



**Bidrag til ein  
norsk strategi  
for kvanterekning**

*Biletet på omslaget*

Kvantedatamaskin frå IQM, Espoo, Finland. Bruken av biletet er i samsvar med Creative Common Attribution-Share Alike 4.0 Int. License

# QCNorway

## Bidrag til ein norsk strategi for kvanterekning

Are Magnus Bruaset<sup>1</sup>, Shaukat Ali<sup>1</sup>, André Brodtkorb<sup>2</sup>, Gunnar Bøe<sup>3</sup>,  
Sergiy Denysov<sup>2</sup>, Hans Eide<sup>3</sup> and Sølve Selstø<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Simula Research Laboratory

<sup>2</sup>OsloMet – storbyuniversitetet

<sup>3</sup>Sigma2

8. juni 2023

Omsetjing til norsk ved Sølve Selstø og Are Magnus Bruaset, ferdig 20. juli 2023

**simula**

OSLOMET

OSLO METROPOLITAN UNIVERSITY  
STORBYUNIVERSITETET

 **sigma2**

# Innhold

<b>Forord</b>	<b>1</b>
<b>Samandrag</b>	<b>3</b>
<b>1 Utgangspunktet</b>	<b>10</b>
<b>2 Utdanning og arbeidsstyrke</b>	<b>15</b>
<b>3 Forsking og utvikling</b>	<b>19</b>
<b>4 Innovasjon og næringsliv</b>	<b>30</b>
<b>5 Infrastruktur for kvanterekning</b>	<b>35</b>
<b>Relevante omgrep</b>	<b>38</b>
<b>Referansar</b>	<b>40</b>



# Forord

Verda ser konturane av ein kvanterevolusjon — ein 40 år gamal draum om at data-maskiner får superkrefter ved å utnytte fenomen frå kvantefysikken ser ut til å materialisere seg raskt. Denne utviklinga har blitt mogeleg på grunn av nylege framsteg i ulike retningar innan kvanteteknologi. Det er framleis uvisst når, kvar og korleis ein kvanterevolusjon vil ta form, men det ser ut til å vere ganske tydeleg at store og kraftfulle endringar er på trappene. Desse endringane kan til og med kome til å overgå den nylege bølga av triumfar innan kunstig intelligens og maskinlæring.

Med dette store momentet, så vel globalt som i nabolanda våre, er det avgjerande at Noreg startar arbeidet med å utvikle sin eigen *nasjonale kvantestrategi*, der *kvanterekning* (engelsk: *quantum computing*) bør vere ein sentral del. I dette innspeldokumentet, som er inspirert av workshop-en QCNorway arrangert i november 2022, legg vi fram våre bidrag til diskusjonen som ein slik strategi kan byggast på.

Kvanteteknologi blir ofte sagt å kvile på fire pilarar: kvantesimulering, kvantesensorar, kvantekommunikasjon og kvanterekning. Forfattarane av dette dokumentet har samansett fagleg bakgrunn, men møtepunktet vårt er bereknings- og datavitskap. Vi har derfor avgrensa våre innspel til diskusjonen rundt ein nasjonal kvantestrategi spesifikt til kvanterekning, som også ser ut til å vere den sterkaste motoren internasjonalt når det gjeld utvikling av kvanteteknologi. Med det sagt, bør det også presiserast at ein framsynt norsk kvantestrategi må byggast på ei vid forståing av dagens kvanteteknologi. *Difor oppfordrar vi alle delar av det norske kvanteinteresserte fagmiljøet til å legge fram sine synspunkt.* På denne måten vil politikarar og dei som implementerer politikken kunne oppdatere seg effektivt og bli i stand til å ta opplyste og kloke val for framtida.

**Proessen.** Dette innspelet tek utgangspunkt i presentasjonar og diskusjonar på og etter workshop-en *QCNorway: Towards a Norwegian Quantum Computing Strategy* som blei arrangert i Oslo 7. – 8. november, 2022. Dette arrangementet var organisert av Simula Research Laboratory, OsloMet – storbyuniversitetet, SINTEF og Sigma2. Det var delfinansiert av Norges forskningsråd (tildeling nr. 341168), Simula Research Laboratory og OsloMet sin Kvantehub. Programkomiteen bestod av forfattarane av dette dokumentet og Franz Fuchs, SINTEF. Komplet program, samt opptak av dei fleste presentasjonane, er tilgjengelege på nettsida til QCNorway, [www.qcnorway.no](http://www.qcnorway.no).

Arbeidet med dette dokumentet, som starta i midten av januar 2023, er eit felles prosjekt som vart slutført i starten av juni 2023. Den 27. mars blei eit komplett utkast delt med ei lita gruppe beståande av dei norske arrangørane, innleggshaldarane og paneldeltakarane på arrangementet *Northern Prospects on Quantum* i Brussel 30. mars. Føremålet med dette arrangementet var å bringe forskarar, forskingsadministratorar, finansieringsapparat og dei som fattar vedtak frå dei nordiske og dei baltiske landa saman med representantar frå Europa-kommisjonen for å diskutere kvanteinitiativ. I vekene før dette blei andre liknande dokument, omtala som *kvanteagendaer*, publiserte i det finske og det svenske kvantemiljøet.

Den 21. april blei eit oppdatert utkast av vårt dokument sendt ut på ei uformell høyring blant eit stort utval representantar for norske, nordiske og europeiske kvantemiljø, inkludert alle som bidrog ved QCNorway-arrangementet i november. Vi fekk mange svar på denne høyringa med ei god blanding av anerkjenning, konstruktiv tilbakemelding, forslag til betringar og eit par bekymringar. All respons har blitt vurdert nøye og brukt aktivt for å gjere dokumentet betre.

Den endelege versjonen av dokumentet, både i form av den originale teksten på engelsk og denne norske omsetjinga, er gjort tilgjengeleg på nettsida til QCNorway og i andre kanalar.

**Takk.** I samband med arbeidet med dette dokumentet, har vi sett pris på ei rekkje diskusjonar og samtalar vi har hatt med kollegaer, både lokalt og internasjonalt. Lista over alle dei som har bidratt til desse diskusjonane er for lang til å bli tatt med her, men dei har så avgjort sett sine spor i sluttresultatet.

Som sagt har vi fått konstruktive tilbakemeldingar frå ei rekkje sentrale personar i kvantemiljøet under den opne høyringa. Dette har vore til stor hjelp i forsøket på å oppnå høg kvalitet og til å finne ein god balanse mellom å vere mottakeleg for andre synspunkt og å gi gode argument for råda vi gir i dette dokumentet. Vi vil spesielt takke Robert Axmann (DLR), Matthias Christandl (Københavns universitet), Carlos Cid (Simula UiB), Himadri Majumdar (SemiQon) og Øyvind Ytrehus (Simula UiB) for innsiktsfulle kommentarar og gode råd.

Oslo, 8. juni 2023

Are Magnus Bruaset      Shaukat Ali      André Brodtkorb

Gunnar Bøe      Sergiy Denysov      Hans Eide      Sølve Selstø

# Samandrag

*Noreg manglar ein nasjonal strategi, med tilsvarande investeringar, for å utvikle eigen ekspertise innan kvanterekning gjennom utdanning, aktiv forskning, verdiskaping og støtte frå teknisk infrastruktur.*

*Med det enorme momentet kvanteteknologi og kvanterekning har innan forskning og utvikling, globalt og i nabolanda våre, står vi i overhengande fare for å komme for seint til eit kappløp som har potensial til å omdefinere det digitale samfunnet og digital forretningsutvikling.*

Dette innspelet presenterer dei viktigaste meldingane frå den opne workshop-en *QCNorway: Towards a Norwegian Quantum Computing Strategy*, som blei arrangert i Oslo 7.–8. november 2022 med meir enn 150 deltakarar. Diskusjonen her er avgrensa til *kvanterekning*, den gir seg ikkje ut for å adressere *kvanteteknologi* generelt. Vi håpar at dette dokumentet, og utfyllande innspel frå andre interessantar, kan inspirere utviklinga av ein nasjonal kvantestrategi — ein strategi der kvanterekning er ein sentral del.

**Utgangspunktet.** Det moderne samfunnet er blitt avhengig av at store mengder data til ei kvar tid blir samla inn og prosessert av avanserte algoritmar. Slik situasjonen er no, veks behovet for reknekraft fleire millionar gonger raskare enn yteevna til tradisjonelle datamaskiner.

Tanken om ein kvantedatamaskin blei formulert alt 40 år sidan. Ein såg for seg at ved å gjere bruk av fenomen frå kvantefysikk, kunne visse problem bli løyst på berre ein liten brøkdelen av tida det ville ha tatt på ein tradisjonell datamaskin. Dette, i sin tur, ville gjere det mogleg å løyse problem med ein kompleksitet langt større enn det konvensjonell informasjonsteknologi er i stand til. I dag ser denne 40 år gamle ideen ut til å nærme seg ein realitet med stormskritt.

Kvantedatamaskiner er venta å kunne tilby spesielt effektive løysingar for bestemte typar berekningsmessige utfordringar, slik som ulike optimeringsproblem innan ei lang rekke bruksområde, inkludert maskinlæring og kunstig intelligens (KI). Dei kan også brukast til å simulere oppførselen til kvantesystem på ein meir effektiv måte enn klassiske datamaskiner kan. Dette vil vere til nytte innan mate-

rialvitskap, kjemi og ei rekkje andre felt. Sidan det framleis vil finnast problem som konvensjonelle datamaskiner løyser best, ser vi at utviklinga av hybride tilnærmingar, der ein kombinerer kvantemaskinvare med tradisjonelle datamaskiner, alt er i gong.

Dersom potensialet innan kvanterekning blir realisert fullt ut, vil samfunnet stå overfor ein digital revolusjon. Denne revolusjonen vil kunne bane veg for både nye vitskaplege innsikter og forretningsidéar som også inkluderer nye tilnærmingar til diagnostisering og behandling av livstruande sjukdomar. Kvanteprosessorar vil bruke berre ein liten brøkdel av energien ein treng for å gjere tilsvarande berekningar med konvensjonell teknologi, så kvantedatamaskiner kan bli viktige når det gjeld berekraftig og klimavenleg dataprosessering — altså såkalla *green computing*.

I tillegg til at teknologien er venta å ha omfattande positive følgjer, fører utviklinga av kvantedatamaskina også med seg farar for det moderne, digitale samfunnet. Det er ein kjent sak at tilstrekkeleg store kvantedatamaskiner vil vere i stand til å knekke dei krypteringsalgoritmane som er mest brukte i dag til å beskytte personvern, hemmelegheiter og integritet. Dette har ført til at *post-kvante-kryptografi* er eit svært aktivt forskingsfelt — eit felt som har som mål å utforme, analysere og implementere algoritmar og protokollar for kryptografi som kan stå imot angrep frå framtidige, store kvantedatamaskiner.

Sidan kvantedatamaskin-teknologien er venta å bli ein billion-dollar-industri (1.000.000.000.000 \$) med potensial til endre det digitale samfunnet på ein grunnleggande måte, er ikkje dette noko som kan ignoreras av nokon moderne, teknologiavhengig nasjon. I dag er det USA som leiar teknologikappløpet, med Kina og Canada som utfordrarar. Mange europeiske land har alt etablert sine eigne nasjonale kvantestrategiar og kunngjort betydeleg finansiering. I mange tilfelle har vi også sett like store eller større private investeringar. I følge tenketanken *European Policy Centre* er det veksande kvanteøkosystemet no på eit kritisk punkt der det vil kunne utvikle seg til ein internasjonalt konkurransedyktig europeisk industri.

Den 15. mars 2023 kunngjorde Storbritannia sin nasjonale strategi, som inkluderer investeringar på 2,5 milliardar britiske pund (2.500.000.000 £) over dei neste 10 åra. Innan utgangen av 2022 var dei totale investeringane innan kvanteteknologi i Nederland, Frankrike og Tyskland på høvesvis 765 millionar, 1,8 milliardar og 2,6 milliardar euro. I tillegg annonserte den tyske regjeringa i april i år at dei vil investere 3 milliardar euro i å utvikle ei universell kvantedatamaskin innan 2026. Dei tilsvarande tala for dei andre nordiske landa er mindre, men likevel betydelege: Danmark, 228 millionar euro; Sverige, 143 millionar euro; og Finland, 24 millionar euro. Desse tre nordiske landa er blant dei 11 landa i verda som har blitt valde ut for bilaterale samarbeidsavtalar med USA innan kvanteteknologisk forskning og utvikling. Investeringane i Danmark og Sverige inkluderer store private tilskot for å bygge sofistikerte kvantedatamaskiner. I tillegg har Danmark nyleg blitt vald som vertskap for det nye NATO-senteret for kvanteteknologi.

I desse tre nordiske landa er det satt inn store krefter for å få utvikla nasjonale kvantestrategiar. Medan det er venta at ein dansk strategi snart blir annonsert<sup>1</sup>, har det finske og det svenske kvantemiljøa nyleg (februar – mars 2023) kunngjort sine *kvanteagendaer* som råd til regjeringane sine.

Noreg har så langt ikkje nokon offisiell kvantestrategi eller betydelege investeringar — verken offentleg eller privat. Situasjonen står fram som svært ubalansert samanlikna med satsingane vi ser i nabolanda våre og i resten av verda. Ein bibliografisk analyse av kvanteforskninga i dei nordiske landa presentert i den finske kvanteagendaen<sup>2</sup> viser klart og tydeleg korleis Noreg som nasjon heng etter. Derfor er det nødvendig at den norske regjeringa handlar no — tydeleg og konkret — før dette tidsvindauget blir stengt.

Regjeringa gav nyleg mandat til Norges forskningsråd til å undersøke pågåande forskning innan kvanteteknologi i Noreg. Rapporten stadfestar at det trengst ein strategi og langsiktige investeringar av betydeleg storleik. Rapporten slår også fast at utviklinga av ein nasjonal kvantestrategi bør involvere forskingsmiljøet — ein prosess som dette dokumentet og liknande innspel frå andre interessentar også kan bidra til.

**Utdanning og arbeidsstyrke.** Kvanterekning, til liks med kvantefysikk, har til no berre vore pensum for dei spesielt interesserte, som oftast innan spesialiserte fysikk- og kjemiutdanningar. Dette må endre seg, noko som faktisk er i ferd med å skje. Rundt om i verda held universitet på å utvikle nye kurs på både bachelor- og masternivå for å utdanne unge studentar. Ein raskt veksande kvanteindustri er på nærast desperat jakt etter slik arbeidskraft. Denne industrien har ikkje tid til å vente dei fem åra det tar å utdanne ein kandidat frå studiestart til masternivå.

