



Kvanteteknologi og kvanteteknologiens implikationer for national sikkerhed

DECEMBER 2024

Udarbejdet af PA Consulting
for Erhvervsstyrelsen



Indholdsfortegnelse

1.	English summary	1
2.	Sammenfatning	3
3.	Indledning	5
3.1.	Rammesætning	5
3.2.	Metode	5
4.	Kvanteteknologi og national sikkerhed	6
4.1.	Kvantecomputere	6
4.2.	Kvantekommunikation	8
4.3.	Kvantesensorer	9
4.4.	Muligheder for samspil med andre kritiske teknologier	11
4.5.	Opsummering	12
5.	Kortlægning af det danske kvantelandskab	12
5.1.	Offentlige myndigheder	13
5.2.	Forskningsinstitutioner	13
5.3.	Kvantenetværk og -organisationer	14
5.4.	Internationale aktører og samarbejder	15
5.5.	Kvantevirksomheder	15
5.6.	Opsummering	17
6.	Sammenligning med andre lande	17
6.1.	Nationale investeringer	18
6.2.	Uddannelse	19
6.3.	Forskning	19
6.4.	Virksomheder	21
6.5.	Patenter	22
6.6.	Opsummering	23
7.	Regulatoriske rammer	23
7.1.	Screening af udenlandske investeringer	23
7.2.	Kontrol med eksport af produkter	26
7.3.	Reguleringen i andre lande	29
7.4.	Analyse af gældende regulatoriske rammer	32
8.	Bilag	35
8.1.	Litteraturliste	35
8.2.	Respondenter	38

1. English summary

Quantum technology represents a new generation of technology with extensive potential, providing opportunities for significant advancements while also posing serious security risks. The technology is typically divided into three main categories – quantum computers, quantum communication and quantum sensors – each offering unique applications. Quantum computers are expected to be able to perform complex calculations far beyond the capacity of classical computers, with transformative potential in areas such as optimisation of logistics and the development of new materials and pharmaceuticals. Quantum communication enables secure communication channels capable of protecting sensitive data from espionage, while quantum sensors facilitate navigation without satellite coverage and enhance measurement precision in several areas, e.g. healthcare and climate research.

At the same time, it is essential to recognise that the same technological capabilities that enable this potential can also be exploited to threaten security. For example, quantum computers may enhance advanced simulations, while also being able to compromise encryption methods and critical infrastructure. This duality becomes tangible in the dual-use nature of the technology, where quantum technology can be used for both civilian and military applications. At present, no applications of quantum technology are assessed to be entirely immune to the risk of malicious use. According to Danish intelligence services, there is a real concern that foreign states may seek illegal access to advanced technologies developed in Denmark, posing threats to national security as well as Denmark's technological position and economic interests.

Compared to other nations, Denmark holds a solid position in the quantum domain, particularly in investments, education and research. The Danish quantum ecosystem, comprised of companies, research institutions and government entities, reflects a tradition of quantum technology being rooted in academia, with its industrial application still relatively recent. The industrial sector is gradually expanding and is expected to grow as the technology matures. This combination of robust research environments and a growing industrial sector provides a solid foundation for leveraging the opportunities created by quantum technology, both nationally and internationally.

The inherent duality of quantum technology – where its potential applications also present risks of misuse – necessitates a careful balance between its development and implementation. This duality also underscores the fact that regulatory safeguards are a requirement for the advancement of Danish quantum technology. Protection and promotion of quantum technology are therefore closely interlinked, with regulation playing a central role in safeguarding national security interests while fostering responsible use of the technology. It is also important to ensure that the regulation strikes the right balance between protection and the need to promote innovation and growth, enabling Danish companies and research environments to compete in the global market.

Regulatory frameworks monitoring and restricting certain forms of economic activity and technology transfer may, however, also pose certain challenges for Danish quantum companies. These challenges could include compliance with complex or resource-demanding requirements. Danish quantum companies might also experience casework time that is longer than expected, affecting their ability to respond quickly to market opportunities. Regulation will inevitably impose some burdens on businesses. A certain level of regulatory burden is an unavoidable reality – and a condition that also exists in other countries, strengthening security across borders. To support and promote the realisation of the potential of quantum technology for the benefit of society, it is pertinent to ensure that regulation is designed and administered in a way that accommodates the needs of businesses as much as possible and takes future technological breakthroughs into account. This is particularly important when considering the expected increase in export control and investment screening applications as quantum technology matures and its application potential is realised.

This leads to five overarching recommendations for enhancement:

1. **Continuous regulatory adaptation:** Explore options for establishing mechanisms to continually update the relevant legislation, such as establishing an interdisciplinary expert group to monitor technological advancements and provide strategic advice on necessary regulatory adjustments. This approach could help ensure that the regulation maintains an appropriate balance between security and innovation in response to quantum technology's development.
2. **Increased transparency in rules, requirements and processes:** To help businesses navigate regulatory frameworks more effectively, opportunities to enhance transparency could be explored. This might include easily accessible guidance and informational materials tailored specifically to quantum companies. It could also include advisory and training initiatives to assist the companies in meeting legal and security requirements. Increased transparency is considered likely to strengthen businesses' ability to act swiftly and accurately in response to emerging market opportunities.
3. **Enhanced dialogue between authorities and the quantum industry:** Explore the potential for establishing closer, ongoing dialogue between government authorities and the industry to address practical challenges in implementing the regulation. This could involve creating permanent forums (or leveraging existing ones) or structured feedback mechanisms. Strengthened dialogue is likely to help ensure that regulation and its enforcement is functioning effectively without being unnecessarily burdensome. This could be in the form of facilitated experience sharing on how to implement legal and security requirements into business operations. Enhanced dialogue could also provide input on necessary regulatory adaptation (cf. Recommendation 1) and contribute to greater transparency (cf. Recommendation 2).
4. **Ensuring an effective case processing level:** Quantum technology is both a novel and a complex area, and its regulatory landscape is also relatively new, which may pose administrative challenges. Government authorities could consider whether and how the current level of case processing and addressing security risks can be maintained – and potentially enhanced – in anticipation of an expected increase in export control and investment screening applications from quantum companies.
5. **Full harmonisation of EU regulation:** Actively advocate for full harmonisation of investment screening and export controls at EU level. Common standards and practices in these areas are considered likely to reduce competitive disparities and contribute to a stronger, more effective protection of quantum technology across borders.

2. Sammenfatning

Kvanteteknologi repræsenterer en ny generation af teknologi med omfattende potentiale, der rummer mulighed for væsentlige fremskridt og alvorlige sikkerhedsrisici. Teknologien opdeles typisk i tre hovedkategorier – kvantecomputere, kvantekommunikation og kvantesensorer – som hver især tilbyder unikke anvendelsesmuligheder. Kvantecomputere forventes at kunne udføre komplekse beregninger, der overstiger kapaciteten for klassiske computere, hvilket kan transformere områder som logistikoptimering og udviklingen af nye materialer og lægemidler. Kvantekommunikation åbner for ultrasikre kommunikationskanaler, der kan beskytte følsomme data mod aflytning, mens kvantesensorer kan muliggøre navigation uden satellitdækning og forbedre præcisionen af målinger i alt fra sundhedssektoren til klimaforskning.

Samtidig er det vigtigt at anerkende, at de samme teknologiske egenskaber, der kan skabe dette potentiale, også kan misbruges til at true vores sikkerhed. Eksempelvis kan kvantecomputere styrke avancerede simuleringer, men de kan også anvendes til at bryde krypteringsmetoder og kompromittere kritisk infrastruktur. Denne dualitet bliver konkret i teknologiens dual use-karakter, hvor kvanteteknologi kan anvendes til både civile og militære formål. På nuværende tidspunkt vurderes der ikke at være nogen anvendelsesområder inden for kvanteteknologi, der er fuldstændig immune over for risikoen for ondsindet udnyttelse. Ifølge de danske efterretnings-tjenester er der begrundet risiko for, at fremmede stater søger ulovlig adgang til avancerede teknologier udviklet i Danmark, hvilket kan true sikkerheden, Danmarks teknologiske position og økonomiske interesser.

Sammenlignet med andre lande har Danmark en solid position inden for kvanteområdet, især inden for investeringer, uddannelse og forskning. Det danske kvantemiljø, bestående af både virksomheder, forskningsinstitutioner og myndigheder, er præget af, at kvanteteknologien traditionelt har været forankret på universiteterne og er relativt ny i industrien. Den industrielle del af sektoren er i langsom fremmarch og forventes at ville ekspandere, efterhånden som teknologien modnes. Denne kombination af stærke forskningsmiljøer og en voksende industriel sektor giver et godt udgangspunkt for at udnytte de muligheder, som kvanteteknologien skaber, både nationalt og internationalt.

Kvanteteknologiens iboende dobbelthed – hvor teknologiens anvendelsespotentialer også udgør dens misbrugspotentialer – gør det nødvendigt at balancere teknologiens muligheder og risici, både i dens udvikling og i dens implementering. Denne dobbelthed betyder også, at regulatoriske beskyttelsestiltag er en forudsætning for også at kunne fremme udviklingen af dansk kvanteteknologi. Beskyttelse og fremme af kvanteteknologi hænger således tæt sammen, og reguleringen er afgørende for at beskytte danskudviklet teknologi mod misbrug og uønsket overførsel til fremmede stater og aktører. Reguleringen spiller dermed en central rolle i at beskytte nationale sikkerhedsinteresser og understøtte ansvarlig anvendelse af teknologien. Samtidig er det vigtigt, at reguleringen finder den rette balance mellem beskyttelse og behovet for at fremme innovation og vækst, så danske virksomheder og forskningsmiljøer kan klare sig i den internationale konkurrence.

Regulatoriske rammer, der overvåger og begrænser visse former for økonomisk aktivitet og teknologiudveksling, kan dog også indebære visse udfordringer for danske kvantevirksomheder, f.eks. i relation til krav og processer, der kan opleves som komplekse eller ressourcekrævende. Kvantevirksomheder kan også opleve, at sagsbehandlingstiderne er længere end ønsket, og at det påvirker deres evne til at reagere hurtigt på markedsmuligheder. Reguleringen vil naturligt indebære visse byrder for virksomhederne. En vis byrde er uundgåeligt – og er et vilkår, der også findes i andre lande og dermed styrker sikkerheden på tværs af landegrænser. Med henblik på at understøtte, at kvanteteknologiens potentiale kan realiseres til gavn for samfundet, er det imidlertid relevant at arbejde for, at reguleringen og dens håndhævelse indrettes og administreres på en måde, der så vidt muligt understøtter virksomhedernes behov og tager højde for fremtidige teknologiske gennembrud – særligt i lyset af, at man må forvente et øget antal ansøgninger om eksportkontrol- og investeringscreening i takt med den kvanteteknologiske udvikling og realisering af dens anvendelsespotentialer.

Dette giver anledning til fem overordnede anbefalinger til forbedringstiltag:

1. **Løbende tilpasning af reguleringen:** Undersøge mulighederne for at etablere mekanismer til løbende opdatering af lovgivningen, f.eks. gennem en tværfaglig ekspertgruppe, der overvåger teknologiske fremskridt og leverer strategisk rådgivning om nødvendige justeringer af lovgivningen. En sådan tilgang vil kunne bidrage til at sikre, at reguleringen til stadighed har den rette balance mellem sikkerhed og innovation i takt med den kvanteteknologiske udvikling.
2. **Øget transparens om regler, krav og processer:** For at sikre, at virksomheder kan navigere effektivt i regler og processer, kan det undersøges, om der er muligheder for at øge transparensen omkring gældende regler. Det kunne f.eks. være gennem lettilgængelige vejledninger og informationsmateriale, specifikt rettet mod kvantevirksomheder. Det kunne også være i form af rådgivnings- og uddannelsesinitiativer, der hjælper virksomheder med at opfylde lov- og sikkerhedskrav. Øget transparens vurderes at kunne bidrage til at styrke virksomhedernes evne til at handle hurtigt og korrekt, når nye markedsmuligheder opstår.
3. **Styrket dialog mellem myndighederne og kvanteindustri:** Undersøge mulighederne for at etablere en tættere og løbende dialog mellem myndigheder og industrien, der kan adressere konkrete og praktiske udfordringer i anvendelsen af reguleringen. Det kunne f.eks. ske ved etablering af faste fora (eller anvendelse af ét af de eksisterende) eller strukturerede feedbackmekanismer. En styrket dialog vurderes at kunne bidrage til at sikre, at reguleringen og dens håndhævelse fungerer i praksis uden at være unødigt byrdefuld, f.eks. ved at dele erfaringer om, hvordan lov- og sikkerhedskrav kan implementeres i virksomhedernes arbejde. Styrket dialog ses også at kunne give input til behov for lovtilpasning (jf. anbefaling 1) samt bidrage til mere transparens om regler og processer (jf. anbefaling 2).
4. **Sikre effektivt sagsbehandlingsniveau:** Der er tale om en ny og kompleks teknologi samt et forholdsvist nyt reguleringsområde, hvilket kan gøre administrationen heraf udfordrende. Myndighederne kan overveje at kigge på, hvorvidt/hvordan det nuværende niveau for sagsbehandling og adressering af sikkerhedsrisici kan fastholdes – og hvis muligt styrkes – i takt med et forventeligt stigende antal ansøgninger fra kvantevirksomheder.
5. **Fuld harmonisering af EU-regler:** Arbejde aktivt for fuld harmonisering af investerings-screening og eksportkontrol på EU-niveau. Fælles standarder og praksis på området vurderes at have potentiale til at reducere ulige konkurrencevilkår samt bidrage til en stærkere og mere effektiv beskyttelse af kvanteteknologi på tværs af landegrænser.

3. Indledning

3.1. Rammesætning

Kvanteteknologi repræsenterer en ny generation af teknologier baseret på kvantemekaniske principper som superposition og sammenfiltrering. Hvor tidligere kvanteteknologier anvendte kvantemekanik indirekte, udnytter andengenerationskvanteteknologi kvantefænomener direkte for at skabe radikalt nye muligheder inden for databehandling, kommunikation og sensorik. Disse kvanteteknologier åbner for potentielle anvendelser, der kan få omfattende indflydelse på alt fra videnskabelig forskning og industriprocesser til sundhedsområdet og ikke mindst national sikkerhed.

Kvanteteknologiens sammenhæng med national sikkerhed udspringer af dens kapacitet til både at styrke sikkerhedsniveauet og udgøre potentielle sikkerhedsrisici. På den ene side muliggør kvanteteknologi udvikling af avancerede sensorer og navigationssystemer, der kan anvendes til præcisionsstyring af våben og navigation uden GPS. På den anden side er der reel mulighed for, at kvantecomputere kommer til at kunne bryde nutidens kryptering, hvilket skaber en stor risiko for kompromittering af kommunikationskanaler og lækage af klassificerede oplysninger. Kvanteteknologiens samfundsudviklende og sikkerhedstruende anvendelser er uløseligt forbundet. Med udviklingen af kvanteteknologi og dens anvendelsesmuligheder kan national sikkerhed derfor styrkes, og sårbarheden kan øges. Denne dualitet understreger et behov for en afbalanceret og proaktiv tilgang til kvanteteknologiens regulering og kontrol.

Denne rapport rammesætter kvanteteknologiens potentialer i en dansk kontekst og undersøger, hvilke implikationer for national sikkerhed teknologien har. Gennem en kortlægning af teknologiens teknologiske barrierer, anvendelsesmuligheder og risici for misbrug fremhæver rapporten nogle af de kritiske sikkerhedsaspekter, som danske myndigheder og erhvervsaktører skal være opmærksomme på i arbejdet med kvanteteknologi.

For at kunne understøtte en ansvarlig udvikling og anvendelse af kvanteteknologi er det rettidig omhu at vurdere de regulatoriske rammer, som både skal beskytte Danmarks sikkerhedsinteresser og fremme udvikling og innovation på kvanteområdet. I takt med teknologiens fremskridt intensiveres behovet for at skabe en balanceret regulering, der både beskytter mod risici som teknologilækage og misbrug og samtidig udgør den mindst mulige byrde for erhvervslivet. Rapporten analyserer derfor eksisterende regulering og gennemgår observationer om reguleringsudfordringer, der enten allerede eksisterer eller vurderes at kunne opstå inden for en årrække på 5-10 år. Afslutningsvist kommer rapporten med anbefalinger til reguleringsmæssige forbedringstiltag, der vurderes at kunne bidrage til at imødekomme de potentielle udfordringer med reguleringen.

3.2. Metode

Denne rapport er udarbejdet af PA Consulting for Erhvervsstyrelsen i perioden august til december 2024. I arbejdet med denne rapport har vi anvendt forskellige kilder og metoder for at sikre en dybdegående og nuanceret analyse af kvanteteknologiens betydning for national sikkerhed. Som en væsentlig del af vores kildemateriale har vi trukket på et stort udvalg af nationale og internationale rapporter om kvanteteknologi, der har været essentielle for at opnå indsigt i globale tendenser, sammenligningsgrundlag samt den kvanteteknologiske udvikling og anvendelseseksempler. Derudover har vi gennemført en række interviews med danske eksperter og aktører inden for forskning, offentlige myndigheder og erhvervsliv. Denne kombination af skriftlige kilder og personlige interviews har givet et solidt fundament for at forstå de komplekse aspekter af kvanteteknologi og dens implikationer for national sikkerhed.

4. Kvanteteknologi og national sikkerhed

Denne rapport fokuserer på det, der kaldes anden generation af kvanteteknologier, hvor kvantefænomener som superposition og sammenfiltrering udnyttes til at skabe helt nye teknologier. Dette adskiller sig fra første generation af kvanteteknologier, hvor kvantemekaniske egenskaber indirekte anvendes til at forbedre klassiske teknologier såsom lasere og MR-scannere. I denne rapport inddrages den anden generation af kvanteteknologier i tre kategorier: kvantecomputere, kvantekommunikation og kvantesensorer. I det følgende beskrives de tre typer kvanteteknologi samt teknologiske barrierer, anvendelsesmuligheder og misbrugspotentialer for hver type.

Superposition er en betegnelse for, at en partikel kan befinde sig i flere tilstande på samme tid. Først når der foretages en måling, henfalder partiklen til én tilstand.

Sammenfiltrering er et fænomen, hvor to eller flere partikler er forbundet således, at deres tilstande afhænger af hinanden uanset afstanden imellem dem. Hvis man måler på tilstanden af den ene partikel, vil man med det samme kende tilstanden af de andre.

4.1. Kvantecomputere

En kvantecomputer kan, meget forsimplet, beskrives som en avanceret lommeregner, og siges at være lige så forskellig fra en klassisk computer, som en klassisk computer er fra en kugleramme. Mens klassiske computere anvender bits (0 eller 1), anvender kvantecomputere qubits, som kan være i en superposition af både 0 og 1 samtidig, hvilket øger antallet af beregningsmuligheder eksponentielt. Kvantecomputere vil dog ikke nødvendigvis være bedre til at løse alle typer opgaver. Klassiske computere vil fortsat være mere effektive til opgaver, der kræver mange simple beregninger, mens kvantecomputere er velegnede til problemer med et mindre antal komplekse operationer.

