

En svensk kvantagenda



Utgivare: Vinnova – Sveriges innovationsmyndighet

Titel: En svensk kvantagenda

Författare: RISE, Swelife, Vetenskapsrådet, Vinnova, WACQT

Utgiven: 22 mars 2023

ISBN-nummer: 978-91-987943-6-6

Diarienummer: 2023-00676

Foto: Chalmers | Anna-Lena Lundqvist

Innehåll

1	Sammanfattning	4
2	Inledning – Varför kvantteknologi?	7
3	Vad är kvantteknologi?	8
4	Vad kan kvantteknologi göra för samhälle och industri?	10
5	Det svenska forskningsläget inom kvantteknologi	15
6	Utbildning och kompetens inom kvantteknologi	17
7	Vad gör andra länder?	18
8	Innovation och kommersialisering	19
9	Standardisering	21
10	Slutsatser	22

Bilagor

Bilaga 1. The four areas of quantum technology

Bilaga 2. SWOT Analysis

Bilaga 3. The Swedish quantum technology landscape

Bilaga 4. Education and competence in quantum technology

Bilaga 5. Quantum technology innovation

Bilaga 6. Quantum technology research within Sweden

Bilaga 7. Agenda working group

Samtliga bilagor återfinns separat på www.vinnova.se.

1 Sammanfattning

Vi är mitt i en teknisk revolution – den andra kvantrevolutionen – som kan leda till kvantdatorer, avlyssningssäker kommunikation och ultrakänsliga mätinstrument. I många länder över hela världen ses kvantteknologi som en nyckelteknologi för framtida säkerhet, datorkraft och sensorer, som kommer att påverka stora delar av samhället. Sverige har stark forskning inom kvantteknologi, mycket tack vare privat finansiering, men nu behövs nationell samordning och investeringar för att maximera nyttan av detta framväxande teknologiområde.

Kvantteknologi bygger på kvantmekanik – den fysik som beskriver världen på dess allra minsta skala. Revolutionen ligger i den relativt nya förmågan att kontrollera och manipulera enskilda kvantsystem, som enskilda atomer och ljuspartiklar. Denna förmåga öppnar dörren till helt ny teknik med stora möjligheter.

Kvantteknologi är en ny och disruptiv teknologi som både skapar nya och förbättrar befintliga tillämpningar. Den utnyttjar kvantmekaniska fenomen, som superposition, klämda tillstånd och sammanflätning, för att åstadkomma saker som annars är omöjliga. Kvantteknologi har potential att påverka många samhällsområden, såsom informationsteknik, hälsa, energisystem, ekonomi och säkerhet. Den delas vanligtvis in i fyra underområden: kvantdatorer, kvantsimulatorer, kvantkommunikation och kvantsensorer.

Kvantdatorn är ett bra exempel på den nya teknologin. En tillräckligt stor kvantdator kan lösa problem som är utom räckhåll för klassiska datorer. Utvecklingen av kvantdatorer går snabbt och vi befinner oss just nu i ett skede där det är svårt och snart omöjligt att simulera kvantdatorer på befintliga superdatorer. I Sverige får vi år 2025 tillgång till en testbädd för kvantdatorer, där algoritmer kan köras på en riktig kvantdator, finansierad av Knut och Alice Wallenbergs stiftelse (KAW). Testbädden kommer att göra det möjligt för svenska forskare och industri att undersöka en bred uppsättning av tillämpningar, vilket gör det möjligt att börja utnyttja potentialen inom detta nya teknikområde.

För att ligga i framkant av denna nya, framväxande teknologi behöver Sverige säkra kompetens inom kvantteknologi, genom högkvalitativ grundutbildning och forskarutbildning samt utbildning och kompetensutveckling inom både industri och samhälle. Kvantteknologins möjligheter kan potentiellt få betydande konsekvenser för ekonomi och samhälle, varför Sverige måste ta en aktiv roll i den snabba internationella utvecklingen. Idag finansierar KAW den enda stora

kvantteknologisatsningen i Sverige, även om andra finansiärer nyligen har lanserat mindre program.

För att ta tillvara kvantteknologins möjligheter för Sverige behövs konkreta nationella mål och en välfinansierad nationell kvantstrategi.

1.1 Kvantteknologisatsningar internationellt och i Sverige

Det görs för närvarande stora investeringar i kvantteknologi över hela världen. EU:s tioåriga flaggskeppsinvestering på 1 miljard euro inleddes i oktober 2018. Flera europeiska länder, däribland Tyskland (2,6 miljarder euro), Frankrike (1,8 miljarder euro), Nederländerna (0,76 miljarder euro) och Storbritannien (1 miljard euro), har gjort omfattande nationella investeringar som är betydligt större än EU:s satsningar. Liknande stora forskningsprogram finns i Nordamerika, Asien och Australien. It-företag som Google, IBM, Intel och Microsoft gör också betydande investeringar i kvantdatorforskning.

I Sverige finns stark forskning inom kvantteknologi. Forskningens kvalitet bekräftas av att USA har valt Sverige som ett av elva samarbetsländer inom kvantteknologi. KAW-stiftelsen har avsatt cirka 1,2 miljarder kronor till Wallenberg Centre for Quantum Technology (WACQT). Svenska universitet (främst Chalmers, KTH, Stockholms universitet och Lunds universitet) och industripartners bidrar med ytterligare cirka 300 miljoner kronor. Ett tiotal svenska företag är involverade i forskningen via industridoktorander. WACQT är en 12-årig satsning som startade i januari 2018 och har två huvudmål: i) Att höja både den generella kunskapen och den mer specialiserade kompetensnivån inom kvantteknologi i Sverige och ii) att bygga en svensk kvantdator. Andra svenska initiativ är *Wallenberg Initiative on Networks and Quantum Information* (WINQ) vid Nordita, *Nordic Institute for Theoretical Physics*, och *Quantum Life Science Centre* vid Karolinska Institutet.

Dessutom stödjer KAW och andra finansiärer flera kvantteknologiforskare via individuella anslag. Svensk forskning inom kvantteknologi är därför stark, men finansieringen är huvudsakligen privat och tidsbegränsad. Motsvarande miljardsatsning finns inte när det gäller utbildning och innovation.