Samtidig som høgare utdanning blir justert for å kunne møte denne nye etterspurnaden, er det viktig at vi tar grep for å auke kunnskapen om kvanterekning — kva det er og kva det kan brukast til, på godt og vondt. Slikt *kvantemedvit* er avgjerande for å kunne demokratisere kvanterekning spesielt og kvanteteknologi generelt. Det siste tiåret har vi sett ein liknande ubalanse mellom dei som har og dei som ikkje har kunnskap og innsikt når det gjeld kunstig intelligens. Kvanterekning har potensial til å påverke samfunnet i enda større grad, og dermed også føre til ein enda større ubalanse — til dels som ein akselerator for framtidig kunstig intelligens.

Noreg må ta desse kunnskapsmessige utfordringane på alvor både når det gjeld å utdanne ein kvantekompetent arbeidsstyrke og når det gjeld å heve den generelle kunnskapen og medvitet om kvanterekning blant folk flest. For å lukkast med dette, treng vi investeringar innan grunnskule, vidaregåande skule og på universitets- og høgskulenivå.

---

<sup>1</sup>Den danske kvantestrategien vart publisert 19. juni 2023, medan dette innspelsdokumentet blei omsett frå engelsk til norsk. Danmark skal investere ein milliard danske kroner i løpet av dei fire neste åra, sjå <https://ufm.dk/aktuelt/pressemeddelelser/2023/regeringen-klar-til-milliardinvestering-som-led-i-ny-strategi-for-kvanteteknologi>.

<sup>2</sup>*The Finnish Quantum Agenda* (2023, tabell 1), sjå <https://instituteq.fi/finnish-quantum-agenda/>.

**Forsking.** I dag blir milliardar av dollar investert i forsking som må til for å utløyse det venta kvantereknings-potensialet. Denne forskinga skjer i USA, Kina og ei rekkje europeiske land, inkludert dei nordiske landa. Majoriteten av desse investeringane går til å utvikle maskinvaren som trengs for å bygge effektive kvantedatamaskiner. Dette er svært kostbart. Sjølv om det er naturleg at den tidlege forskingsinnsatsen dreier seg om maskinvareutvikling, er det påfallande å sjå ubalansen når det gjeld nødvendig programvareutvikling. Vi treng meir forsking på utvikling av nødvendige algoritmar, i tillegg til ei kartlegging av kva for nokre bruksområde som ligg best til rette for å gjere seg nytte av kvanterekning. Gjennom dei drygt 70 åra vi har sett med utvikling av moderne berekningsteknologi har dei fleste prinsippa og verktøya for å lage gode, nyttige applikasjonar og programvare blitt til gjennom prøving og feiling. Ut frå det vi har lært av historia, burde utviklinga av kvanteprogramvare og kvantedatamaskiner gå hand i hand.

Noreg har eit unikt utgangspunkt for å bli ei leiande drivkraft innan utvikling av kvanteprogramvare. Heilt sidan objektorientert programmering, sjølve grunnlaget for moderne programvareutvikling, blei funne opp på 1960-talet av informatikkpionerane Ole-Johan Dahl og Kristen Nygaard, har Noreg hatt ein viktig posisjon innan informasjonsteknologi. Som nasjon er vi truleg for seint ute til å ta ei leiande rolle innan utvikling av kvantemaskinvare, i det minste når det gjeld løysingar basert på teknologiane som hovudaktørane i dag investerer tungt i. Sidan det å ha ei slik leiande rolle også kjem med ein veldig høg økonomisk kostnad, kan det vere meir lønsamt å styre nasjonal innsats i retning av posisjonar som meir opne — typisk innan programvare for kvanterekning. Dette inkluderer område som kvanteinformasjonsteori, kvante-feilkorrigerings- og -feilreduksjon og strukturar som er robuste mot feil og støy. Dette inkluderer også høvet til å ta leiande roller når det gjeld *metodar* for å utvikle robuste og effektive kvantealgoritmar og implementeringar som kan vi kan vere trygge på at løyser relevante problem på rett måte. Eit slikt programvaresentrert syn på kvanterekning er heilt på linje med pågåande diskusjonar innanfor EuroHPC, som er ei av dei primære finansieringskjeldene for europeiske forskingsinvesteringar innan dette området. Ved å bli ein leiande nasjon innan kvante-*software engineering*, vil Noreg kunne føre vidare arven frå oppfinninga av objektorientert programmering.

Parallelt med pågåande norsk forsking på bruk av kvantedatamaskiner og utvikling av kvanteprogramvare, finst det også sterke norske forskingsgrupper innan utforming av datatryggleik og post-kvante-kryptografi. Noreg har også eit rikt forskingsmiljø innan kommunikasjonsteknologi, også med vekt på programvare. Dette dannar eit solid utgangspunkt for å utvikle og forske på kvantenettverk, som er enda ei side av det å sikre trygge og pålitelege økosystem for kvanterekning i framtida.

Norsk forsking innan kvanteteknologi bør skje i nært samarbeid med internasjonale partnarar. Aktiv bruk av EU sine instrument for finansiering av forsking er avgjerande. Dette inkluderer at Noreg som nasjon forpliktar seg til å bidra økonomisk, i tråd med det som er forventa av dei andre landa som deltar. Når det gjeld kvanterekning, gjeld dette spesielt Noreg si deltaking i EuroHPC Joint Undertaking, Digalt Europa, QauntERA, Horisont Europa og andre relevante program.

**Innovasjon.** For å kunne unytte det fulle potensialet innan utdanning og forskning, må den samla kompetansen og forskinga bli overført til verdi i samfunn og næringsliv gjennom innovasjonsprosessar. I dag, i samsvar med den nokså låge kunnskapen nasjonalt, er det berre nokre få, store selskap som prøver å forstå korleis kvanterekning kan vere nyttig for dei i framtida. Dei viktigaste eksempla på kvantenyfike selskap finn vi innan sektorane energi, maritime aktivitetar, logistikk og finans. Men dei er få, og dei ligg eit stykke frå kvarandre.

For at Noreg skal lukkast med å utnytte fordelane som kvanterekning er venta å gi, må vi auke kunnskapen og medvitet — ikkje berre når det gjeld kvanterekning generelt, men også når det gjeld potensialet for store omveltingar innan næringsliv og verdiskaping. På same måte er det også nødvendig å forstå betre korleis denne teknologien kan gjere det mogleg å nye nivå innan offentlege tilbod og for velferdsstaten, til dømes innan helsesektoren. Det er også viktig å forstå avgrensingane dette nye bereknings- og programmeringsparadigmet har. Eit norsk initiativ bør derfor oppfordre til brei deltaking internasjonalt, for eksempel gjennom deltaking i *the European Quantum Industry Consortium* (QuIC) og liknande forum for å støtte både private og offentlege sektorar. Dette bør styrkast ytterlegare ved å inkludere kvanterekning som ein del av dei prioriterte områda innan eksisterande finansieringsinstrument for innovasjon, som for eksempel ordninga med *Senter for forskningsdrevet innovasjon* (SFI). Sidan kvanterekning har eit disruptivt potensial, burde Noreg utvikle mekanismar for å støtte gründerar som ønskjer å satse på nye kvanteinitiativ.

**Infrastruktur.** Noreg sine nordiske partnarar, Sverige, Finland og Danmark, gjer betydelege framsteg innan kvanterekning, sjølv etter internasjonal standard. Dei nordiske landa har ei lang og suksessrik historie med samarbeid innan forskning, utvikling og teknisk infrastruktur. Dei leiande institusjonane i desse landa gir uttrykk for ei sterk vilje til å utvikle nære samarbeid med norske kollegaer. Ved å anerkjenne at berekningsmessig infrastruktur ikkje berre består av maskinvare, men også heile spektrumet av algoritmar, programvare og menneskeleg kompetanse, kan Noreg bli ein ettertrakta samarbeidspartnar ved å komplettere satsingar i dei andre nordiske landa, som hovudsakleg fokuserer på maskinvareutvikling. På denne måten kan Noreg bidra til å gjere regionen til ein betydeleg internasjonal aktør. Men dette er berre mogleg med investeringar retta mot å bygge komponentane som trengs for slik infrastruktur, tett knytt opp til ein nasjonal innsats innan utdanning, forskning og innovasjon innan kvanterekning.

EuroHPC annonserte nyleg finansiering av dei seks første initiativa for å bygge europeiske kvantedatamaskiner i samband med eksisterande senter for tungrekning, *high performance computing* (HPC), i Europa. Noreg er tungt involvert i eitt av desse initiativa, LUMI-Q, med tre partnarar, Sigma2, Simula Research Laboratory og SINTEF. Dette prosjektet er eit tydeleg eksempel på korleis Noreg som nasjon kan gjere seg nytte av europeisk kompetansebygging og tilgang til infrastruktur for forskning og innovasjon innan kvanterekning. Men det er framleis bekymringsfullt

at Noreg som nasjon sviktar dei internasjonale forventingane om å vere med på å finansiere dette og kommande EuroHPC-prosjekt, som trass alt er meint å vere fellesprosjekt (*joint undertaking*). Vi vil raskt tape terreng dersom vi ikkje aksepterer å forplikte oss til eit slikt samarbeid — og, i tillegg, bruker det aktivt for å få fram ei nasjonal satsing innan kvanterekning. Gitt kor mykje som skjer på dette feltet internasjonalt, er det berre eit spørsmål om tid før avstanden til våre naturlege samarbeidspartnarar har blitt så stor at han er uoverstigeleg.

## Anbefalingar

### Utdanning

#### Ein norsk strategi for kvanterekning bør

- prioritere kvantemedvit og kvantekompetanse i arbeidsstyrken på tvers av ulike sektorar;
- auke kunnskapen og medvitet blant folk flest om kva ny kvanteteknologi kan føre med seg;
- sikre at vidaregåande pensum inneheld grunnleggande kunnskap om kvanteteknologi, og meir avanserte tilbod på høgare trinn;
- sikre utvikling av leiande utdanningsprogram innan kvanterekning.

### Forsking

#### Ein norsk strategi for kvanterekning bør

- utnytte det store momentet i kvanterekning rundt om i verda, inkludert i Norden og Europa, og støtte internasjonalt forskingssamarbeid;
- støtte utviklinga av pålitelege applikasjonar som bruker kvanterekning på reelle problem ved å prioritere programvarerelatert forskning, inkludert *software engineering*, kvantealgoritmar, kvanteinformasjonsteori og teknikkar for korleksjon og demping av feil (*quantum error correction and mitigation*);
- bidra til at kvanterekning blir raskare tatt i bruk ved å prioritere forskning som gjer det mogleg å bruke NISQ-maskiner til å løyse reelle problem;
- støtte grunnforskning knytta til utvikling av kvantedatamaskiner basert på andre teknologiar enn dei som er godt dekte av samarbeidsland;
- utvikle høg kompetanse og solid teknologisk grunnlag for å kunne ta vare på datatryggleik og personvern i ein kvanteinformatisk tidsalder;
- støtte tverrfagleg forskning og utvikling som tek for seg etiske og samfunnsmessige sider ved kvanterekning.



## Innovasjon

### Ein norsk strategi for kvanterekning bør

- kartlegge kva for nokre norske næringsområde som kan ha stor nytte av kvanterekning og identifisere områda som står i fremste rekkje;
- identifisere norske selskap og forskingsinstitusjonar med ekspertise i verdsklasse for kvantereknings-*stacken* og tilhøyrande verdikjede;
- stimulere samarbeid mellom academia, forskingsinstitusjonar, industri og offentleg sektor for å styrke innovasjon basert på kvanterekning;
- prioritere etter- og vidareutdanning innan kvanteteknologi slik at den eksisterande arbeidsstyrken kan dra nytte av kvanterekning;
- styrke konkurranseevna til norske selskap gjennom å støtte innovativ utvikling av kvanterelaterte produkt og tenester;
- gjere oss i stand til å verne norske interesser, både i privat og offentleg sektor, frå kvantebaserte angrep på tryggleiken.

## Infrastruktur

### Ein norsk strategi for kvanterekning bør

- sikre tilgang til kvantemaskinvare gjennom deltaking i internasjonale konsortium som EuroHPC;
- prioritere kompetansen og sikre ekspertisen som trengst for å utvikle kvantealgoritmar, -programvare og -applikasjonar.

# 1

## Utgangspunktet

For å setje diskusjonen om ein nasjonal strategi for kvanterekning på dagsorden, arrangerte forfattarane av dette innspelsdokumentet ein open workshop, *QCNorway: Towards a Norwegian Quantum Computing Strategy*, i Oslo, 7.–8. november 2022. Dette arrangementet samla 23 ekspertar frå Noreg og utlandet, og arrangementet blei gjennomført av Simula Research Laboratory, OsloMet – storbyuniversitetet, Sigma2 og SINTEF i fellesskap. Det fekk økonomisk støtte frå Norges forskningsråd (tildeling nr. 341168), OsloMet sin Kvantehub og Simula. Presentasjonane og paneldiskusjonane tok for seg erfaringar, behov og moglegheiter innan utdanning, forskning og innovasjon — i tillegg til infrastruktur og strategiske perspektiv. Dei som bidrog med innlegg var frå EU-kommisjonen, Noreg, Sverige, Danmark, Finland, Tyskland, Nederland og USA, og dekte forskingspolitisk leiing, akademia og industri. Arrangementet over to dagar var godt besøkt med 83 deltakarar til stades og minst 76 online-deltakarar. Alle detaljar når det gjeld programmet, i tillegg til opptak av dei fleste presentasjonane, er tilgjengelege på [www.qcnorway.no](http://www.qcnorway.no).

**Atterhald.** *Dette innspelsdokumentet representerer dei viktigaste lærdomane frå QCNorway slik forfattarane ser det. Det bør presiserast at arrangementet, og dermed også dette dokumentet, er avgrensa til kvanterekning. Det er mange andre relevante forskingstema innan kvanteteknologi der Noreg er i stand til å bidra på internasjonalt nivå. Slike tema ligg utanfor ramma for dette dokumentet og bør heller adresserast av andre delar av det norske forskingsmiljøet innan kvanteteknologi.*

*Vi håpar at dette dokumentet, saman med utfyllande innspel frå andre interessentar, kan gi inspirasjon til å utvikle ein nasjonal kvantestrategi – ein strategi der kvanterekning er ein sentral del.*

**Behovet for kvanterekning.** Det moderne samfunnet har gjort seg avhengig av å kunne samle store mengder data og prosessere desse ved hjelp av avanserte algoritmar — frå automatiserte skattemeldingar til sjølvkøyrande bilar, frå pasient-spesifikk kreftbehandling til å finne den neste favorittserien på Netflix. Berekingar og databehandling er over alt rundt oss, til alle tider på døgnet, frå livsviktige vurderingar til underhalding. Det behovet vi har i dag for reknekraft veks mange millionar gonger raskare enn yteevna til tradisjonelle datamaskiner.<sup>1</sup>

Tanken om kvanterekning, eit heilt nytt paradigme for korleis vi kan designe datamaskiner og algoritmar, blei lansert for over 40 år sidan [2]. Ein såg føre seg å konstruere ei ny type maskin i stand til å gjere seg nytte av kvantefysiske fenomen. Ei slik tilnærming ville gjere det mogleg å skape algoritmar som kan løyse matematiske og statistiske problem ved å utforske eit enormt antal potensielle løysingar på ein svært effektiv måte; ei kvantedatamaskin ville kunne løyse visse problem på berre ein brøkdel av tida det ville ta på ei tradisjonell datamaskin. Ved å utnytte denne enorme reknekrafta ville ei slik maskin vere i stand til å løyse problem med ein kompleksitet som går langt over det som tradisjonell teknologi var i stand til då, no og i framtida. I dag ser det ut til at denne 40-år gamle idéen er raskt i ferd med å bli verkeleg.

