruktur

I dette afsnit præsenteres et overblik over, hvilke forskningsinfrastrukturer med relevans for forskning inden for kvanteområdet der har fået bevillinger fra den nationale pulje for forskningsinfrastruktur. Se mere om den nationale pulje i Boks 5.7.

Boks 5.7 Den nationale pulje for forskningsinfrastruktur

Puljen til forskningsinfrastruktur er Uddannelses- og Forskningsministeriets centrale pulje for investeringer i etableringen af perspektivrige nationale strategiske forskningsinfrastrukturer.

Puljen er siden 2006 udmøntet årligt af uddannelses- og forskningsministeren til udvalgte projekter, der er optaget på det danske roadmap for forskningsinfrastruktur. Det er ikke alle forslag på roadmappen, der opnår bevilling.

Roadmappen fastlægges ca. hvert 4.-5. år, hvor Uddannelses- og Forskningsministeriet indkalder forslag til ny forskningsinfrastruktur. Den nuværende roadmap løber for perioden 2020-2024.

NUFI (Nationalt Udvalg for Forskningsinfrastruktur) rådgiver ministeren om indholdet af roadmappen, og om den efterfølgende årlige uddeling af midler. I NUFU er alle universiteterne og Danmarks Frie Forskningsfond repræsenteret.

Tabel 5.3 viser de hidtidige bevillinger fra den nationale pulje til forskningsinfrastruktur til infrastruktur med relevans for forskning på kvanteområde. Tabellen viser, at der indtil videre er givet bevillinger til 2 nationale forskningsinfrastrukturer med relevans for forskning på kvanteområdet. Det gælder en bevilling til Laserlab.dk fra 2014 og til Qu-antech i 2016.

Tabel 5.3

Bevillinger fra den nationale pulje til forskningsinfrastruktur til infrastruktur med relevans for forskning på kvanteområdet, mio. kr.

Forsk- ningsinfra- struktur	Bevillingsår	Beløb	Deltagende universiteter	Beskrivelse
Laserlab.dk	2014	20,3 mio. kr. (2014-priser)	AU, DTU, KU, SDU, AAU	En tværfaglig national forskningsinfrastruktur, der skal styrke udviklingen af avancerede laserskilder med henblik på anvendelser inden for både industri og forskning.
Quantech	2016	20 mio. kr (2016 priser)	DTU, AU, SDU	Fremstilling og karakterisering af fotoniske og elektroniske kvantekomponenter.

Anm.: Bevillingerne forudsætter 50 procents medfinansiering fra deltagerne. Beløbene i tabellen er alene bevillingen fra den nationale pulje til forskningsinfrastruktur.

Kilde: Uddannelses- og Forskningsstyrelsen

6. Internationalt udsyn

Internationalt er investeringerne i kvanteteknologi steget over de sidste år, og flere lande har udviklet nationale strategier på området.

Dette kapitel sætter fokus på udvalgte landes investeringer og strategier i kvanteforskning, EU's kvantesatsninger og – initiativer, det europæiske rumsamarbejde og internationale forskningsinfrastrukturer.

Kapitlet belyser endvidere konkrete muligheder på kvanteområdet med det nye NATO kvantecenter samt igangværende aktiviteter og satsninger inden for rammerne af Danmarks bilaterale samarbejdsaftaler på forsknings- og innovationsområdet.

Kapitlets hovedkonklusioner

EU og en lang række lande har strategier og sat massive investeringer inden for kvanteforskningen på dagsordenen

En række vestlige lande inden og uden for EU, som f.eks. Nederlandene, Tyskland, Frankrig, Canada, Japan og USA gennemfører i disse år massive investeringer i kvanteforskning og anvendelse af nye teknologier på kvanteområdet, der gør det lettere at tage skridtet til innovation og forretning.

EU satser stærkt og strategisk på kvanteområdet med forskellige initiativer og investeringer. Dette igennem forskellige tiltag til finansiering af forskning og innovation, og specifikke initiativer som EuroHPC, der understøtter anvendelsen af supercomputere og den tidlige anvendelse af kvantecomputere, samt EuroQCI, til udvikling af teknologi til sikker datakommunikation. EU's mål er at opnå en global førerposition og digital suverænitet.

Det europæiske rumsamarbejde kan udnytte den nye kvanteteknologi

I forhold til det europæiske rumsamarbejde i regi af EU og den europæiske rumorganisation (ESA) kan kvanteteknologi give bedre viden om klimaforandringerne, adgang til sikker kommunikation og en bedre overvågning af trafikken i rummet. Kvanteteknologien har ligeledes potentiale til at understøtte den grønne omstilling på både energi- og transportområdet.

NATO har valgt at etablere et nyt kvantecenter i Danmark

NATO's nye kvantecenter, der etableres i Danmark, kan bidrage til at øge den erhvervmæssige nyttiggørelse af dansk grundforskning i kvanteteknologi. Ligeledes forventes det, at det danske medværtskab af neutronfaciliteten European Spallation Source (ESS) kan få en direkte effekt på kvanteforskningen i Danmark.

Danmark har særlig fokus på at øge samarbejdet om kvanteforskning med ligesindede lande

Innovationscentre i udvalgte lande, Invest in Denmark, Trade Council og Tech Ambassadors kontor har stigende fokus på kvanteteknologi og de muligheder, den giver for Danmark. Grundet de sikkerhedsmæssige implikationer og geopolitiske udfordringer fokuseres særligt på samarbejde med ligesindede lande.

6.1 Indledning

Flere og flere lande investerer massivt i forskning og udvikling af nye teknologier på kvanteområdet. I Europa ses investeringer i f.eks. Nederlandene, Tyskland, Frankrig og Storbritannien, og uden for Europa bl.a. i USA, Israel og Japan.

Dette kapitel beskriver bl.a. igangværende initiativer, investeringer og strategier i både EU og i enkelte udvalgte lande, der er interessante i forhold til udvikling af kvanteforskning og -teknologi.

Kvanteteknologi vil forventeligt få stor sikkerhedspolitisk betydning fremover ved at påvirke særligt kryptering og efterretningsindsamling, men også materieludvikling og mere præcise sensorer, der har perspektiver til militær anvendelse. Blandt andet derfor er kvanteområdet blevet genstand for global konkurrence særligt mellem USA og Kina, der begge har gjort kvanteteknologi til et strategisk og kommercielt forskningsområde.

6.2 Indsatsen i EU

EU har fremhævet kvanteteknologi som vital for fremtidig vækst og velstand samt kritisk for opnåelsen af europæisk digital suverænitet, hvor Europa stræber efter at blive globalt førende inden for kvantekommunikation. EU Kommissionen har foreslået at indføre begrænsning i deltagelse fra tredjelande i forskningsprojekter på bl.a. kvanteområderne, samt generelt skærpet fokus på europæisk strategisk autonomi i tilgangen til samarbejdet med tredjelande. Fra dansk side støttes generelt en balanceret EU-tilgang til internationalt forsknings- og innovationssamarbejde med opmærksomhed på etiske, økonomiske og sikkerhedsmæssige risici, forsvarlig forskning samt et stærkere fokus på egeninteresse i samarbejdet.

6.2.1 EU's Quantum Flagship

I oktober 2018 lancerede EU-Kommissionen flagskibsprojektet "Quantum Flagship". Målet var at styrke den europæiske kapacitet på kvanteområdet og skabe en højtprofileret fælleseuropæisk platform, der kunne skabe synlighed, tiltrække midler og skabe netværk mellem forskningsinstitutioner og virksomheder på kvanteområdet. EU-Kommissionen annoncerede ved Flagskibets begyndelse, at den samlede finansiering vil være på 1 mia. euro over en 10-årig periode.

Flagskibets strategiske forskningsdagsorden lægger vægt på kvantekommunikation, kvantecomputere, kvantesimulation, kvantesensorer og kvantemetrologi som centrale forskningsfelter, men behandler også en række samfundsmæssige rammebetingelser for fremskridt på kvanteområdet, herunder uddannelse, innovation, sikkerhed og lighed mellem kønnene.

6.2.2 Horizon Europe og Klyngeprogrammet "Det digitale område, industrien og rummet", Cluster 4

Horizon Europe er EU's rammeprogram for forskning og innovation i årene 2021-27 og efterfølgeren til rammeprogrammet Horizon 2020. Med et budget på cirka 700 mia. danske kr. støtter programmet fri forskning, forskermobilitet, strategisk forskning og innovation, hvor tværfaglige løsninger og internationalt samarbejde er i højsædet.

På tværs af Horizon Europe er der mange forskellige muligheder for finansiering af kvanteforskning og -innovation, herunder i det Europæiske Forskningsråd (ERC), der har fokus på fri og excellent grundforskning, og Marie Skłodowska Curie-programmet (MSCA), der støtter international forskeruddannelse, forskermobilitet og karriereudvikling.

Den strategiske forskning og innovation på kvanteområdet er i Horizon Europe tematisk placeret i klyngeprogrammet "Det digitale område, industrien og rummet". Det er fra

denne klynge (også kendt som Klynge 4), at midlerne til gennemførelse af Quantum Flagships strategiske forskningsdagsorden findes. I arbejdsprogrammet for klynge 4 for perioden 2021-22 er der afsat næsten 2 mia. danske kr. til opslag på kvanteområdet.

6.2.3 EuroHPC

Hos EU-Kommissionen er der stort fokus på at være klar til den tidlige anvendelse af kvantecomputere i sammenhæng med klassiske supercomputere eller HPC (high-performance computing).

EuroHPC er et europæisk fællesforetagende, hvis fortsatte aktiviteter er baseret på en forordning, som Danmark tiltrådte i 2020. Hovedfokus for EuroHPC er at opbygge beregningskapacitet og kompetencer for supercomputere. EuroHPC har også et fokus på den tidlige indlejring af kvantecomputere.

I april 2022 lancerede EuroHPC et opslag om indkøb af 3 kvantecomputere med en åben tilgang til at inkludere alt fra tidlige teknologiske anlæg, eksperimentelle kvantecomputere, til prototyper og operationelle anlæg. Kvantecomputerne skal have præference for at anvende europæisk teknologi, f.eks. som udviklet under Quantum Flagship, og skal integreres i de supercomputere som EuroHPC i øvrigt investerer i.

Formålet med indkøbet er at fremme udviklingen i Europa af algoritmer og software til kvantecomputere samt den tidlige anvendelse heraf. Indkøbet fra EuroHPC forudsætter 50 procent medfinansiering. Danmarks deltagelse i projekter under EuroHPC varetages og prioriteres af Dansk e-Infrastruktur Konsortium (DeiC), uden at Danmark dog har midler afsat til direkte medfinansiering af adgange til kvantecomputere under EuroHPC, eller til den videre udvikling af algoritmer, software og kompetencer. Se mere om udviklingen, adgangen og anvendelsen af kvantecomputere i Boks 6.1.

Boks 6.1 Kvantecomputere, supercomputere og algoritmer

Da kvantecomputere er i en tidlig udviklingsfase, er det vigtigt at skelne mellem tre fokusområder for den teknologiske udvikling:

- *Udviklingen* af kvantecomputere
- *Adgangen* til kvantecomputere
- *Anvendelsen* af kvantecomputere.

Kvantecomputere kan bygges ud fra flere forskellige teknologier, og der bliver forsket i mange forskellige teknologiske retninger for at *udvikle* den første anvendelige kvantecomputer.

Da kvantecomputere fungerer helt anderledes end klassiske supercomputere, er der behov for *adgang* til de første eksperimentelle kvantecomputere, så der kan forskes i algoritmer, programbiblioteker og andet software, som forberedelse på, at de første kvantecomputere reelt kan anvendes.