1.2 Slutsatser

Denna rapport har identifierat nio områden som är nödvändiga att utveckla för att stärka Sveriges position inom kvantteknologi:

- Behov av en svensk nationell målsättning och strategi för kvantteknologi
- Samordning av verksamhet inom kvantteknologi behövs
- Stödet till utbildning i kvantteknologi behöver öka
- Behov av stöd till forskningsinfrastrukturer
- Långsiktigt ekonomiskt stöd till kvantforskning behöver säkerställas
- Behov av förstärkning för kvantinnovation
- Identifiering av tillämpningar och samverkan med industrin
- Kvantstandarder på internationell nivå
- Nordiskt, europeiskt och internationellt samarbete bör främjas

Dessa slutsatser utvecklas närmare i avsnitt 10.

2 Inledning - Varför kvantteknologi?

Vi är mitt i en omställning av hur vi producerar och använder energi, framtvungad av den globala uppvärmningen. Vi har just kommit ut ur en pandemi, och befinner oss i en geopolitisk situation som är mer instabil än på årtionden. Samtidigt fortsätter digitaliseringen att förändra hur vi organiserar vårt samhälle och hur vi lever våra liv. Varför ska vi i detta läge sätta kvantteknologi på agendan?

En anledning är att kvantteknologin har potential att väsentligt påverka vårt samhälle, genom kvalitativt nya beräkningsmöjligheter. Detta kan på lång sikt exempelvis underlätta övergången till smarta energisystem, minska energin som behövs inom transportsektorn genom logistikoptimering och leda till nya energieffektiva sätt att producera gödningsmedel. Denna beräkningsförmåga kommer också att påverka säkerheten eftersom den hotar de krypteringsmetoder för säker kommunikation som används idag.

Inom life sciences kan vi skapa bättre modeller och få ökad förståelse för komplexa, biologiskt aktiva molekyler och proteinveckning samt förbättrad medicinsk bildigenkänning och metagenomisk analys. Teknologin har som nämnts potential att ge oss kvalitativt nya beräkningsresurser, men kommer också att inom en snar framtid möjliggöra förbättrade mätinstrument och sensorer. Detta inkluderar till exempel medicinska diagnostikverktyg som är mindre invasiva, men även detektering av mineraler under jord genom mätning av små förändringar i tyngdkraften, samt förbättrade system för navigering där GPS inte är tillgänglig.

Eftersom kvantteknologi har potential att avsevärt påverka så många aspekter av samhället har ett stort antal länder nyligen lanserat betydande nationella initiativ, däribland Tyskland (2,6 miljarder euro), Frankrike (1,8 miljarder euro), Nederländerna (0,76 miljarder euro), Storbritannien (1 miljard euro) och EU har lanserat ett flaggskeppsprogram för kvantteknologi (1 miljard euro). Liknande program har startat i Nordamerika, Asien och Australien. Företag som IBM, Google, Microsoft, Intel, Alibaba, Tencent och Honeywell investerar stora resurser i FoU och det finns också flera snabbväxande start-up-företag i USA och Europa, till exempel IQM i Finland som startades 2018 och nu har 150+ anställda. I Sverige tog Knut och Alice Wallenbergs stiftelse initiativet till Wallenberg Center for Quantum Technology (WACQT), en 12-årig satsning värd 1,5 miljarder kronor som även den inleddes 2018. År 2022 lanserade Novo Nordisk-stiftelsen i Danmark sitt kvantdator-program med en finansiering på 1,5 miljarder danska kronor under de första sju åren. Samma år presenterade Nato en innovationsaccelerator för kvantteknologi som ska placeras i Köpenhamn.

WACQT har gjort det möjligt för Sverige att vara en aktiv global spelare inom kvantteknologi, till exempel tillhör Sverige (tillsammans med Danmark och Finland) de elva länder som tecknat bilaterala avtal med USA om forskning och utveckling inom kvantteknologi. Från denna mycket positiva utgångspunkt ser vi ett tydligt behov av en nationell svensk strategi för kvantteknologi, inte minst för det långsiktiga målet att skapa ett hållbart samhälle.

3 Vad är kvantteknologi?

Kvantvärlden, på längdskalan av molekyler och nedåt, är paradoxal och bisarr. Partiklar på denna skala kan samtidigt vara både här och där, eller mystiskt sammanflätade på avstånd. Kvantteknologi handlar om att utnyttja dessa icke-intuitiva fenomen för att skapa helt ny teknik med extraordinära förmågor.

Kvantmekaniken växte fram i början av 1900-talet för att beskriva naturens minsta delar. På 1930-talet var den matematiska formuleringen i princip komplett och den nya förståelsen av kvantegenskaper hos ljus och material ledde till uppfinningar som lasern och transistorn – uppfinningar som ligger till grund för dagens informationsteknik. Datorer, internet och mobiltelefoner har drastiskt förändrat våra liv. Idag kallar vi detta den första kvantrevolutionen.

Det ansågs dock länge vara omöjligt att kontrollera enskilda kvantsystem, som enskilda atomer, elektroner eller ljuspartiklar (fotoner). Men på 1980-talet lyckades forskare utveckla metoder för att mäta och kontrollera enskilda atomer och fotoner, arbete som tilldelades Nobelpriset 2012. Parallellt utvecklade andra forskare elektriska komponenter där de kunde manipulera enskilda elektroner.

Förmågan att manipulera och utnyttja egenskaperna hos enskilda kvantsystem öppnar dörren för helt ny teknologi. Det handlar inte om gradvisa förbättringar utan snarare om en helt förändrad spelplan – en andra kvantrevolution.

3.1 Kvantteknologins centrala fenomen

De extraordinära egenskaperna hos den framväxande kvantteknologin är alla baserade på kvantmekanikens icke-intuitiva fenomen. De viktigaste är:

Superposition

I kvantmekanikens värld är det fullt möjligt för partiklar att vara på flera olika ställen samtidigt, eller att till exempel samtidigt befinna sig i tillstånd som har olika energi eller olika polarisering. Dessa tvetydiga tillstånd kallas superpositioner.