**Potensialet i kvanterekning.** Takka vere nylege eksperimentelle og teknologiske gjennombrøtt innan kvantefysikk — gjennombrøtt som til ein viss grad gjer det mogleg å kontrollere og manipulere individuelle to-nivå kvantesystem, typisk enkelt-atom eller lys-partiklar — ser vi no rask vekst i potensialet til kvanterekning. Desse gjennombrøtta representerer ein teknologisk revolusjon som ofte blir omtala som *den andre kvanterevolusjonen*. Denne skjer omlag 100 år etter at kvanteteorien blei til. Denne *første kvanterevolusjonen* førte til mange teknologiske nyvinningar som for lengst er veletablerte og velkjende, som for eksempel, laserar, magnetisk resonans (MR) diagnostisering og tunneleringsmikroskop (STM) — for ikkje å gløyme transistorar og integrerte kretsar, teknologiar som gjorde oss i stand til å lage *klassiske* datamaskiner.

Kvantedatamaskiner er venta å vere spesielt effektive til å løyse visse berekningsmessige utfordringar. Dette har med å gjere at ei kvantedatamaskin er i stand til å evaluere alle moglege løysingar i eitt einaste steg. Slik sett, er optimeringsproblem ein spesielt relevant problemklasse for slike maskiner. Mange utfordringar frå den verkelege verda kokar ned til å løyse optimeringsproblem – frå vêrmelding til databaserte modellar innan maskinlæring og kunstig intelligens. Det finst også ei rekke andre berekningsmessige utfordringar der potensialet for å bruke kvantedatamaskiner er stort. Men framleis vil mange problem vere betre eigna til å bli løyst ved hjelp av konvensjonelle datamaskiner. Derfor ser vi alt no at utviklinga av effektive hybride tilnærmingar tek form, tilnærmingar som koplkar kvantekomponentar saman med tradisjonelle datasystem. Dersom det lukkast å fullt ut realisere moglegheitene som ligg i kvanterekning, står samfunnet truleg framfor ein infor-

<sup>1</sup> Dette er basert på ei forsiktig ekstrapolering frå argumenta presentert i “AI and Compute” [1].

masjonsteknologisk revolusjon. Denne disruptive utviklinga kan tenkjast å bane veg for heilt nye, eineståande vitenskaplege innsikter og næringsretta moglegheiter — inkludert fullstendig nye metodar innan medisinsk diagnostikk og behandling av livstruande sjukdommar.

Tanken om kvanterekning har lenge vore ein uoppfylt draum, men i dei siste tiåra har utviklinga innan kvanteteknologi akselerert dramatisk. Teknologien bak kvanterekning har blitt ei “stor risiko, stor gevinst”-

type næringsverksemd som er motivert av den enorme flyten av tilgjengelege data og gjort mogeleg gjennom svært store investeringar. I følgje selskapet Qureca Ltd. hadde omtrent 33 milliardar euro blitt investert i kvanteteknologi rundt om i verda innan utgangen av 2022 [3]. Dei siterer ein analyse gjennomført av *Research and Markets* som spår at marknaden for kvanteteknologi når 40 milliardar euro innan 2027, med ein samansett årleg vekstrate nær 40% [4]. Honeywell har nyleg anslått at kvanteteknologiske løysingar vil bli ein billionindustri målt i dollar (1.000.000.000.000 \$) [5].

“ Samfunnet står truleg framfor ein informasjonsteknologisk revolusjon

**Det grøne perspektivet.** Når det gjeld berekningar der kvantedatamaskiner løysar problemet betydeleg raskare enn klassiske datamaskiner, er det også venta at den elektriske energien som trengs blir redusert betydeleg. Forsking som NASA, Google og Oak Ridge National Lab har gjort demonstrerer eit tilfelle der ei kvantedatamaskin brukte så lite som 1/50.000 av den energien som den konvensjonelle superdatamaskina Summit trengte [6]. Hovuddelen av energien som trengs i ein kvantedatamaskin-installasjon går typisk med til kjøling av utstyret snarare enn sjølve bruken av kvantekomponentane. Dette gjeld spesielt superleiande kvantedatamaskiner som krev at prosessorane blir kjølt ned til svært låge temperaturar. Sjølv om kvantedatamaskiner ikkje vil erstatte klassiske maskiner, men snarare bidra til å avlaste og akselerere visse delar av tyngre utrekningar, vil framtidig bruk av kvantedatamaskiner kunne bli eit viktig bidrag til å redusere energiforbruket ved dei store sentera for tungrekning.

Det er også viktig å vere klar over at kvanterekning kan ha fordelar innan område som, til dømes, det å simulere kjemiske reaksjonar, materialteknologi eller optimering av komplekse scenario. Alt i alt, kan kvanterekning dermed bidra betydeleg til det grøne skiftet.

**Trusselen mot tryggleik.** Kvanterekning er venta å gi viktige positive effektar. Men den nye reknekrafta vil også føre med seg farar for det moderne, digitale samfunnet. I første rekkje gjeld dette informasjonstryggleik sidan framtidige kvantedatamaskiner vil kunne vere i stand til å knekke dei viktigaste krypteringsalgoritmane vi bruker for å beskytte personvern og løyndomar i dag — også innan stats-

forvaltning. Difor er *post-kvante-kryptografi* blitt eit aktiv forskingsfelt, eit felt som har som mål å utforme, analysere og utvikle krypteringsalgoritmar som kan stå imot reknekrafta til framtidige, store kvantedatamaskiner.

### Den internasjonale scenen.

Sjølv om det er USA som står fremst når det gjeld kvantedatamaskin-revolusjonen, med om lag 60% av alle private investeringar og meir enn 40%

av alle oppstartsbedriftene i verda, er også EU ein viktig deltakar. EU investerte 7,2 milliardar euro i offentlege løyvingar frå 2020 til 2021, omtrent tre gonger så mykje som dei offentlege investeringane i Kina og i USA [7]. Dette forholdet er i ferd med å endre seg — både grunna dei massive offentlege investeringane som Kina har kunngjort, og grunna ein rask auke innan privatfinansierte initiativ i USA [8]. Globalt står Kina og Canada fram som dei viktigaste utfordrarane til den leiande posisjonen USA har [9, 10].

Same kor stor grad draumen om kvanterekning blir verkeleg, er det tydeleg at den ikkje kan ignoreras av nokon moderne, teknologiavhengig nasjon. Sjølv i dag, medan kvantedatamaskinene som er bygde er små og langt frå feilfrie, har kvantereknings-paradigmet alt påverka korleis vi tenkjer om algoritmeutforming, berekningar og databehandling.

Ei rekkje europeiske land har alt etablert eigne nasjonale kvantestrategiar og kunngjort betydeleg nasjonal finansiering. I mange tilfelle har vi også sett at desse investeringane har blitt følgde opp med like store eller større private investeringar. Eit eksempel er Storbritannia som 15. mars i år kunngjorde sin nasjonale strategi. Den inneber ei investering på 2,5 milliardar britiske pund over dei neste 10 åra [11]. Ved utgangen av 2022 var dei totale investeringane i kvanteteknologi i Nederland, Frankrike og Tyskland på høvesvis 765 millionar, 1,8 milliardar og 2,6 milliardar euro. I tillegg kunngjorde den tyske reregjeringa i april 2023 at 3 milliardar euro skal settast av til å bygge ei universell kvantedatamaskin innan 2026 [12]. *The European Policy Center* seier, “In contrast with the US, where Big Tech actors dominate, Europe’s strengths lie in a vibrant ecosystem of research organisations and start-ups. This growing ecosystem is now at a *critical juncture* to develop into an *internationally competitive European industry*.” [13].

Dei tilsvarande investeringane i dei nordiske landa er mindre, men også her betydelege: Danmark, 228 millionar euro; Sverige, 143 millionar euro; og Finland, 23 millionar euro [3]. Desse tre nordiske landa er blant dei 11 landa i verda som USA har inngått tosidige avtalar med for forskingssamarbeid innan kvanteteknologi. Dei danske og svenske investeringane inkluderer store privatfinansierte initiativ for å bygge sofistikerte kvantedatamaskiner. Det bør også nemnast at Danmark, takka vere store aktiviteten innan kvanteteknologi, nyleg blei vald som vertskap for det nye

“ Den nye reknekrafta vil også føre med seg farar for det moderne, digitale samfunnet

NATO-senteret for kvanteteknologi [14]. I desse tre nordiske landa er det no ein stor og brei innsats for å få utvikla nasjonale kvantestrategiar. Vi ventar enda på at den danske strategien skal kunngjerast<sup>2</sup>, medan dei finske og svenske kvantemiljøa har nyleg, februar/mars 2023, presentert sine *kvanteagendaer* som råd til regjeringane sine [16, 17].

**Behovet for ein nasjonal strategi.** Noreg har i dag ingen offisiell kvantepolitikk eller -strategi, eller større kvanteinvesteringar — verken offentlege eller private. Når vi samanliknar med nabolanda våre og resten av verda, står dette fram som ein svært ubalansert situasjon. Ein bibliografisk analyse av kvanteforskinga i dei nordiske landa presentert i den finske kvanteagendaen, [16, tabell 1], viser i klartekst at Noreg heng etter. Vi treng tydeleg handling frå den norske regjeringa for å kunne redusere dette gapet. Slik situasjonen er no, er det framleis rom for at Noreg kan spele ei rolle, men dette handlingsrommet forsvinn om vi ikkje handlar raskt.

Den norske regjeringa bad nyleg Norges forskningsråd undersøke kva forskning som går føre seg i Noreg innan kvanteteknologi [18]. Rapporten frå forskningsrådet [19] gir ei god oversikt over aktiviteten, og han stadfestar at det er behov

for ein nasjonal strategi og betydelege, langsiktige investeringar. Rapporten slår også fast at prosessen fram mot ein nasjonal kvantestrategi bør inkludere forskingsmiljøa. Med dette innspelsdokumentet ønskjer vi å bidra til ein slik prosess — saman med tilsvarende innspel frå andre interessentar.

“ Noreg har i dag ingen offisiell kvantepolitikk eller -strategi, eller større kvanteinvesteringar

**Dei fire aksane.** Når vi snakkar om ein nasjonal strategi for kvanterekning, er det naturleg for oss å dele diskusjonen langs fire aksar: utdanning, forskning, innovasjon og infrastruktur. Desse aksane utgjer viktige, samankopla område, samtidig som dei også har sine spesifikke eigenskapar og prioriteringar. I utarbeidinga av ein nasjonal strategi er det viktig å tenkje heilskapleg og å samordne initiativ og insentiv mellom desse fire områda. Vi har også vald å organisere innhaldet i dette innspelsdokumentet etter desse fire aksane.

---

<sup>2</sup>Den danske kvantestrategien vart publisert 19. juni 2023, medan dette innspelsdokumentet blei omsett frå engelsk til norsk. Danmark skal investere ein milliard danske kroner i løpet av dei fire neste åra [15].

# 2

## Utdanning og arbeidsstyrke

### Anbefalingar

#### Ein norsk strategi for kvanterekning bør

- prioritere kvantemedvit og kvantekompetanse i arbeidsstyrken på tvers av ulike sektorar;
- auke kunnskapen og medvitet blant folk flest om kva ny kvanteteknologi kan føre med seg;
- sikre at vidaregåande pensum inneheld grunnleggande kunnskap om kvanteteknologi, og meir avanserte tilbod på høgare trinn;
- sikre utvikling av leiande utdanningsprogram innan kvanterekning.

Sidan bruken av kvanteinformasjonsteknologi vil fortsette å auke blant kunnskapsarbeidarar, må vi gjere arbeidsstyrken *kvantemedviten*. Tradisjonelt har kvantefysikk og kvanteteknologi blitt undervist i ein akademisk kontekst som del av fysikkstudiet. Dette åleine vil ikkje vere nok til å møte etterspurnaden frå kvanteindustrien. Spesielt vil unge og nyutdanna kunnskapsarbeidarar innan informasjonsteknologi ha behov for å bli introdusert for kvanteverda.

Og her hastar det. Det tek fleire år å utdanne studentar til bachelornivå, masternivå eller høgare, og det tek tid å etterutdanne arbeidsstyrken vi har no. Vi har ikkje noko tid å miste om vi skal prøve å møte den aukande etterspurnaden frå ein kvanteindustri i rask vekst. Dette inkluderer økosystemet rundt denne industrien og andre interessentar i samfunnet. Motivert av desse utfordringane og behova har vi sett ei

rekke utdanningsinitiativ vekse fram internasjonalt — initiativ som adresserer ulike sider ved kvanteteknologi [20].

**Utdanning innan kvanterekning.** Sidan USA ligg fremst i løypa når det gjeld kvanteteknologi, er det naturleg å bruke arbeidsmarknaden der som målestokk for arbeidsmarknaden vi reknar med å sjå i Europa i nær framtid. Fleire nylege studiar har vurdert behovet i den nordamerikanske kvanteindustrien. Nokre av desse blei presentert på workshop-en QCNorway av førsteamanuensis Benjamin Zwickl ved Rochester Institute of Technology [21]. Frå desse studiane kan ein trekkje to relaterte konklusjonar:

Kvantearbeidsstyrken er mangfaldig og femner breiare enn berre folk med doktorgrad.

Kvantearbeidsstyrken spenner vidare enn det som berre er spesifikt for kvanteteknologi.