Det er en udbredt misforståelse, at kvantecomputere ikke eksisterer. F.eks. har IBM udviklet en kvantecomputer med over 1000 qubits, og de tilbyder offentlig adgang til deres prototypekvanteprocessorer via en online platform. Der findes dog endnu ikke kvantecomputere, som er kraftfulde nok til at kunne udregne relevante problemer hurtigere end klassiske computere.

Man skelner mellem "universelle" kvantecomputere, som kan udføre enhver algoritme, og "ikke-universelle" kvantecomputere, også kaldet kvantesimulatorer, der er specialiserede til bestemte problemer. Det er tvivlsomt, om en universel kvantecomputer nogensinde vil findes. Ikke-universelle kvantesimulatorer, derimod, vurderes at have potentialet til at udkonkurrere klassiske computere til specifikke opgaver. I det følgende bruges begrebet "kvantecomputer" om både universelle kvantecomputere og ikke-universelle kvantesimulatorer.

Kvantecomputere rummer enormt potentiale og står samtidig over for store teknologiske udfordringer, før de kan blive bredt anvendelige. En af de største barrierer er qubits' ekstreme følsomhed over for eksterne forstyrrelser såsom temperatur, elektromagnetisk stråling og vibrationer, hvilket gør det vanskeligt at opretholde de nødvendige betingelser for kvanteoperationer over længere perioder. Selv med stabile qubits opstår der fejl på grund af den indbyggende tilfældighed i kvantefysikken, hvilket kræver avancerede fejlkorrigeringsmetoder.

Derudover er skalerbarhed en anden betydelig teknologisk barriere. Eksisterende kvantecomputere har et lavt antal qubits, hvilket begrænser deres beregningskraft. At bygge en kvantecomputer, der er både stor nok til at udføre relevante og praktiske opgaver og stabil nok til at fungere pålideligt, er en stor teknologisk udfordring. Endelig er der behov for standardisering og udvikling af programmeringssprog samt algoritmer, der kan udnytte kvantecomputerens unikke egenskaber effektivt. Disse barrierer kræver fortsat omfattende forskning og innovation for at realisere kvantecomputerens fulde potentiale. Med de seneste års massive investeringer forventes den første danske prototype på kvantecomputer-hardware at være færdigudviklet inden år 2030.

Anvendelsesmuligheder og misbrugspotentialer

Hvis det lykkes at udvikle en kraftfuld kvantecomputer, vil den kunne løse komplekse beregninger, som klassiske computere ikke kan håndtere. Anvendelsesmulighederne spænder bredt og omfatter områder som klima- og vejrmøllering, diagnostik og lægemiddelsimulering. Teknologien gør det muligt at modellere komplekse biologiske systemer som f.eks. proteinfoldning, hvilket er afgørende for udvikling af nye og mere effektive lægemidler. Denne egenskab kan dog også anvendes til ondsindede formål som f.eks. at udvikle avancerede biologiske våben. Teknologien kan også accelerere udviklingen af nye materialer med skræddersyede egenskaber ved at simulere molekylære interaktioner på atomart niveau. Kvantecomputeren vil også kunne anvendes til design af en ny generation af teknologi til militære formål såsom kampfly og fysiske våben.

Teknologien har stort potentiale inden for optimering af logistik, hvor kvantecomputere f.eks. vil kunne bruges til at finde de mest effektive ruter for køretøjer og dermed reducere både transporttid, brændstofforbrug og miljøpåvirkning. Inden for energisektoren kan kvantecomputeren hjælpe med at optimere elnettet og fordele energi mere effektivt, mens den i landbruget kan anvendes til at forbedre planlægning og ressourceanvendelse. Tilsvarende kan denne form for optimering anvendes i militære sammenhænge til at maksimere ressourceeffektiviteten, forbedre logistik og minimere tab i felten, hvilket styrker operationernes samlede effektivitet.

Derudover kan kvantecomputeren simulere komplekse systemer som f.eks. militære operationer, hvor man på kort tid vil kunne evaluere et stort antal potentielle scenarier og strategier. Dette omfatter faktorer som troppebevægelser, ressourcefordeling, logistik og interaktion med fjendtlige styrker. Konkret kan man forestille sig, at kvantecomputeren kan bruges til at simulere reaktioner på forskellige trusler, identificerer svagheder i fjendens strategi og optimere egne operationer under hurtigt skiftende forhold. Dette kan forbedre beslutningsgrundlaget markant og muliggøre tilpasning af taktiske planer i realtid.

En af de største trusler ved kvantecomputeren ses inden for cybersikkerhed og indebærer, at kvantecomputere vil kunne bryde nutidens krypteringsmetoder, da de kan faktorisere store tal langt hurtigere end klassiske computere. Dette underminerer mange af de eksisterende og traditionelle kryptografiske systemer, der er baseret på denne beregningsmæssige kompleksitet.

Konceptet "indsaml nu, dekrypter senere" udgør allerede en væsentlig bekymring, da ondsindede aktører kan opsnappe krypteret data med henblik på dekryptering på et senere tidspunkt, når kvantecomputere er tilstrækkeligt avancerede. Dette kan omfatte følsomme oplysninger, fra personlige data til statshemmeligheder, som i dag beskyttes af traditionelle kryptografiske metoder. Hvis kvantecomputere formår at bryde disse krypteringsalgoritmer, kan data, der er indsamlet årevis forinden, pludselig blive tilgængelige for uvedkommende.

Kvantecomputere skaber desuden betydelige bekymringer om misbrug i forbindelse med online identifikation og autentificering. Traditionelle metoder til identitetsverifikation, såsom passwords og biometriske data, risikerer at blive kompromitteret af kvanteangreb. F.eks. kan kvantecomputere muliggøre forfalskning af digitale signaturer og identiteter, der er baseret på nuværende krypteringsmetoder, hvilket kan føre til identitetstyveri, økonomisk svindel og alvorlige brud på privatlivets fred. Selvom disse trusler ikke er umiddelbare, kan de skabe usikkerhed og mistillid til nutidens identifikations- og autentificeringssystemer.

Det er vigtigt at være bevidst om, at anvendelsesmuligheder og misbrugspotentialer er to sider af samme mønt. De samme egenskaber, der gør kvantecomputere til et kraftfuldt værktøj til positive formål, kan i de forkerte hænder udnyttes til aktiviteter, der truer national sikkerhed. Derfor er det afgørende at sikre, at dansk kvanteteknologi ikke ender i hænderne på aktører med ondsindede intentioner.

Kritiske anvendelsesmuligheder inden for kvantecomputere

- Fremstilling af nye lægemidler og fysiske materialer
- Design og udvikling af kampfly samt biologiske og fysiske våben
- Optimering af logistik og ressourceallokering
- Dekryptering af nutidens krypteringsalgoritmer
- Misbrug af online identifikation og autentificering

4.2. Kvantekommunikation

Kvantekommunikation omfatter flere teknikker, som har til formål at beskytte data og information fra fremtidige kvantecomputerangreb ved hjælp af kvantemekaniske principper. I dag sker dataudveksling ved hjælp af elektriske signaler – bits – sendt gennem optiske fiberkabler. En hacker med adgang til disse kabler kan potentielt kopiere informationen under transmissionen, men kan ikke dekryptere indholdet uden en kraftfuld kvantecomputer. Denne trussel har fremmet udviklingen af kvantekommunikation som et sikkerhedsforstærkende felt.

Kvantekommunikation opdeles typisk i to centrale teknologier: QKD, en metode til sikker overførsel af information ved brug af kvantefysiske principper, og PQC, en metode udviklet til at modstå angreb fra kvantecomputere.

Quantum Key Distribution (QKD) anvender kvantepartikler til sikker udveksling af krypteringsnøgler. Information kodes i qubits, som befinder sig i en superposition af 0 og 1 og er yderst følsomme over for eksterne forstyrrelser. Ethvert forsøg på aflytning får qubitens tilstand til at kollapse og efterlader dermed et spor af indgrebet. De egentlige data overføres via traditionelle netværk, mens de nødvendige krypteringsnøgler overføres via kvantepartikler. De to parter kan således generere en unik og tilfældig talkode, som er ukendt for andre, og denne symmetriske krypteringsnøgle sikrer, at selv fremtidige kvantecomputere ikke kan dekryptere informationen.

Post-Quantum Cryptography (PQC) fokuserer på udviklingen af ikke-kvantebaserede algoritmer, der er stærke nok til at modstå angreb fra kvantecomputere. I modsætning til nutidens standarder, som kvantecomputere forventes at kunne bryde, sikrer PQC datasikkerheden ved hjælp af matematiske strukturer, der kan modstå kvantealgoritmer. PQC er dermed en essentiel teknologi til fremtidens cybersikkerhed, selvom den ikke er en kvanteteknologi i sig selv.

Der er tiltagende enighed om, at ingen enkelt krypteringsalgoritme er tilstrækkelig til at beskytte mod alle former for cyberangreb. Derfor anbefales det at kombinere QKD med PQC i tilfælde, hvor data er ekstra følsom, da der derved opnås en endnu højere grad af sikkerhed. Ved at integrere de to metoder kan man skabe et lagdelt sikkerhedssystem, der både beskytter mod nutidige trusler og de potentielle angreb fra fremtidige kvantecomputere.

Overgangen fra en færdigudviklet teknologi til faktisk implementering kræver flere trin, herunder akkreditering, standardisering, verifikation og certificering, som hver især medfører praktiske udfordringer. Desuden kræver overgangen både softwareopdateringer og udskiftning af hardware, hvilket komplicerer implementeringen og øger omkostningerne. Det optimale tidspunkt og den optimale strategi for overgangen til kvantekommunikation vil variere alt afhængig af it-system, dataenes følsomhed og it-systemets kompleksitet. Jo længere overgangen til kvantekommunikation udskydes, desto større er risikoen for, at data opsamles med henblik på fremtidig dekryptering. Omvendt er der også risici ved at implementere ny teknologi for tidligt, da erfaringer og viden om de nye teknologier er begrænsede. Derfor forventes det, at det kan tage op til ti år, før kvantesikker kommunikation er implementeret på myndighedsniveau.

Anvendelsesmuligheder og misbrugspotentialer

Kvantekommunikation forventes at ville revolutionere kommunikationsinfrastrukturen ved at tilbyde ultrasikre kommunikationslinjer mellem offentlige myndigheder, militære enheder og i kritiske sektorer, f.eks. den finansielle sektor og sundhedssektoren. Med kvantenøglefordeling

(QKD) kan myndigheder, efterretningstjenester og militære enheder udveksle information på en måde, der gør det umuligt for uautoriserede parter at aflytte eller manipulere informationen uden at blive opdaget. Anvendelsen af kvantekommunikation kan være afgørende for beskyttelsen af kritisk infrastruktur såsom energinettet, transportsystemer samt vand- og fødevarerforsyning. Ved at implementere kvantesikrede kommunikationssystemer kan myndighederne beskytte disse vitale systemer mod eventuelle fremtidige cyberangreb og -sabotage. Det forventes, at den nuværende kryptografi med tiden vil blive udskiftet med kvantesikker kryptografi uanset, hvor langt ude i fremtiden den dekrypterende kvantecomputer vurderes at være. Det ultimative mål inden for kvantekommunikation er at skabe et netværk af kvantecomputere forbundet via kvantesikre kommunikationslinjer – et såkaldt kvanteinternet.

Danish Quantum Communication Infrastructure

Er et samarbejde mellem danske universiteter, virksomheder og offentlige myndigheder og udgør Danmarks nationale bidrag til den paneuropæiske infrastruktur, EuroQCI. Projektet koordineres af Erhvervsstyrelsen på myndighedssiden, hvorigennem der skal etableres et kvantesikkert netværk, der forbinder fire offentlige myndigheder og to datacentre i København, samt en langdistanceforbindelse, der knytter de tre deltagende universiteter sammen. Målet er blandt andet at teste forskellige QKD-teknologier og opnå praktisk erfaring med implementering af et kvantekommunikationsnetværk.

Ligesom med kvantecomputere er anvendelsesmuligheder og misbrugspotentialer inden for kvantekommunikation to sider af samme mønt. Selvom kvantekommunikation kan sikre data mod aflytning og manipulation, kan teknologien også udnyttes af ondsindede aktører til at skabe kommunikationskanaler, der er vanskelige at overvåge eller bryde ind i, hvilket kan hindre efterretningstjenesters evne til at opdage og forebygge trusler, f.eks. fremmede magters aktiviteter i Danmark, organiseret kriminalitet eller terrortrusler.

Kritiske anvendelsesmuligheder inden for kvantekommunikation

- Skabe ultrasikre kommunikationslinjer
- Beskyttelse af kritisk og militær infrastruktur fra spionage og overvågning
- Beskyttelse af følsom data og privatlivets fred
- Forhindre identitetstyveri og økonomisk svindel via kvantecomputere

4.3 Kvantesensorer

Kvantesensorer er betydeligt mere følsomme end traditionelle sensorer. De er baseret på ultrakolde atomer eller fotoner, som kontrolleres og manipuleres gennem kvantemekaniske fænomener såsom superposition og sammenfiltrering af specifikke kvantetilstande. Disse kvantetilstande er ekstremt følsomme over for meget små ændringer i omgivelserne, hvilket gør det muligt for kvantesensorer at måle meget små variationer i bl.a. temperatur, acceleration og tid samt elektriske og magnetiske felter. Sammenlignet med traditionelle sensorer kan kvantesensorer måle på meget mindre mængder materiale og opfange detaljer, som ikke kan registreres med traditionelle måleteknikker.

Kvantesensorer er en relativt moden kvanteteknologi og anvendes allerede i dag bl.a. til overvågning af vulkanaktivitet og undergrundsanalyser af rør og celleledninger. Der er dog betydelige barrierer, der hindrer deres bredere anvendelse og kommercialisering. En af de største udfordringer er, at kvantesensorer, på grund af deres ekstreme følsomhed, skal isoleres fra støj i det omkringliggende miljø samtidig med, at de skal kunne registrere de mindste signaler fra det ønskede måleobjekt. Derudover forskes der i at gøre sensorerne mindre rent fysisk og funktionelle ved stuetemperatur, da de nuværende versioner ofte kræver lavere temperaturer for optimal funktionsdygtighed. Den teknologiske kompleksitet gør produktionen af kvantesensorer dyr og svær at skalere, hvilket begrænser deres tilgængelighed på markedet. Der er behov for mere forskning og udvikling for at gøre kvantesensorer mere robuste uden for de specialiserede forskningsmiljøer.

Anvendelsesmuligheder og misbrugspotentialer

Kvantesensorer har et bredt anvendelsespotentiale, herunder civile og industrielle anvendelser, bl.a. inden for sundhedssektoren og geofysik. I sundhedssektoren kan kvantesensorer optimere diagnostik ved at måle biologiske signaler i højere opløsning end nuværende teknologier, hvilket bl.a. kan bruges til målinger af hjerneaktivitet og til analyser af biologisk væv. Inden for geofysik og undergrundsundersøgelser kan kvantesensorer bruges til at kortlægge undergrunden, f.eks. forud for byggeri eller til at identificere nye råstofreserver. Derudover har teknologien potentiale til at overvåge klimaændringer, miljøforhold og ekstreme vejrphenomener, hvilket kan bidrage til bedre forståelse og håndtering af globale udfordringer.

Kvantesensorers største potentiale ses inden for navigations- og detektionsteknologi, hvor de forventes at blive centrale i fremtidens avancerede målesystemer og PNT-teknologier (position, navigation og timing). Kvantesensorer kan anvendes til at navigere efter jordens magnetfelt, hvilket både kan forbedre eksisterende GPS-systemer og muliggøre navigation i områder uden satellitdækning – en afgørende fordel ifm. militære operationer under fjendtlige forhold. Derudover gør teknologien det umuligt at hacke eller jamme sensorernes signaler, hvilket kan være afgørende i sikkerhedskritiske applikationer, da det f.eks. forhindrer fjenden i at manipulere eller forstyrre militære sensorer, som anvendes til navigation, dataindsamling og trusselsdetektion.

Kvantesensorer rummer også et stort potentiale inden for detektion og overvågning, da de bruges til at spore subtile signaler og objekter med hidtil uset præcision. Teknologien kan overvinde stealth-teknologi, såsom ubåde og fly, der normalt undgår traditionelle radarer, hvilket gør både luftrum og have transparente. Dette vil fundamentalt ændre den strategiske balance i militære operationer, da det vil eliminere mange af de taktiske fordele ved stealth-teknologi. Kvantesensorer kan desuden anvendes til avanceret taktisk overvågning under alle vejrforhold og til strategisk overvågning over store afstande, såsom ved maritime operationer og rumovervågning. Derudover kan kvantesensorer anvendes i avancerede målesystemer, hvilket muliggør detektion af objekter og personer, der normalt ville være skjult bag forhindringer som f.eks. vægge, hjørner eller andre strukturer. I sådanne målesystemer kan kvantesensorer sende lysimpulser ud, der reflekteres ved overflader, hvorefter de registreres af kvantesensoren. Ved at analysere disse refleksioner er det muligt at rekonstruere et billede af, hvad der befinder sig rundt om hjørnet. Sådanne teknologier kan få afgørende indflydelse i militære applikationer.

Kvantesensorernes ekstreme følsomhed åbner op for misbrugspotentiale, særligt inden for overvågning og spionage. Fjendtlige aktører kan anvende kvantesensorer til at overvåge kritisk infrastruktur såsom energiforsyningsnetværk, transport- og kommunikationssystemer samt vand- og fødevarerforsyning. For eksempel kan kvantesensorer bruges til at opsnappe små variationer i elektromagnetiske signaler fra kontrolsystemer, hvilket giver mulighed for at kortlægge netværkets struktur og identificere svage punkter, der kan udnyttes til cyberangreb eller spionage.

Inden for militære og strategiske områder kan kvantesensorer bruges til at spore troppebevægelser, afsløre skjulte militærbaser eller opfange kommunikationssignaler fra fjendtlige styrker, hvilket kan kompromittere sikkerhed. For eksempel kan en fjendtlig aktør bruge teknologien til at overvåge militærbaser eller kritisk infrastruktur og koordinere angreb baseret på denne information. Derudover kan kvantesensorer anvendes til industriel spionage ved at registrere signaler fra maskiner og udstyr, hvilket kan gøre det muligt at kopiere avancerede teknologier eller afsløre produktionsprocesser. Den ekstreme præcision, som gør kvantesensorer så værdifulde til positive formål, kan derfor også udnyttes til at skabe nye typer af sikkerhedstrusler.

