



**TEKNOLOGISK
INSTITUT**

KVANTETEKNOLOGI I DANMARK

Fremtiden er kvanteteknologi
– hvordan kommer Danmark med?

**TEKNOLOGISK
UDSYN**

Nr. 2 · December 2023

Teknologisk Udsyn giver en oversigt over den seneste udvikling på et teknologifelt med betydning for Danmarks fremtid. Vi giver et indblik i aktørlandskaber og fremtidige tendenser, Danmarks aktuelle position samt anbefalinger til samfundets implementering. Teknologisk Udsyn udgives fire gange om året.

Udarbejdet af
Teknologisk Institut
Gregersensvej 1
2630 Taastrup

Teknologisk Udsyn Nr. 2 · December 2023
Forfattere: Stig Yding Sørensen, Leif Henrik Jakobsen,
Kristian Kriegbaum Jensen, Emil Højbjerg Thomsen,
Nikoline Olesen, Teknologisk Institut.

ISSN 2794-6320



KVANTETEKNOLOGI HAR UDVIKLET SIG TIL ET CENTRALT FORSKNINGSFELT

Indhold

Executive summary	4
Introduktion til kvanteteknologi: Kommunikation, sensorer og computing	9
Internationalt udsyn for kvanteteknologi.	13
Science	13
Teknologi	20
Marked	28
Dansk Indblik: Kvanteteknologi i Danmark	40
Bibliografi	51
Tre hovedpointer.	55

EXECUTIVE SUMMARY

Kvanteteknologi i Danmark

Fremtiden er kvanteteknologi – hvordan kommer Danmark med?

Kvanteteknologi bliver i stigende grad sat på dagsordenen verden over. Det er en teknologi med betydning for Danmarks fremtid. Derfor har Teknologisk Institut i dette Teknologiske Udsyn taget pulsen på, hvad der sker, og hvad der vil ske med kvanteteknologien i vores globale omverden. Vi har kortlagt den forskningsmæssige interesse, den teknologiske udvikling og den kommercielle udvikling internationalt og nationalt. Danmark er godt med, når det gælder forskning, men den helt store værdi i kvanteteknologien ligger hos de virksomheder, som forstår at udnytte mulighederne. Derfor er det nødvendigt med en væsentlig indsats for at give danske virksomheder muligheder for at kende teknologien og allerede nu forberede sig på en ny kvanteteknologisk virkelighed.

Kvanteteknologi har de seneste 5-10 år udviklet sig til et helt centralt forskningsområde med stor aktivitet i USA, Asien og Europa. Det er imidlertid ikke en ny teknologi. Første generations kvanteteknologi omfatter bl.a. transistorer og laseren, der blev opfundet for 50-75 år siden. Rapporten her handler om anden generations kvanteteknologier, som i de kommende år forventes at åbne op for en ny og anderledes verden. Betegnelsen anden generations kvanteteknologi dækker over udnyttelsen af fænomener som superposition og entanglement, som for mange år siden blev beskrevet teoretisk, men som man først er blevet i stand til at udnytte i de seneste 10-15 år.

Dansk forskning i verdensklasse

Teknologisk Instituts bibliometriske analyser af verdens forskningsaktivitet viser, at antallet af forskningspublikationer i kvanteteknologi er sti-

gende, og fortsætter udviklingen frem mod 2030, vil aktiviteten sandsynligvis blive fordoblet, hvis ikke firedoblet. Mere end 500 forskningsinstitutioner verden over er involveret i udvikling af kvanteteknologi. Dansk forskning klarer sig godt internationalt, når vi tager højde for Danmarks størrelse, godt hjulpet af både offentlige og private aktører. Danmark rangerer som nr. 3 globalt målt på artikler om kvanteteknologi per capita. I takt med teknologiens udvikling vil den internationale interesse stige, så Danmark skal fortsætte med at investere kraftigt, hvis den danske forskning skal bevare sin internationale førerposition.

USA i front på teknologiudvikling

Den teknologiske udvikling omsættes ofte i patenter, hvilket betyder, at udviklingen i patenter er en god indikator for både innovation og for interessen i kommercialisering af teknologien. Analysen af kvanteteknologi er gennemført med tech-mining af internationale patentdatabaser. Analysen viser en stigning i antallet af ansøgte patenter, som på 20 år er 10-15 dobbelt. En lineær fremskrivning viser, at der kan blive udtaget godt 5.000 patenter vedrørende kvanteteknologi i 2025, men udviklingen kan meget vel vise sig at være eksponentiel med de mange investeringer, vi kan se, der finder sted. Investeringer og innovationsaktiviteter er koncentreret omkring Kina, USA og Europa, samt i mindre grad i Indien, Israel, Singapore og Australien. Der er kun få patenter udtaget i Danmark, men måler man pr. indbygger, så er de danske patenter lige akkurat synlige i international sammenhæng.

	Status	Forslag til næste skridt
3	Science Dansk forskning på tredjepladsen målt pr. capita i OECD	Stærkere involvering af brugervirksomheder
14	Teknologi Dansk patentering som nummer 14 målt pr. capita i OECD	Adgang til rådgivning, test og demonstration
6	Marked Danske kvanteinvesteringer på sjettepladsen målt pr. capita i OECD	Udvikling af den kompetencemæssige base

Stater og private investorer

Danmark investerer i kvanteteknologi, og målt i kroner pr. indbygger ligger statens strategiske investeringer på en global sjette plads. Men landene er vanskeligere at sammenligne på de samlede investeringer, fordi også private investorer, virksomheder, private fonde og andre offentlige puljer investerer i kvanteteknologi. I Danmark understøttes kvanteteknologi også af offentlige puljer som Innovationsfonden og Grundforskningsfonden og i høj grad af private fonde, heraf Novo Nordisk Fonden med en investering på 1,5 mia. danske kroner. Fra 2017 og frem er der samlet gennemført og planlagt investeringer i kvanteteknologi på 3,9 mia. kroner.

Analysen af det internationale marked er udført ved at kombinere databaser over virksomheder og patentdata. På denne måde har Teknologisk Institut identificeret næsten 1.200 virksomheder verden over, som arbejder med kvanteteknologi. Der er en overvægt af meget store virksomheder, og i front ligger globale giganter som IBM, Google, Amazon, Huawei og Baidu. I Danmark er der omkring to

håndfulde virksomheder, som primært udspringer af universitetsmiljøet. De vækstperspektiver, der knytter sig til kvanteteknologien, er ganske fantastiske, selvom markedsanalytikerne langt fra er enige om de konkrete vækstrater.

Slutbrugerne vinder til sidst

Den største værdi af kvanteteknologien forventes på sigt at ligge hos slutbrugerne i både det offentlige og det private. "På sigt" vil formentlig sige fra omkring 2035-2045. Et tegn på at markedet stadig er under udvikling, er, at det primært er aktører inden for teknologiudvikling, dvs. forskning og udvikling af software og hardware, der er aktive. Der er langt færre virksomheder, der rent faktisk udnytter teknologien som slutbrugere.

Kommerialisering af kvanteteknologi ligger i overvejende grad hos globale aktører, så en stor del af teknologileverandørerne vil være udenlandske, primært amerikanske og kinesiske,¹ selvom danske 'startups' og virksomheder kan gøre sig gældende på specialiserede områder. En væsentlig indsigt fra

¹ Med den seneste udvikling i forholdet mellem Kina og USA er protektionismen af økonomiske og sikkerhedsmæssige grunde stigende, og af den grund er det ikke sandsynligt, at Kina bliver storleverandør af kvanteteknologi til vesten foreløbig.

analysen er, at ca. 80 % af værditilvæksten på sigt vil forekomme hos virksomheder, som bruger kvanteteknologi i deres forretning (slutbrugere), mens ca. 20 % vil ligge hos teknologileverandørerne.

National strategi med blik for slutbrugere

I den nationale strategi for kvanteteknologi (Regeringen, 2023) er det primære fokus på forskning og innovation (del 1) og sekundært på at kommercialisere kvanteteknologi (del 2). Ved hjælp af 'use cases' og demonstrationsprojekter skal afstanden mellem de virksomheder, der udbyder nye kvanteteknologiske løsninger, og virksomheder, som kan opnå gevinster ved at tage løsningerne i brug, gøres kortere.

Forskningen spiller selvfølgelig den primære rolle i udvikling af kvanteteknologien, men der er også god grund til en tidlig involvering af slutbrugere (private og offentlige virksomheder) og rådgivere i processen, så flest mulige anvendelser bliver identificeret tidligst muligt og det største markedspotentiale kan realiseres.

I den nationale strategi for kvanteteknologi er der flere aktiviteter, der understøtter dette (Regeringen, 2023), fx initiativet om at aktivere de danske styrkepositioner. Initiativet lægger op til, at virksomhederne (slutbrugere) gennem demonstrationsprojekter og 'use cases' skal få øget kendskab til kvanteteknologiens anvendelsesmuligheder.

Behov for stærk, vidensbaseret infrastruktur

Indsatsen overfor virksomhederne kan potentielt styrkes væsentligt, så en langt bredere kreds af slutbrugere bliver aktiveret. Men det er ikke let at få engageret slutbrugere, da de reelle fordele ved at anvende de tilgængelige NISQ kvantecomputere er meget begrænsede, og fordelene for de fleste virksomheder ligger flere år ude i fremtiden. Her kan såkaldt 'quantum inspired computing' med fordel bringes i spil, et område hvor der allerede findes en række danske leverandører med et højt internationalt niveau.

Når den primære samfundsmæssige værdi af kvanteteknologien på sigt ligger hos slutbrugere, så er det vigtigt at give virksomheder og offentlige institutioner langt bedre betingelser for at kunne få adgang til kvanteteknologien. Et tæt samarbejde med slutbrugere vil kunne bidrage til at identificere hvilke anvendelser, der har størst kommercielt potentiale. Der skal med andre ord anvendes en kombination af 'technology push' og 'market pull' – for at optimere kvanteteknologiens værdiskabelse.

De sektorer der kan få gavn af kvanteteknologien, fx virksomheder inden for bioteknologi, farma, materialeteknologi, fødevarer og landbrug, forsikring og finans, bør allerede nu begynde at undersøge mulighederne og forberede sig på, hvordan kvanteteknologi kan forbedre deres forretning. Det har de færreste virksomheder mulighed for på egen hånd, og slet ikke SMV-segmentet, da teknologien er ny, og kompetencebasen endnu er meget snæver.

Hvis en bredere kreds af danske virksomheder hurtigt skal bringes i stand til at udnytte de nye muligheder, kræver det et nært samarbejde mellem teknologirådgivere og/eller leverandører på den ene side og virksomhederne på den anden. Mellemløbet mellem forskning og slutbrugere er i dag ikke stærkt udviklet inden for dette felt, så et oplagt indsatsområde er at opbygge en stærk vidensbaseret infrastruktur, som på den ene side har kompetence til at forstå og anvende teknologien i praksis, og på den anden side er tæt på virksomhederne og deres behov.

I innovationspolitisk sammenhæng kan denne tilgang udfoldes ved, at enkelte virksomheder eller grupper af forskere og slutbrugere inden for danske styrkepositioner får i opdrag at udvikle kvanteteknologi frem mod kommerciel nyttiggørelse, så langt det er muligt inden for en præ-kompetitiv ramme. Sådanne udviklingsprojekter skal have adgang til såvel teknisk som kommerciel rådgivning, bl.a. ved at kunne trække på innovations- og teknologicentre samt forskere. Det vil være af afgørende værdi

at inddrage internationale erfaringer, da udvikling inden for kvanteteknologi foregår globalt. Kompetenceudvikling og efteruddannelse er af vital betydning for både mellemløbet af rådgivere og for slutbrugerne. Derfor bør efter- og videreuddannelses tilbud gøres tilgængelige.

På baggrund af analysen foreslås det at styrke den nationale indsats for kvanteteknologi yderligere, når det gælder tidlig udnyttelse af de teknologiske muligheder. Udnyttelsen af kvanteteknologi hos slutbrugervirksomheder er stadig nogle år ude i fremtiden, men allerede nu kan forberedelserne indledes, så overgangen fra forskning til udnyttelse forstærkes:

- **Stærkere involvering af brugervirksomheder** i en lang række sektorer, hvor involveringen i første omgang består i, at virksomhederne i højere grad får mulighed for at undersøge mulige anvendelser af kvanteteknologi, herunder en begyndende forberedelse af fx algoritmer, test og demonstration.

- **Adgang til rådgivning, test og demonstration af kvanteteknologi.** Det er nødvendigt, at virksomheder har adgang til en innovationsinfrastruktur med en forståelse for både den teknologiske udvikling og virksomhedernes praktiske, forretningsmæssige virkelighed. Desuden at de har mulighed for at teste de nye kvanteløsninger. Det kræver opbygning af infrastrukturen.

- **Udvikling af den kompetencemæssige base gennem uddannelse og efteruddannelse** således at kvanteteknologisk viden og kompetencer til at udnytte teknologien ikke kun er forankret i forskning, men også i den videnskabelige infrastruktur, herunder testfaciliteter, der er tæt på virksomhederne, samt naturligvis i virksomhederne selv.

Så kort og godt. Det er af vital betydning med en langt større involvering og aktivering af dansk erhvervslivs innovationskraft, især inden for Danmarks erhvervsmæssige styrkepositioner.

Kvanteteknologi kort fortalt

Kvanteteknologi bruger kvantemekanikkens love til at forbedre områder som telekommunikation, sundhedsvæsenet og finansielle tjenester. Teknologien kan opdeles i kvantesensorer, kvantekommunikation og kvantecomputing.

Kvantesensorer er meget nøjagtige og kan registrere små ændringer i fx tid, temperatur eller tyngdekraft. De kan bruges til fx navigation uden GPS, medicinsk billedannelse eller til varsler om jordskælv. De første kvantesensorer er allerede på markedet.

Kvantekommunikation overfører information på en sikker måde, der gør det meget svært

for andre at aflytte eller få adgang til den. Det testes i dag, og kommerciel udnyttelse forventes inden for 5-10 år.

Kvantecomputing gør det muligt at løse problemer, som almindelige computere ikke kan løse. Det kan hjælpe med at udvikle fx nye materialer eller ny medicin. Første generation af kvantecomputere er tilgængelige i dag, men der er stadig meget forskning, der skal udføres. Der kan gå 10-20 år før kvantecomputere løser problemer, som ikke kan løses med traditionelle computere.

“

REVOLUTION AF MANGE DISCIPLINER

INTRODUKTION TIL KVANTETEKNOLOGI: KOMMUNIKATION, SENSORER OG COMPUTING

Kvanteteknologi anvender fundamentale principper i kvantemekanik til at løse problemer og skabe nye muligheder inden for kommunikation, måling og beregning. Anden generations kvanteteknologi benytter sig af mekanismer som superposition og entanglement.²

Samlet set står kvanteteknologi til at revolutionere en række discipliner og industrier, fra telekommunikation til sundhedsvæsenet og endda til finansielle tjenester. Der er dog stadig udfordringer, der skal overkommes, inden vi får det fulde udbytte af kvanteteknologien.

Kvanteteknologien er også et vigtigt element i den geopolitiske magtbalance, især mellem supermagter som USA og Kina. Mens USA har investeret betydeligt i forskning og udvikling gennem initiativer som National Quantum Initiative Act (US Gov, 2023), har Kina også investeret massivt i kvanteteknologier som en del af deres langsigtede strategiske planer. EU har ligeledes lagt vægt på kvanteteknologi i sin Horizon 2020-plan, hvilket afspejler den globale anerkendelse af teknologiens potentiale (European Commission, u.d.).

Kvanteteknologi består som sagt af tre hovedområder: kvantekommunikation, kvantesensorer og kvantecomputing.

Kvantekommunikation udnytter kvantemekaniske principper til at sende og modtage information med hidtil uset sikkerhed. Grundlæggende kvantemekaniske fænomener som superposition og entanglement bruges til at implementere såkaldte kvantekrypteringsprotokoller. Disse metoder giver en teoretisk uovertruffen sikkerhed, der muliggør detektering af enhver form for uautoriseret adgang, fx aflytning af kommunikationskanalen. Der er allerede kommercielle produkter på markedet fra fx Toshiba og ID Quantique, men deres relativt høje pris gør, at udbredelsen på nuværende tidspunkt er begrænset. Der arbejdes allerede nu på næste generations produkter til en væsentlig lavere pris.

² Entanglement er det engelske ord for sammenfiltring, som betyder, at partikler kan være i en fælles kvantetilstand uanset afstanden imellem dem. Ændringer i den ene partikel vil øjeblikkeligt påvirke den anden uanset afstanden.

Sikkerheden i kommunikationsinfrastrukturen er af afgørende betydning for en lang række sektorer, herunder forsvar, finans og sundhedssektoren og ikke mindst styring af forsyningsnet for el, vand, olie og gas.

I Kina er der for eksempel allerede igangsat større projekter med såvel et fiberlink mellem Beijing og Shanghai som et satellitlink, der anvender Micius-satellitten (Kwon, 2023), med det formål at implementere sikker kvantekommunikation over store afstande. EU har i 2019 igangsat det såkaldte EuroQCI-projekt, der sigter på at etablere et kvantekommunikationsnet mellem hovedstæderne i EU-landene.

Kvantesensorer anvender kvantetilstande til at måle fysiske variable med en nøjagtighed, der er utænkelig med klassiske sensorer. De er i stand til at detektere minimale ændringer i fysiske størrelser som fx tid, temperatur og tyngdekraft.

De første kvantesensorer er allerede på markedet. Det franske firma uQuans har udviklet en gravitationssensor, der bl.a. anvendes til at varsle kommende vulkanudbrud. Sensoren er baseret på laserkølede atomer. En lignende sensor fra det engelske firma M-squared anvendes til at detektere hulrum under jorden, fx i forbindelse med byggeprojekter. Det ligeledes engelske firma Cerca Magnetics har udviklet en hjernescanner baseret på optisk pumpede magnetometre, der er i stand til at måle patienternes hjerneaktivitet ved stuetemperatur, uden at de behøver at være bundet til en stor traditionel hjernescanner baseret på SQUIDs kølet med flydende helium. Danske NKT Photonics (NKT Photonics, u.d.) er en førende dansk leverandør af fiberlasere, der indgår i en række kvantesensorer.

I Danmark udføres et forskningsprojekt, hvor det undersøges, om optisk pumpede magnetometre kan forbedre MR-scanneres nøjagtighed, hvilket vil gøre det lettere at diagnosticere sygdomme tidligt. Bosch arbejder på at udvikle sensorer, der måler det

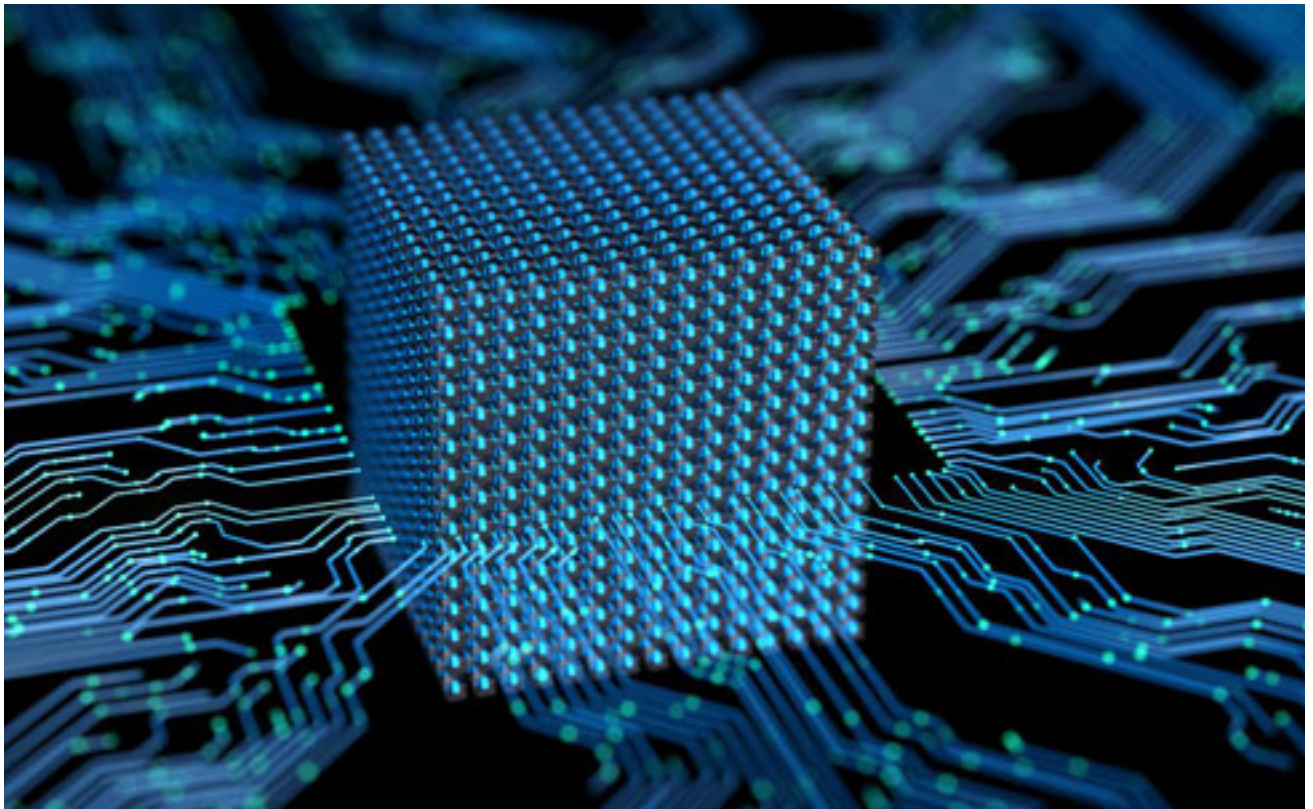
magnetiske felt omkring hjertet, og som kan levere langt bedre data end traditionel EKG (Bosch, 2023). Desuden har forskningscentret QuTech i Nederlandene gjort betydelige fremskridt inden for udvikling af kvantesensorer til anvendelse i miljøovervågning fra satellitter (QuTech, 2019).