Begge desse sidene har med det å gjere at kvanteinformasjonsteknologi i seg sjølv er eit tverrfagleg område. Det å utvikle og betre slik teknologi krev innsats frå fagfolk med ulike bakgrunnar som, til dømes, ingeniørfag, fysikk, materialvitskap, matematikk og informatikk. I ein slik samanheng er det viktig å kunne kommunisere effektivt med kollegaer frå andre fagfelt, også for dei som ikkje er kvanteekspertar. Vi treng difor ein arbeidsstyrke med kvantemedvit. Vidare krev kvanteteknologisk utviklingsarbeid kunnskap frå område som ligg utanfor det reint kvantefysiske, slik som elektromagnetisme, kjøleteknikk, mikrodesign og tradisjonell informasjonsteknologi. Evna til å kommunisere med kollegaer som jobbar med kvantespesifikke felt, typisk nokon som har doktorgrad innan eit kvanterelatert felt, er avgjerande. Ein viss kjennskap til kvanteteknologi er også ein klar fordel, ein dørøpnar, når ein ønskjer å lære seg meir spesialiserte emne i framtida. Det akutte behovet for å auke kunnskapen blant dagens kunnskapsarbeidarar er diskutert i meir detalj i kapittel 4.

Alt no, medan kvanteindustrien framleis ligg i vogga, kan vi sjå konturane av ein arbeidsmarknad for kvantemedvitne arbeidarar utan doktorgrad.

I denne samanhengen ser vi eit kunnskapsgap i norsk høgare utdanning når det gjeld kvanteinformasjonsteori — eit gap som må fyllast både når det gjeld kvantitet og kvalitet. Det er eit akutt behov for å utvikle kurstilbod både når det gjeld volum og mangfald. Desse kursa må ha høg kvalitet, og dei må oppdaterast fortløpande slik at dei kan spegle den raske utviklinga i feltet. I tillegg krev utviklinga og gjennomføringa av slike kurs kunnskap og erfaring når det gjeld *korleis* vi bør undervise kvanterekning og tilgrensande emne.

“ “ Vi treng ein arbeidsstyrke med kvantemedvit



Slik situasjonen er no, blir det tilbydt få kurs ved norske universitet og høgskular. Sjølv om nokre kurs blir gitt, mellom anna ved OsloMet og Universitetet i Oslo, har vi framleis ein lang veg å gå. Det er gledeleg å sjå at talet på PhD-prosjekt innan kvanterelaterte felt er aukande, og det er oppløftande å sjå veksande interesse frå studentar generelt. For å kunne møte denne interessa, og etterspurnaden frå industrien, må vi forske på korleis vi kan introdusere studentar med ulik bakgrunn til kvanteverda og utvikle gode metodar for å implementere dette.

### **Didaktisk forskning for kvanterekning.**

Undervising i informasjonsteknologiske og berekningsmessige sider ved naturfag og matematikk har blitt forma og finpusa gjennom ti-år. Trass i den enorme utviklin-

ga vi har sett innan kvanteteknologi dei siste åra, blir pedagogiske utfordringar ved å undervise kvanterekning framleis handtert på eit nokså elementært og overflatisk nivå. For å gi slik undervising ei solid fagleg forankring, og for å kunne bygge solide porteføljar av kurs, treng vi didaktisk forskning retta mot kvanterekning. Slik forskning bør ta sikte på å utvikle og etablere nye metodar for undervising tilpassa studentgrupper med varierte bakgrunnar — bakgrunnar som inkluderer fysikk, matematikk, informasjonsteknologi, cyber-tryggleik og utvikling av programvare. For å etablere ein mønsterpraksis for å gjere slike studentgrupper kvantekompetente, treng vi svar på ei rekkje spørsmål:

“ Det er oppløftande å sjå veksande interesse frå studentar

- I kor stor grad treng ein informasjonsteknologi-student som vil lære om kvanterekning vite noko om *kvantefysikk*?
- Kva slags intuisjon må byggast for å kunne kome fram til nye kvantealgoritmar som er i stand til å løyse praktiske, relevante problem på ein måte som har ein kvantefordel?
- Korleis kan vi utvikle den nødvendige forståinga og dei nødvendige evnene til å implementere kvanteresistente rutinar for tryggleik i det digitale samfunnet?
- Korleis bør pensum innan programvareutvikling bli endra for å kunne utdanne studentar som er i stand til å utvikle kvanteprogramvare? Treng vi eit heilt nytt pensum eller kan vi justere det vi alt har?
- Korleis lagar vi relevant kursmateriale i kvanterekning som passar for studentar med ulik bakgrunn?
- Kva for nokre evner bør utviklast i ungdomsskulen og i vidaregåande skule for å kunne støtte overgangen til høgare utdanning innan kvanterekning?

Dei erfaringane vi er i ferd med gjere oss når det gjeld pågåande undervising i kvanteteknologi er eit viktig utgangspunkt for å kunne svare på slike spørsmål. Men vi treng fleire dedikerte initiativ, og desse bør organiserast gjennom ein nasjonal strategi. For å sikre relevansen av slike initiativ er det svært viktig at heile spekteret av interessentar blir involvert — interessentar innan akademien, forskingsinstitusjonar, industri og offentleg sektor, ikkje berre universiteta. Ein slik nasjonal strategi bør, spesifikt, inkludere erfaringar frå dei to eksisterande ordningane *Sentre for fremragende undervising* (SFU) og *Sentre for forskningsdrevet innovasjon* (SFI), sjå også diskusjonen i kapittel 4.

**Kvantemedvit i samfunnet.** Idéen om kvantemedvit er ikkje avgrensa til dei som ser for seg ein jobb innan kvanteindustrien. Sjølv om dei færraste av oss tenkjer så mykje over det, har ulike former for kvanteteknologi for lengst blitt ein viktig del av daglegliva våre. Vi brukar kvanteteknologi innan klassisk informasjonsteknologi, eller når vi brukar solceller eller andre typar halvleiarteknologi. Laseren, som først blei kalla “ei løysing på jakt etter eit problem”, har funne uendeleg mange problem å løyse, og medisinske bilet- og diagnostiseringsteknikkar som, til dømes, magnetisk resonans (MR) har for lengst blitt eit standardverktøy på sjukehus.

Slike teknologiar åleine ville vere nok til å motivere auka innsats for å gjere folk meir medvitne om kvantefenomen og korleis slike fenomen kan komme til praktisk nytte. Når vi no ser starten på den andre kvanterevolusjonen, blir denne motivasjonen, eller snarare dette *behovet*, betydeleg styrka. Sidan kvantedatamaskiner er venta å påverke samfunnet på fleire ulike vis, burde alle — ikkje berre profesjonelle innan kvantefeltet — ha ei viss forståing for mogelegheitene og utfordringane som ligg føre oss. Denne framveksande og potensielt disruptive teknologien kan påverke oss alle, og alle burde vere i stand til å påverke korleis han vil vere med på å forme samfunnet. Dette er ei viktig demokratisk utfordring.

Med dette sagt, burde vi også nemne at idéen om kvantefysikk og kvanteteknologi ikkje er fråverande i samfunnet. Av og til blir det løfta fram som noko avansert og mystisk, noko vi ikkje forstår. Dei med kjennskap til kvanteteknologi har eit spesielt ansvar for å formidle innsikter om kva kvanterekning er og kva det ikkje er, kva er *hype* og kva er ekte. Breiare utdanningsprogram og større kvantemedvit vil vere den viktigaste motgifta mot denne hypen, ei motgift som dempar urimelege forventningar utan at folk av den grunn blir mindre nyfikne og fasinerte i møte med kvanteverda.

“ Denne teknologien fører til ei viktig demokratisk utfordring

# 3

## Forsking og utvikling

### Anbefalingar

#### Ein norsk strategi for kvanterekning bør

- utnytte det store momentet i kvanterekning rundt om i verda, inkludert i Norden og Europa, og støtte internasjonalt forskingssamarbeid;
- støtte utviklinga av pålitelege applikasjonar som bruker kvanterekning på reelle problem ved å prioritere programvarerelatert forskning, inkludert *software engineering*, kvantealgoritmar, kvanteinformasjonsteori og teknikkar for korreksjon og demping av feil (*quantum error correction and mitigation*);
- bidra til at kvanterekning blir raskare tatt i bruk ved å prioritere forskning som gjer det mogleg å bruke NISQ-maskiner til å løyse reelle problem;
- støtte grunnforskning knytta til utvikling av kvantedatamaskiner basert på andre teknologiar enn dei som er godt dekte av samarbeidsland;
- utvikle høg kompetanse og solid teknologisk grunnlag for å kunne ta vare på datatryggleik og personvern i ein kvanteinformatisk tidsalder;
- støtte tverrfagleg forskning og utvikling som tek for seg etiske og samfunnsmessige sider ved kvanterekning.

I følgje ein analyse som selskapet Querca Ltd. har gjort, har minst 33 milliardar euro blitt investert i kvanteteknologi totalt i verda innan utgangen av 2022 [3]. Størstedelen av desse investeringane har blitt brukt til å utvikle kvantemaskinvare, noko som er nødvendig for å realisere visjonen om å bygge ein kvantedatamaskin og å ta alle

dei nødvendige stega på vegen dit. Noreg ligg langt etter i det globale maskinvarekappløpet, og det verkar lite sannsynleg at vi som nasjon vil kunne spele noko viktig rolle på dette området i overskødeleg framtid. Dette handlar ikkje berre om tidspunktet, men også om dei enorme kostnadane det krev å drive nybrottsarbeid innan forskning og utvikling på dette området.

Ut frå eit strategisk perspektiv er Noreg best tent med å sjå til at framtidige investeringar innan kvanterekning bidrar til å skape verdier i sam-

band med maskinvareløysingar som alt blir utvikla andre stader (for eksempel gjennom nordiske partnerar, Quantum Delta NL, eller German Quantum Computing Initiative), og gjennom at vi sikrar oss tilgang til slike system via godt finansierede internasjonale forskings- og utviklingssamarbeid. Dei aller fleste som kom med innspel til den opne høyringa vi inviterte til under utarbeidinga av dette dokumentet, har, uavhengig av oss og kvarandre, gitt tydeleg uttrykk for at dei støttar dette synet.

I Europa står programma EuroHPC Joint Undertaking og Digital Europe fram som viktige og relevante instrument der Noreg alt er involvert. For at Noreg skal kunne vere med i kvantereknings-revolusjonen, er det avgjerande at vi fortset å vere involvert i desse og framtidige relevante program. Slik deltaking har som føresetnad at Noreg som nasjon leverer dei økonomiske bidraga som er venta av oss, og som slikt samarbeid baserer seg på. I tillegg bør Noreg vurdere å støtte grunnforskninga som trengs for å utvikle kvantedatamaskiner basert på andre teknologiske løysingar enn dei som blir forska på av internasjonale samarbeidspartnerar, særleg i dei tilfella der norske forskingsgrupper eller selskap har leiande posisjonar. Der finst, til dømes, sterke forskingsgrupper med ekspertise på maskinvareteori ved Universitetet i Oslo (UiO), Norges tekniske og naturvitenskapelige universitet (NTNU) og ved Universitetet i Sørøst-Norge (USN).

**Vurderte forskingsområde.** Forsking på kvanterekning inkluderer vitenskap, teknologi og samfunnsmessige sider, i tillegg til sider relatert til utdanning som vi diskuterte i kapittel 2. Ut frå presentasjonane og diskusjonane på QCNorway, meiner vi at dei vitenskaplege, teknologiske og samfunnsmessige forskingsfeltene vi diskuterer nedanfor er spesielt relevante. Ut frå det vi kjenner til av det norske forskingslandskapet, meiner vi at det norske forskingsmiljøet er i stand til å komme med betydelege bidrag på desse områda.

Det bør presiserast at vår analyse er avgrensa til kvanterekning. Sjølvstøtt er det mange andre relevante forskingsområde i den større konteksten som kvanteteknologi utgjør — område der norske forskingsgrupper er i stand til bidra på eit høgt internasjonalt nivå. Desse områda, som også burde vere ein del ein nasjonal kvantestrategi, er ikkje ein del av tematikken vi har avgrensa oss til i dette innspelsdokumentet.

“ “ Noreg ligg langt etter i det globale maskinvarekappløpet

Andre grupper i det norske kvantemiljøet er betre i stand til å komme med innspel til norsk prioriteringar for desse faglege områda.

## Eit handlingsrom for kvanteprogramvare

Etter fleire år med forskning dominert av maskinvareutvikling er det aukande uro i det internasjonale kvanterekningstiljøet for at programvareutviklinga hamnar i bakleksa. Vi ser at denne diskusjonen går også i Europa, og det er venta at komande arbeidsprogram for relevante europeiske forskingsinitiativ vil adressere dette gapet. Den finske kvanteagendaen, som nyleg blei publisert, seier eksplisitt at “the role of software is crucial in quantum computing, as the hardware alone computes nothing.” [16, s. 7].

Kvantedatamaskiner er fundamentalt forskjellige frå tradisjonelle datamaskiner, og dei er avhengige av ei heilt anna tilnærming til programmering. Difor treng vi også ein heilt annan måte å tenkje på og ei heilt anna verktøykasse for å utvikle programvare for slike maskiner. Dette gjeld ikkje berre måten vi utformer og implementerer algoritmar på, det gjeld også *software engineering*-sider som, til dømes, programvarearkitektur og -abstraksjonar, testing, *debugging*, drift og evolusjon av kvanteprogramvare.

Eit auka fokus på kvanteprogramvare samsvarar godt med det faktum at Noreg alt har ei imponerende og rik historie når det gjeld forskning innan programvareutvikling. Det viktigaste eksempelet her er oppfinninga og utviklinga av programmeringsspråket Simula, som Ole-Johan Dahl og Kristen Nygaard ved *Norsk regnesentral* stod for i 1960-åra. Dette språket la grunnlaget for objektorientert programmering (OOP) [22]. I dag er OOP det dominerande paradigmet for moderne programvareutvikling. Ei rekkje moderne programmeringsspråk har ei klar linje tilbake til Simula-språket, 60 år etter at det blei til. Med inspirasjon frå denne bragda har Noreg fostra fleire sterke forskingsgrupper innan informasjonsteknologi og berekningsorientert forskning.

For eksempel har Simula Research Laboratory, i tillegg til å drive internasjonalt leiande forskning innan *software engineering*, tung kompetanse på

bruk av heterogene system for tungrekning. Dette inkluderer fleire år som vertskap for den nasjonale infrastrukturen for eksperimentell tungrekning, eX3, som tilbyr ei mangfaldig samling av prosessortypar og -modellar (ulike CPU-ar, GPU-ar, FPGA-ar og prosessorar som er utforma spesielt for djup maskinlærning, i tillegg til såkalla nevroforme prosessorar, ulike kommunikasjonsteknologiar, minnesystem, osv.). Denne kompetansen blir komplementert av SINTEF, som har gjort gjennombrotsforskning innan det å bruke grafiske prosessorar (GPU-ar) til generelle berekningar. Dette har dei gjort ved å utnytte det ibuande høvet for parallellisering — før sli-

“ “ Noreg kan ta ein leiande posisjon innan utvikling av nye typar kvantealgoritmar og kvanteprogramvare

ke programmeringsmodellar blei vanlege. Det finst også sterke forskingsgrupper innan desse områda ved fleire norske universitet. Alt i alt har Noreg eit svært godt grunnlag for å ta ein leiande posisjon innan utvikling av nye typar algoritmar og programvareløysingar for kvantedatamaskiner. Om vi lukkast i å ta ein slik posisjon, kan Noreg tilby ekspertise innan algoritmar og programvare til samarbeidspartnarar som bygger og tilbyr maskinvareløysingar. Dette vil stimulere eit sterkt og gjensidig samarbeid.