Kritiske anvendelsesmuligheder inden for kvantesensorer

- Navigation i områder uden satellitdækning
- Detektion af stealth-teknologi, herunder fly og ubåde
- Detektion af objekter og mennesker rundt om hjørner eller bag forhindringer
- Detektion af missiler og små droner
- Sensorer, som ikke kan hackes eller jammes

4.4 Muligheder for samspil med andre kritiske teknologier

Kvanteteknologi er en blandt flere såkaldte kritiske teknologier. Kritiske teknologier vil i denne sammenhæng sige teknologier, der kan være afgørende for national sikkerhed og samfundsmæssige funktioner. Med andre ord vil kritiske teknologier kunne udgøre en risiko for national sikkerhed, hvis de misbruges eller bliver genstand for uønsket teknologisk overførsel til udenlandske aktører.¹

I det følgende beskrives muligheder for, hvordan kvanteteknologi potentielt kan spille sammen med andre kritiske teknologier, herunder hvilke potentialer der kan være ved at kombinere kvanteteknologi med andre kritiske teknologier. Vi fokuserer på tre udvalgte kritiske teknologier, som vurderes at være de mest relevante i denne sammenhæng – foruden cyberteknologi, da samspillet med denne i høj grad er beskrevet under afsnittet om kvantekommunikation. Samspillet mellem kvanteteknologi og andre kritiske teknologier åbner op for nye, innovative løsninger og strategiske fordele, men rejser samtidig bekymringer om potentielle sikkerhedstrusler og misbrug.

Kunstig intelligens

Kunstig intelligens (AI) anvendes allerede til at fremme udviklingen af kvanteteknologi, f.eks. til optimering og kontrol af kvanteopstillinger og til udviklingen af kvantealgoritmer. Der er dog varierende holdninger til, i hvor høj grad kvantecomputere vil kunne accelerere AI-modeller – også kaldet kvanteforstærket AI. Kritikere påpeger, at kvantecomputere har naturlige begrænsninger i forhold til mængden af datainput, da et højt antal input kan introducere flere fejl i beregningerne. Denne begrænsning kan besværliggøre træningsprocessen for AI-modeller, som ofte kræver store datamængder. Der er dog allerede udviklet en række nye kvantealgoritmer med henblik på kvanteforstærket AI, hvoraf nogle tilmed er demonstreret i laboratoriet.

Fortalere for kvanteforstærket AI fremhæver det enorme potentiale i samspillet mellem de to teknologier, der gensidigt kan accelerere hinandens udvikling. F.eks. påpeger FN's Institut for Nedrustningsforskning (UNIDIR), at kvanteforstærket AI kan styrke kvantecomputerens allerede ekstraordinære evne til at udføre komplekse simuleringer, som bl.a. kan anvendes til militære formål, hvor det kan forbedre beslutningsgrundlaget og skabe mere præcise strategiske analyser. Selvom integrationen af AI og kvanteteknologi er i sin spæde fase, viser foreløbige resultater lovende anvendelsesmuligheder, der kan have stor effekt på alt fra videnskabelig forskning til strategiske beslutningsprocesser. Fremtidige gennembrud vil afhænge af fortsat innovation inden for kvantealgoritmer og systemdesign.

Bioteknologi

Bioteknologi- og farmaceutiske industrier er en af de drivende kræfter bag kvanteteknologiens og særligt kvantecomputerens udvikling, da teknologien rummer et enormt potentiale for at reducere omkostninger og accelerere processer inden for lægemiddeludvikling, medicinsk forskning og molekylær simulering. Kvanteteknologi forventes at ville muliggøre f.eks. mere præcise simuleringer af molekylære interaktioner, hvilket kan optimere screeningsprocessen af tusindvis af molekyler hurtigere og mere omkostningseffektivt. Inden for strukturel bioinformatik kan kvantecomputere modellere proteinfoldning på atomniveau, hvilket kan bane vejen for mere målrettede behandlinger. Samtidig kan kvanteteknologi simulere biologiske systemer med høj præcision, hvilket bidrager til en bedre forståelse af sygdomsmekanismer.

Denne udvikling åbner ikke kun op for hurtigere og mere effektive processer inden for lægemiddeludvikling og medicinsk forskning, men kan også have stor indflydelse den måde, vi forstår og behandler sygdomme på. Ved at kombinere kvanteteknologiens beregningskraft med data fra moderne bioinformatik kan forskere identificere nye behandlingsmål og skræddersy terapier til den enkelte patient. Det gør kvanteteknologi til en nøglekomponent i fremtidens medicin og bioteknologi.

¹ "Kritiske teknologier" er bl.a. defineret i §10 i anvendelsesbekendtgørelsen til investeringsscreeningsloven samt i EU-Kommissionens liste over kritiske teknologier.

Rumteknologi

Samspillet mellem kvante- og rumteknologi er blevet et strategisk vigtigt teknologisk område for mange lande, hvilket både skyldes store teknologiske potentialer og geopolitiske interesser. Store nationer som USA, Kina og EU ser kombinationen af disse to teknologier som en vej til teknologisk dominans og en forstærkning af deres position i det globale magtspil. Rumbaseret kvanteteknologi kan både styrke nationale sikkerhedsinteresser og give en strategisk fordel inden for kommunikation, overvågning og navigation.

Rumbaserede QKD-systemer kan anvendes til at skabe ultrasikre kommunikationsnetværk, som kan være afgørende i geopolitiske sammenhænge, hvor informationssikkerhed spiller en central rolle. Desuden giver integrationen af kvantesensorer i rumbaserede systemer mulighed for avancerede PNT-teknologier (position, navigation og timing), der kan fungere uafhængigt af GPS-systemer, hvilket er en betydelig strategisk fordel i konflikt- og krigssituationer.

Ud over de sikkerhedsrelaterede anvendelser har samspillet mellem kvante- og rumteknologi stort potentiale inden for klima- og miljøovervågning. Rumbaserede kvantesensorer kan overvåge havniveaustigninger, afsmeltningen af iskapper og ændringer i atmosfærens sammensætning. Dette kan forbedre varslinger af naturkatastrofer som oversvømmelser og tørker samt støtte beslutningstagning i håndteringen af klimaudfordringer.

Samlet set rummer kombinationen af kvante- og rumteknologi teknologiske muligheder inden for f.eks. national sikkerhed og klimatilpasning og er også en teknologisk milepæl i et geopolitisk kapløb. Det gør det til et nøgleområde for fremtidig investering og internationalt samarbejde.

4.5 Opsummering

Kvanteteknologi udgør en ny generation af teknologi med omfattende dual use-potentiale og risici for alvorligt misbrug. Teknologien opdeles i kvantecomputere, kvantekommunikation og kvantesensorer, som hver især tilbyder unikke anvendelsesmuligheder, der kan skabe væsentlige fremskridt inden for en lang række sektorer, herunder avancerede simuleringer til logistik og medicinudvikling, ultrasikre kommunikationskanaler og navigation i områder uden satellitdækning. Samtidig er det vigtigt at anerkende, at de samme egenskaber også rummer et betydeligt misbrugspotentiale. På nuværende tidspunkt vurderes der ikke at være nogen anvendelsesområder inden for kvanteteknologi, der er fuldstændig immune over for risikoen for ondsindet udnyttelse. Hvor kvantecomputere, kvantekommunikation og kvantesensorer eksempelvis kan anvendes til at styrke sikkerheden, kan samme teknologi i hænderne på fjendtlige aktører også true dansk sikkerhed gennem kompromittering af kritisk infrastruktur, spionage eller cyberangreb. Denne dualitet – hvor teknologiens anvendelsespotentialer også kan udgøre dens misbrugspotentiale – nødvendiggør et fokus på sikkerhed i udviklingen og implementeringen af kvanteteknologi. Alle typer kvanteteknologi, og særligt kvantecomputere, er aktuelt begrænset af teknologiske udfordringer som stabilitet og skalering. Når disse barrierer overvindes, forventes der en markant acceleration i feltet. Forskere understreger, at det er umuligt at forudsige tidspunktet for et gennembrud. Denne usikkerhed gør det nødvendigt at balancere teknologiens muligheder og risici allerede i dag. At opretholde en stærk fokus på sikkerhed samtidig med, at der skabes rammer for innovation og teknologisk udvikling, er afgørende for at sikre, at kvanteteknologi kan realisere sit potentiale uden at kompromittere nationale sikkerhedsinteresser.

5. Kortlægning af det danske kvantelandskab

Det danske økosystem inden for kvanteteknologi består af både startups, scale-ups, etablerede virksomheder, f.eks. på slutbrugersiden, forskningsinstitutioner, myndigheder og en række fora, der samler aktørerne på tværs af økosystemet. Økosystemet er langsomt voksende, og særligt i forlængelse af regeringens kvantestrategi fra 2023 er der flere offentlige initiativer, som skal fokusere på forskellige aspekter af kvanteteknologiens udbredelse, bl.a. sikkerhed og forebyggelse. Økosystemet er dog også i høj grad præget af, at kvanteteknologien traditionelt har været forankret på universiteterne og er relativt ny i industrien, hvilket bl.a. ses ved, at de fleste kvantevirksomheder er relativt unge, ofte er spin-outs fra forskningsmiljøet, og at de primært befinder

sig i forsknings- og udviklingsfasen. Den industrielle del af sektoren er dog i langsom fremmarch og forventes at ville ekspandere i takt med, at teknologien modnes og bliver mere bredt anvendt.

I dette afsnit kortlægges de centrale aktører i det danske kvantelandskab, der arbejder med aspekter relateret til national sikkerhed. I relation til kvantevirksomheder vurderes det, hvor moden teknologien er, herunder hvor tæt de er på at udvikle produkter med kommercielt potentiale. Derudover undersøges det, om danske kvantevirksomheder oplever forsøg fra eksterne aktører på at tilegne sig deres viden, og om de ser en risiko for teknologilækage inden for kvanteområdet.

5.1. Offentlige myndigheder

Flere myndigheder på ministerielt og styrelsesniveau har en central rolle i det danske kvanteøkosystem, bl.a. Erhvervsministeriet og Erhvervsstyrelsen, Udenrigsministeriet, Forsvarsministeriet, Digitaliseringsstyrelsen og Uddannelses- og Forskningsministeriet. Overordnet arbejder myndighederne med koordination og støtte til forskellige strategiske initiativer for at sikre, at Danmark har en stærk kvanteinfrastruktur og sikkerhed.

Udvalgte offentlige initiativer med fokus på kvanteteknologi

Den Internationale Kvantehub

Er et kvantefokuseret samarbejde mellem en række ministerier, der har til opgave at arbejde for at markere Danmark internationalt, bl.a. ved at etablere nye samarbejdsaftaler og styrke Danmarks strategiske kvantesamarbejde med andre lande og centrale udenlandske forskningsinstitutioner og virksomheder. Kvantehubben er den primære indgang for internationale aktører til danske myndigheder og kvanteøkosystem. Hubben, der blev etableret i 2024, udgøres primært af medarbejdere fra Udenrigsministeriet, men også fra Uddannelses- og Forskningsministeriet, Erhvervsministeriet, Forsvarsministeriet og Digitaliseringsministeriet.

Kvanteteknologisk Sikkerhedsforum

Politiets Efterretningstjeneste (PET) etablerede i 2023 Kvanteteknologisk Sikkerhedsforum, hvis formål er at sikre, at sikkerhed bliver en strategisk prioritet blandt danske udviklere af kvanteteknologi. Kvanteteknologisk Sikkerhedsforum har til opgave at støtte opbygningen af lokale sikkerhedsorganisationer og en god sikkerhedskultur i det danske kvanteøkosystem samt vidensdeling mellem sikkerhedsmyndighederne og kvantemiljøet i Danmark. Forummet rådgiver desuden om investeringer og internationale samarbejder og formidler et opdateret trusselsbillede mod dansk kvanteforskning. Kvanteteknologisk Sikkerhedsforum er en del af PETs Center for Innovations- og Videnssikkerhed, der støtter danske forskningsinstitutioner i at håndtere trusler fra fremmede, ikke-ligesindede stater, bl.a. i form af rådgivning, værktøjer og bistand til risikoanalyser.

Sekretariatet for kvantesikker kritisk, digital infrastruktur (SEKDI)

SEKDI blev nedsat af Forsvarsministeriet i august 2024 med henblik på at styrke Danmarks kritiske digitale infrastruktur mod kompromittering fra f.eks. kvantecomputere. Sekretariatet er en del af Center for Cybersikkerhed under Forsvarets Efterretningstjeneste. Sekretariatet har bl.a. til opgave at vejlede myndigheder og virksomheder, der er en del af Danmarks kritiske digitale infrastruktur, om, hvordan de bedst muligt overgår til kvantesikker kryptografi.

5.2. Forskningsinstitutioner

Forskningsinstitutioner spiller en afgørende rolle i det danske kvantelandskab. Københavns Universitet (KU), Danmarks Tekniske Universitet (DTU), Aarhus Universitet og Syddansk Universitet er alle involverede i kvanteforskning, ligesom universiteterne i høj grad samarbejder på tværs, bl.a. i regi af Novo Nordisk Foundation Quantum Computing Programme og NATO DIANA Quantum Centre. Flere af universiteterne samarbejder med virksomheder. Bl.a. samarbejder Niels Bohr Institutet ved KU med Microsoft om udvikling af topologiske kvantecomputere, og DTU samarbejder med virksomheden NKT Photonics om udvikling af avancerede laser- og fiberteknologier til kvantekommunikation og kvantesensorer samt med virksomheden Dencrypt om udvikling af krypteringsteknologi. Også de danske Godkendte Teknologiske Serviceinstitutter (GTS-institutter) spiller en rolle i kvantelandskabet, hvor f.eks. Danmarks Metrologiinstitut (DFM) har en række konkrete forskningsprojekter ift. kvanteteknologiens anvendelse i metrologiinfrastrukturen, bl.a. i samarbejde med DTU.

Udvalgte kvanteteknologiske forsknings- og innovationscentre

Quantum Denmark

Er et kvanteteknologisk samlingssted på KU's Nørre Campus, der skal skabe et fysisk miljø med adgang til sparring, netværk, kontorlandskab, test- og måleudstyr, hjælp til forretningsudvikling for både kvantestartups og etablerede kvantevirksomheder. Quantum Denmark, der åbnede i november 2024, har base på Niels Bohr Institutet på KU og drives af et nationalt konsortium bestående af DFM, KU, DTU, Aarhus Universitet og Deep Tech Lab — Quantum.

Novo Nordisk Foundation Quantum Computing Programme (NQCP)

Er placeret på Niels Bohr Institutet på KU og har til formål at udvikle og bygge kvantehardware og algoritmer til en kvantecomputer, som kan løse væsentlige problemer inden for biovidenskab. En fuldt funktionsdygtig kvantecomputer forventes færdig i 2034. Programmet forventer at involvere et stort internationalt økosystem af verdens førende universiteter og industrier.

Nationalt Forsvarsteknologisk Center (NFC)

NFC er et samarbejde mellem alle danske universiteter og GTS-institutter.² Formålet med NFC er at stille universiteternes og GTS-institutternes viden og kompetencer til rådighed for udviklingen af det danske forsvar samt arbejde for, at den forsvarsmæssige udvikling også kommer uddannelser og samfundet til gode, især mhp. civile anvendelsesmuligheder. Ét af NFC's teknologiske fokusområder er kvanteteknologi, hvor centret bl.a. faciliterer samarbejdet mellem forsvarsmyndigheder, industri og academia (triple helix).

5.3. Kvantenetværk og -organisationer

En række netværk og samlende fora bidrager til at skabe en platform for samarbejde og netværksdannelse på tværs af sektorer. Formålet er dels at styrke videndeling og innovationen i kvantemiljøet, dels at varetage kvantemiljøets interesser og konkurrenceevne både nationalt og internationalt.

Udvalgte kvantefora

Nationalt Forum for Kvanteteknologi

Er et forum, der blev etableret i forlængelse af regeringens kvantestrategi (del I fra juni 2023), der skal fremme en bred national tilgang på kvanteområdet ved at samle de centrale aktører fra hele det danske kvantelandskab. Forummet skal bl.a. rådgive om og løbende gøre status på implementeringen af strategien samt drøfte tværgående temaer, f.eks. prioriteter, udfordringer og behov inden for forskning og innovation, rammevilkår for økosystemet, kommercialisering af forskning og styrkelse af talentindsatsen. Forummet består af 19 faste medlemmer, som udgøres af repræsentanter fra udvalgte organisationer, universiteter og virksomheder. Forummet driftes af Uddannelses- og Forskningsministeriet, Erhvervsministeriet og Udenrigsministeriet.

Danish Quantum Community

Er en medlemsskabsorganisation fra 2021, der har til formål at samle alle kvanteinteressenter i Danmark på tværs af sektorer mhp. at styrke Danmarks indsats inden for kvanteforskning og -teknologier samt opbygge og styrke det danske kvanteøkosystems stemme både nationalt og internationalt. I 2023 havde DQC 37 medlemmer fra både forskningscentre, kvantestartups, slutbrugere, investorer og brancheorganisationer.

Dansk kvantestandardiseringsudvalg

Det danske udvalg for standardisering af kvanteteknologi i regi af Dansk Standard – Quantum Technologies (S-874) – arbejder for at sikre dansk indflydelse i de europæiske og internationale komiteer, der aktuelt er i færd med at udvikle standarder på området. De internationale standardiseringsorganisationer ISO og IEC har allerede udarbejdet en international standard, som fastlægger termer og definitioner i relation til kvantecomputere. Udvalget, som er baseret på betalt medlemskab og pt. består af ca. 20 forskningsinstitutioner, GTS-institutter og kvantevirksomheder, skal sikre danske interesser og konkurrenceevne, f.eks. ift. at fremme interoperabilitet og sikre overholdelse af lovgivningen.

² Aalborg Universitet, Aarhus Universitet, DTU, KU, Syddansk Universitet, IT-Universitetet, Copenhagen Business School, Roskilde Universitet, Teknologisk Institut, Dansk Brand- og Sikringsteknisk Institut, Bioneer, FORCE Technology, Alexandra Institutet, DFM og DHI.

5.4. Internationale aktører og samarbejder

Internationale tech-giganter som IBM og Microsoft er også aktive i Danmark. Microsoft har etableret kvantematerialelaboratorier i Danmark, hvilket understreger Danmarks position i den globale kvanteforskning og tiltrækker international opmærksomhed og investering. Danmark er desuden engageret i en række internationale kvanteinitiativer, der i høj grad har til formål at understøtte, at kvanteforskningen kommer ud til slutbrugerne i form af kommercielle applikationer.

Udvalgte internationale samarbejder

NATO DIANA Quantum Centre

Er en del af NATOs Defence Innovation Accelerator for the North Atlantic (DIANA). Formålet med centret er at samle iværksættere, investorer og forskere mhp. at accelerere udviklingen og kommercialiseringen af dual use-kvanteteknologier til civil og militær brug. Centret bidrager desuden til udviklingen af et deep-tech-økosystem i NATO. Konkret består DIANA Q-centret af et kvanteacceleratorsite, der skal understøtte udviklingen af kvantestartups og drives af Deep Tech lab, samt fire test- og produktionsfaciliteter, der er placeret ved henholdsvis Niels Bohr Institutet på KU, DTU, DFM samt Aarhus Universitet.

Deep Tech Lab — Quantum

Er et initiativ fra Bio Innovation Institute (BII) i København, der skal fremme innovation inden for kvanteteknologi ved at støtte danske og internationale kvantestartups og -spin-outs i deres helt tidlige stadie med skræddersyede programmer. Programmerne fokuserer bl.a. på at hjælpe virksomhederne med at identificere og udvikle de mest lovende business cases og finde den mest velegnede vej til kommerciel levedygtighed. Deep Tech Lab — Quantum arbejder bl.a. sammen med NATO's DIANA Challenge Program.