Både USA og Kina har identificeret kvantesensorer som strategisk teknologi med såvel civile som militære anvendelser i deres respektive forskningsprogrammer. I EU er kvantesensorforskning en del af det stort anlagte Quantum Flagship-program.

Kvantecomputere har potentiale til at ændre hele landskabet for computerteknologi i de kommende 10 til 20 år. Kvantecomputere adskiller sig markant fra klassiske computere, som vi kender dem i dag. Mens klassiske computere bruger "bits" til at lagre og behandle information (hver bit kan være enten 0 eller 1), anvender kvantecomputere "qubits." En qubit, i modsætning til en bit, kan være i en tilstand, der er en superposition af både 0 og 1. Ordet "superposition" er evnen til, for en kvantepartikel (eller i dette tilfælde, en qubit), at befinde sig i flere tilstande på én gang. Det betyder, at en qubit kan repræsentere flere muligheder samtidigt, hvilket tillader kvantecomputere at udføre mange beregninger parallelt.

Kvantecomputere har potentiale til at udføre beregninger, som ingen klassisk computer vil kunne udføre i praksis. På nuværende tidspunkt er kvantecomputeren stadig i den eksperimentelle fase. Eksisterende kvantecomputere har udfordringer med såvel levetiden af de enkelte qubits som med at opnå et tilstrækkeligt antal af qubits. Men forskning og udvikling skrider hastigt frem, både ved universiteterne og i industrien, og der rapporteres løbende om forbedringer i såvel antal af qubits som levetid.

Da en kvantecomputer fungerer helt anderledes end en traditionel computer, kan algoritmer og software til traditionelle computere ikke umiddelbart anvendes på en kvantecomputer. Kvantecomputeren



anvender i stedet såkaldte kvantealgoritmer. Der findes i dag kvantealgoritmer, der er velegnede til at løse visse problemer, fx at opløse et stort tal i primfaktorer eller at udføre visse optimeringsopgaver. Disse opgaver løser kvantecomputeren til gengæld så hurtigt, at det vil give mulighed for at udføre beregninger, der ikke kan gennemføres på traditionelle computere.

Kvantecomputere kommer ikke til at afløse de computersystemer vi kender, men vil udgøre en væsentlig udvidelse af mulighederne for at gennemføre visse komplekse beregninger. Kvantecomputere forventes at skulle fungere som en slags "co-processor" for en traditionel supercomputer (HPC).

Kvantecomputere der kan udføre opgaver, som ikke kan løses med traditionelle computere, forventes at blive tilgængelige inden for 10-20 år. Der er dog stadig udfordringer på grundforskningsniveau, der skal løses, før vi når hertil, fx udvikling af en fejltolerant kvantecomputer med tilstrækkelig mange qubits.³

I dag findes der allerede kvantecomputere med omkring 100 qubits, som kan tilgås fra 'skyen' – fx IBM's NISQ-computere. Disse NISQ-computere kan bestemt anvendes til at træne brugerne i quantum computing, men det debatteres stadig, om det er muligt at få en NISQ-computer til at løse opgaver, der ikke kan løses med en traditionel computer.

En forløber for den egentlige kvantecomputer er den såkaldte kvantesimulator. Ved kvantesimulering kan man ved hjælp af et kontrollérbart og observerbart kvantesystem (fx et optisk kredsløb) simulere et andet kvantesystem (fx et nyt materiale). Kvantesimulering kan opfattes som en form for dedikeret analog kvantecomputer, designet så den kan simulere ét bestemt problem. Denne form for simulering er specielt interessant ift. problemer, der i deres natur er kvantemekaniske, fx kemiske reaktioner. Simple kvantesimulatorer forventes at blive tilgængelige om få år.

³ En fejlkorrigeret (error corrected) kvantecomputer handler om, at levetiden af den enkelte qubit er meget kort, fx 200 us. Derfor er der grænser for, hvor mange beregninger computeren kan gennemføre inden for qubitens levetid. For at håndtere dette problem er der udviklet en række metoder til fejlkorrektion. Pt. anvender man af størrelsesordenen 1000 fysiske qubits til at lave en logisk qubit, der kan bruges i en større beregning. Desuden handler skalering af kvantecomputeren om at skabe et langt større antal fysiske qubits, fx 1 mio. for at kunne gennemføre beregninger med praktisk relevans. I 2023 forventer IBM at realisere en kvantecomputer med ca. 1000 fysiske qubits, så der er et stykke vej igen.

“

GLOBALE VIRKSOM- HEDER DRIVER UDVIKLINGEN

INTERNATIONALT UDSYN FOR KVANTETEKNOLOGI

Kvanteteknologien trækker interesse over hele verden. I dette internationale udsyn sætter vi fokus på udviklingen inden for science, teknologi og marked – og vi sætter udviklingen i Danmark i et internationalt perspektiv.

Analyserne illustrerer, at forskningen overalt buldrer derudaf, og at danske forskere, indtil videre i forhold til Danmarks størrelse, har markeret sig stærkt. Danske virksomheder er mindre synlige, når det gælder kommercialisering af teknologien gennem patenter, og analysen af markedet viser da også, at det primært er store globale teknologivirksomheder, som driver udviklingen. Det udelukker ikke danske teknologileverandører, som stadig kan

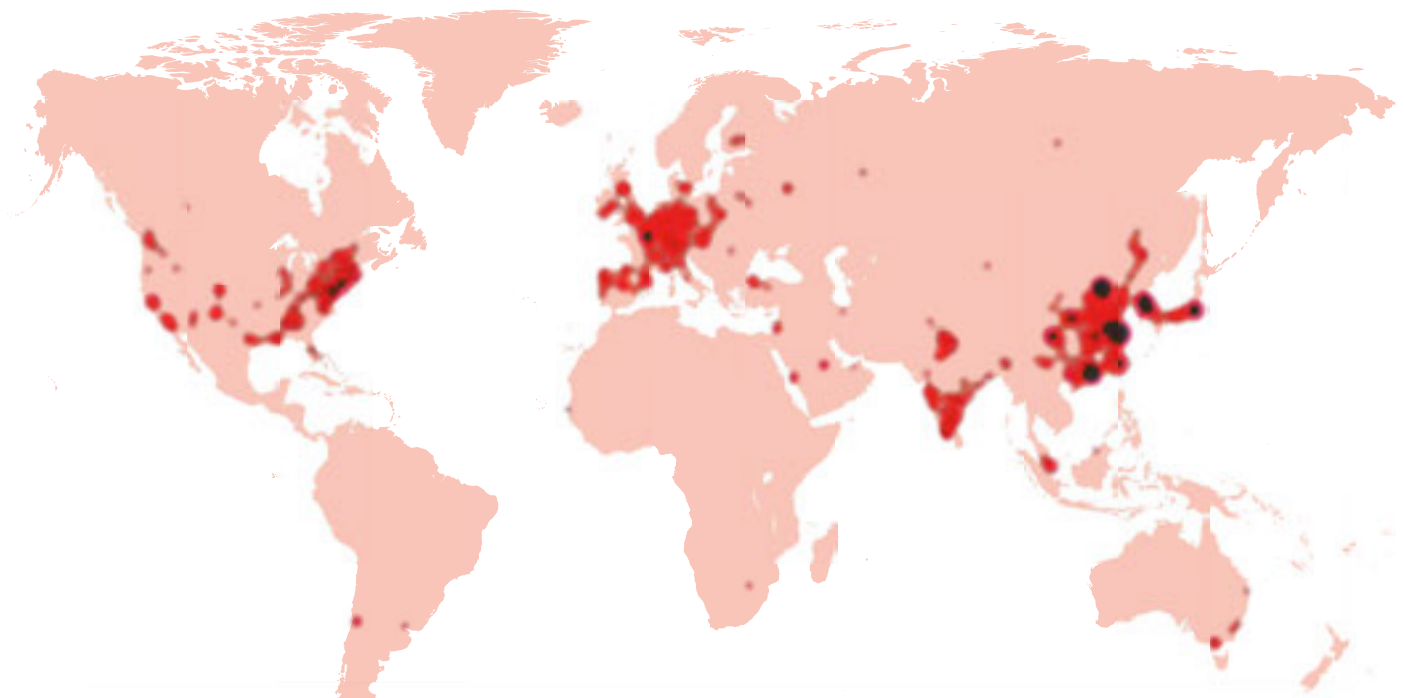
gøre sig gældende på specialiserede områder. Som i resten af verden er leverandørerne først nu ved at komme i gang, fordi kvanteteknologi slet ikke er en moden teknologi endnu, og tilsvarende er markedet heller ikke modent. Den primære værdi af kvanteteknologien ligger hverken hos forskningen eller teknologileverandørerne – runde estimater viser, at 80 % af værdien vil ligge hos slutbrugerne.

Science

Den forskningsmæssige interesse i kvanteteknologi spredt sig over hele verden. Intensiteten af forskning i kvanteteknologi ved universiteter og forskningsinstitutter kan måles på mængden af patentansøgninger og udtagne patenter. En analyse af patenterne viser, at 565 vidensinstitutioner har ansøgt eller udtaget patenter om kvanteteknologi siden år 2000. Fordelingen viser stor aktivitet i primært Kina, Korea og Japan, USA, Europa, Indien samt mindre områder i Australien, Asien, Tyrkiet, Israel og de arabiske lande.



565 VIDENSINSTITUTIONER FORSKER I KVANTETEKNOLOGI



Kilder: Teknologisk Institut på beregninger af udtræk fra Patsnap. Note: Der er i alt identificeret 565 vidensinstitutioner som arbejder med kvanteteknologi. Vidensinstitutionerne er identificeret ved hjælp af Patsnap, så det er vidensinstitutioner, der har ansøgt eller patenteret kvanteteknologi siden år 2000. Farvekoderne læses som et varmekort, der illustrerer koncentrationen. Sort indikerer en høj koncentration, rød en lavere.

Kvanteteknologi er blevet et vigtigt område inden for videnskabelig forskning. Det vidner data om udgivelser af videnskabelig forskning inden for området om. Også på globalt plan er antallet af årlige forskningspublikationer om emnet således steget markant de senere år.⁴ I analyserne er det ikke muligt at skelne mellem første og anden generations kvanteteknologi, men det er en rimelig antagelse, at en stor og stigende andel af de forskningsartikler, der er udgivet siden år 2000, vedrører anden generations kvanteteknologi.

Danmarks kvanteteknologiske forskning er internationalt anerkendt, og den har i de seneste år

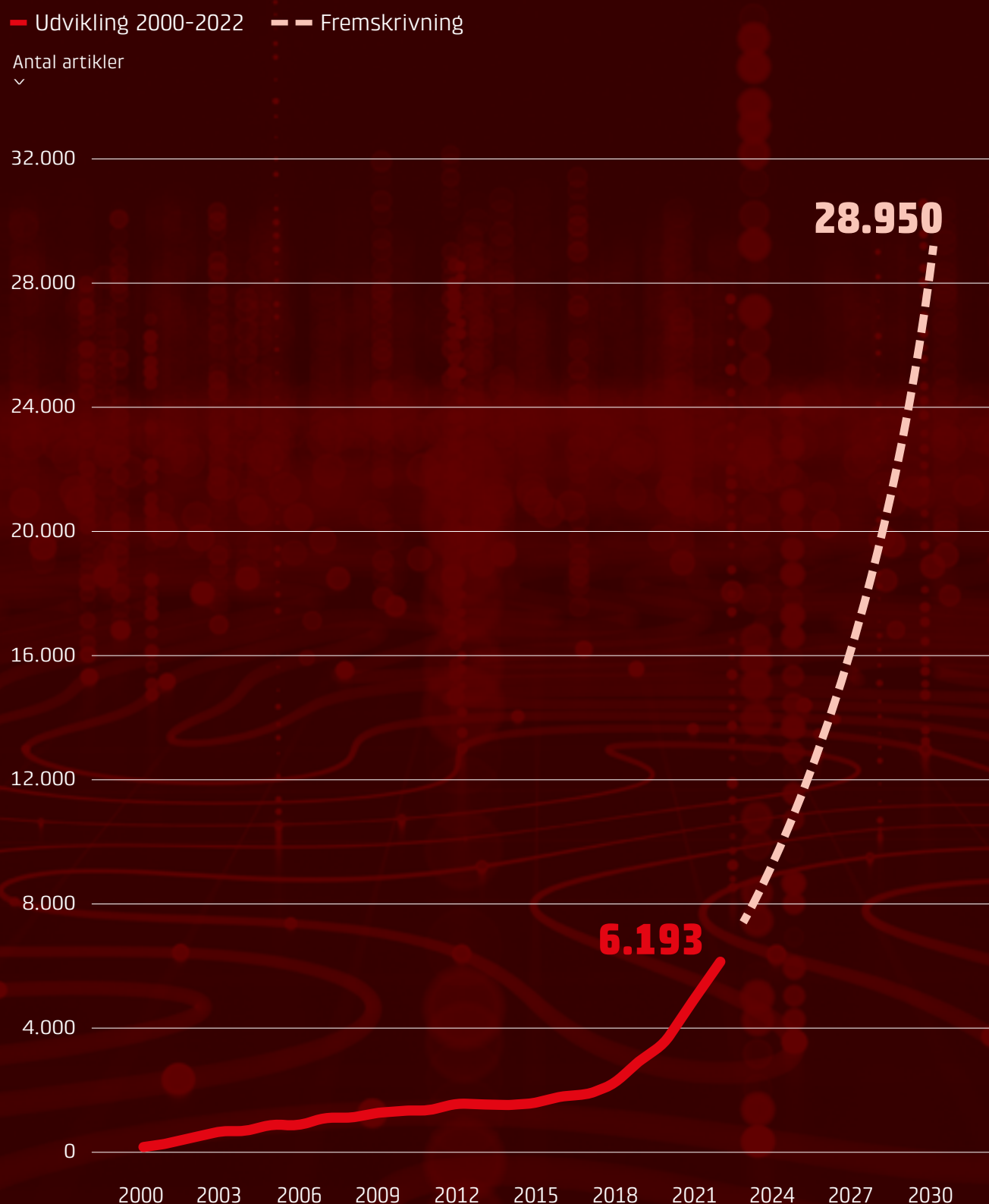
modtaget betydelig støtte fra både offentlige og private sektorer (Uddannelses- og Forskningsstyrelsen, 2022).

Selvom ingen kender fremtiden, kan fremskrivninger give os et bud på, hvordan udviklingen inden for området kan komme til at se ud de kommende år. Udviklingen de senere år antyder en eksponentiel udvikling i antallet af forskningsartikler. Figuren viser en eksponentiel fremskrivning baseret på den forudgående udvikling i antallet af forskningspublikationer relateret til kvanteteknologi. Globalt viser fremskrivningen en stigning fra 6.193 i 2022 til 28.950 i 2030 – svarende til en forventning om

⁴ Rapporten fra Uddannelses- og Forskningsstyrelsen (2022) viser nogle af de samme bibliometriske analyser og er begge baseret på data fra Scopus. Data i denne rapport er udarbejdet uafhængigt af rapporten fra Uddannelses- og Forskningsstyrelsen (2022), og er udregnet med de nyeste tal fra september 2023. Det er også vigtigt at pointere, at der er brugt forskellige søgestrengte, hvilket betyder, at givne resultater i samme periode ikke vil give nøjagtigt det samme. En sammenligning mellem de to analyser stemmer dog generelt overens, fx placerer begge rapporter Schweiz som nr. 1 i publikationsvolumen pr. indbygger.

ANTAL FORSKNINGSARTIKLER OM Kvanteteknologi 2000-2030

Den forskningsmæssige interesse for kvantecomputere er eksploderet – og trenden indikerer, at interessen vil fortsætte



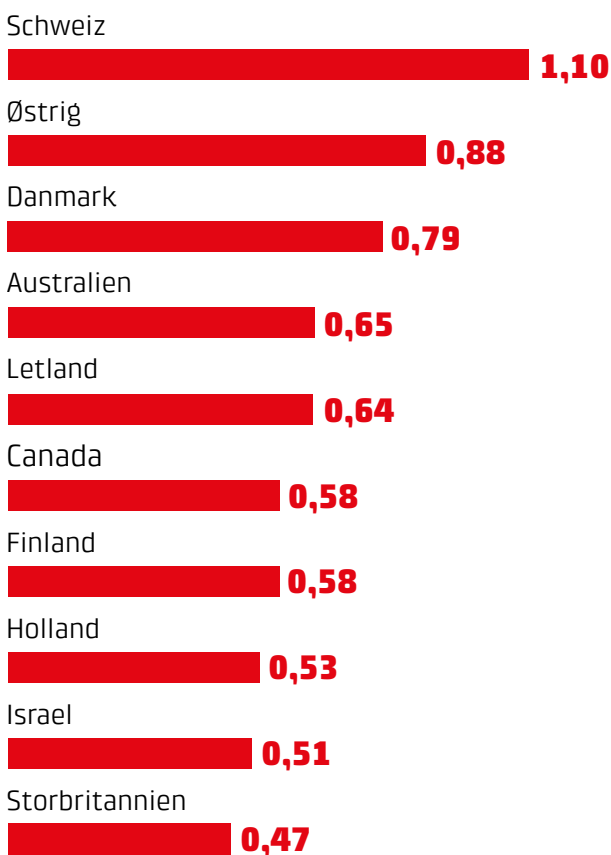
Note: Tal fra 2023 og frem er estimeret eksponentiel fremskrivning.
Kilde: Teknologisk Institut på baggrund af data fra Scopus.

3-4 gange så meget forskningsaktivitet om blot få år. En lineær fremskrivning ville slutte på omkring 13.000 forskningsartikler, hvilket er lidt mere end en fordobling.

Siden 2017 har væksten under alle omstændigheder været kraftig, og den kan forventes at forsætte i højt gear i de kommende år. Et studie fra RAND Corporation for Novo Nordisk Fonden konkluderede

FORSKNINGSARTIKLER PR. 10.000 INDBYGGERE

Danmark er blandt de førende forskningsnationer inden for kvanteteknologi set i forhold til indbyggertallet.



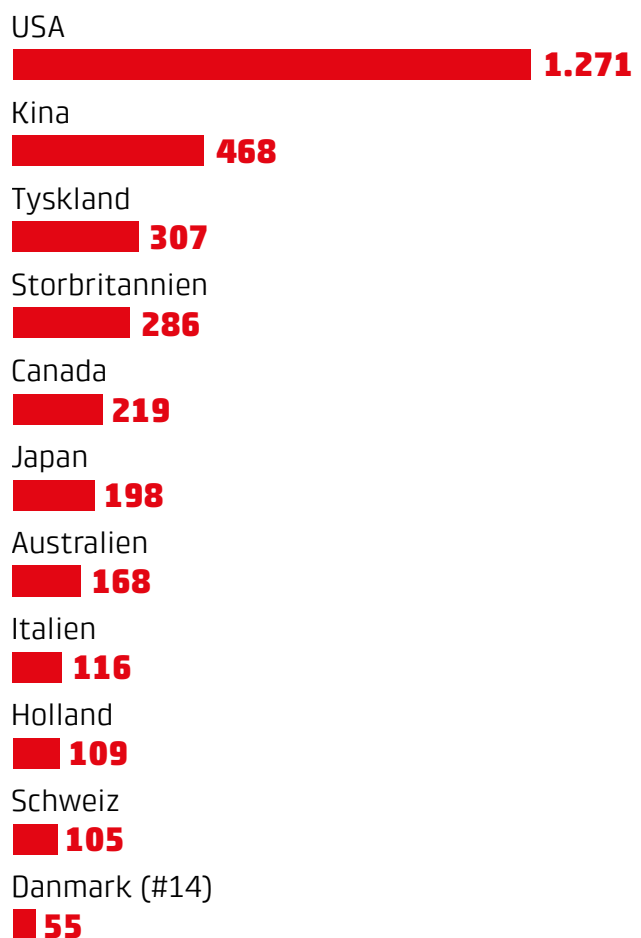
Note: Opgørelse over de 10 OECD-lande med det største antal forskningsartikler pr. 10.000 indbyggere.
Kilde: Teknologisk Institut på baggrund af data for forskningsartikler fra år 2000-2023 fra Scopus.

tilsvarende i 2022, at væksten i forskningsaktivitet verden over har været dramatisk i de senere år (Salil Gunashekar, 2022).