Kvantecomputere vil ikke kunne erstatte klassiske supercomputere, da de hver især – med et vist overlap, er gode til at løse bestemte typer beregningsopgaver. Forventningen er derfor, at den første egentlige *anvendelse* af kvantecomputere bliver som accelerator-komponenter i klassiske supercomputere – dvs. beregningerne skal kunne deles op alt efter om en given beregningsløkke bedst kører på den klassiske del eller på kvanteacceleratoren.

6.2.4 EuroQCI

Kvanteteknologi kan anvendes til sikker datakommunikation. EU-Kommissionen har lanceret et initiativ – EuroQCI (European Quantum Communication Infrastructure) – der på kort sigt har til formål at opbygge nationale, eksperimentelle netværksinfrastrukturer til sikker kommunikation ved brug af kvanteteknologi. På længere sigt er det målet, at de nationale eksperimentelle netværk bygges sammen i et operationelt europæisk netværk for sikker kommunikation. Initiativet involverer både kommunikation via datakabler på landjorden, og via satellitforbindelser. EuroQCI udvikles derfor i samarbejde med EU-landene og med Den europæiske rumorganisation (ESA).

Det er et krav fra EU's side, at den nationale deltagelse i EuroQCI sker med deltagelse af myndigheder og med 50 procent. national medfinansiering. Med udgangspunkt i kvanteforskning udført på DTU, og den organisatoriske kapacitet hos det nationale Forskningsnet, har Danmark indsendt et forslag til deltagelse i EuroQCI, med deltagelse af Erhvervsministeriet, Udenrigsministeriet, Forsvarsministeriet og Uddannelses- og Forskningsministeriet.

6.3 Kvanteteknologi i det europæiske rumsamarbejde

Kvanteteknologi bliver i disse år introduceret i flere af EU's og ESA's rumprogrammer med fokus på at give os bedre viden om klimaforandringerne og give os adgang til sikker kommunikation og bedre overvågning af trafikken i rummet. Kvanteteknologien har ligeledes potentialet til at understøtte den grønne omstilling på både energi- og transportområdet gennem en bedre og hurtigere behandling af data fra satellitter.

6.3.1 Viden om klimaforandringer

Klimaændringer udgør en af de største samfundsudfordringer og i relation hertil stiger behovet markant for øget indsigt i de parametre, som driver ændringerne samt effekterne af disse.

EU har derfor indledt et initiativ med det formål at undersøge mulighederne for at udstyre fremtidige jordobservationssatellitter med kvanteteknologi. Fokus er især på muligheden for at optimere fremtidige gravimetriske satellitter, der måler jordens tyngdefelt, med kvanteteknologi, såkaldte "Quantum gravimetry satellites".

Initiativet gennemføres i samarbejde med ESA og tager udgangspunkt i erfaringerne fra tidligere og nuværende ESA og NASA tyngdefeltssatellitmissioner. Ud fra regelmæssige tyngdefeltmålinger kan f.eks. afsmeltningen fra iskapper og stigningen i havniveauet kortlægges og dermed bidrage med vigtig information i monitoreringen af klimaændringer. Erfaringerne fra disse missioner viser imidlertid et behov for data af højere nøjagtighed, højere opløsning og højere hyppighed.

I EU-ESA initiativet ses en ny type sensor baseret på kvanteteknologi, en såkaldt "cold-atom interferometry (CAI)-based quantum sensor", som en lovende metode til at optimere tyngdemålinger, hvis anvendt på fremtidige satellitmissioner. EU stiler efter at afprøve metoden i rummet på satellitter inden udgangen af dette årti. På sigt er forventningen, at "Quantum gravimetry satellites" vil kunne understøtte EU's Rumprogram og bidrage til forbedrede modeller for klimaets udvikling og de afledte effekter heraf.

6.3.2 Sikker kommunikation og overvågning af trafikken i rummet

Det moderne samfunds afhængighed af satellitdata gør os sårbare. Det gælder ikke mindst de satellitbaserede tjenester, der i dag bidrager til at løse samfundskritiske opgaver. Kvanteteknologi kan medvirke til at højne sikkerheden og modstandsdygtigheden i satellitbaserede tjenester.

Den europæiske rumorganisation (ESA), udvikler f.eks. de satellitter, der skal indgå i EU's tidligere nævnte kvantekommunikationsinfrastruktur (EuroQCI). EuroQCI planlægges også integreret i EU's nye programforslag - Secure Connectivity, som skal levere ekstremt sikker satellitkommunikation baseret på kvantekryptering til europæiske myndigheder, der varetager samfundskritiske funktioner.

EU og ESA peger også på potentialet ved at anvende kvanteteknologi og AI til automatisering af overvågning af trafikken i rummet og ikke mindst varsling om risikoen for

sammenstød mellem satellitter. Sammenstød mellem satellitter er alvorlige, fordi de generer rumaffald, som øger risikoen for yderligere sammenstød. Med udsigt til et hastigt voksende antal satellitter er behovet for automatisering presserende.

6.3.3 Grøn omstilling fra rummet

EU's og ESA's satellitprogrammer har potentialet til at understøtte den grønne omstilling på både energi- og transportområdet¹⁴. Se et eksempel herpå i Boks 6.2. De enorme daglige datamængder forudsætter imidlertid en avanceret digital infrastruktur, hvis deres fulde potentiale skal realiseres.

Boks 6.2 Kvantecomputerens potentiale til udvikling af vindatlas

Supercomputere anvendes allerede i dag af DTU Vind til udvikling af vindatlas på baggrund af radarmålinger af havet. Målingerne sker fra satellitter i EU's Copernicus program for jordobservation. Anvendelsen af kvantecomputere har potentialet til i fremtiden at muliggøre en væsentlig hurtigere gennemgang af disse og andre enorme vind-datasæt, som bruges til at optimere placeringen af vindmølleparker i hele verden.

Kvanteteknologien kan på transportområdet på længere sigt anvendes i opbygningen af en avanceret national datadelingsinfrastruktur, der baserer sig på anvendelse af præcise positioneringsdata fra GPS og Galileo navigationssatellitter. Kvantecomputere er særligt egnede til transportområdet, fordi de kan arbejde med store mængder data i realtid i modsætning til eksisterende algoritmer, der fokuserer på statistiske analyser af fortiden. Infrastrukturen vil kunne bruges til en avanceret trafikstyring og optimering af ruter, logistik og parkering i og uden for byerne. En fuldt udfoldet løsning har potentialet til at reducere vejgodstrafikkens udledninger af drivhusgasser med 20-30 procent og samtidig styrke det danske transporterhvervs internationale konkurrenceevne gennem den afledte digitale innovation hos transportørerne.

6.4 Internationale forskningsinfrastrukturer

6.4.1 ESS – European Spallation Source

Danmarks deltagelse i store, internationale forskningsinfrastrukturer er vigtig for at fremme forskningen i kvanteteknologi. Det gælder ikke mindst European Spallation Source (ESS), som i disse år er under opbygning i Lund i Sverige, og som Danmark sammen med Sverige er medvært for.

ESS er en neutronfacilitet og bliver sammen med de øvrige neutronkilder, herunder ikke mindst Institut Laue-Langevin i Grenoble, et vigtigt redskab til analyse og karakteristik af kvantematerialer. Neutronspreddning giver således en helt unik mulighed for at analysere en række kvantematerialer.

Fra dansk side er der opbygget tre såkaldte fyrtårnsmiljøer, som skal være med til at udnytte potentialerne ved ESS. To af disse miljøer har fokus på udviklingen af nye

¹⁴ Danmarks nationale strategi for rummet, 2021

kvantematerialer. Selv om centrene er etableret inden for de sidste par år, er der allerede etableret samarbejder mellem disse fyrtårsmiljøer og en række kvantecomputer-miljøer i Danmark. Det er på den måde forventningen, at det danske medværtskab af ESS kan få en direkte effekt på kvanteforskningen i Danmark.

Analyse og karakterisering af kvantematerialer er også afhængig af adgang til en række af de øvrige materialeforskningsfaciliteter, som Danmark er medlem af, eller som danske forskere benytter i deres forskning. Synkrotronfaciliteterne ESRF (Grenoble) og Max IV (Lund) og røntgenlaserfaciliteten EuXFEL (Hamborg) anvendes til at analysere og karakterisere forskellige former for kvantematerialer.

6.4.2 CERN

Andre forskningsinfrastrukturer undersøger mulighederne i kvanteteknologi som en del af den generelle teknologiske udvikling, uden at have det som direkte målsætning at forske i kvanteteknologi.

Det gælder CERN, det Europæiske Råd for Nuklearforskning i Geneve, der har formuleret en strategi for udviklingen af kvanteteknologi, som skal fremme anvendelsen af kvanteteknologi i CERN's accelerators og eksperimenter. Strategien inkluderer forskning og udvikling i teori, sensorer, kvantematerialer, anvendelsen af kvantecomputere m.m., hvor CERN samtidig søger samarbejde med CERN's medlemslande, herunder Danmark.

6.5 NATO Center for Quantum Technologies

Som tidligere nævnt rummer kvanteteknologi ikke kun potentialer i forhold til emner som bedre sundhed, grøn omstilling, innovation i erhvervslivet mv. Kvanteteknologi er også en strategisk vigtig teknologi i både geopolitisk og sikkerhedspolitisk sammenhæng. Derfor er NATO, som en del af organisationens 2030-agenda, begyndt at interessere sig for området og arbejder målrettet med at styrke alliancen i forhold til nye og disruptive teknologier, hvoraf kvanteteknologi er udpeget som et af ni prioriterede teknologiområder.

På NATO-topmødet i juni 2021 blev det besluttet at etablere Forsvarsinnovationsacceleratoren NATO's Defence Innovation Accelerator for the North Atlantic (DIANA), der skal bidrage til et stærkt og sikkert transatlantisk økosystem for kvanteteknologi til både civil og sikkerhedspolitisk brug (dual-use teknologi).

I Danmark udarbejdede myndigheder, erhvervslivet og forskningsinstitutioner i fælleskab et bud til NATO på et dansk "NATO Center for Quantum Technologies" i regi af DIANA. Buddet blev afleveret til NATO's generalsekretær den 31. januar 2022, og den 5. april blev Danmark udvalgt til at opbygge NATO-centeret for kvanteteknologi.

Centeret forankres ved Niels Bohr Institutet på Københavns Universitet og støttes af andre danske universiteter - DTU og AU, Danmarks Nationale Metrologiinstitut (GTS-institutttet DFM) og erhvervslivet - herunder med rådgivning og sparring fra Novo Nordisk Fonden og BioInnovation Institute, der skal huse acceleratordelen (se nedenfor).

Formålet med kvantecenteret er at bringe forskere, entreprenører og investorer sammen i et fortroligt miljø og tættere på forsvaret. Målet er at udvikle løsninger baseret på

dual-use. Hermed kan kvantecenteret bidrage til at øge den erhvervsmæssige nyttiggørelse af dansk grundforskning i kvanteteknologi.

Centeret vil bestå af to dele:

- En accelerator, der er et konkurrencepræget forløb for udvalgte start-ups, som strækker sig over 12-18 måneder. Forløbet skal gøre virksomhedernes nye teknologiske løsninger modne til et kommercielt marked.
- Et testcenter og fabrikationsenhed, der består af flere fysiske laboratorier og testfaciliteter, hvor nye innovative idéer kan udvikles og testes.

Kvantecenteret skal ses i lyset af, at Danmarks og allieredes sikkerhed påvirkes af den globale teknologikonkurrence. Nye teknologier som kunstig intelligens, kvanteteknologi og autonome systemer vil præge den geopolitiske udvikling og kan ændre den globale magtbalance.

