



NATIONALE
AGENDA
**QUANTUM
TECHNOLOGIE**

NATIONALE AGENDA
QUANTUMTECHNOLOGIE

September 2019

Voorwoord

Mijn naam is Robbert Dijkgraaf. Ik ben een groot fan van de wetenschap en een fan van Nederland en die twee komen prachtig bij elkaar in deze Nationale Agenda Quantumtechnologie.

Ik zeg altijd graag dat de toekomst al hier is, namelijk in de laboratoria en in de hoofden van onze onderzoekers en ingenieurs. Een belangrijk onderdeel van die toekomst is quantumtechnologie. Het is een manier om niet alleen fantastische nieuwe apparaten en industrieën te ontwikkelen, maar ook om de grote maatschappelijke problemen aan te pakken - of het nu om klimaat, zorg of veiligheid gaat.

De hele wereld investeert in quantumtechnologie, maar wij in Nederland zijn bevoorrecht omdat we de thuisbasis zijn van een aantal fantastische initiatieven. Geweldige, wereldwijd leidende onderzoeksinstituten zoals QuTech in Delft, QuSoft in Amsterdam en QT/e in Eindhoven, prachtige onderzoeksgroepen in Leiden, Nijmegen, Groningen, Twente en Utrecht, verbindende organisaties als TNO en StartupDelta, en heel interessante industriële partnerships en startups.

Nu is het moment om al deze puzzelstukjes bij elkaar te leggen, om met elkaar de uitdaging aan te gaan en te investeren in nieuw talent, nieuwe onderzoekers, nieuwe infrastructuur en bedrijvigheid - ofwel, in het hele ecosysteem. Werken aan doorbraken in onderzoek en innovatie, aan de ontwikkeling van nieuwe toepassingen en markten, aan de competenties die daarvoor nodig zijn op bijvoorbeeld het gebied van systems engineering en aan de ethische, juridische en sociale aspecten van quantumtechnologie: dit document zet de agenda. Als we deze uitvoeren hebben we in 2030 niet alleen heel mooie, spannende en nieuwe wetenschap, maar ook een nieuwe industrie en misschien ook wel nieuwe oplossingen voor een betere wereld.

Ik hoop daarom dat u deze Nationale Agenda Quantumtechnologie met veel plezier zult lezen en zult steunen, want uw hulp hebben we nodig om de in deze agenda beschreven initiatieven en acties met elkaar neer te zetten en samen te bouwen aan de ontwikkeling van een Nederlandse quantumdelta: de QΔNL!

Robbert Dijkgraaf
Directeur en Leon Levy Professor, Institute for Advanced Study, Princeton



Inhoud

Voorwoord	3
Samenvatting	9
1 EEN NATIONALE AGENDA VOOR QUANTUMTECHNOLOGIE	13
1.1 De belofte van quantumtechnologie	13
1.2 Ambitie om door te groeien tot Quantum Delta NL	14
1.3 Totstandkoming van deze agenda	14
1.4 Uitvoering van deze agenda is urgent	16
1.5 Opbouw van de agenda	16
2 WAT MAAKT QUANTUMTECHNOLOGIE ZO BIJZONDER?	19
2.1 De belangrijkste principes van quantumtechnologie	19
2.1.1 Verstregeling	19
2.1.2 Superpositie	19
2.2 Vier veelbelovende toepassingsgebieden	21
2.2.1 Universele quantumcomputers	21
2.2.2 Quantsimulators	23
2.2.3 Quantumcommunicatie	24
2.2.4 Quantsensoren	26
2.3 Fundamentele en technologische uitdagingen	27
2.3.1 Universele quantumcomputers	27
2.3.2 Quantsimulators	30
2.3.3 Quantumcommunicatie	31
2.3.4 Quantsensoren	33
2.3.5 Uitdagingen op andere terreinen	35
2.4 Conclusie	35
3 DE MAATSCHAPPELIJKE EN ECONOMISCHE IMPACT VAN QUANTUMTECHNOLOGIE	37
3.1 Impact op korte én lange termijn	37
3.2 Impact op alle maatschappelijke missies	39
3.2.1 Veiligheid en privacy	40
3.2.2 Energie en duurzaamheid	42
3.2.3 Gezondheid en zorg	43
3.2.4 Landbouw, water en voedsel	44
3.2.5 Mobiliteit en logistiek	45
3.3 De economische impact van quantumtechnologie	46
3.3.1 Een ecosysteem voor quantumgebaseerde producten en diensten	47
3.3.2 De markt voor quantumtechnologie	49
3.4 Ethische, juridische en sociale impact	51
3.5 Conclusie	53

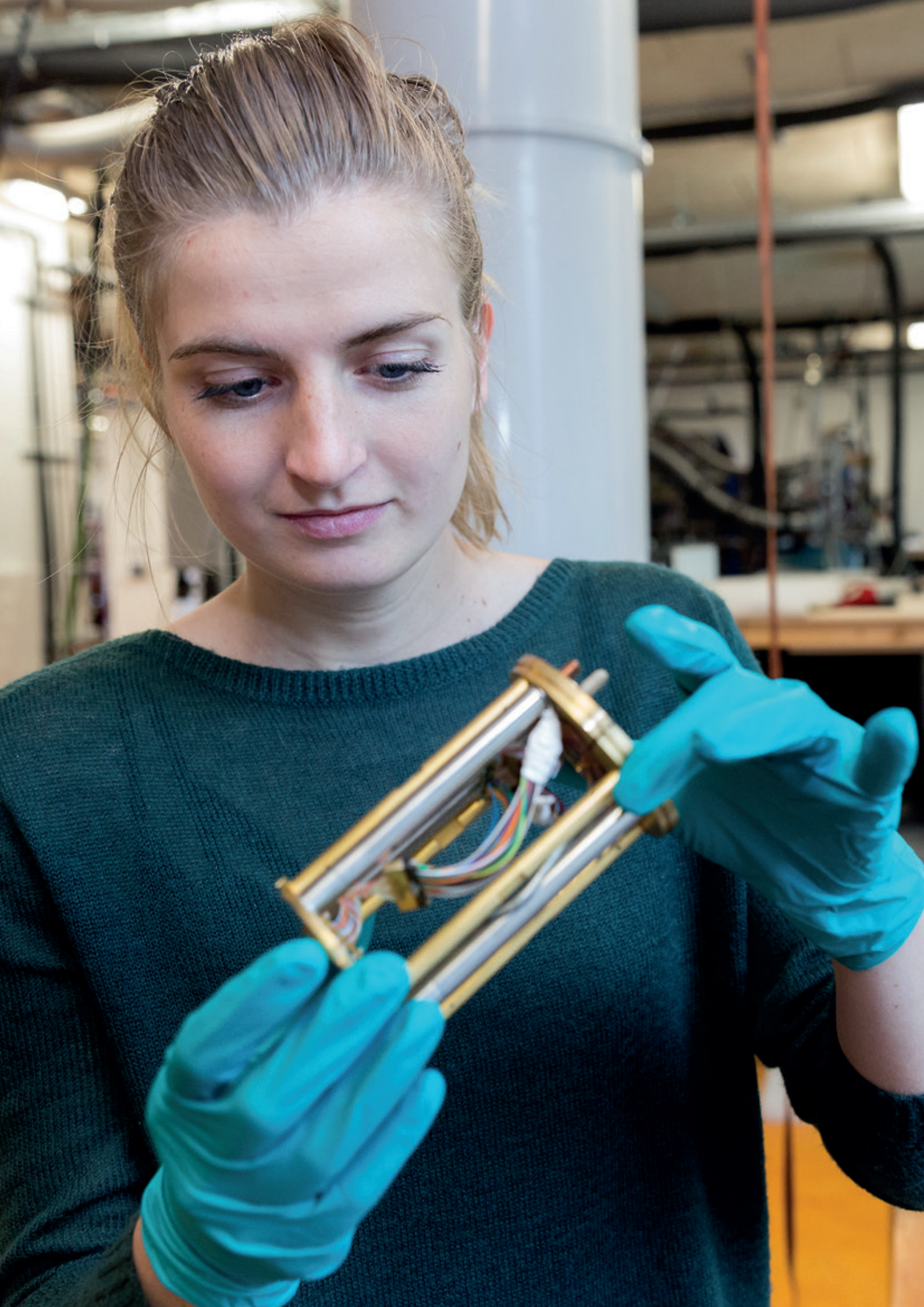


FOTO COVER

Zeer geavanceerde koelinstallatie 'cryostaat' waarin qubits afgekoeld worden tot -273°C . Bij deze extreem lage temperaturen blijven de qubits lang genoeg in een quantumtoestand om er berekeningen mee uit te kunnen voeren.

Inhoud

4	HET NEDERLANDSE QUANTUMLANDSCHAP IN EEN INTERNATIONALE CONTEXT	55
4.1	Vervlechting van overheid, wetenschap, industrie en maatschappij	55
4.2	'Nederland Quantumland'	56
4.2.1	De onderzoekscentra QuTech, QuSoft en QT/e	56
4.2.2	Nederlandse kennisinstellingen en universiteiten	61
4.3	Het wereldwijde speelveld	64
4.3.1	Ontwikkelingen in Europa	65
4.3.2	Ontwikkelingen in Canada en de Verenigde Staten	66
4.3.3	Ontwikkelingen in China	66
4.4	De balans tussen nationale versterking en internationale samenwerking	67
4.5	Conclusie	69
5	TOEKOMSTAGENDA VOOR QUANTUM DELTA NL	71
5.1	Vier actielijnen en drie KAT-programma's	71
5.2	Actielijn 1 Realiseren van doorbraken in onderzoek en innovatie	72
5.2.1	Quantum computing	73
5.2.2	Quantum simulation	74
5.2.3	Quantum communication	75
5.2.4	Quantum sensing	75
5.2.5	Quantumalgoritmes	76
5.2.6	Post-quantum cryptografie	76
5.3	Actielijn 2 Ecosysteemontwikkeling, marktcreatie en infrastructuur	78
5.4	Actielijn 3 Human capital: educatie, kennis en vaardigheden	82
5.5	Actielijn 4 Starten maatschappelijke dialoog over quantumtechnologie	82
5.6	Drie KAT-programma's	83
5.6.1	KAT-1 Quantum Computing and Simulation	84
5.6.2	KAT-2 Nationaal Quantum Netwerk	86
5.6.3	KAT-3 Quantum Sensing Applicaties	90
6	VOORWAARDEN VOOR HET UITVOEREN VAN DE AGENDA	93
6.1	Organisatie en governance	93
6.2	Financiering	93
	Colofon	96



Samenvatting

Quantumtechnologie is een sleuteltechnologie die radicaal nieuwe producten en diensten mogelijk maakt. Quantumcomputers, quantumsimulators, quantumnetwerken en quantumsensoren kunnen straks dingen die 'klassieke' apparaten niet kunnen, zoals het doorrekenen van moleculen en materialen en positiebepaling zonder gps. We staan daarmee aan het begin van een technologie-revolutie die verwacht wordt een grote bijdrage te leveren aan het oplossen van maatschappelijke uitdagingen op het gebied van bijvoorbeeld energie, voedsel en zorg. Nederland doet mee in de wetenschappelijke en technologische voorhoede van de ontwikkelingen en wereldwijd wordt er door overheden en bedrijven fors geïnvesteerd in quantumonderzoek en -innovatie.

Ook de marktverwachtingen zijn hooggespannen. Marktonderzoekers voorspellen dat de markt voor quantumtechnologie de komende twintig jaar uit zal groeien tot ruim 65 miljard USD, en in 2050 wereldwijd zo'n 300 miljard USD zal bedragen. De parallel met de semiconductie-industrie wordt getrokken: quantumtechnologie bevindt zich nu in een ontwikkelingsstadium waarin halfgeleiders zich in de jaren vijftig van de vorige eeuw bevonden. De potentiële maatschappelijke en economische impact van quantumtechnologie kan op termijn wel eens vergelijkbaar zijn met die van de halfgeleider, zeker wanneer we ook het effect van mogelijke spin-offs op andere terreinen meenemen.

Deze Nationale Agenda Quantumtechnologie heeft tot doel Nederland te positioneren als een internationaal toonaangevend centrum en knooppunt voor quantumtechnologie: de Quantum Delta NL, kortweg QΔNL. Onze uitgangspunt is uitstekend: Nederlandse universiteiten en kennisinstellingen zijn koplopers op het gebied van qubits, quantuminternet, quantumalgoritmes en post-quantum cryptografie en fungeren als een magneet voor wereldwijde bedrijfsinvesteringen en talent. We zijn bovendien sterk in systems engineering en in het combineren van technologieën tot werkende systemen, cruciaal

voor innovatie. Deze positie als voortrekker en pionier wil Nederland behouden en verder versterken. Zoals Silicon Valley de aanjager en het middelpunt is geworden voor de halfgeleiderindustrie en haar toepassingen, zo streeft Nederland ernaar dat te worden voor quantumtechnologie. Baanbrekend onderzoek, hoogwaardig onderwijs, state-of-the-art faciliteiten en programma's om de technologie versneld naar de markt te brengen moeten talent en bedrijven aantrekken en leiden tot een bruisend quantumecosysteem dat een Europese en zelfs mondiale functie heeft.

Toekomstagenda voor QΔNL

Het opbouwen van massa en excellentie in kennis, talent, infrastructuur en bedrijvigheid vereist nieuwe investeringen en inspanningen. Het gaat daarbij om meer dan alleen de technologie zelf; ook de maatschappelijke acceptatie en ethische aspecten van quantumtechnologie zijn belangrijk. Deze agenda beschrijft wat er moet gebeuren. Figuur 1 toont de structuur van de agenda. Voor de gehele sector zal worden ingezet op vier actielijnen: realiseren van doorbraken in onderzoek en innovatie; ecosysteemontwikkeling, marktcreatie en infrastructuur; human capital en het starten van een maatschappelijke dialoog. Overkoepelend definieert deze agenda bovendien drie ambitieuze katalysatorprogramma's of KAT-programma's, om de technologie versneld naar de markt en maatschappij te brengen via 'demonstrator'-faciliteiten die de technologie tastbaar maken en eindgebruikers en onderzoekers ruimte bieden om ervaring op te doen met het gebruik ervan. Ze leggen ook verbinding: tussen de vier actielijnen, tussen de spelers in het ecosysteem en tussen wetenschap en toepassing. Een nationaal loket zorgt ervoor dat iedereen die iets met de technologie wil, weet waar hij of zij in Nederland terecht kan.

Drie ambitieuze KAT-programma's

KAT-1 | Quantum Computing and Simulation

Om de samenleving voor te bereiden op quantum-computers, worden er quantumapplicaties ontwikkeld en demoversies online toegankelijk gemaakt via de faciliteiten in dit KAT. Dit stelt de overheid, het bedrijfsleven, technologieontwikkelaars en studenten in staat om een quantumcomputer te bezoeken en mogelijkheden te verkennen en ervaring op te doen met implementaties op echte hardware. De verschillende faciliteiten verbinden kennisinstellingen en bedrijven die werken aan quantum computing op nationale schaal en over de gehele 'stack': van hardware tot software en applicaties.

KAT-2 | Nationaal Quantum Netwerk

Om quantumnetwerken en het quantuminternet naar een volgend niveau te trekken, wordt een nationaal quantumnetwerk gebouwd dat lokale kennisclusters onderling met elkaar verbindt en ook toekomstige gebruikers de mogelijkheid geeft zich aan te sluiten. In dit programma is ruimte voor funderend en toegepast onderzoek en voor participatie door de hardware-

industrie, voor het ontwikkelen van verschillende componenten van de infrastructuur. De open structuur van het Nationaal Quantum Netwerk maakt ook de ontwikkeling mogelijk van een bruisende software- en security-industrie. Het netwerk zal tevens dienen als landelijk testbed voor data-intensieve toepassingen, zoals cloud computing, Internet of Things en autonomous driving.

KAT-3 | Quantum Sensing Applicaties

Om de ontwikkeling en toepassing van quantumsensoren een extra boost te geven wordt een multidisciplinair samenwerkingsplatform opgericht, waarin onderzoekers, systems engineers en ontwikkelaars ervaringen uit kunnen wisselen, resources kunnen delen en samen met bedrijven en eindgebruikers in diverse sectoren use cases definiëren en uitwerken tot prototypes. Er wordt ook een test- en gebruikersfaciliteit voor quantumsensoren opgezet, om bedrijven en andere organisaties te helpen met innovatie en het marktrijp maken van de technologie. Daarbij wordt een link gelegd met aanpalende technologieën zoals (geïntegreerde) fotonica en elektronica.

Vier actielijnen

Deze Nationale Agenda Quantumtechnologie definieert vier actielijnen:

Actielijn 1 | Realiseren van doorbraken in onderzoek en innovatie, op zes onderwerpen:

- Quantum computing
- Quantum simulation
- Quantum communication
- Quantum sensing
- Quantum algorithms
- Post-quantum cryptografie

Actielijn 2 | Ecosysteemontwikkeling, marktcreatie en infrastructuur

1. Internationale positionering van QΔNL en internationale inbedding van de agenda
2. Opzetten van fieldlabs als praktijkomgevingen voor innovatie
3. Uitbreiden van de benodigde cleanroom-faciliteiten
4. Doorontwikkelen van het Delftse quantumcluster voor het Nederlandse ecosysteem
5. Uitbouwen en versterken van lokale kernen binnen het nationale landschap
6. Opzetten technology transferprogramma, stimuleren startups

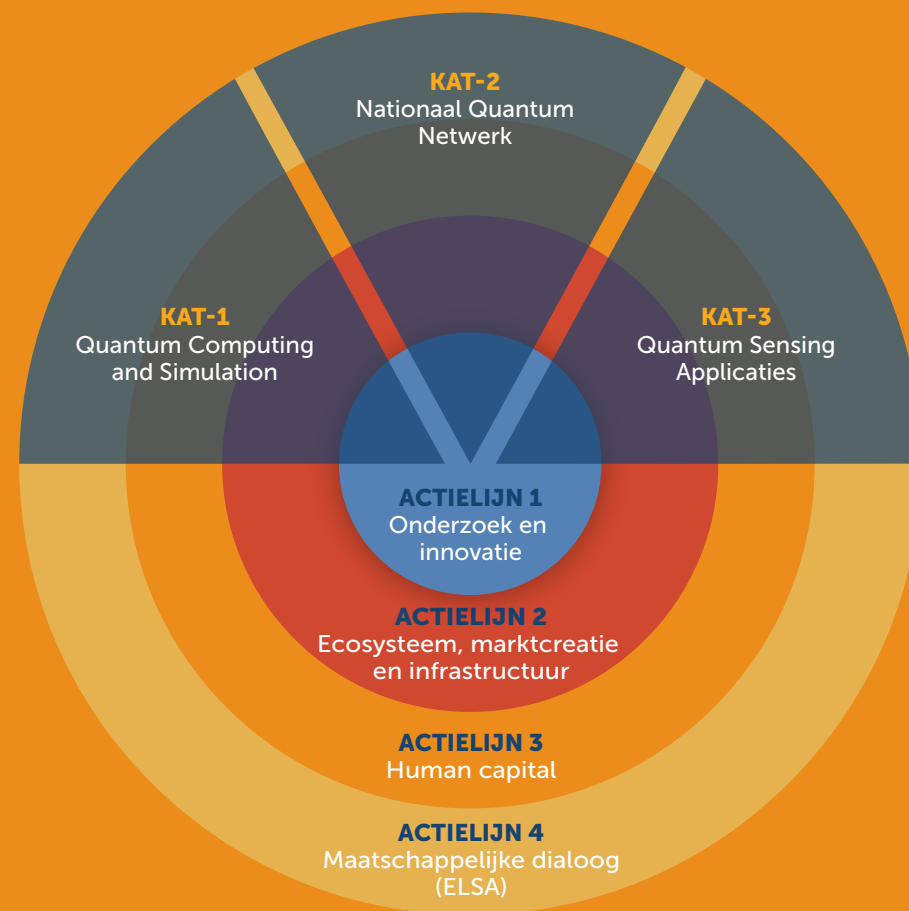
Actielijn 3 | Human capital: educatie, kennis en vaardigheden

7. Versterken educatie, samenwerking en kennisuitwisseling
8. Aantrekken en behouden van talent uit binnen- en buitenland
9. Communitybuilding, conferenties, summer schools, uitwisseling studenten

Actielijn 4 | Starten van een maatschappelijke dialoog rondom quantumtechnologie

10. Starten van een (internationale) dialoog over quantumtechnologie
11. Oprichten van een nationale ELSA-commissie en -leerstoel
12. Ontwikkelen juridische en ethische kaders voor quantumtechnologie

FIGUUR 1
Vier actielijnen en drie ambitieuze, verbindende KAT-programma's.



Financiering en organisatie

De totale jaarlijkse omvang van het programma inclusief lopende programma's is circa 102 miljoen euro per jaar, waarvan 69 miljoen reeds is gedekt door bestaande programma's. De nieuwe actielijnen vragen om een investering van 34 miljoen per jaar. Een breed samengesteld kernteam heeft deze agenda in een eensgezinde samenwerking tot stand gebracht. Een groot aantal partijen uit de 'gouden driehoek' is daarbij betrokken, onder andere door middel van een goed bezochte landelijke inloopdag in april 2019 en een klankbordgroep met ongeveer vijftig vertegenwoordigers van wetenschap, bedrijfsleven en overheid. De kerngroep is als coalitie bereid en voornemens de regie van de uitvoering van de agenda voortvarend ter hand te nemen.

Tot slot

Er is haast bij het uitvoeren van deze agenda. De wereld om ons heen staat niet stil: er wordt veel geïnvesteerd en de 'battle for brains' is in volle gang. De technologie is bovendien van strategisch belang voor onze soevereiniteit. Om een leidende positie te behouden is het zaak dat Nederland een volgende stap zet. Niet alleen financieel, maar ook door strategische prioriteiten te kiezen en die op te pakken. De ontwikkeling van quantumtechnologie is immers een internationale aangelegenheid: geen enkel land is in staat de technologie in isolement te ontwikkelen, maar veel landen proberen wel een flink deel binnen de landgrenzen te krijgen. Door een juiste balans van nationale versterking en internationale samenwerking kunnen we Nederland optimaal positioneren. Op andere terreinen is dat eerder gelukt, zoals in de watersector, en in de halfgeleiderindustrie, met de Brainportregio. We hebben met onze excellente positie in quantumtechnologie een unieke kans om dit weer te doen.

01

EEN NATIONALE AGENDA VOOR QUANTUMTECHNOLOGIE

1.1 De belofte van quantumtechnologie

Quantumtechnologie staat internationaal volop in de belangstelling. Na de eerste quantumrevolutie in de twintigste eeuw, die via onder andere de transistor en de laser tot onze huidige informatiemaatschappij van computers en het internet heeft geleid, staan we nu aan het begin van een tweede quantumrevolutie. En dat is behoorlijk spannend. Deze tweede golf gaat namelijk dingen mogelijk maken die 'klassieke' apparaten niet kunnen. Zo hebben quantumcomputers de potentie om bepaalde problemen veel sneller op te lossen dan 'gewone' computers ooit zullen kunnen en verschaft quantumsimulatie ons middelen om quantumprocessen, zoals het complexe gedrag van moleculen, te helpen ontrafelen. Quantumcommunicatie maakt het mogelijk om bepaalde gedistribueerde problemen efficiënter op te lossen en om veilig te communiceren, waarbij berichten niet of nauwelijks onderschept kunnen worden - als iemand al een poging zou wagen, dan merken de verzender en de ontvanger van het bericht dat direct. En met quantumsensoren kan men op heel kleine schaal extreem gevoelige metingen verrichten, op manieren die met klassieke sensoren onmogelijk zijn.

Quantumtechnologie berust 'gewoon' op principes van de quantummechanica, onze meest geteste en precieze theorie van de wereld. Toch heeft quantumtechnologie voor veel mensen iets mysterieus, of zelfs bijna magisch. "Als je denkt dat je de quantummechanica begrijpt, dan begrijp je de quantummechanica niet", zo zei de vermaarde fysicus Richard Feynman ooit. Maar dankzij grote door-

braken in het afgelopen decennium is nu helder dat de principes toegepast kunnen gaan worden in baanbrekende nieuwe technologieën. Voor de nieuwe generaties van quantumtechnici die nu opgeleid gaan worden zal quantummechanica een praktisch vak worden. De radicaal nieuwe toepassingen die de tweede quantumrevolutie mogelijk maakt, leveren veelbelovende kansen op voor de industrie en kunnen helpen bij het vinden van oplossingen voor enkele van de grootste maatschappelijke uitdagingen op het gebied van bijvoorbeeld energie, voedsel en zorg. Wereldwijd wordt er dan ook fors geïnvesteerd in quantumtechnologie, en hoewel dat ondertussen heeft geresulteerd in enkele eerste commerciële toepassingen staan we nog maar aan het begin van wat allemaal mogelijk is.

Zodra we de technologie volledig beheersen, zal dat onze wereld veranderen. Tijdens de toekenning van de Nobelprijs voor Natuurkunde aan Serge Haroche en David Wineland, in 2012, stelde de Nobelcommissie het als volgt: "Perhaps the quantumcomputer will change our everyday lives in this century in the same radical way as the classical computer did in the last century." Een lonkend perspectief, dat extra aantrekkelijk wordt wanneer we bedenken dat investeringen in de ontwikkeling van quantumcomputers, quantumnetwerken, quantumsimulators en quantumsensoren ongetwijfeld ook zullen leiden tot spin-offs op andere terreinen. Vergelijk het streven om quantumtechnologie onder de knie te krijgen met het ruimtevaartprogramma: de missie om een mens op de maan te zetten heeft óók geleid tot de ontwikkeling van nieuwe lichtgewicht materialen, diverse medische apparatuur en schokabsorberende schoenen - om slechts enkele van de talloze spin-offs te noemen.¹

'We staan nu aan het begin van een tweede quantumrevolutie. En dat is behoorlijk spannend.'

¹ Zie: https://www.nasa.gov/sites/default/files/80660main_ApolloFS.pdf

Kortom, quantumtechnologie houdt een grote belofte in, voor samenleving, industrie en wetenschap. Om die belofte waar te maken is deze agenda opgesteld; hij duidt kansen, tijdslijnen en acties.