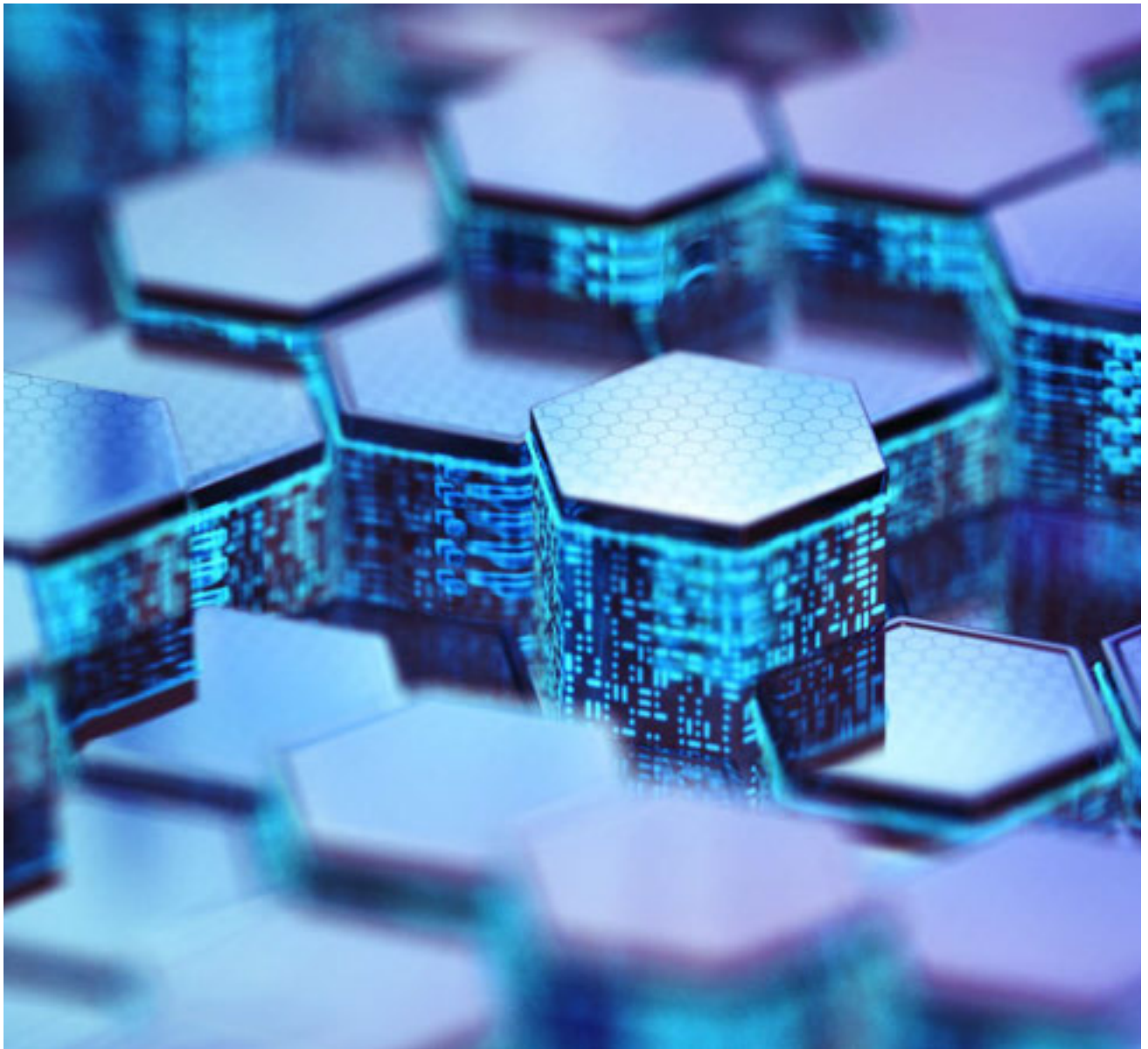
Ser man på Danmark i global kontekst, rangerer Danmark som nr. 3 i forhold til antallet af forskningsartikler publiceret per capita inden for kvanteteknologi. Dette er en vigtig indikator for Danmarks

FORDELING AF DE 10 % MEST CITEREDE FORSKNINGSARTIKLER

Den mest citerede forskning inden for kvantecomputere kommer fra USA. Dansk forskning er nummer 14.



Note: Opgørelse af hvilke lande, de 10 pct. mest citerede forskningsartikler stammer fra.
Kilde: Teknologisk Institut på baggrund af data for forskningsartikler fra år 2000 - 2023 fra Scopus.



engagement i kvanteteknologiforskning og vidner om en dansk styrkeposition.

En anden måde at belyse Danmarks forskningsposition på, er ved at se på den mest citerede forskning. Citationer kan være udtryk for, bl.a. hvor indflydelsesrig og anerkendt en given publikation har været for det videnskabelige samfund.

En gennemgang af de 10 % mest citerede forskningspublikationer inden for kvanteteknologi fra 2000 til 2023 viser, at især USA spiller en central rolle i udviklingen af kvanteteknologi, og de amerikanske forskere og institutioner har haft en betydelig indflydelse på feltet. Så selvom kvanteteknologi har en signifikant tilstedeværelse i dansk forskning, så er det stadig USA, Kina, Tyskland, Storbritannien og Canada, som besidder den mest

indflydelsesrige forskning. Dette understreger vigtigheden af internationale samarbejder og udveksling af viden inden for kvanteteknologi.

Kina er meget aktiv, når det gælder forskning i kvanteteknologi. Verdens største forskningslaboratorium for kvanteteknologi ligger i Hefei, Anhui provinsen og er på 37 hektarer; den kinesiske virksomhed Origin Quantum har fået 148 millioner i direkte tilskud fra den statsejede venture kapitalfond Shenzhen Capital. I det hele taget rapporteres det i netmedier, at Kina investerer 15 milliarder dollars til understøtning af kvanteteknologi, hvilket er dobbelt så stor en investering som de samlede, statslige investeringer i EU og fire gange de statslige investeringer i USA (P, 2023). Til gengæld er de amerikanske private investeringer 13 gange så store som de kinesiske (ibid.).

Mængden af udbudte kandidatuddannelser i kvanteteknologi på alverdens universiteter stiger. McKinsey opgjorde i alt 50 uddannelser inden for dette felt (McKinsey & Company, 2023). Dette er vigtige skridt i udviklingen af kvanteteknologi, eftersom en af de store udfordringer er mangel på kvalificeret arbejdskraft.

Også i Danmark har vi pr. 1. september 2023 startet det første hold på en ny kandidatuddannelse i Quantum Information Science. Uddannelsen udbydes i et samarbejde mellem Københavns Universitet og Danmarks Tekniske Universitet. Selvom der oprindeligt kun var 25 pladser, blev optaget udvidet til 41, da man modtog omkring 170 ansøgninger (Ministry of Foreign Affairs of Denmark, 2023). De studerende kommer både fra Danmark og fra udlandet, bl.a. Kina, Indien, Irland, Bangladesh, Kroatien,

Serbien og USA. Udover kandidatuddannelsen i Quantum Information Science findes der 28 andre uddannelser i Danmark, hvor undervisning i kvanteteknologi indgår (Uddannelses- og Forskningsstyrelsen, 2022).

Samlet set indikerer de nævnte data, at Danmark har en stigende aktivitet i kvanteteknologi og er aktivt involveret i forskningen på området. Selvom Danmark rangerer som nr. 3 globalt i forhold til forskningsartikler pr. indbygger, er der stadig en stor udfordring i at konkurrere med lande som USA, Kina og Tyskland. For at fastholde og øge den forskningsmæssige position inden for kvanteteknologi er det vigtigt for Danmark at opretholde investeringer i forskning og fremme forskningssamarbejde på internationalt plan.





**USA SPILLER EN
CENTRAL ROLLE I
UDVIKLINGEN AF
KVANTETEKNOLOGI**

Teknologi

Patenter og patentansøgninger er en stærk, global indikator for innovation og en indikation af kommercielle interesser. En søgning i globale patentdatabaser efter kvanterelateret innovation identificerer i alt 28.738 patenter og patentansøgninger.⁵ Nogle lande giver særlige skattefordele til virksomheder med patenter, herunder Kina, som på den måde kan blive overrepræsenteret i statistikken ved at bidrage med patenter med megen ringe innovationshøjde. Til nogle analyser har vi derfor indskrænket søgningen til kun at indeholde de innovationer, som er ansøgt eller patenteret hos mere end én myndighed.

Ligesom ved optællingen af forskningsartikler er der ikke mulighed for at skelne mellem første og anden generations kvanteteknologi, når det gælder patentering. De patenter, der indgår i optællingen, er dog klart identificeret som patenter, der vedrører kvantecomputing, kvantesensorer og kvantekommunikation, så den største del af patenterne antages at være relateret til anden generations kvanteteknologi.

I 2004 blev der ansøgt om 383 patenter, der kan relateres til kvanteteknologi. Frem til 2010 steg det årlige antal patentansøgninger forholdsvis langsomt, hvorefter udviklingen tog fart. I 2025 kan der forventes over 5.506 patentansøgninger vedrørende kvanteteknologi, men udviklingen kan meget vel vise sig at være eksponentiel resulterende i et langt større antal innovationer end ovenfor vist. Uanset hvad den korrekte fremskrivning bliver, så er aktiviteten stærkt stigende og kan forventes at

fortsætte. Væksten er udtryk for stigende statslig interesse og investering i teknologierne og kan også være udtryk for en forventning om kommercielle muligheder fremover. Der kan dog være ganske lang udviklingstid, flere år, fra udtagelsen af et patent til lanceringen af et produkt.

Innovationsaktiviteterne er koncentreret omkring Kina, USA og Europa samt Indien. Desuden er der aktiviteter i Israel, Singapore og Australien. Kortet viser den geografiske fordeling af ansøgninger og patenter siden 2020, for patenter der er ansøgt eller udstedt i mere end et land.⁶

Blandt de 28.738 kvanterelaterede innovationer⁷ har vi fundet patenter og patentansøgninger (herefter kaldet innovationer) vedrørende kvantecomputing (6.671 innovationer), kvantekommunikation (5.718 innovationer) og kvantesensorer (2.487 innovationer). En ansøgning kan rumme flere dimensioner, men der er blot 85 ansøgninger, der overlapper på alle tre teknologifelter inden for kvanteteknologi.

For **kvantecomputing** er der identificeret i alt 6.671⁸ innovationer⁹ på verdensplan. Innovationsaktiviteten var lav indtil omkring 2015, hvorefter innovationsaktiviteten på få år blev tidoblet, og efter en kort opbremsning fra 2021-24 er estimeret, at der igen vil ske en markant vækst. Den fladere kurve kan være et resultat af manglende registreringer eller af PatSnaps regnemetode. Men McKinsey (McKinsey & Company, 2023) har i sin analyse af startups konstateret en opbremsning i etableringen af netop startups. De angiver som

⁵ Interessen er her innovationsaktiviteten, og derfor medtælles både ansøgninger og publicerede patenter. I opgørelsen skriver vi "patenter", men i virkeligheden er der tale om patentfamilier, fordi en innovation kan være udtaget som patent hos flere patentmyndigheder. Ved at anvende patentfamilier undgås det, at den samme innovation medtælles flere gange.

⁶ Nogle lande giver særlige skattefordele til virksomheder med patenter, herunder Kina, som på den måde kan blive overrepræsenteret i statistikken ved at bidrage med patenter med megen ringe innovationshøjde. Til nogle analyser, som denne, har vi derfor indskrænket søgningen til kun at indeholde de innovationer, som er ansøgt eller patenteret hos mere end én myndighed. Men også i det tilfælde fremstår Kina som et land med meget høj aktivitet målt i absolutte tal.

⁷ Søgninger gennemført midt september 2023.

⁸ Søgning den 14. september 2023

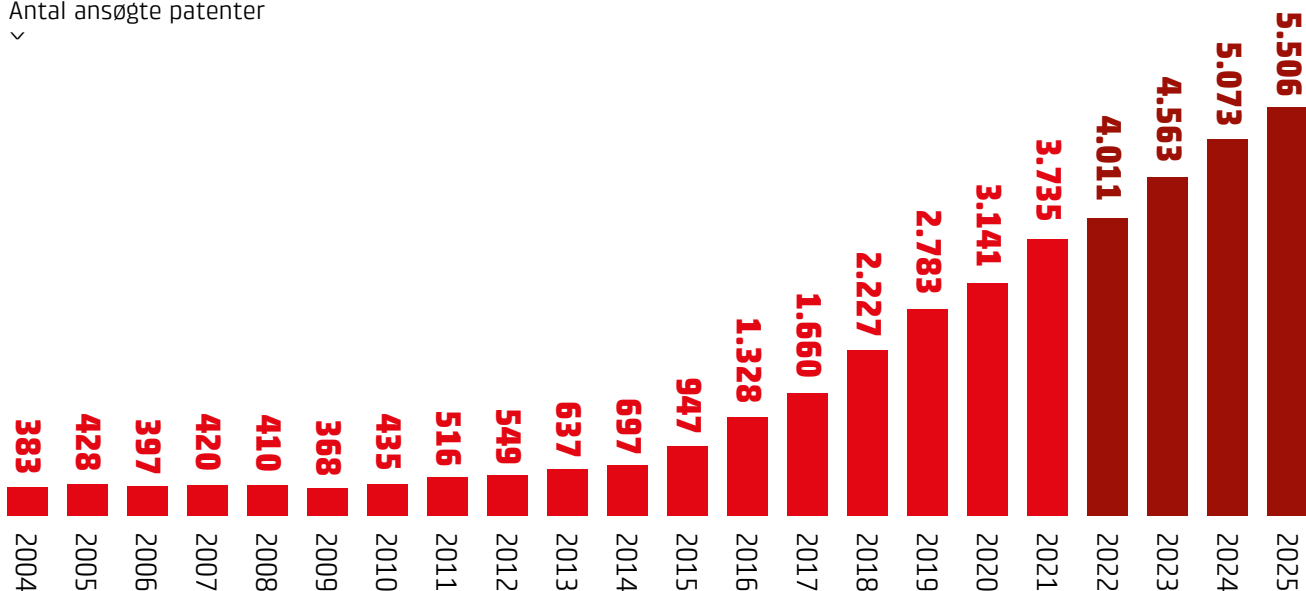
⁹ Innovation her defineret som patentansøgninger eller publiceringer. Innovation er når noget nyt skaber værdi. For kvanteteknologi gælder, at 70% – 80% af ansøgningerne ender som godkendte patenter. Patenter kan kun udtages, når der er en nyhedsværdi og bliver det, når der er værdier at beskytte. Derfor er patenter en god indikator for innovation.

KVANTERELATEREDE PATENTANSØGNINGER 2004-2025

Antallet af kvanterelaterede patentansøgninger forventes 14-doblet i 2025 ift. 2004

■ Patentansøgninger ■ Estimat

Antal ansøgte patenter

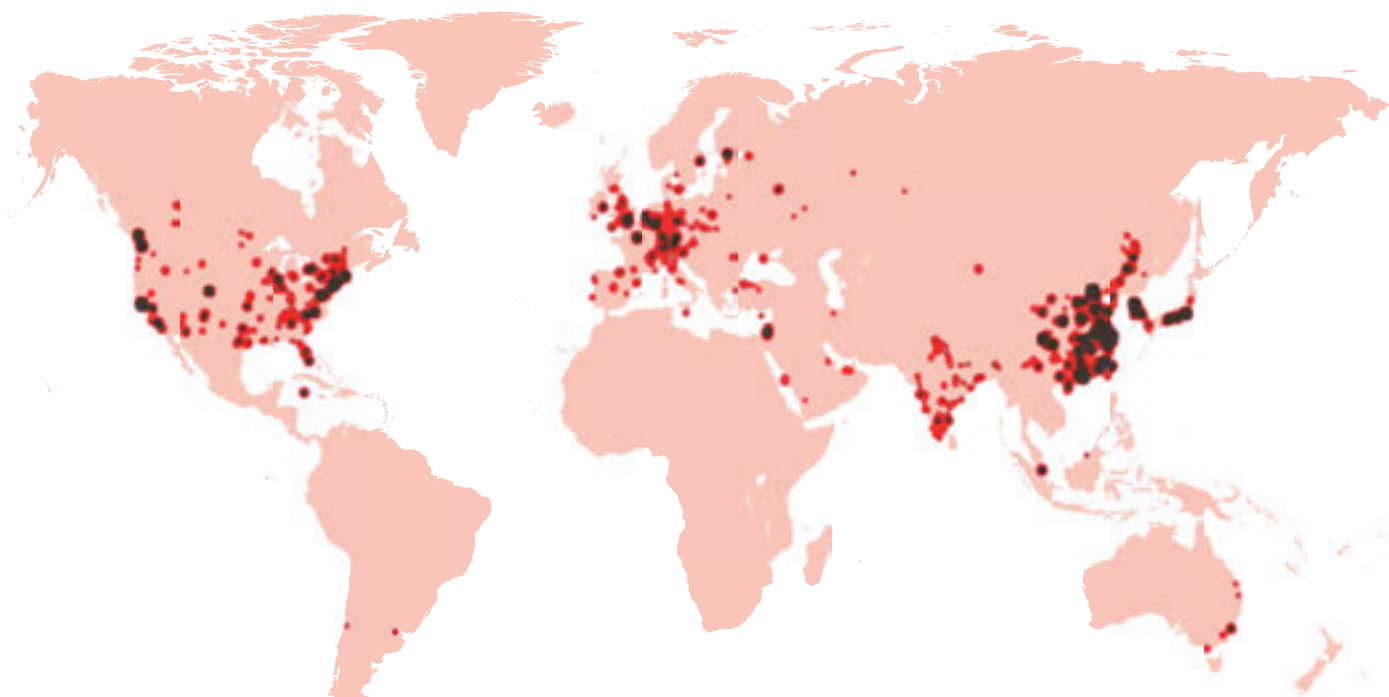


Note: Tal til 2021 og 2022-2025 er fremskrevet af Patsnap

Kilde: Teknologisk Institut på baggrund af data fra Patsnap. I alt 28.738 Innovationer i relation til kvante-relateret teknologi er identificeret. Innovationer målt som patentfamilier er baseret på i alt 75.323 patenter. 60 – 80 procent af ansøgningerne bliver til patenter.

KVANTETEKNOLOGISK INNOVATION FRA 2020

Patentansøger bag ansøgninger relateret til kvanteteknologi



Note: Heatmap for de 3.777 ansøgere, hvor innovationen vedr. kvanteteknologi er patentansøgt eller udtaget i mindst to lande efter år 2000. Kortet viser koncentrationer af patenthavere. Ved sort farve høj koncentration og ved rød lav koncentration. Hvis ingen farver kan der være ansøgere eller patentejere, men ikke i nogen videre koncentration.

forklaring mangel på talent, manglende forretningsmuligheder, eller mangel på investorer, som måske er mere interesseret i scale-ups. Kommercialisering af teknologien forudses først på længere sigt, og den horisont kan vise sig at være for langt ude i fremtiden for investorer. Det ville kunne forklare opbremsningen i patentaktiviteten.

USA har med 57 % af patenterne det absolutte lederskab, mens Kina efter en lidt langsommere start nu har 18 %¹⁰ af patenterne. I 2022 indsendte kinesiske ansøgere flere ansøgninger (924) end USA (530). Antallet af patenter er dog ikke umiddelbart

det samme som en førerposition. I Kina bliver man karakteriseret som højteknologisk virksomhed og får skattefordele ved mange patenter, hvilket giver incitament til at indlevere patentansøgninger på selv meget små forbedringer. Teknologierne omhandler informationsbehandling med kvantemekanik, hvor der indgår nanoteknologi og delkomponenter samt maskinlæring og beregningsmodeller.

Hvis patenteringen opgøres per capita er USA fortsat førende, og herefter kommer Finland, Østrig og Australien. Der er fundet 9 patenter for kvantecomputing med oprindelse i Danmark, når analysen

Mest patenterende aktører inden for kvantecomputing

IBM ligger i front som den mest patenterende virksomhed (520+ patentansøgninger og patenter). IBM betragter sig selv som verdens førende inden for Quantum Computing¹¹ og IBM har udviklet en række NISQ kvantecomputere, der kan tilgås via skyen.



Lige efter IBM ligger kinesiske Origin Quantum Computing Technology Co, som i maj 23 kunne præsentere deres 176-qubit Quantum Computing Platform, som kaldes "Zuchongzhi".