EU's Quantum Technologies Flagship

Er et EU-forsknings- og innovationsinitiativ fra 2018, der skal understøtte transformationen af europæisk kvanteforskning til kommercielle applikationer, der udnytter kvanteteknologiens potentiale. Konkret finansierer flagskibet kvanteteknologiske projekter, grundforskning samt uddannelses- og internationale samarbejdsaktiviteter. Flagskibet er aktuelt i sin anden fase med et samlet budget på over 400 millioner euro og mere end tyve nye projekter. Den langsigtede vision er at udvikle et europæisk kvanteinternet, hvor kvantecomputere, simulatorer og sensorer er forbundet via kvantekommunikationsnetværk.

5.5. Kvantevirksomheder

Danmark har et voksende antal virksomheder, der primært arbejder med kvanteteknologi. I dag findes der 24 sådanne virksomheder³, hvoraf størstedelen er relativt unge og flere er spin-outs fra forskningsmiljøet.

Størstedelen af de danske kvantevirksomheder – lige over halvdelen – producerer kvantekomponenter og leverer disse til andre kvantevirksomheder. En central aktør hér er NKT Photonics, den største kvantevirksomhed i Danmark, som udvikler avancerede laserteknologier, der er nyttige til flere forskellige kvanteteknologier. Også virksomheder såsom Quantum Machines og Atom Computing fokuserer på udvikling af komponenter til kvantecomputere, herunder delkomponenter til kvantehardware, og indgår ofte som underleverandører i større internationale kvanteprojekter.

Den resterende halvdel af kvantevirksomhederne arbejder med produkter, der er målrettet slutbruger-virksomheder uden for kvantemiljøet. Hér er produktet typisk udvikling af algoritmer, software og konsulentytelser. Eksempelvis arbejder Molecular Quantum Solutions (MQS) med kvantesimulering inden for medicinsk forskning, og virksomheder som Kvantify og Qpurpose udvikler algoritmer og software til kvantecomputere. Inden for kvantekommunikation udvikler flere virksomheder, såsom Cryptomathic og Dencrypt, nye krypteringsløsninger til at modstå angreb fra fremtidige kvantecomputere. Disse virksomheder udvikler således ikke kvanteteknologi, men teknologi, der relaterer sig til kvanteteknologi. Inden for kvantesensorer er virksomheder som Sparrow Quantum og DiaSence solidt placeret.

³ Erhvervsministeriet. Kvantearchiv. Juni 2024.

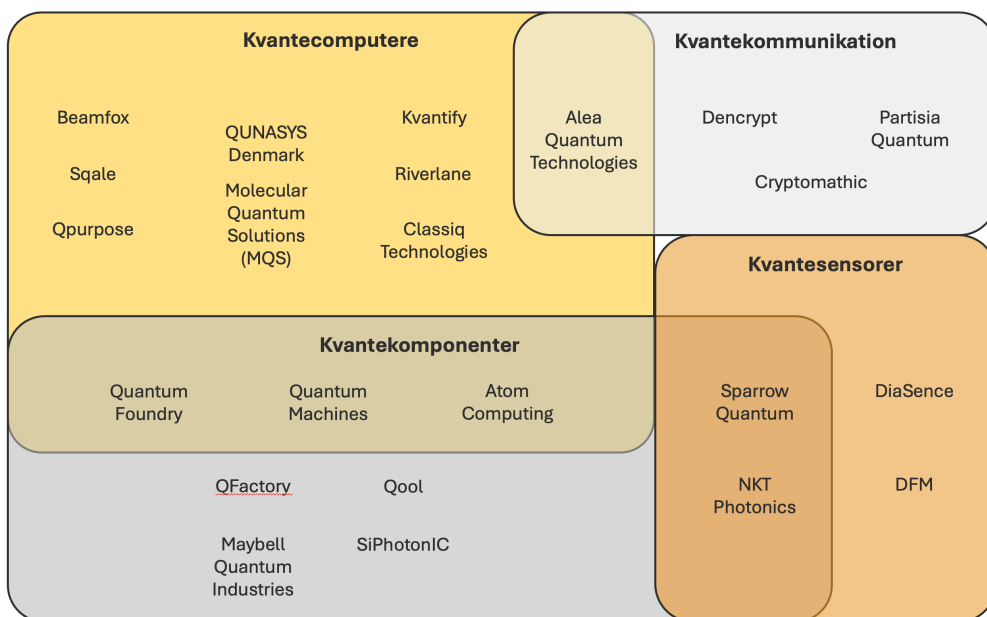


Illustration: Danske kvantevirksomheder og deres kvanteteknologiske fokusområde.⁴

Vurdering af modenhed og kommercialisering af kvanteteknologi i danske virksomheder

De fleste danske virksomheder inden for kvanteteknologi befinder sig fortsat primært i forsknings- og udviklingsfasen. Samtidig har flere virksomheder allerede introduceret kommercielt levedygtige produkter, især inden for kvantesensorer og kvantekommunikation. Disse produkter er tilgængelige på markedet og anvendes i forskellige industrier. F.eks. sælger virksomheder som Sparrow Quantum, Kvantify og Dencrypt allerede tidlige løsninger ved siden af udviklingen af mere avancerede løsninger og produkter. Dette indikerer, at selvom mange danske kvantevirksomheder stadig er i udviklingsfasen, er der en voksende gruppe, som formår at omsætte forskning til praktiske og kommercielle løsninger. Den industrielle del af kvantecosystemet er således i langsom fremmarch og må forventes at ville ekspandere i takt med, at teknologien modnes og bliver mere bredt anvendelig.

I maj 2024 blev **NKT Photonics** opkøbt af den japanske virksomhed **Hamamatsu Photonics**. NKT Photonics er en central aktør inden for avancerede laserteknologier, der er relevant for kvantekommunikation og kvantesensorer.

I marts 2023 blev **QDevil**, der specialiserer sig i udvikling af avancerede komponenter til kvantecomputere, opkøbt af det israelske firma **Quantum Machines**, der er stærk inden for kvantekontrolsystemer og software.

EIFOs kvantefond

Som led i regeringens kvantestrategi fra 2023 er der etableret en kvantefond i Danmarks Eksport- og Investeringfond (EIFO), der er en statslig finansieringsfond under Erhvervsministeriet. Kvantefonden skal investere i især danske kvantevirksomheder, men også kvantevirksomheder fra Norden, Europa og NATO-lande, og bidrage til at kommercialisere kvanteforskningsområdet. EIFO's kvantefond vil hovedsageligt fokusere på forholdsvis nystartede virksomheder og vækstvirksomheder inden for kvanteteknologi. Hvilke vertikaler, stadier m.m., som fonden skal fokusere på, forventes fastlagt inden slutningen af 2024.

EIFOs kvantefond har på nuværende tidspunkt investeret i tre kvantevirksomheder, henholdsvis danske Kvantify, der udvikler software til bl.a. kvantecomputere, engelske Aquark Technologies, der arbejder med kaldt atomkvantesensorer og er en del af NATO DIANA-Q, samt amerikanske Atom Computing, der er et af verdens førende kvantecomputerselskaber. Sidstnævnte har på baggrund af investeringen valgt Danmark som sit europæiske hovedkontor. EIFOs investeringer har bl.a. til hensigt at tiltrække udenlandske kvantevirksomheder til Danmark samt bringe førende kvanteteknologi, knowhow og jobs til det danske kvantecosystem.

⁴ Det bemærkes, at illustrationen for overblikkets skyld er simplificeret med udeladelse af visse nuancer. F.eks. er flere virksomheder at finde i flere kvanteteknologiske kategorier eller gennemfører aktiviteter, der ikke naturligt passer ind i vores kategorisering.

Inden for en kort periode har to betydningsfulde opkøb af danske kvantevirksomheder fundet sted. Salget af henholdsvis NKT Photonics og QDevil understreger, at danske kvantevirksomheder har opnået et betydelig kommercielt potentiale, ligesom det understreger den internationale interesse i Danmarks kvanteteknologiske kapacitet.

Selvom kvanteteknologiens primære anvendelser blandt danske virksomheder i dag overvejende er rettet mod civile og kommercielle formål, kan teknologien ikke fuldstændig afskærmes fra risici for misbrug. Der findes endnu ingen kvanteteknologiske anvendelsesområder, der vurderes at være fuldstændig immune over for denne risiko, hvilket betyder, at teknologier og produkter udviklet af danske kvantevirksomheder – ligesom virksomheder i andre lande – også teoretisk kan have anvendelser inden for områder, der kan true national sikkerhed. Dette forhold understreger behovet for ansvarlighed og sikkerhedsbevidsthed hos danske kvantevirksomheder.

Virksomhedernes oplevelse af risici for teknologilækage eller eksterne aktørers forsøg på ulovlig tilegnelse af viden

Forsvarets Efterretningstjeneste (FE) vurderer, at udviklingen og kontrollen med avancerede teknologier er blevet en del af den sikkerhedspolitiske konkurrence mellem stormagterne, og at fremmede stater derfor har særlig interesse i teknologier med dual use-potentiale, herunder avancerede teknologier såsom kvanteteknologi. Sådanne teknologier er ifølge FE et prioriteret mål for statsstøttede aktørers forsøg på ulovlig tilegnelse gennem cyberangreb og industrispio-nage. Politiets Efterretningstjeneste (PET) vurderer, at fremmede efterretningstjenester i stigende grad forsøger at skaffe sig adgang til viden og teknologi fra bl.a. danske virksomheder, og fremhæver, at dette udgør en vedvarende trussel mod sikkerheden omkring avanceret teknologi.

Selvom de danske efterretningstjenester vurderer, at der er en betydelig trussel mod kvanteteknologien, der er under udvikling i Danmark, oplever danske kvantevirksomheder ikke i nævneværdig grad denne trussel i deres daglige operationer. Ifm. respondentinterviews rapporterer virksomhederne ikke om konkrete tilfælde af industrispio-nage eller uautoriserede forsøg på at tilegne sig deres teknologier gennem f.eks. samarbejder eller andre kanaler. Denne oplevelse kan dels skyldes det forebyggende samarbejde mellem efterretningstjenesterne og kvantesektoren, som har bidraget til et øget opmærksomheds- og sikkerhedsniveau. Samtidig kan den manglende rapportering dog også afspejle en begrænset sikkerhedskultur eller sikkerhedsbevidsthed i dele af sektoren, eller at de medarbejdere, som har deltaget i interviews, ikke har haft det fulde overblik over eventuelle sikkerhedshændelser.

Initiativer som Kvanteteknologisk Sikkerhedsforum og Sekretariatet for kvantesikker kritisk, digital infrastruktur (SEKDI) forventes at komme til at spille en stor rolle i at informere og uddanne virksomheder om potentielle trusler og bedste praksis inden for sikkerhed samt styrke virksomhedernes evne til at beskytte deres teknologier og produkter.

5.6. Opsummering

Sammenfattende er det danske kvantemiljø karakteriseret af en omfattende økosystemstruktur, hvor offentlige og private aktører arbejder sammen på tværs af sektorer og funktioner. Dette inkluderer både strategiske samarbejder for at fremme forskningen og kommercialiseringen af kvanteteknologien og konkrete projekter som f.eks. NQCP, der har til formål at udvikle specifikke kvanteprodukter til et bestemt formål. Den industrielle del af sektoren er i langsom fremmarch og forventes at ville ekspandere i takt med, at teknologien modnes. Desuden ses et øget fokus i kvantelandskabet på sikkerhedsaspekter, bl.a. qua etableringen af Kvanteteknologisk Sikkerhedsforum, SEKDI samt Nationalt Forsvarsteknologisk Centers fokus på kvanteteknologi.

6. Sammenligning med andre lande

Dette afsnit sammenligner Danmarks position inden for kvanteteknologi med en række andre lande baseret på offentlig tilgængelige data. De inkluderede lande er Norge, Sverige, Finland, Nederlandene, Tyskland, Frankrig, Østrig, Schweiz, Storbritannien, USA, Israel samt Kina, og de inddrages, når data og relevante pointer foreligger. Sammenligningen fokuserer på fem udvalgte

parametre: nationale investeringer, uddannelse, forskning og forskningssamarbejder, antal virksomheder samt patenter.

6.1. Nationale investeringer

Danmark har investeret markant i kvanteteknologi sammenlignet med sine nordiske naboer. Med en samlet national investering på 2,8 mia. kr. har Danmark investeret mere end dobbelt så meget som Sverige, ti gange så meget som Finland og næsten 70 gange så meget som Norge. Dette placerer Danmark i en ledende position i Norden, hvor landet også har taget føringen med at lancere en national kvantestrategi. Ekspertter peger dog på, at et styrket samarbejde mellem de nordiske lande kan blive afgørende i fremtiden, da landene sammen vil kunne stå stærkere over for de massive investeringer, der sker i både Midt- og Sydeuropa. Danmarks investeringer overstiger også dem i mellemstore europæiske lande som Østrig og Schweiz, hvor Danmark samlet set har investeret over tre og fire gange så meget. Danmarks investeringer er dog fortsat mindre end i større europæiske lande som Frankrig, Tyskland og Storbritannien, som har investeret mere end fem, otte og elleve gange så meget som Danmark.⁵

Danmark og Nederlandene fremhæves ofte for deres betydelige engagement i kvanteteknologi. Nederlandene har gennem en årrække ført en mere offensiv investeringsstrategi, hvor den hollandske stat alene har investeret et beløb svarende til ca. 4,6 mia. kr. i Quantum Delta NL, en paraplyorganisation, der forbinder de fem primære kvanteforskningsmiljøer med erhvervslivet. Dette har styrket Nederlandenes position som en betydelig aktør inden for kvanteteknologi på det europæiske marked.⁶

Danmark og Israel har sammenlignelige nationale investeringer i kvanteteknologi med henholdsvis 2,8 mia. kr. og et beløb svarende til 2,7 mia. kr. Danmarks investeringsstrategi er rettet mod langsigtet vækst i kvanteforskning med et særligt fokus på grundforskning samt en stigende indsats inden for teknologiudvikling og støtte til virksomheder i sektoren. I modsætning hertil er Israels investeringer mere koncentrerede over en kortere periode med et stærkt fokus på udvikling af kvantecomputere og et stigende fokus på forsvarsapplikationer.⁷

På globalt plan er investeringsaktiviteten i kvanteteknologi især koncentreret i Europa, Kina og USA, dog med store forskelle i investeringslandskaberne. Kina har angiveligt investeret et beløb svarende til mere end 100 mia. kr. i kvanteteknologi, hvilket er mere end dobbelt så meget som de samlede statslige investeringer i EU og tre gange de statslige investeringer i USA.⁸ Til gengæld er private investeringer i USA rapporteret til at være op mod 13 gange større end de kinesiske, hvilket indikerer, at de samlede investeringer i USA sandsynligvis overstiger de kinesiske.⁹

Ifølge NATO Science and Technology Organization er udviklingen af og dermed også investeringerne i kvantecomputere primært drevet af kommercielle interesser, mens det for kvantekommunikation og kvantesensorer er motiveret af forsvars- og sikkerhedsrelaterede interesser.¹⁰

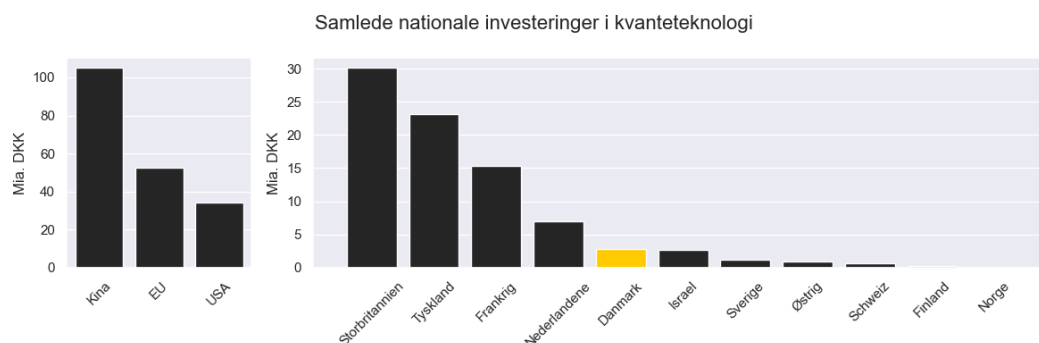


Illustration: De samlede nationale investeringer i kvanteteknologi til dags dato, omregnet til DKK. Venstre figur viser investeringer for Kina, EU og USA, mens højre figur viser investeringer for udvalgte europæiske lande samt Israel. Kilde: Qureca.com, oktober 2024.

⁵ Qureca. Quantum Initiatives Worldwide 2024.

⁶ The Times of Israel. Defence Ministry, Innovation Authority to fund Israel's first quantum computer.

⁷ Physicsworld. How the Netherlands is forging ahead in quantum technologies.

⁸ Qureca. Quantum Initiatives Worldwide 2024.

⁹ Teknologisk Institut. Kvanteteknologi i Danmark. Fremtiden er kvanteteknologi – Hvordan kommer Danmark med?

¹⁰ NATO Science and Technology Organization. Science & Technology Trends 2023-2043.

6.2. Uddannelse

Danmark står stærkt inden for uddannelse af kvantetalenter og er tilmed det land i verden, som uddanner flest inden for kvanteteknologi pr. indbygger¹¹. Pr. 1. september 2023 blev en ny kandidatuddannelse i Quantum Information Science lanceret i et samarbejde mellem Københavns Universitet og Danmarks Tekniske Universitet¹², og i 2025 åbnes en ny kandidatuddannelse i Quantum Computing på Syddansk Universitet¹³. Selvom danske universiteter ikke er de første til at tilbyde sådanne specialiserede kvantekandidatuddannelse, udgør disse initiativer et betydeligt løft for dansk kvanteuddannelse, og de bringer Danmark tættere på niveau med førende internationale universiteter.

Nanochips løfter dansk kvanteundervisning

I efteråret 2024 installerede NQCP den første af fem nanochips i et laboratorium i den nyligt indviede Niels Bohr Bygning. Disse chips skal bruges udelukkende til uddannelsesformål, herunder efteruddannelse af kvantespecialister. Både kvaliteten og antallet af disse nanochips overgår, hvad mange internationale forskningsinstitutioner har til rådighed. Denne indsats løfter dansk kvanteundervisning fra et overvejende teoretisk niveau til et mere eksperimentelt niveau.

Danmark med til at styrke europæisk kvanteuddannelse

EU satser målrettet på at vinde det globale kapløb om at uddanne flest kvantetalenter. Danmark spiller en central rolle i denne indsats gennem aktive bidrag til internationale initiativer, der styrker uddannelsen i kvanteteknologi på tværs af EU. Et af de mest markante projekter er DigiQ (Digitally Enhanced Quantum Technology Master) ledet af en professor fra Aarhus Universitet. DigiQ, som er en del af EU's Quantum Flagship-program, har modtaget 17,6 mio. euro fra Digital Europe Programme og samler 20 universiteter fra ti europæiske lande med målet at udvikle 16 nye specialiserede kandidatuddannelser inden for kvanteteknologi.¹⁴

Med et stigende fokus på specialiserede kvanteuddannelser i Europa, USA og Kina er konkurrencen om at tiltrække talentfulde internationale studerende intensiveret. Forskere ved danske universiteter peger på, at det er blevet vanskeligere at tiltrække dygtige Ph.d'ere og postdocs til Danmark på grund af det øgede fokus på kvanteteknologi over hele verden. De initiativer, som er blevet søsat de seneste par år, herunder regeringens kvantestrategi, skal bl.a. hjælpe danske kvanteuddannelser med at forblive attraktive, både for danske og internationale studerende.