1.2 Ambitie om door te groeien tot Quantum Delta NL

Nederland heeft een uitstekende startpositie om de kansen die quantumtechnologie biedt te verzilveren. Nederlandse universiteiten en kennisinstellingen hebben een vooraanstaande positie in de wereldwijde ontwikkeling van quantumhardware en -software met de bijbehorende aansturing, algoritmes en toepassingen. We zijn een koploper op het gebied van qubits, quantuminternet, quantumalgoritmes en post-quantum cryptografie. Uit een studie van Elsevier² blijkt bijvoorbeeld dat de citatie-impact (een maat voor de impact van het verrichte onderzoek) van Nederlandse publicaties op het gebied van quantumcommunicatie, quantum computing en encryptietechnologieën met scores tussen de 1,6 en 2,1 ver boven het wereldgemiddelde van 1,0 ligt en ook Europees tot de absolute top behoort: een stevig bewijs dat er in ons land kwalitatief hoogwaardig onderzoek wordt gedaan. Het Delftse QuTech, Nationaal Icoon sinds 2014, heeft als gezamenlijk TUD/TNO-kennisinstituut een unieke positie in de wereld, zoals bevestigd door de excellente scores en bewoordingen in de internationale evaluatie die onlangs werd uitgevoerd onder leiding van Robbert Dijkgraaf.³ Ook andere sterke samenwerkingsverbanden timmeren hard aan de weg, zoals QuSoft in Amsterdam en QT/e in Eindhoven. Al deze instituten werken vanuit hun Nederlandse basis nauw samen met universiteiten, startups en gevestigde bedrijven, zoals Microsoft, Intel, ABN AMRO, Delft Circuits, Qblox, Bosch en Shell. Een mooi voorbeeld hiervan vormt het Microsoft Quantum Lab, dat Koning Willem-Alexander in februari 2019 heeft geopend op de campus van de TU Delft.

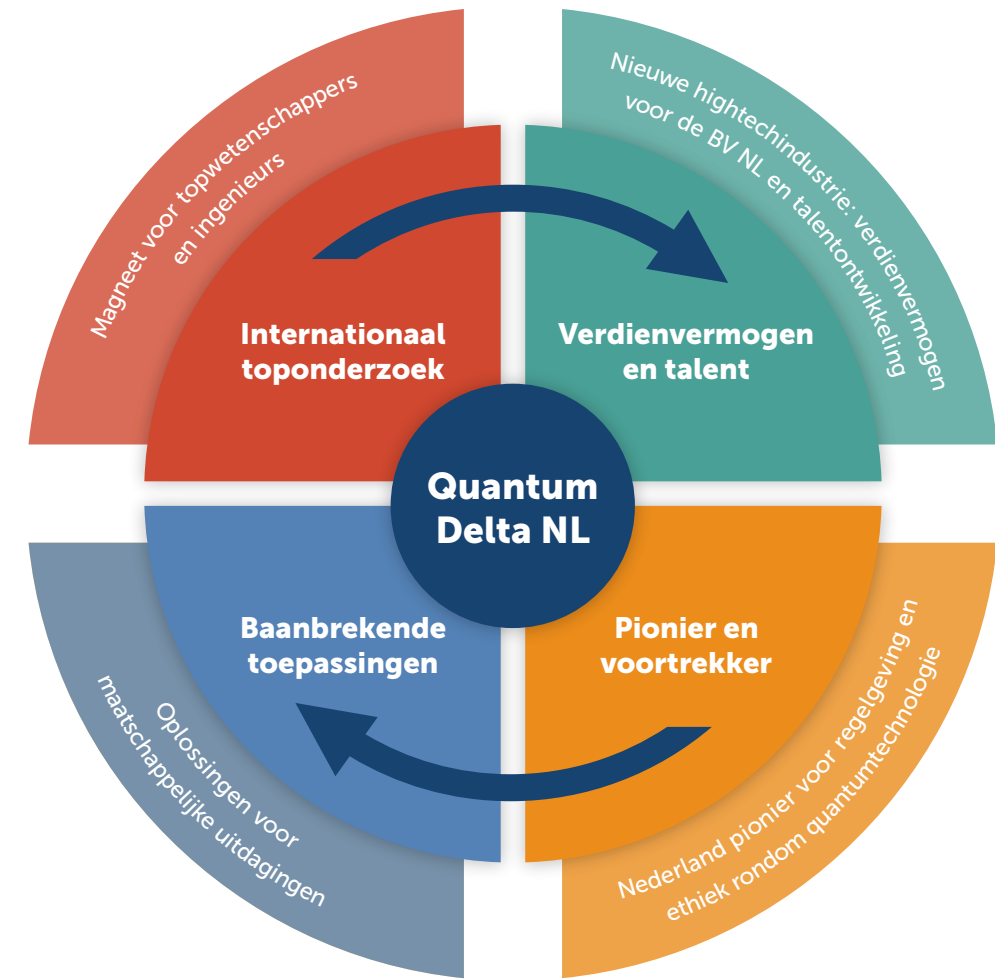
Deze positie als voortrekker en pionier wil Nederland behouden en verder versterken. De spelers in het Nederlandse ecosysteem hebben daarom gezamenlijk de ambitie geformuleerd om Nederland om te vormen tot een internationaal toonaangevend centrum en knooppunt voor quantumtechnologie:

de Quantum Delta NL, kortweg QΔNL. Nu is het moment. Quantumtechnologie bevindt zich in een vergelijkbaar stadium van ontwikkeling als de transistortechnologie in de jaren vijftig van de vorige eeuw, en bekend is tot wat voor een enorme industrie dat heeft geleid. Zoals Silicon Valley de aanjager en het middelpunt is geworden voor de halfgeleiderindustrie en haar toepassingen, zo wil Nederland dat worden voor quantumtechnologie. Baanbrekend onderzoek, hoogwaardig onderwijs en state-of-the-art faciliteiten voor het ontwikkelen en testen van de technologie en nieuwe applicaties moeten talent en bedrijven aantrekken en leiden tot een bruisend quantumecosysteem in Nederland.

Het opbouwen van massa en excellentie in kennis, talent, infrastructuur en bedrijvigheid vereist nieuwe investeringen en inspanningen. Het gaat daarbij om meer dan alleen de technologie zelf; ook de maatschappelijke acceptatie en ethische aspecten van quantumtechnologie verdienen aandacht. Deze agenda vormt het startpunt en beoogt een vliegwiel in gang te zetten, zoals Figuur 2 illustreert. Dat zo'n vliegwiel ook in Nederland kan werken, bewijst de ICT-sector. Door al in een vroeg stadium te investeren in de ontwikkeling van internettechnologie heeft Nederland internationaal een sterke positie verworven. Daar plukken we volop de vruchten van, met de Amsterdam Internet Exchange (AMS-IX) als een van de grootste internetknooppunten ter wereld, de komst van grote datacenters naar ons land en het ontstaan van nieuwe Nederlandse wereldspelers als Adyen Payments en Booking.com. Dat is precies wat we met deze agenda ook op het gebied van quantumtechnologie willen bereiken.

1.3 Totstandkoming van deze agenda

In het voorjaar van 2019 hebben Nederlandse kennisinstellingen en bedrijven op aangeven van de Staatssecretaris van Economische Zaken en Klimaat en de topsectoren HTSM en ICT in kaart gebracht wat er allemaal moet gebeuren om hun ambitie ten aanzien van quantumtechnologie waar te maken. TNO, QuTech, QuSoft, EZK, NWO, QT/e en het Lorentz Instituut hebben samen met AMS-IX, StartupDelta (Techleap.nl) en Microsoft deze handschoenen opgepakt in het kader van het KIA/KIC-proces en de Meerjaren Programma's



FIGUUR 2

Ambitie om Nederland te ontwikkelen tot een internationaal toonaangevend centrum en knooppunt voor quantumtechnologie: de **Quantum Delta NL**. De vier kwadranten weerspiegelen de reikwijdte van deze ambitie en de pijlen in het midden symboliseren de interactie tussen die vier vlakken. Ze benadrukken tevens de functie van deze nationale agenda: als vliegwiel voor de ontwikkeling en toepassing van quantumtechnologie in Nederland.

voor Sleuteltechnologieën, in nauwe samspraak met het hele veld. Een groot aantal partijen uit de 'gouden driehoek' is betrokken bij de totstandkoming van deze agenda, onder andere door middel van een goed bezochte landelijke inloopdag in april 2019 en de brede klankbordgroep die is ingesteld en waarin namens de Nederlandse overheid ook het Ministerie van Defensie en het Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties vertegenwoordigd waren. Deze Nationale Agenda Quantumtechnologie bevat het resultaat.

Het belang van quantumtechnologie wordt ook onderkend door de Nederlandse en Europese overheid, die quantumtechnologie als sleuteltechnologie hebben bestempeld. Voorstellen en richtlijnen voor beleid zijn vastgelegd in

onder andere het Europese Quantum Flagship⁴, het Quantum Manifesto⁵ en Quantum Software Manifesto (2017), en de brief 'Naar Missiegedreven Innovatiebeleid met Impact'⁶ die het Nederlandse kabinet op 13 juli 2018 aan de Tweede Kamer heeft gestuurd. In het missiegedreven innovatiebeleid ligt de nadruk op de economische kansen van de maatschappelijke uitdagingen en sleuteltechnologieën. Vier thema's staan daarbij centraal: landbouw, water & voedsel, gezondheid & zorg, energietransitie & duurzaamheid en veiligheid. De sleuteltechnologieën vormen een vijfde thema; quantumtechnologie is aangewezen als één van de acht clusters van sleuteltechnologieën. Dit beleid is als uitgangspunt voor deze agenda genomen.

² Elsevier, 'Kwantitatieve analyse van onderzoek en innovatie in sleuteltechnologieën in Nederland', juni 2018.

³ Zie: https://www.qanu.nl/sites/default/files/inline-files/QANU%20Report%20Mid-Term%20Review%20QuTech%202015-2018_def.pdf

⁴ Zie: <https://qt.eu/>

⁵ Quantum Manifesto: A New Era of Technology, Mei 2016.

⁶ Kamerstuk 33 009 (2017-2018), nr. 63.



1.4 Uitvoering van deze agenda is urgent

Er is haast bij het uitvoeren van deze agenda. De wereld om ons heen staat niet stil en stopt veel geld in quantumtechnologie. Terwijl China en de Verenigde Staten hebben aangekondigd de komende jaren miljarden dollars te gaan investeren in de technologie, laten ook Europese landen zich niet onbetuigd. Duitsland heeft bijvoorbeeld een investering van 650 miljoen euro aangekondigd, het VK heeft besloten zijn eerste 'national quantum technologies programme' een vervolg te geven en ook een land als Zweden zet met 100 miljoen euro vol in op quantumtechnologie. De Europese Unie heeft een miljard euro opzijgezet voor haar Quantum Technologies Flagship en zet stappen om een Europese quantumcommunicatie-infrastructuur te bouwen; initiatieven waarin ook Nederlandse partijen participeren.

Om een leidende positie te behouden is het zaak dat Nederland een volgende stap zet en ook eigen middelen investeert. Niet alleen financieel, maar ook door strategische prioriteiten te kiezen en die gezamenlijk op te pakken. Dat is tevens van belang voor onze soevereiniteit. Quantumtech-

nologie heeft strategische waarde. Willen we als Nederland en Europa niet afhankelijk worden van de Verenigde Staten en China, dan is niet investeren geen optie. Nederland moet zijn middelen slim en effectief inzetten en daarbij aansluiten bij internationale bondgenoten in EU- en NATO-verband. Want waar China vooral centraal stuurt vanuit de overheid en in de Verenigde Staten bedrijven leidend zijn, onderscheidt Europa zich juist in de hechte en multidisciplinaire samenwerking tussen overheid, bedrijfsleven en wetenschap. Ook Nederland heeft in dat opzicht een sterke traditie, zoals de totstandkoming van deze agenda bewijst. We zijn goed in het samen ontwikkelen, bouwen en toepassen. Daar kunnen we als land ons voordeel mee doen.

1.5 Opbouw van de agenda

De Nationale Agenda Quantumtechnologie is als volgt opgebouwd: na de inleiding van **hoofdstuk 1** worden in **hoofdstuk 2** enkele relevante principes van de technologie uitgelegd (op hoofdlijnen) en vertaald naar de vier meest veelbelovende toepassingsgebieden. Het hoofdstuk bevat

ook een overzicht van de actuele wetenschappelijke en technologische uitdagingen.

In **hoofdstuk 3** wordt de maatschappelijke en economische impact van quantumtechnologie behandeld. Het schetst hoe de technologie oplossingen kan bieden voor maatschappelijke vraagstukken en gaat in op de potentiële economische impact van de technologie voor Nederland - uitgaande van de vier missies en voor verschillende sectoren van de Nederlandse economie. Ook behandelt het ethische, juridische en sociale aspecten die gepaard gaan met de toepassing van de technologie.

Hoofdstuk 4 beschrijft het Nederlandse quantumlandschap, vanuit een internationaal perspectief. Onderzoek, onderwijs en bedrijfsleven komen aan bod. Het hoofdstuk laat zien dat Nederland op het gebied van wetenschap, onderwijs en samenwerking met het bedrijfsleven een vooraanstaande positie inneemt, getuige ook de vele voorbeelden die her en der in tekstkaders zijn opgenomen. Ook gaat het in op de internationale samenwerking die nodig is om de ambitie van deze agenda waar te maken.

Voortbouwend op de hoofdstukken 3 en 4, beschrijft **hoofdstuk 5** de acties die nodig zijn om de geschetste kansen te verzilveren en van Nederland een internationaal toonaangevend centrum op het gebied van quantumtechnologie te maken. De agenda onderscheidt daartoe vier actielijnen:

Actielijn 1
Realiseren van doorbraken in onderzoek en innovatie;

Actielijn 2
Ecosysteemontwikkeling, marktcreatie en infrastructuur;

Actielijn 3
Human capital: educatie, kennis en vaardigheden;

Actielijn 4
Starten van een maatschappelijke dialoog rondom quantumtechnologie.

De agenda definieert bovendien drie toonaangevende katalysatorprogramma's (KAT-programma's), die tot doel hebben de ontwikkelingen in de quantumtechnologie aan de hand van demonstrators 'tastbaar' te maken en versneld naar maatschappij en industrie te brengen. De KAT's staan voor versnelling en verbinding: ze omvatten de vier actie-

lijnen van deze agenda, ze brengen de verschillende spelers in het ecosysteem samen, ze verenigen hardware en software en ze koppelen wetenschap en onderzoek aan use cases en toepassingen. De drie KAT-programma's zijn:

KAT-1
Quantum Computing and Simulation;

KAT-2
Nationaal Quantum Netwerk;

KAT-3
Quantum Sensing Applicaties.

De voorwaarden voor het uitvoeren en realiseren van de agenda staan in **hoofdstuk 6**. Organisatie, governance en financiering van de uitvoering van de agenda komen daar aan bod.

02

WAT MAAKT QUANTUMTECHNOLOGIE ZO BIJZONDER?

2.1 De belangrijkste principes van quantum-technologie

De quantummechanica ontstond in het begin van de vorige eeuw als een reactie op nieuwe experimentele resultaten, die met de toen bestaande wetenschappelijke theorieën niet konden worden verklaard. Om ze te kunnen verklaren was een nieuwe theorie nodig. Deze quantumtheorie is begin 20^e eeuw in Europa ontwikkeld door vooraanstaande fysici zoals Einstein, Bohr, Schrödinger en Heisenberg en beschrijft het gedrag van energie en materie op atomaire en subatomaire schaal; dit is de wereld van de allerkleinste 'quantumdeeltjes'. Ook vele Nederlandse fysici, waaronder Nobelprijswinnaars Kamerlingh Onnes, Lorentz en Zeeman hebben belangrijke bijdragen geleverd aan deze quantumtheorie. Het gedrag van de quantumdeeltjes vormt de basis voor de werking van quantumcomputers, quantumcommunicatie-systemen, quantumsensoren en quantumsimulators, zoals wordt uitgelegd in paragraaf 2.2. Eerst worden echter twee belangrijke principes uit de quantummechanica kort toegelicht: verstrengeling en superpositie. De toepassing van met name deze twee principes vormt de basis van de tweede quantumrevolutie.

2.1.1 Verstrengeling

Verstrengeling is een fenomeen dat optreedt als twee of meer quantumdeeltjes (bijvoorbeeld fotonen of elektronen) zich in een toestand bevinden die niet beschreven kan worden door alleen de toestanden van de afzonderlijke deeltjes; de deeltjes vormen als het ware één systeem.

Als twee deeltjes verstrengeld zijn, geeft een meting van de toestand van het ene deeltje instantaan informatie over de toestand van het andere deeltje, zelfs als de twee deeltjes zich op grote afstand van elkaar bevinden. Het lijkt alsof ze instantaan, dus sneller dan het licht, met elkaar communiceren en informatie uitwisselen, maar dat is niet het geval. Wij mensen kunnen ons daar eigenlijk geen voorstelling van maken. Einstein wilde dan ook niet aan deze volgens hem "spooky action at a distance", maar ondertussen is experimenteel aangetoond dat verstrengeling wel degelijk een reëel verschijnsel is. In 2015 werd bij QuTech in Delft een experiment uitgevoerd, waarmee voor het eerst met zekerheid werd aangetoond dat verstrengeling op grote afstand behouden blijft.⁷

2.1.2 Superpositie

Een quantumdeeltje kan zich in een combinatie van meerdere toestanden tegelijk bevinden. Zo bevindt de spin van een elektron in een magnetisch veld zich in een willekeurige combinatie van spin 'omhoog' en spin 'omlaag', totdat we een meting doen en één spintoestand meten. Dit is dus anders dan bij bijvoorbeeld een munt, waarbij we weten dat óf kop, óf munt boven ligt, maar niet een combinatie van beide die pas tot een bepaling van 'kop' of 'munt' leidt wanneer we naar de munt kijken. Dit principe van de quantummechanica heet superpositie. Ook dit gaat het menselijke voorstellingsvermogen te boven.

'Quantumtechnologie maakt dingen mogelijk die met klassieke technologie niet mogelijk zijn.'

⁷ 'Loophole-free bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres', Hensen, B. et al., Nature 526 (2015).

In het tekstkader worden verstrengeling en superpositie geïllustreerd aan de hand van Schrödingers kat.⁸ Katten staan in de illustratie symbool voor toestanden van microscopisch kleine quantumsystemen (van bijvoorbeeld fotonen of elek-

tronen). Voor grote, macroscopische systemen (zoals echte katten) zijn deze verschijnselen niet waarneembaar, ze mid-delen daarin als het ware uit.

Schrödingers kat: superpositie en verstrengeling

Superpositie

$$[\text{witte kat} \rangle + [\text{zwarte kat} \rangle$$

Dit is een witte kat, die zich in een superpositie bevindt van een toestand 'dood' en een toestand 'levend'. (Het plusje (+) geeft aan dat een toestand een superpositie is; de haken ([>) zijn een notitie om aan te geven wat één toestand is.) Zodra je naar de kat kijkt (dus: een meting uitvoert), neem je de kat óf dood óf levend waar: de superpositie is 'ingestort' en er blijft nog maar één van beide toestanden over.

Afzonderlijke superposities, maar geen verstrengeling

$$[\text{witte kat} \rangle + [\text{zwarte kat} \rangle \text{ en } [\text{witte kat} \rangle + [\text{zwarte kat} \rangle$$

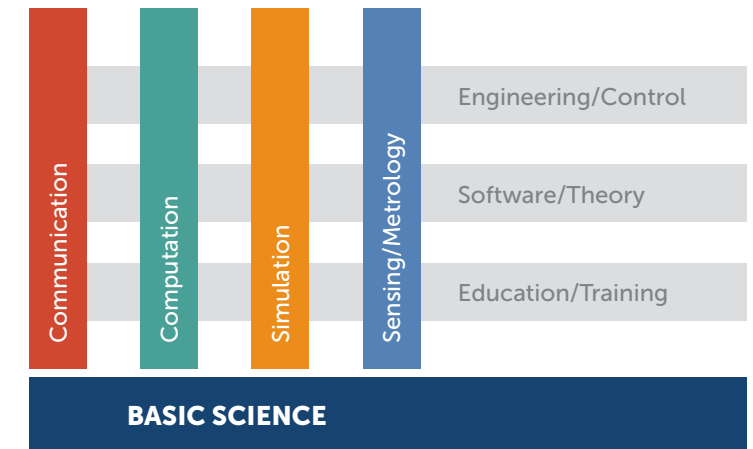
Dit zijn twee katten: een witte en een zwarte. Allebei afzonderlijk bevinden ze zich in een superpositie van dood en levend. Als je de witte kat bekijkt en daarmee zijn toestand 'bepaalt', weet je daarmee nog niets over de toestand van de zwarte kat. Deze katten zijn niet verstrengeld.

Twee verstrengelde katten

$$[\text{zwarte kat} \rangle + [\text{witte kat} \rangle$$

Dit zijn weer twee katten: een witte en een zwarte. De totale toestand is een superpositie van de toestand 'beide katten zijn dood' en 'beide katten zijn levend'. Als je de witte kat bekijkt, en deze blijkt dood, dan is de toestand van de zwarte kat instantaan ook 'dood'. Als de witte kat levend blijkt, dan is de toestand van de zwarte kat instantaan ook 'levend' - zelfs als beide katten zich op grote afstand van elkaar bevinden! Dit noemen we verstrengeling.

FIGUUR 3
Structuur van het Europese Quantum Flagship.



2.2 Vier veelbelovende toepassingsgebieden

Deze agenda deelt de quantumtechnologie in vier grote toepassingsgebieden in, conform het Europese Quantum Flagship: quantum computation, quantum communication, quantum simulation en quantum sensing & metrology. Daarnaast onderscheidt het Quantum Flagship drie werkvelden, die voor elk van de vier pilaren relevant zijn: engineering & control, software & theory en education & training. Onderliggend aan het geheel is wat het Flagship 'basic science' noemt. Figuur 3 illustreert de structuur van het Quantum Flagship.

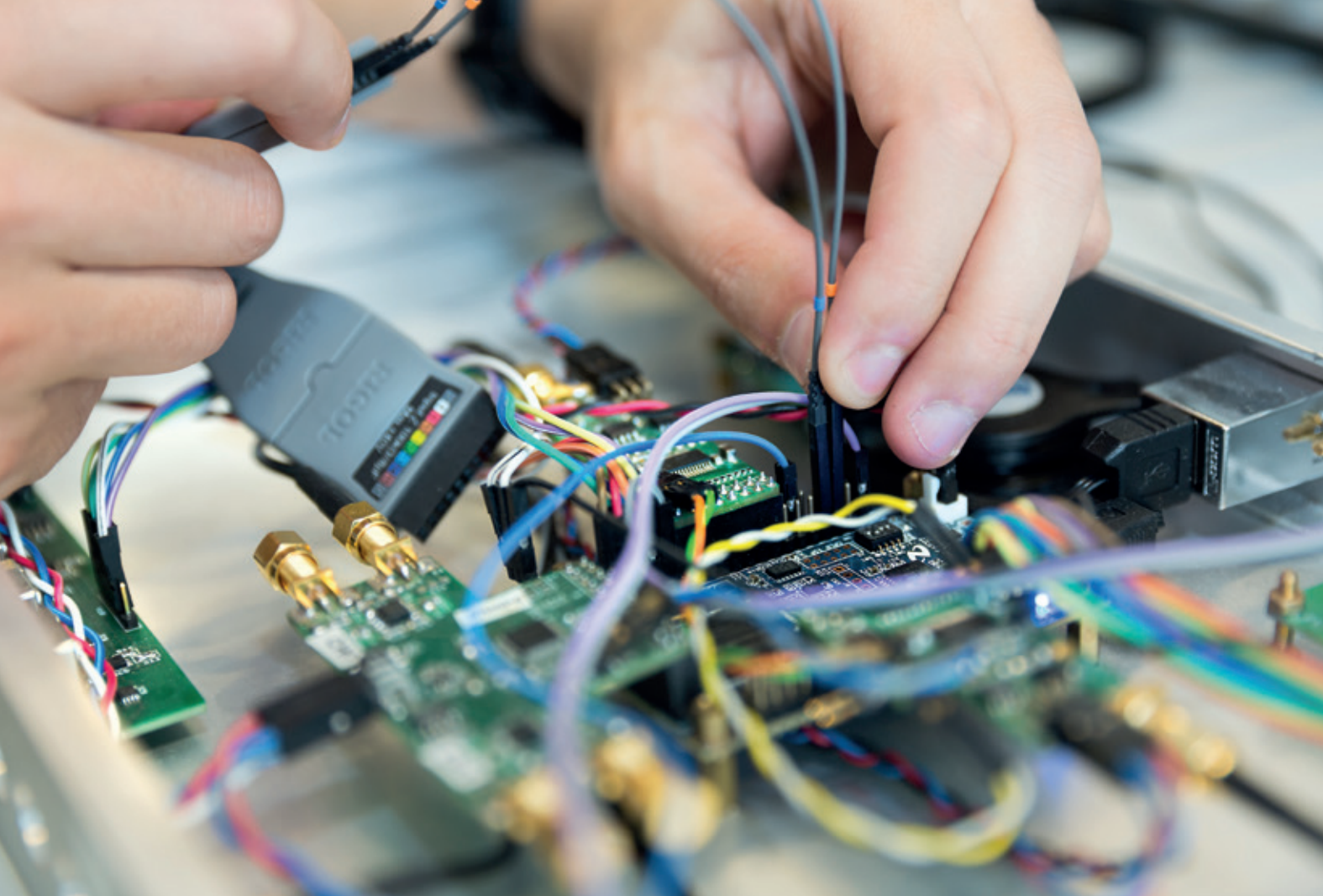
2.2.1 Universele quantumcomputers

Quantumcomputers maken op een slimme manier gebruik van quantummechanische effecten. Superpositie en verstrengeling spelen daarbij een belangrijke rol. Hierdoor functioneren ze op een fundamenteel andere manier dan klassieke computers. Een klassieke computer rekt met bits, die 0 of 1 kunnen zijn. Een quantumcomputer rekt met qubits (een afkorting voor 'quantum bits') en deze kunnen 0 en 1 tegelijk zijn, ofwel: ze kunnen zich in een superpositie van 0 en 1 bevinden. De qubits van een quantumcomputer kunnen zich collectief in een superpositie van alle mogelijke toestanden bevinden. Door de computer operaties op de qubits uit te laten voeren, kunnen daardoor in principe meerdere berekeningen tegelijk uitgevoerd worden, zoals het tekstkader over de quantumcomputer versus de klassieke computer illustreert.