I Canada ligger D-Wave Systems, som også er specialiseret i Quantum Computing. D-Wave Systems har mere end 170 patenter, og kalder sig "the practical quantum computing Company". D-wave tilbyder cloud-baserede løsninger på deres Advantage™ quantum annealer,¹² som kan betegnes som en analog kvantecomputer, der primært er egnet til at løse optimeringsproblemer.

De øvrige i top-10 er alle amerikanske: Microsoft, Google, Regents of California, Intel og Northrop Grumman Systems Corp. I analysen her er kun medtaget innovationer, der er udtaget i mindst to lande.

¹⁰ Målt efter oprindelsesland

¹¹ www.ibm.com/quantum

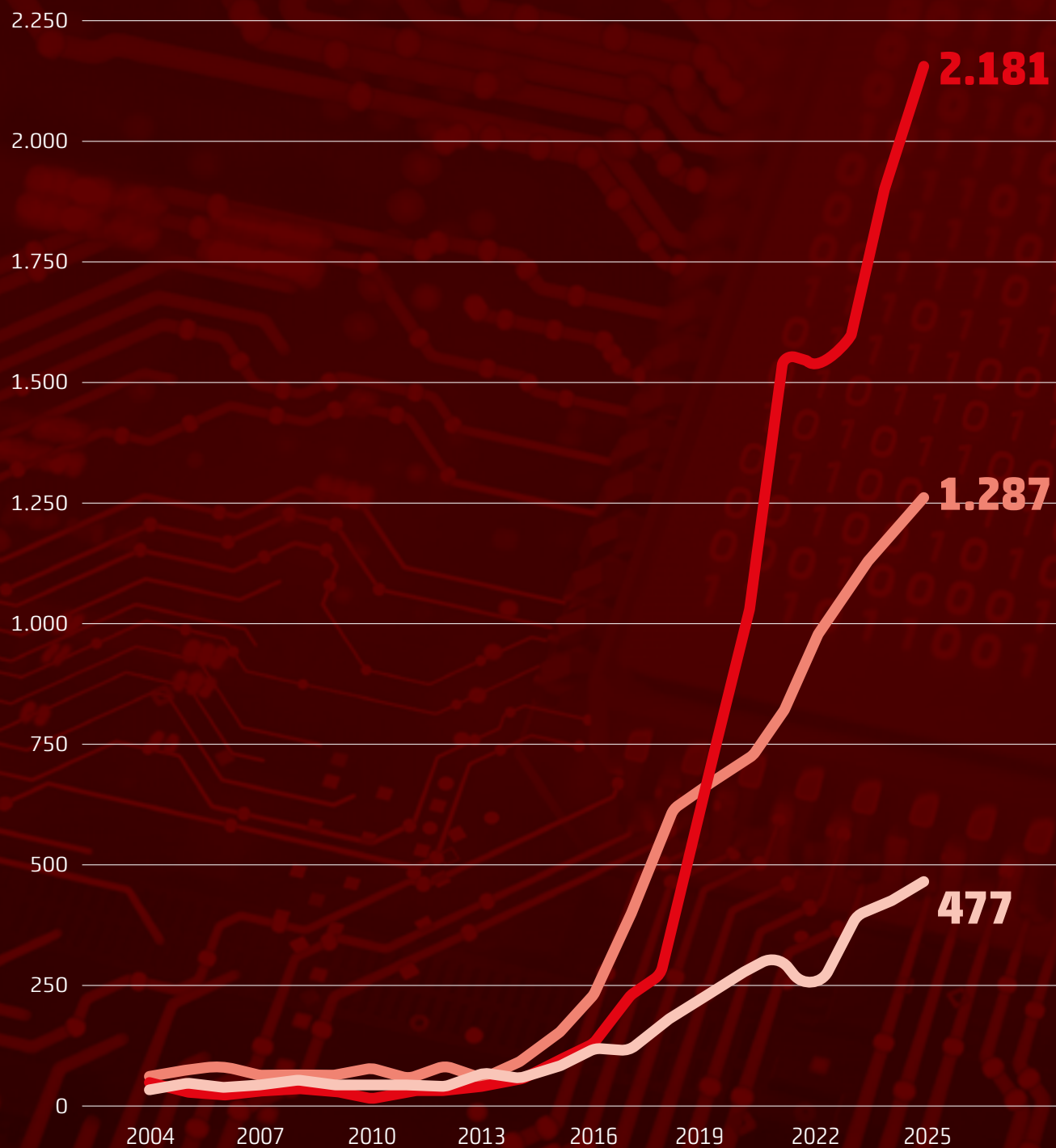
¹² www.dwavesys.com/solutions-and-products/product-overview

ANTAL ÅRLIGE PATENTANSØGNINGER 2004-25

Antal årlige ansøgninger 2004-21, samt 2022-2025 (estimat) for kvantecomputing, kommunikation og sensorer

— Computing — Kommunikation — Sensorer

Antal ansøgte patenter



Note: Tal fra 2023 og frem er estimeret eksponentiel fremskrivning.
Kilde: Teknologisk Institut på baggrund af data fra Scopus.

som her føres på oprindelsesland.¹³ Globalt set er det store aktører, som IBM Microsoft (USA), Baidu (Kina), Google (USA), Intel (USA) og Fujitsu (Japan) der ligger i front.

Over tid er der næsten lige så meget innovation inden for **kvantekommunikation** som inden for kvantecomputing. Her er der identificeret 5.718 patentansøgninger. Innovationsaktiviteten omkring kvantekommunikation begyndte lidt tidligere end kvantecomputing, men i 2025 forventes et niveau på 1.287 patenter.

Kina er førende med 3.553 ansøgninger og patenter – svarende til 38 % af patenterne inden for kvantekommunikation - og USA er lidt efter med 29 % af patenter og ansøgninger. Også ansøgere fra Japan (8 %), Korea (7 %) og UK (6 %) gør sig bemærket. Der er identificeret ét patent med udspring i Danmark. Hvis aktiviteten opgøres per capita rangerer Korea øverst, fulgt af UK, USA, Japan og Singapore. Danmark rangerer som nr. 26. Den største del af patenterne handler om netværkssikkerhed og hemmeligholdelse samt transmissionssystemer.

¹³ Ansøgningerne er fra Københavns Universitet, Qdevil APS og Aarhus Universitet. På nær en enkelt fra juli 2022 er de alle publiceret i 2023 www.ibm.com/quantum

Mest patenterende aktører inden for kvantekommunikation

Den største gruppe af patenter udspringer fra Japanske Toshiba med 87 patenter, og University of California og Berkely, hvorfra "The Regents of California University" står for 68 innovationer. Dernæst er det IBM, NEC, INTEL, og på 5. pladsen er det QuantumCTek med 34 patenter og ansøgninger. QuantumCTek er et kinesisk teknologiselskab, der fokuserer på kvantekommunikation og kvantekryptografi. QuantumCtek blev grundlagt i 2009 og har specialiseret sig i udviklingen af avancerede kvantekommunikationssystemer og kvantekryptografiløsninger. Magiq Tech Inc. ligger på 6. pladsen efterfulgt af koreanske ETRI, Fujitsu og Samsung Electrics (28). Først som nummer 11 på listen følger den første europæiske virksomhed, ID Quantique fra Schweiz.

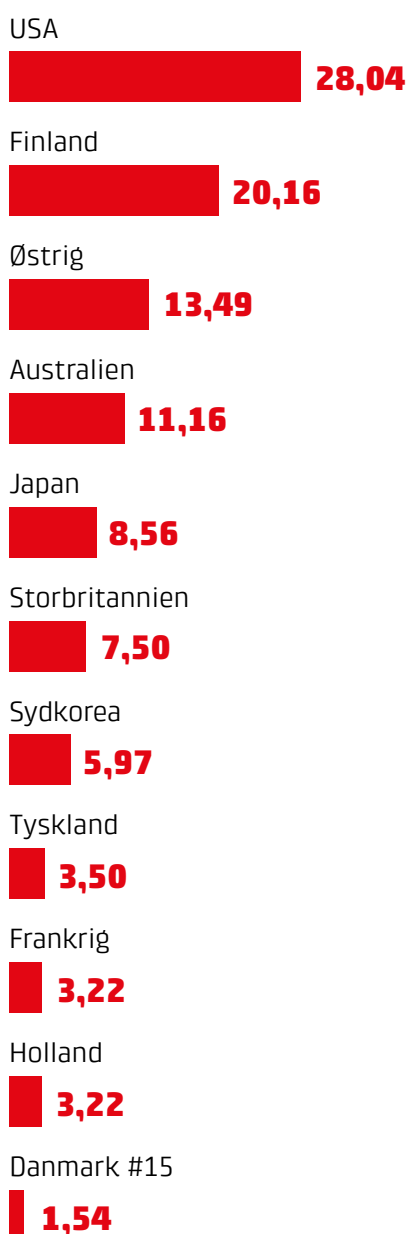
I analysen her er kun medtaget patenter, der er udtaget i mindst to lande. En analyse, hvor alle patenter tæller med, sætter de californi-

ske universiteter i front efterfulgt af QuantumCTek, og på de følgende syv øverste pladser er det kun Toshiba, der ikke er kinesisk. Nummer 3 er Beijing University (123 patenter), og herefter følger 4. Ruban Quantum Tech Co. Ltd. (Kina, 119 patenter) - har hovedkvarter i Zhejiang Sheng og er grundlagt i 2017. 5. Toshiba (Japan, 86 patenter) - er den ikke-kinesiske undtagelse, 6. State Grid Corp (Kina, 78 patenter), som blandt andet er involveret i Kinas satsning på kvantebaseret satellitkommunikation (Zhen, 2021), 7. Qudoor Tech Inc. (Kina, 77) arbejder med kvantekommunikation og sikkerhed inden for stat, forsvar, finans, energi og big data, 8. Shangdong Institute of Quantum Science and Technology (72), 9. CAS QAS Quantum Network Ltd. (Kina, 65 patenter), og 10. Central South University i Changsha (Kina, 62 patenter). Analysen illustrerer, at mange kinesiske patenter kun udtages i Kina og ikke i andre lande.

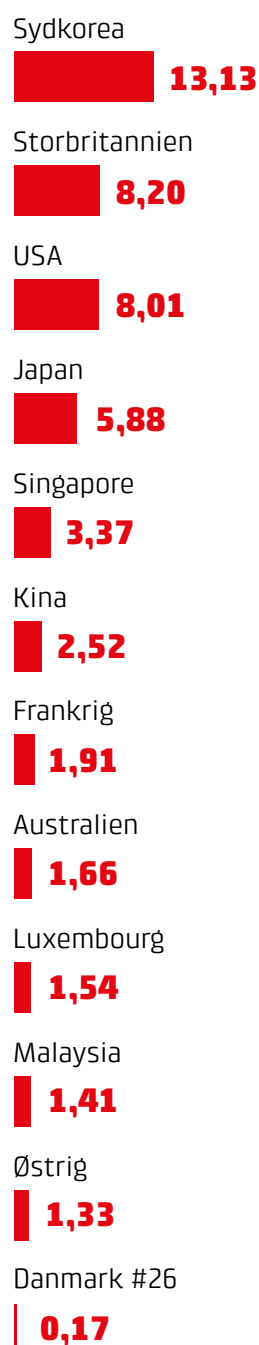
INNOVATION PER CAPITA INDEN FOR KVANTECOMPUTING, -KOMMUNIKATION OG -SENSORER

Patenter og ansøgninger pr. million indbyggere

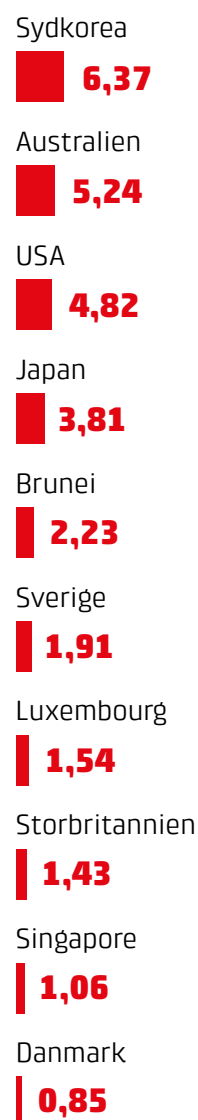
Kvantecomputing



Kvantekommunikation



Kvantesensorer



Note: Patenter og ansøgninger pr. million indbyggere. Oprindelseslande hvor den første ansøgning blev indsendt. For Danmark 9 patenter på computing, 1 på kommunikation og 5 på sensorer. Med 15 patenter inden for kvanteteknologi placerer Danmark sig samlet som nr. 14 i OECD målt i antal patenter pr. capita. Kilde: Teknologisk Institut på baggrund af data fra Patsnap.



**DANMARK LIGGER
NUMMER 10 INDEN
FOR PATENTERING AF
KVANTESENSORER**



Når det gælder **kvantesensorer**, er patenteringen på globalt plan mere beskeden og omfatter 3-400 innovationer årligt.¹⁴ Men interessen er hastigt stigende. Indtil 2012 lå det årlige antal patenter på 40-50 patenter, så antallet af patenter er tidoblet. En nærmere analyse viser, at både antallet af innovationer og antallet af ansøgere har været støt stigende siden 2012. Det er som regel et godt tegn på, at teknologien er i vækst.

Udviklingen kan spores tilbage til primært Asien og USA. Af innovationerne er 37 % fra USA, mens Asien samlet tegner sig for 47 % (Kina 27 %, Japan 11 %, Korea 8 %, Indien 1 %). Tilbage er 16 %, hvoraf EU og Storbritannien tegner sig for mere end halvdel. Den kinesiske aktivitet overhalede USA i 2017.

¹⁴ Der er ansøgt eller udstedt 6.015 patenter, som kan samles i 2.489 patentfamilier eller forskellige innovationer.

Opgøres patenterne per capita, ser rangordningen lidt anderledes ud. USA ligger med 4,82 patenter på en tredjeplads og Kina på en tiende plads.

Danmark ligger som nummer 10 med fem innovationer, inden for kvantesensorer, der har oprindelse i Danmark. De danske patenter udspringer især af DTU's Mikroelektronik Center, som i 1999 tegnede tre patenter på en metode, der kan bruges til at skabe "kvanteprikker" eller "kvantetråde" med meget regelmæssige mønstre, som kan bruges i elektroniske eller optoelektroniske enheder (som fx avancerede sensorer eller lysdioder). Den kan også bruges til at lave målestandarder i nanometerområdet eller optiske elementer, der kan bøje lys på specifikke måder.

Mest patenterende aktører inden for kvantesensorer

De ti mest patenterende aktører domineres af USA og Japan: 1. University of California (USA), 2. Samsung (Korea), 3. Sumitomo (Japan), 4. Fujifilm (Japan), 5. California Institute of Technology (USA), 6. Toshiba (Japan), 7. US Navy, 8. MIT (USA) og 9. Hitachi (Japan), 10. Fujitsu (Japan). Top-10 tegner sig årligt for omkring hver fjerde innovation.

Blandt "nyankomne" ansøgere findes også kinesiske aktører. Quingdao Universitet (Kina), ColdQuanta (USA – Som gennem en cloudservice tilbyder atommanipulation med atomer, der er nedkølet til næsten absolutte nulpunkt) (Time, 2022), Shanghai Institute of microsystem and information technology (Kina), Apple (USA), Qudoor Tech (Kina) (Dargan, 9 Leading Chinese Quantum Computing Compa-

nies [2022], 2021), Silicon Quantum Computing (Australien), SeeQC (USA), King Abdulaziz University (Saudi) og Suzhou Universitet (Kina).



Desuden er der et patent fra Aarhus Universitet, som i 2019 har patenteret en metode til at spore og analysere specifikke proteiner i blodet, der kan indikere tilstedeværelsen af autoimmune sygdomme. Sporingsanalyse til nanopartikler bruges til at opspore disse proteiner, og "kvanteprikker" hjælper med at gøre dem synlige, så de nemt kan identificeres. Dette giver en mere nøjagtig diagnose og kan potentielt føre til mere effektive behandlingsformer. Qdevil Aps og Københavns Universitet har i 2022 et patent vedr. et oscilloskop.

Hvis søgningen i innovationer indsnævres til kun at medtage innovationer, der er søgt eller udtaget i mere end ét land falder antallet af innovationer til 1,146. Det reducerer væsentligt i antallet af kinesiske innovationer, som i patentsammenhæng ofte er overrepræsenteret, fordi der er betydelige skattemæssige fordele ved at være patentansøger i Kina. Søgningen ændrer ikke ved, at der er stigende interesse i kvantesensorer, men det er primært kinesiske patenter, der udgår af søgningen, og USA tegner sig så for 49 % af innovationerne, mens Kina har en mere beskedne plads.

Marked

Det globale marked for kvanteteknologi har oplevet en eksplosiv stigning i investeringer og virksomheder i de seneste år, om end McKinsey (McKinsey & Company, 2023) har konstateret en opbremsning i startup-segmentet af virksomheder siden 2018. Investeringerne er drevet af forventninger til en stigende efterspørgsel efter den nye og exceptionelle beregningskraft, som kvanteteknologien har potentiale til at levere, men af en global konkurrence mellem stater om at blive en del af førerfeltet i udviklingen af teknologien. I forhold til landets størrelse, er Danmark i top-5 af de lande, hvor staten investerer mest i udviklingen af kvanteteknologi.

Markedet for kvanteteknologi er i vækst, og analysebureauerne forudser alle betydelige vækstrater: McKinsey estimerer, at det globale marked for kvanteteknologi vil være på omkring 741 mia. kr. i 2040 (McKinsey & Company, 2023). Af kvanteteknologiens underkategorier forventes kvantecomputing at have den største andel med et øvre estimat på 630 mia. kr. BCC Research forudser en årlig vækst i det globale marked frem mod 2028 på hele 48,1 % (Kudle, 2023).

Andre analyser offentliggør kun deres konklusioner og giver ikke indsigt i detaljer eller metode. Det giver naturligvis en større usikkerhed i fortolkningen: Det gælder fx MarketsandMarkets, som forudser en vækst på 38,3 % (MarketsandMarkets, u.d.), Fortune Business Insights forudser 32,1 % (Fortune Business Insight, 2023), mens Vantage Market Research er mere konservativ med en vækstrate på 22 % (Vantage Market Research, 2023).

Det er høje vækstrater, også selvom de forskellige forecasts falder forskelligt ud. Det er dog vigtigt at pointere, at estimeringen af markedsstørrelsen er endog meget usikker, i og med de reelle tal for investeringer og omsætninger ikke kendes.

Det springende punkt er, hvornår en kvantecomputer rent faktisk kan løse opgaver, der ikke kan løses af en supercomputer (HPC). Hvis det først sker om 20 år, vil markedet ikke vokse som forudset. Markedet i dag domineres af offentlige og private fondes investeringer i forskning og ikke af kommercielt salg af produkter og services. Fremskrivninger af markedsstørrelsen kan være endnu mere usikre, da der er flere ubekendte faktorer, som kan påvirke



udfaldet både i en negativ og positiv retning (fx krig, videnskabelige gennembrud, politisk bevågenhed, kommerciel interesse). For især kvantekommunikation gælder, at interessen i nationalt forsvar og sikkerhed driver en stor del af efterspørgslen. Market Research Future estimerer, at hele 43 % af omsætningen inden for kvantekommunikation stammer fra forsvarsindustrien (Market Research Future, 23).

Væksten drives af det potentiale, som kvanteteknologien lover og af ønsket om at opnå en konkurrencefordel på et område i vækst, samt af nationale sikkerhedshensyn. Store offentlige tilskud til forskning er en væsentlig drivkraft på markedet. Markets and Markets (MarketsandMarkets, u.d.) nævner fx, at Kina vil bruge 15 milliarder dollars på direkte støtte, og der er også støttekroner at hente i Australien, i USA og i de fleste af de ledende lande i EU. Den kinesiske støtte bliver vurderet til at være dobbelt så stor som de samlede statsstøtter i EU og fire gange så stor som den amerikanske statsstøtte. McKinsey & Company (McKinsey & Company, 2023) har opgjort de private investeringer i startups inden for kvanteteknologi, og her spiller

den offentlige støtte en betydeligt mindre rolle. Her er de amerikanske investorer langt foran. De amerikanske private investeringer er fx 11 gange så store som de kinesiske og 6 gange så store som investeringer i EU. Næst efter USA, er det Canada og Storbritannien, der har de største investeringer i startups.