6.3. Forskning

Det danske forskningsmiljø inden for kvanteteknologi står stærkt med fremtrædende forskningsmiljøer inden for både teoretiske og eksperimentelle områder. Dansk forskning oplever vækst, bl.a. som resultat af de seneste års omfattende investeringer og øgede fokus på feltet. Dansk forskning er blandt den førende inden for fotoniske kvantesensorer og -computere, kvantematerialer samt særlige områder inden for kvantekommunikation.

Danmark ligger blandt toppen, når man ser på antal publikationer inden for kvanteteknologi pr. indbygger. Når man ser på gennemsnittet i perioden 2000-2023¹⁵ indtager Danmark tredjepladsen, mens landet er på andenpladsen i data fra 2016-2020¹⁶. I begge opgørelser er Schweiz først, med Østrig på andenpladsen i den første opgørelse, men ikke medtaget i den anden. Selvom "pr. indbygger"-målet kan være misvisende, da lande med store befolkninger som USA og Kina ofte placeres lavt, indikerer begge opgørelser, at Danmark klarer sig godt på publiceringsfronten inden for kvanteforskning.

¹¹ Udenrigsministeriet. Denmark is taking the lead in educating quantum talent.

¹² Danish Quantum Community. DTU and KU launch master's programme in Quantum Information Science.

¹³ Danish Quantum Community. New master's program in quantum computing announced at SDU.

¹⁴ The Quantum Flagship. Europe aiming to win global race for quantum talent.

¹⁵ Teknologisk Institut. Kvanteteknologi i Danmark. Fremtiden er kvanteteknologi – Hvordan kommer Danmark med?

¹⁶ Uddannelses- og Forskningsstyrelsen. Forskning på kvanteområdet. Herunder samspelet mellem universiteter og virksomheder.

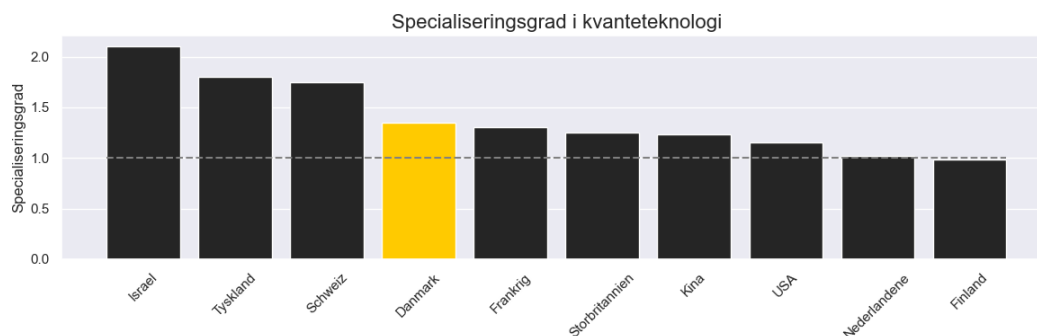


Illustration: Specialiseringsgraden for udvalgte lande. Specialiseringsgraden er et mål for, hvor meget en bestemt type forskning fylder i et land relativt til resten af verden. Hvis et land har en specialiseringsgrad på 1 (svarende til den stiplede linje) betyder det, at den type forskning fylder lige så meget i det pågældende land som i resten af verden. Kilde: Uddannelses og Forskningsstyrelsen, juni 2022.

Specialiseringsgraden er et mål for, hvor meget et forskningsområde fylder i et lands publikationer i forhold til det globale niveau. Data fra perioden 2015-2020 viser, at Danmark har en specialiseringsgrad inden for kvanteteknologi på 1,3, hvilket indikerer, at kvanteforskning udgør 30% mere i Danmark end på verdensplan. I kontrast hertil har Finland og Nederlandene en specialiseringsgrad på omkring 1,0, hvilket betyder, at kvanteforskning er tilsvarende det globale gennemsnit. Tyskland og Schweiz er eksempler på lande med højere specialiseringsgrader end Danmark – her er specialiseringsgraderne på knap 1,8, hvilket indikerer en større vægt på kvanteforskning relativt til anden forskning end i Danmark. Et af de lande i verden, hvor kvanteforskning fylder mest, er Israel, hvis specialiseringsgrad overstiger 2,0. Det betyder, at kvanteforskning udgør mere end dobbelt så stor en del af forskningen i Israel sammenlignet med det globale gennemsnit.¹⁷

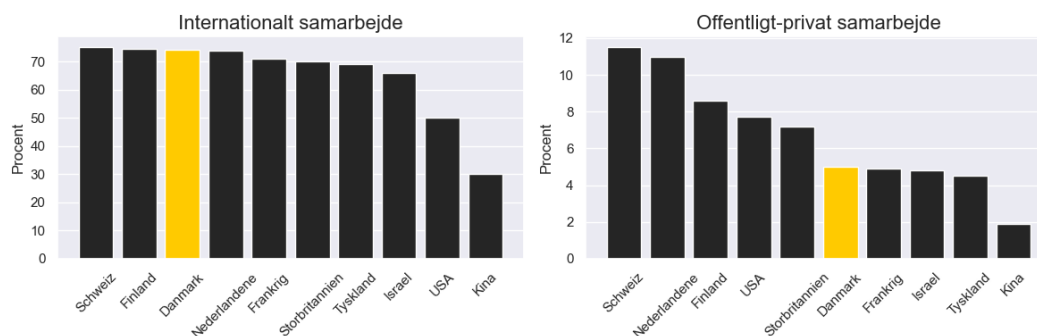


Illustration: Andelen af forskningssamarbejde i danske kvantepublikationer. Venstre figur viser andelen ved internationalt forskningssamarbejde, og højre figur viser andelen ved offentligt-privat samarbejde. Kilde: Uddannelses og Forskningsstyrelsen, juni 2022.

Dansk kvanteforskning udmærker sig ved internationalt forskningssamarbejde – en afgørende faktor, der øger forskningens kvalitet, rækkevidde og indflydelse. I perioden 2016-2020 udgjorde danske kvantepublikationer med internationale medforfattere en andel på 74,1% af alle danske kvantepublikationer, hvilket er betydeligt højere end gennemsnittet for samtlige danske forskningsområder på 61,1%. Dette placerer Danmark blandt førende lande som Schweiz, Finland og Nederlandene. Danmark ligger dermed foran større lande såsom Frankrig, Storbritannien, Tyskland og Israel og endnu længere foran USA og Kina, hvor forskningsinstitutioner i højere grad samarbejder internt i landene.¹⁸

Derimod er billedet anderledes, når det gælder offentligt-privat forskningssamarbejde, som ligeledes er en vigtig faktor for udviklingen af kvanteteknologi, da det fremmer vidensudveksling og teknologioverførsel mellem forskningsinstitutioner og industrien. I perioden 2016-2020 lå andelen af danske kvantepublikationer med offentlig-privat sampublicering på blot 5%, hvilket er markant lavere end gennemsnittet for al dansk forskning, hvor tallet var 10,8%. Dette placerer Danmark blandt de lande med lavest offentlig-privat sampublicering. I Schweiz og Nederlandene er andelen mere end dobbelt så høj, og Finland, USA og Storbritannien ligger også højere end

¹⁷ Uddannelses- og Forskningsstyrelsen. Forskning på kvanteområdet. Herunder samspillet mellem universiteter og virksomheder.

¹⁸ Uddannelses- og Forskningsstyrelsen. Forskning på kvanteområdet. Herunder samspillet mellem universiteter og virksomheder.

Danmark. På niveau med Danmark finder man Frankrig, Israel og Tyskland, mens Kina ligger betydeligt under.¹⁹

6.4. Virksomheder

Seneste opgørelse fra Erhvervsministeriet viser, at Danmark har i alt 24 kvantevirksomheder med omkring 570 ansatte samt en række virksomheder med kvantefunktioner, der samlet beskæftiger ca. 135 personer. De danske kvantevirksomheder er generelt relativt nye, hvor to ud af tre er grundlagt inden for de seneste fem år²⁰. Med et stødt stigende antal nye kvantevirksomheder i de seneste år er det danske kvanteerhvervsliv i stabil vækst. Sammenlignet med Norge og Sverige er Danmark længere fremme i både antallet og størrelsen af kvanteopstartsvirksomheder, men ligger dog generelt efter Finland og Nederlandene.

Der findes ingen fuldstændig database over kvantevirksomheder på verdensplan, men McKinsey & Company offentliggør årligt en rapport om kvanteteknologi, der bl.a. kortlægger aktiviteten inden for kvanteopstartsvirksomheder i flere lande. I deres seneste rapport fra april 2024²¹ identificerer McKinsey & Company omkring 370 kvanteopstartsvirksomheder, heraf fem er danske. Dette antal er betydeligt lavere end det, Erhvervsministeriet har registreret, hvilket sandsynligvis skyldes begrænsninger i McKinseys & Company's screeningsmetoder samt variationer i definitioner af kvante- og opstartsvirksomheder. Antages det, at uoverensstemmelsen er ensartet på tværs af lande, kan McKinsey & Company's data stadig give et sammenligningsgrundlag, som beskrevet nedenfor:

Ifølge McKinsey & Company ligger Danmark på niveau med Norge, Sverige og Østrig i antallet af opstartsvirksomheder inden for kvantecomputere, men efter Finland, Nederlandene, Schweiz, Tyskland, Frankrig og Israel. Storbritannien og USA skiller sig markant ud med henholdsvis otte og 25 gange så mange opstartsvirksomheder inden for kvantecomputere som Danmark.

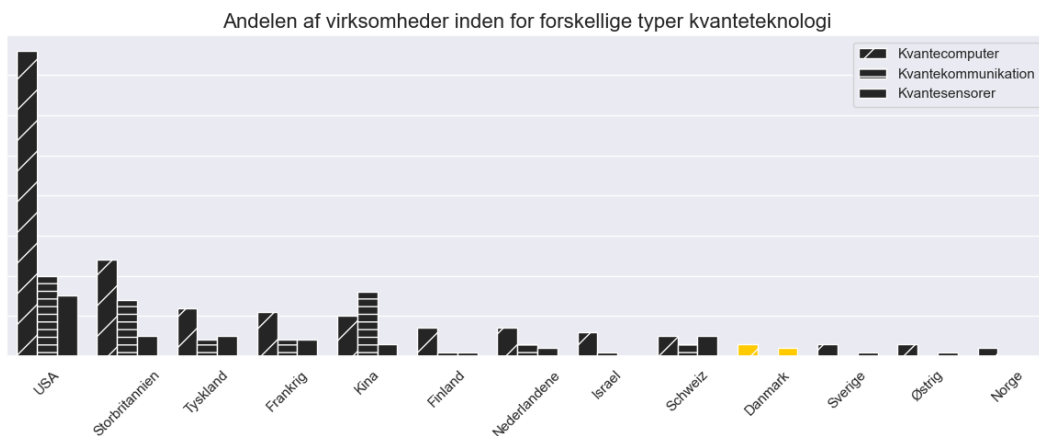


Illustration: Andelen af virksomheder inden for de tre forskellige typer kvanteteknologier: kvantecomputere, kvantekommunikation og kvantesensorer. Kilde: McKinsey & Company, april 2024.

Rapporten af McKinsey & Company viser desuden, at der ikke er danske opstartsvirksomheder inden for kvantekommunikation, hvilket skyldes, at de eksisterende danske virksomheder, som arbejder med kvantesikker kryptering, såsom Cryptomathic, Zybersafe og Dencrypt, er grundlagt i 2014 eller tidligere. Norge, Sverige og Østrig har heller ingen opstartsvirksomheder inden for kvantekommunikation, mens alle andre sammenligningslande har mindst én. I spidsen finder vi Storbritannien og USA, hvor antallet er ca. tre og fem gange højere end i de sammenligningslande med tredjehøjst antal.

Sammenligner man antallet af opstartsvirksomheder inden for kvantesensorer, ligger Danmark på niveau med Sverige, Finland, Nederlandene og Østrig, mens Schweiz, Tyskland, Frankrig og Storbritannien har mindst dobbelt så mange som Danmark. Også her ligger USA i spidsen med

¹⁹ Uddannelses- og Forskningsstyrelsen. Forskning på kvanteområdet. Herunder samspillet mellem universiteter og virksomheder.

²⁰ Erhvervsministeriet. Kvanteteindustrien i Danmark.

²¹ McKinsey & Company. Quantum Technology Monitor.

tre gange så mange opstartsvirksomheder inden for kvantesensorer som de europæiske lande med det højeste antal.

McKinsey & Companys rapport viser, at Danmark har et lavt til moderat antal opstartsvirksomheder inden for alle tre typer kvanteteknologier sammenlignet med andre lande.

Overordnet set er det globale kvantøkosystem karakteriseret ved, at Europa primært beskæftiger sig med produktionen af kvantekomponenter, mens USA – med sine mange store tech-virksomheder – og i nogen grad Kina er de største aftagere af disse komponenter. Ser man på den geografiske fordeling af virksomheder inden for kvanteteknologi, fremstår Tyskland, Nederlandene og Storbritannien som de førende europæiske aktører, både hvad angår antal og størrelse af virksomhederne. I disse lande findes desuden enkelte større tech-virksomheder, som kan måle sig med amerikanske modparter.

6.5. Patenter

I 2023 havde Danmark ni patenter inden for kvantecomputere, et patent inden for kvantekommunikation og fem patenter inden for kvantesensorer, ifølge en optælling af Teknologisk Institut²². Dette relativt lave antal patenter afspejler, hvordan den danske kvanteaktivitet har fordelt sig inden for de tre kvantetyper.

Antallet af patentansøgninger inden for kvanteteknologi på verdensplan er steget markant over de seneste årtier og er 10-15 fordoblet på 20 år. I 2023 var antallet af søgte patenter inden for kvanteberegninger 3508, hvoraf ca. halvdelen kom fra USA og Kina. Kun 14 af disse ansøgninger – svarende til 0,4% – kom fra danske virksomheder, hvilket peger på, at Danmark er betydeligt bagud ift. at patentere kvanteteknologier.²³

Flere af respondenterne i de gennemførte interviews peger på, at en af årsagerne til det lave antal danske patenter er, at det danske forskningsmiljø stadig er i gang med at tilpasse sig en virkelighed, hvor kvanteteknologi ikke længere er et rent forskningsfelt, men også et strategisk forretningsområde. Dette skift kræver en ændret adfærd i forskningsmiljøerne, som traditionelt har været præget af åbenhed og en hurtig offentliggørelse af resultater i videnskabelige tidsskrifter. Respondenterne peger ligeledes på, at en anden medvirkende faktor til det lave antal danske patenter er, at danske kvantevirksomheder i nogen grad vælger at arbejde med forretningshemmeligheder frem for patenter. Dette valg har flere fordele – først og fremmest elimineres risikoen for, at patenteret teknologi kan blive *reverse engineered* og kopieret, og dernæst reduceres den tid og de omkostninger, der normalt kræves til ansøgning og vedligeholdelse af patenter.

Udvalgte eksempler på forsvarsrelaterede kvanteprojekter i andre lande

Frankrig

Frankrigs forsvarsanskaffelsesagentur har siden 2006 investeret i en særlig type kvantesensorer, kvantegravimeter, som kan bruges til at kortlægge havbunden, detektere ubåde og navigation. Tidligere i år modtog den franske flåde for første gang et kvantegravimeter, som skal bruges til førstnævnte formål. Derudover arbejder Frankrigs forsvarsinnovationsagentur også på en anden type kvantesensorer, som skal bruges til elektronisk krigsførelse, herunder overvågning af radar- og kommunikationssignaler. Disse sensorer forventes at være klar inden for fem år.²⁴

Storbritannien

Storbritannien tester en række kvanteteknologier i militære sammenhænge. Tidligere i år demonstrerede den britiske flåde med succes, anvendelsen af en kvantesensor til præcis navigation²⁵. Derudover har Storbritannien gennemført vellykkede tests af kommercielle fly, der anvender kvantebaserede navigationssystemer, som ikke kan hackes eller spores af fjendtlige aktører. Sidstnævnte projekt er støttet af den britiske regering med et beløb svarende til mere end 70 millioner kr. som en del af landets kvantestrategi.²⁶

²² Teknologisk Institut. Kvanteteknologi i Danmark. Fremtiden er kvanteteknologi – Hvordan kommer Danmark med?

²³ Børsen. "Manglende patenter kan være en bombe under dansk konkurrenceevne".

²⁴ Defense News. Armed with quantum sensors, France eyes leaps in electronic warfare.

²⁵ UK Royal Navy. Royal Navy successfully tests quantum-sensing technology.

²⁶ UK Government. Un-jammable quantum tech takes flight to boost UK's resilience against hostile actors.

USA

Det amerikanske militær har i mange år investeret betydeligt i kvanteteknologi til militære formål, og deres luftvåben var blandt de første til at annoncere, at de undersøger kvantecomputerens potentiale i militære sammenhænge²⁷. Eksempler på konkrete anvendelser inkluderer den amerikanske flåde, som tester, hvordan kvantecomputere kan bruges til at overvåge satellitter²⁸, samt det amerikanske flyvåben, der udforsker, hvordan kvantecomputere kan anvendes til logistik og ressourcfordeling inden for militæret.²⁹

6.6. Opsummering

Danmark har opnået en samlet set solid position inden for kvanteteknologi og er særligt stærke inden for investeringer, uddannelse og forskning, men svagere stillet inden for virksomheder og patenter. Danmark har en ambitiøs national kvantestrategi og betydelige nationale investeringer. Uddannelsesmæssigt er Danmark fint med, hvor nye kandidatuddannelser samt nyt avanceret laboratorieudstyr er med til at forbedre dansk kvanteuddannelse. Forskningen er ligeledes godt positioneret med et forholdsvis højt antal publiceringer og stærke internationale samarbejder. Den lave andel af offentligt-privat forskningssamarbejde, det begrænsede antal patenter og det lave antal opstartsvirksomheder sammenlignet med andre lande peger dog på, at Danmark halter efter på det kommercielle område.

7. Regulatoriske rammer

Danske kvantevirksomheder opererer i en sektor med høj risiko for teknologilækage og potentiel dual use-anvendelse – det er derfor vigtigt at forstå den danske og internationale regulering, der ved at overvåge og begrænse visse former for økonomisk aktivitet og teknologiudveksling har til formål at beskytte national sikkerhed.