Centeret skal bidrage til at fastholde NATO's teknologiske forspring og til at tiltrække deep-tech virksomheder og –kompetencer samt bidrage til at udbygge Danmarks ledende position på kvanteområdet. Det skal samtidig levere et konkret resultat i forhold til regeringens strategi ved at styrke væsentlige danske sikkerhedsinteresser gennem tæt samarbejde mellem industri og forskningsinstitutioner. Ydermere vil centeret styrke Danmarks position i NATO og bidrage til at trække Danmark endnu tættere på kerneallierede, som har tydelig interesse i de danske kompetencer på kvanteområdet.

6.6 Kvantecområdet i andre lande

En række lande satser netop i disse år massivt på en udvidelse af kvanteforskningen, således at grundforskningen suppleres med anvendt forskning, der gør det lettere at tage skridtet til innovation og forretning.

Nedenstående landebeskrivelser giver et indblik i forskellige tilgange til kvanteforskning og kvanteteknologier. Nogle af landene har udviklet en national strategi eller har lanceret målrettede programmer eller handlingsplaner på området. Det gælder bl.a. Israel, Storbritannien, Tyskland og USA. Andre lande har, om ikke en strategi, så dog et øget fokus på kvanteteknologi som værende en nøglesektor for landenes økonomi, som det er tilfælde i f.eks. Canada og Sydkorea.

I en del af landene er kvanteforskning og udvikling af kvanteteknologi støttet af store offentlige investeringer. I Frankrig, Nederlandene, Storbritannien og Tyskland arbejder man med offentlig-private partnerskaber, hvorimod man i Sverige for det meste er finansieret af private kilder. De fleste af nedenstående lande staser stort på udviklingen af en kvantecomputer eller på integrationen af en kvantecomputer i klassiske systemer.

Canada: Kvanteeindustrien er blevet identificeret som en nøglesektor, der kan cementere Canadas økonomi, kan give langsigtet modstandsdygtighed og vækst, især efterhånden som teknologierne modnes og flere sektorer udnytter dens muligheder. I det føderale budget for 2021 blev investeringer på 360 mio. canadiske dollars over syv år an-

nonceret for at lancere en national kvantestrategi. Strategien skal styrke Canadas betydelige potentiale inden for kvanteforskning, udvikle kvanteklare teknologier, virksomheder og talenter, og konsolidere Canadas globale lederskab på dette område.

Finland: Det finske økonomiministerium finansierede for nylig et innovationsprojekt for VTT Technical Research Center i Finland, som skal bygge landets første kvantecomputer. VTT har indgået aftale med IQM, en start-up virksomhed baseret i Finland, til at varetage projektet. Arbejdet begyndte i slutningen af 2020, og vil fortsætte indtil 2024. Finland har i april 2022 indgået en bilateral aftale med USA om udvikling af kvanteteknologier.

Frankrig: I 2019 blev der udarbejdet en rapport (Forteza-rapporten) med 6 konkrete anbefalinger til udvikling af kvanteteknologi i Frankrig, som skal tjene som grundlag for regeringens udarbejdelse af en fransk kvanteteknologisk strategi. Rapporten anbefaler at udvikle en kvantecomputerinfrastruktur på fransk jord til forskning og industri, lancere et ambitiøst teknologisk udviklingsprogram, oprette et program til støtte for udvikling af anvendelser, skabe et effektivt innovationsmiljø, implementere en passende økonomisk sikkerhedsstrategi samt etablering af effektiv regeringsførelse. Med udgangspunkt i Forteza-rapporten præsenterede præsident Macron i 2021 Frankrigs nationale strategi og en investering på 1,8 mia. euro i udviklingen af kvanteteknologi i perioden 2021-2025, hvor staten finansierer 1,13 mia. euro, og hvor den øvrige finansiering kommer fra industriprogrammer, EU-finansiering og start-up investeringer. Sigtet er at gøre det muligt for den nye "hybrid quantum computing" platform at sammenkoble traditionelle systemer og kvantecomputere. Systemerne vil derefter være tilgængelige for et internationalt samfund af forskningsinstitutioner, nystartede virksomheder og industripartnere. Frankrig er i forhandlinger med USA om at indgå en bilateral aftale om udvikling af kvanteteknologier.

Israel: Israel Innovation Authority (IIA) og Forsvarsministeriets Direktorat for Forskning og Udvikling (MAFAT) meddelte i februar 2022, at de vil afsætte 200 millioner NIS (ca. 62,1 millioner dollars) til at bygge Israels første kvantecomputer. Investeringen i kvantecomputere kommer oven i de investeringer, der hidtil er blevet foretaget i teknologisk udvikling blandt virksomheder og forskere som led i det nationale kvantevidenskabs- og kvanteteknologiprogram. Programmet blev lanceret for ca. to år siden af TELEM-forummet (nationalt forsknings- og udviklingsforum) med et budget på 1,25 mia. NIS (ca. 388 mio. dollars). Dette forum består af MAFAT, den israelske innovationsmyndighed, planlægnings- og budgetudvalget, ministeriet for innovation, videnskab og teknologi samt finansministeriet.

Japan: I 2018 lancerede den japanske regering Quantum Leap Flagship programmet (Q-LEAP), som et forsknings- og udviklingsprogram. Formålet er at opnå 'kvantespring' i forhold til økonomiske og samfundsmæssige mål, ved at udnytte kvanteteknologien på følgende tre områder: kvantesimulering og kvantecomputing (målet er at bygge en computer med 100 qubits om 10 år), sensorer og kvantemetrologi, og næste generation af lasere. Q-LEAP-programmet omfatter et budget på 200 millioner dollars over 10 år. Der udarbejdes et netværkslignende forskningsgrundlag for hvert af de tre teknologiske områder; derudover gennemføres der et flagskibsprojekt og grundlæggende grundforskning. I april 2022 annoncerede den japanske regering at have til hensigt at deltage i det globale kvantecomputerkapløb, ved at tage sin første indenlandsk producerede kvantecomputer i brug inden marts 2023. Der er en målsætning om 10 millioner brugere af teknologien i 2030.

Kina: Kina har prioriteret kvanteforskning og -teknologi som værende kritisk for landets nationale sikkerhed og udvikling. Kvanteteknologi er en del af Kinas fjortende 5-årsplan. Kinesisk forskning har allerede opnået en førende position inden for disciplinen, hvilket er muliggjort af statslig støtte og finansiering samt rekruttering og dyrkning af talent. Som andre steder i verden fokuserer kinesiske forskere primært på databehandling og kommunikation. Det første har til formål at skabe en revolutionerende computer, der kan nedbryde de nuværende klassiske computers beregningsmæssige begrænsninger. Kina har allerede gjort bemærkelsesværdige fremskridt og konkurrerer dermed med de amerikanske giganter Google og IBM. Det andet område - kvantekommunikation - har til formål at etablere ubrydelige telekommunikationsnetværk og i sidste ende et kvanteinternet.

Nederlandene: Centralt for det nederlandske fokus på kvanteområdet er Quantum Delta NL, som er et offentlig-privat partnerskab mellem globale teknologivirksomheder, offentlige myndigheder og større kvanteforskningscentre. Nederlandene satser på både kvanteberegning, kvantesimulering, kvantekommunikation, kvantesansning, kvantealgoritmer og postkvantekryptografi. Quantum Delta NL forventer at oprette 100 start-up virksomheder, 2000 ph.d'er og ingeniører, samt tre laboratorier for forskning og udvikling. I 2020 etablerede Nederlandene en national investering i at fremme kvanteteknologi på godt 4,5 mia. kr. for perioden 2020-2027. Nederlandene er i forhandlinger med USA om at indgå en bilateral aftale om udvikling af kvanteteknologier.

Schweiz: I 2020 publicerede det schweiziske forskningsråd, Swiss Science Council, en hvidbog med overvejelser og anbefalinger om kvanteteknologi i Schweiz, for at sikre, at Schweiz kan udnytte sit fulde potentiale og sine strategiske fordele på kvanteområdet. Der er etableret et nationalt center for forskningskompetencen 'Kvantevidenskab og -teknologi', som består af 30 forskningsgrupper fra forskellige institutioner fra hele Schweiz. ETH Zürich og Paul Scherrer Institutet (PSI) grundlagde i 2021 et fælles center for udvikling af kvantecomputere. Målet er at fremme realiseringen af kvantecomputere baseret på både ionfælder og superledende enheder. ETH Zürich stiller 32 mio. schweizerfrancs til rådighed til dette formål.

Storbritannien: Som et af de første lande til at udvikle en handlingsplan og investere i kvanteteknologier startede UK første fase af sit UK National Quantum Technologies Programme i 2013 med en statslig investering på 270 mio. britiske pund i perioden 2014-2019. Anden fase startede i 2020, med en statslig bevilling på 150 mio. pund. Programmet beror på tætte offentlige-private samarbejder med fokus på forskning, innovation, uddannelse, test og demonstration. Den britiske strategi identificerer fem prioriterede indsatsområder, herunder kapacitet for kvanteteknologiske strategier i UK, markedsmuligheder, udvikling af en lokal kvalificeret arbejdsstyrke, skabe sunde miljøer samt internationalt engagement. UK indgik i 2021 en bilateral aftale med USA om udvikling af kvanteteknologier.

Sverige: Udviklingen af kvanteteknologier i Sverige er primært baseret på private initiativer. Forskningscenteret Wallenberg Center for Quantum Technology, er et samarbejde mellem Chalmers Tekniske Universitet og andre svenske universiteter. Centeret er finansieret af en privat fond, med en 12-årig forskningsindsats på 1,3 mia. svenske kr. i perioden 2018-2027. Sverige har i april 2022 indgået en bilateral aftale med USA om udvikling af kvanteteknologier.

Syd Korea: Den sydkoreanske regering har sat særligt fokus på 10 kritiske, nye teknologier, som de mener er kerneteknologier ift. Sydkoreas position på den globale scene. Kvanteteknologi er et af disse ti områder. Det sydkoreanske ministerium for forskning og ICT (MSIT) har annonceret, at de har fordoblet deres investering i kvanteteknologi i 2022 for at øge talentbasen, fremme forretningsmodeller inden for kvanteteknologi samt udvikle kerneteknologier inden for kvanteteknologi. MSIT annoncerede således i januar 2022, at de vil investere i udviklingen af en computer med 50 qubit for at lukke den teknologiske kløft med andre avancerede nationer. Regeringen vil også drive et center for kvanteinformationsforskere for at fremme kvantespecialister. Desuden vil der blive oprettet et kooperativt forskningsinstitut for kvanteinformation i USA som en opfølgning til det koreansk-amerikanske topmøde i maj 2021.

Tyskland: I marts 2021 præsenterede Tyskland sin nationale kvantestrategi "Agenda Quantensysteme 2030", der er en tiårig plan baseret på anbefalinger fra en ekspertgruppe af forskere og repræsentanter fra industrien. Gruppen har udarbejdet et roadmap for forskning og innovation inden for kvanteteknologi. Den tyske regering har investeringsmål på 2 mia. euro frem til 2025 til udmøntning af strategien gennem samarbejde med forskningsinstitutioner, industri, offentlige myndigheder og samfundet. I Tyskland er der en stærk kobling mellem industri- og forskningspolitik, hvor erhvervslivet ligeledes spiller en vigtig rolle. F.eks. har BMW indgået et samarbejde med det tekniske universitet i Aachen. Ti førende tyske virksomheder er med til at stifte Quantum Technology and Application Consortium for at udvikle det grundlæggende inden for kvanteberegninger. Særligt det seneste partnerskab med IBM har sikret Tyskland en plads i kvantekapløbet. Endvidere har Tyskland indgået en aftale på ca. 40 mio. euro med den finske start-up IQM, om at levere en kvantecomputer integreret i en klassisk supercomputer (HPC).