Doordat ze meerdere bewerkingen tegelijk kunnen uitvoeren, kunnen quantumcomputers in potentie problemen oplossen die voor klassieke computers praktisch onoplosbaar zijn, omdat de berekeningen exponentieel meer tijd zouden kosten. Quantumcomputers zullen klassieke computers niet vervangen, maar kunnen bepaalde berekeningen mogelijk maken waar klassieke computers waarschijnlijk nooit krachtig genoeg voor zullen zijn. Dat kan leiden tot revolutionaire toepassingen, zoals het oplossen van complexe optimalisatievraagstukken of het voorspellen, simuleren en modelleren van het gedrag van moleculen, katalysatoren of nieuwe materialen. Universele quantumcomputers zijn digitaal en gebaseerd op zogenaamde 'gates'. Ze kunnen net als klassieke computers telkens opnieuw worden geprogrammeerd om nieuwe problemen op te lossen.

De vooruitgang op het gebied van quantumhardware maakt het waarschijnlijk dat er over enkele jaren quantumcomputers beschikbaar komen voor bepaalde toepassingen. Zoals klassieke computers onbruikbaar zijn zonder adequate software, zijn ook quantumcomputers nutteloos als er geen goede quantumsoftware beschikbaar is. Quantumhardware en -software zijn daarom beide onmisbaar om de belofte van quantum computing in te lossen.

⁸ De bekende Oostenrijkse natuurkundige Erwin Schrödinger deed in de jaren dertig van de vorige eeuw een beroemd gedachtenexperiment waarin een kat voorkomt; dit experiment is 'Schrödingers kat' gaan heten.



De quantumcomputer versus de klassieke computer

Een klassieke computer voert bewerkingen uit op bits, waarbij elke bit een waarde 0 of 1 heeft. Stel dat we met een klassieke computer een berekening doen met een bit met waarde 0. Als we dezelfde berekening ook moeten doen met een bit met waarde 1, dan moet de klassieke computer deze berekening helemaal apart opnieuw doen. Wanneer echter een quantumcomputer dezelfde bewerking uitvoert op een qubit (die in een superpositie van 0 en 1 is), dan krijg je als uitkomst tegelijkertijd de uitkomst van de berekening voor een bit met waarde 0 en waarde 1 - in superpositie. Ofwel: waar de klassieke computer in dit voorbeeld twee bewerkingen nodig heeft, kan de quantumcomputer het af met één bewerking. Dit voordeel groeit exponentieel met het aantal qubits dat wordt gebruikt: daar waar een klassieke computer met n bits n bewerkingen moet uitvoeren, kan de quantumcomputer er met n qubits in principe 2^n tegelijk doen. Of, anders gezegd: een quantumcomputer kan in principe 2^n keer sneller rekenen dan een klassieke computer. Er zit echter een addertje onder het gras.

De kneep is, dat zodra de bewerking gedaan is en de toestand van de qubits uitgelezen wordt, de superpositie verdwijnt en de qubits gezamenlijk terecht komen in één toestand. Het is daarom niet zo dat de quantumcomputer 'gewoon' een heel snelle, parallel rekenende computer is. De gemeten toestand moet immers wel de juiste uitkomst representeren. En daar spelen interferentie⁹ en software een rol. Quantumalgoritmes moeten ervoor zorgen dat het 'goede antwoord' overblijft (door constructieve interferentie) en dat 'verkeerde' antwoorden uitdoven (destructieve interferentie). Het schrijven van quantumsoftware is dan ook fundamenteel anders dan het schrijven van klassieke software; quantumsoftware gebruikt vaak compleet nieuwe en veelal tegenintuïtieve ideeën.

⁹ In de quantummechanica kan een deeltje ook als een materiegolf beschreven worden: het heeft tegelijkertijd eigenschappen van een deeltje en van een golf. Dit is de zogenoemde golf-deeltje-dualiteit. Bij golfverschijnselen kan interferentie optreden, wat versterking ('constructieve interferentie') of uitdoving ('destructieve interferentie') van een golf tot gevolg kan hebben.

De quantum computing stack

Quantumhardware en -software zijn beide onmisbaar om de belofte van quantum computing in te lossen. Waar de gemiddelde gebruiker van een klassieke computer alleen software ervaart die heel ver afstaat van het niveau van de individuele transistors in het apparaat, 'draait' tussen de gebruiker en de chip een scala aan algoritmes, die maken dat een muisklik resulteert in elektronische signalen op nanometerschaal, waardoor vervolgens bijvoorbeeld een email wordt geopend.

Ook quantumtechnologie kent deze gelaagdheid, geïllustreerd in de figuur¹⁰. De quantum computing stack omvat de verschillende 'lagen': van interactie met de buitenwereld via algoritmes en software tot en met de hardware controle over individuele qubits in de quantumchip. Quantumcomputers en quantumsimulators hebben zo'n stack, maar ook bij quantumnetwerken (waar op machineniveau opdrachten voor het verstrengelen van deeltjes of het uitlezen van een quantumtoestand worden gegeven, terwijl de gebruiker via een web interface toegang vraagt tot bepaalde data) is sprake van een software stack. Ook voor het gebruiken en kunnen uitlezen van quantumsensoren zijn verschillende hardware- en softwarelagen nodig, waarbij de complexiteit sterk afhankelijk is van de toepassing (denk aan een netwerk van quantumsensoren in een vliegtuig, ten behoeve van navigatie, waarmee op het hoogste

niveau de (auto-)piloot beslissingen neemt over koersveranderingen).

Toepassingen en use cases voor eindgebruikers vereisen de ontwikkeling van quantumalgoritmes en -applicaties, die zowel platformonafhankelijk ontwikkeld kunnen worden in de bovenste lagen van de stack, als ontwikkeld kunnen worden voor, en in combinatie met, specifieke quantum computing hardware. Daarnaast stimuleert de ontwikkeling van nieuwe quantumhardware in de onderste lagen van de stack continu vernieuwingen in de lagen daarboven. Uiteindelijk moeten deze twee ontwikkeltrajecten met elkaar worden verbonden voor een coherent innovatieproces.



2.2.2 Quantumsimulators

Terwijl een universele quantumcomputer telkens opnieuw kan worden geprogrammeerd om nieuwe en verschillende problemen op te lossen, is een quantumsimulator eigenlijk een quantumcomputer met (tot nu toe) in meeste gevallen één specifieke toepassing of doel - het is om zo te zeggen een 'special purpose' quantumcomputer. Zo worden er bijvoorbeeld quantumsimulators gebouwd waarmee bepaalde moleculaire interacties kunnen worden nagebootst of waarmee specifieke optimalisatieproblemen kunnen worden opgelost. Daarnaast spelen quantumsimulators een belangrijke rol bij de compilatie en optimalisatie van quantumsoftwareprotocollen ('quantum code'). Het concept van de quantumsimulator is direct terug te voeren op het oorspronkelijke idee van Richard Feynman in 1982: moeilijke

quantummechanische problemen kunnen veel beter worden opgelost met behulp van een ander quantumstelsel dan op een klassieke computer. Voorwaarde is wel dat het betreffende quantumstelsel onder zeer gecontroleerde omstandigheden is geconstrueerd en kan worden gemanipuleerd. Dergelijke quantumsimulators geven ons het gereedschap om veel-deeltjes problemen uit de vastestoffysica, quantumchemie, materiaalkunde en hoge-energiefysica op te lossen. Ze maken daarbij gebruik van quantummechanische verschijnselen - een quantumsimulator is immers per definitie een quantumstelsel.

Er zijn verschillende manieren waarop quantumsimulators kunnen worden gerealiseerd, bijvoorbeeld op basis van extreem koude atomen, elektronen met behulp van gepo-

¹⁰ Illustratie: Koen Bertels, 'A full system architecture', gepresenteerd in een workshop tijdens de International Conference on Parallel Processing (ICPP), Oregon USA, 13 augustus 2018.

lariseerde fotonen of met elektronen in artificiële roosters. Dankzij de quantummechanische interacties (gebaseerd op superpositie of verstrengeling) tussen de atomen, elektronen, of fotonen kunnen deze systemen andere complexe quantumsystemen simuleren.

Voor het maken van berekeningen kunnen de specifieke quantum devices ook als quantum-coprocessor gekoppeld worden aan een klassieke computer. Dit worden hybride quantumsimulators genoemd. Met behulp van een rekenkundige 'lus' via de quantum coprocessor kunnen complexe berekeningen worden uitgevoerd, die praktisch onmogelijk zijn met alleen klassieke processoren. Experimenteel zijn er al resultaten behaald, zoals het voorbeeld van een quantumsimulatie van een complexe berekening uit de quantumelectrodynamica in het tekstkader laat zien.

2.2.3 Quantumcommunicatie

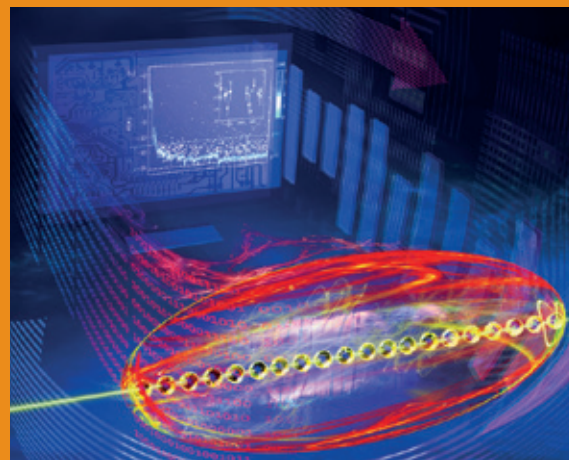
In quantumcommunicatie speelt het principe van verstrengeling een belangrijke rol. Qubits kunnen met elkaar verstrengeld worden, waardoor er correlaties tussen de quantumtoestanden van verschillende deeltjes tot stand gebracht kunnen worden over grote afstanden. Een andere eigenschap van qubits is, dat ze niet met behoud van superpositie

gekopieerd kunnen worden. Bijgevolg kan iedere poging om qubits te onderscheppen, te lezen en weer door te sturen gedetecteerd worden, door de toestanden van de ontvangen qubits aan het einde te vergelijken met de toestanden van de verzonden qubits. Quantumcommunicatie is dan ook in potentie veilig tegen inbreuk van buitenaf, al moet wel de identiteit van de zendende en ontvangende partij betrouwbaar zijn. Dit biedt grote mogelijkheden voor data-uitwisseling en databewerking met behoud van privacy van de gebruikers. Het verzenden van qubits over lange afstanden is echter niet eenvoudig; hiervoor wordt gewerkt aan speciale 'quantum-versterkers'.

Naar verwachting zullen de verschillende quantumcommunicatie-netwerken in de toekomst uitgroeien tot een wereldomspannend 'quantuminternet', dat onder meer veilige communicatie, veilige online applicaties en veilige positie-verificatie mogelijk zal maken. Er zijn ook al andere toepassingen bekend, zoals de synchronisatie van atoomklokken of de realisatie van een groot quantum computing netwerk door afzonderlijke quantumcomputers op verschillende locaties onderling met elkaar te verbinden. Dankzij verstrengeling zou het daarin mogelijk zijn om – zonder dat iemand onopgemerkt kan meekijken – berekeningen uit

Een hybride quantumsimulator met twintig ionen controleert zelf zijn antwoorden

Een onderzoeksgroep in Innsbruck (waarin een oud-promovendus uit Eindhoven werkzaam is) gebruikte een programmeerbare quantumsimulator met twintig ionen als co-processor om quantummechanische berekeningen uit te voeren die de capaciteit van klassieke processoren te boven gaat¹¹. Met deze hybride quantumsimulator werd een modelprobleem uit de quantumelectrodynamica opgelost, wat eerder alleen mogelijk was met een digitale quantumsimulator met 220 gates. Door de ontwikkeling van slimme algoritmen was deze hybride simulator zelf in staat de resultaten te verifiëren. (Figuur: University of Innsbruck, all copyrights reserved.)

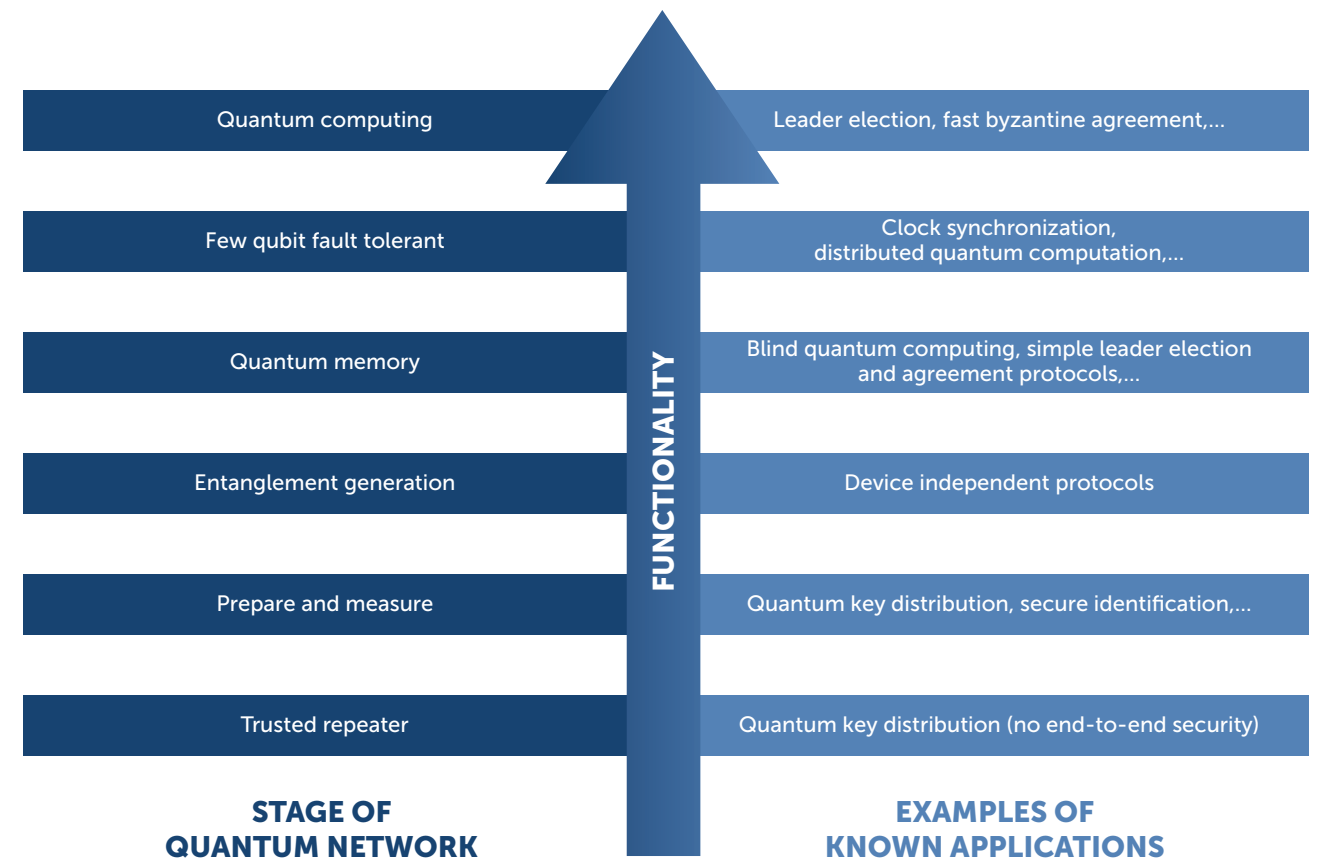


¹¹ Self-verifying variational quantum simulation of lattice models', C. Kokail et al. Nature 569 (2019).

te voeren op quantumcomputers op een andere locatie. Ook telescopen zouden via een quantuminternet wereldwijd aan elkaar gekoppeld kunnen worden om samen een reusachtige telescoop te vormen, die ongekend diep het heelal in kan kijken. Figuur 4, uit een recent visie paper in Science, laat de verschillende ontwikkelingsstadia van een quantuminternet en enkele bijbehorende toepassingen zien. We staan momenteel aan het begin van deze spannende ontwikkeling (het niveau 'Trusted repeater' in de figuur).

Op diverse plekken in Nederland en de wereld bouwen onderzoekers aan quantumnetwerken. De verwachting is dat de eerste rudimentaire netwerken die de principes

en functionaliteit van quantuminternet kunnen testen tot en met het vierde niveau ('Quantum memory stage' in Figuur 4) de komende jaren zullen verrijzen. Nederland loopt op dit moment voorop met het maken van een dergelijk netwerk via glasvezelverbindingen, heeft een uitstekende kennispositie vanuit klassieke netwerken met onder andere AMS-IX, en heeft de uitgelezen mogelijkheid om een grote rol te spelen in de opkomst en opbouw van een wereldwijde quantuminternet-industrie.



FIGUUR 4 Verschillende stadia van quantumnetwerken (links) met voorbeelden van toepassingen die in elk van de stadia mogelijk worden (rechts). Figuur uit Wehner et al., Science 362, 303 (2018).



Delftse wetenschappers realiseren als eersten 'on demand' quantumverstregeling

Onderzoekers van QuTech in Delft zijn erin geslaagd om quantumverstregeling tussen twee quantumchips sneller te genereren dan dat die verstregeling verloren gaat. Verstregeling – door Einstein ooit omschreven als 'spooky action at a distance' – is het fenomeen dat bij een (toekomstig) quantuminternet voor kracht en fundamentele veiligheid zal zorgen. Via een nieuw, slim verstregelingsprotocol en zorgvuldige bescherming van die verstregeling, zijn deze onderzoekers de eersten ter wereld die een dergelijke quantumlink 'on demand' kunnen leveren. Dit opent de deur naar het verbinden van meerdere quantum nodes en daarmee naar het eerste

echte quantumnetwerk ter wereld. Ze publiceerden hun resultaten in juni 2018 in Nature.

In 2015 haalde deze Delftse onderzoeksgroep ook al het wereldnieuws.^{12,13} De onderzoekers waren de eersten die quantumverstregeling tussen elektronen genereerden over een lange afstand (1,3 kilometer), waardoor ze experimenteel bewijs konden leveren van quantumverstregeling. Dat experiment is de basis van hun huidige aanpak om een quantuminternet te ontwikkelen: individuele elektronen op afstand (in diamant-chips) worden verstregeld, met lichtdeeltjes als 'tussenpersonen'.

2.2.4 Quantumsensoren

Quantumsensoren zijn instrumenten waarmee variaties in de omgeving kunnen worden waargenomen, zoals veranderingen in temperatuur, straling, versnelling, tijd (klokken) en elektrische of magnetische velden. In tegenstelling tot klassieke sensoren maken quantumsensoren gebruik van quantumverschijnselen, zoals verstregeling, om deze variaties te kunnen waarnemen. Quantumsensoren onderscheiden zich door hun hoge gevoeligheid, wat nauwkeurigere metingen mogelijk maakt, en door hun hoge resolutie, wat het doormeten van extreem kleine structuren (zoals DNA) mogelijk maakt.

Prototypes van meetsystemen in laboratoria, die gebruik maken van quantumsensoren, laten al zien dat ze op verschillende vlakken beter presteren dan klassieke systemen. Een eerste generatie systemen die gebruik maken van quantumsensoren is ondertussen commercieel verkrijgbaar, bijvoorbeeld versnellingsmeters en atoomklokken gefabriceerd door het Franse bedrijf Muquans¹⁴ of door het Amerikaanse AOSense¹⁵, maar het merendeel van de experimentele meetsystemen is echter nog niet klaar voor commercieel gebruik. Om optimaal gebruik te kunnen maken van nieuwe mogelijkheden, is het niet alleen van belang dat er robuuste en betrouwbare quantumsensoren en quantum-

chips worden ontwikkeld, maar ook dat er toegewijde hardware en software wordt ontwikkeld voor het aansturen en uitlezen van deze chips en sensoren.

De continue ontwikkelingen in de quantumtechnologie maken het waarschijnlijk dat er de komende jaren meer quantumsensoren beschikbaar komen die beter presteren dan klassieke sensoren. Atoomklokken geven absolute referentiepunten om hoogtes mee te bepalen, zullen draadloze communicatie en financiële transacties helpen beveiligen wanneer gps tijdelijk uitvalt, of zullen synchronisatie van radiotelescopie drastisch verbeteren. Aan sensoren voor de hightech machinebouw en halfgeleiderindustrie, waar metrologie de grootste uitdaging is, wordt onderzocht door onder andere TNO. Betere navigatiesystemen, radarsystemen en medische detectietechnieken komen op langere termijn binnen bereik. Het feit dat er nog altijd nieuwe typen quantumsensoren worden ontdekt, met nieuwe toepassingen, bewijst dat fundamenteel en toegepast onderzoek naar deze technologie vruchten afwerpt.

2.3 Fundamentele en technologische uitdagingen

Deze paragraaf zet voor de vier toepassingsgebieden uit de vorige paragraaf op een rij wat technisch al mogelijk is en waar de grootste wetenschappelijke en technologische uitdagingen liggen.

2.3.1 Universele quantumcomputers

Op diverse plekken in academia en de industrie zijn ondertussen kleine quantumcomputers gebouwd; systemen in de orde van tientallen qubits van variërende kwaliteit. Regelmatig wordt de lancering van grotere systemen aangekondigd. Verschillende partijen maken daarvoor gebruik van verschillende technologieplatformen. De twee platformen waarmee momenteel de grootste systemen gemaakt kunnen worden, werken met zogenaamde 'ion traps' of met supergeleidende qubits. Grote tech-bedrijven zoals IBM en Google zetten in op supergeleidende qubits en hebben een eerste, voorlopige versie van een quantumcomputer beschikbaar gesteld via de cloud, inclusief programmeertaal. Intel volgt twee technologieën: naast de supergeleidende qubits ook quantum dots in silicium. Dat laatste is interessant vanwege de verwachte schaalbaarheid met bestaande chipfabricage-technologie: de semiconductie-industrie is voorna-

melijk gebaseerd op siliciumplatformen. Microsoft zet in op een andere technologie, namelijk de topologische quantumcomputer. Dit is een potentieel zeer stabiel platform, maar het is tot nu toe nog niet gelukt om een topologische qubit te creëren. Microsoft ontwikkelt ook quantumalgoritmes die toepasbaar zijn op verschillende qubit-platforms en werkt aan een programmeertaal, Q#.

De grootste uitdagingen voor de ontwikkeling van een universele quantumcomputer zijn:

Ontwikkeling van geavanceerde quantumfoutcorrectie-algoritmes

Qubits zijn intrinsiek gevoelig voor ruis, omdat een qubit dankzij superpositie elke combinatie van 0 en 1 kan zijn. Kleine afwijkingen in de berekeningen kunnen daardoor leiden tot foutieve antwoorden en soms zijn de qubits in een systeem niet lang genoeg stabiel om een berekening uit te kunnen voeren. Daarom zijn er foutcorrectie-algoritmes ontwikkeld, waarin een groter aantal ondersteunende qubits gebruikt wordt om de fouten te corrigeren die optreden in de qubits waarmee de berekeningen worden gedaan; het systeem wordt als het ware fouttolerant gemaakt. Dit betekent wel een overhead in aantallen qubits: schattingen gaan ervan uit dat er zo'n honderd tot tienduizend ruizige qubits nodig zijn om één logische qubit te creëren. Voor praktische applicaties van quantumalgoritmes moet op deze manier de kans op een foute qubit teruggebracht worden naar één op de tienduizend of minder.

Ontwikkeling van NISQ-systemen met enkele honderden qubits

Quantumfoutcorrectie en fouttolerante quantum computation zijn onmisbaar om grootschalige universele quantumcomputers te laten werken, maar de ontwikkelde foutcorrectie-algoritmes kunnen nog niet ingezet worden in de kleine quantumcomputers die op dit moment wel al beschikbaar zijn. Er zijn simpelweg niet voldoende ruizige qubits voorhanden om er met de huidige algoritmes één logische qubit van te kunnen maken. Daarbij zijn de qubits niet stabiel genoeg om door fouttolerante algoritmes uitgevoerd te worden. Quantumcomputers zullen daarom op korte termijn dus nog 'ruizig' zijn. Daarom wordt deze periode ook wel het NISQ-tijdperk genoemd, of het Noisy Intermediate Scale Quantum Era - een term die recent werd aangedragen door John Preskill, hoogleraar aan Caltech. Algemeen luidt de verwachting, dat er binnen afzienbare tijd NISQ-systemen met een paar honderd redelijk stabiele qubits gerealiseerd kunnen worden.

¹² Zie: <https://www.nytimes.com/2014/05/30/science/scientists-report-finding-reliable-way-to-teleport-data.html>

¹³ Zie: <https://www.nytimes.com/2015/10/22/science/quantum-theory-experiment-said-to-prove-spooky-interactions.html>

¹⁴ Zie: <https://www.muquans.com/>

¹⁵ Zie: <https://aosense.com/>

Hoewel deze systemen nog steeds niet fouttolerant zijn, zijn ze waarschijnlijk lang genoeg stabiel om enkele berekeningen uit te kunnen voeren. Mogelijke eerste toepassingen zijn te vinden in de machine learning.

Verlaging van het foutpercentage en verhoging van het aantal qubits

Het maken van een grootschalige universele quantumcomputer met volledige foutcorrectie en fouttolerante software is een enorme technologische uitdaging. Door vele fysieke qubits te laten samenwerken kunnen met een universele quantumcomputer grootschalige berekeningen worden gedaan, zelfs met qubits die af en toe een fout maken. Hiervoor moet het foutpercentage van de huidige systemen nog met een factor tien tot honderd verder worden teruggebracht. Bovendien moet het aantal (fysieke) qubits met minstens honderdduizend stuks vergroot worden om genoeg logische qubits te creëren, opdat de quantuminformatie lang genoeg wordt vastgehouden. Eén van de grootste uitdagingen hiervoor is ‘connectivity’, of interconnects. Zonder doorbraken op dit vlak kan er niet opgeschaald worden; onder andere QuTech en Intel hebben dit erkend als grote uitdaging.