**Kvanteprogramvare-stacken.** I motsetnad til det høge abstraksjonsnivået som blir brukt innan klassisk berekning og programmering, er dagens paradigme for kvanteprogrammering sentrert rundt spesifikasjon av lågnivå kretsar som instruerer kvantedatamaskina om kva ho skal gjere. Dette abstraksjonsnivået kan, konseptuelt, samanliknast med korleis dei aller første elektroniske, digitale maskinene for generell bruk frå slutten av 1940-talet blei instruerte. På desse maskinene konstruerte ein fysiske kretsar ved å kople kablar til ei koplingstavle [23]. For å kunne utvikle ein kraftfull kvanteprogramvare-*stack* som grunnlag for å skape pålitelege applikasjonar i ein industriell samanheng, er det naudsynt med store forskingsmessige framsteg innan kvanteprogramvare-utvikling.

Forskning som skal legge grunnlaget for å utvikle ein programvare-*stack* for industrien bør sikte mot vitskapelege gjennombrøtt på fleire teknologiske abstraksjonsnivå, slik som utvikling av kvantealgoritmar, høgnivå programmeringsspråk, kompilatorar, kodeoversettarar, *debuggers*, kvantedatamaskin-simulatorar og kvanteoperativsystem — i tillegg til fleire andre støtteområde. Eksempel på slike støtteområde kan vere kvanteinformasjonsteori, kvantefeilkorrigering, kvantefeildemping (*mitigation*), og feiltolerante strukturar. Noreg har relevant kompetanse til å kunne bidra betydeleg til internasjonal forskning innan alle laga av denne *stacken* av kvanteprogramvare. Eit eksempel kan vere det å skape effektive kvantekompilatorar, eit anna mogleg norsk satsingsområde kan vere det å konstruere kvanteoperativsystem som utnyttar kvanteressursar på ein effektiv måte. I alle høve vil forskning innan dei nedste laga av *stacken*, som det å bygge eit operativsystem eller ein kompilator, krevje tett samarbeid med forskingsgrupper som jobbar med kvantemaskevare. Noreg står i ein gunstig posisjon for å utforske slike samarbeid i Norden, Europa og verda elles. Det føregår, eksempelvis, imponerende arbeid i nabolanda våre retta mot å bygge kvantedatamaskiner med eigenskapar heilt i frontlinja, spesielt ved IQM og VTT i Finland [24], Chalmers tekniska högskola [25], Universitetet i København og ved Niels Bohr-instituttet i Danmark [26, 27] — og innan økosystema rundt desse organisasjonane.

“ Noreg står i ein gunstig posisjon for å utforske slike samarbeid i Norden, Europa og verda elles

Som deltakar i EuroHPC-samarbeidet har Noreg eit godt utgangspunkt for å kunne bidra innan leiande europeiske initiativ. Eit eksempel er prosjektet LUMI-Q som skal bygge ein av dei seks første europeiske kvantedatamaskinene [28]. Dette prosjektet har eit solid norsk fotavtrykk ved at Simula, SINTEF og Sigma2 er partnerar i dette konsortiet. For å kunne gjennomføre eit slikt forskings- og utviklingssamarbeid, trengs finansiering retta spesifikt mot dette — med mål både om å styrke det nordiske samarbeidet og å oppfylle forventingane når det gjeld nasjonale bidrag til EuroHPC og Digital Europe.

**Kvante-*software engineering*.** Eitt av dei områda der norske forskarar har vist internasjonal klasse innan informasjonsteknologi er *software engineering*. Ut frå dette klassiske utgangspunktet, har norske forskarar vore avgjerande når det gjeld å etablere *quantum software engineering* som eit nytt, internasjonalt forskingsfelt. Noreg har difor gode føresetnadar for å levere eineståande forskning som kan føre til nye paradigme, metodar, teoriar, og verktøy for korleis ein kan etablere god praksis for å utvikle korrekte og pålitelege applikasjonar for kvantedatamaskiner. Slik forskning dekkjer mange ulike sider, slik som (1) modellering og analyse, for eksempel innan generering og verifisering av kode; (2) kvanteprogrameringsparadigme, for eksempel teoriar og abstraksjonar; (3) tekniske og metodemessige fundament for kvalitetskontroll av kvanteprogramvare, inkludert testing, *debugging* og reparasjon av applikasjonar.

Eitt anna område innan programvareutvikling der Norge har bidratt betydeleg er *software dependability*, påliteleg programvare, eit fagfelt som har som mål å sikre at applikasjonar er korrekte, robuste og trygge, i tillegg til andre sider som gjer at brukaren kan stole på programvara. Det tidlegare senteret for forskingsdrive innovasjon (SFI) Certus<sup>1</sup> fokuserte på *software verification and validation* i ein industriell samanheng. Certus bidrog til stor framgang innan programvare-pålitelegheit, både vitenskapleg og i form av innovasjonar. Desse erfaringane tilseier at arbeidet med påliteleg kvanteprogramvare må starte allereie no for at kvanterekning skal bli tatt opp av industrien på ein vellukka måte i framtida. Historisk sett har låg programvarekvalitet gjentatte gonger gjort at vi ikkje kan stole på programvaresystem vi er kritisk avhengige av, noko som ført til store økonomiske tap og fysisk skade. Eksempel på slik skade kan vere feildosering av medisinar, kollaps av romfartøy, eller at bremsesystema i bilar bryt saman [30]. Det er venta at kvantedatamaskiner vil kunne løyse fleire komplekse problemtypar som er kritisk viktige innan næringsliv og samfunnet generelt. Vi må difor sette ekstreme krav til pålitelegheit, noko som vil vere vanskeleg å få til på grunn av den høgst

“ “ Kvanterekning vil sette ekstreme krav til pålitelegheit

<sup>1</sup>Simula Research Laboratory var vertskap for *the Certus Centre for Software Validation* frå 2011 til 2019, sjå [29].



ikkje-konvensjonelle måten slike maskiner verkar på. Enkelt sagt, viss vi hadde tilgang til den mest kraftfulle kvantedatamaskina og vi lukkast i implementere løysinga av eit veldig komplekst problem på denne, ville vi ikkje kunne stole på denne applikasjonen med mindre vi kan sikre oss at han er påliteleg. Viss vi ikkje kan stole på applikasjonen, vil denne implementeringa ha liten verdi. Difor er det avgjerande at forskinga innan pålitelegheit til kvanteprogramvare blir prioritert no, før kvanterekning blir tekne i bruk av industrien og konsekvensane av programvarefeil blir uopprettelege.

**Integrasjon av kvantedatamaskiner og klassiske maskiner.** I dag skjer tilgangen til kvantedatamaskiner vanlegvis via spesialiserte laboratorium, som på Chalmers [25] eller VTT [24], eller via skytenester levert av internasjonale gigantar som IBM, Azure, AWS og Google eller selskap som D-Wave, QuTech, PASQAL og Rigetti som alle spesialiserer seg på kvanterekning. Samtidig er det stor framgang med å innlemme kvantemaskinvare i eksisterande infrastrukturar for tungrekning (HPC). LUMI-Q prosjektet nemnd over, samt fem andre EuroHPC-finansierte prosjekt, er i ferd med å starte bygginga av seks europeiske kvantedatamaskiner. Alle desse vil bli inkorporerte i eksisterande tungreknesystem, og i visse tilfelle som ein nettverksressurs som kan brukast på tvers av landegrenser<sup>2</sup>.

Når ei kvantedatamaskin blir installert i eit tungreknemiljø, kan ho fungere som ein eigen ressurs så vel som ein akselerator i samspel med konvensjonelle prosessorar. I det siste tilfellet, på same måte som vi i eit vanleg tungreknesystem brukar GPU-ar for å ta seg av visse delar av jobben, vil algoritmen bruke vanlege prosessorar for visse deloppgåver og kvantedatamaskina for andre. Svara frå dei ulike deloppgåvene blir så sett saman til ei komplett løysing. Sidan kvantedatamaskiner vil kunne gjere visse oppgåver ekstremt effektivt medan tradisjonelle prosessorar vil fortsette å løyse andre typar jobbar på ein betre måte, er det grunn til å vente seg kraftige, hybride system. I ein slik samanheng treng ikkje kvanteprosessoren vere ei komplett kvantedatamaskin; det kan vere snakk om kvantekomponentar, som for eksempel eit kretskort med ein kvante-*annealer* som er laga for spesifikke algoritmar innan optimering. Dette eksempelet på ei hybrid kvanteakselerert løysing ligg nært opp til måten vi brukar GPU- eller FPGA-akselererte løysingar i dag.

Uavhengig av korleis ein innlemmar kvanteprosessorar i eit tradisjonelt system vil ei slik integrering skape utfordringar når det gjeld programvare. Korleis bør al-

“ Kvanterekning kombinert med klassisk tungrekning i hybride system er venta å bli kraftfullt

<sup>2</sup>Som ein sidekommentar kan vi nemne at eit av dei aller første grensekryssande sambanda mellom klassiske tungreknere ressursar og ein kvantedatamaskin blei vist fram på QCNorway av Axel Andersson [31]. Han demonstrerte i sanntid koplinga mellom den norske infrastrukturen for eksperimentell tungrekning (eX3) hjå Simula i Oslo og kvantedatamaskina QAL 9000 på Chalmers tekniske universitet i Göteborg [25].



goritmane bli utforma eller delt opp for å kunne utnytte kvanteressursane fullt ut? Kva type programvareabstraksjonar og -bibliotek trengs for å at slike hybride løysingar skal gjere nytte for seg og vere i stand til å levere pålitelege applikasjonar? Korleis kan data bli overført mellom maskinressursane raskt nok til at kvanteprosesoren ikkje blir ståande ledig? Korleis kan ein feilsøkje slike hybride applikasjonar utan at det går ut over utrekna resultata? Lista over relevante spørsmål er lang, og ho fører med seg ei lang rekkje forskingsmessige utfordringar.

## Bruk av støyfulle, mellomstore kvantedatamaskiner

Dagens kvantedatamaskiner er relativt små når det gjeld antal kvantebitar<sup>3</sup>, eller *qubits* som det heiter på engelsk. Frå naturen si side er *qubits* svært sårbare for feil og vanskelege å kontrollere. Difor er kvantedatamaskiner ustabile, komplekse system med langt høgare feilrater enn det tradisjonelle datamaskiner har. På grunn av slike avgrensingar i prosessor-kapasiteten kan ikkje dagens kvantedatamaskiner implementere feilkorrigering i stor nok grad.

Trass i at næringsliv og media nærar ein overoptimisme på dette feltet, er ei meir måtehalden erkjenning at vår generasjon må mest truleg leve med støyfulle, mellomstore kvantedatamaskiner (*Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) computers*) [32]. Så langt har dei fleste eksisterande algoritmane blitt utvikla med ein ideell, fullstendig koherent kvantedatamaskin i tankane. Difor er det nødvendig å styrke utviklinga av algoritmar, og kvanteberekningsmessige løysingar generelt, som tillet kontrollerbare, skalerbare implementeringar på NISQ-plattformar vi har i dag — og i nær framtid.

“ Det er fruktbart å legge vekt på utvikling av nye, feiltolerante kvantemetodar

**Ei praktisk tilnærming til NISQ-maskiner.** Sjølv om det er vanskeleg å spå, verkar det rimeleg å gå ut frå at vi neppe vil sjå store, støyfrie kvantedatamaskiner i nær framtid. Ei slik erkjenning gjer det naturleg å aktivt utforske den vitskaplege og den kommersielle nytten vi kanskje kan å ha av NISQ-maskiner i nær framtid:

Kan vi gjere nyttige og verdifulle berekningar med dagens NISQ-maskiner?

Er det mogleg å vise, på ein detaljert måte, at visse relevante problem frå den verkelege verda kan adresserast med slike datamaskiner?

Algoritmar som toler ein viss grad av støy vil vere langt meir interessante og nyttige enn metodar som krev mange, ideelle støyfrie *qubits*. I eit slikt perspektiv er det fruktbart å legge vekt på utvikling av nye, feiltolerante kvantemetodar —

<sup>3</sup>IBM avduka ein kvanteprosessor med 433 *qubits* i november, 2022.

metodar som vil vere nyttige både i ein NISQ-samanheng og med potensielt feilfrie kvantedatamaskiner i framtida.

Slikt utviklingsarbeid treng teoretiske undersøkingar. Men *empiriske undersøkingar* er også viktige, spesielt med tanke på at slike tilnærmingar ofte er heuristiske i utgangspunktet. Sjølv om vi ikkje alltid vil kunne *bevise* rigorøst nokon kvantefordel for algoritmar tilpassa NISQ-maskiner i ein generell samanheng, vil slike metodar likevel kunne tenkjast å løyse problem på ein meir effektiv måte enn metodar som køyrer på klassiske, konvensjonelle maskiner. Ved å analysere yteevna til slike metodar på eksisterande kvantemaskinvare, vil vi ikkje berre vere i stand til å undersøke effektiviteten når det gjeld kva for nokre rekneressursar som trengst, men også når det gjeld energiforbruk.

Ein kvante-*annealer* — eller kvante*herdar* — er ein kvanteprosessor spesialbygd for å løyse optimeringsproblem. Slike prosessorar er mindre sårbare for feil enn meir universelle kvantedatamaskiner som baserer seg på sekvensar av *portar*, eller *gates* som det heiter på engelsk. Innanfor det svært nyttige, men avgrensa, bruksområdet optimering er kvante-*annealers* eit svært tiltalende alternativ til portbaserte NISQ-datamaskiner. Dette skuldast at dei er meir stabile, noko som i sin tur gjer at *annealer*-baserte system kan skalerast opp til et betydeleg antal *qubits*. Ein manifestasjon på dette er plattformen D-Wave Advantage, som kan tilby meir enn 5000 *qubits* [33]. På den andre sida er dette ei tilnærming som ikkje utan vidare kan brukast til å løyse andre typar problem.