USA: I 2018 offentliggjorde USA en national strategi, som skal sikre fortsat lederskab inden for Quantum Information Science, og som udnytter indsatsen på tværs af seks politikområder: Videnskab, arbejdsstyrke, infrastruktur, industri, økonomisk og national sikkerhed og internationalt samarbejde. I forlængelse af strategien vedtog den amerikanske kongres National Quantum Initiative (NQI) Act, som giver de føderale offentlige myndigheder National Institute of Standards and Technology (NIST), National Science Foundation (NSF) og Department of Energy (DOE) mulighed for at katalysere væksten af kvanteteknologien gennem samarbejde med universiteter og det private erhvervsliv. NQI har fået tildelt 1,2 mia. USD over en femårig periode. I 2020 og 2021 blev der yderligere tildelt 860 mio. USD. USA har indgået bilaterale samarbejdsaftaler om udvikling af kvanteteknologi med Japan, Nederlandene, Finland, Sverige og Storbritannien.

6.7 Internationalt samarbejde og kommercialisering

Foruden et stærkt samarbejde i EU og NATO, så har Danmark mulighed for at samarbejde bilateralt med ligesindede lande med væsentlige kapaciteter på kvanteområdet.

6.7.1 Bilaterale samarbejder

Uddannelses- og Forskningsministeriet arbejder på at få etableret rammer for et stærkere internationalt samarbejde med de lande, som danske aktører efterspørger et konkret samarbejde med. Danmark har således otte bilaterale samarbejdsaftaler med lande

uden for EU på forsknings- og innovationsområdet. Det gælder: Brasilien, Indien, Israel, Japan, Kina, Sydafrika, Sydkorea og USA.

De danske bilaterale aftaler er med til at styrke mulighederne for bl.a. danske institutioner og virksomheder for at få offentlig finansiering af konkrete forsknings- og innovationsprojekter, samt af test- og demonstrationsprojekter, idet aftalerne giver mulighed for at lancere fælles opslag inden for veldefinerede områder. Med henblik på kvanteforskning og kvanteteknologi er især samarbejdet med Israel, Japan og USA interessant.

Danmark har i juni 2021 underskrevet et 'Memorandum of Understanding' med det amerikanske Department of Energy (DOE), hvori samarbejde om kvanteforskning og -teknologi indgår. Aftalen giver f.eks. adgang til samarbejde med DOE's 17 prestigefyldte nationale laboratorier, såsom Oak Ridge National Laboratory og Lawrence Berkeley National Laboratory, der begge har aktiviteter på kvanteområdet. Når det gælder forskningsfinansiering, arbejdes der konkret på at gennemføre bilaterale opslag med involvering af DOE og NIST (National Institute of Standards and Technology), to af de centrale interessenter under USA's National Quantum Initiative Act.

For Israel og Japan foregår der pt. ikke konkrete samarbejdsaktiviteter inden for kvanteteknologi med Danmark, men der er inden for rammerne af de danske bilaterale samarbejdsaftaler muligheder for det. Det kan i øvrigt nævnes, at Japan og USA har underskrevet en fælleserklæring om samarbejde inden for kvanteteknologi allerede tilbage i december 2019.

6.7.2 Fælleserklæring mellem Danmark og USA

Den amerikanske regering har igennem længere tid udvist stor interesse for samarbejde om kvanteteknologi med Danmark, da kvanteforskning er en dansk styrkeposition. F.eks. valgte den amerikanske udenrigsminister Anthony Blinken under sit besøg i Danmark i maj 2021 at besøge Niels Bohr Institutet på Københavns Universitet.

Danmark og USA indgik d. 7. juni 2022 en fælleserklæring om samarbejde om kvanteteknologi med henblik på øget samarbejde om udvikling af kvanteteknologier. Fra dansk side kan det fremme amerikanske investeringer samt øge fokus og promovere danske kompetencer inden for kvanteteknologi. Erklæringen vil også understøtte eksisterende forskningssamarbejder med det amerikanske Department of Energy (DOE) til fremme af kvanteteknologiske løsninger inden for den grønne omstilling, der potentielt kan kommercialiseres. Erklæringen vil desuden støtte den nuværende dialog med særligt amerikanske virksomheder om placering eller fastholdelse af kvanteaktiviteter i Danmark. Herudover bidrager erklæringen også til det langvarige strategiske partnerskab mellem Danmark og USA.

6.7.3 Innovationscentre

Innovation Centre Denmark (ICDK) har syv centre strategisk placeret i innovative hotspots rundt omkring i verden: München, Tel Aviv, Bangalore, Seoul, Shanghai, Boston og Silicon Valley. ICDK kan fremme samarbejde mellem forskningsinstitutioner, virksomheder og relevante myndigheder. ICDK hjælper f.eks. danske virksomheder, iværksættere

og forskere med at facilitere adgang til lokal viden, netværk til forsknings- og innovationsaktører, kapital og markeder. Det er særligt centrene i USA, Tyskland og Israel, der har fokus på kvanteteknologi.

De to innovationscentre i USA, *ICDK Boston* og *ICDK Silicon Valley* er begyndt at se nærmere på mulige indsatser inden for kvanteteknologi. Begge centre er i færd med at undersøge potentialet for aktiviteter, der støtter op omkring talentudveksling og uddannelsessamarbejde med de amerikanske eliteuniversiteter, der er stærke inden for kvanteforskning. Der er interesse fra amerikansk side at samarbejde med Danmark, og ICDK Silicon Valley ser på muligheder og barrierer for at styrke danske forskers adgang til de fremmeste laboratorier i USA.

Flere af de såkaldte tech giganter, såsom Microsoft, Google, Facebook og tech-virksomheden NVIDIA, er til stede i Silicon Valley. Tætheden mellem de store tech og it-virksomheder og stærke forskningsmiljøer skaber et solidt økosystem, der fremmer teknologioverførsel og kommercialiseringen af forskning på universiteterne. ICDK i Silicon Valley kan igennem relevante kontakter være med til at belyse teknologiudviklingen og -anvendelse inden for bestemte sektorer, såsom den finansielle sektor og lægemiddel-sektoren.

I Israel arbejder *ICDK Tel Aviv* aktivt med at knytte danske forskere til de israelske miljøer inden for både kvanteteknologi og cybersikkerhed. Innovationscentret har adgang til israelske myndigheder, universiteter og corporate R&D-afdelinger såsom Intel, Microsoft og IBM. Innovationscenteret har således bl.a. etableret en dansk-israelsk kvantealliance med repræsentanter fra myndigheder, forskere og virksomheder fra både det israelske og danske økosystem.

I Tyskland følger *ICDK München*, med sit fokus på Sydtyskland, den bayerske delstatsregerings bud på, hvordan delstaten investerer i forskning og innovation gennem sin Hightech-Agenda Bayern. I sommer 2020 blev kvanteteknologi begunstiget med hele 300 millioner euro jf. rubrikken "SuperTech". München er knudepunktet for denne indsats, og her er forskningsklyngen Munich Center for Quantum Science and Technology, Max Planck Instituttet for Kvanteeoptik og Leibniz Supercomputing Centre stærke miljøer. Hertil kommer, at der som følge af Hightech-Agenda Bayern opbygges et nyt Center for Quantum Computing and Quantum Technologies (ZQQ) i en partnerkreds bestående af bl.a. Fraunhofer, Det Tekniske Universitet (TUM) og Ludwig-Maximilians Universitet (LMU) i München. Bayerns delstatsregering lancerede i november 2021 køreplanen QuantumTech Vision og igangsatte i januar 2022 initiativet Munich Quantum Valley, der begge skal medvirke til at gøre Bayern til Europas centrum for kvanteforskning.

6.7.4 Invest in Denmark, Trade Council og Techplomacy

Invest in Denmark, Trade Council og Tech Ambassadørens kontor, har stigende fokus på kvanteteknologi og de muligheder, der ligger på investerings- og eksportsiden for Danmark. Det gælder også det geopolitiske billede og de sikkerhedspolitiske implikationer for internationalt samarbejde og handel. Grundet den forventede store sikkerhedspolitiske betydning fremover fokuserer man særligt på samarbejde med ligesindede lande med væsentlige kapaciteter på kvanteområdet, som blandt andre USA, Japan, Australien, Storbritannien og enkelte EU-lande, såsom Nederlandene og Finland.

Forventningen er, at en række af Danmarks nuværende styrkepositioner vil kunne øges markant gennem kvanteteknologiske løsninger. Måltrettet forskning i anvendelse af kvanteteknologiske løsninger inden for sektorer, hvor Danmark allerede står stærkt, vil kunne udbygge Danmarks førerposition på disse områder yderligere. Den grønne omstilling kan accelereres gennem nye teknologiske løsninger, og pharma/life science industrien og logistikvirksomheder, vil ligeledes kunne drage store fordele af disse teknologier.

7. Bibliometrisk analyse

Dette kapitel analyserer den danske kvanteforskning i perioden 2011-2020 ud fra en bibliometrisk vinkel.

I kapitlet belyses forskningens størrelse, indhold, specialisering og gennemslagskraft i såvel en national som international kontekst. Samtidig analyseres samarbejdsmønstre på tværs af lande, virksomheder og institutioner.

Analysen viser, at den danske kvanteforskning er karakteriseret ved en høj grad af internationalt samarbejde (74,1 procent), en høj andel af højt citerede publikationer (22,9 procent), og en begrænset sampublicering med erhvervslivet (5 procent).

Kapitlets hovedkonklusioner

Dansk forskning inden for kvanteområdet har en høj andel af publikationer blandt de 10 procent mest citerede publikationer

Dansk forskning står i al almindelighed stærkt målt på gennemslagskraft og andelen af højt citerede publikationer (andel i top-10). Det gælder også i forhold til forskning på kvanteområdet. Andelen af højt citerede publikationer i dansk forskning udgør således 19,3 procent i perioden 2011-2020, men den danske kvanteforskning ligger imidlertid endnu højere med en andel af særligt højt citerede publikationer på 22,9 procent.

Blandt analysens sammenligningslande placerer det dansk kvanteforskning i top tre efter Nederlandene og Schweiz målt på andelen af særligt højt citerede publikationer inden for kvanteforskning.

Danmark har en høj publiceringsvolumen og specialiseringsgrad inden for forskning på kvanteområdet

Målt i forhold til publikationsvolumen per mio. indbyggere ligger dansk kvanteforskning næsthøjest blandt sammenligningslandene – dog med Schweiz et stykke foran Danmark.

Ser man på specialiseringsgrad – dvs. om et land er særlig specialiseret inden for et forskningsområde i forhold til specialiseringen på verdensplan, viser analysen, at forskning inden for kvanteområdet fylder 30 procent mere i dansk forskning, end kvanteforskning gør på verdensplan. Det placerer Danmark i midterfeltet blandt de udvalgte sammenligningslande. Blandt sammenligningslandene har Israel den højeste specialiseringsgrad, og kvanteforskningen fylder dobbelt så meget blandt de samlede israelske forskningspublikationer, som på verdensplan.

Samlet er Danmark – sammen med Schweiz – karakteriseret ved en høj publikationsvolumen per mio. indbyggere, en relativ høj specialiseringsgrad, og en høj andel af publikationer blandt de 10 procent mest citerede publikationer. Danmark ligger med andre ord højt blandt sammenligningslandene på alle tre parametre – dog med Schweiz et stykke foran Danmark samlet set.