Ontwikkeling van opschaalbare quantumcomputer-architectuur en -elektronica

Net als de klassieke computer is de quantumcomputer opgebouwd uit diverse lagen, waarin abstracte (quantum) algoritmes stap voor stap vertaald worden naar de controle-

signalen waarmee de qubits aangestuurd worden. Hoe deze architectuur, inclusief compilers, run-time en foutcorrectie precies moet worden vormgegeven is een belangrijke vraag, waarop momenteel slechts enkele voorlopige en gedeeltelijke antwoorden gegeven kunnen worden. De architectuur moet vertaald worden naar een concrete, schaalbare implementatie inclusief maatwerkelektronica.

Uitdagingen op het gebied van de systems engineering

De complexiteit van een universele quantumcomputer is te vergelijken met die van bijvoorbeeld een satelliet of een EUV-lithografiemachine. Eén van de grootste uitdagingen voor het bouwen van universele quantumcomputers is daarom het systeemontwerp en de integratie van alle hardware en control software. We zitten nu pas in de conceptiefase van deze technologie maar met het toenemen van het aantal qubits zullen vele aspecten invloed op elkaar hebben: qua chipdesign zullen materiaalkeuzes en processtappen invloed hebben op de coherentietijd en nauwkeurigheid van de qubits. De thermische last van de stuursignalen naar de quantumchips is gekoppeld aan de beschikbare koelcapaciteit. De complexiteit van de elektronica en control software hangt samen met de kwaliteit van de chips en de analyse van de meetsignalen voor foutcorrectie vereist krachtige computers en slimme algoritmes met een grote dataverwerkingscapaciteit en een zeer snelle feedback. Het ontwerpen en realiseren van een dergelijk complex product vereist een systems engineering aansturing waarbij trade-offs optreden



en systeemkeuzes gemaakt worden – in samenhang en niet alleen op de deelelementen. TNO en TU Delft hebben dit erkend als grote uitdaging en zetten met het project Quantum Inspire de eerste stappen op het gebied van een brede systeemaanpak.

Een quantumcomputer met honderdduizend qubits wordt een bijzonder complexe machine. Alle onderdelen van een toekomstige quantumcomputer moeten geïntegreerd worden in een werkend systeem. Trade-offs tussen de verschillende lagen in de quantumcomputer moeten vanaf de ontwerpfase worden meegenomen. Over het algemeen wordt aangenomen dat het nog minimaal tien jaar duurt voordat er een grootschalige, stabiele quantumcomputer gebouwd kan worden. Wel zijn er wereldwijd diverse klassieke systemen beschikbaar waarop kleine quantumcomputers gesimuleerd worden. QuTech’s Quantum Inspire¹⁶ platform is er daar één van.

Efficiënt kunnen invoeren van grote datasets

Een klein aantal qubits kan in een quantumcomputer volstaan om een exponentieel grotere hoeveelheid data te representeren (dankzij superpositie). Er is op dit moment echter geen efficiënte methode om een grote, klassieke dataset om te zetten in een quantumtoestand. Voor bepaalde rekenproblemen die veel data-input vergen, zou de tijd die nodig is om een quantumtoestand te creëren momenteel

de rekentijd domineren. Grote datasets kunnen daardoor niet efficiënt in een quantumcomputer ingevoerd worden.

Verdere uitbreiding van het aantal quantumalgoritmes

Als de toestand van een quantumcomputer uitgelezen wordt, blijft er van de oorspronkelijke, complexe quantumtoestand slechts één enkel, klassiek resultaat over. Om de rekenkracht van quantumcomputers te kunnen benutten, zijn bijzondere algoritmes nodig. Het ontwikkelen van dergelijke quantumalgoritmes is een kritieke aangelegenheid, die veel specifieke kennis vereist. De afgelopen drie decennia zijn er al verschillende quantumalgoritmische technieken ontwikkeld. Met behulp van deze quantumalgoritmische gereedschapskist kunnen we met een quantumcomputer vele problemen efficiënter proberen op te lossen. Dit is niet anders dan hoe we software ontwikkelen voor klassieke computers en het vergt veel inventiviteit. Het Amerikaanse NIST-instituut houdt een uitgebreide online lijst bij van tot nu toe ontwikkelde quantumtechnieken.¹⁷ Om de potentie van NISQ-computers en grootschaliger quantumcomputers daadwerkelijk te kunnen benutten, is het echter noodzakelijk dat de verzameling bekende quantumtechnieken verder uitgebreid wordt en dat we werken aan het toepassen van die technieken op praktische use cases. Dit vergt nader onderzoek naar nieuwe technieken, maar ook naar de beperkingen van quantumcomputers voor bepaalde doelgebieden. Ook zal er gekeken moeten worden naar problemen die in de praktijk voorkomen.

Quantum Inspire: één systeem voor meerdere soorten qubits

Bij QuTech in Delft wordt op dit moment gewerkt aan een prototype quantumcomputer waarbij een brede systeemaanpak centraal staat. Binnen het project werken onderzoekers en engineers uit verschillende disciplines samen aan een systeem dat in staat is om eenvoudige quantumalgoritmes te emuleren op een emulator én uit te voeren op een echte hardware chip. Het systeem is modulair opgebouwd zodat algoritmes uitgevoerd kunnen worden op chips op basis van supergeleidende qubits, spin qubits en NV-center qubits. Op dit moment worden algoritmes nog geëmuleerd en wordt het systeem uitgebreid om te gaan werken met echte qubits. Quantum Inspire maakt gebruik van de nationale supercomputer Cartesius van SURF, waarbij een quantumcomputer met een omvang tot 37 qubits wordt nagebootst.



¹⁶ Zie: www.quantum-inspire.com

¹⁷ Zie: www.quantumalgorithmzoo.org

Op de kortere termijn zal dit vooral betrekking hebben op NISQ-technologie. Berekeningen met NISQ-computers vereisen weer een eigen set van algoritmes, en dus hun eigen onderzoek en ontwikkeling.

Ontwikkeling van methoden om quantumsoftware te verifiëren en testen

Het 'debuggen' van klassieke software gebeurt door het geheugen uit te lezen tijdens het uitvoeren van het programma. Dit is voor een quantumcomputer niet mogelijk, omdat het uitlezen van de toestand tijdens het uitvoeren van een algoritme het proces zou verstoren. Een quantumtoestand kan niet simpelweg gekopieerd worden om gecontroleerd te worden (dit heet het 'no-cloning theorema'). Ook het verifiëren van het eindresultaat van een grootschalige quantumcomputer is niet triviaal: het resultaat kan vaak niet even op een klassieke computer nagerekend worden, omdat een quantumcomputer immers dingen kan die een klassieke computer niet kan. Daardoor zijn nieuwe methoden om quantumsoftware te 'debuggen' en testen essentieel voor de ontwikkeling van grootschalige quantumcomputers.

Ontwikkeling van intuïtieve gebruikersinterfaces

Om een quantumcomputer te kunnen bedienen, hebben gebruikers behoefte aan een intuïtieve interface. Dit is een uitdaging vanwege de tegen-intuïtieve aard van quantumfysica, waar quantumbits tegelijk 0 en 1 kunnen zijn. Bij de klassieke computer zijn mentale modellen en metaforen zoals folders, desktops, en windows bijzonder krachtig gebleken. Dergelijke modellen en metaforen zullen ook cruciaal blijken voor het toegankelijk maken van quantumcomputers.

2.3.2 Quantumsimulators

De verst ontwikkelde quantumsimulators zijn op dit moment gebaseerd op koude atomen en ionen, die relatief ongevoelig zijn voor verstoringen van buitenaf. Bovendien zijn deze methodes al enkele tientallen jaren in ontwikkeling. De huidige quantumsimulators hebben tientallen en maximaal ongeveer honderd ionen of atomen. Deze systemen zijn echter nog niet programmeerbaar, dus niet toepasbaar voor het oplossen van een meer algemene, grotere set van

problemen. Er zijn ook systemen waarin ionen en atomen worden gecombineerd, de voordelen van beide systemen benuttend. Andere systemen die voor de grootschalige quantumcomputer worden onderzocht (zoals spins in quantum dots¹⁸, spins in diamant supergeleidende circuits¹⁹, en elektronen in artificiële roosters²⁰) kunnen ook dienen als platform voor quantumsimulaties, waarbij voor elk systeem de vraag is wat de meest gunstige qubit is. De verschillende platformen zijn vanwege hun specifieke eigenschappen geschikt voor verschillende open vraagstukken.

Binnen het Europese Quantum Flagship streeft het PASQuaS-project²¹ ernaar binnen vier jaar een compleet programmeerbare quantumsimulator met duizend atomen of ionen te realiseren. De ambitie is dat deze quantumsimulator voor het eerst 'quantumvoordeel' laat zien, aan de hand van optimalisatieproblemen die met klassieke methoden waarschijnlijk niet opgelost kunnen worden. Quantumsimulators kunnen ook gebruikt worden om andere systemen te ontwerpen, zoals halfgeleiderstructuren. Het QOMBS-project²² in het Quantum Flagship ontwikkelt een quantumsimulator van koude atomen in een rooster, om daarmee een nieuw zogenaamde quantum cascade laser frequency comb te ontwerpen. Deze complexe technologie kan een grote impact hebben op de ontwikkeling van quantumcommunicatie en quantumsensoren.

De grootste uitdagingen voor de ontwikkeling van quantumsimulators zijn:

Opschaling richting duizend qubits

De ontwikkeling en realisatie van quantumsimulators met duizend qubits is een volgende stap. Hoewel deze qubits niet volledig controleerbaar hoeven zijn voor de simulaties is de uitdaging niettemin zeer complex, ook wat de engineering betreft. Het is geen sinecure om zulke grote systemen ingevangen te houden, om te voorkomen dat ze te veel interactie met de buitenwereld hebben en om de resultaten uit te kunnen lezen en interpreteren. Daarnaast is er ontwikkeling nodig om op voldoende grote schaal programmeerbare qubits te kunnen maken, waarbij bijvoorbeeld atomen

en ionen door impulsen van buitenaf geprogrammeerd kunnen worden door middel van elektromagnetische signalen. Een platform dat is gebaseerd op elektronen in artificiële roosters biedt hier veel mogelijkheden, daar deze volledig automatisch gemaakt kunnen worden.²³ Voor veelbelovende simulatorsystemen gebaseerd op qubits op chips zijn de uitdagingen vergelijkbaar met die genoemd in 2.3.1.

Ontwikkeling van nieuwe quantumalgoritmes

Parallel aan de ontwikkeling van de benodigde hardware dienen ook de quantumalgoritmes voor quantumsimulators van deze schaal ontwikkeld te worden. Blauwdrukken voor dit soort algoritmes worden nu ontwikkeld, bijvoorbeeld door onderzoekers binnen QuSoft en QuTech. Ook TNO en de Universiteit Leiden werken hieraan.

Verificatie en validatie

Wanneer de complexiteit van quantumsimulaties die van klassieke simulaties overtreft, dient zich de belangrijke vraag aan of we het resultaat van de quantumsimulaties kunnen vertrouwen. Er is een grote behoefte aan methodes om de betrouwbaarheid van quantumsimulaties te verifiëren en valideren.

2.3.3 Quantumcommunicatie

Op weg naar een wereldomspannend quantuminternet zullen verschillende stadia doorlopen worden, waarbij met elke stap nieuwe applicaties mogelijk worden (zie Figuur 4). De simpelste vorm van quantumcommunicatie is het met behulp van de quantumeigenschappen van bijvoorbeeld lichtdeeltjes beveiligen van klassieke informatie, zoals verzonden via glasvezels of satellieten. Deze toepassing heet Quantum Key Distribution (QKD). Dit is een belangrijke technologie, waarbij een apart informatiekanaal, dat is gebaseerd op de quantumeigenschappen van licht, wordt gebruikt om een (klassieke) encryptie-sleutel te verzenden. Zodra iemand het kanaal probeert af te luisteren, wordt dat direct duidelijk. QKD is nuttig voor het beveiligen van kritieke data, die ook in de toekomst veilig moet blijven. Daarom is de verwachting dat de technologie in eerste instantie vooral zal worden toegepast in de financiële sector en voor defensie- en veiligheidstoepassingen. Overigens speelt ook post-quantum cryptografie een belangrijke rol bij het beveiligen van data tegen inbreuk door quantumcomputers in de toekomst. Hierover staat meer in paragraaf 3.2.1.

Europa neemt een leidende positie in met betrekking tot de ontwikkeling van QKD-technologie, mede dankzij het Zwitsers/Koreaanse bedrijf ID Quantique dat al een eerste generatie QKD-producten in de markt aanbiedt. Voor het ontwikkelen van een pan-Europees QKD-netwerk wordt onderzocht voor welke toepassingen QKD nog meer relevant kan zijn; welke dat zijn, zal de komende jaren steeds duidelijker worden. Ook wordt de technologie doorontwikkeld zodat potentieel zwakke plekken, zoals de afhankelijkheid van een juiste werking van de fotodetectoren, kunnen worden weggewerkt. De recente uitvinding en eerste werkende voorbeelden van zogenaamde 'measurement-device-independent QKD' zijn hier een veelbelovend voorbeeld van.

Communicatienetwerken die op grote schaal de unieke quantumeigenschappen maximaal benutten vergen meer complexe technologie. Figuur 5 schetst de elementen van een quantumnetwerk. Net als het klassieke internet bestaat het uit verschillende onderdelen: glasvezelverbindingen en/of 'free-space' verbindingen, 'quantum repeaters' die het signaal onderweg versterken, 'end-nodes', ofwel kleine quantumcomputers van waaruit signalen gestuurd kunnen worden en waarmee berekeningen aan de qubits gedaan kunnen worden, 'switches' die de datapakketjes in het netwerk de juiste kant op sturen, enzovoorts. De noodzakelijke ingrediënten voor het ontwikkelen van grotere quantumnetwerken en een quantuminternet zijn in Nederland aanwezig. Naast de hardwarecomponenten moet er voor het quantuminternet ook specifieke software ontwikkeld worden; enerzijds om de hardware aan te sturen en het internetverkeer te regelen, anderzijds voor het draaien van applicaties op de verschillende quantumcomputersystemen in het netwerk.

¹⁸ Nature, 'Quantum simulation of a Fermi-Hubbard model using a semiconductor quantum dot array', T. Hensgens et. al., Nature 548, 70–73 (2017).

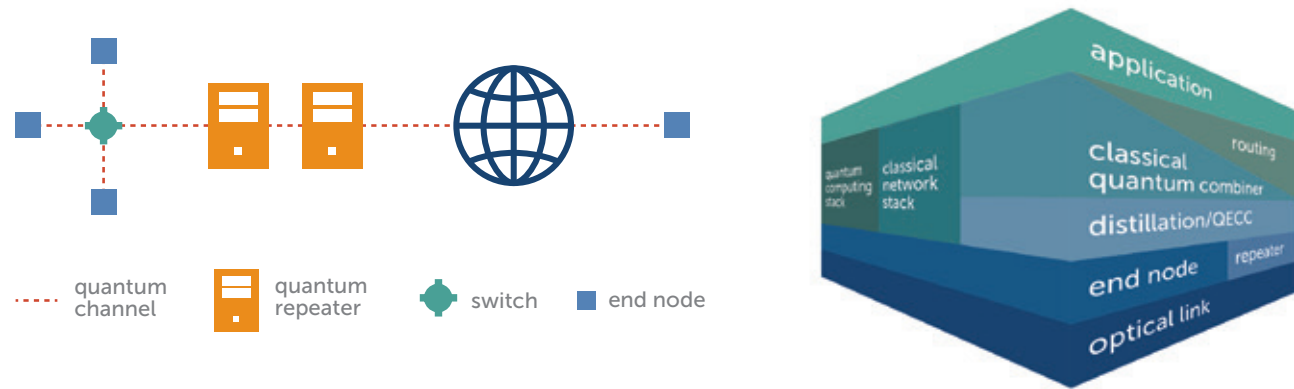
¹⁹ Zie: www.nature.com/articles/d41586-018-05979-0, www.nature.com/articles/nphys2251

²⁰ Zie: www.nature.com/articles/nphys4105, www.nature.com/articles/s41567-018-0328-0

²¹ Zie: <https://pasquans.eu>

²² Zie: www.qombs-project.eu/index.php/Home

²³ Zie: www.nature.com/articles/nnano.2016.131



FIGUUR 5
Schematische weergave van de basiselementen van een quantuminternet (links: hardwarecomponenten; rechts: quantuminternet stack). Figuren uit Wehner et al., Science 362, 303 (2018).

De grootste uitdagingen voor het realiseren van een quantuminternet zijn:

Het realiseren van verstrengeling over langere afstanden

Het huidige record voor langdurige verstrengeling tussen twee quantumgeheugens over een glasvezelkabel staat op 1,3 km. De eerstvolgende uitdaging is het opschalen van de quantumlink tussen twee qubits over een standaard glasvezel tot afstanden van 30 tot 100 kilometer. Hiervoor zijn aanpassingen van de frequentie (kleur) en stabilisatie van de fotonen noodzakelijk. Voor grotere afstanden zijn quantumversterkers nodig. Deze zijn fundamenteel anders dan klassieke versterkers, aangezien elke bewerking 'onderweg' de verstrengeling tussen twee qubits verbreekt. Dit kan opgelost worden door een proces van 'wisseling van verstrengeling' in een tussenstation: als eindpunt A is verstrengeld met versterker R, en versterker R ook verstrengeld is met eindpunt B, dan kan R de verstrengeling tussen A en B aan elkaar 'lijmen'. Daartoe is gedurende een korte tijd een quantumgeheugen noodzakelijk in versterker R.

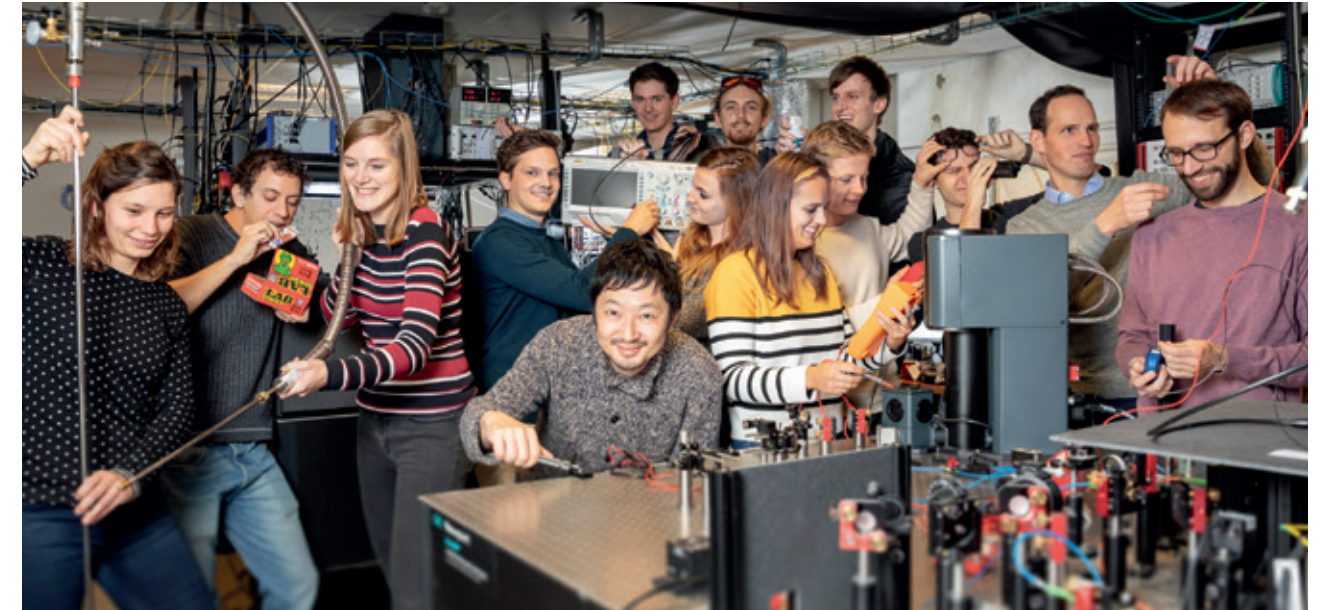
Het realiseren van complexe eindpunten, quantumprocessors van het quantumnetwerk

Voor de eerste nuttige toepassingen (bijvoorbeeld veilige identificatie en communicatie) van een quantuminternet is

het voldoende dat de eindpunten van een quantumverbinding (de quantumprocessors) uit een enkel qubit bestaan. Voor complexere bewerkingen en extra functionaliteit (zoals bijvoorbeeld 'blind quantum computing' en distributed quantum computing) zijn quantumprocessors van enkele qubits en een quantumgeheugen nodig. Het kunnen uitvoeren van foutcorrectie in de eindpunten van de quantum-links is een volgende stap in complexiteit. Hiervoor zijn processoren met meerdere onderling verstrengelde qubits nodig.

Architectuur van het quantumnetwerk

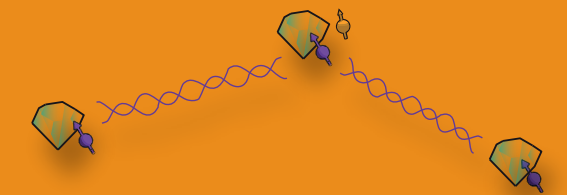
Naast de hardwarecomponenten moet voor het quantuminternet ook specifieke software ontwikkeld worden, die de hardware aanstuurt en het internetverkeer regelt. In Delft is een IETF-concept²⁴ van 's werelds eerste 'link layer protocol' geschreven²⁵, waarmee het creëren van verstrengeling van een fundamenteel natuurkundig experiment een goed gedefinieerde netwerkdienst wordt. Andere onderwerpen zijn het ontwerp van de volledige quantuminternet stack, waarbij zowel hardware als software een rol spelen, evenals de interoperabiliteit tussen de verschillende netwerklagen. Daarnaast dient er een quantumveilige authenticatiemethode ontwikkeld te worden, zodat de beveiliging van de toegang tot het quantumnetwerk voor externe gebruikers ook op quantumeigenschappen is gestoeld, en niet op na



Het eerste quantumnetwerk ter wereld gebaseerd op verstrengeling

In de laboratoria van QuTech op de campus van de TU Delft bouwen onderzoekers aan het eerste verstrengelings-quantumnetwerk ter wereld. In dit netwerk worden defecten in diamant (zogenaamde 'nitrogen-vacancy centers') gebruikt als quantumbits; met behulp van licht kunnen deze quantumbits verstrengeld worden (figuur rechtsonder). In een netwerk van drie zogeheten 'quantum nodes' wil het team een verstrengelde toestand over het gehele netwerk maken. Daarnaast is deze configuratie geschikt om een 'quantum repeater' te testen.

Hierbij wordt de verstrengeling als het ware doorgevoerd om een grotere afstand te overbruggen. Voor het realiseren van een grootschalig quantuminternet is dit een essentiële stap.



te bootsen, of te kraken, klassieke methoden, zoals wachtwoorden, numerieke codes, of klassieke, fysieke objecten.

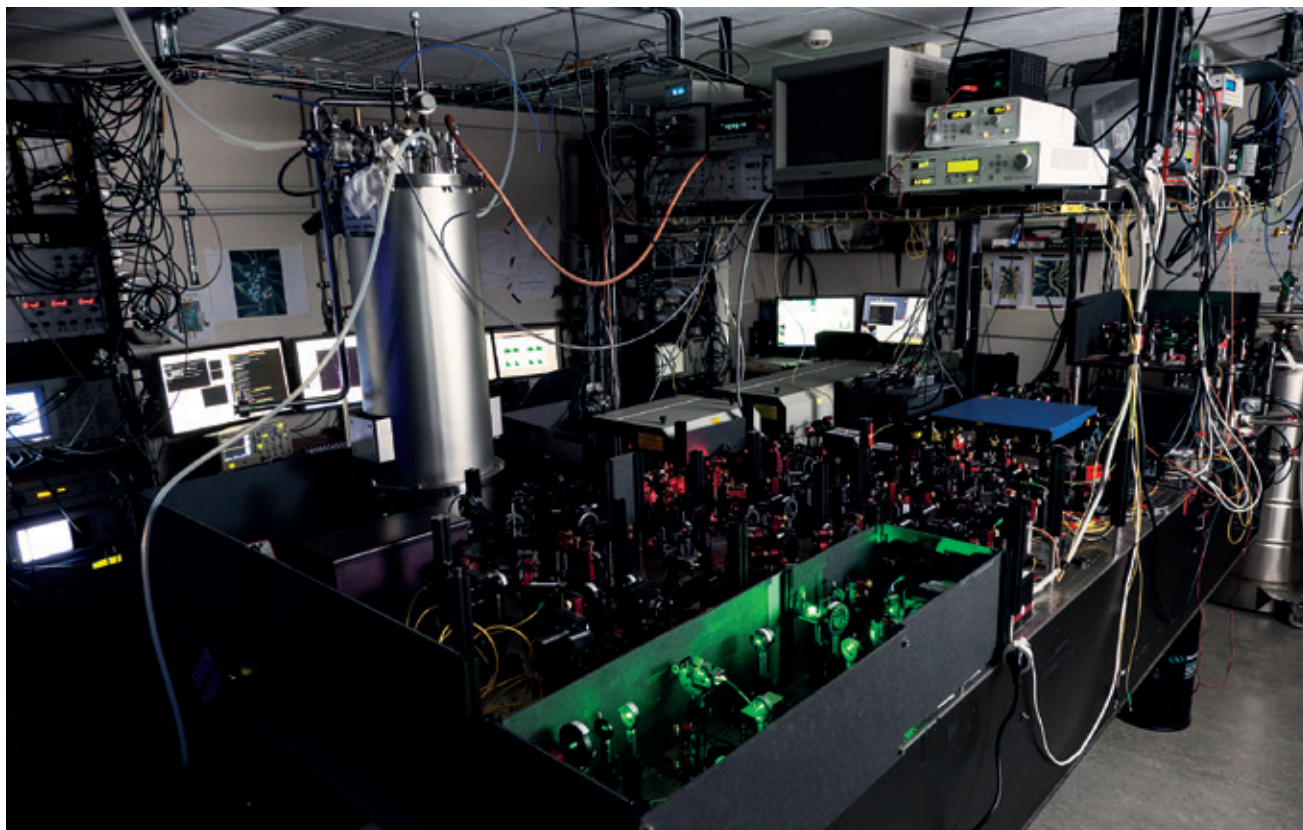
Software voor quantuminternet-applicaties

Voor elk ontwikkelingsstadium van het quantuminternet zullen nieuwe applicaties ontdekt en ontwikkeld worden. In eerste instantie zal de focus liggen op applicaties in de veiligheids-, overheids- en financiële sector. Naar mate de complexiteit van het quantuminternet toeneemt, worden ook applicaties met meerdere, aan elkaar gekoppelde quantumprocessors, zoals kloksynchronisatie en 'distributed quantum computing' mogelijk.