Sammanflätning

Superpositioner kan sträcka sig mellan flera partiklar, en speciell typ kallas sammanflätning. En manipulation av en partikel påverkar dess sammanflätade partner omedelbart – även om de befinner sig väldigt långt ifrån varandra och utan att någon information överförs.

Klämda tillstånd

Inom kvantfysiken finns det en gräns för hur exakt du samtidigt kan känna till kopplade (konjugerade) variabler, såsom frekvens och tid, för ett objekt. Men genom att försätta objektet i ett så kallat klämt tillstånd kan man låta osäkerheten främst påverka endast en av variablerna. Då går den andra variabeln att mäta mer noggrant.

3.2 Kvantteknologins fyra områden

Kvantteknologi grupperas ofta i fyra huvudområden: kvantdatorer, kvantsimulering, kvantkommunikation och kvantsensorer. Läs mer om dessa i bilaga 1.

Vad är kvantteknologi bra för? - på grundval av tekniken:

- i. Kvantdatorer har potential att utföra beräkningar som en klassisk dator inte kan, inklusive att lösa svåra optimeringsproblem, till exempel inom logistik, DNA-sekvensering och maskininlärning. En stor kvantdator kan också knäcka krypteringskoder som en klassisk dator inte kan.
- ii. Kvantsimuleringar av komplexa molekyler kan hjälpa oss att utveckla nya läkemedel, eller katalysatorer. Det kan också hjälpa oss att designa nya material. Ett konkret exempel där kvantsimuleringar används är för att förbättra produktionsprocessen av gödningsmedel, som idag förbrukar enorma mängder energi.
- iii. Kvantkommunikation använder sammanflätade tillstånd för att skicka meddelanden som inte kan avlyssnas. I det längre perspektivet diskuteras ett nytt internet byggt för kvantinformation, ett kvantinternet. Men på kortare sikt är tekniken intressant för

säker delning av data inom till exempel hälso- och säkerhetssektorer.

- iv. Kvantssensorer kan möjliggöra betydligt mer exakta mätningar. Bättre atomklockor som används i GPS är ett exempel, sensorer för medicinsk diagnostik är ett annat.

3.3 Relation till maskininlärning och AI

Maskininlärning kan definieras som algoritmer som förbättras ju mer data de får tillgång till. Artificiell intelligens (AI) inkluderar algoritmer som utför så varierade uppgifter som att köra bil, ansikts- och taligenkänning, slå mänskliga spelare i schack eller skapa långa texter eller bilder från enkel textinmatning. Framgången som vi nyligen sett för dessa algoritmer, ofta baserade på matematisk modellering av neurala nätverk som har varit kända i årtionden, bygger på tillgången till enorma datamängder och oöverträffad beräkningskraft.

En fråga är hur en kvantdator med sin kvalitativt nya beräkningskraft kan förbättra maskininlärning och AI. Det finns kvantalgoritmer som kan utföra linjära algebraberäkningar, som är kärnan i maskininlärning, exponentiellt snabbare än klassiska algoritmer. De förlitar sig dock på att data redan finns i kvantdatoren. Det är en viktig begränsning eftersom ingen för närvarande vet hur man matar in stora mängder data i en kvantdator. Detta begränsar kraftigt den potentiella effekten av även en stor, framtida felkorrigerad kvantdator för maskininlärning. Det finns intressanta idéer om hur man kan använda en kvantdator för specifika uppgifter inom till exempel mönsterigenkänning med så kallade kvantkärnor, men det finns alltså för närvarande inget hopp om att en kvantdator avsevärt skulle minska de klassiska beräkningar som behövs inom detta område.

4 Vad kan kvantteknologi göra för samhälle och industri?

Kvantteknologi har potential att gynna samhället och nästan alla branscher. Några av de mest lovande applikationsområdena är hälsa och life science, energi, finans och cybersäkerhet. Dessa industrier kan dra nytta av kvantteknologi tack vare den exponentiella ökningen av beräkningskraft och säkra kommunikationsmöjligheter. Nedan ger vi konkreta exempel på vad vi kan hoppas på i framtiden.

Inom hälso- och sjukvård och life science kan kvantteknologi spela en omvälvande roll för att främja precisionshälsa och precisionsmedicin. Tillämpningar som

kvantmikroskopi, kvantspektroskopi och kvantberäkning kan förbättra sjukdomsförutsägelse, prevention, diagnostik och behandling. Till exempel kan kvantmikroskopi förbättra ögonavbildning, kvantspektroskopi kan övervaka vävnadssyresättning i hjärtat och hjärnan, och kvantberäkning kan hjälpa till att förstå sjukdomar som Alzheimers, Parkinsons och ALS, liksom påskynda läkemedelsutvecklingen.

”Vi har åtta projekt inom ”quantum-life-science”, allt från kvantberäkning inom metagenomik, proteinveckning och kemi, till kvantmikroskopi och spektroskopi för högre upplösning i öga och hjärna. Hälso- och sjukvård och life-science kan inte gå miste om de möjligheter som kvantteknologier kan ge oss och därför har vi startat ett svenskt Quantum Life Science Center för att påskynda utvecklingen och skapa ett attraktivt ekosystem för vår forskning, innovation och våra företag.”

Ann-Marie Wennberg Larkö
Professor och sjukhusdirektör Sahlgrenska universitetssjukhuset

4.1 Exempel på tillämpningar

Syresättning i hjärta och hjärna

En forskargrupp i Lund undersöker hur kvantstrukturer som minskar ljusets hastighet till några tiotals kilometer per sekund kan användas för att möjliggöra optisk avbildning djupt inne i kroppen. Framför allt siktar de på att mäta syresättning i den främre hjärtväggen och i hjärnan, vilket skulle vara till stor hjälp för att diagnosticera stroke. Om projektet faller väl ut skulle varje akutmottagning vinna på att ha ett sådant instrument. Därför har forskarna grundat ett spin-off företag – Deep Light Vision AB – med målet att utveckla ett kommersiellt mätinstrument för syresättning.