Like fullt har kvante-*annealers* vist seg nyttige i samarbeidsprosjektet OsloMet har med kollektivtransport-selskapet Ruter. I dette prosjektet blei ein kvantealgoritme for kunstig intelligens (KI), QBoost [34], implementert på plattformen D-Wave Advantage for å predikere passasjerkapasiteten på ulike busslinjer. Denne implementasjonen har gjort bruk av faktiske trafikkdata og resultatata er samanlikna og analysert opp mot Ruter si eiga tradisjonelle KI-løysing. Resultata viser at QBoost gir ein auke på omtrent 1% betre presisjon i prediksjonane, og kvaliteten på prediksjonane veks raskare med størrelsen på databasen enn tilfellet er med den klassiske KI-algoritmen.

**Skybasert NISQ-databehandling som forskningslaboratorium.** I staden for å gi seg i kast med den pågåande kampen mot støy og dekoherens i NISQ-maskiner, kan vi tenkje oss å snu det noverande paradigmet og heller utvikle ei tilnærming som bruker slike hinder som ressursar. I ein slik samanheng kan ein sjå på NISQ-prosessorar som *opne kvantesystem*.

I 2022 såg vi de første stega i retning av å bruke teoretiske verktøy frå fagfeltet *opne kvantesystem* på dagens NISQ-maskiner. Forskingsgrupper frå Tyskland, Frankrike, Polen og Sveits bidrog til dette. Vi reknar med at desse forsøka vil føre til nye tilnærmingar for å analysere og utforme *qubit*-baserte NISQ-program. Vi trur at langs vegen fram mot dette målet, vil vi, på ein komplementær måte, kunne utvikle ny metodikk for å simulere opne kvantesystem ved å bruke eksisterande prototypar av kvantedatamaskiner. Dette vil i sin tur kunne bidra til ei ny retning innan eks-

perimentelle studiar av opne kvantesystem. På den måten vil ikkje dagens NISQ-maskiner berre vere mangelfulle forgjengarar for framtidige kvantedatamaskiner; dei vil også vere fleksible plattformar godt eigna til å utforske, simulere og modellere komplekse kvantefenomen. OsloMet bidrar til å realisere denne idéen gjennom å delta i det europeiske prosjektet *DQUANT: A Dissipative Quantum Chaos perspective on Near-Term Quantum Computing*, som er finansiert gjennom QuantERA-programmet [35].

“ Dagens NISQ-maskiner bør ikkje berre sjåast på som mangelfulle forgjengarar for framtidige kvantedatamaskiner

## Tryggleik og personvern

Den berekningsmessige kapasiteten til framtidige kvantedatamaskiner gir oss ikkje berre verdifulle fordelar innan viktige bruksområde, men også utfordringar innan tryggleik og personvern. Tilgang til slik reknekraft vil gjere det mogleg å knekkje kryptografiske algoritmar og metodar som i dag held løyndomar hemmelege — for både enkeltindivid og nasjonar. Alle moderne borgarar er omgitt av kryptografisk beskytta kommunikasjon, anten ein handlar online, sjekkar helsedata, har med offentlege institusjonar som NAV eller likningsvesenet å gjere, sjekkar bankkontoen på mobilen eller “vippsar” pengar til ein ven. Kryptografi er eit heilt grunnleggande verktøy for å sikre personvern og tryggleik i det digitale samfunnet.

**Informasjonstryggleik via kryptering.** Sikker datakommunikasjon gjer bruk av såkalla *digitale nøklar*, ofte på ein asymmetrisk måte. Ved å bruke ein offentlig tilgjengeleg nøkkel, kan kven som helst (ein person eller ei datamaskin) sende krypterte løyndomar til eigaren av denne nøkkelen. Berre den mottakaren som har den motsvarande private nøkkelen vil vere i stand til å dekkryptere meldinga, noko som vernar kommunikasjonen mot avlytting. Ein måte å angripe eit slikt krypteringsskjema på kan vere å prøve å bestemme den private nøkkelen med utgangspunkt i den offentleg kjende nøkkelen. I dei krypteringssystema som blir brukt i dag, som for eksempel RSA, er dette eit problem som ikkje kan løysast med konvensjonelle superdatamaskiner. Derimot vil ein framtidig, tilstrekkeleg stor kvantedatamaskin som køyrer kvantealgoritmar for dette føremålet, klare å knekkje dei asymmetriske kryptosystema som er i bruk i dag.

Som forklart av forskingsdirektør Øyvind Ytrehus ved Simula UiB på QCNorway [36], ser det ut som at kvantedatamaskiner kapable til å truge dagens algoritmar for sikker kommunikasjon kan vere tilgjengelege rundt 2040 — altså mindre enn to tiår frå no. Men denne trusselen er enda meir akutt enn det: ein uvenleg aktør kan samle inn kryptert informasjon allereie i dag for å dekkryptere det seinare når

kraftige nok kvantedatamaskiner blir tilgjengelege. Slike *Store Now, Decrypt Later*-angrep [37], “lagre no, dekrypter seinare”, gjer at kvanteresistente krypteringsløy-singar trengs alt no. Over heile verda blir det lagt ned stor innsats i forskning innan *post-kvante-kryptografi* for å sikre tryggleik og personvern i kvantesamfunnet. Slike kryptografiske metodar er venta å vere sikre sjølv når store, støyfrie og pålitelege kvantedatamaskiner kjem.

“ Framtidige kvantedatamaskiner vil gi oss utfordringar innan tryggleik og personvern

**Post-kvante-kryptografi.** Målet med post-kvante-kryptografi er å konstruere krypteringsalgoritmar som er baserte på underliggande matematisk problem som er svært vanskelege å løyse både på klassiske maskiner og kvantedatamaskiner. Viktige retningar for dette forskinga inkluderer bruk av høgdimensjonale gitter, feilkorrigerende kodar og såkalla isogeni-baserte metodar som det matematiske grunnlaget. Standardiseringsarbeidet som blir gjort av NIST, regjeringa i USA sitt standardiseringsbyrå, står sentralt i denne utviklinga. Som ein del av denne prosessen har forskarar i heile verda blitt utfordra til å føreslå nye matematiske grunnlag for kryptering med offentleg nøkkel og for digital signering. Dei føreslåtte algoritmekandidatane blir så analyserte av forskingsmiljøa, som aktivt prøver å knekkje dei. NIST håpar å kunne publisere ein ny standard om to år.

Der er ei rekkje forskingsgrupper som jobbar med datatryggleik i Noreg, og enkelte av desse fokuserer spesifikt på post-kvante-kryptografi. Simula si eining for kryptografi og informasjonstryggleik, Simula UiB, er aktiv innan dette arbeidet. Dei deltek mellom anna i eit internasjonalt lag av forskarar som har sendt inne ein kodebasert krypteringsalgoritme til NIST. Denne algoritmen er ein kandidat for den fjerde runden i vurderinga om kva som skal bli den nye NIST-standard. Simula UiB har fleire forskingsaktivitetar gåande innan ulike sider av kvantesikker kryptografi, delfinansiert av Norges forskingsråd.

Det meste av arbeidet innan post-kvante-kryptografi blir gjort på ein open og transparent måte — både for å kunne teste så tidleg som mogleg kor robuste dei nye metodane er, og for å kunne sikre at demokratiske prinsipp er ivaretatt best mogleg. Den føreståande standardiseringa av post-kvante-kryptografiske algoritmar vil bli følgt opp av eit enormt arbeid når krypteringsinfrastrukturen skal oppgraderast med dei valde algoritmane. Dette globale migrasjonsarbeidet vil føre med seg mange store utfordringar, og det er rimeleg å gå ut frå at dette vil ta fleire år. For å kunne ivareta interessene til landet og folket, er det svært viktig at Noreg bygger opp kompetansen og teknologien som er nødvendig for å vurdere, bruke og implementere kvanteresistente kryptografiske mekanismar.

## Etiske og samfunnsmessige følgjer av kvanterekning

Parallelt med vitskapleg og teknologisk utviklingsarbeid innan kvanterekning, må ein også vurdere dei etiske og samfunnsmessige sidene. I tråd med det vi diskuterte over, er dette i stor grad relatert til korleis reknekrafta og moglegheitene som kvantedatamaskiner gir vil kunne påverke tryggleik og personvern. Det bør også leggst merke til at mange av bruksområda som er venta å påverke utviklinga av kvanterekning, spesielt dei som er knytt til næringslivet, har potensial til å påverke samfunnet kritisk, til og med på individnivå. Slike bruksområde inkluderer mellom anna detaljerte DNA-analyser, design og utvikling av nye medisinar, finans og kunstig intelligens. Verda har alt sett kor vanskeleg det er for lovverk og regulering å halde tritt med utviklinga og implementeringa av avansert maskinlæring og algoritmar innan kunstig intelligens. Om vi tek i betraktning den eineståande reknekrafta som framtidens kvantedatamaskiner vil ha, og det faktum at teknologien vil kunne legge grunnen for heilt nye bruksområde og dermed føre til etiske utfordringar vi ikkje har sett tidlegare, er det absolutt ikkje noko tid å miste.

Den måten maskinlæring har gjort det mogleg å utforske enorme mengder data på i dag, samt utviklinga av stadig meir autonome system, har gitt næring til ei veksande uro når det gjeld kven som kontrollerer slik teknologi og slike algoritmar. Sidan slike teknologiar kan få enorme konsekvensar, både på samfunns- og individnivå, må folk vere i stand til å forstå moglegheitene og konsekvensane, på godt og vondt, og kunne ta eigne, informerte val. Desse demokratiske sidene, som bør overførast direkte til kvanterekning, er nært knytt til etikk, tryggleik, personvern og lovverk. Som påpeikt i [38], er ikkje den noverande innsatsen tilstrekkeleg på dette området.

Noreg har både tradisjon for og ekspertise innan samfunnsforskning av høg kvalitet, i tillegg til å vere ein leiande nasjon innan demokratisering. Dette, saman med det vitskapelege grunnlaget for solid kvanteforskning, er tungtvegande argument for at ein norsk kvantestrategi bør inkludere tverrfaglege initiativ som fører saman vitskapleg forskning, teknologisk utviklingsarbeid og samfunnsforskning.

“ “ Somme bruksområde vil føre til etiske utfordringar vi ikkje har sett tidlegare

# 4

## Innovasjon og næringsliv

### Anbefalinger

#### Ein norsk strategi for kvanterekning bør

- kartlegge kva for nokre norske næringsområde som kan ha stor nytte av kvanterekning og identifisere områda som står i fremste rekkje;
- identifisere norske selskap og forskingsinstitusjonar med ekspertise i verdsklasse for kvantereknings-*stacken* og tilhøyrande verdikjede;
- stimulere samarbeid mellom academia, forskingsinstitusjonar, industri og offentleg sektor for å styrke innovasjon basert på kvanterekning;
- prioritere etter- og vidareutdanning innan kvanteteknologi slik at den eksisterande arbeidsstyrken kan dra nytte av kvanterekning;
- styrke konkurransevna til norske selskap gjennom å støtte innovativ utvikling av kvanterelaterte produkt og tenester;
- gjere oss i stand til å verne norske interesser, både i privat og offentleg sektor, frå kvantebaserte angrep på tryggleiken.

Forventingane til kva kvanterekning faktisk er i stand til, og kor raskt kraftige og brukbare kvanteløysingar vil nå marknaden, har ein tendens til bli framstilt på ein noko overoptimistisk måte av dei som jobbar med marknadsføring. Med det sagt, bør det også leggest til at dersom vi møter teknologien på ein litt tolmogig og nøktern måte, kan vi vente oss endringar som kan ha enorme konsekvensar for industri og næringsliv.

Internasjonalt er det ofte dei same kandidatane som blir trekt fram som eksempel på næringsområde med ekstra stort potensial for effektiv nytte av kvanterekning.

Slike område inkluderer farmasi og livsvitskap, design og konstruksjon, industrielle produksjonsprosessar, energi, finans og logistikk. I dei fleste av desse døma vil nytteverdien vere avhengig av at ein lukkast i å løyse eit komplisert problem eller at ein kan sette gjentakande optimeringsproblem bort til ein kvantekomponent. Applikasjonen kan også tenkjast å løyse andre typar problem ved å formulere dei om til optimeringsproblem.

I farmasøytisk industri, for eksempel, er det å utvikle nye legemiddel ein kompleks prosess som krev analyse av enorme mengder data. Kvanterekning kan vere i stand til å få slike prosessar til å gå vesentleg raskare, for eksempel ved å simulere måten molekyl oppfører seg på og ved å predikere korleis dei vekselverkar med andre molekyl. På den måten kan ein med ei kvantedatamaskin akselerere dei grunnleggande operasjonane innan design av legemiddel.

Finansinstitusjonar handterer også enorme mengder data, der raske og nøyaktige analysar er avgjerande for å kunne ta gode, opplyste val. Kvanterekning kan tenkjast å tilby reknekrafta som trengst for å kunne analysere store datasett på ein effektiv måte og oppdage mønster og trendar som er vanskeleg å finne med klassiske metodar. Dette kan leie til betre investeringsstrategiar, betre handtering av risiko, og oppdaging av svindelforsøk.

For produksjonsprosessar og logistikk kan ein sjå for seg at kvantealgoritmar blir brukt til å optimere leveringskjeda og betre trafikkflyten. Når det gjeld energi-produksjon, som er spesielt relevant for Noreg, kan kvanterekning bli brukt til å optimere ressursutnyttinga innanfor dei tekniske, juridiske og marknadsstyrte rammene, til dømes optimering av produksjonsratar for petroleum, vasskraft og vindenergi. Ein kan også sjå føre seg detaljert modellering av fysiske og kjemiske prosessar, til dømes innan foredling av hydrokarbonar eller når ein utformar neste generasjon høgkapasitetsbatteri.

**Opptak av kvanterekning i Noreg.** Store delar av norsk næringsliv er i dag avhengige av teknologi som vil kunne gjere seg nytte av kvanterekning — til dømes innan sektorar som olje og gass, maritime næringar og akvakultur. Vi ser alt no eksempel på samarbeid mellom forskingsgrupper og industri, samt offentleg sektor, som undersøker potensialet innan kvantealgoritmar. For å gi nokre eksempel: Kollektivtransportelskapet Ruter samarbeider med OsloMet om å bruke kvantealgoritmar for å predikere

passasjerkapasiteten på bussane deira [39]. SINTEF koordinerer eit samarbeidsprosjekt med fleire leiande norske selskap, Kongsberg Maritime, DNB og Equinor, med mål om å bygge kvanteoptimeringsalgoritmar på industriell skala [40, 41]. Forskarar frå OsloMet og UiO prøver å finne ut av kva potensial kvanterekning har

“ “ Store delar av norsk næringsliv er i dag avhengige av teknologi som vil kunne gjere seg nytte av kvanterekning

for å optimere personleg kreftbehandling, medan Simula og Kreftregisteret saman undersøker om kvantealgoritmar for kunstig intelligens kan vere ein presis metode for å oppdage brystkreft frå mammografibilete.