Københavns Universitet er den danske institution, der har udgivet flest publikationer inden for forskning på kvanteområdet

Københavns universitet er den institution, som har udgivet flest kvantepublikationer i perioden 2011-2020. Herefter kommer Danmarks Tekniske Universitet, Aarhus Universitet, Syddansk universitet og Aalborg Universitet. Københavns Universitet har desuden en feltvægtet gennemslagskraft (2,23), der ligger væsentligt højere end niveauet for den samlede danske forskning (1,82). Den feltvægtede gennemslagskraft er et udtryk for, hvor meget en publikation citeres sammenholdt med det gennemsnitlige antal citationer, som lignende publikationer inden for det givne fagområde har modtaget.

Kvanteforskningen domineres af naturvidenskabelig og teknisk videnskabelig forskning

Den danske kvanteforskning domineres ikke overraskende af den naturvidenskabelige (68 procent) og den teknisk videnskabelige forskning (29 procent) med fagområderne fysik, kemi og materialevidenskab som de største områder.

Kvanteforskningen er karakteriseret ved en høj grad af internationalt samarbejde

Kvanteforskningen er generelt karakteriseret ved en høj grad af internationalt samarbejde. Med en andel på 74,1 procent i perioden 2011-2020 ligger Danmark helt i top sammen Schweiz, Finland og Nederlandene. Sammenlignes den danske kvanteforskning med det naturvidenskabelige område i Danmark generelt, så ligger andelen af internationalt samarbejde inden for kvanteområdet højere (7,2 procentpoint). Sammenlignes området med dansk forskning inden for fysik generelt, ligger det også lidt højere (2,6 procentpoint).

Danmarks ti største samarbejdslande kommer primært fra Europa, men også Kina og USA er i top fem. På institutionsniveau samarbejder danske forskere oftest med forskere fra CNRS i Frankrig og Harvard University i USA.

Kun få offentlige og private aktører sampublicerer inden for kvanteområdet

Offentlige og private aktører publicerer kun i begrænset omfang sammen inden for kvanteforskningen (5 procent), og i væsentligt mindre grad end hvad der er tilfældet for den samlede danske forskning (10,8 procent). Analysen viser også, at danske forskere især sampublicerer med virksomheder inden for it- og telebranchen – hvoriblandt Microsoft fra USA er den primære samarbejdspartner i forhold til publikationer. Generelt er billedet dog kendetegnet ved, at universiteternes samarbejde omkring publikationer sker med mange forskellige virksomheder (40) i stedet for få, store samarbejdspartnere.

7.1 Metode og afgrænsning

Som beskrevet i Boks 2.1 er fokus i nærværende bibliometriske analyse kvanteforskningens *anden* generation.

For at skabe et datasæt, der bedst muligt identificerer publikationer fra anden generation og færrest mulige fra første, baseres analysen på en søgestreng med søgeord, der specifikt relaterer til anden generation kvanteforskning, frem for en generel søgning alene på den overordnede term "Quantum". Ligeledes afgrænses perioden til 2011-2020¹⁵, så det alene er den seneste forskning, der er inkluderet. Kvanteforskning, der ikke eksplicit anvender termen "quantum" i sine publikationer, er forsøgt identificeret, men disse indgår kun i begrænset omfang. Det skyldes, at søgeordene ofte bliver for brede og resulterer i mange *falske positive* resultater, dvs. publikationer, der enten ved-

¹⁵ Data for 2021 er endnu ikke tilgængelig (april 2022).

rører andre forskningsområder, eller som henvender sig til første generation kvanteforskning. Begrænsningen vurderes imidlertid ikke at have rykket det samlede billede af kvanteforskningen eller forholdene de enkelte aktører imellem.

Søgestrengen er blandt andet baseret på fagtermer fra EU's "Quantum Flagship" i Horizon Europe-forskningsprogrammet samt rapporterne "Danish Quantum Agenda", udgivet af Danish Quantum Community 2022, og "Quantum technology in Denmark", udgivet af Industriens Fond 2020.¹⁶

Datagrundlaget for denne analyse er den bibliometriske database Scopus, som indeholder forskningspublikationer fra mere end 9.400 forskningsinstitutioner og 230 lande. Databasen indekserer 23.500 videnskabelige tidsskrifter og næsten 10 mio. konferencebidrag¹⁷. Analyserne er udarbejdet i analyseværktøjet SciVal.

Ud over en emne- og tidsmæssig afgrænsning af kvanteforskningen er analysen desuden afgrænset til publikationstyperne *articles*, *reviews* og *conference papers*, og søgestrengen søger i publikationernes *title*, *abstract* og *author key words*.

I analysen anvendes begrebet "dansk kvanteforskning". Begrebet henviser til publikationer inden for kvanteforskning med deltagelse af en forfatter fra en dansk institution, og ikke kun publikationer, hvor der *alene* er forfattere fra danske institutioner. Størstedelen af alle kvantepublikationer sker med internationalt samarbejde, hvorfor en opgørelse af publikationer alene med danske forfattere ville give et ufuldendt billede af den danske aktivitet på området.

7.1.1 Sammenligningslande

I analysen sammenlignes Danmark med 11 kvanteforskende lande, som enten har stærke forskningsmiljøer på området eller et stort, nationalt investeringsniveau.

Analysens sammenligningslande er således de tre europæiske, og på flere parametre sammenlignelige, lande Finland, Nederlandene og Schweiz. Herudover indgår de tre store europæiske lande Frankrig, Storbritannien og Tyskland. Endelig sættes tallene i en global kontekst med sammenligningslandene Israel, Canada, USA, Kina og Japan.

7.1.2 Indikatorer

Følgende indikatorer anvendes i analysen:

- **Optælling af publikationer (fuldtælling):** En publikation tæller én gang for hver institution/land, der har en forfatter, som indgår på publikationens forfatterliste. Der anvendes ikke fraktionering i denne analyse, og en publikation kan således optræde mere end én gang.
- **Forskningsspecialisering** viser, om et land er særligt specialiseret inden for et forskningsområde. Forskningsspecialisering beregnes ved at sætte andelen af publikationer inden for et forskningsområde i et givent land i forhold til andelen af

¹⁶ Der skal lyde et stort tak for sparring og kvalificering af søgeord til kvanteforskere fra Aarhus Universitet, Københavns Universitet, Syddansk Universitet, Aalborg Universitet samt Novo Nordisk Fonden.

¹⁷ https://www.elsevier.com/___data/assets/pdf_file/0007/69451/Scopus_Content_Coverage_Guide_WEB.pdf

publikationer inden for det samme forskningsområde på verdensplan. En forskningsspecialisering i Danmark på 1 betyder, at forskningsområdet publiceringsmæssigt fylder det samme i Danmark som i resten af verden, mens en værdi på 1,5 betyder, at det fylder 50 procent mere i Danmark end i resten af verden.

$$\frac{\text{Antal publikationer inden for et forskningsområde i DK}}{\text{Samlede antal publikationer i DK}} \bigg/ \frac{\text{Antal publikationer inden for et forskningsområde i verden}}{\text{Samlede publikationer i verden}}$$

- **Citationer:** Der inkluderes selvcitationer i analysen, da der er tale om analyser på lande- og institutionsniveau, hvor alle citationer fra henholdsvis samme land eller institution betragtes som selvcitationer i SciVal.
- **Feltvægtet gennemslagskraft** opgør antallet af citationer, som en publikation har fået sammenholdt med det gennemsnitlige antal citationer, som lignende publikationer inden for det givne fagområde har modtaget. Verdensgennemsnittet er 1,0, hvilket konkret betyder, at værdier, der ligger over 1,0, har en feltvægtet gennemslagskraft, der ligger højere end det samlede verdensgennemsnit. Tilsvarende betyder en feltvægtet gennemslagskraft under 1,0, at den ligger under det samlede verdensgennemsnit. Indikatoren kan fortælle om en publikations relevans for andre forskere.
- **Udgivelser blandt de 10 procent mest citerede:** Andelen af et publikationssæt som ligger blandt de 10 procent mest citerede publikationer. Hvis procentsatsen overstiger 10 procent, ligger flere publikationer blandt de 10 procent mest citerede end gennemsnittet. Denne indikator er feltvægtet.
- **International sampublicering** måler antallet af forskningspublikationer med mindst én international medforfatter.
- **Offentlig-privat sampublicering** måler antallet af publikationer med forfattere fra både offentlige forskningsinstitutioner og erhvervslivet.

7.2 Kvanteforskningen i dansk perspektiv

For at forstå den danske kvanteforsknings volumen og gennemslagskraft sættes forskningen indledningsvist i en national kontekst.

7.2.1 Kvanteforskning sammenlignet med dansk forskning generelt

Tabellen nedenfor sammenholder således, på en række parametre, den danske kvanteforskning med den samlede danske forskning i perioden 2011–2020.

Tabel 7.1

Dansk kvanteforskning sammenholdt med dansk forskning samlet set, 2011-2020

	Dansk kvanteforskning	Dansk forskning samlet
Antal og andel af publikationer, 2011-2020	1.370 (0,6 procent)	243.032 (100 procent)
Feltvægtet gennemslagskraft, 2011-2020	1,86	1,82
Andel af publikationer blandt top 10 pct.	22,9	19,3
Andel publikationer offentlig-privat sampublicering, 2011-2020, pct.	5	10,8
Andel publikationer med international sampublicering 2011-2020, pct.	74,1	61,1

Anm.: Følgende publikationstyper er inkluderet: artikler, reviews og konferencebidrag.

En feltvægtet gennemslagskraft på 1,0 er lig med verdensgennemsnittet.

Kilde: Scival marts 2022

Dansk forskning står generelt stærkt målt på gennemslagskraft (1,82) og andelen af højt citerede publikationer (andel i top-10) (19,3 procent). Kvanteteorrådet er ingen undtagelse.

Af Tabel 7.1 fremgår det, at den danske kvanteforskning, målt på feltvægtet gennemslagskraft, der viser forskningens citationsgrad, ligger på niveau med den samlede danske forskning (1,86), og tillige har en større andel, der er særligt højt citeret (andel i top-10) (22,9 procent).

Tabellen viser endvidere, at den danske kvanteforskning, med 13 procentpoint forskel til den samlede danske forskning, oftere udføres gennem internationalt samarbejde.

Som det fremgår af analysens senere afsnit (se Figur 7.2), tegnes kvanteforskningen især af den naturvidenskabelige forskning med fysik som det største felt. Sammenlignes kvanteteorrådet med det naturvidenskabelige område i Danmark generelt, så ligger andelen af internationalt samarbejde inden for kvanteteorrådet fortsat højere (7,2 procentpoint). Sammenlignes området med fysik generelt, så ligger det lidt højere (2,6 procentpoint).