2.3.4 Quantumsensoren

Geavanceerde quantumsensoren maken gebruik van quantumcoherentie (superpositie), quantumcorrelaties en verstrengeling tussen deeltjes van verschillende systemen om een hogere gevoeligheid en resolutie te bereiken dan met klassieke sensorsystemen behaald kan worden. De ontwikkeling van detectoren (en bronnen), waarbij specifieke quantumeigenschappen centraal staan, vindt al gedurende enige decennia plaats. Onder andere de ontwikkeling van bronnen van ultrakoude atomen in Nederland (voor bijvoorbeeld atoomklokken) wordt wereldwijd als toonaangevend gezien. De technologie ten aanzien van bronnen van ultrakoude atomen en fotonbronnen en -detectoren is vergevorderd, bijvoorbeeld met betrekking tot het meten van de gekwantificeerde fase en polarisatie. Ook het meten van gecorreleerde quantumeigenschappen ligt binnen bereik.

²⁴ IETF staat voor Internet Engineering Task Force, een standaardisatieorgaan voor het internet.
²⁵ 'The Link Layer service in a Quantum Internet', A.D. Dahlberg et al., IETF draft, March 11, 2019.



Eén van de 'eindstations' of 'quantum nodes' van de quantum link tussen Delft en Den Haag, de eerste stap op weg naar een quantuminternet-infrastructuur gebaseerd op verstrengeling, waarbij de eerste link tussen Delft en Den Haag zal worden uitgebreid over de Randstad en wellicht in de toekomst heel Nederland kan omvatten. (Bron: QuTech)

Daarnaast staan quantum-beeldvormingstechnieken en sensoren op basis van ultrakoude atomen in de belangstelling, waaronder extreem precieze zwaartekrachtsensoren en atoomklokken. Zo streeft het Europese Quantum Flagship-project iqClock²⁶, dat wordt gecoördineerd vanuit Amsterdam, twee doelen na. Enerzijds werkt het aan de ontwikkeling van een nieuw type ultra-accurate optische klok; anderzijds richt het zich op het ontwikkelen van een geïntegreerde, op industriële schaal produceerbare klok, waarmee British Telecom haar netwerken wil gaan synchroniseren.

De grootste uitdagingen met betrekking tot de ontwikkeling van quantumsensoren zijn:

Ontwikkelen van nieuwe sensortechnologieën

Er is nog veel onbekend over de optimale methoden voor quantumsensoren. De verwachting is dat er veel winst geboekt kan worden met slimme optimale quantumcontroleprotocollen, bijvoorbeeld op het gebied van selectiviteit en gevoeligheid. Zo maken quantumsensoren op

dit moment bijvoorbeeld nog niet volledig gebruik van alle mogelijkheden die de tweede quantumrevolutie met zich meebrengt, zoals verstrengelde toestanden. Het aanmaken van en gebruik maken van de meer subtiele correlaties tussen de verschillende onderdelen van sensoren (zoals ultrakoude atomen, ionen en NV-centers, enzovoort) opent de deur naar robuustere en preciezere sensoren, zoals de superstralende klokken die worden ontwikkeld in het iqClock-programma.

Verkleinen van de 'voetafdruk' van quantumsensorssystemen

Alhoewel quantumsensoren zelf (zeer) klein in formaat zijn, zijn de experimentele meetsystemen eromheen vaak een stuk groter. Door het integreren en passend maken van deze meetsystemen kan de voetafdruk (grootte, gewicht, kosten, benodigd elektrisch vermogen) van quantumsensorssystemen verkleind worden. Dit vergroot de toepasbaarheid en schaalbaarheid van quantumsensoren en is cruciaal om quantumsensoren marktrijp te maken.

WAT MAAKT QUANTUMTECHNOLOGIE ZO BIJZONDER?

Ontwikkeling van schaalbare productieprocessen

Veel quantumsensoren gebruiken unieke materialen, zoals diamant of supergeleidende materialen. Om quantumsensoren wijdverspreid te gebruiken zullen deze materialen uniform en met hoge kwaliteit moeten worden geproduceerd in (semi-)geautomatiseerde productieprocessen.

Versnellen van de quantumsensoren

Huidige generatie quantumsensoren zijn beperkt door de snelheid van de uitlezing. Veel van deze sensoren werken met enkele lichtdeeltjes of elektronen en kunnen verder geoptimaliseerd worden om het meetproces te versnellen en hun toepassingsgebied te vergroten. Denk hierbij aan fotondetectoren die een grotere stroom aan fotonen aankunnen, waardoor veel toepassingen dichterbij komen – zoals langeafstand QKD-systemen.

Ontwikkeling van snelle detectoren met hoge detectie-efficiëntie

Op dit moment zijn er wereldwijd al verschillende bedrijven actief die detectoren verkopen voor het detecteren van individuele fotonen. Voor onder meer Quantum Key Distributie is het nodig dat de detectiesnelheid en -efficiëntie significant worden verhoogd om zo hoge sleuteldistributie-snelheden te halen. Dit gaat hand in hand met de ontwikkeling van snelle en betrouwbare fotonenbronnen die individuele of verstrengelde fotonen kunnen uitzenden.

2.3.5 Uitdagingen op andere terreinen

Bovenstaande technologische ontwikkelingen zijn vooral gericht op de qubit zelf en het systeem daar direct daaromheen. Zij spreken tot de verbeelding en zijn daardoor goed zichtbaar. Er is echter meer nodig om quantumtechnologie tot wasdom te brengen. Tussen de qubits en de buitenwereld liggen bijvoorbeeld vele lagen aan technologie die ook nog ontwikkeld moeten worden. Het aansturen en uitlezen van quantumtoestanden bij extreem lage temperaturen, het controleren van licht op extreem kleine schaal, of het afschermen van extreem precieze sensoren tegen ruis vraagt om nieuwe oplossingen op het gebied van bijvoorbeeld nanotechnologie, fotonica en materiaalkunde.

Voor een groot deel van de quantumtechnologie die in ontwikkeling is, staat bijvoorbeeld nog helemaal niet vast wat nu eigenlijk de beste materiaalkeuze is. Ook daar is nog veel onderzoek en ontwikkeling nodig. Daarnaast zijn er buiten de technologie om andere uitdagingen: zo zijn bijvoorbeeld talentontwikkeling en maatschappelijke inbedding van de technologie onontbeerlijk om de mondiale quantumrevolutie tot een succes te maken.

2.4 Conclusie

Quantumtechnologie maakt dingen mogelijk die met klassieke technologie niet mogelijk zijn. Grote toepassingsgebieden zijn quantumcommunicatie, quantumcomputers, quantumsimulators en quantumsensoren. Op kleine schaal zijn er al enkele eerste generatie-toepassingen beschikbaar, maar voor de meeste technologieën zijn er nog significante stappen nodig voordat 'quantumvoordeel' behaald kan worden. De technologische en wetenschappelijke uitdagingen zijn legio. Er zijn nog vele jaren van onderzoek en ontwikkeling nodig voordat het potentieel van quantumtechnologie ten volle kan worden benut, maar op de weg daarnaartoe zullen we telkens nieuwe productlanceringen en spin-offs zien ontstaan. Daarvan dienen zich de eerste voorbeelden al aan. Grote bedrijven investeren in Nederlandse onderzoekprogramma's, de eerste startups en spin-offs ontstaan vanuit deze samenwerkingen en meer en meer geïnteresseerde partijen, zoals leveranciers van hightech-componenten, vestigen zich rondom kennisinstellingen, waarmee de basis wordt gelegd voor een Nederlands quantumecosysteem.

²⁶ Zie: www.iqclock.eu/

03

DE MAATSCHAPPELIJKE EN ECONOMISCHE IMPACT VAN QUANTUMTECHNOLOGIE

3.1 Impact op korte én lange termijn

Quantumtechnologie benut natuurverschijnselen uit de quantumfysica in concrete toepassingen. Zoals besproken in het voorgaande hoofdstuk, zijn de meest in het oog springende eigenschappen van de quantumfysica superpositie en verstrengeling. Deze natuurverschijnselen bieden zulke fundamenteel nieuwe mogelijkheden, dat quantumtechnologie met recht een sleuteltechnologie genoemd kan worden en een 'gamechanger' kan zijn in tal van maatschappelijke en economische sectoren.

De ontwikkeling van quantumcomputers, quantumcommunicatie-systemen, quantumsensoren en quantumsimulators heeft de potentie om maatschappelijke uitdagingen te helpen oplossen en biedt kansen voor alle sectoren van de economie. Hoewel er al concrete toepassingen van de technologie gebruikt worden, is er nog veel ontwikkeling nodig voordat we kunnen beschikken over bijvoorbeeld een volwaardig quantuminternet of een grote, universele quantumcomputer. Daar horen lange tijdslijnen bij, maar de investeringen die we nu doen in de technologie zullen ook de komende jaren al leiden tot allerhande toepassingen, zoals Figuur 6 illustreert.

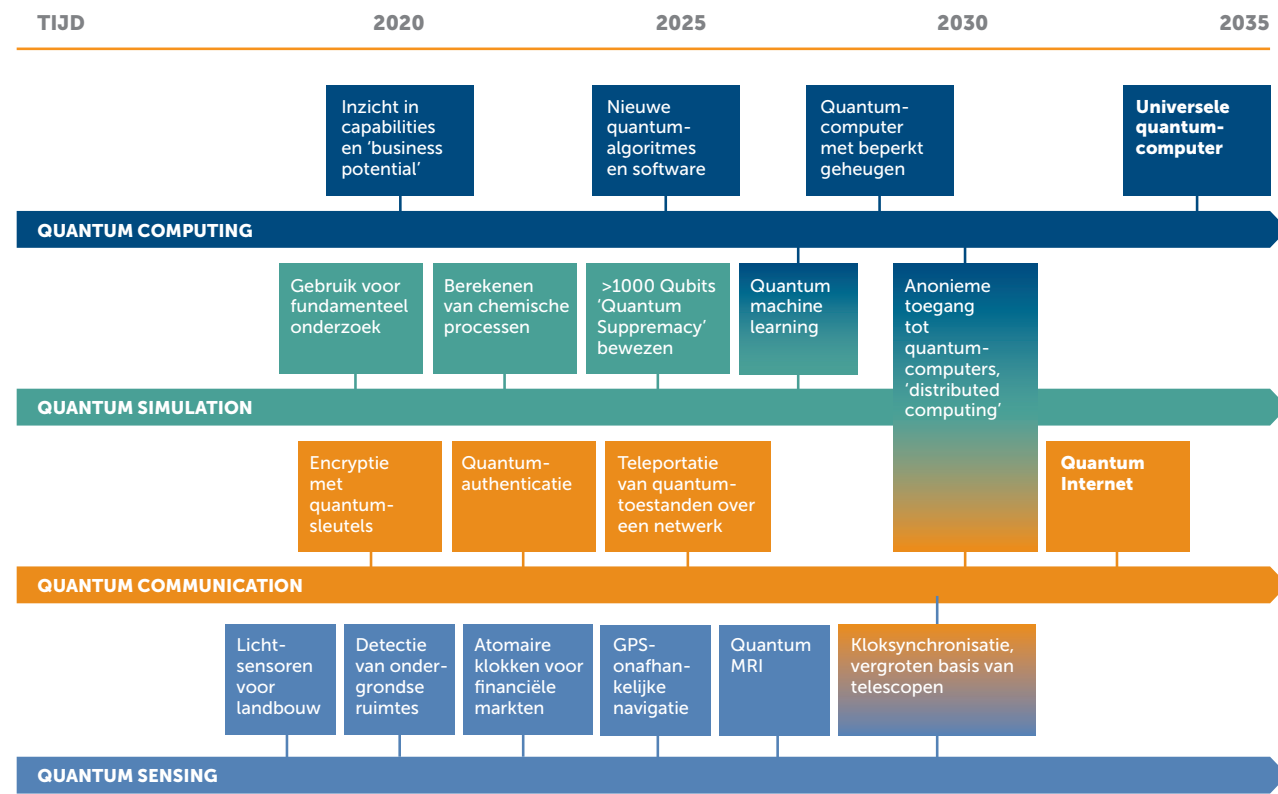
De vier lijnen in de afbeelding representeren de ontwikkelingen in de vier toepassingsgebieden van de technologie (communication, computing, simulation, sensing) voor de komende vijftien jaar, waarbij op iedere lijn verschillende 'tussenstations' getekend zijn. Deze tussenstations symboliseren mogelijke toepassingen, producten en diensten die de komende jaren naar verwachting beschikbaar zullen komen:

Tussen nu en 5 jaar: Fundamenteel veilige communicatie door middel van Quantum Key Distributie. Eerste generatie QKD-systemen worden door bijvoorbeeld het Zwitserse ID Quantique al commercieel aangeboden. Zo is tijdens de laatste verkiezingen in Zwitserland QKD-technologie gebruikt voor het beveiligen van de internetverbinding tussen de plaats waar de stemmen geteld werden en de locatie waar de stemresultaten opgeslagen werden. En recent zijn beleggingshuizen op Wall Street in New York via een QKD-verbinding verbonden met hun back-offices in New Jersey.

Tussen nu en 5 jaar: Zoals klassieke computers onbruikbaar zijn zonder adequate software, zijn ook quantumcomputers nutteloos als er geen goede quantumsoftware beschikbaar is. Veel van deze software, algoritmes en technieken worden nu reeds ontwikkeld, vaak samen met de industrie die de relevante vraagstukken levert.

Tussen nu en 5 jaar: Quantumsimulators die kunnen dienen als kleinschalige, ruizige, analoge quantumcomputers (NISQ, zie paragraaf 2.3.1), waarmee specifieke problemen opgelost worden. Deze staan momenteel volop in de belangstelling van hard- en softwaregiganten als Google, IBM, Intel, Rigetti, maar ook van het Chinese Alibaba. Ook in Nederland wordt hier onderzoek naar gedaan, onder andere in Eindhoven, Delft en Amsterdam. Dergelijke eerste generatie quantumcomputers, met typisch tien tot twintig qubits, worden in de cloud (al dan niet tegen betaling) reeds beschikbaar gesteld aan de onderzoeksgemeenschap voor het testen van eenvoudige algoritmes. De komende vijf jaar wordt ook de realisatie van een compleet programmeerbare quantumsimulator met duizend atomen of ionen verwacht, die voor het eerst 'quantumvoordeel' kan laten zien.

'Quantumtechnologie heeft de potentie om maatschappelijke uitdagingen te helpen oplossen en biedt kansen voor alle sectoren van de economie.'



FIGUUR 6
Toekomstbeeld van de ontwikkelingen in de quantumtechnologie, en (voorbeelden van) de daaruit volgende toepassingen in de komende decennia.

Over 5 tot 10 jaar: De Quantum Technologies Roadmap²⁷, die als onderdeel van het Europese Quantum Flagship is gemaakt, spreekt de verwachting uit dat sensoren met precisie op enkel-quantum niveau op een termijn van circa vijf jaar beschikbaar komen. Binnen tien jaar geldt dat voor netwerken van quantumsensoren, terwijl geïntegreerde systemen-op-een-chip, zoals een chip-geïntegreerde atoomklok volgens de roadmap verder dan tien jaar in de toekomst liggen. Toekomstig gebruik van deze quantumsensoren wordt bijvoorbeeld voorzien in de gezondheidszorg (extreem gevoelige MRI), het defensiedomein (denk aan netwerken voor detectie van onderzeeërs of bunkers), het halfgeleiderdomein (waar hoge resolutie en zeer gevoelige

quantumsensoren nieuwe metrologiemogelijkheden kunnen bieden) en de landbouwsector. Ze kennen ook toepassingen in de astronomie (LOFAR, Einstein Telescoop).

Over 5 tot 10 jaar: Zeer precieze atomaire quantumklokken bestaan op dit moment al in laboratoria. Deze kloksystemen zijn gebaseerd op de stralingsfrequentie van energie-overgangen van enkele atomen of ionen in gekoelde systemen. De uitdaging is nu om deze kloksystemen robuuster en kleiner te maken, zodat ze bijvoorbeeld kunnen worden toegepast in satellieten. In combinatie met gps kunnen dan navigatiesystemen met een zeer hoog niveau van timing-stabiliteit en traceerbaarheid gemaakt worden, die zelfs in gebieden

waar gps niet beschikbaar is gebruikt kunnen worden. Deze 'timing solutions' kunnen ook hun waarde bewijzen in toekomstige slimme netwerken, bijvoorbeeld voor de synchronisatie van signalen in energie- en telecomnetwerken.

Over meer dan 10 jaar: Een mondiaal quantuminternet, waarin de veiligheid van quantumencryptie gecombineerd wordt met klassiek dataverkeer over glasvezels en via satellieten. Hier valt ook te denken aan een quantumverbinding tussen quantumcomputers op verschillende locaties, waardoor een grote, gedistribueerde quantumcomputer gerealiseerd kan worden.

Over meer dan 10 jaar: Universele quantumcomputers, die problemen kunnen oplossen die voor klassieke computers fundamenteel onoplosbaar zijn. Te denken valt aan complexe optimalisatievraagstukken of aan het voorspellen, simuleren en modelleren van het gedrag van moleculen, katalysatoren of nieuwe materialen. Ook het breken van hedendaagse encrypties, oplossen van complexe optimalisatieproblemen, het snel doorzoeken van databases en geavanceerde machine learning (kunstmatige intelligentie) behoren dan tot de mogelijkheden.

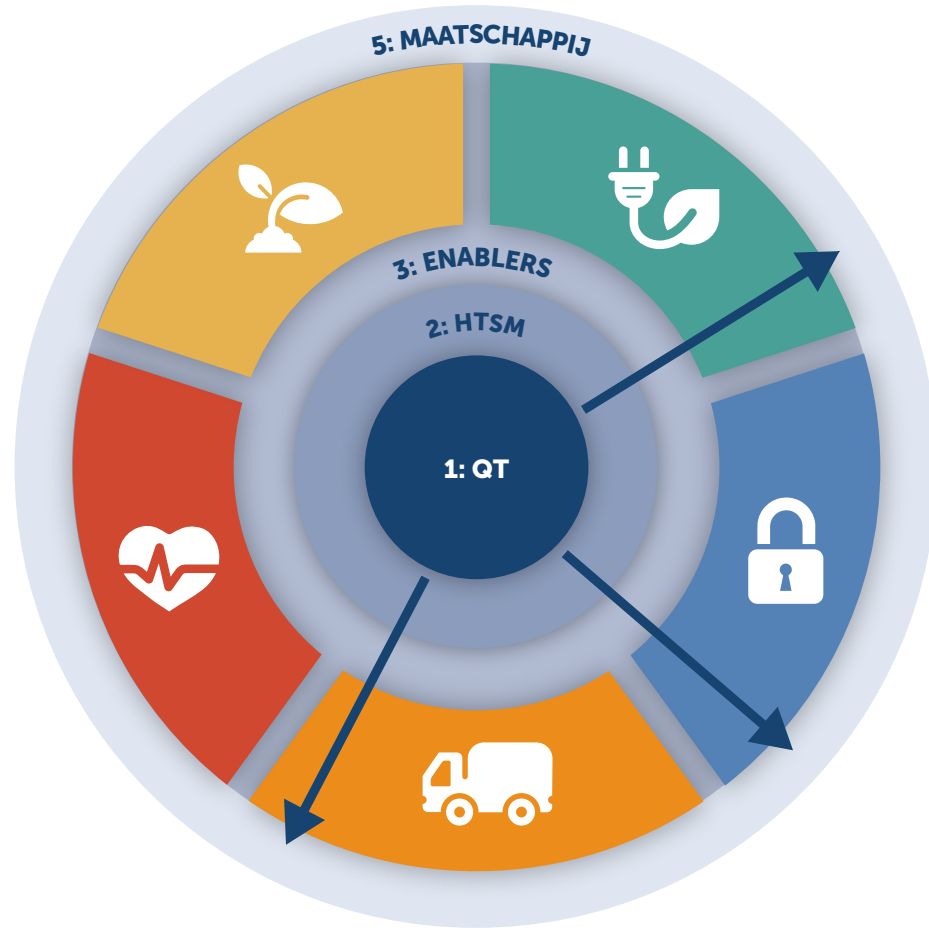
De ontwikkeling van een generieke, fouttolerante quantumcomputer en van een Europees of zelfs wereldwijd quantuminternet vertoont qua complexiteit en ambitie overeenkomsten met het ruimtevaartprogramma of met de ontwikkeling van de semiconductor-industrie. En net zoals die ontwikkelingen tot talloze spin-offs hebben geleid, zullen vermoedelijk ook investeringen in de quantumtechnologie tussentijds resulteren in allerlei nu nog onvermoede applicaties. Deze kunnen op hun beurt tot nieuwe bedrijvigheid en misschien zelfs nieuwe economische clusters leiden. De geschiedenis toont aan dat het extreem moeilijk is om precieze voorspellingen te doen over de toepassingen die voortvloeien uit disruptieve technologische ontwikkelingen. Ongetwijfeld worden er meer en deels ook andere producten en toepassingen ontwikkeld dan die waar we nu aan denken, ook de komende jaren al. Investeringen in de quantumtechnologie houden daarom niet alleen een belofte in voor de verre toekomst, maar ook al voor de kortere termijn.

3.2 Impact op alle maatschappelijke missies

Quantumtechnologie vindt haar weg naar de maatschappij via de 'pijlen' in Figuur 7. Centraal in de figuur staat de technologie zelf en het onderzoek dat voornamelijk plaatsvindt bij de universiteiten en instituten (cirkel 1 in de figuur), vaak in samenwerking met bedrijven. De cirkel eromheen (2) representeert de ontwikkeling en implementatie van op quantumtechnologie gebaseerde applicaties, producten en diensten die volgt uit dat onderzoek, door en met industriële partners in vooral de HTSM- en ICT-sector. Een bloeiend ecosysteem, een goede infrastructuur, talentontwikkeling en het gebruik en de ontwikkeling van aanverwante technologieën (zoals fotonica, kunstmatige intelligentie, blockchain, nanofabricage en materiaalkunde) zijn cruciaal; de derde cirkel symboliseert deze 'enablers'. De toepassingen landen uiteindelijk ook in de andere (top)sectoren, hier weergegeven door de vijf segmenten in de vierde cirkel, die ieder een missie met de bijbehorende maatschappelijke uitdagingen voorstellen. De buitenste cirkel staat voor de uiteindelijke impact van de technologie in de maatschappij. De maatschappelijke impact zal vooral via de missies zichtbaar zijn; hoe quantumtechnologie daar kan bijdragen wordt in deze paragraaf toegelicht.

In de jaren negentig van de vorige eeuw dacht men dat de grootste potentie van quantumcomputers en quantumnetwerken lag op het gebied van veiligheid en defensie. Dit was gebaseerd op de ontwikkeling van Shor's algoritme voor quantumcomputers, dat in relatie staat tot het breken van data-encryptie. Toen duidelijk werd dat de generieke quantumcomputer die nodig is voor het uitvoeren van Shor's algoritme zeker nog meer dan tien jaar op zich zal laten wachten, zoals Figuur 6 in de vorige paragraaf laat zien, terwijl ondertussen de eerste 'ruizige' quantumcomputers (NISQ), quantumsensoren en quantumnetwerkapplicaties hun intrede deden, kwamen de potentiële mogelijkheden van quantumtechnologie ook in beeld bij partijen in andere sectoren. Potentiële gebruikers van quantumtechnologie treffen we daarom ook aan in bijvoorbeeld de financiële sector, de energiesector, de landbouw, de chemie en farmacie, de hightech (kunstmatige intelligentie, machine learning, cyber security) en in de logistiek (en planning). De volgende paragrafen bevatten voorbeelden van mogelijke toepassingen en hun gebruikers, voor elk van de vijf missies.

²⁷ Zie: <https://qt.eu/newsroom/quantum-technology-roadmap/>



1 Onderzoek en ontwikkeling

- Quantum Communication
- Quantum Computing
- Quantum Simulation
- Quantum Sensing
- Quantum Algorithms
- Post-quantum Cryptografie

2 Ontwikkeling en introductie van applicaties, producten en diensten

- Hardware
- Software
- Supply Chain

3 'Enabling factoren'

- Ecosystemen, infrastructuur
- Talentontwikkeling
- Aanverwante technologieën

4 Toepassing in de missies

- Gezondheid en zorg
- Landbouw, water en voedsel
- Energietransitie en duurzaamheid
- Veiligheid
- Mobiliteit en logistiek

5 Impact in de maatschappij

privégegevens of financiële of medische dossiers. Ontwikkelingen op het gebied van de post-quantum cryptografie hebben tot doel dit gevaar af te wenden.

Naast post-quantum encryptie bestaat ook quantum-encryptie. Het verschil tussen beide technologieën is dat post-quantum encryptie geen gebruik maakt van quantum-hardware, terwijl quantumencryptie dat juist wel doet om informatie te beveiligen. Een fundamenteel verschil. Door computers met elkaar te verbinden in quantumnetwerken, kunnen op een andere manier veilige verbindingen gerealiseerd worden. Dergelijke verbindingen maken gebruik van het quantumverschijnsel 'verstrengeling', waardoor het altijd opgemerkt wordt wanneer iemand probeert af te luisteren of op een andere manier data wil vergaren. De tot nu verst ontwikkelde quantumtechnologie voor communicatie is Quantum Key Distribution (QKD). Er bestaan onder andere zogenaamde 'prepare and measure' QKD-protocollen; deze zijn gebaseerd op superpositie. De quantuminformatie die verstuurd wordt, wordt gebruikt om een gezamenlijke sleutel uit te destilleren waarmee vervolgens boodschappen over het klassieke internet vergrendeld kunnen worden. Om er zeker van te zijn dat toegang tot quantumcomputers en het quantumnetwerk ook daadwerkelijk wordt verleend aan

diegenen die de gebruikers claimen dat ze zijn, moet daarnaast een methode van authenticatie ('Secure Authentication') ontwikkeld worden. Dat kan op basis van software of op basis van fysieke objecten.