Skal ein skissere ein nasjonal kvantestrategi, vil eit viktig steg vere å identifisere kva for nokre norske næringsområde som har mest å vinne på kvanterekning, både med tanke på dei berekningsmessige problema som skal løysast og tilgangen på kompetent personale og utstyr. Ut frå erfaringane til dei som ligg lengst framme i løypa, kan ein vente at fleire sektorar og selskap blir involverte i tida som kjem.

“ Få potensielle brukarar interesserte og involverte så tidleg som mogleg

For å få til eit vellukka norsk opptak av kvanterekning, og kvanteteknologi generelt, er det svært viktig å få potensielle brukarar interesserte og involverte så tidleg som mogleg. Ei slik involvering kan ikkje vere avgrensa til overordna tilbakemeldingar, dei bør heller oppfordrast til sjølve å bli direkte involverte med teknologien. Sjølv om utvikling av kvantemaskinvare er viktig i samband med europeisk sjølvbestemming, vil den viktigaste økonomiske drivaren vere *bruken* av kvanterekning.

**Tilgong til og utvikling av tverrfagleg ekspertise.** Kvanterekning og kvantedatabehandling skil seg fundamentalt frå tradisjonell informasjons- og kommunikasjonsteknologi, og krev ei anna tilnærming til problemløysing. For å kunne ta opp i seg kvantereknings-teknologi på ein effektiv måte, må industrien klare å kombinere sin eigen spesifikke kompetanse med relevant kvanteekspertise gjennom partnerskap med academia, forskingsinstitusjonar og dei som leverer teknologien. I tillegg er industrien nøydd til å investere i å bygge opp sin eigen kompetanse internt, både ved å etterutdanne arbeidsstyrken og ved strategisk rekruttering.

Etter- og vidareutdanning, inkludert aktiv deltaking på industrirelaterte konferansar og liknande, bør komplementerast av at arbeidsmiljøet legg til rette for eksperimentering og innovasjon ved å sette av ressursar til forskings- og utviklingsarbeid. Dette kan til dømes vere å sette opp eit eige kvanterekningsteam eller å inngå partnerskap med eksterne ekspertar for å kunne samarbeide om konkrete prosjekt. Slike grep kan bidra til å gjere organisasjonar i stand til å ta ut potensialet innan kvanterekning og til å unngå å måtte betale den høge prisen det vil innebere å dette av lasset i ein tidleg fase. Det bør altså vere eit viktig mål for ein norsk kvantestrategi å etablere eit forståeleg og tilgjengeleg forskingsbasert innovasjonsprogram — eit program som vil gjere norsk industri, offentleg sektor, academia og forskingsinstitusjonar i stand til å skape nye kvantereknings-applikasjonar saman. Dette er nødvendig for å kunne legge til rette for eit tilstrekkeleg stort volum og moment i dette sektoroverskridande, tverrfaglege forskings- og utviklingsarbeidet. Det alle-reie eksisterande programmet *Senter for forskningsdrevet innovasjon* (SFI) har vist



seg å vere ein effektivt reiskap for å få i stand slike kollektive tiltak, og ein bør vurdere det som eit mogleg instrument for å etablere nasjonale fyrårn for effektivt opptak av kvanterekning i Noreg.

**Auke av kompetansen i arbeidsstyrken.** Som vi har vore inne på i kapittel 2, er kvanterekning ein gryande teknologi der vi alt ser eit underskott på kvalifisert arbeidskraft. Sidan dette også er svært kompleks teknologi, tek det tid å bli dyktig, sjølv på eit meir konseptuelt nivå. Difor kan ein ikkje gjere seg avhengig av berre å rekruttere kompetente fagfolk utanfrå — det er like viktig å utvikle program mynta på å auke kompetansen til dei talenta som alt finst i arbeidsstyrken. Etter- og vidareutdanning retta mot tilsette bør ha som mål å utvikle ei vid forståing av kva kvanterekning er — både når det gjeld teoretiske sider og praktisk bruk. Slike utdanningsgrep innan industri og offentleg sektor bør balanserast nøye opp mot utviklinga som skjer i universiteta sine program for kvanterekning — og den generelle auken innan kvantemedvitet i samfunnet. Opplæring som del av jobben bør føregå innanfor rammene til det tverrfaglege samarbeidet mellom ulike sektorar som vi var inne på over. Spesifikt bør ein nyttiggjere seg erfaringane som har blitt gjort ved universitet og forskingsinstitusjonar som er tungt involverte i utdanning på bachelor-, master- og PhD-nivå.

Finansiering av program for utdanning og vidareutdanning i kvanterekning vil vere nødvendig, og dette bør adresserast i ein nasjonal kvantestrategi. Det vil vere naturleg å basere eit slikt initiativ på utvalde erfaringar frå programmet *Senter for fremragende undervisning* (SFU). Men det er avgjerande at eit slikt kvanterekningsinitiativ involverer heile spekteret av interessentar frå akademia og forskingsinstitusjonar til industri og offentleg sektor, og at initiativet ikkje er avgrensa til universiteta aleine. For å sikre at det blir integrert med organisasjonane som treng denne kompetansen, bør eit slik utdanningsprogram kombinere relevante erfaringar frå både SFU- og SFI-programma.

**Sikring av sensitive data mot angrep frå kvantedatamaskiner.** Som vi var inne på i kapittel 3, vil kvantedatamaskiner utgjere ein betydeleg risiko for organisasjonar som treng å verne sensitive data gjennom kryptering. Framtidige kvantedatamaskiner vil vere i stand til å knekkje nokre av dei viktigaste krypteringsmetodane som vi brukar i dag, noko som i sin tur vil føre til at sensitiv informasjon kan komme på avvegar. Og sjølv om slike krypteringsmetodar er sikre i dag, er det mogleg å fange opp sendt eller lagra chiffterkst (krypterte data) og lagre denne til dess kvantedatamaskinene er sterke nok til å dekkryptere informasjonen. Dette kan sjølv sagt utgjere ein fare, spesielt når sensitiviteten ikkje avtar med tida, som tilfellet er

“ “ Etter- og vidareutdanning bør ha som mål å utvikle ei vid forståing av kva kvanterekning er

med helsedata og visse typar statshemmelegheiter. Difor er det viktig at organisasjonar som har kritiske data og informasjon er proaktive og tek grep alt no for å sikre informasjonstryggleiken når kvanterekning blir vanleg.

Som vi argumenterte for i kapittel 3, vil offentlege investeringar i forskning og utvikling innan post-kvante-kryptografi vere nødvendige. Eit slikt initiativ må også følgjast opp med investeringar og rask implementering av post-kvante-tiltak innan både privat og offentlig sektor. Slike tiltak vil kunne komplementere dagens mønsterpraksis for datatryggleik, slik som å sikre seg at data er krypterte både når dei blir sendt og når dei ligg lagra, ved å avgrense tilgangen til sensitive data og ved å implementere fleir-faktor-autentisering. Berre ved ei samansett tilnærming til datatryggleik som tek omsyn både til tekniske grep og mønsterpraksis kan organisasjonar sikre seg at deira data blir verande sikre i ei kvanteinformasjonsteknologisk tid.

**Internasjonalt industrielt samarbeid.** SINTEF, Simula og Equinor er partnarar i *the European Quantum Industry Consortium (QuIC)*, som har som oppdrag “*to boost the European quantum-technology industry’s competitiveness and economic growth, and bolster value creation across the continent.*” (å auke konkurranseevna og den økonomiske veksten til den europeiske kvanteteknologiske industrien og å styrke verdiskaping over heile kontinentet) [42].

I 2022 blei eit norsk QuIC-avdeling oppretta i samarbeid mellom SINTEF, Simula og Equinor. Deltakinga i slike samanslutningar kan hjelpe norsk industri og norske forskarar med å bygge sterke nettverk innan EU og på den måten bidra til å bygge opp kvantereknings-teknologien. Slike nettverk kan også bidra til å sette oss i ein betre posisjon til å leie eller delta i EU-finansierte prosjekt innan kvanterekning. Derfor er det nødvendig med tilrettelagte ordningar for å støtte norske organisasjonar si deltaking og nettverksbygging innan relevante EU-miljø på kvanterekning.

# 5

## Infrastruktur for kvanterekning

### Anbefalingar

#### Ein norsk strategi for kvanterekning bør

- sikre tilgang til kvantemaskinvare gjennom deltaking i internasjonale konsortium som EuroHPC;
- prioritere kompetansen og sikre ekspertisen som trengst for å utvikle kvantealgoritmar, -programvare og -applikasjonar.

Slik kvanteteknologien ser ut i dag, er det ikkje tilrådeleg å investere i storskala kvantemaskinvare i Noreg for bruk i forskning og offentlege tenester i nær framtid. For slike formål bør tilgang til relevant maskinvare heller sikrast gjennom deltaking i internasjonale konsortium. Samstundes kan det vere føremålstenleg å vurde- re mindre, eksperimentelle installasjonar av maskinvare dersom desse kan utfylle teknologi og system som vi har tilgang til gjennom internasjonalt samarbeid.

Sidan kompetanse og programvare er uunnverlege delar av ein vellukka infra- struktur for databehandling, bør det nasjonale fokuset på kort sikt primært vere å bygge kompetanse og sikre avansert ekspertise innan kvanteprogramvareutvikling. På lengre sikt, når kvantereknings-teknologien er i stand til å vise seg overlegen, kan investeringar i nasjonale system vurderast for å møte nasjonale behov, framleis med internasjonalt samarbeid som ein faktor.

**Situasjonen i dag.** Slik stoda er i dag, kan kvantereknings-teknologien framstå som noko umoden med tanke på å tilby omfattande infrastruktur for berekningar til ei brei gruppe av brukarar. Sagt på ein annan måte er kvantedatamaskiner framleis på dei lågaste nivå av skalaen for *Technology Readiness Levels* [43]. Ei rekkje tekniske implementeringar av kvantedatamaskiner på eit svært grunnleggande nivå konkurrerer om å bli den mest levedyktige løysinga — ei løysing som kan skalerast opp og danne grunnlaget for industrielle produkt. Framleis har ingen teknologi eller arkitektur utmerka seg som det opplagte, naturlege valet. På grunn av denne uvissa, og på grunn av det omfattande forskings- og utviklingsarbeidet som trengst, er investeringskostnadane for stor-skala infrastruktur svært store i dag. Samtidig må Noreg vere klar den dagen kvanterekning har nådd eit meir modent produksjonsnivå. Difor bør den norske tilnærminga, no i startfasen, vere å ta del i internasjonale initiativ for samarbeid med sikte på å byggje infrastruktur — på ein måte som spenner over heile grunnlaget diskutert i tidlegare kapittel. Ein bør følgje utviklinga nøye og vente med store investeringar i nasjonal infrastruktur for kvanterekning til tidspunktet er rett.

“ Noreg må vere klar den dagen kvanterekning har nådd eit meir modent produksjonsnivå ”

**Behovet for internasjonalt og nasjonalt samarbeid.** Som vi har vore inne på i tidlegare kapittel, kan kvanterekning komme til å påverke mange viktige sektorar, inkludert finans, helse og energi. Difor investerer mange land i forskings- og utviklingsarbeid innan kvanterekning. Men det å utvikle slik infrastruktur krev betydelege investeringar, og ein einskild nasjon som Noreg har ikkje utan vidare ressursane og ekspertisen som trengs for å byggje ein eigen, *omfattande* infrastruktur. Difor må ein nasjonal strategi legge vekt på deltaking i internasjonale partnerskap, spesielt i Europa. Dette er nødvendig for å sikre at Noreg har den nødvendige kunnskapen om kvantereknings-infrastrukturane som blir bygde, i tillegg til korleis dei blir drivne og haldne i stand, for å kunne gjere seg nytte av desse verktøya innan område som er viktige for landet. I denne samanhengen bør det også seiast at når det gjeld investeringar i kvantedatamaskinsystem for kritiske funksjonar som nasjonal tryggleik, eller reint kommersielle formål, kan det vere naturleg å resonnerer annleis. Denne type investeringar ligg utanfor tematikken for dette dokumentet.

Internasjonalt samarbeid vil gjere det mogleg å dele ressursar og kunnskap, og det vil gjere det lettare å kome fram til teknologiske standardar og protokollar. Det vil også støtte utviklinga av eit nettverk av senter for kvanterekning og brukarar, noko vil gjere det lettare for forskarar å få tilgang til og bruke kvanterekningsressursar. På same måte vil samarbeid også på nasjonalt nivå vere viktig for å kunne utvikle omfattande støtte rundt kvantereknings-teknologi, for eksempel når det gjeld behova innan forskning og utdanning av nasjonal betydning. Norske kjelder

for finansiering av FoU, forskingsinstitusjonar og norsk industri må samarbeide om etableringa og vedlikehaldet av delte ressursar for kvanterekning, og spesielt vurdere kva som er det rette nivået for nasjonale ressursar sett i lys av internasjonalt samarbeid.

I EU ser vi no ei sterk vilje til å samordne både ressursar og investeringar, og dette vil fortsette å vere ein viktig del av strategien til EuroHPC. EU-utlysingar finansiert av programmet *Digital Europe* vil i mange tilfelle krevje eit visst nasjonalt bidrag, typisk 50%. Det er nødvendig å få på beina ein prosess for å påverke og observere arbeidsprogram som leier fram til slike utlysingar. Ein slik prosess bør vere i tråd med den nasjonale kvantestrategien, og han bør resultere i at midlar blir sette av for at norske miljø aktivt kan ta del i slike europeiske program.

Sjølv om samarbeid med EU er viktig, bør Noreg også vere open for samarbeid på den globale arenaen dersom dette gir oss tilgang til kvantereknings-teknologiar som er overlegne dei europeiske alternativa. Dette kan gjelde høvet til å teste korleis algoritmar skaleres på datamaskiner med fleire *qubits* enn dei som er tilgjengelege i EU, for eksempel.

**Relasjonen til tungrekning.** Klassiske system for tungrekning, det vil seie *high performance computing* (HPC), vil vere viktige integrerte komponentar i ein infrastruktur for kvanterekning. Mange praktiske utfordringar må handterast for å få kvantedatamaskiner til å køyre som separate einingar, som til dømes brukartilgang (autentisering, tilgjengeleggjering, miljø osv.), innlesing og uthenting av data, handtering av arbeidsflyt, allokering av reknetid og handtering av kvanteressursane [44]. Når ein skal møte utfordringane med å integrere og sette saman kvantesystem og klassiske superdatamaskiner, vil ekspertisen og erfaringane ein har gjort seg med tungrekning dei siste 40-50 åra bidra til å gjere dette lettare. Ved å sette kvantesimulatorar og kvantedatamaskiner saman med superdatamaskiner gjennom ein einskapleg sky-tilgang vil ein kunne gi store delar av det vitskaplege miljøet høve til å gjere seg kjend med kvanterekning. Dermed vil også teknologien bli tatt i bruk raskare.