Levande avbildning av biologiska processer

Kvantmikroskopi har potential för bättre prestanda än traditionella mikroskopitekniker, eftersom den kan uppnå högre rumslig upplösning, förbättrat bilddjup och större bandbredd. Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) har utvecklat ett kvantmikroskop som kan utföra in vivo-avbildning på enfotonnivå med hjälp av infraröda biomarkörer. Denna teknik kommer att vara tillgänglig på marknaden genom spin-off företaget Quantum Scopes. Karolinska Institutet (KI) har utvecklat en plattform för att använda ögat som ett kroppsfenster för att icke-invasivt kunna studera funktionen hos implanterade vävnader. Kvantmikroskopi, utvecklad av KTH och KI tillsammans,

kommer att möjliggöra avbildning djupare in i vävnader och därmed ge mer detaljerad information för att fylla viktiga kunskapsluckor.

Simulering av läkemedel

Inom läkemedelsforskningen görs idag beräkningar på klassiska högpresterande datorer (HPC) för att förutsäga reaktivitet och andra egenskaper hos läkemedelsmolekyler som hjälp för att utforma nya molekyler och välja ut läkemedelskandidater. För att kunna simulera kemiska reaktioner och exakt förutsäga egenskaper måste man även modellera hur den aktuella molekylen påverkas av den omgivande miljön, i lösning eller i fast tillstånd. Detta är ett svårt beräkningsproblem som är komplicerat och tidskrävande för en klassisk HPC-dator. Urvalsprocessen av läkemedel kan därför vara mycket tidskrävande och dyr, och här finns en chans för kvantdatorer att göra stor skillnad.

"AstraZeneca följer noga utvecklingen av AI, maskininlärning och kvantberäkningar för att förstå hur den påverkar våra möjligheter att upptäcka och utveckla nya mediciner och behandlingar.

Möjligheterna med kvantberäkningar undersöker vi till exempel genom samarbete med IBM och Hartree Center i UK, men framför allt genom vårt industridoktorandprojekt och partnerskap med WACQT, som vi planerar att utöka med en industripostdok."

Anders Broo, PhD

Executive Director, Head of Data Science and Modelling, Pharmaceutical Sciences, R&D

Astra Zeneca

Proteinveckning och metagenomik

DNA-sekvensering har revolutionerat vår förståelse av biologi och medicin och banar väg för framtida precisionsmedicin. Det finns många beräkningsutmaningar i processen att omvandla denna ständigt ökande mängd data till förbättrad hälsa i vårt samhälle. Att förstå hur mutationer påverkar proteinveckning i våra celler är ett verkligt svårt beräkningsproblem. Maskininlärningsbaserade AlphaFold ger en del av svaret, men vi behöver fortfarande förstå mer om veckningsdynamik i levande celler, vilket är viktigt till exempel för Alzheimers sjukdom. Här har kvantdatorer potential att kvalitativt förändra simuleringsförmågan i framtiden. Inom metagenomik bör DNA-sekvenser matchas för att identifiera olika bakterier och virus i bland annat blodprover. Läsfel både i provsekvenserna och i databasen gör denna matchning svår. Detta kan vara ett område där en kvantdator skulle kunna ge bättre prestanda än klassiska datorer.

Energibesparingar

När kvantdatorer kan simulera riktigt stora molekyler kan man till exempel tänka sig att lösa konstgödselproduktion på ett mycket mer energieffektivt sätt än vad som nu är möjligt. Idag används stora mängder energi (flera procent av världens energiproduktion) för att med hjälp av kvävefixering tillverka ammoniak, som i sin tur används för att tillverka konstgödsel. Detta görs med hjälp av den så kallade Haber Bosch-processen som är mycket energiineffektiv eftersom den använder högt tryck och höga temperaturer. Samtidigt vet vi att bakterier kan göra samma sak vid rumstemperatur med hjälp av ett enzym. Om vi kan simulera och efterlikna den aktiva delen av detta enzym kan vi potentiellt utveckla en mycket effektivare process och spara mycket energi.

Cybersäkerhet

De krypteringsalgoritmer som används idag förlitar sig på att konventionella datorer är mycket ineffektiva på att göra de beräkningar som krävs för att dekryptera säkra data. Men även om det är astronomiskt svårt att dekryptera med konventionella datorer så kan en kvantdator utrustad med rätt algoritm bryta krypteringen relativt enkelt. Detta har motiverat flera europeiska initiativ att snabbt sätta ihop kvantkryptografiska kommunikationskanaler där fiberoptiska nätverk kommer att användas för att säkert kommunicera känslig information mellan och inom länder. Dessutom ska satellitnät användas för att koppla upp lokala fibernät till den globala webben – något som kräver stora nationella insatser för att initieras.

Kvantnyckeldistribution

Kryptering bygger på så kallade krypteringsnycklar som används för att kryptera och dekryptera information. Problemet är i allmänhet att överföra nyckeln utan att en obehörig får tag på den. I kvantkommunikation löses detta genom att överföra krypteringsnyckeln med hjälp av kvantpartiklar. Det kallas kvantnyckeldistribution, på engelska *Quantum Key Distribution* (QKD). Enligt kvantfysikens lagar är det omöjligt att mäta eller kopiera ett tillstånd hos en kvantpartikel utan att märkbart ändra det. Därför kan man alltid vara säker på att upptäcka avlyssning. Kommersiella system för QKD finns redan på marknaden.

Försörjningskedjor och logistik

Att inom logistiken hitta de mest effektiva rutterna för exempelvis flygplan eller el-/hybridlastbilar, samtidigt som begränsningar i form av lastkapacitet och avstånd före laddning uppfylls, leder till svåra optimeringsproblem. Antalet möjliga lösningar växer extremt snabbt med antalet fordon och destinationer. Dessa så kallade kombinatoriska optimeringsproblem är rättframma att implementera på kvantdatorer och om kvantdatorn kan hitta mer optimala lösningar kommer vi att använda mindre resurser och uppleva mindre förseningar och trängsel i både flyg- och vägtrafik. Optimering av försörjningskedjor leder till liknande typer av kombinatoriska optimeringsproblem och att hitta bättre lösningar skulle avsevärt kunna förbättra produktionseffektiviteten i många företag.

"Jeppesen finds it extremely important to closely follow the developments within quantum computing worldwide and in particular those for optimization. Since in Sweden our core business is logistics optimization, it is essential for us to know if and when a quantum computer can contribute to significantly better solutions. To this end, our partnership and industrial PhD project together with WACQT is a key component and we will certainly benefit from the upcoming Swedish testbed for quantum computing."