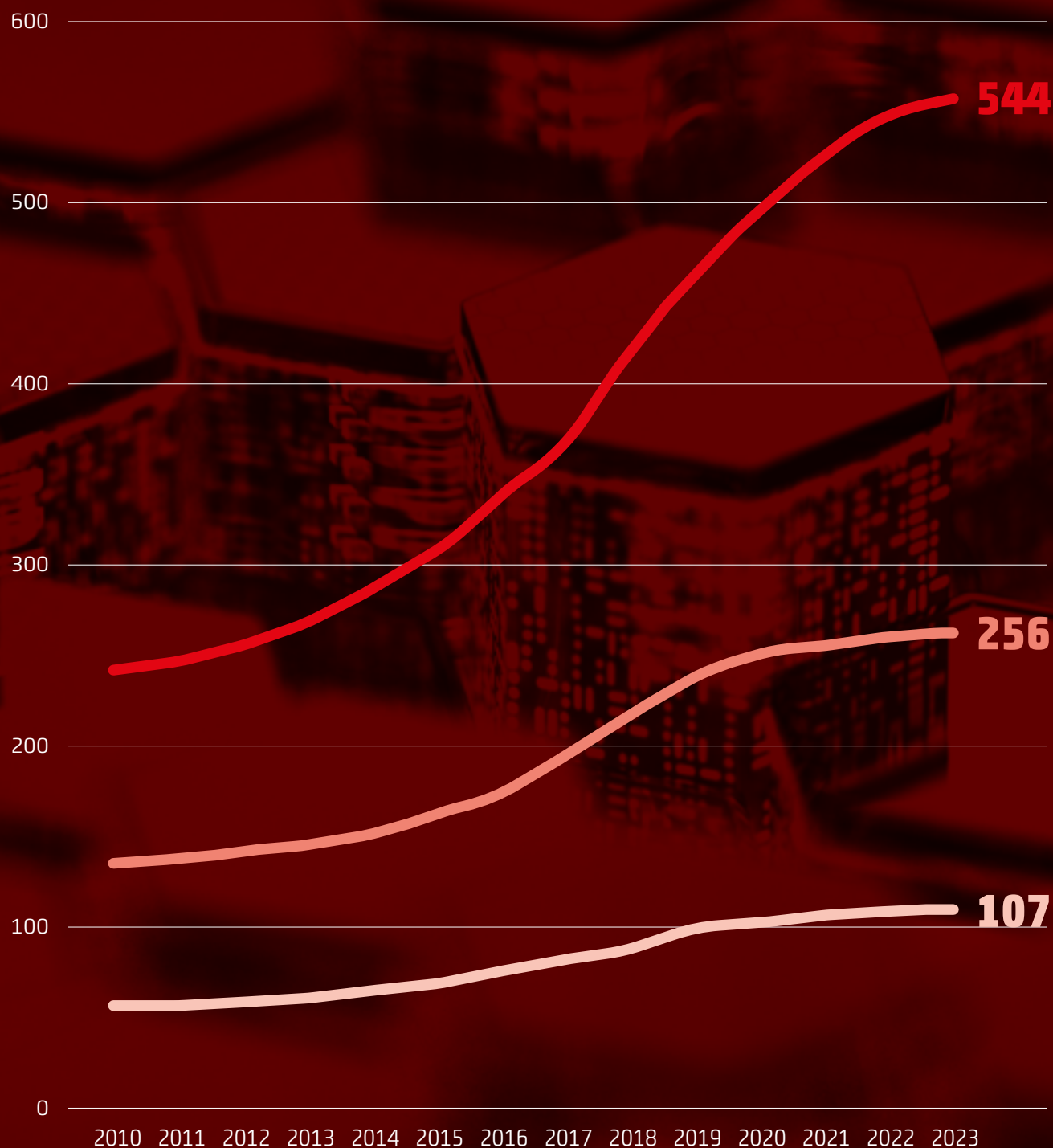
Kvanteteknologi har potentiale til at skabe en ny industri med mange nye arbejdspladser, og i takt med at udbuddet af cloud-baserede løsninger stiger, vil alene tilgængeligheden også øge interessen. McKinsey (McKinsey & Company, 2023) vurderer, at de industrier, som primært kan drage fordel af kvanteteknologi, vil være autobranschen, kemi, finanssektoren, biovidenskab, og i det hele taget segmenter der har fordel af biomedicinsk simulering, optimering, maskinlæring, materialeudvikling og offentlige tjenester som trafikoptimering eller vejrtjenester (MarketsandMarkets, u.d.).

Potentialet for kvanteteknologi er til stede, men der er mange usikkerheder forbundet med tidshorisonten for teknologiudviklingen og dermed også vurderingen af det økonomiske potentiale. McKin-

VIRKSOMHEDER INDEN FOR KVANTETEKNOLOGI 2010-2023

— Computing — Kommunikation — Sensorer

Antal virksomheder



Kilder: Crunchbase og Patsnap. Note: Der er i alt identificeret 1164 virksomheder, som arbejder med kvanteteknologi. 804 af disse kan genfindes som aktive i Crunchbase, og indgår i opgørelsen her. Særligt asiatiske virksomheder er dårligere repræsenteret i Crunchbase.

sey (McKinsey & Company, 2023) peger selv på, at den lange udviklingshorisont kan få private investorer interesse til at køle. Fra det offentlige kan der være ændringer i politiske prioriteringer, som fx at der i stigende grad er eksportkontrol og handelshindringer mellem de regioner, der er førende i teknologiuudviklingen, herunder især mellem vesten og Kina. Desuden kan offentligt forbrug til grøn omstilling, bekæmpelse af sygdomme (fx Covid) eller stigende offentlige velfærdsudgifter konkurrere om de samme midler, og dermed reducere, hvor meget den offentlige sektor kan investere. Der er væsentlige økonomiske, forsyningsmæssige og sikkerhedsmæssige interesser på spil, som kan hæmme udviklingen. World Economic Forum (World Economic Forum, 2022) peger desuden på behov for standardiseringer og regulering. Endelig er der mangel på kvalificeret arbejdskraft, om end udbuddet af uddannelser er stigende (McKinsey & Company, 2023).

En kortlægning af virksomheder inden for kvanteteknologi viser en stor vækst i antallet af virksomheder, som beskæftiger sig med kvanteteknologi, hvilket afspejler, at markedet har store forventninger til teknologien. Ved at kombinere søgninger i globale virksomheds- og patentdatabaser har Teknologisk Institut identificeret 1.188 virksomheder, som arbejder med kvanteteknologi.¹⁵ Af disse virksomheder kan 804 bekræftes som aktive i virksomhedsdatabaser, men blandt de resterende er særligt kinesiske og andre asiatiske virksomheder overrepræsenteret. Asiatiske virksomheder er generelt dårligere afdækket i internationale virksomhedsdatabaser. Herudover er det vigtigt at pointere, at det reelle tal muligvis kan være højere,

da virksomheder kan arbejde med kvanteteknologi i et mindre eller større omfang og ikke nødvendigvis publicerer dette offentligt eller udtager patenter.

Af de 804 bekræftede aktive virksomheder beskæftiger 544 sig med kvantecomputing, 256 arbejder med kvantekommunikation og 107 med kvantesensorer. Blandt de virksomheder, som ikke kan bekræftes aktive, udgør kvantekommunikation og kvantesensorer en større andel.¹⁶

En virksomhed kan arbejde med mere end ét af de tre områder, hvorfor tallene i figuren summerer til mere end 804; 28 virksomheder beskæftiger sig med alle tre områder. Af disse er 13 store virksomheder med mere end 10.000 ansatte, hvoraf 8 er de asiatiske virksomheder LG Electronics, Samsung, Fujitsu, Hitachi, Fujifilm, Canon, Honda og Industrial and Commercial Bank of China. I Europa er de store virksomheder, som arbejder på tværs af de tre områder, Siemens og Deutsche Telekom, og i Nordamerika er det fx Blackberry, Corning og Qualcomm.



¹⁵ McKinsey (McKinsey & Company, 2023) har i deres opgørelse fra april 2023 identificeret omkring 350 startups ved brug af virksomhedsdatabaserne Crunchbase og Pitchbook. Når Teknologisk Institut finder flere virksomheder, så skyldes det kombinationen af Crunchbase og en patentanalyse, hvor vi har identificeret de virksomheder og vidensinstitutioner, der står bag patenterne. Der er sandsynligvis flere små virksomheder, end vi har identificeret, dels fordi Crunchbase ikke har fuld dækning og dels fordi, der bag patenter ansøgt af individuelle borgere ofte vil være en virksomhed. Pitchbook har en lidt bredere dækning, så McKinsey har derfra sandsynligvis fundet virksomheder, som Teknologisk Institut ikke har identificeret. En fuldstændig database findes ikke, men kortlægningen ser ud til at være den bredeste hidtil. Der kan også være virksomheder, der arbejder med kvanteteknologi, som af sikkerhedshensyn ikke offentliggør oplysninger. Der skelnes i øvrigt ikke mellem første generations og anden generations kvanteteknologi, da der ikke findes dataoplysninger, der gør det muligt, men patenterne, som kortlægningen bygger på, er primært ansøgt efter år 2000, så hovedparten formodes at være relateret til anden generations kvanteteknologi.

¹⁶ 762 af de 1.188 virksomheder beskæftiger sig med kvantecomputing, 494 med kvantekommunikation og 252 med kvantesensorer.

DE GLOBALE MARKEDSLEDERE INDEN FOR KVANTETEKNOLOGI

Kvantecomputing

IBM

IBM er i front, når det kommer til omfanget af forskning og udvikling inden for kvantecomputere. IBM anvender sine kvantecomputere i medicin og materialeforskning, forsyningskæder og logistik, finansielle tjenester, kunstig intelligens samt cloud-sikkerhedsapplikationer. Deres investeringer fokuserer på at udvikle nye teknologier, såsom kvantechips uden silicium, der er designet specifikt til kvantecomputere.

Microsoft

Microsoft tilbyder integrerede quantum computing-tjenester, software og løsninger.

Google

Google udvikler sine egne kvantecomputere, og deres maskiner rangerer i øjeblikket blandt verdens mest kraftfulde. Derudover har Google etableret et dedikeret kvante-AI-campus i Santa Barbara, Californien, som er beregnet til at huse deres kvantecomputere. Google er hemmelighedsfulde om deres arbejde på kvanteteknologi, men jobopslag tyder på, at de arbejder med kvantesensorer, post-kvantekryptografi (PQC) og distribueret computing.

Andre eksempler

Andre nøgleaktører er Atos, Alibaba, Amazon, D-Wave Systems Inc. (Canada), Intel Corp. (USA), Rigetti & Co. (USA), QC Ware (software) (USA), Quantinuum Ltd (USA), Riverlane (software) (UK), Xanadu, PsiQuantum (USA).

Kvantekommunikation

Toshiba

Toshiba leverer cybersikkerhed baseret på kvanteteknologi. Se www.toshiba.eu/quantum

ID Quantique

ID Quantique i Schweiz leverer både sikkerhedssystemer og sensorer baseret på kvanteteknologi. Sikkerhedssystemerne leveres til en række sektorer, fx datacentre, finans, telecom, kritisk infrastruktur, sundhed og bilindustrien. Se www.idquantique.com

Andre eksempler

Fujitsu (Japan), Huawei (Kina), Fermi National Accelerator Laboratory, MagiQ (USA), Mitsubishi (JP), NEC, NTT lab, Raytheon, Quantumctek Co. (Kina), Quantum Xchange (USA), Qrypt (USA), Isara (Canada), Agnostiq (Canada), VeriCloud (Frankrig), Qusecure (US), Amazon AWS (US), Alibaba (Kina).

Kilder kvantecomputing: (Markets and Markets, 2023), (CB insights, 2022).

Kilder kvantekommunikation: (Market Research Future, 23), (P, 2023), (VentureRadar, 2023), (Fermilab).

Kilder kvantesensorer: (Vantage Market Research, 2022), (Apogee Instruments, 2023) samt Patsnap (patentsøgninger) og virksomhedernes hjemmesider. Bemærk at nogle af de nævnte virksomheder mere bygger deres teknologi på første generations kvanteteknologi end anden generations kvanteteknologi.

Kvantesensorer

Shanxi University

Quantum Sensing Laboratory beskæftiger sig primært med eksperimentel og teoretisk forskning inden for laser-teknologi og optiske kvanteenheder samt omsætning af kvanteteknologiresultater. En af de mest patenterende aktører siden 2020. Se (kinesisk) ioe.sxu.edu.cn/sys/labs12/index.htm

M-Squared Lasers Limited

M Squared (Scotland / Californien) tilbyder en række kvanteprodukter, inklusiv integrerede systemer (kvanteaccelerometre, gravimetre og ure) samt optiske systemer og elektronik til virksomheder og institutioner globalt. Se www.m2lasers.com

μQuans

MyQuans er fransk og leverer præcisionsmåleudstyr. Se www.muquans.com

Cerca Magnetics

Britiske Cerca Magnetics arbejder på en hjerne-scanner. Se www.cercamagnetics.com

Andre Eksempler

Samsung Electronics Co. Ltd., Fujifilm Corp., Apogee (se www.apogeeinstruments.com/quantum), Networking (Oscilloquartz), Adcon Telemetry GmbH, Meter Group, Microchip Impedans Ltd, Spectrum Technologies

Kvanteteknologi er et forretningsområde i stor vækst, som også viser sig i et stigende antal aktører. Der er sket en fordobling i antallet af virksomheder siden 2010 inden for alle tre kvanteteknologiske områder. Fra 2015 og årene frem øges væksten. Dog ses en opbremsning i 2022 og 2023. Tallene kan være ufuldstændige, fordi der er forsinkelse i opdateringen af virksomheds- og patentdatabaser, men mulige forklaringer kan også være mangel på specialister, begrænsede forretningsmuligheder og investorers tilbageholdenhed – hvilket sandsynligvis forklarer, hvorfor figuren ikke viser fortsat høj vækst i disse år.

Figuren nederst viser, hvordan væksten i startup-virksomheder inden for kvanteteknologi også i særlig grad tager fart omkring 2015. I 2020 er antallet af startups - defineret som virksomheder, som ikke er ældre end 5 år - steget til 241 fra kun 66 virksomheder i 2015. I denne periode er 119 startups kommet til inden for kvantecomputing, 67 inden for kvantekommunikation og 25 inden for kvantesensorer.

Næsten 43 % af startups i 2020 befinder sig i Nordamerika. Kun 11 % befinder sig i Indien, Kina, Japan,

Singapore eller Sydkorea, mens 35 % har hovedsæde i Europa.

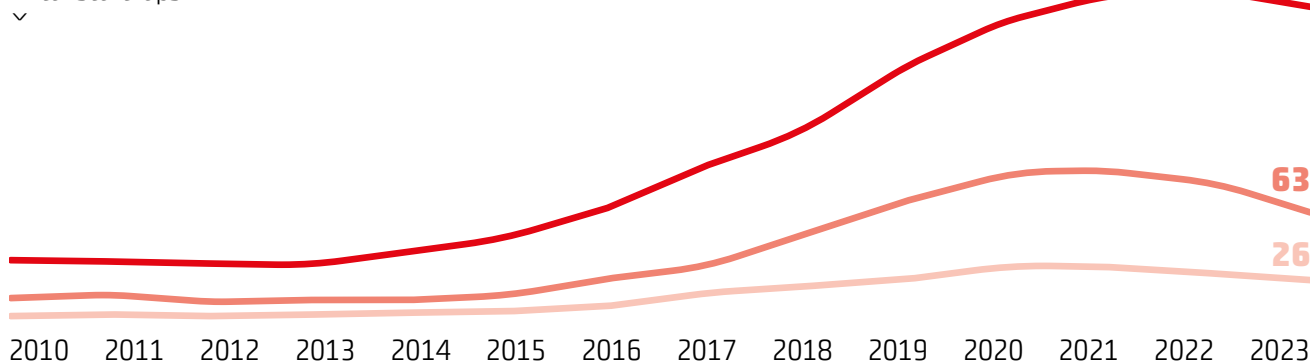
Store virksomheder med mere end 10.000 ansatte er stærkt overrepræsenteret blandt aktørerne. De store virksomheder udgør 18 % inden for kvantecomputing, 30 % inden for kvantekommunikation og 23 % inden for kvantesensorer. Det er således en industri som, på trods af store vækstrater i startups, i høj grad domineres af store virksomheder med betydelig investeringskapital. Alligevel er der nogle interessante forskelle mellem de tre kvanteteknologiske områder. Inden for computing er de helt små virksomheder med færre end 50 ansatte mere udbredte, mens de mellemstore virksomheder med 50 til 1.000 ansatte er mere udbredte inden for kommunikation.

Figuren på modsatte side viser hvilke industrier, som virksomheder, der beskæftiger sig med kvanteteknologi, er forbundet med. Tykkelsen på trådene, som forbinder teknologi og industri, afspejler antallet af virksomheder. Forskning og ingeniørarbejde, software, hardware og informationsteknologi er de klart største industrier, og de knytter sig i høj

STARTUPS INDEN FOR KVANTETEKNOLOGI

— Computing — Kommunikation — Sensorer

Antal start-ups



Kilder: Crunchbase og Patsnap. Antal nye startups pr. år. I 2021-22 ses en lille opbremsning i antallet af startup's, som også McKinsey har konstateret. Mulige forklaringer er mangel på specialister, begrænsede forretningsmuligheder og investorers tilbageholdenhed.

Note: Startups er defineret som virksomheder, der er højst fem år gamle. Virksomheder indgår i mere end én gruppe, hvis de arbejder med flere af de tre typer af kvanteteknologi. Opgørelsen dækker virksomheder, der kan genfindes som aktive i Crunchbase.

VIRKSOMHEDSSTØRRELSE EFTER TYPE AF KVANTETEKNOLOGI

Antal ansatte: ■ 1-10 ■ 11-50 ■ 51-100 ■ 101-250 ■ 251-1.000 ■ 1.001-10.000 ■ 10.001+