Som vi var inne på i kapittel 3, har ikkje dagens kvantereknings-teknologi gode nok mekanismar for å korrigere feil til å kunne lage stabile system. For å kunne redusere nokre av desse utfordringane kan dagens klassiske ressursar for tungrekning brukast til å etterprosessere og verifisere resultat som er berekna på ei kvantedatamaskin.

Vidare kan klassiske tungreknesystem, til ei viss grad, også brukast til å simulere og teste kvantealgoritmar utan å køyre algoritmane på ein faktisk kvantedatamaskin. På denne måten kan slike system også understøtte utviklinga av kvanteprogramvare. Såleis er det nødvendig å integrere ressursar for tungrekning med kvantedatamaskiner for å kunne få ut det fulle potensialet i denne gryande teknologien.

# Relevante omgrep

- *Dekoherens:*  
Når bølger møtest, vil dei anten forsterke kvarandre og danne ei større bølge, eller dei kan legge seg saman destruktiivt og føre til ei mindre bølge eller komplett kansellering som resultat. Kvanteobjekt har også denne eigenskapen. Men dersom eit kvantesystem ikkje kan isolerast fullstendig frå miljøet rundt, vil denne eigenskapen gradvis gå tapt.
- *Den første/andre kvanterevolusjonen:*  
Når kvanteteorien for materien vart til for om lag hundre år sidan, endra det ikkje berre vitskapen. Det førte også med seg mykje ny teknologi, slik som laserar, transistorar og magnetisk resonans (MR)-teknikken. Dette er det ein kallar *den første kvanterevolusjonen*. Det er ei utbreidd oppfatning at vi no ser byrjinga på ein ny kvanteteknologisk revolusjon som vil disruptivt endre informasjonsteknologien ved å utnytte kvantefenomen innan berekning, metrologi og informasjonsprosessering.
- *Klassisk berekning:*  
Berekningar og databehandling som ikkje er kvanterekning; bruk av vanlege datamaskiner, med andre ord.
- *Kvante-annealer eller kvanteherdar:*  
Dette er ein spesifikk type kvanteprosessor som er spesiallaga for å handtere optimeringsproblem. Dette skjer ved å la kvantesystemet finne konfigurasjonen med minimal energi. Slike prosessorar er mindre sårbare for feil enn meir generelle portbaserte kvanteprosessorar, noko som i sin tur gjer det mogleg å bygge større maskiner. Dei største har no over 5000 kvantebitar, *qubits*.
- *Kvantefysikk:*  
Det teoretiske rammeverket som skildrar mikroverda — altså atom, molekyl, nanostrukturar og partiklar — og korleis dei vekselverkar. Denne måten å skildre naturen på er fundamentalt ulik dei klassiske Newton-lovene for mekanikk, som skildrar makroverda.
- *Kvantemedvit:*  
Evna til å kjenne igjen kvantefenomen og korleis dei kan utnyttast innan teknologi. I denne samanhengen vil ikkje dette nødvendigvis implisere ekspertise-

se når det gjeld tekniske og matematiske sider ved kvantefysikken, men snarare eit generelt medvit om kvantenaturen til materien og korleis vi kan nyttiggjere oss av denne.

- *Kvantesimulering:*  
Det å simulere eit kvantesystem ved å bruke ei kvantedatamaskin.
- *Opne kvantesystem:*  
Eit opne kvantesystem er eit kvantesystem som vekselverkar med eit mykje større system. Dette større systemet utgjer det vi kallar *miljøet*, som det originale, mindre systemet er *opne* mot. Denne vekselverknaden medfører ei betydeleg endring i tilstanden kvantesystemet er i og måten det utviklar seg på i tid. Ein konsekvens er delvis eller fullstending tap av eigenskapar som for eksempel koherens, *purity* og samanfiltring, *entanglement* på engelsk. I praksis er ingen kvantesystem fullstendig isolerte frå miljøet rundt, og difor er det viktig å utvikle eit teoretisk rammeverk for å modellere og skildre effektar induert av vekselverknaden mellom kvantesystem og miljø. I tillegg er det viktig å forstå korleis slike vekselverknader påverkar tidsutviklinga til det opne systemet.
- *Port- eller gate-basert kvantedatamaskin:*  
Ei kvantedatamaskin som, i prinsippet, kan køyre kva som helst program definert av ein sekvens av logiske portar brukt på spesifikke kvantebitar, *qubits*. Ein slik port, eller *gate*, er ei spesifikk handling eller instruks pålagt ein eller få slike *qubits*. Mange slike kvanteportar, som *ikkje*, eller NOT, er samanfallande med logiske portar som blir brukt innan vanleg, klassisk databehandling. Kvante-*annealer*-konseptet, derimot, er eit meir bruks-spesifikt alternativ til denne meir generelle tilnærminga til kvanterekning og kvantedatabehandling.
- *Post-kvante-kryptografi:*  
Det å designe og analysere kryptografiske algoritmar og metodar som er baserte på matematiske problem som, så vidt vi veit, ikkje kan løysast vesentleg meir effektivt på ei kvantedatamaskin enn på ei vanleg, klassisk maskin. Post-kvante-kryptografiske konstruksjonar er venta å fortsette å vere sikre også når større og pålitelege kvantedatamaskiner blir tilgjengelege. Også kalla *kvanteresistent kryptografi*.
- *Qubit:*  
Korting for kvantebit, *quantum bit* på engelsk. Ein qubit er eit kvantesystem med to moglege tilstandar. Dette utgjer den grunnleggande informasjonseininga i ein kvantedatamaskin. Den motsvarande informasjonseininga i ei klassisk datamaskin, ein bit, er anten 0 eller 1. Ein qubit kan også vere 0 eller 1, men i tillegg kan ein slik tilstand også vere ein vilkårleg lineær kombinasjon av 0 og 1.

- *Støyfulle, mellomstore kvantedatamaskiner eller NISQ computers:*  
Dagens kvantedatamaskiner er langt frå idelle — på fleire måtar. Antal *qubits* er framleis nokså avgrensa. Men det som verre er, er at dei også er utsett for støy og *dekoherens*; bølge-eigenskapane som kvantesystem har, går tapt som følgje av at systemet blir samanfiltra med miljøet rundt. Dette er, til ei viss grad, uunngåeleg i fysiske implementeringar. Det blir no lagt stor innsats i utviklinga av teknologien for å prøve å imøtegå og redusere slike problem.



# Referansar

Alle dei lista nettsidene vart besøkte 3. juli 2023.

- [1] OpenAI. AI and Compute, 2018. <https://openai.com/research/ai-and-compute>.
- [2] 40 years of quantum computing. *Nature Reviews Physics*, 4(1):1, 2022. Editorial, <https://www.nature.com/articles/s42254-021-00410-6/>.
- [3] Qureca. Quantum Initiatives Worldwide – Update 2023, 2023. <https://qureca.com/quantum-initiatives-worldwide-update-2023/>.
- [4] Research and Markets. Quantum Technology Market by Computing, Communications, Imaging, Security, Sensing, Modeling and Simulation 2022–2027, 2023. <https://www.researchandmarkets.com/reports/5317365/quantum-technology-market-by-computing/>.
- [5] Honeywell. Honeywell Quantum Solutions And Cambridge Quantum Computing Will Combine To Form World’s Largest, Most Advanced Quantum Business, 2021. <https://www.honeywell.com/us/en/press/2021/06/honeywell-quantum-solutions-and-cambridge-quantum-computing-will-combine-to-form-worlds-largest-most-advanced-quantum-business/>.
- [6] Physics World. Quantum Computers Vastly Outperform Supercomputers When It Comes to Energy Efficiency, 2020. <https://physicsworld.com/a/quantum-computers-vastly-outperform-supercomputers-when-it-comes-to-energy-efficiency/>.
- [7] Anika Pflanzner, Wolf Richter, and Henning Soller. A Quantum Wake-up Call for European CEOs. *McKinsey Digital*, 2021. <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/a-quantum-wake-up-call-for-european-ceos/>.
- [8] Matteo Biondi, Anna Heid, Nicolaus Henke, Niko Mohr, Lorenzo Pautasso, Ivan Ostojic, Linde Wester, and Rodney Zemme. Quantum Computing Use Cases are Getting Real – What You Need to Know. *McKinsey Digital*, 2021. <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/quantum-computing-use-cases-are-getting-real-what-you-need-to-know/>.
- [9] Thomas Corbett and Peter W. Singer. National Quantum Strategy, 2022. <https://www.defenseone.com/ideas/2022/04/china-may-have-just-taken-lead-quantum-c>

- omputing-race/365707/.
- [10] Matt Swayne. China's Origin Quantum Ships First Quantum Computer, 2023. <https://thequantuminsider.com/2023/02/03/china-s-origin-quantum-ships-first-quantum-computer/>.
- [11] Government of the United Kingdom. National Quantum Strategy, 2023. <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy/national-quantum-strategy-accessible-webpage>.
- [12] Matt Swayne. Germany Announces 3 Billion Euro Action Plan For a Universal Quantum Computer, 2023. <https://thequantuminsider.com/2023/05/03/germany-announces-3-billion-euro-action-plan-for-a-universal-quantum-computer/>.
- [13] Georg Riekes. Quantum technologies and value chains: Why and how Europe must act now, 2023. <https://www.epc.eu/en/Publications/Quantum-technologies-and-value-chains-Why-and-how-Europe-must-act-now~4f3940a>.
- [14] Ministry of Foreign Affairs of Denmark. New Danish NATO Center for Quantum Technology, 2022. <https://investindk.com/insights/new-danish-nato-center-for-quantum-technology>.
- [15] Uddannelses- og Forskingsministeriet. Regeringen klar til milliardinvestering som led i ny strategi for kvanteteknologi, 2023. <https://ufm.dk/aktuelt/pressemeddelelser/2023/regeringen-klar-til-milliardinvestering-som-led-i-ny-strategi-for-kvanteteknologi>.
- [16] The Finnish Quantum Agenda, 2023. <https://instituteq.fi/finnish-quantum-agenda/>.
- [17] En svensk kvantagenda, 2023. <https://www.vinnova.se/publikationer/en-svensk-kvantagenda/>.
- [18] Jan Willie Olsen. Skal kartlegge kvanteteknologi i Norge. *Khrono*, 2022. <https://khrono.no/skal-kartlegge-kvanteteknologi-i-norge/707401/>.
- [19] Research Council of Norway. Gjennomgang av norsk forskning på kvanteteknologi, 2022. Memo on assignment from the Norwegian Ministry of Education and Research.
- [20] Maninder Kaur and Araceli Venegas-Gomez. Defining the quantum workforce landscape: a review of global quantum education initiatives. *Optical Engineering*, 61(8):081806, 2022.
- [21] Benjamin Zwickl. Developing a “quantum aware” workforce: trends in North America and Europe, 2022. Presentation at the QC-Norway workshop. <https://www.qcnorway.no/videos#Zwickl>.
- [22] Wikipedia. Simula, 2022. <https://en.wikipedia.org/wiki/Simula>.
- [23] Computer History Museum. ENIAC, 2023. <https://www.computerhistory.org/revolution/birth-of-the-computer/4/78>.
- [24] Himadri Majumdar. Finnish perspectives on Quantum Computing and Business, 2022. Presentation at the QCNorway workshop. <https://www.qcnorway.no/videos#Majumdar>.
- [25] Göran Wendin. HPC+QC, NordIQuEst and the Future of Quantum Computing, 2022. Presentation at the QCNorway workshop. <https://www.qcnorway.no/videos#Wendin>.

- os#Wendin.
- [26] Niels Bohr Institute. Microsoft Quantum Computings, 2020. <https://nbi.ku.dk/english/industrial-collaboration-at-nbi/cases/microsoft-quantum-lab-copenhagen/>.
- [27] Niels Bohr Institute. Major investment for developing Denmark's first fully functional quantum computer, 2022. <https://nbi.ku.dk/english/news/news22/major-investment-for-developing-denmarks-first-fully-functional-quantum-computer/>.
- [28] LUMI. Czechia will host the European LUMI-Q quantum computer, 2022. <https://lumi-supercomputer.eu/czechia-will-host-the-european-lumi-q-quantum-computer/>.
- [29] The Certus Centre for Software Validation and Verification, 2019. <http://certus-sfi.no/>.
- [30] Wikipedia. List of software bugs, 2023. [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_software\\_bugs](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_software_bugs).
- [31] Axel Andersson. eX3 + QAL 9000 connection, 2022. Presentation at the QCNorway workshop. <https://www.qcnorway.no/videos#Andersson>.
- [32] John Preskill. Quantum Computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*, 2:79, 2018.
- [33] D-Wave Advantage system. <https://www.dwavesys.com/solutions-and-products/systems/>.
- [34] Calogero Zarbo. Take off with Quantum Machine Learning. <https://medium.com/@calogerozarbo88/take-off-with-quantum-machine-learning-2d31e95164ea>.
- [35] DQUANT: Dissipative Quantum Chaos Perspective on Near-Term Quantum Computing. <https://quantera.eu/dquant/>.
- [36] Øyvind Ytrehus. Quantum-safe cryptography, 2022. Presentation at the QCNorway workshop. <https://www.qcnorway.no/videos#Ytrehus>.
- [37] David Joseph et al. Transitioning organizations to post-quantum cryptography. *Nature*, 605(7909):237–243, 2022.
- [38] Zeki C Seskir, Steven Umbrello, Christopher Coenen, and Pieter E Vermaas. Democratization of quantum technologies. *Quantum Science and Technology*, 8(2):024005, feb 2023.
- [39] Umair M. Imam. How Ruter uses Quantum computing in its machine learning algorithms, 2022. [https://youtu.be/\\_zDMmz4WcOs](https://youtu.be/_zDMmz4WcOs).
- [40] Terje Nilsen. Why should Norwegian companies invest in Quantum Computing knowledge already at this early stage?, 2022. Presentation at the QCNorway workshop. <https://www.qcnorway.no/videos#Nilsen>.
- [41] Tobi Giesgen. Preparing now for the bright unknown in an uncertain future, 2022. Presentation at the QCNorway workshop. <https://www.qcnorway.no/videos#Giesgen>.
- [42] European Quantum Industry Consortium, 2023. <https://www.euroquic.org/>.
- [43] Wikipedia. Technology readiness level, 2023. [https://en.wikipedia.org/wiki/Technology\\_readiness\\_level](https://en.wikipedia.org/wiki/Technology_readiness_level).
- [44] Partnership for Advanced Computing in Europe. <http://www.prac-e-ri.eu/>.



**Kontakt: [qcnorway@simula.no](mailto:qcnorway@simula.no)**