Dr Peter Sutton,
Director for Software Development, Jeppesen Sweden

Kvantmeteorologi

Exakta modeller av väder- eller klimatsystem, och förutsägelser baserade på dem, kräver stor klassisk beräkningskraft. Speciellt för att göra förutsägelser korrekta på lång sikt. Det beror på att väderfenomen är kaotiska och icke-linjära till sin natur – deras nuvarande tillstånd bestämmer deras framtid, men det ungefärligt nuvarande tillståndet bestämmer inte den ungefärliga framtiden. De modeller som används involverar vanligtvis många ingångsvariabler, vilket ger ett beräkningsproblem med många dimensioner – här kan kvantdatorer ge en fördel. En relativt liten uppsättning kvantbitar kan användas för att representera information med stor dimensionalitet, medan den klassiska motsvarigheten är begränsad.

4.2 Kvantteknologi – humaniora och samhälle

Som diskuterats ovan har kvantteknologi en mycket stor utvecklingspotential inom många områden av stor betydelse för näringsliv och offentlig verksamhet, såsom hälso-

och sjukvård. Den framväxande tekniken har därmed potential att förändra människors vardag och samhället i stort.

Följaktligen kan vi inte ens föreställa oss idag vilken typ av teknisk och samhällslig utveckling och utmaningar som ligger framför oss. Samtidigt som vi ser fantastiska möjligheter kan vi inte bortse från eventuella negativa konsekvenser som kvantteknologin skulle kunna ge upphov till. Vi har därför ett ansvar att lära oss om potentiella risker parallellt med den utveckling vi söker inom alla möjliga områden. Även om det redan i dag finns fungerande lagar och regler, vilket naturligtvis också innefattar hantering av olika frågor på kvantteknologiområdet, behöver vi också vidareutveckla regelverket. För att kunna göra det krävs en växande kunskaps- och kompetensnivå inte bara bland forskare och studenter, utan också bland allmänhet, myndigheter samt dagens och morgondagens politiker.

Ett av de vassaste verktygen för att hantera risker, inklusive etiska frågor, är ökad kunskapsnivå. Av detta följer att vi behöver kompletterande utbildning på alla nivåer. Det omfattar utbildning i kvantteknologi i skolor, från grundskolan och uppåt, men också som en del av livslångt lärande och skräddarsydd utbildning inom både offentlig sektor och näringsliv. Den bör också omfatta etiska, juridiska, sociala hållbarhets- och kulturfrågor. För att vara ett land i framkant när det gäller att dra nytta av de möjligheter som erbjuds och samtidigt hantera risker, är en hög kunskapsnivå en nödvändighet. Detta uppnås genom forskning hand i hand med utbildning på alla nivåer, samt implementering inom olika sektorer.

5 Det svenska forskningsläget inom kvantteknologi

För att få en överblick över kvantteknologiområdet inom det svenska forskningslandskapet har Vetenskapsrådet genomfört en bibliometrisk studie. Därutöver sändes en enkät till 40 utvalda svenska forskare inom fältet. Samtliga forskare besvarade enkäten. Svaren visar att Sverige har stark och aktiv forskning inom kvantteknologiområdet – Figur 1 visar hur Sverige står sig jämfört med andra länder vad gäller vetenskapliga publikationer – och att ytterligare tillväxt kan förväntas under de kommande åren. Svaren visar även att forskningsfältet engagerar forskare med bred geografisk och ämnesmässig spridning. Deras internationella samarbeten är mycket aktiva och de bidrar till svensk forskning i en internationell kontext. Det insamlade

materialet ger en bas från vilken slutsatser kan dras, med möjliga strategiska konsekvenser.

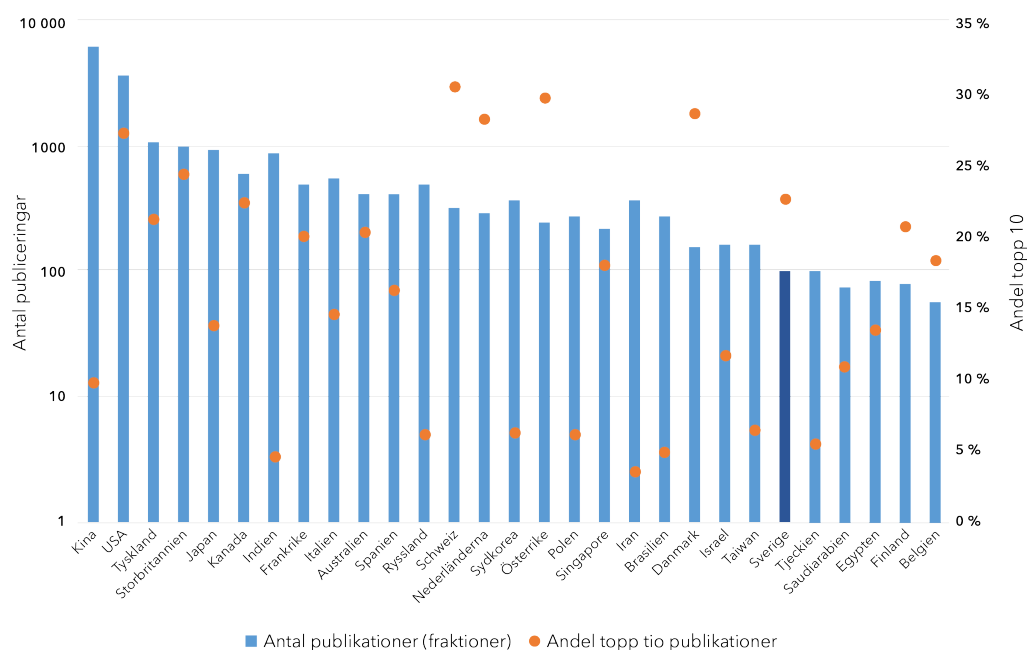
När det gäller forskningsinfrastruktur behöver lokala och nationella renrum uppgraderas och utökas för att möta behoven inom området, för att konsolidera forskningsområdet och skapa förutsättningar för ytterligare framsteg i ett internationellt sammanhang. Sådana investeringar skulle kunna gynna användare även utanför kvantteknologin. Detta gäller även för beräkningsanläggningar, där insatser redan är på väg, men ytterligare fokus kan behövas (till exempel genom EuroHPC-resurser).