I dette afsnit beskrives de sikkerhedsrelaterede lovrammer, der gælder for danske kvantevirksomheder. Det beskrives desuden, hvordan tilsvarende regulering ser ud i andre sammenlignelige lande. Efterfølgende analyseres de gældende danske regulatoriske rammer, herunder ift. hvilke regulatoriske udfordringer der potentielt kan opstå inden for de kommende 5-10 år. Afslutningsvist kommer en række anbefalinger til, hvordan reguleringen og den regulatoriske proces kan indrettes med henblik på at imødegå udfordringerne.

Definitioner

National sikkerhed: Forhold, der vedrører Danmarks territoriale integritet og befolkningens overlevelse. Defineret i investeringscreeningslovens § 4, stk. 1, 1. pkt.

Offentlig orden: Forhold, der vedrører Danmarks evne til at opretholde et selvstændigt demokratisk og sikkert samfund, uden at forholdene dermed berører den nationale sikkerhed. Defineret i investeringscreeningslovens § 4, stk. 1, 2. pkt.

7.1. Screening af udenlandske investeringer

Investeringscreeningsreglerne har til formål at forhindre, at udenlandske direkte investeringer og særlige økonomiske aftaler kan udgøre en trussel mod den nationale sikkerhed eller offentlige orden i Danmark. Det gøres gennem screening af og eventuelle indgreb over for sådanne investeringer og aftaler.

Det kunne f.eks. være, hvis en investor fra et land med interesser, som strider mod Danmarks sikkerhedspolitiske interesser, opkøber en betydelig ejerandel i en dansk virksomhed, der udvikler kvanteteknologi. Dette kunne give den udenlandske investor adgang til teknologi, der kan anvendes til sikkerhedsbrud, industrispionage eller teknologisk overlegenhed – og dermed potentielt udgøre en risiko for Danmarks nationale sikkerhed eller offentlige orden.

Screeningsordningen i Danmark er fastsat i investeringscreeningsloven og dens bekendtgørelser, der trådte i kraft den 1. juli 2021. Ordningen giver Erhvervsstyrelsen mulighed for at foretage

²⁷ IOT World Today. US Navy, Air Force Collaborate on Quantum.

²⁸ Defense One. The Navy is trying to use quantum computers to task spy satellites.

²⁹ CoinGeek. US Air Force turns to quantum computing for military logistics.

en konkret og individuel vurdering af, om en udenlandsk investering og visse økonomiske aftaler kan udgøre en potentiel trussel, og træffe beslutninger om at tillade eller forbyde sådanne investeringer. Erhvervsstyrelsen kan også betinge en investering eller aftale, hvis det vurderes, at den mulige trussel kan afbødes ved nærmere betingelser for gennemførelse af investeringen eller aftalen. Det kunne f.eks. være betingelser om begrænsninger af investorens mulighed for at få indsigt i virksomhedens teknologiudvikling eller begrænsninger af investorens ejerandel – og dermed investorens muligheder for at dominere beslutninger, der påvirker virksomhedens strategiske retning.

Sagsbehandlingsprocessen i Danmark er opdelt i to faser. I fase 1 screener Erhvervsstyrelsen, om en sag kan afgøres hurtigt. Som del af screeningen vil der bl.a. blive indhentet vurderinger fra andre relevante myndigheder, herunder de danske efterretningstjenester. Denne fase har en tidsfrist på 45 kalenderdage fra det tidspunkt, hvor ansøgningen er fuldt oplyst. Hvis der under fase 1 identificeres forhold, der kræver yderligere undersøgelser, overgår sagen til fase 2. Her gennemføres en mere dybdegående vurdering, som kan inkludere EU-notifikation og inddragelse af yderligere oplysninger fra ansøgeren. Fase 2 har en tidsfrist på 125 kalenderdage. Den faseopdelte proces har til formål at sikre, at ukomplicerede sager afgøres hurtigt.

Lovgrundlag for investeringsscreening

- **FDI-forordningen** – Europa-Parlamentets og Rådets forordning (EU) 2019/452 af 19. marts 2019 om et regelsæt for screening af udenlandske direkte investeringer i Unionen.
- **Investeringscreeningsloven** – Lov nr. 842 af 10/05/2021 om screening af visse udenlandske direkte investeringer m.v. i Danmark (investeringscreeningsloven), senest ændret ved lov nr. 674 af 11/06/2024.
- **Anvendelsesbekendtgørelsen** – Bekendtgørelse nr. 1491 af 25/06/2021 om afgrænsning af anvendelsesområdet for lov om screening af visse udenlandske direkte investeringer m.v. i Danmark (investeringscreeningsloven).
- **Procedurebekendtgørelsen** – Bekendtgørelse nr. 958 af 26/06/2023 om procedurer for ansøgning om tilladelse til udenlandske direkte investeringer og særlige økonomiske aftaler samt anmeldelse af udenlandske direkte investeringer og særlige økonomiske aftaler m.v.
- **Fortrolighedsbekendtgørelsen** – Bekendtgørelse nr. 959 af 26/06/2023 om videregivelse af fortrolige oplysninger om visse udenlandske direkte investeringer m.v. i Danmark til andre myndigheder.
- **Samarbejdsdirektivet** – Direktiv nr. 2010/40/EU af 12. juli 2010 om samarbejde vedrørende screening af udenlandske direkte investeringer m.v. efter investeringsscreeningsloven.

Den danske screeningsordning er udformet som en kombination af et lovpligtigt tilladelseskrav og en frivillig anmeldelsesmulighed. For investeringer i sektorer og aktiviteter, der anses for særligt følsomme for den nationale sikkerhed eller offentlige orden, er det obligatorisk at søge om tilladelse fra Erhvervsstyrelsen. I øvrige sektorer er det frivilligt for investorer at anmelde deres investeringer.

De særligt følsomme sektorer og aktiviteter er defineret gennem fem kategorier, der vurderes at kræve særlig opmærksomhed for at beskytte national sikkerhed og strategiske interesser.

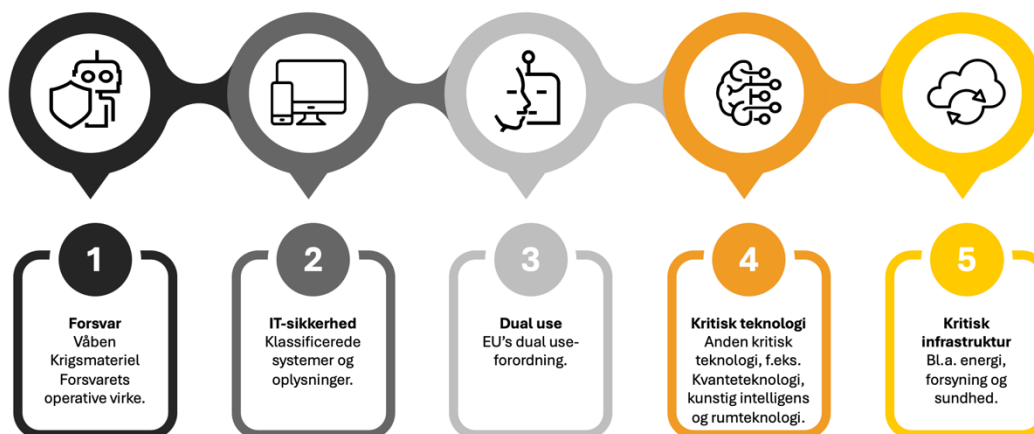


Illustration: Fem særligt følsomme sektorer og aktiviteter er fastsat i investeringscreeningsloven § 6 og uddybet i anvendelsesbekendtgørelsens § 7-11.

Kategorien "kritisk teknologi" omfatter en række avancerede teknologier, herunder "kvanteteknologi ifm. kvantecomputere, kvantesensorer, kvantekryptografi og kvantekommunikation"³⁰. Det betyder, at investeringer i virksomheder, der udvikler eller fremstiller kvanteteknologi, falder under de obligatoriske screeningskrav. Der er dog mulighed for en såkaldt præ-screening, dvs. at Erhvervsstyrelsen kan anmodes om en forhåndsvurdering af, om en påtænkt udenlandsk investering eller særlig økonomisk aftale rent faktisk vedrører kritisk teknologi.³¹

Opkøb af NKT Photonics fik først afslag – og blev derefter godkendt

I maj 2023 blev det offentliggjort, at Erhvervsministeren havde givet afslag på tilladelse til en udenlandsk investering. Den japanske virksomhed Hamamatsu Photonics havde modtaget afslag på at erhverve den danske kvantevirksomhed NKT Photonics, der arbejder med avancerede laserteknologier til brug for kvantekommunikation og kvantesensorer. Afslaget skete med henvisning til investeringscreeningsloven og hensynet til national sikkerhed. Hamamatsu Photonics havde forinden det danske afslag opnået de påkrævede godkendelser fra myndighederne i Tyskland, Storbritannien og USA.

I maj 2024 blev det offentliggjort, at Hamamatsu Photonics få måneder efter afslaget havde indsendt en ny ansøgning om at få transaktionen godkendt i Danmark, og at Erhvervsministeren i denne omgang gav tilladelse til, at investeringen kunne gennemføres på nærmere fastsatte vilkår af hensyn til den nationale sikkerhed.

Sagen vidner om, at Danmark tager nationale sikkerhedshensyn meget alvorligt inden for kritiske teknologier, herunder kvanteteknologi, og at myndighederne er villige til at fastsætte vilkår for at sikre, at investeringer kan gennemføres under betryggende forhold.

Investeringscreeningsloven skal ses på baggrund af EU-forordning om screening af udenlandske direkte investeringer, også kaldet FDI-forordningen, som finder direkte anvendelse i alle EU-medlemslande.³² Forordningen pålægger ikke medlemslandene at indføre nationale investeringscreeningsordninger – dette sker på frivillig basis, hvilket Danmark har valgt at gøre. FDI-forordningen, der trådte i kraft i oktober 2020, etablerer en samarbejds mekanisme mellem medlemslandene og EU-Kommissionen i forbindelse med screening af udenlandske direkte investeringer. Samarbejds mekanismen indebærer, at Danmark skal orientere andre EU-medlemslande og EU-Kommissionen om visse investeringer, som undergår formel screening i Danmark, med henblik på at afklare, om den pågældende investering kan have negative konsekvenser for den nationale sikkerhed eller offentlige orden i andre EU-lande. EU-medlemslandene har herigennem mulighed for at fremsende bemærkninger til investeringer i andre EU-lande. Det er dog fortsat Danmarks egen beslutning, hvorvidt man ønsker at godkende eller afvise investeringer.

³⁰ Anvendelsesbekendtgørelsens § 10, stk. 1, nr. 7.

³¹ Anvendelsesbekendtgørelsens § 6.

³² Europa-Parlamentets og Rådets forordning (EU) 2019/452 af 19. marts 2019 om et regelsæt for screening af udenlandske direkte investeringer i Unionen.

Fremtiden for screening af udenlandske investeringer

I januar 2024 fremsatte EU-Kommissionen et forslag til en ny forordning, der sigter mod at harmonisere screeningsprocedurene for udenlandske investeringer i EU.³³ Baggrunden for forslaget er evalueringer, der viser betydelige forskelle i medlemslandenes screeningsmekanismer og i definitionen af kritiske sektorer, hvilket vurderes at udgøre potentielle sikkerhedsrisici og give mulighed for omgåelse af reglerne. Formålet med den foreslåede forordning er således at skabe en mere ensartet ramme mhp. at styrke sikkerheden i EU og samtidig sikre mere lige konkurrencevilkår. Forslaget går bl.a. på at gøre det obligatorisk for alle EU-lande at etablere screeningsordninger, ligesom ordningen foreslås at skulle omfatte investeringer i kritiske sektorer samt investeringer mellem EU-selskaber, der reelt kontrolleres fra tredjelande. Da den nuværende dansk lovgivning allerede i høj grad lever op til de fleste af de foreslåede bestemmelser, vurderes forslagets konsekvenser for danske virksomheder dog at være begrænsede.

7.2. Kontrol med eksport af produkter

Eksportkontrol med dual use-produkter

Eksportkontrol refererer til de love og regler, der regulerer udførsel af bestemte produkter, herunder software og teknologi, fra et land til udlandet. Eksportkontrolreglerne har til formål at forhindre, at produkter og teknologier misbruges i militære eller sikkerhedstruende sammenhænge, når de eksporteres til tredjelande – f.eks. udførsel af våben og militært udstyr, der kan anvendes til at opruste militært, fremme terrorisme eller overtræde menneskerettighederne.

Eksportkontrol omfatter både kontrol med produkter, der er opført på EU's fælles liste over militært udstyr, som administreres af Rigspolitiet, og kontrol med dual use-produkter, der administreres af Erhvervsstyrelsen. For kvanteteknologi er det primært reguleringen af dual use-produkter, der er relevant i en eksportkontrollammenhæng.

Lovgrundlag for eksportkontrol med dual use-produkter

- **Dual use-forordningen** – Europa-Parlamentets og Rådets forordning (EU) 2021/821 af 20. maj 2021 om en EU-ordning for kontrol med eksport, mæglervirksomhed, teknisk bistand, transit og overførsel i forbindelse med produkter med dobbelt anvendelse (omarbejdning).
- **Seneste EU-kontrolliste** – EU-kommissionens forordning (EU) 2024/2547 af 5. september 2024 om ændring af Europa-Parlamentets og Rådets forordning (EU) 2021/821 for så vidt angår listen over produkter med dobbelt anvendelse.
- **Eksportkontrolloven** - Bekendtgørelse nr. 635 af 09/06/2011 om lov om anvendelsen af visse af Den Europæiske Unions retsakter om økonomiske forbindelser til tredjelande m.v.
- **Ændringslove til eksportkontrolloven**
 - Lov nr. 1732 af 01/12/2020 – Adgang til kontrolbesøg m.v.
 - Lov nr. 2305 af 08/12/2021 – Ophævelse af forbud mod teknisk bistand og indførelse af straffebestemmelse for ny kontrol med cyberovervågningsprodukter
 - Lov nr. 641 af 11/06/2024 – Bemyndigelse til at vedtage national kontrol med eksport af visse produkter med dobbelt anvendelse og indførelse af straffebestemmelser i forbindelse med den nye nationale kontrol og eksport til våbenembargolande.
- **Eksportkontrolbekendtgørelsen, inkl. national kontrolliste** – Bekendtgørelse nr. 694 af 29/05/2024 om kontrol med eksport m.v. af produkter og teknologi med dobbelt anvendelse ("dual use").

Eksportkontrol med dual use-produkter i Danmark sker på baggrund af EU's forordning om kontrol med eksport, mæglervirksomhed, teknisk bistand, transit og overførsel i forbindelse med produkter med dobbelt anvendelse, også kaldet dual use-forordningen, som finder direkte anvendelse i alle EU-medlemslande. Dual use-forordningen sikrer en ensartet tilgang på tværs af EU for at undgå, at produkter, der kan true sikkerheden, eksporteres ud af EU uden den nødvendige kontrol. Bl.a. fastsætter dual use-forordningen fælles vurderingskriterier og fælles typer af

³³ Grund- og nærhedsnotat til Folketingets Europaudvalg om forslag til Europa-Parlamentet og Rådets forordning om screening af udenlandske investeringer i Unionen og om ophævelse af Europa-Parlamentets og Rådets forordning (EU) 2019/452, KOM (2024) 23, 2024.

tilladelser samt en fælles EU-liste over produkter med dobbelt anvendelse – den såkaldte kontrolliste (bilag I).

EU's kontrolliste indeholder en detaljeret oversigt over produkter og teknologier med dobbelt anvendelse, som er underlagt eksportkontrol på grund af deres potentiale til både civil og militær anvendelse. Kontrollisten er opdelt i ti produktområder (0-9). Flere af produktområderne, f.eks. "elektronik", "telekommunikation og informationssikkerhed" og "sensorer og lasere", omfatter eller kan potentielt omfatte kvanteteknologi eller kvanteteknologiske produkter, som dermed kræver tilladelse ifm. eksport ud af EU. Kontrollisten opdateres cirka en gang om året i takt med den teknologiske udvikling. Opdateringerne sker på baggrund af konsensusvedtagelser i de multilaterale eksportkontrolregimer.

Multilaterale eksportkontrolregimer

Der er fire globale eksportkontrolregimer. Danmark er med i alle fire.

Australia Group

Etableret i 1985 for at forhindre spredning af kemiske og biologiske våben gennem eksportkontrol med komponenter og produktionsudstyr hertil.

Missile Technology Control Regime

Stiftet i 1987 for at forhindre udbredelsen af missiler og missilteknologi gennem eksportkontrol af varer og teknologier, der kan bruges til at udvikle missiler.

Nuclear Suppliers Group

Grundlagt i 1974 for at forhindre, at eksport af nukleare materialer, udstyr og teknologi bidrager til spredning af kernevåben.

Wassenaar Arrangement

Etableret i 1996 for at fremme ansvarlighed blandt dets 42 medlemsstater i eksporten af våben og dual use-produkter for at forhindre, at de kan bruges til destabiliserende formål. Medlemmerne har bl.a. udarbejdet en fælles liste over våben og dual use-produkter, som skal undergå eksportkontrol.

Dual use-forordningen indeholder desuden en liste (bilag IV), der oplister de mest kritiske produkter og teknologier fra kontrollisten. Disse produkter og teknologier er underlagt særligt strenge eksportkontrolregler og kræver altid en eksporttilladelse – også hvis eksporten sker mellem EU-lande. En eksportør vil derfor skulle gennemgå både kontrollisten (bilag I) for at afgøre, om det relevante produkt eller den relevante teknologi er omfattet af eksportkontrol, samt bilag IV for at afgøre, om produktet/teknologien er omfattet af de skærpede eksportregler. Produkter og teknologi, som alene er omfattet af kontrollisten (bilag I), og som skal overføres inden for EU, kræver ikke en eksporttilladelse.

	Eksport inden for EU	Eksport uden for EU
Ikke omfattet af EU's kontrolliste (bilag I)	Ikke krav om eksporttilladelse	Ikke krav om eksporttilladelse (medmindre der gælder andre regler, f.eks. catch-all-bestemmelser eller sanktioner)
Omfattet af EU's kontrolliste (bilag I)	Ikke krav om eksporttilladelse	Krav om eksporttilladelse
Omfattet af EU's kontrolliste (bilag I) og listen over særligt kritiske produkter (bilag IV)	Krav om eksporttilladelse	Krav om eksporttilladelse
Omfattet af den nationale kontrolliste	Ikke krav om eksporttilladelse	Krav om eksporttilladelse

EU-medlemslande har mulighed for at indføre yderligere kontrolforanstaltninger på ikke-listeførte produkter med dobbelt anvendelse, hvis det vurderes nødvendigt af hensyn til den offentlige sikkerhed eller menneskerettigheder. I november 2024 havde 14 af de 27 EU-lande valgt at benytte sig af denne mulighed, herunder Danmark.³⁴

Således har man fra dansk side med eksportkontrolbekendtgørelsen indført en national kontrolliste med fem konkrete dual use-produkter, der ikke er nævnt på EU's kontrolliste, men som af danske myndigheder, i samarbejde med andre EU- og partnerlande, vurderes at udgøre en særlig sikkerhedsrisiko, herunder kvantecomputere. Produkterne på den nationale kontrolliste er omfattet af krav om tilladelse ved eksport ud af EU, og ansøgningsprocessen er tilsvarende den, der gælder for produkter på EU's kontrolliste. Eksportkontrolbekendtgørelsen trådte i kraft den 1. juli 2024, og den nationale kontrolliste er optrykt som bilag 1. Listen er en detaljeret oversigt over dual use-produkter, der for hvert produkt eller teknologi specificerer tekniske karakteristika.