Computing



Kommunikation

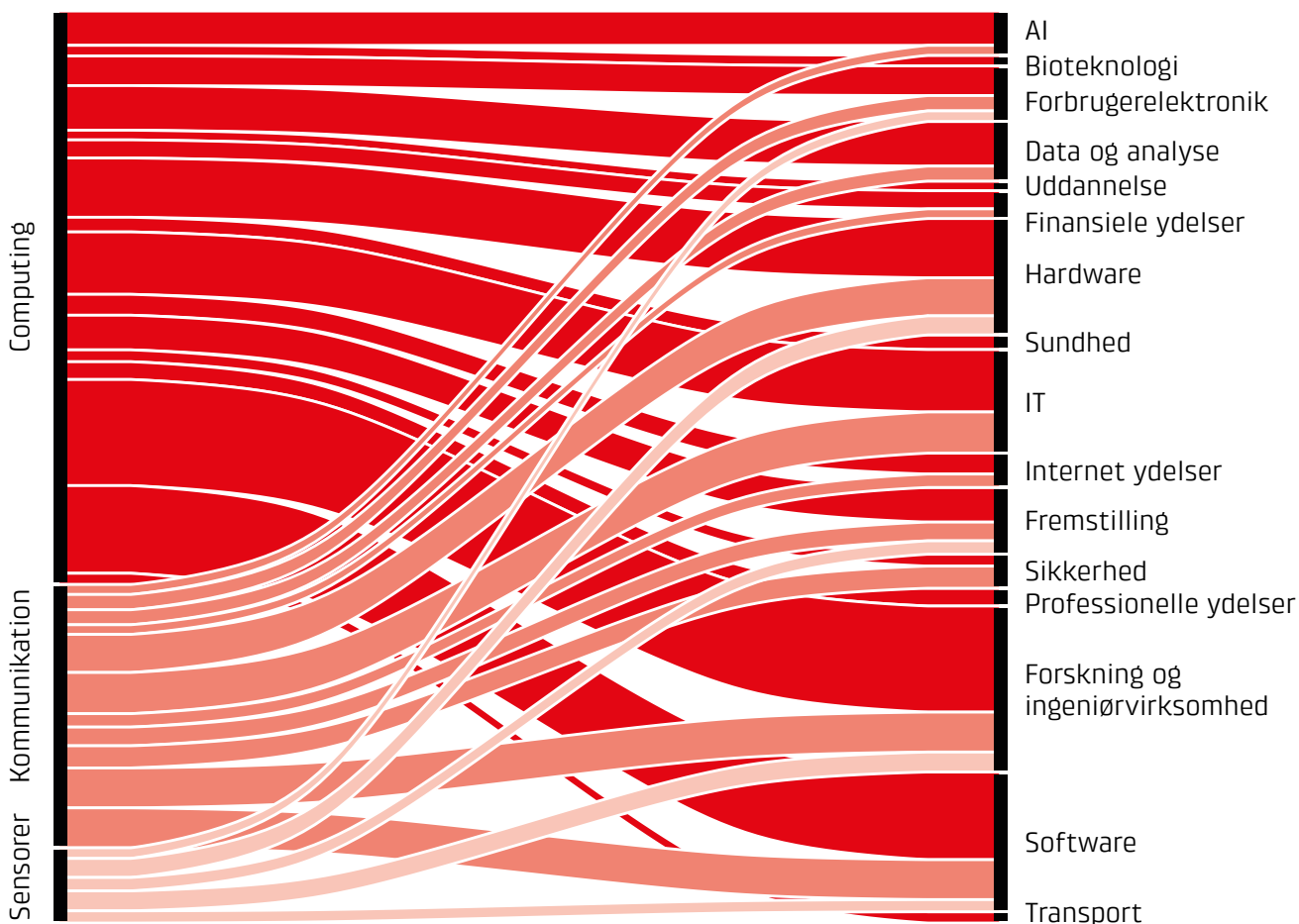


Sensorer



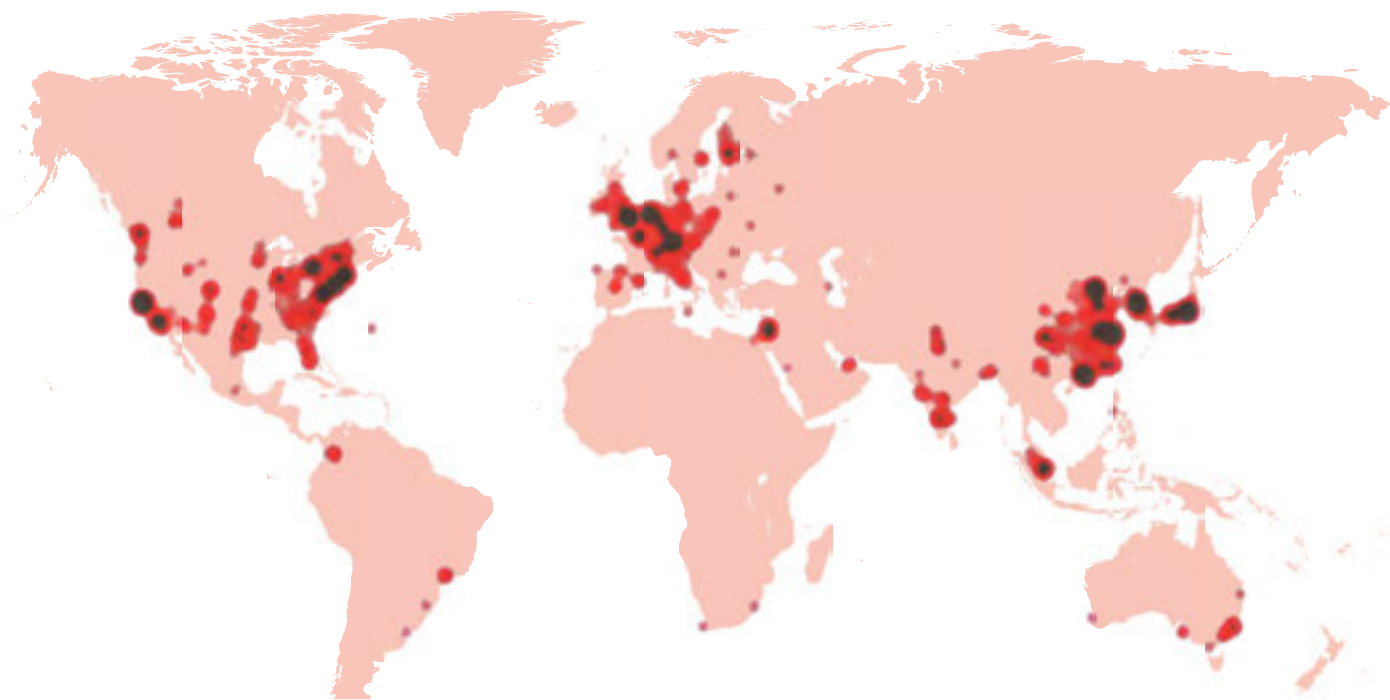
Kilder: Crunchbase og Patsnap. Note: Der er i alt identificeret 1.164 virksomheder, som arbejder med kvanteteknologi. 804 af disse kan genfindes som aktive i Crunchbase, og indgår i opgørelsen her. Særligt asiatiske virksomheder er dårligere repræsenteret i Crunchbase.

INDUSTRIER INDEN FOR KVANTETEKNOLOGI



Kilder: Crunchbase og Patsnap. Note: Figuren viser hvilke industrier, som virksomheder inden for de tre typer af kvanteteknologi oftest er forbundet til. Data er fra de 804 virksomheder, der kan genfindes som aktive i Crunchbase. Tykkelsen på trådene, som forbinder teknologi og industri, afspejler antallet af virksomheder.

KORT OVER VIRKSOMHEDER INDEN FOR KVANTETEKNOLOGI



Kilder: Teknologisk Institut på grundlag af Crunchbase og Patsnap. Note: Der er i alt medtaget 1.164 virksomheder, som på den ene eller anden måde arbejder med kvanteteknologi på kortet. Virksomhederne forsker i, udvikler og producerer kvanteteknologiske produkter, både første generation og anden generation. Der indgår også rådgivervirksomheder og software – algoritme udviklere.

grad til udviklingen og modningen af teknologien. Færre virksomheder er inden for industrier, hvor det handler om at udnytte forretningsmulighederne i teknologien.

De industrier hvor vi alligevel finder virksomheder, som arbejder med kvanteteknologi, giver nogle indikationer af hvilke industrier, som i første omgang kan opleve, at kvanteteknologi gør en forskel for deres forretningsmodeller. Kunstig intelligens samt data- og analysearbejde er de industrier, hvor vi finder en del virksomheder, fordi kvantecomputing potentielt kan give store muligheder i forhold til hurtigere og mere effektiv eksekvering af algoritmer og bearbejdning af store datasæt i real-time. Herudover anses kvanteteknologien for særligt relevant inden for transportindustrien, finansindustrien og bioteknologi (Morrison, 2023), hvilket også er industrier, hvor vi finder virksomheder, der i dag udforsker mulighederne for en gevinst af kvanteteknologi.

Transportindustrien, hvor kvanteteknologi kan blive en vigtig brik i automatiseringen af transport, skiller sig ud ved at være præget af få, men store, multinationale virksomheder. Her finder vi 14 virksomheder med mere end 10.000 ansatte, heriblandt Volkswagen, BMW, Porsche, Kia Motors, Hyundai, Honda, Toyota, Denso, Boeing og General Motors.

Ser man på, hvordan virksomhederne fordeler sig geografisk, ser man stor aktivitet særligt i Tyskland, Holland og England, på USAs øst- og vestkyst (særligt New York og San Francisco) og i Østasien omkring Beijing, Shanghai, Taiwan, Seoul og Tokyo, på Kinas kyst, i Japan og Sydkorea. Det er dog kun i USA og Asien, at vi finder klynger af mere end 30 virksomheder i et afgrænset område omkring de store byer.

En betydelig del af markedet er drevet af statsinvesteringer. De globale statsinvesteringer er særligt



**AI SAMT DATA OG ANALYSE-
ARBEJDE HØRER TIL DE
INDUSTRIER DER ALLEREDE
NU ARBEJDER MED KVANTE-
TEKNOLOGI**

koncentreret i Kina, hvor staten har en ambition om, at landet bliver førende på kvanteteknologi. Der er dog også betydelige gennemførte og planlagte statsinvesteringer i EU og Storbritannien, som samlet set nærmer sig de kinesiske statsinvesteringer. I forhold til annoncerede planlagte statsinvesteringer skal man tage forbehold for, om de faktisk bliver fuldt udmøntet. Særligt i Kinas tilfælde er der usikkerhed omkring dette.

Figurerne på modsatte side viser de akkumulerede statsinvesteringer inklusiv de investeringer, som er planlagt i de kommende år. Fx løber de danske investeringer på 1,2 mia. kr. fra 2023 til 2027, mens Kinas investeringer på over 100 mia. kr. finder sted i årene 2021 til 2025 som en del af deres fjortende femårsplan. Omregnes statsinvesteringer til kr. pr. indbygger, placerer Danmark sig i førerfeltet på en sjetteplads med 205 kr. pr. indbygger.

USA investerer markant færre offentlige midler i kvanteteknologi, hvilket dog modsvares af, at private investorer spiller en større rolle i Nordamerika. Investeringer i Danmark er primært målrettet universiteter og i mindre grad teknologiudviklende virksomheder.

Opgørelsen dækker kun annoncerede strategiske midler, som staterne har afsat. Tidsperioderne kan variere fra land til land, da deres strategier dækker over forskellige tidsperioder. Udover strategiske statsinvesteringer modtager forskningsgrupper og virksomheder også midler fra offentlige fondes generelle puljer, fra private fonde og fra private investorer. I årene 2017-2021 investerede offentlige fonde i Danmark 0,5 mia. kr. i kvanteområdet (Uddannelses- og Forskningsstyrelsen, 2022). Disse er ikke talt med i opgørelsen over statsinvesteringer.

Selvom Danmarks annoncerede statsinvesteringer i kvanteteknologi ved første øjekast ikke fremstår som imponerende sammenlignet med andre lande, skal det bemærkes, at Danmark reelt prioriterer kvanteteknologi højt. Tager man højde for

investering pr. indbygger, stiger Danmark op på en imponerende global sjetteplads. Dette indikerer en betydelig ambition ift. at deltage i udviklingen af kvanteteknologi, hvilket er afgørende for Danmarks position i den stigende globale konkurrence på det kvanteteknologiske område.

Fra det private marked blev der investeret omkring 20,4 mia. kr. sidste år, hvilket markerer et bemærkelsesværdigt rekordniveau i forhold til 321 mio. kr. i 2019 og 686 mio. kr. i 2020 (Morrison, 2023). Her skal man skelne mellem venture capital (VC) investeringer og donationer fra private fonde. VC-investeringer flyder primært til startups i USA, efterfulgt af Canada, Storbritannien og EU (McKinsey & Company, 2023). Startups i Nordamerika baserer sig således i højere grad på VC-investeringer, mens startups i Europa og Kina i højere grad baserer sig på offentlige investeringer og støtteordninger.

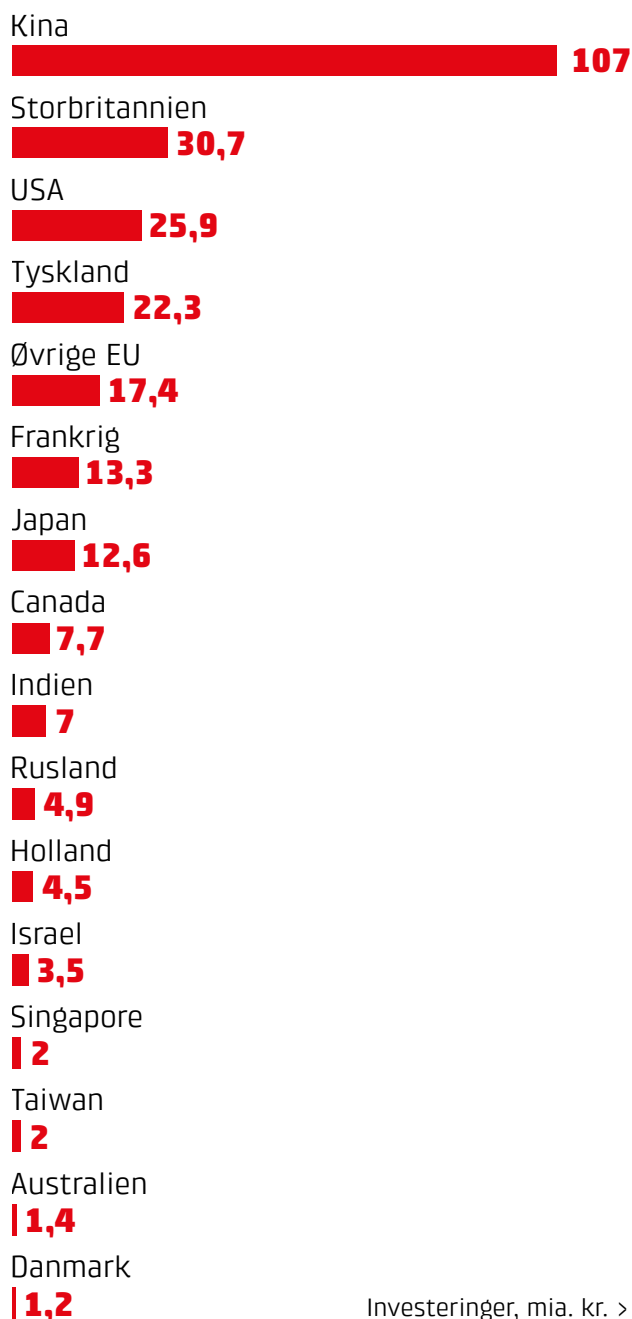
I Danmark er startup-miljøet relativt lille med virksomheder såsom MQS, Sparrow Quantum og Kvantify, der udtrykker, at det i Danmark er svært at rejse kapital grundet mangel på risikovillighed (Erhvervsstyrelsen, 2022). De har dog alle tre tiltrukket investeringer, fx Sparrow Quantum der så sent som i år hentede den største seed-investering til dato i Danmark på 31 mio. kr. Investorerne bag inkluderer venture-kapitalfonde og Det Europæiske Innovationsråd (Kromann Reumert, 2023).

De største private investeringer i Norden kommer fra private fondes donationer til offentlig forskning. I Danmark har Novo Nordisk Fonden investeret 1,5 mia. kr. i Niels Bohr Instituttet (Novo Nordisk Fonden, 2022), og i årene 2017-21 donerede private fonde yderligere 700 mio. kr. til forskning på kvanteområdet (Uddannelses- og Forskningsstyrelsen, 2022). I Sverige har Knut & Anita Wallenberg Fonden doneret 1,2 mia. over 12 år til etablering af Wallenberg Centre for Quantum Technology, som ledes af Chalmers Tekniska Högskola og involverer en række svenske universiteter (RISE, 2023).

AKKUMULEREDE STATSINVESTERINGER I KVANTETEKNOLOGI

Inklusiv planlagte investeringer

De globale statsinvesteringer er mest koncentreret i Asien. Især Kina satser stort med næsten dobbelt så stor en investering i forhold til EU, som nummer 2. Dette er dog også en nødvendighed med Kinas mål om at være global leder inden for kvanteteknologi. En anden forklaring ligger måske også i, at en større del af andre landes investeringer stammer fra det private marked i modsætning til Kina.

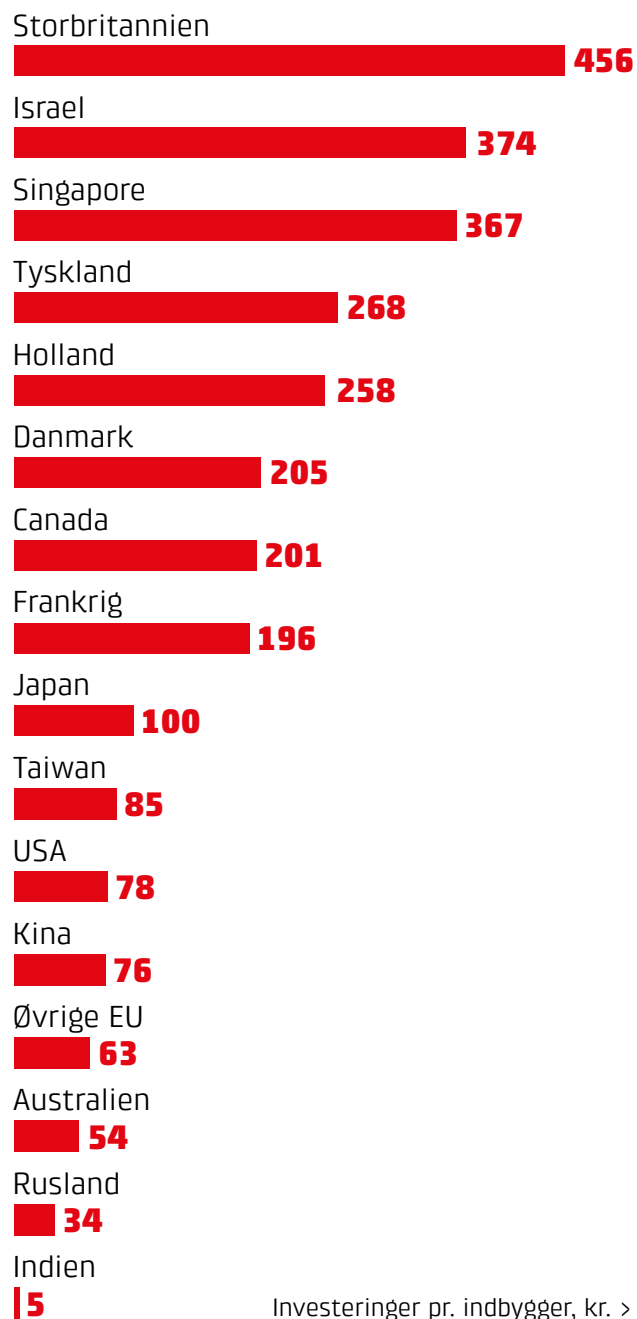


Investeringer, mia. kr. >

Kilder: Beregninger af Teknologisk Institut bygger på A. McKinsey & Company. (2023). Quantum Technology Monitor. McKinsey & Company. B. Uddannelses- og Forskningsministeriet. (2023). Strategi for Kvanteteknologi. København: Uddannelses- og Forskningsministeriet. C. Department for Science, Innovation & Technology (2023). National Quantum Strategy. London: Department for Science, Innovation & Technology. D. PR Newswire (2021). E. Egen desk research.

AKKUMULEREDE STATSINVESTERINGER I KVANTETEKNOLOGI PR. INDBYGGER

Per indbyggertal bliver statsinvesteringer vendt på hovedet. Storbritannien er netop udkommet med en ambitiøs strategi i marts 2023 for kvanteteknologi frem mod 2034.



Investeringer pr. indbygger, kr. >

Kilder: Beregninger af Teknologisk Institut bygger på A. McKinsey & Company. (2023). Quantum Technology Monitor. McKinsey & Company. B. Uddannelses- og Forskningsministeriet. (2023). Strategi for Kvanteteknologi. København: Uddannelses- og Forskningsministeriet. C. Department for Science, Innovation & Technology (2023). National Quantum Strategy. London: Department for Science, Innovation & Technology. D. World Bank (2023). World Bank Open Data. Hentet fra data.worldbank.org. E. Egen desk research.

“

FORSKNING ER AFGØRENDE FOR DANSK POSITION

DANSK INDBLIK: KVANTETEKNOLOGI I DANMARK

Kvanteteknologi har i Danmark fået stor opmærksomhed både som et dansk forskningsfelt og som et kommercielt vækstområde. Kvanteteknologi er i en tidlig teknologisk modenhedsfase, hvorfor praktisk anvendelse – kommercialisering af kvanteteknologi – i vid udstrækning ligger op til 10 år ude i fremtiden.

En udbredt tankegang er, at Danmark især kan positionere – og har positioneret – sig inden for forskning som et fundament for at forstå og bruge kvanteteknologi. Og at det er gennem forskning og nyttiggørelse af resultaterne af kvanteforskningen, at det danske erhvervsliv – det danske økosystem for kvanteteknologi – tager kvanteteknologien i anvendelse, også omtalt som nyttiggørelse gennem "technology push".

En sådan lineær opfattelse af udvikling og nyttiggørelse af en ny teknologi som kvanteteknologi tegner dog et forsimplet billede af de udviklingsprocesser, som leder til praktisk anvendelse og nyttiggørelse af teknologien. Vi ser allerede nu, at nogle især større ressourcestærke virksomheder går ind i udvikling af kvanteteknologiske løsninger, som retter sig mod praktisk eller kommerciel anvendelse muliggjort af banebrydende kvanteforskning og drevet af behov og muligheder for at lancere nye teknologiske løsninger til markedet, også omtalt som "market pull".

Markedet for kvanteteknologi begynder således at udvikle sig med forventninger om en betydelig vækst, som vist i forrige afsnit. Når kvanteteknologien er mere moden, er et estimat – baseret på den historiske udvikling inden for andre nye, banebrydende teknologier – at 80 % af værditilvæksten vil være blandt virksomheder, som bruger kvanteteknologi i deres forretning (slutbrugere), mens 20 % vil ligge hos teknologileverandørerne (Jean-François Bobier, 2021). Og i et stort og voksende marked vil det være interessant for Danmark og danske virksomheder at få del i det marked, hvor værditilvæksten er størst, hvilket også reflekteres i den danske strategi for kvanteteknologi (Regeringen, 2023).

Forskning i kvanteteknologi og kvanteteknologisk udvikling er afgørende, og som vist har Danmark allerede en stærk position, når det gælder forskning. Samfundsøkonomisk tegner de store gevinster sig ved at trække virksomheder ind i udnyttelsen af kvanteteknologiske løsninger. Ved at trække virksomhederne med så tidligt som muligt vil det

ikke bare kvalificere udviklingen af kvanteteknologi, men også kvalificere danske virksomheder til at være en del af det nye marked for kvanteteknologi og drage nytte af de nye teknologier.