Offentlige og private aktører publicerer kun i begrænset omfang sammen inden for kvanteforskningen (5 procent), og i væsentligt mindre grad end hvad der er tilfældet for den samlede danske forskning (10,8 procent).¹⁸

7.2.2 Karakteristik af dansk kvanteforskning

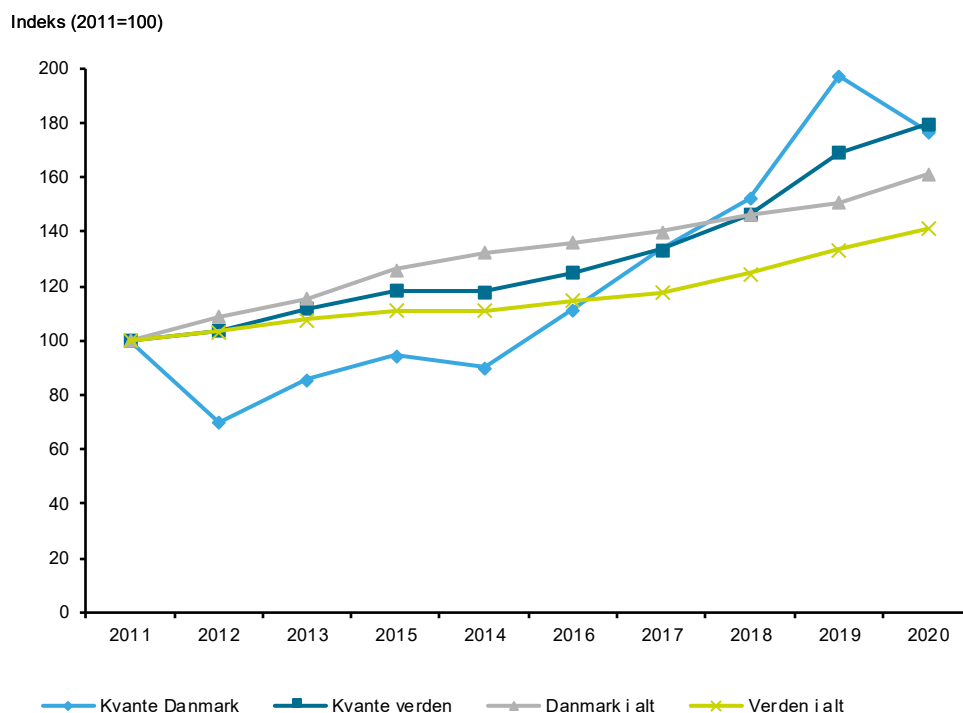
I det følgende belyses den danske kvantepublikations udvikling og emnemæssige fokus, samt forskningens primære aktører og deres samarbejdspartnere.

Graferne nedenfor viser udviklingen i publikationsvolumen inden for kvanteteorrådet i perioden 2011-2020.

¹⁸ Et begrænset publikationssamarbejde behøver i sig selv ikke at betyde, at virksomhedssamarbejde ikke finder sted. Virksomheder kan være tilknyttet kvanteprojekter eller være aftagere af projektresultater uden at optræde som medforfatter på publikationerne.

Figur 7.1

Udvikling i publikationsvolumen, Danmark og verden, indeks (2011=100), 2011-2020



Kilde: Scival marts 2022

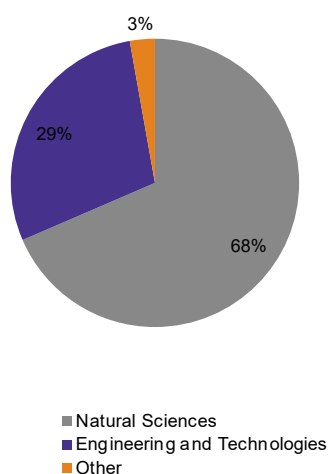
Figuren viser, at omfanget af forskningspublikationer på verdensplan er steget med hele 41 procent i perioden 2011-2020 og med 61 procent i Danmark. Figuren viser endvidere, at den danske kvantepublikation følger samme opadgående tendens. For kvanteområdet er antallet af publikationer næsten fordoblet med 9016 publikationer på verdensplan i 2011 til 16.197 i 2020, og fra 113 publikationer i Danmark i 2011 til 200 i 2020. Det svarer til en stigning på henholdsvis 77 procent og 80 procent i perioden.

7.2.2.1 Faglige områder

Ser man på indholdet af kvanteforskningen domineres denne særligt af to hovedområder.

Figur 7.2

Dansk kvanteforskning fordelt på hovedområde, 2011-2020

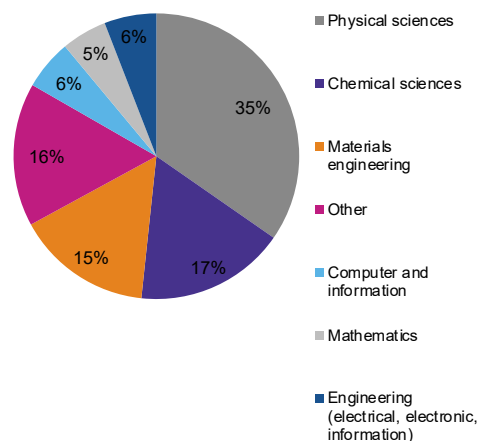


Anm.: Hovedområderne er inddelt efter OECD's klassifikation (FORD)¹⁹

Kilde: Scival marts 2022

Figur 7.3

Dansk kvanteforskning fordelt på fagområde, 2011-2020



Anm.: Fagområderne er inddelt efter OECD's klassifikation (FORD)²⁰
Other grupperer en række små områder

Kilde: Scival marts 2022

Figurerne viser, at hovedparten af den danske kvanteforskning foregår inden for det naturvidenskabelige område (68 procent) og det teknisk videnskabelige område (29 procent). Herunder er det især fagområderne fysik, kemi og materialevidenskab, der dominerer billedet.

Figur 7.4 viser hvilke emneord, der oftest optræder i de danske kvantepublikationer.

¹⁹ Fields of Research and Development (FORD), OECD

²⁰ Fields of Research and Development (FORD), OECD

Københavns Universitet har det højeste antal publikationer inden for kvanteområdet i perioden. Herefter kommer Danmarks Tekniske Universitet, Aarhus Universitet, Syddansk Universitet og Aalborg Universitet. Dette billede stemmer godt overens med resultaterne af analyserne af både fordeling af eksterne forskningsbevillinger fra nationale fonde og EU-programmer i kapitel 5 samt opgørelsen af forskerårsværk mv. i kapitel 4.

Københavns Universitet markerer sig særligt ved at have en feltvægtet gennemslagskraft (2,23), dvs. en citationsgrad blandt andre forskere, der ligger væsentligt højere end niveauet for den samlede danske forskning (1,82) (se Tabel 7.1).

Kvanteforskningen er, som nævnt, karakteriseret ved en høj grad af samarbejde såvel internationalt som nationalt. Eksempelvis er Københavns Universitet den institution, som Danmarks Tekniske Universitet oftest publicerer med, ligesom Danmarks Tekniske Universitet er Syddansk Universitets primære samarbejdspartner.²¹

7.2.2.3 Samarbejdslande

For så vidt angår det internationale samarbejde, viser Tabel 7.3, hvilke lande, som de danske kvanteforskere oftest publicerer med.

Tabel 7.3

Primære samarbejdslande, 2011-2020

Land	Antal
Tyskland	283
USA	270
Storbritannien	178
Schweiz	111
Kina	104
Frankrig	98
Spanien	95
Nederlandene	89
Italien	77
Canada	76

Anm.: Opgørelserne er ikke fraktionerede
Kilde: Scival marts 2022

Af tabellen over de ti primære samarbejdslande fremgår det, at de danske forskere oftest publicerer med forskere fra Europa, hvoraf tyske institutioner samlet set udgør den største andel. Det er dog værd at bemærke, at Kina og USA også er blandt Danmarks fem primære samarbejdspartnere på området.

²¹ Samarbejde om publikationer

7.2.2.4 Internationale samarbejdsinstitutioner

Tabel 7.4 viser, hvilke institutioner der særligt tegner billedet

Tabel 7.4

Primære samarbejdsinstitutioner, 2011-2020

Institution	Land	Antal
CNRS - Centre national de la recherche scientifique	Frankrig	73
Harvard University	USA	50
CEA - Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives	Frankrig	42
Swiss Federal Institute of Technology Zurich	Schweiz	41
Delft University of Technology	Nederlandene	33
National Research Council of Italy	Italien	33
ICREA	Spanien	32
Chinese Academy of Sciences	Kina	31
Leibniz University Hannover	Tyskland	31
Lund University	Sverige	31
Polytechnic University of Catalonia	Spanien	31
University of Bristol	Storbritannien	31
University of Basel	Schweiz	30
Institute of Photonic Sciences	Spanien	29
Massachusetts Institute of Technology	USA	29
University College London	Storbritannien	29

Anm.: Opgørelserne er ikke fraktionerede.

Kilde: Scival marts 2022

Det er især forskere fra forskningsinstituttet, CNRS, under det franske Uddannelses- og forskningsministerium, som de danske forskere publicerer med. Herefter kommer forskere fra Harvard University i USA, det franske atomenergiagentur, CEA, samt det schweiziske universitet, Swiss Federal Institute of Technology.

7.2.2.5 Sampublicering med virksomheder

Inden for kvanteforskningen publiceres der, som tidligere nævnt, kun i begrænset omfang med erhvervslivet. Af Tabel 7.5 ses de virksomheder, som danske forskere publicerer med.

Tabel 7.5

Primære virksomheder, 2011-2020

Virksomhed	Land	Antal
Microsoft USA	USA	12
Lucent	USA	6
Nippon Telegraph & Telephone	Japan	6
Nokia	Finland	6
IBM	USA	5
DFM - Dansk Fundamental Metrologi A/S ²²	Danmark	4
OFS Fitel Denmark ApS	Danmark	4
ASML Netherlands BV	Nederlandene	3
Hitachi, Ltd.	Japan	3
Fujikura Ltd.	Japan	2
HRL Laboratories	USA	2
Huawei Technologies Co., Ltd.	Kina	2

Anm.: Opgørelserne er ikke fraktionerede.

Kilde: Scival marts 2022

Det er især virksomheder inden for it- og telebranchen, som de danske forskere publicerer med. Blandt disse virksomheder er Microsoft fra USA den primære samarbejdspartner. Generelt er billedet dog kendetegnet ved et begrænset publikationssamarbejde med mange forskellige virksomheder (40) i stedet for få, store samarbejdspartnere.

7.3 Kvanteforskningen i internationalt perspektiv

I dette afsnit belyses den danske kvanteforskning i en international kontekst. Opgørelserne sammenholder således den danske kvanteforskning med 11 udvalgte lande på en række parametre.

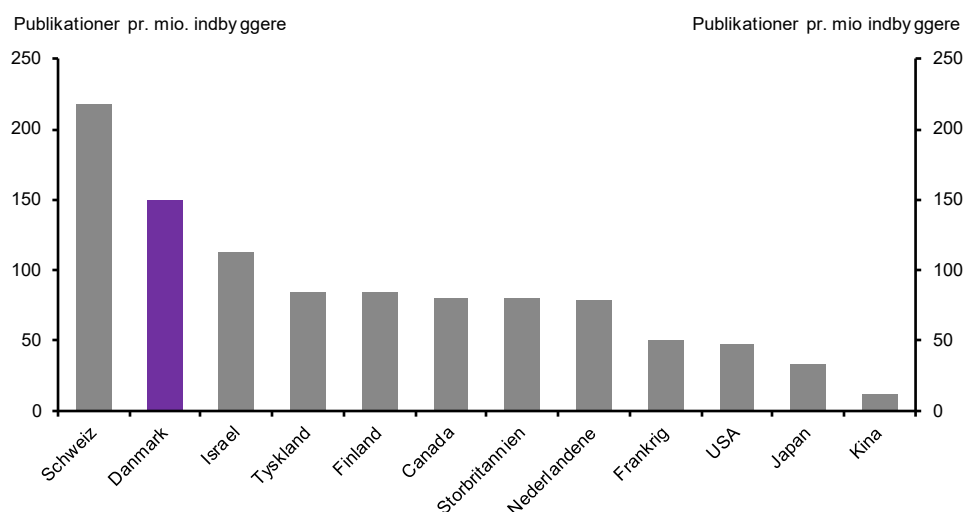
7.3.1 Publiceringsvolumen i internationalt perspektiv

Indledningsvist sammenlignes publikationsvolumen i de 11 lande.