Ook quantumsensoren bieden in de toekomst mogelijkheden in het veiligheidsdomein. Ze kunnen worden ingezet voor militaire of beveiligingsdoeleinden, zoals voor navigatie in omstandigheden waar gps niet gebruikt kan worden (bijvoorbeeld in vijandelijk gebied, of ondergronds) of voor het detecteren van onderzeeërs met behulp van gravitatiesensoren. Optische atomaire klokken op onderzeeërs, op schepen of in vliegtuigen kunnen gebruikt worden om manipulatie van gps-signalen te detecteren. Atomaire klokken kunnen ook ingezet worden in telecommunicatienetwerken, zodat deze ook bij het wegvallen van gps-signalen kunnen blijven werken. Volgens een recent rapport zou het wegvallen van gps en telecommunicatienetwerken alleen al in de VS een verlies van honderden miljoenen dollars per dag veroorzaken.²⁸

FIGUUR 7
Quantumtechnologie vindt haar weg naar de maatschappij.



3.2.1 Veiligheid en privacy: post-quantum cryptografie, quantumnetwerken, -computers en -sensoren

Een generieke, fouten-gecorrigeerde en fouttolerante quantumcomputer heeft de potentie om huidige versleutelingen van data te ontcijferen. Veel bestaande encryptiemethoden worden in zo'n geval fundamenteel onveilig. Een belangrijke en veel gebruikte klasse van deze methoden is gebaseerd op wiskundige problemen. Een voorbeeld hiervan vormt RSA-encryptie; dit wordt tegenwoordig voor een groot deel van de online versleuteling van informatie gebruikt. RSA-versleuteling berust in essentie op het feit dat het heel eenvoudig is om twee zeer grote priemgetallen met elkaar te vermenigvuldigen, maar voor het omgekeerde, het snel ontbinden van een zeer groot getal in twee priemgetallen, zijn

geen efficiënte en snelle algoritmes bekend. We kunnen dit daarom, als de getallen groot genoeg zijn, niet binnen een realistische tijdspanne met een klassieke computer doen. In 1994 toonde de Amerikaanse wiskundige Peter Shor op papier aan dat het ontbinden van grote getallen in priemgetallen met een quantumcomputer wel snel te doen is. Een quantumcomputer zou daardoor in staat zijn een zeer groot deel van de hedendaagse encryptie te breken.

Dit laatste is bedreigend, ook al is de quantumcomputer die dergelijke berekeningen kan uitvoeren er nog niet. Bijvoorbeeld informatie die cruciaal is voor de (nationale) veiligheid dient vaak tientallen jaren bewaard te blijven, en malafide instanties die hun hand kunnen leggen op dergelijke versleutelde informatie, hoeven in feite alleen maar te wachten tot zij beschikking krijgen over een quantumcomputer om die informatie te kunnen lezen. Dat is niet alleen een reëel gevaar voor staatsgeheimen, maar ook voor bijvoorbeeld

Post-quantum cryptografie als voorbereiding op een toekomst met quantumcomputers

De op dit moment meest gebruikte cryptografische 'public key' protocollen zijn niet veilig voor een aanval met een quantumcomputer. Deze protocollen zijn gebaseerd op wiskundige problemen die zeer moeilijk op te lossen zijn met een klassieke computer, zoals bijvoorbeeld het ontbinden van (heel) grote getallen in priemgetallen. Dit is nu net het type problemen dat met een (nu nog hypothetische) grote, stabiele quantumcomputer heel snel zou kunnen worden opgelost. Post-quantum cryptografie is de tak van de cryptografie, die zich bezighoudt met het ontwikkelen van moderne, algoritmische encryptietechnologie die bestand is tegen aanvallen met een quantumcomputer.

Er is nog veel onderzoek nodig om nieuwe protocollen te ontwikkelen die niet gebroken kunnen worden door quantumalgoritmes. Samenwerking tussen experts op het gebied van quantumalgoritmes en cryptologen is noodzakelijk. Aan post-quantum cryptografie wordt gewerkt door bijvoorbeeld KPN, QT/e en QuSoft, en het staat ook bij Microsoft en Google hoog op de agenda. Ook TNO werkt aan producten en strategieën om organisaties te helpen quantum-resistent te worden. Daarnaast wordt er internationaal gewerkt aan de standaardisatie van post-quantum cryptografieprotocollen.

²⁸ 'Economic Benefits of the Global Positioning System (GPS)', RTI, Report Number 0215471, Sponsored by the National Institute of Standards and Technologies (NIST), USA.

Quantum Key Distribution maakt extreem veilige communicatie mogelijk

De eerste generatie QKD-producten is al commercieel verkrijgbaar. Een nadeel van deze eerste QKD-systemen (die gebruik maken van glasvezelverbindingen) is dat ze op dit moment in afstand nog gelimiteerd zijn tot 50 à 100 kilometer (hoewel er al testen zijn uitgevoerd over meer dan 400 kilometer) en nog niet honderd procent veilig zijn. De standaard, klassieke versterkers die gebruikt worden in glasvezelnetwerken werken in dit geval namelijk niet. In verschillende onderzoeksprojecten wordt daarom gewerkt aan de ontwikkeling van quantumversterkers. Zo ook in Nederland, binnen de Quantum Internet Alliance.

Tegelijk worden de eerste stappen gezet om intercontinentale afstanden via de ruimte te overbruggen. 'Free-space QKD' maakt gebruik van de quantummechanische eigenschappen van licht, in combinatie met laser-satcomtechnologie, om encryptiesleutels te versturen waarmee ultraveilige communicatie mogelijk wordt. Zo heeft China in 2016 een satelliet gelanceerd waarmee eerste verkennende experimenten uitgevoerd worden voor het versturen van quantum-data door de ruimte, tussen een of enkele satellieten en ontvangststations op de grond. Niet alleen China zet hierop in;

ook andere landen waaronder Canada, Singapore en het Verenigd Koninkrijk werken aan free-space QKD-missies. Op Europese schaal lopen er via het ESA ScyLight programma verschillende projecten op het gebied van space-based QKD, waarin naast TNO ook het Nederlands bedrijfsleven betrokken is. Recent is er ook een nieuw Nederlands project gestart waarin QuTech samen met ABN AMRO gaat werken aan quantumveilige verbindingen voor de financiële sector.²⁹



3.2.2 Energie en duurzaamheid: quantumsimulators, -computers en -sensoren

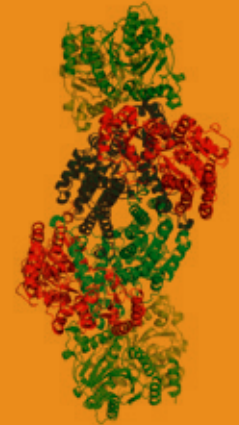
Dankzij verschijnselen als superpositie en verstrengeling kunnen quantumcomputers exponentieel grotere hoeveelheden informatie parallel verwerken dan klassieke computers. Ook het simuleren van quantumsystemen, voor bijvoorbeeld het berekenen van verschillende toestanden van moleculen of chemische verbindingen, kan op een veel natuurlijker wijze, namelijk door gebruik te maken van quantumsimulators. Bij een quantumsimulator wordt een controleerbaar en manipuleerbaar quantumstelsel gebruikt om het gedrag van het te onderzoeken quantumstelsel te voorspellen.

De maatschappelijke impact van de hier geschetste ontwikkelingen is groot. En veiligheid en privacy vertalen zich ook naar andere domeinen en toepassingen. Als we via een quantuminternet veiliger kunnen communiceren, dan kan dat bijvoorbeeld de toepassing van nieuwe digitale technologieën stimuleren, zoals kunstmatige intelligentie, machine learning en cloud computing. Ook kunnen in de toekomst verschillende quantumcomputers via een quantumnetwerk veilig met elkaar verbonden worden. Dat geeft weer een heel nieuw scala aan mogelijkheden, zoals genetwerkte quantum computing, of het via de cloud unaniem en veilig uitvoeren van berekeningen op een quantumcomputer.

²⁹ Zie: <https://medium.com/abn-amro-developer/abn-amro-investing-in-quantum-technology-cce474fe430f>

Quantumcomputers voor het ontwerpen van complexe moleculen

Met financiële steun van Shell Research is aan de Universiteit Leiden een onderzoeksgroep van start gegaan die samen met de Vrije Universiteit gaat onderzoeken hoe een quantumcomputer ingezet kan worden om complexe moleculen te ontwerpen. Kunstmatige fotosynthese en milieuvriendelijke bereiding van kunstmest zijn twee toepassingen aan de horizon, die buiten het bereik liggen van zelfs de meest krachtige gewone computers. De illustratie (bron: Wikipedia) schetst het complexe enzym nitrogenase dat de sleutel is voor milieuvriendelijke kunstmest: voor een gewone computer te ingewikkeld om door te rekenen, maar naar verwachting binnen het bereik van een quantumcomputer.



Voor vraagstukken op het gebied van energie en duurzaamheid kunnen quantumsimulators en quantumcomputers oplossingen helpen vinden. Zo kunnen ze ingezet worden voor het vinden van geschikte materialen voor het fabriceren van betere batterijen, voor het ontwikkelen van nieuwe types zonnepanelen of voor ontwerpen van supergeleiders voor energietransport, die werken bij hogere temperaturen. Datzelfde geldt voor optimalisatievraagstukken die betrekking hebben op elektriciteitsnetwerken en energiedistributie. Daarnaast kunnen op quantumtechnologie gebaseerde sensoren het gravitatieveld van de aarde ongekend nauwkeurig in beeld brengen voor toepassingen in de geologie (koolstofopslag, vulkanisme, exploratie, stabiliteit van bodemlagen). De potentiële impact van quantumtechnologie op de energietransitie is dus groot.

Verschillende Nederlandse universitaire onderzoeksgroepen (Eindhoven, Amsterdam, Leiden, Delft, Utrecht) werken aan de ontwikkeling van quantumsimulators. Bij een aantal van deze onderzoeken zijn ook bedrijven betrokken. Zo hebben Shell en de Universiteit Leiden een gezamenlijk project opgezet dat zich richt op het oplossen van vraagstukken uit de quantumchemie en fotosynthese.



3.2.3 Gezondheid en zorg: quantumcomputers, -simulators en -sensoren

Ook ten aanzien van gezondheid en zorg kunnen quantumcomputers en quantumsimulators van grote betekenis zijn, vanwege hun capaciteit om quantumprocessen te simuleren. In essentie worden namelijk alle processen en systemen op nanoschaal geregeerd door de quantumfysica – zo ook in het menselijk lichaam. Op kleine schaal kunnen deze processen nog wel met een klassieke computer en analytische berekeningen worden gesimuleerd, maar zodra de systemen groter worden (grotere moleculen, ingewikkelder processen) lukt dat niet meer. De hedendaagse supercomputers kunnen een cafeïnemolecuul nog net doorrekenen, maar een penicillinemolecuul gaat niet meer.

Moleculaire interacties op (sub)atomair niveau zijn cruciaal voor het onderzoek naar nieuwe medicijnen. Als in de toekomst alle eiwitten die mensen aan kunnen maken (en dat zijn er meer dan twintigduizend) gemodelleerd zouden kunnen worden met behulp van quantumsimulators, inclusief hun interactie met bestaande of nieuw ontwikkelde medicijnen, dan zou dat verstrekkende implicaties hebben voor de gezondheidszorg en farmacie. Het zal nog vele decennia aan onderzoek en ontwikkeling vergen, maar in principe zijn quantumcomputers en quantumsimulators er op lange termijn waarschijnlijk toe in staat.

Quantum Sensing voor gebruik in ziekenhuizen: nano-MRI

Met behulp van defecten in het kristalrooster van vaste stoffen zoals diamant kunnen zeer gevoelige en veelzijdige quantumsensoren worden gemaakt. Ze combineren een hoge gevoeligheid met een hoge resolutie en zijn toepasbaar bij verschillende temperaturen; bijvoorbeeld ook op kamertemperatuur. De toepassingen zijn veelzijdig: elektrische stromen, magneetvelden, elektrische lading, temperatuur, druk en mechanische krachten kunnen op micro- en nanoschaal gedetecteerd worden. Er wordt wereldwijd gewerkt aan allerlei toepassingen. Een paar voorbeelden zijn nanoschaal MRI-toepassingen voor materiaalkunde en biochemie, het karakteriseren van quantummaterialen, gps-vrije navigatie, de kwaliteitscontrole van harddisks en batterijen en de detectie van plastic leidingen.

Ook toekomstige medische toepassingen worden onderzocht, door verschillende consortia. Zo maakt het Quantum Flagship-project MetaboliQs³⁰ gebruik van defecten in het oppervlak van een diamant om pyrodruivenzuur (een eindproduct van de afbraak van suikers, vetten en eiwitten) te polariseren. Dit pyrodruivenzuur wordt vervolgens gebruikt om vaatziektes op te sporen middels een MRI-scan, die vele malen sneller werkt dan de standaard scans. Daarnaast is er in 2018 een NWA-project gestart waarin de TU Delft samen met QuTech, Universiteit Leiden, TNO en de twee startups Applied Nanolayers en Leiden Spin Imaging een 'quantummicroscopie' ontwikkelt die met een diamantmagneetveldsensor het gedrag van elektronen op nanoschaal kan afbeelden, zowel vlakbij het absolute nulpunt als bij kamertemperatuur. Deze methode kan in de toekomst als nanoschaal-MRI ingezet worden in ziekenhuisonderzoeken.³¹

Daarnaast kunnen quantumsensoren gebruikt worden in patiënten-diagnostiek, bijvoorbeeld in toekomstige MRI-scanners. MRI-scanners kunnen onderliggende structuren van moleculen of proteïnen detecteren, en kunnen daardoor bijvoorbeeld tumoren zichtbaar maken. Op dit moment zijn voor het maken van één MRI-afbeelding meerdere scans over een relatief groot oppervlak nodig, waar vervolgens een gemiddelde van wordt genomen. Met behulp van quantumsensoren, die veel gevoeliger en nauwkeuriger zijn dan bestaande sensoren, zou in principe heel lokaal en met een veel hogere resolutie gemeten kunnen worden.



3.2.4 Landbouw, water en voedsel: quantumcomputers, -simulators en sensoren

Een veel gebruikt voorbeeld om de potentie van quantum computing te duiden is kunstmest. Kunstmest is essentieel voor het verbouwen van voedsel en voor het kunnen voeden van miljarden monden. Een belangrijk bestanddeel van kunstmest is ammonia, maar de productie van ammonia via het zogenaamde Haber-Bosch proces kost ontzettend veel energie: naar schatting ongeveer drie procent van de totale (mondiale) energieproductie! In bepaalde bacteriën zitten enzymen die ammonia veel efficiënter produceren. Als men kan achterhalen hoe dat enzym precies werkt, kan dit proces wellicht nagebootst worden. Een grote energiebesparing kan

het gevolg zijn. Op dit moment kunnen zelfs de zwaarste supercomputers echter nog maar acht aminozuren van het enzym simuleren, terwijl het in totaal uit 450 aminozuren bestaat. Men verwacht dat een fouttolerante quantumcomputer op termijn wel in staat is om het enzym te simuleren. Als we het enzym daarmee kunnen doorgronden en nabootsen, dan zou de productie van kunstmest vele malen goedkoper én duurzamer worden.

Een ander gebruik van quantumtechnologie in de landbouw bestaat uit het meten van straling in het golflengtegebied van fotosynthese. Dit gebeurt door middel van 'photosynthetic active radiation' quantumsensoren. Met behulp van dit type sensoren (dat overigens al door verschillende fabrikanten op de markt wordt aangeboden) kan gedetailleerd inzicht verkregen worden in de groei van gewassen. Quantumsensoren zouden daarnaast gebruikt kunnen worden voor het detecteren van verontreinigingen in water.

Ook op het gebied van waterhuishouding en het doorrekenen van stromingen kunnen quantumcomputers en -simulators mogelijk uitkomst bieden. Quantumsimulaties kunnen de mogelijke oplossingen berekenen van de Navier-Stokes vergelijkingen voor vloeistof- en gasstromen, en zo bijvoorbeeld de turbulentie rondom een vliegtuigvleugel simuleren. Airbus heeft daarom een challenge opgezet, die onlangs van start is gegaan en gedurende heel 2019 loopt. Airbus schrijft

hierover: "It is open to the whole scientific community of experts, researchers, start-ups, academics and will lay the ground for the ultimate shift to a quantum era in aerospace."³² Maar er zijn ook toepassingen denkbaar in het modelleren van het effect van hoge bloeddruk op hart en vaten, van processen in de chemische industrie of voor het voorspellen van overstromingen in laaggelegen landen.



3.2.5 Mobiliteit en logistiek: quantumcomputers en quantumsimulators

Overheden, bedrijven en andere organisaties gebruiken klassieke computers voor het oplossen van zoekproblemen en het optimaliseren van talloze processen: het doorzoeken van grote databestanden, het vinden van de meest efficiënte route door een drukke stad, het zo efficiënt mogelijk ophalen van artikelen uit een groot magazijn, het indelen van werkschema's, het ontwerpen van efficiënte chips of vliegtuigen enzovoorts. Voor veel van deze problemen kunnen mogelijk quantumcomputers en quantumsimulators voor een significante versnelling van de berekeningen zorgen. Zo kan met behulp van Grover's algoritme uit 1996 een ongestructureerde database vele malen sneller doorzocht worden.

Het QuantumLab: quantum computing en de waterhuishouding van Nederland

Innovation Quarter, QuTech, TNO, IBM en Microsoft werken momenteel aan het opzetten van een 'fieldlab' met als doel use cases in de watersector te ontwikkelen voor quantumcomputers. Hiertoe zijn twee workshops georganiseerd met quantumexperts en potentiële eindgebruikers uit de watersector, waaronder Deltares, KWR, Imhoff, Stowa, Danser en aFrogleap. Men wil samen onderzoeken hoe de kracht van quantum computing in deze sector van pas zou kunnen komen. Aanvullend is er brede interesse om te onderzoeken of een oplossing voor de Navier-Stokes vergelijking, die gebruikt wordt

voor modellen in onder andere de vloeistofmechanica, sneller benaderd zou kunnen worden met behulp van de quantumcomputer.³³ Er wordt verkend of deze fieldlab-constructie ook andere use cases kan adresseren, voor verschillende toepassingen en sectoren zoals de financiële sector, cyber security en logistieke ketens. Interessant om te vermelden is dat het oplossen van de Navier-Stokes vergelijking één van de zeven millenniumproblemen is: diegene die zo'n probleem oplost verdient een beloning van 1 miljoen dollar.

³⁰ Zie: www.metaboliqs.eu/en/the-project.html

³¹ Zie: www.nwo.nl/onderzoek-en-resultaten/programmas/nwo/nationale-wetenschapsagenda-onderzoek-op-routes-door-consortia-orc/toekenningen-2018.html

³² Zie: <https://www.airbus.com/innovation/tech-challenges-and-competitions/airbus-quantum-computing-challenge.html>

³³ "Towards Solving the Navier-Stokes Equation on Quantum Computers", <https://arxiv.org/abs/1904.09033>

Quantum computing voor de optimalisatie van processen

Bosch en QuSoft doen samen onderzoek naar toepassingen van quantum computing die voor de multinational van waarde kunnen zijn. Er wordt onder andere gekeken of quantum computing een meerwaarde kan leveren in ontwerpprocessen en het gebruik van kunstmatige intelligentie, alsmede bepaalde optimalisatieprocessen kan versnellen. Een bij het project betrokken postdoc zegt hierover: "Nu de eerste quantumcomputer

dichterbij komt, is het belangrijk voor bedrijven om te ontdekken hoe quantumalgoritmes ze kunnen helpen, bij bijvoorbeeld optimalisatie en simulaties voor productontwikkeling. Het wordt heel interessant om te leren welke reken- en optimalisatieproblemen het belangrijkst zijn voor Bosch en om deze problemen vervolgens aan te pakken met quantumalgoritmes."

Andere voorbeelden zijn het vinden van een minimum of maximum van een bepaalde rekenfunctie of landschap, en het vinden van de kortste route tussen twee punten op een kaart. Voorwaarde is dat klassieke data efficiënt in een quantumcomputer ingeladen kan worden.

Er zijn verschillende voorbeelden waarin quantumoptimalisatie in de praktijk al getest wordt. Het voorbeeld van Airbus over het voorspellen van de luchtstroom over vliegtuigvleugels, waarbij alle luchtdeeltjes gemodelleerd worden opdat een robuuster en efficiënter vliegtuig ontworpen kan worden, is in de vorige paragraaf al genoemd. Een ander voorbeeld is dat van de NASA, dat samen met het Canadese D-Wave (een producent van een bepaald type quantumcomputer) werkt aan het optimaliseren van de verdeling van bagage en lading aan boord van een ruimteschip.

3.3 De economische impact van quantum-technologie

Het quantumtechnologie-landschap heeft de afgelopen jaren grote veranderingen ondergaan. Tien jaar geleden droegen de wetenschappelijke centra en QuTech al de visie uit dat quantumtechnologie een grote technologische en maatschappelijke impact zou gaan hebben. Destijds vond dat geluid nog weinig gehoor; er was vooral scepsis over de

technische haalbaarheid. Dat is nu wel anders. Quantumtechnologie bevindt zich volgens Gartner momenteel op de rijzende flank van de Gartner hype cycle³⁴: de verwachtingen zijn hoog gespannen, er wordt door overheden en bedrijven volop geïnvesteerd, diverse startups ontstaan en er is ook in de media volop aandacht voor de technologie. Het lijkt alsof iedereen er bovenop zit, maar de verwachtingen moeten wel nog waargemaakt worden. Volgens Gartner's theorie van de hype cycle zal er eerst nog een fase van afkoeling volgen, waarin blijkt dat de technologie nog niet rijp is en nog vele tekortkomingen en uitdagingen kent. Juist die periode vraagt om vasthoudendheid: de aanhouder die gericht blijft ontwikkelen en experimenteren om de technologie en haar toepassingen verder te brengen zal zich uitstekend positioneren voor de fase waarin de markt zich echt gaat ontwikkelen en commerciële toepassingen gaan ontstaan en groeien.

Zo zal ook quantumtechnologie zich op termijn vertalen in nieuwe marktkansen voor bedrijven, in alle sectoren en met de bijbehorende economische groei. De precieze omvang daarvan laat zich op dit moment moeilijk schatten, omdat er nog veel ontwikkeling nodig is alvorens de technologie op echt grote schaal kan worden toegepast en benut. Er kan echter wel iets gezegd worden over de markt voor de aanbieders van op quantumtechnologie gebaseerde producten en diensten, inclusief hun toeleveranciers. Dat is het onderwerp van deze paragraaf.

3.3.1 Een ecosysteem voor quantumgebaseerde producten en diensten

Quantumtechnologie levert in eerste instantie kansen op voor de HTSM- en ICT-sector. Daar bevinden zich immers de bedrijven die op quantumtechnologie gebaseerde producten en diensten ontwikkelen en in de markt zullen gaan zetten, en hun toeleveranciers. HTSM is een belangrijke sector voor de Nederlandse economie, met wereldspelers als ASML, ASM International, NXP, Philips en Thales en een groot aantal toeleverende MKB-bedrijven, in onder andere de Brainport-regio. Ook ICT is een belangrijke sector, met bedrijven als KPN, Microsoft, IBM, Intel, Fox-IT, SAP en ATOS. Daarnaast zullen softwarebedrijven steeds belangrijker worden, en applicaties ontwikkelen voor zowel quantumcomputers als het quantuminternet. Veel van deze bedrijven zijn betrokken bij de ontwikkeling van quantumtechnologie en hebben bijgedragen aan de totstandkoming van deze agenda. Dat geldt ook voor verschillende Nederlandse startups en scale-ups die zich richten op quantumtechnologie, zoals QuiX in Enschede en Delft Circuits, Single Quantum en Qblox in Delft.

Investerings in de technologie leiden tot nieuwe en hoogwaardige werkgelegenheid. Ter illustratie enkele schattingen.

Adviesbureau Birch heeft in 2018 een studie verricht naar de realisatie van een Q-Campus in Delft.³⁵ In navolging op die studie is becijferd, dat de realisatie van de Q-Campus in 2023 kan leiden 675 FTE directe, hoogwaardige R&D-arbeitsplaatsen. Wanneer ook indirecte werkgelegenheid wordt meegenomen, komt het totale werkgelegenheidseffect op ruim 2000 FTE in 2023 (waarvan naar schatting 25% op mbo-niveau). Het totale werkgelegenheidseffect voor 2030 is berekend op 7000 FTE. Deze studie betrof destijds alleen de regio Delft; duidelijk is dat met de programma's in andere steden en regio's het totale werkgelegenheidseffect van quantumtechnologie voor Nederland aanzienlijk hoger zal liggen – zowel op de korte als op de langere termijn.

In sterk vereenvoudigde vorm kan het ecosysteem voor quantumtechnologie worden geschetst zoals in Figuur 8 weergegeven. Centraal staat de technologie zelf, en de partijen die werken aan onderzoek en ontwikkeling van de technologie. Daaromheen staan de toeleveranciers. Zij leveren de kritische componenten en halfproducten voor quantumcomputers en quantumsensoren, zoals (optische) chips, lasers, cryogene koelinstallaties of elektronica. Dit levert kansen op voor onder andere de Nederlandse

Qblox, een van de quantum-startups in de regio Delft

Qblox is in 2018 opgericht als spin-out van QuTech's activiteiten op het gebied van elektronica-ontwikkeling. Het bedrijf legt zich toe op het doorontwikkelen van de 'stack' van elektronische componenten die nodig zijn om qubits te kunnen manipuleren en een universele quantumcomputer te kunnen bouwen.