Sigtet med dette afsnit er at diskutere værdien af og ikke mindst, hvordan vi kan opnå en stærk involvering af erhvervslivet og andre brugere af kvanteteknologi i udviklingen af kvanteteknologiske løsninger. Fokus vil især være på økosystemet omkring kvanteteknologi og mulighederne for at styrke forskning og især innovation til gavn for kommerciel udnyttelse af kvanteteknologi. Afsnittet bygger på eksisterende analyser, udredninger og strategier for kvanteområdet.

Science – kvanteforskning i Danmark

Dansk forskning inden for kvanteteknologi har international høj standard og nyder international anerkendelse, både når man måler på publicering og uddannelsesindsats¹⁷ (Uddannelses- og Forskningsstyrelsen, 2022). Det forskningsmæssige fokus har især været på grundforskning, og der vil også fremover være et behov for grundforskning (Uddannelses- og Forskningsstyrelsen, 2022). En mere kvalitativ vurdering af kvanteforskningen i de nordiske lande fremhæver også Danmark, men der må ikke ses bort fra, at der i de for Danmark sammenlignelige nordiske lande også sker en opgradering inden for forskning i kvanteteknologi (Dargan, Quantum Computing in Scandinavia, 2023).

Den kvanteteknologiske forskning i Danmark drives især af Niels Bohr Institutet/Københavns Universitet, DTU og Aarhus Universitet. Den danske kvanteforskning er præget af grundforskning, hvor samarbejdet med udenlandske universiteter spiller

en stor rolle. Hertil kommer, at universiteterne også har et samarbejde med især store internationale virksomheder, som fx IBM, Microsoft og KPMG, som tillige har udviklingsafdelinger i Danmark samt små specialiserede virksomheder fx spin-outs fra universiteterne. Interessenter i det danske økosystem for kvanteteknologi og forskning anerkender værdien af grundforskning, men står samtidig til lyd for et behov for øget strategisk forskning¹⁸ og dermed mere anvendelsesorienteret forskning og innovation (Uddannelses- og Forskningsstyrelsen, 2022).

Anerkendelsen af dansk kvanteforskning kommer tillige stærkt til udtryk ved etableringen af flere forsknings- og udviklingscentre inden for kvanteteknologi, hvor sigtet er at nå frem til praktiske og anvendelige løsninger, fx for Novo Nordisk Foundation Quantum Computing Programme, hvor en fuld funktionsdygtig kvantecomputer forventes færdig i 2034.

I forbindelse med Novo Nordisk Foundation Quantum Computing Programme udtaler Henrik C. Wegener, rektor på Københavns Universitet, at *"alle dele af samfundet vil på sigt få gavn af de nye muligheder, som vi nu åbner hoveddøren til. Det gælder fx den grønne omstilling, cyber-sikkerhed og udviklingen af nye lægemidler. Bevillingen sikrer, at Københavns Universitet også fremover bliver blandt verdens førende institutioner inden for kvanteforskning. Med sin størrelse, ambition og tværfaglige samarbejde i Danmark og internationalt giver den nye satsning forskerne mulighed for at sætte skub i udviklingen af kvanteteknologien"*. (Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet, 2022).

Selvom vi udvikler kvantecomputere, som kan være brugbare inden for 10-15 år, er der bred enighed om, at der er enorme udfordringer forbundet med at udvikle en kvantecomputer, hvilket bl.a. handler

¹⁷ se også ovenstående afsnit om Science

¹⁸ Strategisk forskning er defineret ved, at forskning skal bidrage til at løse specifikke teknologiske eller samfundsmæssige udfordringer (Forskningsråd, 2013)

FORSKNINGSCENTRE VED DANSKE UNIVERSITETER

Villum Centre of Excellence for the Mathematics of Quantum Theory (QMATH) ved Københavns Universitet, Institut for Matematiske Fag (Centre for the Mathematics of Quantum Theory, u.d.).

BigQ - Center for Macroscopic Quantum States ved DTU Fysik (bigQ - Center for Macroscopic Quantum States, u.d.)

Centre for Silicon Photonics for Optical Communications (SPOC) (Centre for Silicon Photonics for Optical Communications (SPOC), u.d.) ved DTU Electro.

Solid-state quantum simulators for biochemistry (SolidQ) ved Københavns universitet, Niels Bohr Instituttet (Solid-state quantum simulators for biochemistry (SolidQ), u.d.).

Center for Complex Quantum Systems (CCQ) ved Aarhus Universitet, Institut for Fysik og Astronomi (Center for Complex Quantum Systems (CCQ), u.d.).

UDVIKLINGS- OG FORSKNINGSCENTRE

Nato DIANA Quantum Centre består dels af et acceleratorsite med fokus på forretningsudvikling for startups, der er drevet af BioInnovation Institute Deep Tech Lab – Quantum, og dels af fire testcentre vedr. Quantum Material Fabrication og Quantum Material Characterization. Disse er forankret på Niels Bohr Instituttet og støttet af Københavns Universitet, Danmarks Tekniske Universitet, Aarhus Universitet og Danmarks Nationale Metrologiinstitut. Siget er at bringe forskere, entreprenører og investorer sammen om udvikling af innovative løsninger baseret på dual use. (NATO Diana Quantum Centre, u.d.).

Novo Nordisk Foundation Quantum Computing Programme, placeret på Niels Bohr Instituttet, KU, har til formål at udvikle og bygge kvantehardware og algoritmer til en kvantecomputer, som kan løse væsentlige problemer inden for life science. En fuld funktionsdygtig kvantecomputer forventes færdig i 2034. Programmet forventer at involvere et stort internationalt økosystem af verdens førende universiteter og industrier, bl.a. forskere fra Massachusetts Institute of Technology (USA), Delft University of Technology (Holland), Danmarks Tekniske Universitet, Aarhus Universitet og University of Toronto (Canada). (Novo Nordisk Fonden, 2022).

om opskalering. Nok har Google, Microsoft, IBM og Kina udviklet nogle af de første versioner af kvantecomputere i egne laboratorier, men de ikke er klar til en industriel opskalering. Og det er noget helt andet end forskning, da "en opskalering af kvantecomputeren er næsten som at banke en helt ny industri op. Der er ikke bare brug for kvantefysikere, der forsker i kvantebits, der også brug for eksperter i materiale- og computervidenskab, en hær af ingeniører og meget mere" (Sonne, 2022).

Teknologiudvikling i Danmark

De første udbydere af kvanteteknologiske løsninger har gjort deres entre på det danske marked. Det drejer sig hovedsagelig om relativt mindre virksomheder – teknologiudviklere - der udvikler delkomponenter eller algoritmer (software) til kvantecomputere.

En række virksomheder, som NKT Photonics A/S, Sparrow Quantum ApS, ACCELINK DENMARK A/S, Qdevil ApS, SiPhotonIC ApS og Beamfox Technologies ApS, udvikler komponenter til kvantecomputere baseret på dyb materialeteknologisk viden. Der er dog forskel på disse materialer. Det spænder over "komponenter til telecom-området (fx Accelink) ... til lasere til brug i den optiske kvantecomputer (NKT Photonics) til QDevils såkaldte Qcage, der er en "holder" til en kvanteprocessor i kvantecomputeren. Hovedsageligt udvikles komponenter relateret til kvanteteknologi, men en vigtig pointe er, at flere af komponenterne også kan anvendes i andre dele af teknologien, som fx kvantekommunikation og kvantesensorer" (Erhvervsstyrelsen, 2022).

Udover de ovennævnte komponent-virksomheder er der også udbydere, der udvikler algoritmer, som fx Molecular Quantum Solutions ApS, der arbejder med "algoritmeområdet, idet de udnytter kvan-

TDC undersøger kommerciel udnyttelse af kvanteteknologi – eksempel på slutbruger

Et eksempel på begyndende kommerciel høst af fordele ved kvanteteknologi ses hos TDC Net, som sammen med Kvantify undersøger mulighederne for at anvende kvantesimulering til at overskue, hvad ændringer i mobilnettet med 4.000 master og 20.500 kilometer fibernet betyder. Kvantevirksomheden Kvantify hjælper med at udvikle software, der blandt andet kan anvendes på de kvantecomputere, som er under udvikling hos IBM, Amazon eller Microsoft. TDC Net forklarer i Berlingske Tidende, at de allerede nu bygger softwaren til kvantecomputeren og tester den, så "bearbejdet" er gjort, når teknologien er klar. TDC understreger vigtigheden af

at få udviklet teknologiske talenter (Breinstrup, 2023).

Den kommercielle gevinst ligger stadig år ud i fremtiden, og kun de store virksomheder har mulighed for at afsøge en teknologimulighed på samme måde som TDC. Det er et godt eksempel på en slutbruger virksomhed, der undersøger anvendelsesmuligheder med henblik på at udnytte mulighederne, når de er der. Mindre virksomheder har ikke samme mulighed, men kunne få mulighed for at få rådgivning og eksperthjælp i den eksisterende videns infrastruktur, hvis en sådan rådgivnings- og eksperthjælp bliver opbygget i tide.

teteknologiske principper til simuleringer inden for Pharmaindustrien". Andre virksomheder med fokus på udvikling af algoritmer er KPMG, Trifork, Microsoft, IBM samt Kvantify ApS og Qpurpose (Erhvervsstyrelsen, 2022).

Inden for kommunikation er der også udviklere, der tilbyder kryptering som Zybersafe ApS og Dencrypt A/S. Det er også her, man finder potentielle anvendere eller slutbrugere af kvantekryptering, som Danske Bank, TDC Net og EnergiNet (Erhvervsstyrelsen, 2022).

Med tanke for kvanteteknologiens anvendelsesmuligheder er der også andre (potentielle) slutbrugere som fx Novo Nordisk (udvikling af medikamenter), Ørsted (placering af havvindmøller og optimering af strømproduktion) og Frogne (optimering af transport og logistik).

Marked for anvendelse af kvanteteknologi

Et dansk marked for anvendelse af kvanteteknologi og kvanteteknologiske løsninger er endnu meget umodent. Det danske spirende marked er i dag i høj grad karakteriseret ved et marked for teknologi-udvikling. Private virksomheder – hvoraf stort set alle er spin-outs fra universiteterne – udvikler nye løsninger (komponenter og service, software og kvantecomputere), som de er på vej ud i markedet til (potentielle) slutbrugere med for at afprøve de kommercielle muligheder ved kvanteteknologi.

Markedet er således fortsat umodent forstået ved, at markedet mere er kendetegnet ved prækommercielle investeringer end egentligt salg. En karakteristik af markedet peger på tre hovedindtægtskilder (Danish Quantum Community, 2022):

- Offentlige og private fonde samt venturekapital investerer i teknologileverandører og deres FoU (en dominerende indtægtskilde).

- Indtægter fra salg af produkter og services fra teknologileverandører til slutbrugere (en lille indtægtskilde).
- Investeringer i anvendelsesorienteret forskning blandt slutbrugere for at udvikle teknologiske løsninger til eget brug og til at fremme mulighederne for at nyttiggøre kvanteteknologi (en lille indtægtskilde).

På sigt er forventningen, at kvanteteknologi vil have afgørende betydning for mange sektorer, som tillige repræsenterer danske erhvervsmæssige styrkepositioner (Danish Quantum Community, 2022):

- Transport/logistik med henblik på optimering af ruteplanlægning og godstransport, reduktion af kuldioxid.
- Kommunikation med henblik på forbedret cybersikkerhed.
- Finans/fintech med henblik på præcis tidsstemping, porteføljeoptimering, risikovurdering, afsløring af svindel.
- Pharma med henblik på hurtig og effektiv udvikling af nye lægemidler samt klinisk afprøvning.
- Energi med henblik på effektivisering og optimering af elnettet og samspil med andre energiformer.
- Ingredienser med henblik på computerstyret syntese af nye enzymer/proteiner.
- Sensorer med henblik på udvikling og brug af kvantesensorer med højere følsomhed og dynamisk rækkevidde.

Flere af disse sektorer repræsenterer både flere store, internationalt markedsledende danske virksomheder og en underskov af SMV'er.

Konturerne af et økosystem for kvanteteknologi

Der er klare forventninger til, at markedet for kvanteteknologi vil ekspandere i det kommende årti, se ovenfor, og at Danmark har potentiale til at få en signifikant del af dette marked. Dette beror bl.a.



**DER ER STADIG RELATIVT FÅ
TEKNOLOGILEVERANDØRER
OG STARTUPS I DET DANSKE
ØKOSYSTEM**

på, at flere grundpiller – vitale rammebetingelser – i det kvanteteknologiske økosystem allerede i dag repræsenterer selvstændige styrkepositioner. Det drejer sig bl.a. om:

- Kvanteforskning ved danske universiteter.
- Uddannelse i kvanteteknologi.
- Industrielle miljøer, der støtter op om udvikling af økosystemet for kvanteteknologi gennem bl.a. Danish Quantum Community¹⁹ og flere erhvervsorganisationer.
- En offentlig forsknings- og innovationspolitik, der dog har en større vægt på forskning og innovation end på brug (eller kommercialisering) af den kvanteteknologiske forskning (Uddannelses- og Forskningsministeriet, 2023) og (Regeringen, 2023).

Ud over kvanteforskningen består det danske økosystem, i forhold til den egentlig kommercielle udnyttelse, af relativt få teknologileverandører og startups. Hertil kommer et antal større danske virksomheder inden for en række styrkepositioner, som afsøger (kommercielle) muligheder for at bruge kvanteteknologi:

- Teknologileverandører - en underskov er under udvikling, men der er stadig relativt få teknologileverandører og startups (spin-outs).
- Slutbrugere - få dominerende virksomheder inden for danske styrkepositioner udviser interesse for kvanteteknologiens muligheder.
- Udenlandske aktører udviser interesse for danske forskningsmæssige kvantekompetencer ved at placere udviklingscentre i Danmark.

Det bliver yderligere udfordret af en række andre trusler eller svagheder (Industriens Fond, KPMG og IT-Branchen, 2020):

- Relativt store investeringer i grundlæggende kvanteforskning og relativt svag kobling mellem forskning og kommercialisering har resulteret i få startups af teknologileverandører. Samtidig så

rapporten færre investeringer i innovation/anvendelsesorienteret forskning. Dette er en trussel for udvikling af en industri, der skal udvikle og levere kvanteteknologiske løsninger.

- Slutbrugere tøver med selv at være aktive i forhold til at udvikle og nyttegøre kvanteteknologi for i stedet blot at "følge med strømmen" ved at købe færdigudviklede kvanteteknologiske løsninger.

Selvom kvanteforskning står stærkt, må kommercialiseringen i slutbrugerleddet ikke overses. Dette hænger bl.a. sammen med, at kvanteteknologien fortsat er relativt umoden, dog med begyndende kommercielle anvendelsesmuligheder inden for kommunikation og sensorer. For private investorer er tidshorizonten lang, og som vi har set internationalt, kan der være en opbremsning i investeringslysten i opstartsvirksomheder inden for kvanteteknologi, og investeringslysten hos slutbrugerne vil, med den lange tidshorizont in mente, ikke være større.

Industrien på banen for udnyttelse og kommercialisering af kvanteteknologi

Som et svar på mange af de udfordringer som kvanteforskning og kommercialisering af forskning står overfor, er der i den nationale strategi for kvanteteknologi opstillet en række initiativer for udvikling af kvanteområdet i Danmark. Den seneste er den nationale kvantestrategi - del 2 (Regeringen, 2023).

I den nationale strategi er forskningen fortsat højest prioriteret. I perioden 2023-2027 er der afsat 1 mia. kr. til forskning, mens der er afsat 200 mio. kr. til at styrke kommercialisering, sikkerhed og internationalt samarbejde (Uddannelses- og Forskningsministeriet, 2023) og (Regeringen, 2023). Den nationale strategi på kvanteområdet rækker ud mod anvendt forskning og innovation gennem øget

¹⁹ www.dqc.dk

samspil med erhvervslivet gennem use cases og demonstrationsprojekter samt test og demonstrationsfaciliteter. Innovationsfonden har i efteråret 2023 også haft åbent for opslag "Quantum Technologies Call" med sigte på at investere minimum 116 millioner kr. i både grundlagsskabende kvanteforskning og partnerskaber med virksomheder inden for alle kvanteteknologiske retninger.

Selvom sigtet er at modne og kommercialisere dansk kvanteteknologi, er programmet også åbnet for relativt umodne teknologier og kræver ikke nødvendigvis virksomhedsdeltagelse (Innovationsfonden, 2023) Alt i alt er der mange rigtig gode initiativer, men industrien kunne med fordel i højere grad blive involveret i at udvikle de potentialer, som kvanteteknologien giver for dansk industri og ikke mindst for det danske samfund.

Vi har allerede indledningsvist påpeget, at kvanteteknologi favner både teknologisk og markeds-mæssigt bredt. Derfor er det også en strategisk overvejelse, hvor Danmark kan stå stærkest. Ud fra analyser af IKT-sektorer, vil vi gøre den antagelse, at det kvanteteknologiske marked kan udvikle sig til tre overordnede gensidigt afhængige markedsbaserede værdikæder – se side 49.

Kvanteteknologi er en kapitalintensiv industri, og mange større lande kan investere langt mere i forskning og kommercialisering end Danmark. Her ved vil Danmark næppe have mulighed for at spille nogen afgørende rolle som industrielt ledende i introduktion af fx kvantecomputere. Derfor bliver det afgørende at satse på kvanteteknologiske områder, som kan løfte danske erhvervsmæssige styrkepositioner (scope), samtidig med at Danmark udvikler det industrielle miljø for udvikling og produktion af kvanteløsninger til de danske styrkepositioner, som er internationalt konkurrencedygtige (scale).

Det er tidligere anslået, at 80 % af værditilvæksten på lang sigt vil ske i virksomheder, som bruger kvanteteknologi i deres forretning (slutbrugere), mens 20 % vil ligge hos teknologileverandørerne. Så selvom forskning og teknologiudvikling globalt set spiller en vital rolle i udvikling af kvantebaserede løsninger, så er der en god grund til at involvere de slutbrugerende industrier i udviklingen af kvanteteknologi, da de kan medvirke til gøre teknologiudviklingen markedsnær og brugbar, samtidig med at det vil fremme kommercialiseringen.

I den nationale strategi for kvanteteknologi er der også ansatser hertil (Regeringen, 2023), fx med initiativet om at aktivere de danske styrkepositioner. Initiativet lægger op til, at virksomhederne (slutbrugeren) gennem demonstrationsprojekter og use case skal få øget kendskab til nye teknologiske løsninger, som teknologileverandører præsenterer, samt om kvanteteknologiens anvendelsesmuligheder.

Det er imidlertid vigtigt at sikre, at kvanteteknologien bliver optaget og udnyttet af slutbrugerne. Det er her den største værditilvækst vil være på lang sigt. I litteraturen tales om "Valley of death" (se fx (IESE INSIGHT, 2020) (European Innovation Council, 2023), (UK Government, Department for Science, Innovation & Technology, 2023), som den risiko der opstår, når en ny teknologi understøttet af offentlige investeringer skal flyttes fra forskning og videre til kommerciel brug drevet af private investeringer. Overgangen kan være træg, hvis kun den yderste frontlinje af private aktører tør binde an med helt ny teknologi, og investeringerne i udnyttelsen risikerer derfor at blive for små. Der er mange innovationer, som slipper over denne "dødens dal" for innovation, og mange andre der ikke gør. Med andre ord er der en risiko for, at vi Danmark laver forskning i verdensklasse, mens det i sidste ende er virksomheder i andre lande, som løber med de økonomiske frugter.²⁰

²⁰Udfordringen er også kendt som det Europæiske Paradox (Annamaria Conti, 2011), hvor EU halter efter USA, når det gælder at konvertere akademiske resultater til økonomiske resultater. Contis artikel viser, at der udtages lige så mange IP rettigheder, men i længden er indtjeningen ringere i EU end i USA.

VÆRDIKÆDER INDEN FOR KVANTETEKNOLOGI

Forskning, udvikling og salg af kvanteløsninger

Specifikke kvanteløsninger



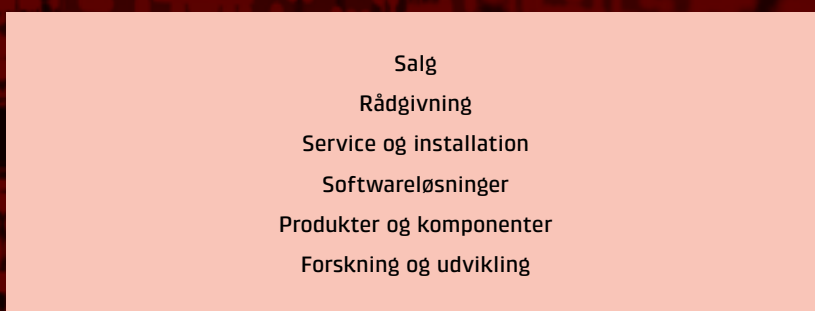
Kvanteløsninger eller produkter som er udviklet eller tilpasset til brug inden for specifikke sektorer med henblik på at løse specifikke opgaver eller opfylde specifikke behov. Disse specifikke kvanteløsninger vil bygge oven på eller videre på de fundamentale kvanteløsninger og de generiske kvanteløsninger.