Om kvantteknologin ska få en stabil grund inom det svenska forskarsamhället skulle ytterligare satsningar på unga forskares karriärer vara en viktig del av strategin. Nära knutet till det är ytterligare behov av utbildningsinsatser inom området, för att bygga en bas för rekrytering både för universitet och industrin.

Behovet av att främja starka samarbeten inom kvantteknologi-området kan identifieras. Detta inkluderar samarbete mellan forskargrupper vid universitet, industripartners och internationella aktörer.

Kvantsimulering är ett område som bedöms öka i betydelse, men där de svenska insatserna är få i internationell jämförelse. Det skulle vara strategiskt att stärka detta område för att behålla en sund bas för framtida forskning.

Figur 1. Kvantteknologi 2017-2021



De 30 största länderna inom kvantteknologi sorterade efter antalet vetenskapliga publikationer (blå staplar). De orange prickarna visar andelen topp-tio-publikationer för respektive land. Data från Web of Science, Clarivate Analytics.

6 Utbildning och kompetens inom kvantteknologi

Om Sverige ska kunna tillvarata möjligheterna inom kvantområdet, men också parera de risker som kan uppstå, krävs en ökad kompetensnivå för flera olika grupper av människor i samhället. Många länder har blivit smärtsamt medvetna om den hårda konkurrensen om kvalificerad arbetskraft inom kvantteknologiområdet. Om Sverige ska lyckas utveckla ett livskraftigt ekosystem inom området är en riktad satsning på utbildning helt nödvändig.

Eftersom kvantteknologin bygger på kvantfenomen som är icke-intuitiva till sin natur är en stark forskarutbildning avgörande för att säkerställa konkurrenskraftig forskning och utveckling, vid universitet såväl som i små och stora företag. Men för att uppnå detta måste vi som land och våra universitet erbjuda attraktiva förutsättningar för att både lyckas rekrytera och behålla unga talanger.

Att utbilda doktorander och postdoktorer i kvantteknologi är ett utmärkt sätt att se till att vi har expertis i Sverige, så att vi kan utnyttja denna nya teknik när fler tillämpningar utvecklas. Men det finns också ett behov av att utvidga grundutbildningen, att ge ett större antal ingenjörer och inte minst framtida beslutsfattare den förståelse som krävs för att kunna se och ta till sig de nya möjligheter som uppstår.

För att bana väg för ett bra och konstruktivt mottagande av kvantteknologi hos allmänheten och därmed öka möjligheterna till en positiv och hållbar samhällsutveckling behöver den allmänna förståelsen för kvantteknologi främjas. När intresset väl väcks underlättas införandet av nya rön inom olika områden, liksom att sund kritik från en mer upplyst allmänhet kan främja en positiv utveckling inom kvantteknologiområdet.

Olika verktyg kan utvecklas för att uppnå detta, men här spelar naturligtvis media en viktig roll. Detta pekar i sin tur på behovet av en ökad kompetensnivå rörande kvantteknologi även inom journalistkåren.

7 Vad gör andra länder?

Figur 2 visar de globala investeringarna i kvantteknologi, vilket återspeglar det ökande intresset och finansieringen från världens regeringar. Då kvantdatorer, kvantsensorer och kvantkommunikation förväntas ge omvälvande effekter på olika områden, positionerar länder sig för att vara ledande i den andra kvantrevolutionen. Investeringarna visar på kvantteknologins växande betydelse för att forma framtiden för innovation och konkurrenskraft.

Ländernas olika mål vittnar om bredden på kvantteknologiområdet och indikerar också den förväntade bredden av påverkan på olika samhällssektorer. För att ge en antydan om redan pågående initiativ lyfter vi här fram några exempel från olika nationella ansatser.

Bland våra nordiska grannar är både Finland och Danmark starka nationer inom kvantteknologi. Finland anser sig ha utvecklat ett starkt kvantekosystem som är internationellt erkänt och konkurrenskraftigt. Från Finland betonas att den andra kvantrevolutionens potentiella styrka är så kraftfull att den därmed utgör ett viktigt element i den nationella säkerheten och självförsörjningen. Följaktligen finns det ett identifierat behov av systematiskt och samordnat samarbete.

Även Danmark agerar utifrån att kvantteknologin kommer att genomsyra samhället. Danmark har under många år gjort betydande investeringar i grundforskning och forskningsinfrastruktur inom området. Men eftersom området nu snabbt går från grundläggande aspekter till tillämpningar anses det nu vara nödvändigt med ytterligare investeringar i innovation.

Frankrike, Tyskland och Nederländerna investerar statliga pengar i kvantteknologi eftersom de inser dess potential att omvandla olika branscher, såsom finans, sjukvård och telekommunikation. Till exempel syftar Tyskland till att använda kvantteknologi för att förbättra säkerheten och integriteten i kommunikationsnätverk, medan Frankrike investerar i kvantdatorer för att utveckla nya material och optimera leveranskedjor.

Nederländerna investerar i kvantteknologi för att skapa nya tillämpningar för kvantsensorer inom områden som hälso- och sjukvård och jordbruk. Sammantaget hoppas dessa länder få en konkurrensfördel i den globala kapplöpningen mot kvantteknologi och positionera sig som ledande inom området.