Kvanteteknologi på den nationale kontrolliste **Uddrag fra bilag 1 til bekendtgørelse nr. 694 af 29/05/2024**

"4A906. Kvantecomputere og relaterede 'elektroniske enheder' og komponenter som følger:

- a. *Kvantecomputere, som følger:*
 - 1) *Kvantecomputere, der understøtter 34 eller flere, men færre end 100, 'fuldt kontrollerede', 'forbunde' og 'fungerende' 'fysiske qubits', og som har en C-NOT-fejl på mindre end eller lig med 10^{-4} .*
 - 2) *Kvantecomputere, der understøtter 100 eller flere, men færre end 200, 'fuldt kontrollerede', 'forbunde' og 'fungerende' 'fysiske qubits', og som har en C-NOT-fejl på mindre end eller lig med 10^{-3} .*
 - 3) *Kvantecomputere, der understøtter 200 eller flere, men færre end 350, 'fuldt kontrollerede', 'forbunde' og 'fungerende' 'fysiske qubits', og som har en C-NOT-fejl på mindre end eller lig med 2×10^{-3} .*

Eksport af dual use-produkter, der er underlagt eksportkontrol, kræver tilladelse fra de danske myndigheder. Kompetencen til at udstede eksporttilladelser ligger hos Erhvervsstyrelsen for så vidt angår dual use-produkter og -teknologier. Hvis en virksomhed ønsker at eksportere et dual use-produkt, der står på EU's kontrolliste eller den nationale kontrolliste, skal der således ansøges om en eksporttilladelse fra Erhvervsstyrelsen, som vurderer hver ansøgning individuelt. Hvis en udførsel vurderes at udgøre en risiko, kan Erhvervsstyrelsen give afslag eller fastsætte specifikke vilkår for eksporttilladelsen, f.eks. krav om interne kontrolprocedurer, rapportering af eksportaktiviteter, opbevaring af relevant dokumentation eller betingelser om, hvilke former for dokumentation eksportøren skal fremvise.

Ud over de produkter og teknologier, der fremgår af EU's kontrolliste og den nationale kontrolliste, gælder der også en såkaldt catch-all-bestemmelse for eksport til lande uden for EU. Denne regel, der er bestemt i EU's dual use-forordning, giver myndighederne mulighed for at kræve eksporttilladelse for varer, der ikke er specifikt nævnt på listerne, hvis der er en risiko for, at de kan anvendes til udvikling og produktion af masseødelæggelsesvåben, militær anvendelse i lande omfattet af en våbenembargo eller krænkelse af menneskerettighederne. Hvis en eksportør har grund til at mistænke, at en vare kan blive anvendt til et kritisk eller militært formål, skal der indgives en ansøgning til Erhvervsstyrelsen. Derudover kan Erhvervsstyrelsen selv pålægge ansøgningspligt i konkrete tilfælde, hvor der vurderes at være risiko for, at eksporten kan skade international sikkerhed. Tilgangen gør det muligt at håndtere nye og uforudsete trusler i takt med den teknologiske udvikling og stiller samtidig krav til eksportørernes agtpågivenhed og due diligence. Eksportører skal aktivt vurdere potentielle risici ved deres eksport og indhente relevant dokumentation, som ifm. ansøgningen skal indsendes til Erhvervsstyrelsen, der, baseret på en samlet risikovurdering af de indsendte oplysninger, vurderer, om der kan gives tilladelse.

³⁴ Følgende EU-lande har vedtaget en national kontrolliste: Belgien (delvist), Tjekkiet, Danmark, Kroatien, Letland, Litauen, Luxembourg, Ungarn, Nederlandene, Østrig, Rumænien, Slovenien, Finland og Sverige, jf. Informationsmeddelelse C/2024/5881 af 2. oktober 2024.

For at understøtte eksportørers vurdering af udenlandske kunder tilbyder Erhvervsstyrelsen en mulighed for at få foretaget et kundetjek. Ved et kundetjek vurderes det, om danske myndigheder har kritiske oplysninger om kunden, og eksportøren informeres om resultaterne. Kundetjekket udføres bl.a. med bistand fra efterretningstjenesterne og kan være et værdifuldt redskab i arbejdet med at sikre compliance og beskytte teknologier mod uautoriseret anvendelse.

Fremtiden for eksportkontrol

EU-Kommissionen offentliggjorde i januar 2024 en hvidbog om eksportkontrol som led i en samlet pakke, der skal styrke EU's økonomiske sikkerhed og sikre en ensartet og effektiv eksportkontrol af dual use-produkter. Hvidbogen fremhæver en række udfordringer ved det nuværende eksportkontrollsystem, herunder manglende koordination mellem EU-landene og begrænsninger i den nuværende ordnings evne til hurtigt at tilpasse sig nye sikkerhedsrisici. På denne baggrund foreslår Kommissionen bl.a. at gøre EU's kontrolliste mere dynamisk ved at tilføje kritiske teknologier, der ikke nødvendigvis kan opnås konsensus om i de eksisterende internationale kontrolregimer. Samtidig opfordres der til styrket koordination mellem nationale kontrollister, så medlemslandenes indsats i højere grad harmoniseres. Danmark støtter forslaget, idet det vurderes at ville skabe lige vilkår for europæiske virksomheder og øge sikkerheden på tværs af medlemslandene.³⁵

Handelssanktioner

I tillæg til eksportkontrolreglerne er handelssanktioner et vigtigt redskab i reguleringen af handel med kritiske produkter. Sanktioner kan pålægges af både EU og FN og har til formål at forhindre, at visse produkter, teknologier eller økonomiske ressourcer når frem til stater, virksomheder, organisationer eller personer, der udgør en trussel mod international fred og sikkerhed. EU og FN vedtager løbende handelssanktioner mod et land, hvis landet – trods flere opfordringer til det modsatte – fortsætter med at overtræde internationale aftaler om f.eks. menneskerettigheder eller brud på våbenhvile. Sanktionerne kan omfatte totalforbud mod eksport af specifikke produkter, restriktioner på visse sektorer, eller finansielle foranstaltninger som indefrysning af aktiver og begrænsning af finansielle transaktioner.

Når sanktioner er gældende, vil de ofte også påvirke eksporten af varer, der normalt ikke kræver tilladelse. I så fald vil selv produkter, der ikke er opført på kontrollisterne, være underlagt eksportrestriktioner. Den samlede liste over varer, som er underlagt eksportkontrol, kan derfor variere, hvilket understreger vigtigheden af, at eksportører altid kontrollerer, om der er gældende sanktioner for det land, de eksporterer til, eller for den specifikke kunde, de handler med.

Et eksempel kunne være ved eksport af avanceret kvantesensorteknologi til et land, der er underlagt en international våbenembargo. Hvis en eksportør bliver bekendt med, at teknologien potentielt kunne anvendes til militære formål, som f.eks. udvikling af avancerede våbensystemer eller overvågningsudstyr til undertrykkelse af civilbefolkningen, vil myndighederne kunne kræve en eksporttilladelse, selvom produktet ikke er opført på hverken EU's kontrolliste eller den nationale kontrolliste. For danske eksportører betyder det, at de både skal forholde sig til de nationale regler, herunder EU's og den nationale kontrolliste, og til de sanktioner, som Danmark har tilsluttet sig gennem EU eller FN.

Erhvervsstyrelsen administrerer reglerne om de dele af sanktionerne, som omhandler indefrysning og eksportforbud for visse produkter, herunder dual use-produkter. Erhvervsstyrelsen vejleder desuden virksomheder om, hvordan sanktioner og eksportkontrol kan påvirke deres handel, og hvordan virksomhederne overholder reglerne.

7.3. Reguleringen i andre lande

Over de seneste år har flere lande bevæget sig i retning af strengere og mere omfattende regulering inden for eksportkontrol og investeringsscreening, herunder i form af nationale kontrollister. Denne udvikling ses i høj grad at være drevet af en stigende global opmærksomhed på de

³⁵ Grund- og nærhedsnotat til Folketingets Europaudvalg om Europa-Kommissionens hvidbog om eksportkontrol, KOM (2024) 25 final, af 4. marts 2024.

sikkerhedsrisici, der opstår, når udenlandske aktører får adgang til kritisk infrastruktur, kritisk teknologi og forsvar. Hér spiller kvanteteknologi en central rolle, og det er tydeligt, at flere lande har fået øjnene op for kvanteteknologiens strategiske betydning, hvilket øger behovet for kontrol og beskyttelse på området. Ved regulering forsøger flere lande at beskytte deres nationale sikkerhed og økonomiske interesser ved at forhindre teknologilækage og uønskede udenlandske investeringer, der potentielt kan kompromittere kritisk infrastruktur eller strategiske sektorer. Nedenfor beskrives reguleringen på investeringscreening- og eksportkontrolområdet for en række udvalgte sammenlignelige lande.

Tyskland

Tyskland har et af Europas mest omfattende investeringscreeningsregimer, reguleret af udenrigshandelsloven (Außenwirtschaftsgesetz) og udenrigshandelsbekendtgørelsen (Außenwirtschaftsverordnung (AWV)), som giver Forbundsministeriet for Økonomiske Anliggender og Klimahandling (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz) beføjelse til at screene udenlandske investeringer, der kan påvirke nationale sikkerhedsinteresser. Screeningen dækker både sektorspecifikke og tværsektorielle investeringer og er særligt fokuseret på kritisk infrastruktur og følsomme teknologier. Tyskland er en del af EU's investeringscreeningssamarbejde og har også nationale regler, der går ud over EU's minimumskrav.

Den tyske eksportkontrol reguleres ligeledes af udenrigshandelsbekendtgørelsen (AWV) og følger EU's dual use-forordning, herunder EU's kontrolliste. Tyskland har indført en national kontrolliste, der i juli 2024 blev udvidet med en række nye teknologier, herunder kvantecomputere og relaterede elektroniske samlinger, komponenter hertil samt understøttende teknologi og software.

Frankrig

Frankrigs investeringscreening reguleres af Code monétaire et financier (lov om monetære og finansielle anliggender) og administreres af Ministère de l'Économie et des Finances (økonomi- og finansministeriet). Frankrig er en del af EU's investeringscreeningssamarbejde og har etableret nationale investeringscreeningsregler, særligt inden for strategiske sektorer som forsvar, energi og avanceret teknologi.

Eksportkontrollen i Frankrig følger EU's dual use-forordning og anvender EU's kontrolliste over produkter med dobbelt anvendelse. Frankrig har ligeledes indført en national kontrolliste, der i februar 2024 blev udvidet til at omfatte kvantecomputere og kvanteteknologi, tilhørende elektroniske samlinger og komponenter samt software og teknologi designet eller modificeret til udvikling eller produktion af kvantecomputere.

Storbritannien

Storbritanniens investeringscreening er reguleret af National Security and Investment Act fra 2021, som giver regeringen beføjelser til at gennemgå udenlandske investeringer, der kan udgøre en risiko for national sikkerhed. Screeningen fokuserer især på sektorer som forsvar, energi og avanceret teknologi. Efter Storbritanniens udtræden af EU er landet ikke længere omfattet af EU's regulering på området, men har implementeret en screeningsordning, der ligner EU's system.

Eksportkontrollen i Storbritannien håndteres af Export Control Joint Unit (ECJU) under Department for International Trade. Reglerne er baseret på Export Control Order fra 2008, som regulerer eksport af både militærvarer og dual use-produkter. For eksport til visse allierede lande, herunder EU-medlemslande og USA, kan der typisk opnås en eksporttilladelse ved at anvende en Open General Export Licence (OGEL) med forudgående registrering og opfyldelse af særlige krav. Eksport til andre lande kræver en individuel eksporttilladelse. I forlængelse af den britiske National Quantum Strategy fra marts 2023 blev Export Control Order i marts 2024 udvidet til at omfatte bl.a. kvantecomputere og relaterede elektroniske samlinger samt komponenter hertil.

USA

USA's investeringscreening administreres af Committee on Foreign Investment in the United States (CFIUS), som vurderer udenlandske investeringer, der kan udgøre en risiko for national sikkerhed. Foreign Investment Risk Review Modernization Act (FIRRMA) fra 2018 styrkede CFIUS' beføjelser, især i relation til investeringer i kritiske sektorer som teknologi, forsvar og infrastruktur. CFIUS kan pålægge restriktioner eller blokere investeringer, når det vurderes, at de udgør en trussel. I november 2024 indførte USA et forbud mod visse investeringer i kinesiske teknologivirksomheder, der arbejder med avancerede teknologier, herunder kvanteteknologi. Forbuddet træder i kraft den 2. januar 2025.

Eksportkontrollen i USA er reguleret af Export Administration Regulations (EAR), som administreres af Bureau of Industry and Security (BIS) under U.S. Department of Commerce. For så vidt angår dual use-produkter gælder den nationale Commerce Control List (CCL). USA's eksportkontrolregler finder ekstraterritorial anvendelse, hvilket betyder, at reglerne også gælder uden for USA's grænser, når eksporttransaktioner involverer amerikanske produkter, teknologi eller komponenter. I september 2024 indførte USA eksportkontrol på bl.a. kvantecomputere, tilknyttet udstyr, komponenter, materialer, software og teknologi relateret til udvikling og vedligeholdelse af kvantecomputere. Med lovændringen blev der også indført en ny licensfritagelse – Implemented Export Controls (IEC) – der betyder, at eksport og reeksport til og fra lande, der har implementeret tilsvarende nationale kontroller for de relevante varer, ikke kræver en licensansøgning. For Danmark, der har indført eksportkontrol på de samme produkter som USA, betyder det, at visse amerikanske produkter kan eksporteres til Danmark uden krav om eksporttilladelse.

Japan

Japans investeringscreening er reguleret under Foreign Exchange and Foreign Trade Act (FEFTA), og administreres af Ministry of Economy, Trade and Industry (METI). Screeningsordningen fokuserer på investeringer i strategisk vigtige sektorer såsom forsvar, teknologi og kritisk infrastruktur, der kan påvirke landets nationale sikkerhed. I 2020 udvidede Japan omfanget af screening, så flere sektorer og investeringstyper nu kræver forhåndsgodkendelse.

Eksportkontrollen i Japan er også reguleret af FEFTA og omfatter regler for eksport af dual use-varer, -teknologi og -software. I september 2024 blev listen over eksportkontrollerede varer udvidet til at omfatte en række nye kritiske teknologier, herunder kvantecomputere. Kvantekryptografi samt lasere og optiske sensorer var allerede omfattet. Japans eksportkontrolsystem er desuden karakteriseret ved deltagelse i flere multilaterale eksportkontrolregimer, hvilket sikrer koordination med internationale standarder.

Sammenfatning

I Danmark har man med investeringsscreeningsloven og den nationale kontrolliste taget proaktive skridt for at styrke beskyttelsen af kritiske teknologier, herunder kvanteteknologi. Initiativerne afspejler en øget bevidsthed om de sikkerhedsmæssige aspekter forbundet med kvanteteknologi. Internationalt observeres en lignende udvikling. Gennemgangen af reguleringen i Tyskland, Frankrig, Storbritannien, USA og Japan viser en fælles indsats for at beskytte national sikkerhed i relation til kvanteteknologi. På tværs af de undersøgte lande ses eksempler på nyere regulering af udenlandske investeringer samt lovændringer, der skærper den nationale kontrol med eksport af kvanteteknologi. Alle landene har indført nationale kontrollister, der omfatter en eller flere typer kvanteteknologi. Tilsvarende tiltag ses hos andre sammenlignelige lande, såsom Nederlandene, Spanien og Canada, mens EU arbejder på at harmonisere medlemslandenes screeningsprocedurer og eksportkontrol yderligere. Dette peger på, at sådanne foranstaltninger er blevet et grundvilkår i et geopolitisk klima, hvor kontrol med avancerede teknologier i stigende grad er nødvendig for at beskytte nationale og allieredes sikkerhedsinteresser. Regler for investeringscreening og eksportkontrol er således blevet en integreret del af de markedsvilkår, som kvantevirksomheder opererer under, også på globalt plan.

7.4. Analyse af gældende regulatoriske rammer

Danmark er som en lille, åben økonomi afhængig af udenlandske markeder og global samhandel, herunder muligheden for at modtage udenlandske investeringer og foretage investeringer i udlandet. Udenlandske investeringer i Danmark er grundlæggende gavnlige for erhvervslivet og det danske samfund som helhed, da de ikke kun bringer nødvendig kapital, men også indebærer adgang til værdifuld viden, som understøtter teknologiudvikling og innovation.

I de senere år er der imidlertid opstået en tendens til, at udenlandske investeringer i EU i stigende grad målrettes mod strategiske aktiver, hvor investoren opererer under statslig indflydelse. I nogle tilfælde er disse investeringer en del af en erklæret strategi fra regeringen i det pågældende land, hvor investeringer i udlandet anvendes til at styrke deres sikkerhedspolitiske position på den globale scene. Udenlandske investeringer i danske virksomheder eller kritisk infrastruktur kan dermed have bagvedliggende ikke-kommercielle, strategiske hensigter.

Observationer om potentielle fremtidige regulatoriske udfordringer

For at imødegå disse trusler er der etableret sikkerhedsrelaterede regulatoriske rammer, herunder investeringscreenings- og eksportkontrolregler. Mens disse rammer er nødvendige for at forhindre teknologilækage og beskytte mod sikkerhedstrusler, medfører de også visse udfordringer for danske kvantevirksomheder. PA Consulting har sammenfattet de perspektiver og erfaringer, som rapportens respondenter har bidraget med, samt egne vurderinger i følgende observationer, som allerede består eller vurderes at kunne opstå inden for en årrække på 5-10 år.

Ét aspekt, der af visse respondenter er blevet omtalt som en eksisterende udfordring, og som vurderes at komme til at fylde mere hos kvantevirksomhederne i takt med, at antallet af ansøgninger på kvanteområdet øges, er den kompleksitet og administrative byrde, som virksomhederne møder ved efterlevelse af reglerne og processerne, der er forbundet hermed. At opnå forståelse for reglerne og ansøgningsprocesserne for investeringsgodkendelser og eksporttilladelser kan være tids- og ressourcekrævende, hvilket vurderes at kunne påvirke især mindre virksomheder og startups, der måske ikke har de nødvendige kompetencer eller ressourcer. Nogle respondenter har omtalt sagsbehandlingstider, der er længere end ønsket, som en eksisterende udfordring, der kan hæmme virksomhedernes evne til hurtigt at reagere på markedsmuligheder og indgå internationale samarbejder.