Generiske kvanteløsninger



Kvanteteknologiske løsninger eller produkter der i sig selv kan anvendes uden at være udviklet til anvendelse i en specifik industriel sammenhæng eller sektor, fx inden for kommunikation, simulation eller sensorer. Hertil skal tilføjes, at kommunikation, simulation og sensorer kan forventes at være tilgængelige før kvantecomputere.

Fundamentale kvanteløsninger



Produkter og løsninger hvis funktionalitet er udviklet med henblik på brug inden for mange områder. Her kan være tale om delprocesser eller løsninger, som kan anvendes flere steder inden for kvanteteknologien, fx samlet i en kvantecomputer.

Kilde: Teknologisk Institut

Langt de fleste patenter i Europa forbliver kommercielt udnyttede og inaktive, selvom om forskningen er i verdensklasse. Dertil kommer, at der ikke er garanti for, at nytten af forskningen kommercialiseres og udnyttes i samme land, som oprindeligt foretog investeringerne.

Med de danske frontløbere på forskningssiden har Danmark en fordel, der bør kunne udnyttes til en hurtigere kommerciel udnyttelse af resultaterne. Derfor er det vigtigt, at ikke kun få slutbrugere, som nu, men en langt bredere kreds af slutbrugere aktiveres og interesserer sig for mulighederne og får den nødvendige hjælp og støtte. Også der hvor den praktiske anvendelse og nytte ligger flere år ud i fremtiden.²¹ Slutbrugere vil langt hurtigere kunne bidrage med at trække kvanteteknologien i retning af nyttiggørelse og kommercialisering end en klassisk "technology push" drevet af universiteterne. En strategisk ramme for slutbrugere er præsenteret i tekstboksen.

I innovationspolitisk sammenhæng kan denne tilgang udfoldes således, at enkelte virksomheder eller grupper af slutbrugere inden for danske styrkepositioner får i opdrag at udvikle og udforske mulig kommerciel nyttiggørelse af kvanteteknologi, så langt det er muligt inden for en præ-kompetitiv ramme.

Sådanne udviklingsprojekter skal have adgang til såvel teknisk som kommerciel rådgivning, bl.a. ved at kunne trække på innovations- og teknologicen- tre samt forskere. Her vil det tillige være af stor værdi at inddrage eller trække på international erfaring, fx teknologi og business cases.

Endelig er kompetenceudvikling og efteruddannelse også af vital betydning for slutbrugerne, så sådan-

ne tilbud til virksomhederne bør også gøres tilgængelige, der hvor de typisk henter deres videre- og efteruddannelsestilbud.

Strategi for udvikling og nyttiggørelse af kvanteteknologi for slutbrugere

"Companies in multiple industries likely to benefit from quantum computing should start now with an impact of quantum (IQ) assessment. It will map potentially quantum-advantaged solutions to issues or processes in their businesses (portfolio optimization in finance, for example, or simulated design in industrial engineering).

They also should assess the value and costs associated with building a quantum capability. Depending on the path to value and the timeline, end users may benefit from the IP, skills development, and implementation readiness that come from partnering with a tech provider.

Companies in affected industries should also incorporate quantum computing into their digital transformation roadmaps."

Kilde: Jean-François Bobier, 2021.

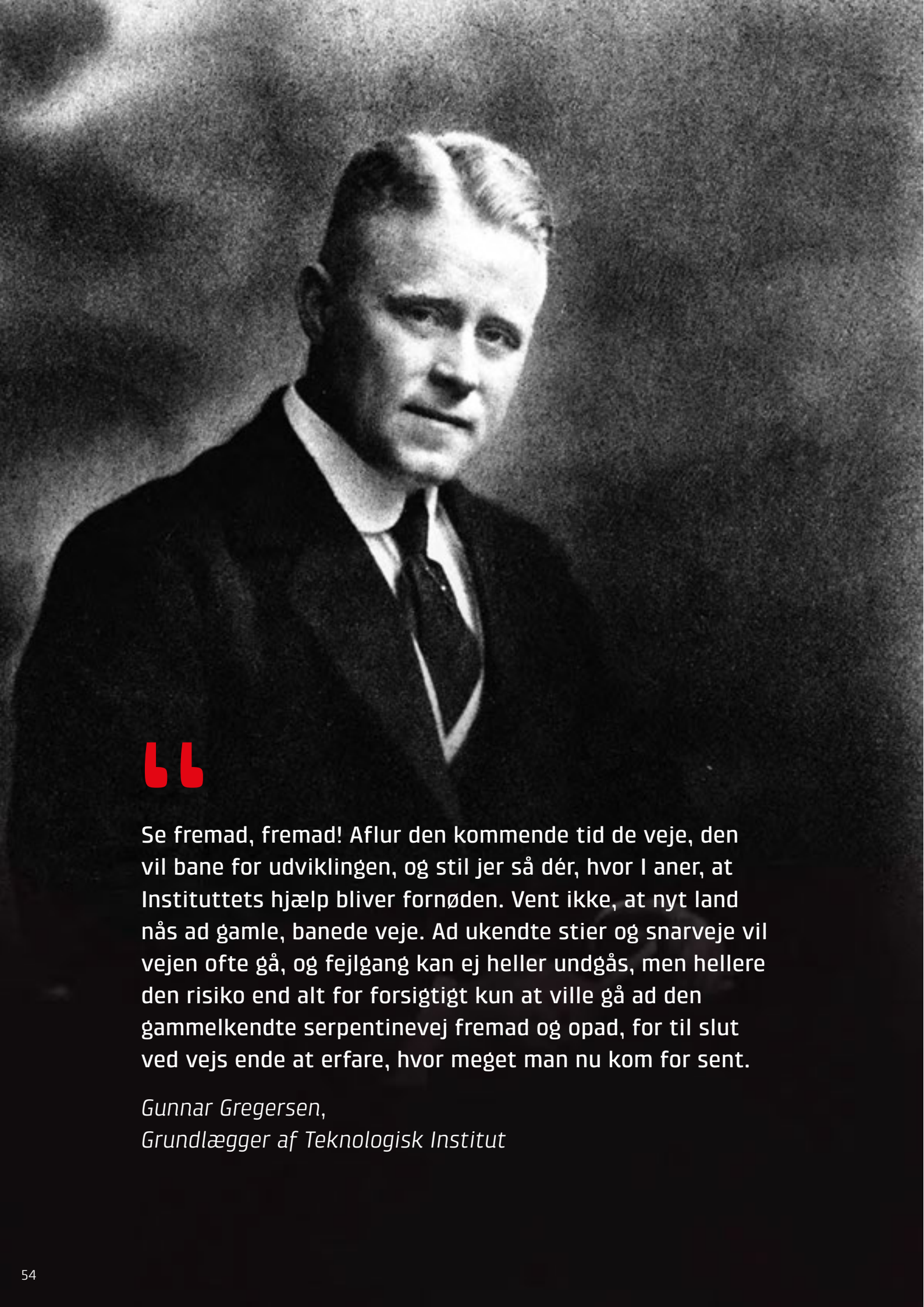
²¹ Den britiske "National Quantum Strategy" (UK Government, Department for Science, Innovation & Technology, 2023) anser på samme måde Storbritannien som ledende inden for kvantecomputing, og satser på forskning, udvikling af kvantesektoren og ikke mindst på at "prepare our wider economy for the quantum revolution and ensure that UK leads internationally", og som led i strategien i de kommende ti år vil Storbritannien understøtte brugen på mange måder, herunder udvikle acceleratorprogrammer, som sikrer kommercialisering og industrialisering og rækker ud til slutbrugerne ved at fokusere på systemintegration, applikationer og real-world demonstrations.

BIBLIOGRAFI

- Annamaria Conti, P. G. (2011). Is the US outperforming Europe in university technology licensing? A new perspective on the European Paradox. Research Policy, 1. doi: doi.org/10.1016/j.respol.2010.10.007
- Apogee Instruments. (2023). Quantum (PAR) Sensors / Meters. Retrieved from Apogee Instruments: www.apogeeinstruments.com/quantum
- bigQ - Center for Macroscopic Quantum States . (n.d.). bigQ - Center for Macroscopic Quantum States. Retrieved from www.bigq.fysik.dtu.dk/about-bigq
- Bosch. (2023). Quantum technologies: Bosch aims to use sensors to take a leading position. Retrieved Oktober 5, 2023, from www.bosch-presse.de/pressportal/de/en/quantum-technologies-bosch-aims-to-use-sensors-to-take-a-leading-position-258816.html
- Boston Consulting Group. (2023). Making Sense of Quantum Sensing. Retrieved from www.bcg.com/publications/2023/making-sense-of-quantum-sensing
- Breinstrup, T. (2023, September 25). Kvantecomputere skal sikre den bedste mobil og internetdækning. Retrieved from Berlingske.
- Byford, S. (2021, April 13). Samsung's Galaxy Quantum 2 has quantum cryptography built in. Retrieved from The Verge: www.theverge.com/2021/4/13/22381321/samsung-galaxy-quantum-2-announced-qrng-cryptography-chip
- CB insights. (2022, Januar 31). Google In Quantum: How The Tech Giant Is Competing For The Next Era Of Computing. Retrieved from CB insights: www.cbinsights.com/research/google-big-tech-quantum
- Center for Complex Quantum Systems (CCQ). (n.d.). Center for Complex Quantum Systems (CCQ). Retrieved from phys.au.dk/ccq/about
- Centre for Silicon Photonics for Optical Communications (SPOC). (n.d.). Centre for Silicon Photonics for Optical Communications (SPOC). Retrieved from spoc.dtu.dk/research
- Centre for the Mathematics of Quantum Theory. (n.d.). Retrieved from Centre for the Mathematics of Quantum Theory: qmath.ku.dk
- Danish Quantum Community. (2022). Danish quantum agenda 2022.
- Dargan, J. (2021, April 20). 9 Leading Chinese Quantum Computing Companies [2022]. Retrieved from The Quantum Insider: thequantuminsider.com/2021/04/20/9-companies-leading-the-quantum-technologies-race-in-china
- Dargan, J. (2023, September 13). Quantum Computing in Scandinavia. Retrieved from The Quantum Insider: Quantum Computing In Scandinavia
- Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet. (2022, September 21). Milliardinvestering skal udvikle Danmarks første kvantecomputer. Retrieved from Københavns Universitet: science.ku.dk/presse/nyheder/2022/milliardinvestering-skal-udvikle-danmarks-foerste-quantecomputer
- Erhvervsstyrelsen. (2022). Kortlægning af økosystemet for kvanteteknologi i dansk erhvervsliv. København: Erhvervsstyrelsen.
- European Commission. (n.d.). Quantum - Shaping Europe's digital future. Retrieved from Digital Strategy EU: digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/quantum
- European Innovation Council. (2023). Backing Visionary entrepreneurs. Retrieved from t.ly/8I8A7
- Fermilab. (n.d.). Quantum communication. Retrieved from quantum.fnal.gov/research/quantum-communication-networking
- Fortune Business Insight. (2023, Juli). Quantum Computing Market. Retrieved from Fortune Business Insight: www.fortunebusinessinsights.com/quantum-computing-market-104855
- Global Times. (2023, Juni 8). China's newest quantum computer Wukong is expected to launch in July: report. Retrieved from Global Times: www.globaltimes.cn/page/202306/1292169.shtml

- IBM. (n.d.). The IBM Quantum Development Roadmap. Retrieved August 29, 2023, from IBM. COM: www.ibm.com/quantum/roadmap
- IESE INSIGHT. (2020). Corporate venturing: a bridge for Europe's Valley of Death. Business School, University of Navarra. Retrieved from www.iese.edu/insight/articles/corporate-venturing-europe
- Industriens Fond, KPMG og IT-Branchen. (2020). Quantum technology in Denmark. The case for Danish investment in quantum technology.
- Innovationsfonden. (2023). Innovationsfonden åbner for ansøgninger til kvante-projekter. Retrieved from www.innovationsfonden.dk/da/news-article/innovationsfonden-aabner-ansoegninger
- Jean-François Bobier, M. L. (2021). What Happens When 'If' Turns to 'When' in 'If' Turns to 'When' in. Boston Consulting Group.
- Kromann Reumert. (2023, Juni 2). Dansk kvantestartup sikrer rekordstor seed-investering på 31 mio. kr. Retrieved from Kromann Reumert: www.kromannreumert.com/nyheder/dansk-kvantestartup-sikrer-rekordstor-seed-investering-paa-31-mio-kr
- Kudle, M. (2023, September). Quantum Computing: Technologies and Global Markets to 2028. Retrieved from bcresearch.com: www.bcresearch.com/market-research-report/information-technology/quantum-computing-technologies-and-global-markets.html
- Kwon, K. (2023, June 25). China Reaches New Milestone in Space-Based Quantum Communications. Retrieved from Scientific American: www.scientificamerican.com/article/china-reaches-new-milestone-in-space-based-quantum-communications
- Market Research Future. (23). Market Research Future. Market Research Future. Retrieved from www.marketresearchfuture.com/reports/quantum-communication-market-12240
- Markets and Markets. (2023, Februar 3). Market Leaders- Top Quantum Computing. Retrieved from Markets and Markets: www.marketsandmarkets.com/ResearchInsight/quantum-computing-market.asp
- MarketsandMarkets. (n.d.). Quantum Computing Market. Retrieved from MarketsandMarkets: www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/quantum-computing-market-144888301.html
- McKinsey & Company. (2023). Quantum Technology Monitor. McKinsey & Company. Retrieved from www.mckinsey.com/-/media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/quantum%20technology%20sees%20record%20investments%20progress%20on%20talent%20gap/quantum-technology-monitor-april-2023.pdf
- Ministry of Foreign Affairs of Denmark. (2023, September 8). Denmark Just Opened a New MSc Programme in Quantum Information Science. Retrieved from Invest in Denmark: www.investindk.com/insights/denmark-just-opened-a-new-msc-programme-in-quantum-information-science
- Morrison, R. (2023, April 25). Investment in quantum technology hit a record \$2.35bn last year. Retrieved from Tech Monitor: www.techmonitor.ai/hardware/quantum/quantum-investment-2022
- NATO Diana Quantum Centre. (n.d.). Facilities and services. Retrieved from Københavns universitet: dianaq.ku.dk/opretional-units
- NKT Photonics. (n.d.). Quantum gravity sensing. Retrieved from NKTphotonics: www.nktphotonics.com/applications/quantum-nano-technology/quantum-gravity-sensors
- Novo Nordisk Fonden. (2022, September 21). Milliardinvestering skal udvikle Danmarks første fuldt funktionelle kvantecomputer. Retrieved from Novo Nordisk Fonden: www.novonordiskfonden.dk/nyheder/milliardinvestering-skal-udvikle-danmarks-foerste-fuldt-funktionelle-kvantecomputer

- P, J. (2023). Chinese Quantum Companies And National Strategy 2023. The Quantum Insider. Retrieved from www.thequantuminsider.com/2023/04/13/chinese-quantum-companies-and-national-strategy-2023
- QuTech. (2019). QuTech realises 'MRI on the atomic scale'. Retrieved from Qutech.nl: www.qutech.nl/2019/12/18/qutech-realises-mri-on-the-atomic-scale
- Regeringen. (2023). National strategi for kvanteteknologi. Del 2 - Kommercialisering, sikkerhed og internationalt samarbejde.
- RISE, S. T. (2023). Swedish Quantum Agenda. Vinnova.
- Salil Gunashekar, I. F.-O. (2022). Using Quantum Computers and Simulators in the Life Sciences - Current Trends and Future Projects. Rand Corp. / Novo Nordisk Foundation. Retrieved from www.rand.org/pubs/research_reports/RRA1899-1.html
- Solid-state quantum simulators for biochemistry (SolidQ) . (n.d.). Solid-state quantum simulators for biochemistry (SolidQ). Retrieved from nbi.ku.dk/english/research/quantum-optics-and-photonics/quantum-photonics/solid-state-quantum-simulators-for-biochemistry-solidq
- Sonne, F. G. (2022, Maj 7). Kvantecomputeren kan ændre vores verden radikalt! Men hvorfor er den så vild? Retrieved from Videnskab.dk: www.videnskab.dk/teknologi/kvantecomputeren-kan-aendre-vores-verden-radikalt-men-hvorfor-er-den-saa-vild
- Time. (2022, November 22). Quantum Design in the Cloud - Best Inventions of 2022. Retrieved from Time: www.time.com/collection/best-inventions-2022/6223403/coldquanta-albert
- Uddannelses- og Forskningsministeriet. (2023). Strategi for kvanteteknologi. Del 1 - Forskning og innovation i verdensklasse.
- Uddannelses- og Forskningsstyrelsen. (2022). Forskning på kvanteområdet. København: Uddannelses- og Forskningsstyrelsen.
- UK Government, Department for Science, Innovation & Technology. (2023). National Quantum Strategy. London. Retrieved from assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1142942/national_quantum_strategy.pdf
- US Gov. (2023). National Quantum Initiative Act. Retrieved from quantum.gov: www.quantum.gov
- Vantage Market Research. (2022). Quantum Sensors Market - Global Industry Assessment and Forecast. Vantage Market Research. Retrieved from www.vantagemarketresearch.com/industry-report/quantum-sensors-market-1551
- Vantage Market Research. (2023, Juli). Quantum Computing Market. Retrieved from Vantage Market Research: www.vantagemarketresearch.com/industry-report/quantum-computing-market-2163
- VentureRadar. (2023). Top Quantum communication Companies. Retrieved from www.ventureradar.com/keyword/Quantum%20communication
- World Economic Forum. (2022). State of Quantum Computing: Building a Quantum Economy. Geneva: World Economic Forum.
- Zhen, L. (2021, Januar 9). China's experiment in quantum communication brings Beijing closer to creating a hack-proof network. Retrieved from Yahoo!Finance.



Se fremad, fremad! Aflur den kommende tid de veje, den vil bane for udviklingen, og stil jer så dér, hvor I aner, at Instituttets hjælp bliver fornøden. Vent ikke, at nyt land nås ad gamle, banede veje. Ad ukendte stier og snarveje vil vejen ofte gå, og fejlgang kan ej heller undgås, men hellere den risiko end alt for forsigtigt kun at ville gå ad den gammelkendte serpentinevej fremad og opad, for til slut ved vejs ende at erfare, hvor meget man nu kom for sent.

*Gunnar Gregersen,
Grundlægger af Teknologisk Institut*

Tre hovedpointer

Danmark har en stærk position i dag, når det gælder kvanteteknologi. Det gælder både inden for forskning, teknologiudvikling og markedsinvesteringer.



Stærkere involvering af brugervirksomhederne

Virksomheder skal i højere grad have mulighed for at undersøge mulige anvendelser af kvanteteknologi, herunder en begyndende forberedelse af fx algoritmer, test og demonstration.



Adgang til rådgivning, test og demonstration af kvanteteknologi

Virksomheder skal have adgang til en innovationsinfrastruktur med en forståelse for både den teknologiske udvikling og virksomhedernes praktiske, forretningsmæssige virkelighed. Desuden skal de have mulighed for at teste de nye kvanteløsninger. Det kræver opbygning af infrastrukturen.



Udvikling af den kompetencemæssige base gennem uddannelse og efteruddannelse

Kvanteteknologisk viden og kompetencer til at udnytte teknologien må ikke kun være forankret i forskning, men også i den videnskabelige infrastruktur, herunder testfaciliteter, der er tæt på virksomhederne, samt naturligvis i virksomhederne selv.

Teknologisk Udsyn skaber klarhed i et komplekst landskab ud fra fakta om teknologi, marked, tendenser og kortlægning af aktører. Vi viser mulighederne for at styrke de danske virksomheders konkurrenceevne gennem innovation, samarbejde og investering i teknologi. Vi har som mål at vise vejen til en banebrydende, bæredygtig og økonomisk levedygtig fremtid.

Lad os bygge en bedre fremtid sammen!

Juan Farré,
Adm. direktør - Dansk Teknologisk Institut



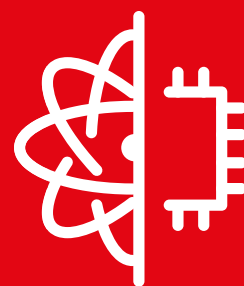


**TEKNOLOGISK
INSTITUT**

Teknologisk Institut er et uafhængigt og almennyttigt forsknings- og udviklingsinstitut, der er godkendt som GTS-Institut af Uddannelses- og Forskningsministeren.

Instituttet har siden 1906 arbejdet for at fremme udnyttelsen af teknologiske fremskridt til gavn for erhvervsliv og samfund gennem udvikling, rådgivning og formidling.

Vi opfylder dette formål ved at udvikle ny viden gennem forsknings- og udviklingsaktiviteter, som omsættes til teknologiske serviceydelser og stilles til rådighed på markedsvilkår.



www.teknologisk.dk