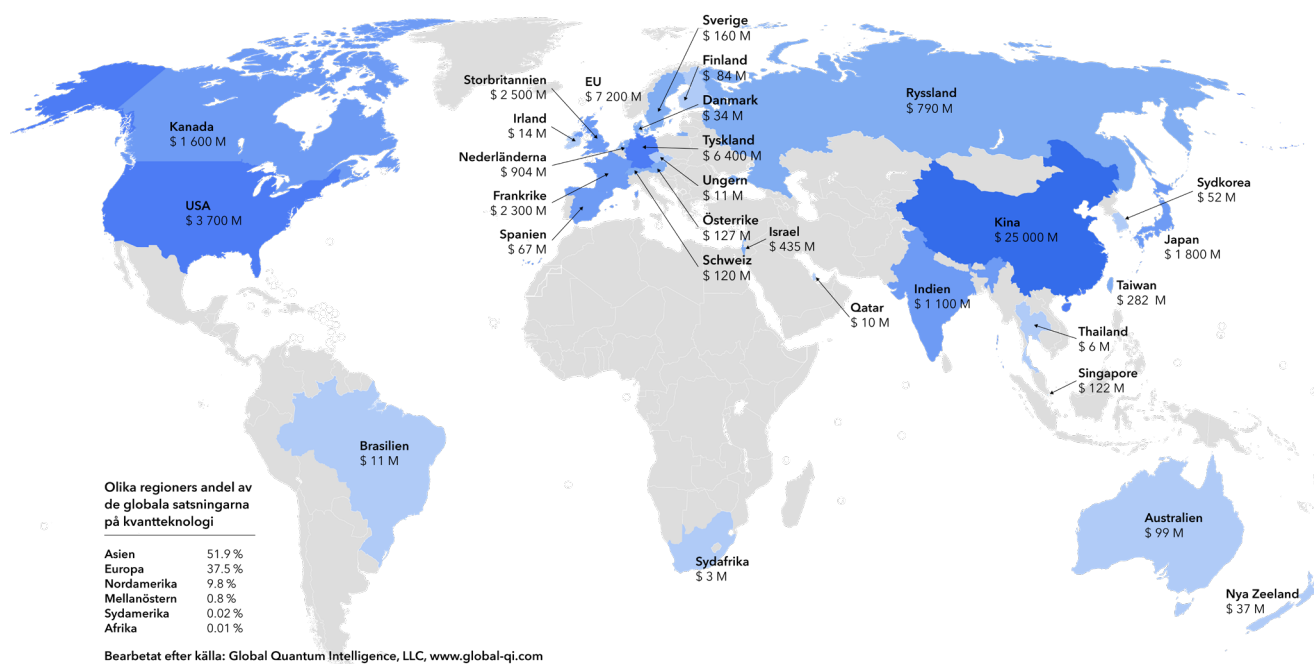
Om vi rör oss över Atlanten hittar vi stora investeringar och framstående länder inom kvantteknologi. Kanada har under flera decennier investerat i kvantteknologi och forskning vilket gör landet till en global ledare inom området. Men de identifierar i sin

nationella strategi att landet måste fortsätta att investera och förnya sig för att ligga steget före.

USA är som alltid en stormakt i den här typen av utveckling och där finns stora satsningar både från regeringen och industrin. Regeringen har lanserat ett National quantum initiative med fem stora forskningscenter. På företagssidan satsar stora företag som Google, IBM med flera hårt på att utveckla kvantdatorer. USA har också tagit initiativet till bilaterala avtal med elva andra länder (inklusive Sverige) och på så sätt skapat ett konsortium av likasinnade stater med stark forskning inom området.

7.1 Kvantinitiativ/insatser över hela världen

Figur 2. Karta över insatser i kvantteknologi fram till 2022 redovisat i miljoner USD



8 Innovation och kommersialisering

Kvantteknologi har en enorm potential inom flera områden, inklusive kommunikation, kryptografi, materialvetenskap, hälsa och life-science. För att dessa tekniska landvinningar ska gynna samhället och ekonomin krävs nu ett starkt fokus på kommersialisering och innovation.

Även om kvantteknologi fortfarande är i ett tidigt utvecklingsstadium finns det goda skäl för att etablera ett nationellt ekosystem för innovation och kommersialisering av tekniken. Vid sidan om akademien spelar både etablerade företag och start-ups redan en viktig roll i utvecklingen av kvantteknologi, och internationella teknikjättar investerar mycket stora belopp.

Sverige har stark forskning inom kvantteknologi och visar på tydliga styrkeområden, inte minst kopplat till den kompetens som finns inom kvantdatorer. För att dessa styrkepositioner ska nå samhället och ekonomin är det avgörande att ekosystemet utvecklas med inriktning mot innovation. Det kräver stöd till nystartade såväl som etablerade företag, liksom forskare som vill kommersialisera sin teknik eller sina idéer, vilket kan möjliggöra tekniköverföring från grundforskning till kommersialisering. Sverige måste utveckla ett innovationsekosystem som omfattar ett brett spektrum av aktörer för att dra nytta av sina styrkor inom kvantteknologi. Kommersialiseringen av tekniken kommer att ske gradvis, och även om det stora genombrottet ännu inte har skett, finns redan tekniska lösningar som har nått en hög teknikmognad och framgångsrikt kommersialiserats.

Sammanfattningsvis är utvecklingen av ett innovationsekosystem med fokus på kommersialisering och innovation avgörande för Sveriges långsiktiga konkurrenskraft inom kvantteknologiområdet. Sverige har potential att bli ledande inom detta område med stöd till nystartade företag, etablerade företag och forskare. I figur 3 beskrivs Sveriges förutsättningar för kvantinnovation. Följande åtgärder är av högsta prioritet:

- Stöd till nystartade företag i form av såväl ekonomiskt som icke-finansiellt stöd.
- Stöd till etablerade företag för att tillsammans med universitet identifiera tillämpningar för kvantteknologi.
- Stöd till forskare som vill kommersialisera en teknik eller idé.
- Kontinuerlig kunskapsuppbyggnad för ökad förståelse och utveckling av ett sammankopplat innovationsekosystem.

Figur 3. Varför Sverige behöver satsa på innovation för kvantteknologi



9 Standardisering

Sverige bör delta i standardiseringsforum samt policy- och regelutveckling inom området. Kvantteknologin är ung men skulle redan nu gynnas av standardisering. Standarder och ramverk gör det möjligt för aktörer att använda och själva ansluta sig till ett gemensamt sätt att utveckla inom området, samt kan ge stora fördelar för framgången hos olika företag. Det är ett sätt att öka interoperabiliteten som också kan leda till kostnadseffektivitet i själva genomförandet. Hög grad av internationellt samarbete och gemensamma projekt är andra sätt att skapa en slags informell standardisering.