Manglende harmonisering af regler og procedurer mellem lande er ligeledes af visse respondenter blevet nævnt som et aspekt, der kan skabe ulige konkurrencevilkår og stille danske kvantevirksomheder ringere ift. lignende udenlandske virksomheder. Forskelle i reguleringsniveau og -tilgang mellem lande kan betyde, at udenlandske investeringer og talent i højere grad søger mod lande, der tilbyder mere favorable rammevilkår, hvilket potentielt kan svække Danmarks position inden for kvanteteknologi. Også fraværet af reciprocitet i handelsrelationerne – f.eks. mellem Danmark og Kina – er blevet nævnt som et forhold, der skaber en asymmetri i regulering og markedsadgang og en skævvridning i konkurrencen, og som vurderes at have potentiale til at begrænse eller hæmme danske kvantevirksomheders globale position.

Det er PA Consultings vurdering, at fremtidige regulatoriske udfordringer også kan omfatte behovet for løbende at tilpasse reglerne til den hastige teknologiske udvikling, så der sikres en hensigtsmæssig og tidssvarende beskyttelse af nationale interesser. På eksportkontrolområdet, eksempelvis, kunne en mulig udfordring være, at eksisterende regulering risikerer at blive forældet, hvis kontrollister m.m. ikke holdes opdaterede, så nye teknologier og anvendelser dækkes. Tilsvarende kunne der på investeringsscreeningsområdet eksempelvis opstå spørgsmål om, hvorvidt en bred formulering risikerer at inkludere teknologier eller anvendelser, der kun udgør en begrænset sikkerhedsrisiko. Eksemplerne peger på et behov for løbende at sikre, at reguleringen til stadighed rammer den rette balance i lyset af teknologisk og sikkerhedsmæssig udvikling.

Anbefalinger til forbedringstiltag

Reguleringen skal understøtte den videre udvikling af det kvanteteknologiske område uden at udfordre national sikkerhed. Det kræver at reguleringen på området finder den rette balance mellem hensynet til national sikkerhed på den ene side og behovet for åbenhed og internationalt samarbejde på den anden side. På baggrund af egne og respondenters vurderinger og observationer, og i lyset af den kvanteteknologiske udvikling, der af forskningsmiljøet forventes inden for de næste 5-10 år, har PA Consulting identificeret fem anbefalinger til, hvordan reguleringen og den regulatoriske proces kan indrettes mhp. at imødegå potentielle udfordringer.

1. Løbende tilpasning af reguleringen

Løbende opdatering af reglerne på området i takt med kvanteteknologiske fremskridt vurderes at være afgørende for at sikre den rette regulatoriske balance. F.eks. kan grænseværdierne på den nationale kontrolliste med den teknologiske udvikling risikere blive forældede og skulle opdateres til den nye teknologiske virkelighed. Mulighederne for at etablere mekanismer til løbende opdatering af lovgivningen kan undersøges. Det kunne f.eks. være i form af en tværfaglig ekspertgruppe, der overvåger teknologiske fremskridt og leverer strategisk rådgivning om nødvendige justeringer af lovgivningen, så reguleringen til stadighed er relevant og effektiv, samt rammer den rette balance mellem sikkerhed og innovation i takt med den kvanteteknologiske udvikling.

2. Øget transparens om regler, krav og processer

For at sikre, at virksomheder kan navigere effektivt i regler og processer, kan det undersøges, om der er muligheder for at øge transparensen omkring gældende regler. Det kunne f.eks. være gennem lettilgængelige vejledninger og informationsmateriale, specifikt rettet mod kvantevirksomheder, der hjælper virksomhederne med at navigere i det komplekse regulatoriske landskab og forstå, hvilke processer de går ind i. Myndighederne kan også overveje, om uddannelsesinitiativer og øget rådgivning, især målrettet små og mellemstore virksomheder, vil kunne støtte kvantevirksomhederne i deres arbejde med at efterleve reglerne. Ved at styrke virksomhedernes kapacitet til at navigere i regulering og processer er der potentiale for at bidrage til at styrke virksomhedernes evne til at handle hurtigt og korrekt, når nye markedsmuligheder opstår, og reducere risiko for utilsigtede overtrædelser. Det vil også potentielt medføre en større forståelse fra virksomhedernes/ansøgernes side ift. processuelle udfordringer, ventetider osv. Samlet set vurderes øget transparens at kunne styrke tilliden mellem virksomheder og myndigheder.

3. Styrket dialog mellem myndighederne og kvanteindustri

Der kan kigges på mulighederne for at etablere en tættere og løbende dialog mellem myndigheder og industrien, der kan adressere konkrete og praktiske udfordringer i anvendelsen af reguleringen. Det kunne f.eks. ske ved etablering af faste fora (eller anvendelse af ét af de eksisterende) eller strukturerede feedbackmekanismer. En styrket dialog ses at kunne bidrage til at sikre, at reguleringen og dens håndhævelse fungerer i praksis uden at være unødigt byrdefuld, f.eks. ved at dele erfaringer om, hvordan lov- og sikkerhedskrav kan implementeres i virksomhedernes arbejde. Styrket dialog ses også at kunne give input til behov for lovtilpasning (jf. anbefaling 1) samt bidrage til mere transparens om regler og processer (jf. anbefaling 2).

4. Sikre effektivt sagsbehandlingsniveau

Der er tale om en ny og kompleks teknologi samt et forholdsvis nyt reguleringsområde, hvilket kan gøre administrationen heraf udfordrende. Myndighederne kan overveje at kigge på, hvorvidt/hvordan det nuværende niveau for sagsbehandling og adressering af sikkerhedsrisici kan fastholdes – og hvis muligt styrkes – i takt med et forventeligt stigende antal ansøgninger fra kvantevirksomheder. Mere forudsigelige sagsbehandlingstider vurderes at have potentiale til at forbedre virksomhedernes evne til hurtigt at reagere på markedsmuligheder og indgå samarbejder.

5. **Fuld harmonisering af EU-regler**

Arbejde aktivt for fuld harmonisering af investeringscreening og eksportkontrol på EU-niveau. Fælles standarder og praksis på området vurderes at have potentiale til at reducere ulige konkurrencevilkår samt bidrage til en stærkere og mere effektiv beskyttelse af kvanteteknologi på tværs af landegrænser.

Ovenstående anbefalinger vurderes at kunne bidrage til at imødegå de identificerede observationer og potentielle udfordringer samt skabe forudsætningerne for en afbalanceret regulering, der understøtter videre udvikling af kvanteområdet uden at gå på kompromis med sikkerheden.

Potentielle fremtidige regulatoriske udfordringer	Anbefalinger til fremtidig regulering
Behov for at tilpasse reglerne til den teknologiske udvikling.	Undersøge mulighederne for at etablere mekanismer til løbende opdatering af reguleringen, f.eks. gennem en tværfaglig ekspertgruppe, der overvåger teknologiske fremskridt og rådgiver om nødvendige justeringer af lovgivningen.
Komplekse og ressourcekrævende efterlevelseskrav.	Overvej mulighederne for at øge transparensen omkring de gældende regler og krav, f.eks. gennem lettilgængelige vejledninger samt støtte virksomhederne i deres compliancearbejde via uddannelsesinitiativer og rådgivning.
Balance mellem beskyttelse af national sikkerhed og fremme af internationalt samarbejde.	Undersøge mulighederne for at styrke dialogen mellem myndigheder og kvanteindustri, der kan adressere konkrete og praktiske udfordringer i anvendelsen af reguleringen.
Sagsbehandlingstider, der er længere end ønsket.	Undersøge mulighederne for, hvorvidt/hvordan det nuværende sagsbehandlingsniveau kan fastholdes – og hvis muligt styrkes – i takt med et forventeligt stigende antal ansøgninger fra kvantevirksomheder.
Ikke fuld harmonisering af regler og procedurer.	Arbejde aktivt for fuld harmonisering af investeringscreening og eksportkontrol på EU-niveau.

8. Bilag

8.1. Litteraturliste

1. Uddannelses- og Forskningsministeriet. Strategi for kvanteteknologi. Del 1 – Forskning og innovation i verdensklasse. Juni 2023. <https://ufm.dk/publikationer/2023/strategi-for-quanteteknologi-del-1-forskning-og-innovation-i-verdensklasse>
2. Erhvervsministeriet. Strategi for kvanteteknologi. Del 2 – Kommercialisering, sikkerhed og internationalt samarbejde. September 2023. <https://www.em.dk/Media/638314888112081952/Kvantestrategi.pdf>
3. Kommissorium for Nationalt Forum for Kvanteteknologi. December 2023. <https://www.em.dk/Media/638442862214652059/Kommissorium%20for%20Nationalt%20Forum%20for%20Kvanteteknologi-2.docx.pdf>
4. Erhvervsstyrelsen. Kortlægning af økosystemet for kvanteteknologi i dansk erhvervsliv. Juni 2022. <https://erhvervsstyrelsen.dk/kortlaegning-af-oekosystemet-quanteteknologi-i-dansk-erhvervsliv>
5. Erhvervsministeriet. Kvanteeindustrien i Danmark. Juni 2024. <https://via.ritzau.dk/files/5540552/13883641/100389/da>
6. Uddannelses- og Forskningsstyrelsen. Forskning på kvanteområdet, herunder samspillet mellem universiteter og virksomheder. Juni 2022. <https://ufm.dk/publikationer/2022/forskning-pa-quantecomradet-herunder-samspillet-mellem-universiteter-og-virksomheder>
7. Udenrigsministeriet. Udenrigsministeriets strategi for teknologiens diplomati. Marts 2024. https://techamb.um.dk/-/media/country-sites/techamb-en/media/strategy-2024/strategi-for-udenrigsministeriets-teknologiske-diplomati_digital.ashx
8. Udenrigsministeriet. Quantum Technology Opportunities in Denmark. 2021. https://investindk.com/-/media/websites/invest-in-denmark/publications/tech/invest-in-denmark-tech-quantum-fact-sheet-2021_new.ashx
9. Udenrigsministeriet. Denmark is taking the lead in educating quantum talent. <https://investindk.com/insights/denmark-is-taking-the-lead-in-educating-quantum-talent>
10. Teknologisk Institut. Kvanteteknologi i Danmark. Fremtiden er kvanteteknologi – Hvordan kommer Danmark med? December 2023. https://www.teknologisk.dk/_media/89171_Teknologisk%20Udsyn%20-%20Kvanteteknologi%20i%20Danmark%20-%202023.pdf
11. National Forsvarsteknologisk Center. Forsvarsteknologisk forskning i Danmark. Februar 2024. <https://www.ft.dk/samling/20231/almdel/FOU/bilag/75/2823395.pdf>
12. Industriens Fond, KPMG og IT-Branchen. Quantum Technology in Denmark. The case for Danish investment in quantum technology. November 2020. <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/dk/pdf/dk-2020/11/Quantum-technology-in-Denmark.pdf>
13. Niels Bohr Instituttet, DTU Physics, DTU Electro, KMD, IBM, Dansk Erhverv, IT-Branchen, KPMG. Quantum-related Cybersecurity in Denmark. Oktober 2022. <https://digital-lead.dk/files/Innovation/Cyberboost%20-%20Quantum%20related%20cyber%20security.pdf>

14. Danish Quantum Community. Danish Quantum Agenda 2022. Juni 2022. <https://dq.c.dk/wp-content/uploads/2022/06/Danish-Quantum-Agenda-v1-0.pdf>
15. Politiets Efterretningstjeneste. Vurdering af spionagetruslen mod Danmark, Færøerne og Grønland. Maj 2023. https://pet.dk/-/media/mediefiler/pet/dokumenter/analyser-og-vurderinger/vurdering-af-spionagetruslen-mod-danmark/vurdering-af-spionagetruslen-mod-danmark-2023_dk_web.pdf
16. Forsvarets Efterretningstjeneste. Udsyn 2023. En Efterretningsbaseret vurdering af de ydre vilkår for Danmarks sikkerhed og varetagelsen af danske interesser. November 2023. <https://www.fe-ddis.dk/globalassets/fe/dokumenter/2023/udsyn/-udsyn-2023-.pdf>
17. Center for Cybersikkerhed. Trusselvurdering. Cybertruslen mod Danmark 2023. Maj 2023. <https://www.cfcs.dk/da/nyheder/2023/cfcs-udgiver-cybertruslen-mod-danmark-2023/>
18. Grund- og nærhedsnotat til Folketingets Europaudvalg om forslag til Europa-Parlamentet og Rådets forordning om screening af udenlandske investeringer i Unionen og om ophævelse af Europa-Parlamentets og Rådets forordning (EU) 2019/452, KOM (2024) 23, af 27. marts 2024. [ERU Almdel Bilag 169 Grund og nærhedsnotat om Revideret investeringsscreeningsforordningdocx \(ft.dk\)](#)
19. Grund- og nærhedsnotat til Folketingets Europaudvalg om Europa-Kommissionens hvidbog om eksportkontrol, KOM (2024) 25 final, af 4. marts 2024. [ERU Almdel Bilag 146 Grund og nærhedsnotat om EuropaKommissionens hvidbog om eksportkontroldocx \(ft.dk\)](#)
20. Europa Kommissionen. Commission Recommendation of 3.10.2023 on critical technology areas for the EU's economic security for further risk assessment with Member States. (Oktober 2023). <https://defence-industry-space.ec.europa.eu/commission-recommendation-03-october-2023-critical-technology-areas-eus-economic-security-further-en>
21. Global Forum on Technology. Quantum Technologies Briefing Document. April 2024. <https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/networks/global-forum-on-technology/global-forum-on-technology-quantum-technologies-brief-2024.pdf>
22. Niels Bohr Institutet: Quantum. From Science to Solutions. 100 years after – the heritage of Niels Bohr. 2020. <https://nbi.ku.dk/english/research/Kvantefolder-QUANTUM-from-Science-to-Solutions.pdf>.
23. The European Quantum Flagship. Strategic Research Agenda. Februar 2020. https://qt.eu/media/pdf/Strategic_Research_Agenda_d_FINAL.pdf
24. The European Quantum Flagship. Europe aiming to win global race for quantum talent. November 2022. <https://qt.eu/news/2022/europe-aiming-to-win-global-race-for-quantum-talent>
25. NATO review: Quantum technologies in defence and security. Juni 2021. <https://www.nato.int/docu/review/articles/2021/06/03/quantum-technologies-in-defence-security/index.html>
26. NATO Science and Technology Organization. Science & Technology Trends 2023-2043. Marts 2023. https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2023/3/pdf/stt23-vol2.pdf

27. Global Risk Institute og EvolutionQ: Quantum Threat Timeline Report 2023. December 2023. <https://globalriskinstitute.org/publication/2023-quantum-threat-timeline-report/>
28. McKinsey & Company. Quantum Technology Monitor. April 2024. <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/steady%20progress%20in%20approaching%20the%20quantum%20advantage/quantum-technology-monitor-april-2024.pdf>
29. Institute Q. Finnish Quantum Agenda. 2023. <https://instituteq.fi/finnish-quantum-agenda/>
30. Vinnova. The Swedish Quantum Agenda. Marts 2023. <https://www.vinnova.se/en/publikationer/a-swedish-quantum-agenda/>
31. World Economic Forum. State of Quantum Computing: Building a Quantum Economy. September 2022. <https://www.weforum.org/publications/state-of-quantum-computing-building-a-quantum-economy/>
32. Qureca. Quantum Initiatives Worldwide 2024. April 2024. <https://www.quireca.com/quantum-initiatives-worldwide/>
33. The Times of Israel. Defence Ministry, Innovation Authority to fund Israel's first quantum computer. Februar 2022. <https://www.timesofisrael.com/defense-ministry-innovation-authority-to-fund-israels-first-quantum-computer/>
34. Physicsworld. How the Netherlands is forging ahead in quantum technologies. December 2021. <https://physicsworld.com/a/how-the-netherlands-is-forging-ahead-in-quantum-technologies/>
35. Danish Quantum Community. DTU and KU launch master's programme in Quantum Information Science. Maj 2022. <https://dqc.dk/dtu-and-ku-launch-masters-programme/>
36. Danish Quantum Community. New master's program in quantum computing announced at SDU. April 2024. <https://dqc.dk/new-masters-program-in-quantum-computing-announced-at-sdu/>
37. Børsen. "Manglende patenter kan være en bombe under dansk konkurrenceevne". Marts 2024. <https://borsen.dk/nyheder/generelt/dansk-forskertradition-truer-globalt-kaplob>
38. Defense News. Armed with quantum sensors, France eyes leaps in electronic warfare. Juni 2024. <https://www.defensenews.com/global/europe/2024/06/25/armed-with-quantum-sensors-france-eyes-leaps-in-electronic-warfare/>
39. UK Royal Navy. Royal Navy successfully tests quantum-sensing technology. Oktober 2024. <https://www.royalnavy.mod.uk/news/2024/october/31/20241101-royal-navy-successfully-tests-quantum-sensing-technology>
40. UK Government. Un-jammable quantum tech takes flight to boost UK's resilience against hostile actors. Maj 2024. <https://www.gov.uk/government/news/un-jammable-quantum-tech-takes-flight-to-boost-uks-resilience-against-hostile-actors>
41. IOT World Today. US Navy, Air Force Collaborate on Quantum. Januar 2023. <https://www.iotworldtoday.com/industry/us-navy-air-force-collaborate-on-quantum>
42. Defense One. The Navy is trying to use quantum computers to task spy satellites. Februar 2024. <https://www.defenseone.com/technology/2024/02/navy-trying-use-quantum-computers-task-spy-satellites/394481/>

43. CoinGeek. US Air Force turns to quantum computing for military logistics. Januar 2024. <https://coingeek.com/us-air-force-turns-to-quantum-computing-for-military-logistics/>
44. NKT A/S, selskabsmeddelelse nr. 13 af 2. maj 2023, <https://ml-eu.globenews-wire.com/Resource/Download/6faa9094-ff06-4662-b6fb-28d2f48cf0e0>
45. NKT A/S, selskabsmeddelelse nr. 12 af 6. maj 2024, <https://ml-eu.globenews-wire.com/Resource/Download/0b7b54f0-74cf-4a64-a50a-01224306ac5b>

8.2. Respondenter

Indledende interviews – hypotesegenerering	
Forsvarsministeriet	Dirk Bjerge
Niels Bohr Institutet	Klaus Mølmer
NQCP/Quantum Foundry Copenhagen	Asbjørn Drachmann
Forsvarets Materiel- og Indkøbsstyrelse, Værnsfælles Videnscenter	Steen Søndergaard
NQPC/Danish Quantum Community	Jan W. Thomsen
Udenrigsministeriet/Den Internationale Kvantehub	Louise Lund Henneberg og Sofie Lindskov Hansen
Dencrypt	Frederik Wedel-Heinen
Kvantify	Ulrich Busk Hoff
DFM	Jan Hald

Uddybende interviews – hypotesevalidering	
Deep Tech Lab - Quantum	Cathal Mahon
FE/Center for Cybersikkerhed/SEKDI	-
Sparrow Quantum	Kurt Stokbro
Nationalt Forsvarsteknologisk Center	Jeffrey Scott Saunders
NKT Photonics	Basil Garabet og Christian Poulsen
Dansk Standard	Bjørn Nørrekjær Hvidtfeldt
QunaSys	Erik Stangerup
DFM	Michael Kjær
DTU Fysik	Ulrik Lund Andersen
Teknologisk Institut	Juan Farré
PET	-
EIFO	Anders Thorup-Jensen
Forsvarsakademiet	Katrine Nørgaard