²² DFM er et Godkendt Teknologisk Serviceinstitut (GTS-institut). GTS-institutterne er private almennyttige institutioner/virksomheder.

Figur 7.5

Danmarks publikationsvolumen sammenlignet med udvalgte lande, 2016-2020



Anm.: På grund af begrænsninger ift. antallet af publikationer i Scival, opgøres tallene for en femårig i stedet for en tiårig periode.

Kilde: Scival marts 2020

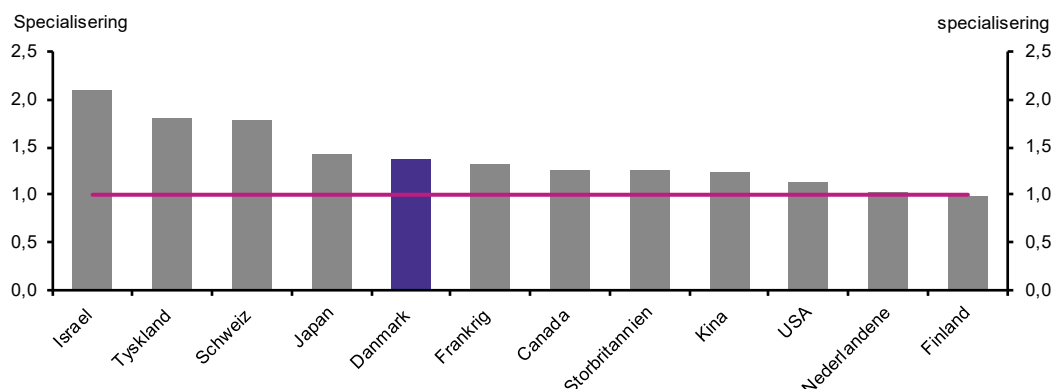
Af opgørelsen fremgår det, at Schweiz ligger helt i front ift. antallet af kvantepublikationer per mio. indbyggere. Den schweiziske volumen er således 46 procentpoint højere end i Danmark på en andenpladsen og 94 procentpoint højere end i Israel på tredjepladsen. Kinas høje indbyggertal placerer landet på en sidsteplads, mens lande som Nederlandene, Storbritannien, Canada, Finland og Tyskland udgør et større midterfelt.

7.3.2 Specialiseringsgraden inden for kvanteforskning hos udvalgte lande

En indikator for, hvor specialiseret et land er inden for et forskningsområde, er ved at undersøge, hvor meget området fylder i det pågældende lands forskning sammenholdt med andelen på verdensplan. Figur 7.6 viser sammenligningslandenes specialiseringsgrad inden for kvanteforskningen.

Figur 7.6

Specialiseringsgraden inden for kvanteforskning hos udvalgte lande, 2016-2020



Anm.: En forskningsspecialisering i Danmark på 1 betyder, at forskningsområdet publiceringsmæssigt fylder det samme i Danmark som i resten af verden, mens en værdi på 1,5 betyder, at det område fylder 50 pct. mere i Danmark end i resten af verden. På grund af begrænsninger ift. antallet af publikationer i Scival, opgøres tallene for en femårig i stedet for en tiårig periode.

Kilde: Scival marts 2022.

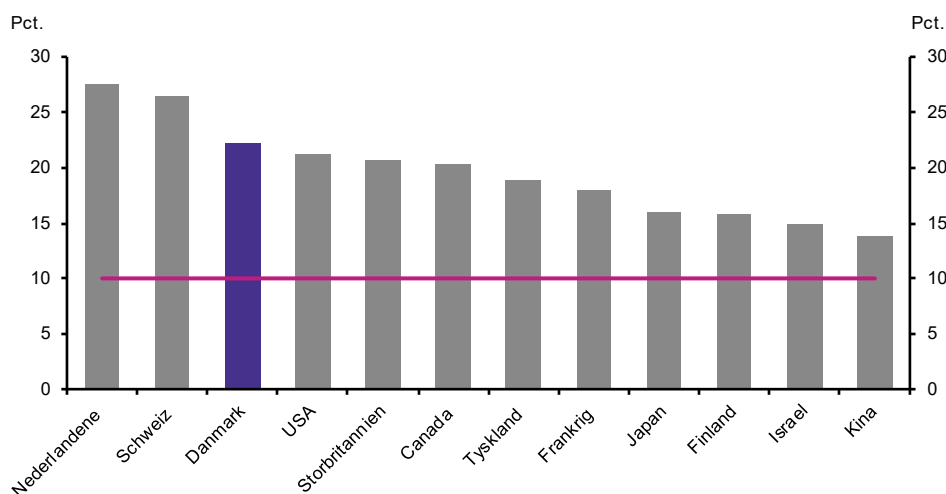
Blandt sammenligningslandene har Israel den højeste specialiseringsgrad, hvilket konkret betyder, at kvanteforskningen fylder mere blandt de israelske publikationer, end hvad der er tilfældet for de øvrige lande. I Israel fylder kvanteforskningen dobbelt så meget, som den gør på verdensplan. Det er væsentligt mere end i blandt andet Danmark, hvor forskningen fylder 30 procent mere end på verdensplan. Efter Israel har Tyskland og Schweiz den næsthøjeste specialiseringsgrad inden for området, foran Japan og Danmark på de efterfølgende pladser. Nederlandene og Finland ligger på de sidste pladser.

7.3.3 Andel af højt citerede publikationer

Forskningens gennemslagskraft kan bl.a. måles ved at se på andelen af publikationer, der er blandt de 10 procent mest citerede videnskabelige publikationer. Figur 7.7 viser, hvor høj denne andel er i sammenligningslandene.

Figur 7.7

Andel af publikationer i top 10-pct., feltvægtet, udvalgte lande, 2016-2020



Anm.: Denne indikator er mindre følsom over for enkelte, højt citerede publikationer end den feltvægtede gennemslagskraft, da der tages udgangspunkt i procentdelen af et lands samlede publikation. På grund af begrænsninger ift. antallet af publikationer i Scival, opgøres tallene for en fem-årig i stedet for en tiårig periode.

Kilde: Scival marts 2022

Nederlandene har, efterfulgt af Schweiz, den højeste andel af publikationer blandt de 10 procent mest citerede publikationer. Danmark ligger på en tredjeplads foran USA.

For så vidt angår Nederlandene, betyder det, at selvom kvanteområdet volumenmæssigt ikke er stort, så bliver den forskning, der udføres, til gengæld i høj grad citeret.

Schweiz og Danmark på de næste pladser er begge karakteriseret ved en høj publikationsvolumen per mio. indbyggere, en relativ høj specialiseringsgrad, og høje andele af publikationer i top-10 procent. De to lande ligger med andre ord højt blandt sammenligningslandene på alle tre parametre med Schweiz et stykke foran Danmark.

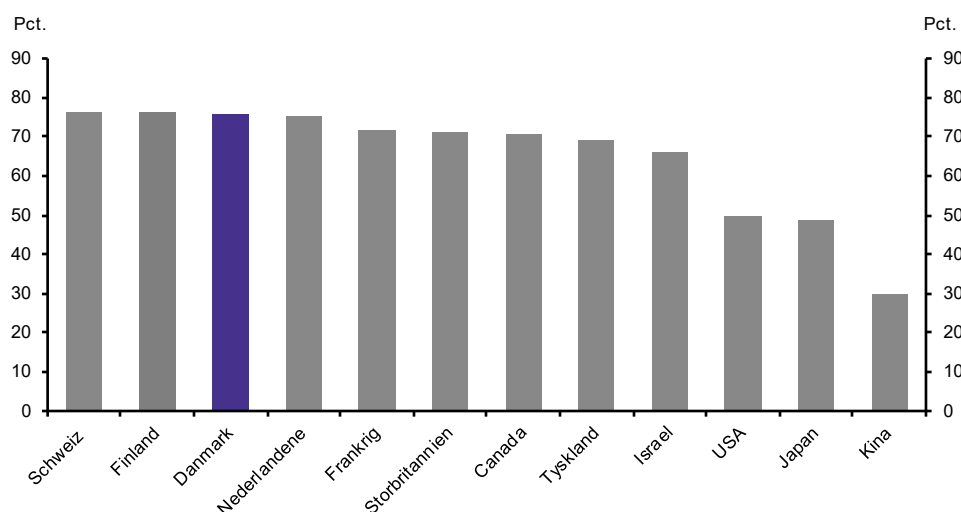
7.3.4 Internationalt samarbejde

Kvanteforskningen er, som tidligere nævnt, karakteriseret ved både nationalt og internationalt samarbejde. Disse samarbejder er med til at understøtte forankringen af forskningen i samfundet og udbredelsen internationalt. Publikationer med international sampublicering har samlet set en højere gennemslagskraft end øvrige publikationer²³. Figur 7.8 viser andelen af internationalt samarbejde i sammenligningslandene.

²³ Center for Forskningsanalyse (2017): Collaboration in Research

Figur 7.8

Andel af internationalt samarbejde, udvalgte lande, 2016-2020



Anm.: På grund af begrænsninger ift. antallet af publikationer i Scival, opgøres tallene for en femårig i stedet for en tiårig periode.

Kilde: Scival marts 2022

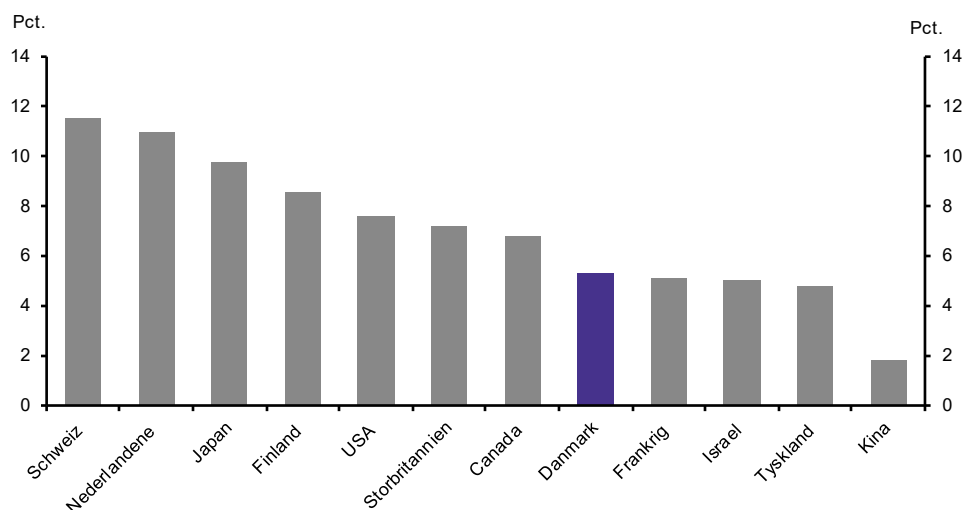
Danmark ligger sammen med Schweiz, Finland og Nederlandene helt i top ift. andelen af publikationer, der udføres gennem internationalt samarbejde. Generelt har alle sammenligningslandene en høj andel af publikationer med internationalt samarbejde, pænt over gennemsnittet for kvanteforskning i verden på 32,5 procent og den naturvidenskabelige forskning på 21,6 procent.

7.3.5 Offentlig-privat sampublicering

Offentlig-privat sampublicering kan til en vis grad ses som en indikator for forskningens relevans for erhvervslivet, da forskning, der bliver udført i og publiceret som resultat af et samarbejde mellem en offentlig forskningsinstitution og en virksomhed, ofte vil være målrettet de behov, som virksomheden har. Figur 7.9 viser andelen af offentlig-privat sampublicering blandt sammenligningslandene.