Många standardiseringsforum och regelverk är relevanta för kvantteknologi, beroende på tillämpning och perspektiv. Det är dock viktigt att även beakta de övergripande initiativ som finns inom EU kring en gemensam syn på *knowledge security* så att vi arbetar för fortsatt fri forskning inom områden som kvantteknologi, avseende produkter, teknologier och lösningar som kan komma till både civil och militär användning, så kallade dubbla användningsområden eller dual use.

10 Slutsatser

För att tillvarata kvantteknologins potential och föra Sverige till en ledande position när det gäller kvantteknologi är följande utvecklingsområden identifierade.

Behov av en svensk nationell målsättning och strategi för kvantteknologi

Sverige behöver formulera sin ambition inom kvantteknologiområdet och ta fram en nationell strategi för att förverkliga denna ambition. En sådan strategi bör beskriva vilken position Sverige avser att inta i globala forsknings- och innovationskedjor, och vilka resurser och åtgärder som behövs för att uppfylla dessa mål.

Samordning av verksamhet inom kvantteknologi behövs

Strategin bör bygga på befintliga styrkor och syfta till att samordna svenska insatser. Tonvikten bör läggas på att bygga en komplett och sammankopplad innovationskedja. Detta innebär också en ansvarsfördelning och ett förtydligande av ansvaret mellan statliga aktörer samt aktörer i det bredare systemet.

Stödet till utbildning i kvantteknologi behöver öka

Idag lärs kvantfysik ut på de flesta svenska universitet, men omfattningen av utbildningen i kvantteknologi är liten. De ingenjörsmässiga aspekterna saknas till stor del. Utbildningsinsatser bör omfatta ett brett spektrum av utbildningsprogram som syftar till att bygga en bred kompetensprofil i samhället kring kvantteknologi. Programmen bör inte bara syfta till att främja nästa generations forskare inom kvantteknologi utan också bidra till att öka kvantförståelsen i bredare ingenjörsprogram. Det finns vidare ett behov av att öka förståelsen inom discipliner utanför det tekniska området för att underlätta tillämpningen av kvantteknologi i olika branscher.

Behov av stöd till forskningsinfrastrukturer

Komponenter till kvantdatorer tillverkas med hjälp av nano- och mikrofabrikation, vanligtvis i renrum som erbjuder avancerad process- och analysutrustning. Sverige har flera högklassiga renrum i Myfab-nätverket. Att underhålla och förbättra dessa renrum

skulle stödja både den framväxande kvantteknologin och Sveriges förmåga att utveckla och producera halvledarchip. De senaste åren har finansieringen av ny utrustning i svenska renrum minskat och det finns en risk att Sverige förlorar sin ledande position. Långsiktig finansiering av testbädden för kvantberäkningar är också av hög prioritet.

Medan Sverige kan uppvisa starka forskare med stort vetenskapligt genomslag inom kvantteknologiområdet, är forskningsekosystemet koncentrerat kring ett fåtal forskargrupper med fokus på ett begränsat antal teknikplattformar. I utvecklingen av forskningsekosystemet bör Sverige sträva efter att bredda forskningsfältet genom att utöka antalet involverade forskare och bygga kompetens kring fler teknikplattformar.

Långsiktigt ekonomiskt stöd till kvantforskning behöver säkerställas

Långsiktiga finansieringsmöjligheter är avgörande för att utveckla ett starkt ekosystem för forskning i kvantteknologi. Svensk kvantforskning har till stor del varit beroende av finansieringen genom WACQT-programmet. Det är viktigt att säkerställa en långsiktig och tillräcklig finansiering, i linje med den uttalade ambitionen att stödja ledande kvantforskning efter slutet av WACQT-programmet (2029). Finansieringsmöjligheterna bör vara tillräckliga för att täcka kvantforskningens bredare inriktning, inbegripet alla fyra delområden: kvantdatorer, kvantsimulering, kvantsensorer och kvantkommunikation.

Behov av förstärkning för kvantinnovation

För att utnyttja forskningsresultaten och omvandla dem till innovationer, produkter och företag behövs ett samordnat innovationsprogram inom kvantteknologi. Vinnova har nyligen lanserat några program för att stödja innovation, men det är små program som är mycket begränsade jämfört med forskningsinsatserna. KAW kan bara stödja forskning vid universiteten. Framöver bör finansieringen i högre grad fokusera på tillämpningar inom kvantteknologi. Sådana investeringar tjänar flera syften, både att stödja kommersialisering och låta fler aktörer engagera sig i kvantekosystemet.

Identifiering av tillämpningar och samverkan med industrin

Sverige behöver prioritera samverkan mellan industri och akademi vid identifiering av tillämpningar och öka industrins engagemang i kvantteknologi. Genom att främja samarbete mellan industri och akademi och öka industrins engagemang kan utvecklingen och kommersialiseringen av kvantteknologi stödjas.

Kvantstandarder på internationell nivå

Kvantteknologin är fortfarande ung men skulle redan nu gynnas av standardisering. Sverige bör tillsammans med andra länder enas om standarder för kvantteknologi. Till exempel standardiserade protokoll för kvantkommunikation samt kvalitets- och kapacitets-standarder för kvantdatorer.

Nordiskt, europeiskt och internationellt samarbete bör främjas

Sverige bör aktivt utveckla det internationella samarbetet på det kvantteknologiska området och samtidigt utveckla samverkan med ambitioner på såväl nordisk, europeisk som global nivå.

De nordiska länderna, särskilt Danmark, Finland och Sverige har en stark forskningstradition inom kvantteknologi. För närvarande finns det två viktiga nordiska organisationer inom detta område: "Nordic Quantum" och "Nordic Quantum Life Science". Tillsammans blir de nordiska länderna en stark internationell aktör.

Sverige bör också stärka och samordna sitt engagemang i kvantteknologiverksamhet på EU-nivå, såsom EU Quantum Flagship, EuroQCI, EuroHPC, QuantERA och European Chips Act. Detta skulle till exempel kunna förbättras genom att stärka Brysselkontoret-med kompetens på detta område.

Sverige är ett av elva länder (inklusive Danmark och Finland) som har ett bilateralt avtal med USA om att samarbeta kring kvantteknologi. Sverige bör dra nytta av detta bilaterala avtal och nätverket av länder som har liknande avtal.