Om de huidige prototype-quantumcomputers ter grootte van een handjevol qubits op te schalen naar honderden en duizenden qubits moet ook de aansturingselektronica meegroeien. Qblox betreedt een markt waarin bestaande electronicagiganten standaardproducten leveren die niet aansluiten op de huidige en vooral de toekomstige behoeften van de quantum computing community. Het bedrijf is een schoolvoorbeeld van hoe een mix aan expertise (zoals quantumtheorie, elektronica, computer science) samengebracht kan worden om maatwerk en adequate productondersteuning te leveren.



³⁴ Zie: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-emerge-in-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2018/>. Quantum computing bevindt zich volgens Gartner op de rijzende flank van de hype cycle. Quantum communication, quantum simulation en quantum sensing zijn door Gartner niet in de hype cycle opgenomen, maar bevinden zich vermoedelijk op een vergelijkbare positie.

³⁵ Birch, 'Building a Q-Campus: realizing a quantum ecosystem in Delft', 2018. NB. Q-Campus is nog een werknaam.

semicon- en fotonica-industrie en trekt bovendien buitenlandse toeleveranciers aan. Een voorbeeld van een dergelijk bedrijf is het Finse BlueFors Cryogenics, dat eind 2018 heeft aangekondigd een R&D-vestiging op de Q-Campus te openen. Bluefors levert geavanceerde koelapparatuur, die cruciaal is voor het maken van een quantumcomputer.

Deze toeleveranciers leveren aan de bedrijven die op quantumtechnologie gebaseerde apparaten produceren en verkopen, zoals QKD-apparatuur en quantumcomputers. Deze producenten hanteren verschillende businessmodellen. Zo hanteert IBM een 'hardware-as-a-service'-businessmodel,

waarbij de eindgebruiker via de cloud toegang krijgt tot de reken capaciteit van de quantumcomputers van IBM. Er zijn ook partijen die de apparaten los verkopen, zoals het Canadese bedrijf D-Wave (dat overigens ook een cloud service aanbiedt). In deze schakel van het ecosysteem wordt ook de software ontwikkeld die nodig is om de apparaten te laten functioneren, zoals software voor foutcorrectie.

De volgende schakel omvat bedrijven die quantumapplicaties en -software ontwikkelen voor en verkopen aan eindgebruikers, waarbij de eindgebruikers de betreffende applicaties kunnen laten draaien op de apparaten van hard-



FIGUUR 8
Gestileerd overzicht van het ecosysteem voor quantumtechnologie. De paden zijn apart weergegeven, maar zijn niet geïsoleerd van elkaar en organisaties die in één pad of schakel actief zijn kunnen ook in andere paden en schakels actief zijn. De figuur is bovendien niet compleet: overheden, investeerders, branche-organisaties, maatschappelijke instanties en standaardisatie-instituten zijn er omwille van de eenvoud bijvoorbeeld niet in opgenomen.

ware-as-a-service aanbieders of op hun eigen quantumcomputer. In Nederland werkt bijvoorbeeld QuSoft aan de ontwikkeling van quantumapplicaties. Hier passen ook de aanbieders van producten en diensten die gebruik maken van quantumtechnologie. Een voorbeeld is KPN, dat met zijn partners oplossingen ontwikkelt voor veilige datacommunicatie en daarbij gebruik maakt van quantum-versleutelde verbindingen (QKD). Zij leveren aan eindgebruikers in verschillende domeinen, de buitenste 'schil' in het plaatje. Potentiële eindgebruikers vinden we in alle sectoren van de economie. Verschillende waren betrokken bij het maken van deze agenda; zo hadden bijvoorbeeld ABN AMRO, Shell, Aramco en het Ministerie van Defensie zitting in het klankbord en waren er organisaties uit onder andere de zorgsector, de watersector en het veiligheidsdomein aanwezig op de inloopdag die voor deze agenda is georganiseerd.

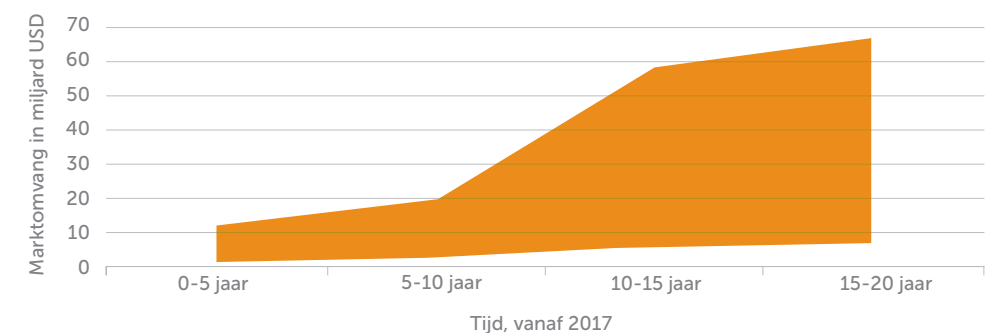
Nederland heeft ervaring in het opbouwen van dergelijke ecosystemen. Een bekend voorbeeld in de hightech is de Brainportregio rondom Eindhoven. Maar ook in de ICT doet Nederland het goed. Er heeft zich een sterke digitale infrastructuur met bijbehorend ecosysteem ontwikkeld. Partijen als Microsoft en Google hebben grote datacenters in Nederland gebouwd en de Internet Exchange in Amsterdam (AMS-IX) heeft zich ontwikkeld tot een van de grootste internetknooppunten ter wereld, zoals Schiphol en de haven van Rotterdam knooppunten zijn op het gebied van de logistiek. De ambitie van deze agenda is om Nederland ook tot internationaal centrum en knooppunt voor quantumtechnologie te maken. Deze technologie sluit goed aan op het Nederlandse semiconcluster en op ontwikkelin-

gen in bijvoorbeeld de fotonica en smart industry. Het heeft bovendien een sterke relatie met de positie van Nederland op het gebied van ICT en de ontwikkelingen in kunstmatige intelligentie en machine learning.

3.3.2 De markt voor quantumtechnologie

In de al eerder aangehaalde studie van Birch uit 2018, schat het adviesbureau dat de totale markt voor quantumtechnologie in de 36 OECD-landen de komende twintig jaar kan uitgroeien tot circa 65 miljard US-dollar. Het bureau baseert zich daarbij op marktverwachtingen van Morgan Stanley en cijfers van de OECD. Figuur 9 schetst de verwachting van Birch.

Voor de markt van op quantumtechnologie gebaseerde producten en diensten kan onderscheid gemaakt worden tussen de markt voor quantumcomputers inclusief quantum-simulators, de markt voor quantumsensoren en de markt voor quantumcommunicatie-oplossingen. Hoewel er al enkele eerste producten en diensten beschikbaar zijn die gebruik maken van quantumtechnologie, zoals de zogenaamde quantum-annealer van D-Wave, de universele maar nog kleinschalige quantumcomputer van IBM, de eerste generatie QKD-oplossingen van het Zwitserse ID Quantique en de atoomklokken en versnellingsmeters van het Franse bedrijf Muquans, is de omvang en toekomstige ontwikkeling van deze markten op dit moment nog zeer ongewis. Deze paragraaf bevat een indicatie van de mogelijke toekomstige omvang ervan, op grond van (gefragmenteerde) informatie uit diverse bronnen.



FIGUUR 9
Schatting van de ontwikkeling van de totale markt voor quantumtechnologie in de 36 OECD-landen. (Bron: Birch)

De markt voor quantumcomputers en quantumsimulators

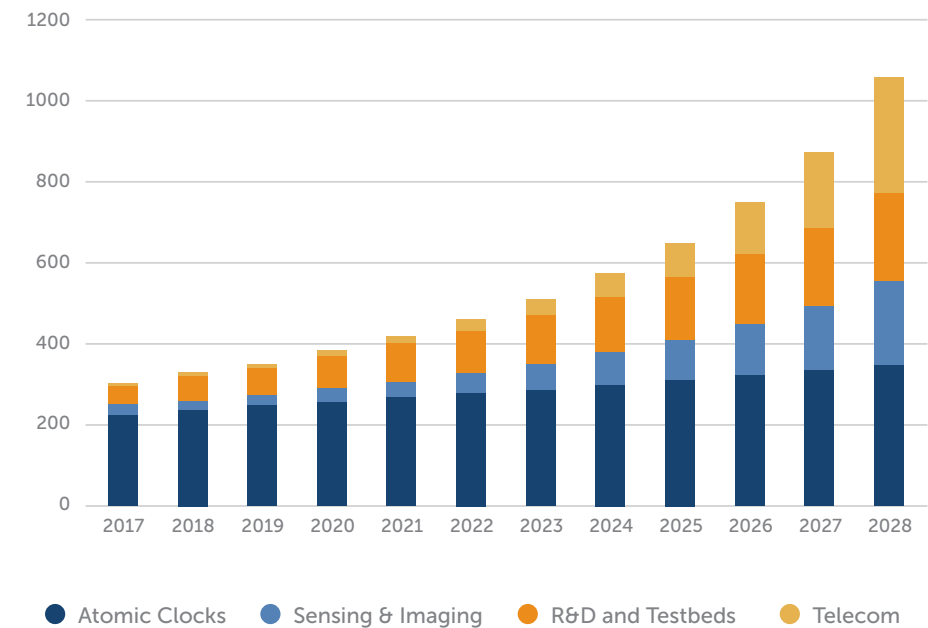
Kijkend naar quantumcomputers en de daaraan gerelateerde dienstverlening, schatte BCG³⁶ in 2018 dat de wereldwijde markt voor quantum computing en quantumsimulatie zich zal ontwikkelen van 1 à 2 miljard US-dollar in 2030 tot 263 à 295 miljard dollar in 2050. Deze getallen weerspiegelen twee scenario's: een nulsceario, waarin BCG de ontwikkeling van quantumcomputer conservatief inschat (de wet van Moore toegepast op qubits en met de aanname dat er geen versnelling optreedt in de ontwikkeling van quantumfoutcorrectie-algoritmes), en een plusscenario, waarin de behoefte aan foutcorrectie significant afneemt met als gevolg dat grootschalige quantumcomputers eerder beschikbaar komen. Beide situaties representeren echter een grote en significante markt, zeker op de lange termijn. Ter vergelijking: de wereldwijde markt voor computing bedraagt volgens BCG op dit moment zo'n 800 miljard dollar.

De snelheid waarmee de markt zich ontwikkelt verschilt enorm in beide scenario's van BCG. Dat komt doordat de ontwikkeling van de markt in sterke mate afhangt van de snelheid waarmee grootschalige quantumcomputers beschikbaar komen. Zo merkt BCG op dat de potentieel adresseerbare markt in 2030 vele malen groter zou kunnen zijn, namelijk zo'n 50 miljard dollar. Dat zou echter een snellere ontwikkeling van de quantumcomputer vereisen dan waar BCG in zijn scenario's van uitgaat. BCG rekent

bovendien uit, dat als het op dit moment al mogelijk zou zijn om quantumsimulaties van complexe atomaire processen uit te voeren, dit alleen al in de Verenigde Staten een markt van 15 à 30 miljard dollar zou opleveren. Dit kan verklaren waarom andere bureaus (waaronder Birch) al sneller een grotere markt voor quantumcomputers voorspellen, variërend van circa 2 tot 10 miljard dollar in 2025.³⁷ Zij gaan uit van een snellere ontwikkeling van de quantumcomputer dan dat BCG in 2018 deed.

De markt voor quantumcommunicatie en quantumsensoren

Recent heeft Tematys een marktstudie uitgebracht voor de Europese Unie, waarin de wereldmarkt voor quantumcommunicatie (met name QKD-toepassingen) en quantumsensoren zoals atoomklokken in kaart is gebracht.³⁹ Zij voorspellen dat de markt voor quantumsensoren in de periode 2020 - 2028 zal groeien van ongeveer 30 miljoen euro tot 210 miljoen Euro, dat de markt voor atoomklokken van 250 miljoen euro groeit tot 350 miljoen Euro, en dat de markt voor quantumcommunicatie (telecom) toeneemt van circa 10 miljoen euro tot 300 miljoen Euro. Een voorwaarde voor het laatste is dat de prijzen voor QKD-units in deze periode met zo'n tachtig procent moeten dalen. Figuur 10 bevat de resultaten van de studie.



FIGUUR 10
Totale markt voor nanoscale quantum optics, wereldwijd, in M€. (Bron: Tematys)

3.4 Ethische, juridische en sociale impact

De meeste artikelen en beschouwingen gaan uit van de positieve effecten van quantumtechnologie op de economie en maatschappij. Zoals elke nieuwe, revolutionaire technologie is ook quantumtechnologie op zichzelf goed noch slecht. De manier waarop de technologie de maatschappij zal beïnvloeden wordt bepaald door de mensen die hem gebruiken. Quantumtechnologie roept bij sommigen doemscenario's op met betrekking tot bijvoorbeeld veiligheid en privacy, de balans tussen burgers, overheden en grote bedrijven, of de geopolitieke verhoudingen tussen landen. Ook de rol van quantumcomputers in de ontwikkeling van kunstmatige intelligentie en van systemen die uiteindelijk misschien slimmer zijn dan wijzelf, kan vragen oproepen. Enkele potentiële risico's van quantumtechnologie voor de maatschappij zijn:

Risico van een grotere ongelijkheid tussen mensen

Het is heel waarschijnlijk dat eerste generatie quantumcomputers en quantumsimulators niet in gelijke mate toegankelijk zijn voor iedereen. Dit kan leiden tot een ongelijke verdeling van macht en rijkdom, bijvoorbeeld tussen de Verenigde Staten, China, Europa en de rest van de wereld, en tussen een aantal grote technologiebedrijven en de rest van de samenleving. Een manier om deze risico's tegen te gaan, kan zijn om quantum computing 'as a service' aan te bieden, zoals IBM nu al doet met de dienst Quantum Experience. Quantumcomputerchips functioneren alleen

bij extreem lage temperaturen, dus waarschijnlijk zullen ze niet als desktop maar als een cloud service worden aangeboden aan gebruikers. Door deze cloud services vrij beschikbaar te maken, kunnen de voordelen van een quantumcomputer door iedereen gedeeld worden. De vraag blijft dan wel of iedereen bereikt kan worden met de kennis en kunde die nodig is om die service te gebruiken.

Risico's voor de stabiliteit van het financiële systeem

Geld is een digitale 'asset' geworden en de meeste banktransacties worden online gedaan. Cybercriminelen die het financiële systeem willen aanvallen zouden dit in de toekomst met behulp van een quantumcomputer kunnen doen. Shor's algoritme kan hen in staat stellen de beveiliging te kraken. Daarom zouden banken en andere financiële instellingen zich nu al moeten voorbereiden op de komst van de quantumcomputer. Gelukkig gebeurt dat ook al, waarbij post-quantum cryptografie en QKD elk hun eigen routes volgen op weg naar een veiligere communicatie. Standaardisering en certificering zijn hierbij echter noodzakelijk.

Risico's op het gebied van privacy en veiligheid

Een quantumcomputer kan in de toekomst een groot deel van de hedendaagse public key encryptie breken. Dat is niet alleen een reëel gevaar voor staatsgeheimen, maar ook voor bijvoorbeeld privégegevens of financiële of medische dossiers. Ontwikkelingen op het gebied van de post-quantum cryptografie hebben tot doel dit gevaar af te wenden.

Drie fases in de ontwikkeling van de markt voor quantumcomputers

Chad Rigetti, de oprichter en CEO van Rigetti Computing, zei in november 2018 het volgende over de ontwikkeling van de eerste applicaties en use cases voor quantum computing: "I look at the quantum computing market as having three phases. The first, which we recently moved out of, was the what-is-possible phase. People could see the potential, but the big question was, can we build a programmable quantum computer? We've answered that question, yes, we've shown it can be done. We're now in

the second phase, the early market phase. We know the machines are real, but nobody has actually built one and used it to solve a problem that is not also solvable using classical computers. When we do that – which is my definition of quantum advantage – we'll move into the third phase, the growth phase for quantum computing. That will be defined by the development of new markets and domains that are rooted in quantum advantage."³⁸

³⁶ BCG, 'The coming quantum leap in computing', Massimo Russo et al., mei 2018.

³⁷ Waaronder Market Research Future, AMR en Tabular Analysis.

³⁸ 'Chad Rigetti on the Race for Quantum Advantage', interview door BCG, november 2018.

³⁹ 'Market Research Study in Nanoscale quantum optics', COST Action MP1403, Tematys.

Legal & Societal Sounding Board van het Quantum Software Consortium

In 2017 kende NWO een Zwaartekracht-programma toe aan het Quantum Software Consortium, een samenwerking tussen coördinator QuSoft, QuTech en de Universiteit Leiden. Met deze toekenning van 18,8 miljoen euro voor een periode van tien jaar werkt dit consortium aan de ontwikkeling van software voor quantumcomputers en quantumnetwerken, aan cryptografie in een quantumwereld en

aan quantumsoftware-demonstrators. Daarnaast wordt expliciet gezocht naar methoden voor het 'verantwoord innoveren' met deze technologieën, die zowel juridisch, ethisch, als maatschappelijk grensverleggende impact hebben. Hiervoor is een 'Legal & Societal Sounding Board' opgericht, dat zich richt op deze ELSA-aspecten en een bescheiden onderzoeks- en educatieprogramma opzet.

Risico's met betrekking tot de controlerende rol van overheden

Quantumtechnologie kan ertoe leiden dat overheden hun burgers heel precies kunnen controleren. Dat is een risico voor de vrijheid en privacy van burgers en vereist mogelijk aanscherpingen in de wetgeving. Anderzijds kunnen risico's ontstaan wanneer criminele organisaties quantumtechnologie gaan gebruiken die niet kan worden gehackt door een overheid; in zo'n geval kan de overheid juist te weinig controle uitoefenen.

Risico's in het veiligheidsdomein

Landen die als eerste over quantumtechnologie beschikken zullen voor enige tijd een communicatie- en surveillancevoordeel hebben ten opzichte van andere landen, wat tot geopolitieke verschuivingen kan leiden. Net zoals er in de toekomst nieuwe medicijnen en moleculen gesimuleerd kunnen worden met behulp van een quantumcomputer, zouden quantumsimulaties ook gebruikt kunnen worden voor het maken van nieuwe (biologische) wapens, die bijvoorbeeld zijn afgestemd op specifiek DNA. Quantum computing vrij beschikbaar maken voor alle landen kan deze verschuivingen beperken. Een bijkomende complicatie is dat quantumtechnologie 'blind computing' mogelijk maakt: het gebruiken van een quantumcomputer voor berekeningen zonder dat de host er weet van heeft welke berekeningen worden uitgevoerd. Het vrij beschikbaar maken van quantum computing zal daarom regulering vereisen.

Gezien de snelle ontwikkelingen van de technologie, is het tijd om een maatschappelijke dialoog te starten over de ethische, juridische en sociale aspecten van quantumtechnologie (de zogenaamde ELSA-aspecten) en over de integratie ervan in de Nederlandse (en Europese) maatschappij. Nederland kan hierin het voortouw nemen en als pionier optreden. Een begin is al gemaakt, met een publicatie⁴⁰ over de impact van quantuminternet op de maatschappij door het Quantum Vision team van de TU Delft. Aspecten als het verbeteren van privacy, governance over het quantuminternet en net neutrality, en toegankelijkheid voor alle partijen worden hierin beschreven. Daarnaast is er een Legal & Societal Sounding Board ingesteld in het Quantum Software Consortium (zie tekstkader).

Een voorwaarde voor een maatschappelijke dialoog over quantumtechnologie is dat alle deelnemers de technologie en haar implicaties tot op bepaalde hoogte begrijpen. Quantumtechnologie wordt (ook door kenners) immers nog vaak gepresenteerd als raadselachtig, doorspekt met tegen-intuïtieve ideeën en processen. Dit kan voor betrokkenen uit andere wetenschapsgebieden, de industrie, de overheid en de rest van de maatschappij een barrière opwerpen om deel te nemen aan de discussie over quantumtechnologie. Een dergelijke barrière kan uiteindelijk de groei en inbedding van de technologie schaden. Er is het risico dat de maatschappij de technologie afstoot of niet accepteert, waardoor de inbedding tegengehouden, tegengewerkt of enorm vertraagd wordt. Denk maar aan onderwerpen als stamceltherapie, genetische modificatie, klimaatoplossingen en vaccinaties.

3.5 Conclusie

Quantumtechnologie zal een grote impact hebben op onze maatschappij en economie – niet alleen op de lange, maar ook al op de korte termijn en voor alle sectoren van de Nederlandse economie. Het aantal mogelijke toepassingen van quantumcomputers, quantumsimulators, quantumnetwerken en quantumsensoren is schier onbeperkt; we kunnen op dit moment misschien nog niet eens de helft bedenken van wat er allemaal mogelijk wordt. Daardoor is het niet goed mogelijk om nu al te schatten hoe groot de economische effecten van alle toepassingen, producten en diensten zullen zijn die de technologie mogelijk maakt. Vergelijk het maar met de markt voor halfgeleiders: in 1943 voorspelde Thomas Watson, destijds CEO van IBM, dat er een wereldmarkt zou ontstaan voor misschien zo'n vijf computers. Dat is al lang geleden, maar ook veel later nog dachten verschillende mensen dat het zo'n vaart niet zou lopen. Zo zei Ken Olsen, oprichter en president-directeur van DEC, in de jaren '70 een toonaangevende speler in de markt voor computertechnologie, in 1977 het volgende: "There is no reason anyone would want a computer in their home."⁴¹ En nu, jaren later, zijn computers niet meer weg te denken uit het dagelijkse leven en is de halfgeleiderindustrie aanjager van mobiele applicaties, zelfrijdende voertuigen, enzovoorts.

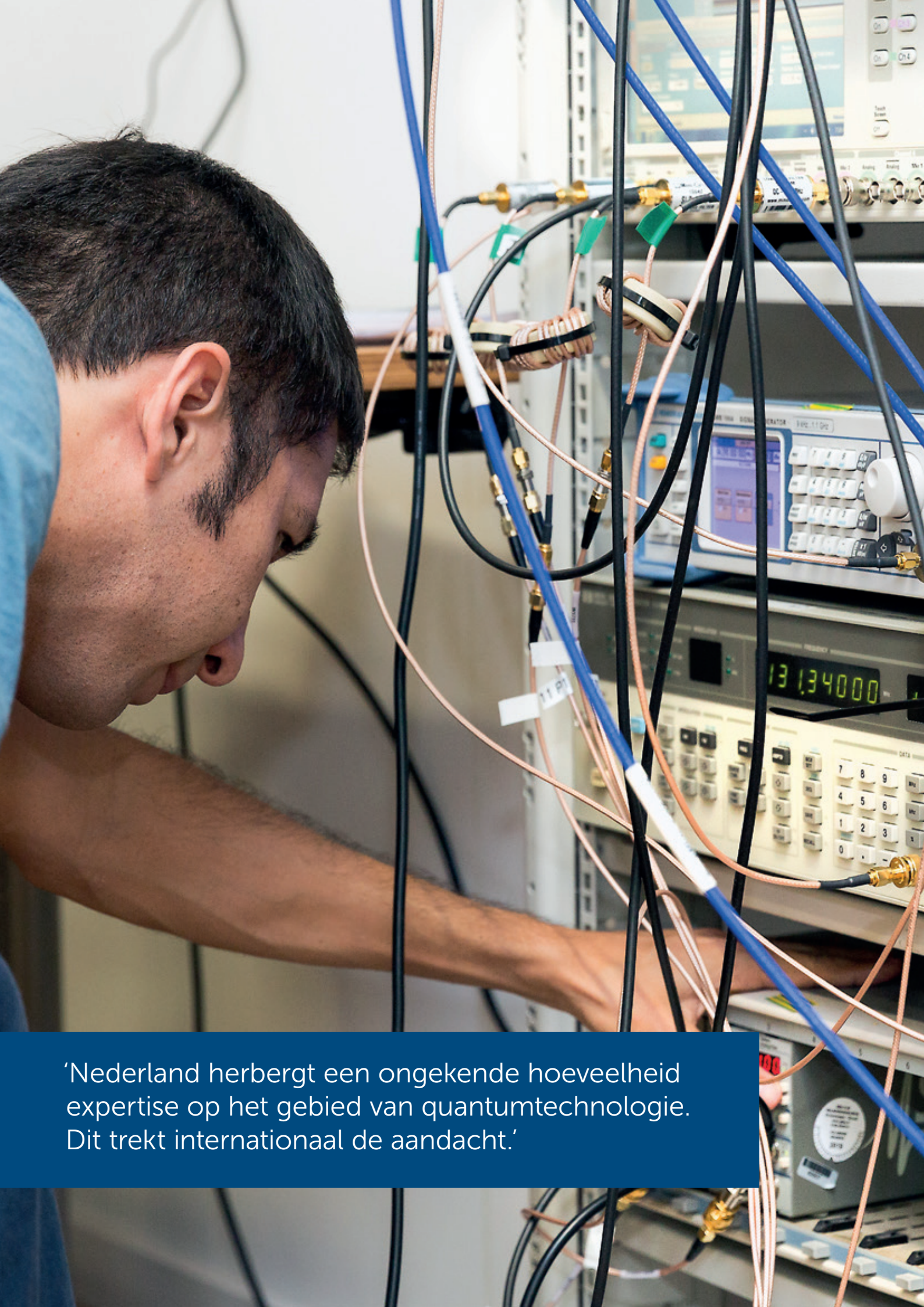
Op termijn ligt er ontegenzeggelijk een grote markt in het verschiet, maar het moment waarop deze ten volle bediend kan worden hangt af van het tempo waarin de technologie zich zal ontwikkelen. Desondanks moeten we nu acteren om de economische kansen van quantumtechnologie voor Nederland te maximaliseren. We moeten nu investeren in onderzoek, onderwijs, infrastructuur en de opbouw van een ecosysteem. Want als we nu massa en excellentie opbouwen en een voorsprong nemen, dan kunnen we daar als land decennialang van profiteren. Op andere terreinen is het Nederland gelukt, zoals in de watersector (met unieke kennis en kunde), in de ICT-sector (als groot internetknooppunt) en in de semicon (als wereldmarktleider op het gebied van

chipfabricage-apparatuur). De uitgangspositie om zo iets ook op het gebied van quantumtechnologie te bereiken hebben we, met enkele wereldwijd leidende onderzoeksinstituten en hun nauwe samenwerking met grote en kleine bedrijven. Nu is de tijd om die positie uit te bouwen.