Figur 7.9

Andel af offentlig-privat publiceringssamarbejde, udvalgte lande, 2016-2020



Kilde: Scival marts 2022

Blandt sammenligningslandene har Schweiz og Nederlandene de højeste andele af offentligt-privat forskningssamarbejde, mens Danmark ligger blandt de lande, som har den laveste. Andelen af samarbejde i den danske kvanteforskning ligger, som tidligere nævnt, også væsentligt lavere end gennemsnittet for den samlede danske forskning (se Tabel 7.1)

En del af forklaringen på forskelle i graden af sampublicering med erhvervslivet kan blandt andet bunde i forskelle i TRL-niveauer²⁴ i landenes kvanteforskning. Jo mere anvendelsesorienteret og markedsnært forskningen er, desto højere vil andelen af virksomheder, der deltager i publikationen, typisk være.

²⁴ Technology Readiness Level

8. Bilag

8.1 Besvarelser på spørgeramme med fokus på respondenter vurdering af dansk forskning på kvanteområdet

Tabel 8.1 viser et samlet overblik over de respondenter, der har svaret tilbage på den udsendte spørgeramme, der havde til formål at afdække den generelle vurdering af dansk forskning på kvanteområdet. Der er i alt modtaget 41 besvarelser på denne spørgeramme. Besvarelsene er primært afspejlet i kapitel 3.

Det skal bemærkes, at der er stor forskel på, hvor stor en del af spørgerammen der er udfyldt fra de enkelte respondenter.

Det skal endvidere bemærkes, at nogle universiteter har valgt at indsende en samlet fælles besvarelse på denne spørgeramme, mens andre universiteter har valgt at lade de enkelte institutter indsende deres egen besvarelse af spørgerammen.

Tabel 8.1

Respondenter, der har besvaret spørgeramme med fokus på vurdering af dansk forskning på kvanteområdet

Type	Navn	Afdeling
Universitet	Københavns Universitet	Covernotat fra Forskning og Innovation
Universitet	Københavns Universitet	Datalogisk Institut
Universitet	Københavns Universitet	Institut for Matematiske Fag
Universitet	Københavns Universitet	Kemisk Institut
Universitet	Københavns Universitet	Niels Bohr Institutet
Universitet	Københavns Universitet	Det Sundhedsvidenskabelige Fakultet
Universitet	Københavns Universitet	Det Juridiske Fakultet
Universitet	Aarhus Universitet	Fælles besvarelse fra dekanatet for Natural Sciences og dekanatet for Technical Sciences
Universitet	Danmarks Tekniske Universitet	Direktionen (fællesbesvarelse for DTU samlet)
Universitet	Syddansk Universitet	Institut for Fysik, Kemi og Farmaci
Universitet	Syddansk Universitet	Institut for Matematik og Datalogi
Universitet	Syddansk Universitet	Mads Clausen Instituttet
Universitet	Aalborg Universitet	Institut for Matematiske fag
Universitet	Aalborg Universitet	Institut for Materialer og Produktion
Universitet	Aalborg Universitet	Institut for Elektroniske Systemer
Universitet	IT Universitetet	
Universitet	Copenhagen Business School	Copenhagen Business School (fællesbesvarelse)

GTS	Dansk Fundamental Metrologi – DFM
GTS	Teknologisk Institut
Offentlige fond	Danmarks Frie Forskningsfond-DFF
Offentlige fond	Innovationsfonden
Offentlige fond	Vækstfonden
Private fond	Novo Nordisk Fonden
Private fond	VILLUM FONDEN
Private fond	Poul Due Jensens Fond
Erhvervs-og brancheorganisation	Dansk Industri
Erhvervs-og brancheorganisation	Dansk Erhverv
Erhvervs-og brancheorganisation	IT Branchen
Erhvervs-og brancheorganisation	Lif-Lægemiddelindustriforeningen
Faglig organisation	Dansk Metal
Faglig organisation	IDA
Viden- og erhvervsklyngerne	CenSec
Øvrige organisationer	Danish Quantum Community
Øvrige organisationer	Videnskabernes Selskabs Kvante-komité
Øvrige organisationer	ATV
Øvrige organisationer	DEIC
Øvrige organisationer	DIREC
Ministerier	Erhvervsministeriet
Ministerier	Udenrigsministeriet
Ministerier	Forsvarsministeriet
Ministerier	Sundhedsministeriet

8.2 Besvarelser på spørgeramme med fokus på universiteternes aktiviteter inden for dansk forskning på kvanteområdet

Tabel 8.2 viser et samlet overblik over de universitetsinstitutter, der har svaret tilbage på den udsendte spørgeramme, der havde til formål at afdække universiteternes aktiviteter inden for forskning på kvanteområdet, og som i deres besvarelse angav at have aktiviteter inden for forskning på kvanteområdet. Det drejer sig i alt om 21 universitetsinstitutter. Besvarelserne er primært afspejlet i kapitel 4.

Tabel 8.2

Universitetsinstitutter der har besvaret spørgeramme med fokus på universiteternes aktiviteter inden for dansk forskning på kvanteområdet, og som har angivet at have aktiviteter

Universitet	Institut
Copenhagen Business School	Copenhagen Business School (fællesbesvarelse)
Danmarks Tekniske Universitet	DTU Compute
Danmarks Tekniske Universitet	DTU Energi
Danmarks Tekniske Universitet	DTU Fotonik
Danmarks Tekniske Universitet	DTU Fysik
Danmarks Tekniske Universitet	DTU Kemi
Danmarks Tekniske Universitet	DTU Kemiteknik
Danmarks Tekniske Universitet	DTU Sundhedsteknologi
Københavns Universitet	Institut for Matematiske Fag
Københavns Universitet	Datalogisk Institut - DIKU
Københavns Universitet	Kemisk Institut
Københavns Universitet	Niels Bohr Institutet
Syddansk Universitet	Institut for Fysik, Kemi og Farmaci
Syddansk Universitet	Institut for Matematik og Datalogi - IMADA
Syddansk Universitet	Mads Clausen Institutet
Aalborg Universitet	Institut for Matematiske Fag
Aalborg Universitet	Institut for Elektroniske Systemer
Aarhus Universitet	Institut for Fysik og Astronomi
Aarhus Universitet	Institut for Kemi
Aarhus Universitet	Institut for Matematik
Aarhus Universitet	Interdisciplinary Nanoscience Center (iNANO)

8.3 Besvarelser på spørgeramme med fokus på uddelinger af forskningsmidler til dansk forskning på kvanteområdet

Tabel 8.3 viser et samlet overblik over de offentlige og private fonde, der har besvaret den udsendte spørgeramme der havde til formål at afdække uddelinger af forskningsmidler til dansk forskning på kvanteområdet, og som samtidig har angivet af have uddelt midler til området. Der drejer sig i alt om 7 fonde – heraf 3 offentlige fonde og 4 private fonde. Besvarelserne er primært afspejlet i kapitel 5.

Tabel 8.3

Offentlige råd og fonde der har besvaret spørgeramme med fokus på uddeling af forskningsmidler til forskning på kvanteområdet, og som har angivet at have uddelt midler

Offentlig eller privat fond	Navn
Offentlig fond	Danmarks Grundforskningsfond
Offentlig fond	Danmarks Frie Forskningsfond
Offentlig fond	Innovationsfonden
Privat fond	VILLUM FONDEN
Privat fond	Novo Nordisk Fonden
Privat fond	Carlsbergfondet
Privat fond	Augustinus Fonden

8.4 Søgestreng til den bibliometriske analyse

```
( TITLE-ABS ( ("quantum") W/3 ("technolog*" OR "Comput*" OR "Simulator" OR
"sensing" OR "imaging" OR "cryptography" OR "programming" OR "standard*" OR
"regulation" OR "algorithm" OR "photon*" OR "sensor" OR "software" OR "spin" OR
"processor" OR "simulation" OR "circuit" OR "memory" OR "coding" OR "code" OR
"information" OR "communication" OR "gate" OR "operation" OR "emitter" OR "su-
premac" OR "integration" OR "repeater" OR "nano*" OR "material" OR "internet" ) )
) OR ( TITLE-ABS ( ("quantum") AND ("squeeze*") AND ("light" ) ) ) OR ( TITLE-ABS
( ("quantum") AND ("superposition" OR "entropy" OR "many-body" OR "few-body"
OR "error correction" OR "qubit" OR "qutrit" OR "qudit" OR "fault-toleran*" OR "Me-
trology" OR "super conduc*" OR "tensor network" OR "entanglement" OR "bell ine-
qualit*" OR "discrete variable" OR "continous variable" OR "cavity electrodynamic"
OR "cooperative phenomen*" OR "strong coupling" OR "subradiance" OR "superradi-
ance" OR "spin model" OR "single-photon source" ) ) ) OR ( TITLE-ABS ( ("quantum")
AND ("comput*" OR "solar cell" OR "photovoltaic") AND ("nanophon*" OR "devise"
OR "plasmon*" OR "ion trap*" OR "dot" ) ) ) OR ( TITLE-ABS ( ("bose-einstein con-
densation") OR ("quantum-safe cryptography") OR (" post-quantum cryptography"
) ) ) OR ( AUTHKEY ( (" quantum") W/3 ("technolog*" OR "Comput*" OR "Simulator"
OR "sensing" OR "imaging" OR "cryptography" OR "programming" OR "standard*"
OR "regulation" OR "algorithm" OR "photon*" OR "sensor" OR "software" OR "spin"
OR "processor" OR "simulation" OR "circuit" OR "memory" OR "coding" OR "code"
OR "information" OR "communication" OR "gate" OR "operation" OR "emitter" OR
"supremacy" OR "integration" OR "repeater" OR "nano*" OR "material" OR "internet"
) ) ) OR ( AUTHKEY ( ("quantum") AND ("squeeze*") AND ("light" ) ) ) OR ( AUTHKEY
( ("quantum") AND ("superposition" OR "entropy" OR "many-body" OR "few-body"
OR "error correction" OR "qubit" OR "qutrit" OR "qudit" OR "fault-toleran*" OR "Me-
trology" OR "super conduc*" OR "tensor network" OR "entanglement" OR "bell ine-
qualit*" OR "discrete variable" OR "continous variable" OR "cavity electrodynamic"
OR "cooperative phenomen*" OR "strong coupling" OR "subradiance" OR "superradi-
ance" OR "spin model" OR "single-photon source" ) ) ) OR ( AUTHKEY ( ("quantum")
AND ("comput*" OR "solar cell" OR "photovoltaic") AND ("nanophon*" OR "devise"
OR "plasmon*" OR "ion trap*" OR "dot" ) ) ) OR ( AUTHKEY ( ("bose-einstein conden-
sation") OR ("quantum-safe cryptography") OR ("post-quantum cryptography" ) ) )
AND NOT ( TITLE-ABS ( ("quantum Field Theory" OR "High Energy Physics and Cos-
mology" OR "Flourescence Quantum" ) ) ) AND NOT ( AUTHKEY ( ("quantum Field
Theory" OR "High Energy Physics and Cosmology" OR "Flourescence Quantum" ) ) )
AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE , "ar" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE , "cp" ) OR LIMIT-TO (
DOCTYPE , "re" ) ) AND ( LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2020 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR ,
2019 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2018 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2017 ) OR LIMIT-
TO ( PUBYEAR , 2016 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2015 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR ,
2014 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2013 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2012 ) OR LIMIT-
TO TO ( PUBYEAR , 2011 ) )
```