Tegelijkertijd roept quantumtechnologie ethische en juridische vragen op, zoals eigenlijk elke nieuwe, revolutionaire technologie dat doet. Deze moeten we niet uit het oog verliezen. Zeker veiligheid en privacy staan momenteel volop in de belangstelling: de angst dat quantumcomputers bestaande databeveiligings sleutels op termijn kunnen breken. Dat is een reëel gevaar, maar met post-quantum cryptografie en QKD hebben we al enkele antwoorden in voorbereiding om de veiligheid van onze data respectievelijk communicatie te waarborgen. Nederland kan het voortouw nemen in het starten van een maatschappelijke dialoog over deze en andere ELSA-vraagstukken, en daarmee binnen Europa en misschien zelfs wereldwijd het voortouw nemen in de ontwikkeling van de benodigde sociale, ethische en juridische kaders. Nederlandse kenniscentra zijn de eerste stappen al aan het zetten.

⁴⁰ Zie www.tudelft.nl/2019/tu-delft/tu-delft-lanceert-publicatie-over-de-impact-van-quantuminternet/

⁴¹ Zie: www.pcworld.com/article/155984/worst_tech_predictions.html



‘Nederland herbergt een ongeken- de hoeveelheid expertise op het gebied van quantumtechnologie. Dit trekt internationaal de aandacht.’

04

HET NEDERLANDSE QUANTUMLANDSCHAP IN EEN INTERNATIONALE CONTEXT

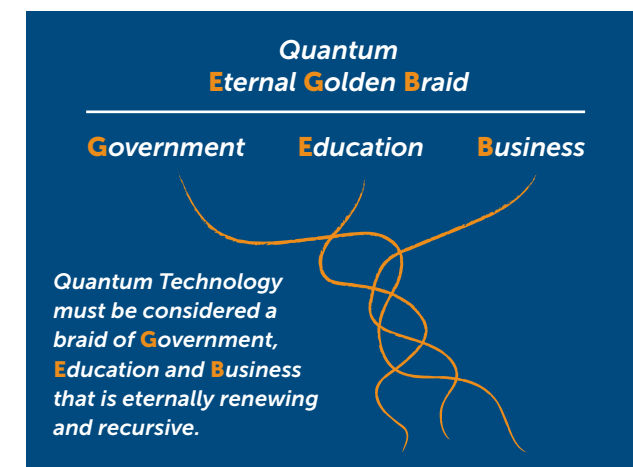
4.1 Vervlechting van overheid, wetenschap, industrie en maatschappij

Succesvol ontwikkelen van en innoveren met quantum-technologie is uiterst complex. Dat komt door de grote wetenschappelijke en technologische uitdagingen die moeten worden opgelost, maar ook door de benodigde integratie van verschillende technologieën en disciplines. Het vereist veel denkkracht, creativiteit en infrastructuur, en een grote impuls met betrekking tot human capital en financiering. Bovendien is quantumtechnologie conceptueel ingewikkeld en vormt het vertalen van quantumconcepten in concrete toepassingen een uitdaging op zich. Geen enkele persoon of organisatie, en zelfs geen enkel land kan de technologie zelfstandig in de volle breedte ontwikkelen.

Een continue samenwerking tussen de onderzoeksweld, het bedrijfsleven en de overheid is vereist. Niet als lineair proces, waarin het stokje als in een estafette wordt overgedragen, maar in een meerjarige samenwerking waarin de rollen van de partijen in verschillende stadia in elkaar overlopen.

In die samenwerking speelt de overheid meer dan alleen haar traditionele rol van wetgever en subsidieverstrekker, maar neemt ze als netwerkpartner en belanghebbende actief deel aan het innovatieproces. En, bijzonder voor dit veld: bedrijven financieren niet alleen hoog TRL-onderzoek⁴² waarvan de resultaten snel marktrijp zijn, maar zijn ook partner in funderend onderzoek. Ze werken met universiteiten aan de ontwikkeling van talent en de opbouw van eigen onderzoekscapaciteiten.

55



FIGUUR 11

Innovatie in wetenschap en technologie wordt steeds complexer en vereist een continue samenwerking tussen wetenschap, industrie, overheid en maatschappij. Dit is de basis van de gouden driehoek aanpak die in Nederland al jaren wordt gevolgd in het topsectoren- en missiegedreven innovatiebeleid. De variant hierop in dit plaatje is gepresenteerd door een vooraanstaande quantum-expert die was uitgenodigd voor een keynote tijdens de inloopdag die plaatsvond in Utrecht, op 16 april 2019, met een knipoog naar het beroemde boek 'Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid' van Douglas Hofstadter.

⁴² TRL staat voor Technology Readiness Level en is een maat voor de rijpheid van een technologie. Hoe hoger de TRL, hoe dichterbij de industriële of maatschappelijke toepassing van een technologie.

Deze vervlechting van wetenschap, industrie en overheid biedt unieke kansen voor Nederland, omdat samenwerken in onze cultuur is ingebakken en we kunnen bogen op een lange traditie van publiek-private samenwerking, die ons keer op keer hoog in de internationale innovatieranglijsten doet eindigen.

Bovendien herbergt Nederland op geografisch kleine schaal een ongekeerde hoeveelheid expertise op het gebied van quantumtechnologie. Dit trekt internationaal de aandacht, onder andere van grote bedrijven die willen investeren in Nederland. Hierdoor kunnen wetenschappelijke resultaten sneller in toepassingen worden vertaald en het draagt bij aan het ontstaan van startups. Nu is dan ook een belangrijk moment om door te pakken: lokaal zijn de eerste samenwerkingsverbanden rondom quantumtechnologie aan het ontstaan, die met elkaar een Nederlands ecosysteem vormen. Een belangrijke kracht van Nederland hierbij is systeemdenken: Nederland is buitengewoon goed in systems engineering en het combineren van uiterst complexe technologieën tot werkende systemen met unieke mogelijkheden, denk maar aan de Brainportregio en het succes van de Nederlandse semiconductieindustrie. De hierbij opgedane kennis kan van groot nut zijn bij de realisatie van grote doorbraken ten aanzien van bijvoorbeeld het quantuminternet en de quantumcomputer.

4.2 'Nederland Quantumland'

Nederland heeft als klein land veel expertise en faciliteiten op het gebied van quantumtechnologie. De ruggengraat van dit unieke kennis- en innovatielandschap wordt gevormd door drie gespecialiseerde onderzoekscentra. Van noord naar zuid zijn dit achtereenvolgens: QuSoft in Amsterdam, QuTech in Delft en QT/e in Eindhoven. Daarnaast zijn er de universiteiten van Leiden, Nijmegen, Utrecht, Twente en Groningen en de onderzoeksinstituten TNO en AMOLF. Onderling wordt nauw samengewerkt aan onderzoek en innovatie, waarbij ook nationale en internationale bedrijven zijn aangehaakt.

Volgens een recent rapport van Birch werken verspreid over de Nederlandse kennisinstellingen circa 70 hoofdonderzoekers (PI's) aan quantumtechnologie, en behaalden in 2016

bijna 2500 studenten hun MSc-diploma in een vakgebied gerelateerd aan quantumtechnologie.⁴³ De kennisopbouw in Nederland mag daarom met recht indrukwekkend genoemd worden. De impact van het onderzoek dat in Nederland aan quantumtechnologie wordt gedaan steekt bovendien sterk boven het internationale gemiddelde uit, zoals het rapport van Elsevier dat in paragraaf 1.2 werd aangehaald aantoont.

4.2.1 De onderzoekscentra QuTech, QuSoft en QT/e

QuTech: Advanced Research Center for Quantum Computing and Quantum Internet

QuTech is in Nederland het grootste onderzoekscentrum op het gebied van quantumtechnologie en heeft internationaal grote faam. Het centrum ontstond in 2013, als een samenwerking tussen de TU Delft en TNO en mede op basis van publiek-privaat gefinancierde samenwerking met Microsoft en NWO. Het centrum heeft als missie om quantumtechnologie op basis van superpositie en verstrengeling te ontwikkelen en toe te passen in schaalbare quantumnetwerken en quantumcomputers. Hiertoe bundelt het instituut de krachten van wetenschappelijk onderzoek, technologieontwikkeling, engineering en industriële betrokkenheid. De combinatie van deze multidisciplinaire aanpak en het feit dat QuTech werkt aan een zogenaamde full-stack quantumcomputer en quantuminternet, maken QuTech uniek in de wereld.

Het onderzoek wordt uitgevoerd in vier focusgebieden: fout-tolerante quantum computing, quantuminternet en netwerk (quantum) computing, topologische quantum computing en quantumsoftware en -theorie. Daarnaast heeft QuTech een roadmap voor 'shared development', waarbinnen gebiedsoverschrijdende technologie wordt ontwikkeld en gedeeld. In 2014 werd QuTech uitgeroepen tot Nationaal Icoon. In 2018 bood het centrum werk aan ongeveer 200 fulltime medewerkers en het wil doorgroeien naar 350 FTE in 2023.

QuTech heeft verschillende succesvolle samenwerkingen met andere instituten. De basis voor het huidige succes is gelegd in de samenwerking tussen Delft en Leiden, via een FOM/NWO-focusprogramma (2004-2013), een ERC Synergy Grant (2013-2019) en twee Zwaartekrachtprogramma's (waarvan een ook met QuSoft). Met QT/e in Eindhoven worden nanostructuren voor majorana qubits ontwikkeld en met de Universiteit Twente wordt samengewerkt bij de fabricage van

QuTech: een Nationaal Icoon

In 2014 werd QuTech door de Nederlandse regering tot één van de vier Nationale Iconen benoemd, vanwege de prominente plaats die QuTech inneemt in de wereld van quantumonderzoek en vanwege de potentie om grote maatschappelijke uitdagingen in onder andere de gezondheidszorg en het veiligheidsdomein te helpen oplossen. Met deze status gaf de overheid een helder signaal af: QuTech is van groot belang voor Nederland. Dit signaal vertaalde zich in 2015 naar een publieke investering vanuit de TU Delft, TNO, NWO en de ministeries van OC&W en EZ, van circa 150 miljoen euro voor tien jaar.



Si-MOS-substraten. Samen met LION in Leiden onderzoekt QuTech de interactie van licht en materie op quantschaal en hybride toepassingen van supergeleidende en topologische quantum computing technologieën.

Recent heeft QuTech een quantum computing hardware- en softwareplatform ontwikkeld: de Quantum Inspire. Hiermee kunnen binnen een emulatieomgeving quantumalgoritmes ontwikkeld en getest worden op de nationale supercomputer Cartesius van SURF, waarbij een quantumcomputer met een omvang tot 37 qubits wordt nagebootst. Deze omgeving staat open voor ontwikkelaars van quantumsoftware en -algoritmes, en beoogt quantumtechnologie naar een hoger plan te tillen. Binnenkort wordt het platform uitgebreid met een echte quantumchip. Daarmee vormt dit platform een vruchtbare vorm van open innovatie voor QuTech, die als startpunt kan dienen voor het bouwen van een nationale faciliteit voor quantum computing. Later in 2019 verwacht QuTech ook toegang tot echte qubits aan te bieden via het Quantum Inspire platform.

QuTech werkt samen met Microsoft aan de ontwikkeling van een quantumcomputer op basis van zogenaamde topologische Majorana-fermionen. In 2012 toonden onderzoekers van de TU Delft en de TU Eindhoven in een baanbrekende Science-publicatie voor het eerst de belangrijkste tekenen voor het bestaan van deze deeltjes aan. In februari 2019 opende Koning Willem-Alexander het Microsoft Quantum Lab Delft.

In 2015 investeerde Intel 50 miljoen dollar in een exclusieve samenwerking voor tien jaar met QuTech, voor de ontwikkeling van technologie en elektronica voor quantum computing. Hierbij brengt Intel expertise in op het gebied van

geavanceerde fabricage van qubits en voor het maken van elektronica die werkt bij extreem lage temperaturen. QuTech speelt een internationale trekkersrol bij de ontwikkeling van een quantuminternet. Zo leidt QuTech de Quantum Internet Alliance van het Europese Quantum Technologies Flagship, dat als doel heeft om een blauwdruk te maken voor een Europees quantuminternet. Ook in dit veld trekt QuTech private partijen aan. De ontwikkeling van een quantuminternet-proeftuin met verbindingen tussen verschillende steden in de Randstad geschiedt in samenwerking met onder andere KPN, ABN AMRO, AMS-IX en SURF. Binnen het Europese Flagship werkt QuTech samen met twaalf bedrijven die variëren van hardware-ontwikkelaars (zoals het Duitse Toptica en het Nederlandse Janssen Precision Engineering) tot applicatieontwikkelaars (zoals SAP).

De totale omvang van de industriële bijdrage aan het onderzoek in QuTech overstijgt 10 miljoen euro in 2019.

Delft Q-Campus

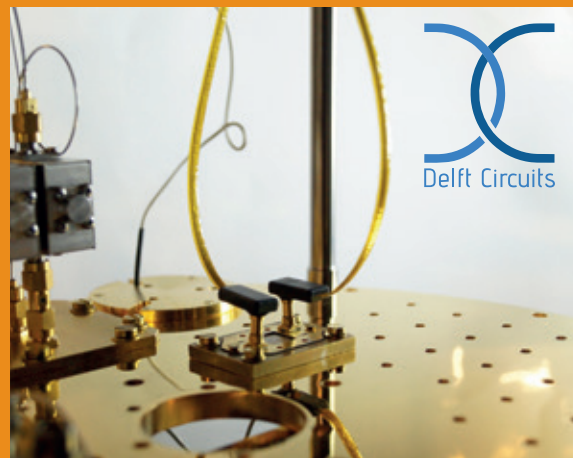
De aankondiging van Microsoft om een eigen lab op de TU Delft campus te vestigen, is aanleiding geweest voor de start van Q-campus⁴⁴: een initiatief om het lokale ecosysteem rondom QuTech uit te bouwen met bedrijven, startups en gedeelde faciliteiten. Momenteel wordt de organisatie voor Q-campus ingericht, met als belangrijkste taken acquisitie, accountmanagement en community building. Inmiddels heeft het Finse bedrijf Bluefors aangekondigd een onderzoeksfaciliteit op de Q-campus te openen en is er een handvol startups gevestigd. Zo verkoopt Single Quantum sinds 2012 supergeleidende enkel-foton detectoren (het bedrijf is daarmee een van de toonaangevende spelers wereldwijd), richt Delft Circuits zich sinds 2017 op de commerciële productie van breedband microgolfkabels voor cryogene omgevingen en

⁴³ Birch, 'Building a Q-Campus: realizing a quantum ecosystem in Delft', 2018.

⁴⁴ Dit is nog een werknaam.

Een voorbeeld van een startup: Delft Circuits

Delft Circuits is een startup die in 2017 is ontstaan uit de afdeling Quantum Nanoscience van de TU Delft en ontwikkelt bekabeling die nodig is binnen en buiten de cryostaten voor de aansturing van qubits. Dit is een niche-markt waar momenteel slechts enkele partijen in actief zijn. Het eerste product, Cri/oFlex®, is een laag-thermisch belastbaar, massaal schaalbaar en flexibel type RF-bekabeling. Bij Delft Circuits werken momenteel circa twaalf mensen met een multidisciplinaire achtergrond. Delft Circuits levert aan national labs, universiteiten en bedrijven wereldwijd, zoals aan IMEC, Yale, MIT en D-Wave.



biedt QBlox sinds 2019 hardware aan voor het aansturen en uitlezen van multi-qubit systemen. Adviesbureau Birch heeft in haar al eerder aangehaalde studie bevestigd dat de Q-Campus community in 2023 kan uitgroeien tot 900 ondernemers en onderzoekers, waarvan 350 bij QuTech zelf.

Quantum Applicaties Fieldlab Zuid-Holland

Recent zijn samenwerkingsverbanden rond applicaties en use cases met betrekking tot quantum computing en quantuminternet opgezet vanuit een regionale samenwerking (QuTech, TUD, TNO, IQ) in verbinding met de toepassers vanuit overheid en bedrijfsleven. Deze activiteit wordt in het kader van de Nationale Agenda Quantumtechnologie verbonden met de andere applicatiegerichte activiteiten in Nederland, zoals die in Amsterdam en Leiden (zie beschrijvingen verderop in de tekst).

Door de ontwikkeling van geschikte modellen en de vertaling daarvan in software en algoritmes wordt de waarde van quantumtechnologie voor verschillende sectoren met de partners ontwikkeld en geëvalueerd. De aanpak steunt op het gebruik van hardware en simulatoren van QuTech (Quantum Inspire, Quantum Link) en de andere relevante internationale aanbieders. Het doel is de verdere ontwikkeling van use cases, het versnellen van de 'uptake' van quantumtechnologie in ons nationale bedrijfsleven, en het organiseren van de aansluiting op de relevante hardware-aanbieders. Als applicatiegebieden zijn op dit moment water (zie het kader over het QuantumLab in paragraaf 3.2.4), finance en energie in bewerking, en worden verkenningen uitgevoerd voor security en bio/pharma.

QuSoft: Research Center for Quantum Software

QuSoft is een samenwerkingsverband tussen CWI, UvA en VU Amsterdam. Het centrum is gestart in 2015 en heeft als

missie om nieuwe protocollen, algoritmes en applicaties te ontwikkelen die toegepast kunnen worden op kleinschalige en middelgrote quantum computing prototypes. Dit wereldwijd toonaangevende onderzoek wordt uitgevoerd langs vier lijnen: quantumsimulatie en toepassingen voor systemen met enkele qubits, quantum-informatiekunde, cryptografie in een quantumwereld, quantumalgoritmes en complexiteit. In 2018 huisvestte QuSoft 60 fulltime medewerkers; het instituut streeft ernaar te groeien naar 120 FTE in 2022.

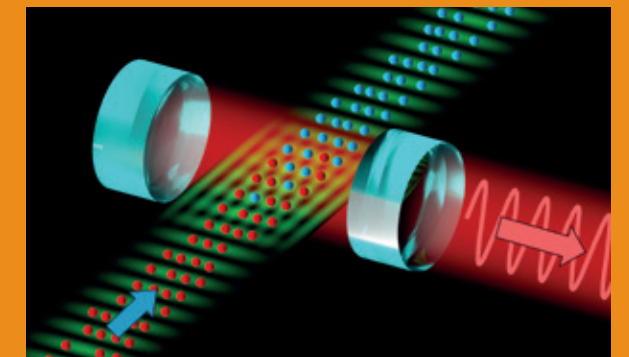
QuSoft is via verschillende samenwerkingen nauw verbonden met de rest van het quantumlandschap. Een belangrijk voorbeeld daarvan is het Quantum Software Consortium, waarin QuSoft samenwerkt met QuTech en de Universiteit Leiden om quantumsoftware en applicaties te ontwikkelen. Daarnaast werken de individuele onderzoekers van QuSoft intensief samen met andere nationale partners. Een voorbeeld is een onlangs toegekend NWO Natuurkunde Vrij Programma rondom quantumsimulators. Hierin werkt QuSoft samen met de Universiteit Utrecht, de Radboud Universiteit en met QT/e in Eindhoven. Een tweede voorbeeld is het iqClock-programma voor ultra-nauwkeurige atoomklokken.

QuSoft werkt nauw samen met de industrie. In februari van 2019 startte QuSoft een unieke samenwerking met Bosch Group, waarin gedurende twee jaar een verkenning plaatsvindt naar praktische toepassingen van quantum computing binnen Bosch, specifiek voor engineering-ontwikkelingen en op het vlak van kunstmatige intelligentie en machine learning. Met ATOS werkt QuSoft samen in workshops rondom quantum-programmeren. Daarnaast start QuSoft met ABN AMRO een project rondom quantum-safe bankieren. Ook bereidt QuSoft de lancering voor van een spin-off bedrijf, dat producten en diensten op het gebied van quantumsoftware zal gaan aanbieden.

Het European Quantum Flagship-project iqClock

Het Quantum Flagship-project iqClock geeft samen met het MoSaiQ trainingsnetwerk voor jonge onderzoekers richting aan de industriële ontwikkeling van een geïntegreerde optische rasterklok, en doet dat mede via de ontwikkeling van een nieuw type optische klok, de superstralende klok. Deze is gebaseerd op een continue bron van koude atomen, met een hele hoge intensiteit, en moet hierdoor veel gevoeliger zijn dan bestaande atoomklokken. Deze onderzoeksactiviteiten vormen nationaal een basis voor de ontwikkeling van optische atoomklokken, waarin bijvoorbeeld LioniX International, Universiteit Twente en ESA samenwerken om nieuwe, eenvoudiger lasersystemen te ontwikkelen, maar ook om onderzoek te doen naar quantumcomputers en quantumsimulators op basis van ultrakoude atomen.

De uitkomsten kunnen hun weg vinden naar toepassingen in bijvoorbeeld de telecomsector en veiligheidssector. (Illustratie: Florian Schreck en Shayne Bennetts, UvA.)



Quantum Applicatie en Software Hub Amsterdam

Doordat bedrijven en instanties steeds meer doordrongen raken van de mogelijke impact van quantumtechnologie, is er een toenemende vraag naar exploratie van use cases en applicaties voor quantumtechnologie op steeds meer toepassingsgebieden.

Ingegeven door deze toenemende vraag wordt de Quantum Applicatie en Software Hub Amsterdam opgericht. Hierin wordt de kennis en kunde op het vlak van quantumsoftware en -applicaties binnen QuSoft, samen met applicatie-specifieke kennis uit de universiteiten (zoals business and finance), gekoppeld aan uitdagingen vanuit het bedrijfsleven. In de Hub helpen lokale en regionale overheden om de samenwerking te faciliteren, en zijn Innovation Exchange Amsterdam (IXA) en het Amsterdam Science Park (ASP) betrokken om de ontwikkeling van nieuwe ideeën, oplossingen, diensten en producten te ondersteunen en de innovatie naar de markt te versnellen.

De Hub zal op verschillende onderwerpen de samenwerking aangaan met de industrie, zoals voor quantum finance (aangezien de financiële sector in Amsterdam een natuurlijk ecosysteem kent), maar ook voor quantumchemie en materiaalontwikkeling, of bijvoorbeeld voor quantumapplicaties in Operations Research. Deze onderwerpen zijn niet alleen wetenschappelijk interessant, maar hebben ook een directe link met applicaties en het bedrijfsleven.

In eerste instantie kunnen de meeste verkenningen platform-onafhankelijk worden gedaan, maar op termijn zal ook de implementatie op hardware uitgevoerd moeten

worden. Dit kan gaan om quantumsimulators of quantumcomputers, maar ook om quantumcommunicatie-infrastructuur of quantumsensoren. Voor het succes van de Hub is het daarom van groot belang dat deze open staat voor samenwerking met alle spelers in de Quantum Delta NL (en daarbuiten). Door tegelijkertijd zowel duidelijk zichtbaar als verbindend te zijn, is de Hub in staat extra partijen uit zowel binnen- als buitenland aan de Nationale Agenda Quantumtechnologie te binden. Op deze wijze versterkt de Hub de QΔNL en draagt hij bij aan een aantrekkelijk vestigingsklimaat.

QT/e: Center for Quantum Materials and Technology Eindhoven

QT/e begon in 2018 als een samenwerking tussen de faculteiten Technische Natuurkunde, Wiskunde & Informatica en Electrotechniek van de TU/e. QT/e richt zich op grensverleggend fundamenteel en toegepast onderzoek om doorbraken in de ontwikkeling van quantummaterialen en quantumtechnologie mogelijk te maken, waarmee nieuwe methoden en producten ontwikkeld worden die ten dienste staan van de maatschappij. In verschillende onderzoeksgroepen werken veertig onderzoekers aan de volgende onderwerpen: quantumsimulatie, post-quantum cryptografie, quantumprotocollen, quantum-nanofotonica en quantummaterialen en -apparaten.

QT/e en QuTech werken nauw samen om complexe structuren op nanoschaal te realiseren voor topologische quantum computing toepassingen op basis van Majorana-deeltjes. QT/e werkt met de Universiteit Twente aan de ontwikke-

Quantumveilige authenticatie

Binnen QT/e wordt aan de theorie van quantumveilige authenticatie ('Quantum Secure Authentication') gewerkt, gebaseerd op zogenaamde physically unclonable functions (PUFs). Door zeer zwak laserlicht te schijnen op een complexe verstrooier, ontstaat een uniek patroon dat kan worden gebruikt voor authenticatie. Op de Universiteit Twente is hiervoor een zogenaamde QSA-in-a-box demonstrator gebouwd (zie foto), in samenwerking met QT/e. In de toekomst zal deze technologie verder worden geminiaturiseerd, met als droom een quantumcreditcard.



ling van quantumveilige authenticatie, en in het Europese UNIQORN-project⁴⁵ werkt QT/e mee aan de ontwikkeling van geïntegreerde technologie die QKD-on-a-chip mogelijk moet maken. De Eindhovense speerpunten nanotechnologie, materiaalkunde en geïntegreerde fotonica vinden via deze programma's hun toepassing in quantumtechnologie. Controle over koude atomen voor quantumsimulatie-toepassingen staat centraal in het Koude Atomen Lab van de TU Eindhoven. Samen met QuSoft, UvA, Universiteit Utrecht en de Radboud Universiteit participeert deze groep in een NWO-programma om quantummaterialen te simuleren met koude atomen en moleculen.

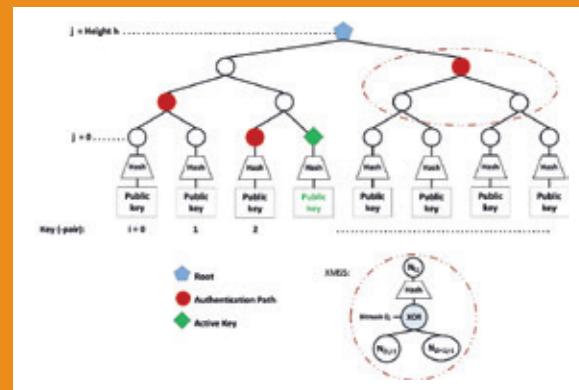
In het focusgebied post-quantum cryptografie werken de QT/e onderzoekers zowel aan de ontwikkeling en implementatie van deze cryptografie, alsmede aan veiligheidsanalyses en 'side-channel' aanvallen op post-quantum cryptosystemen.

Deze systemen zijn ontworpen om aanvallen van quantumcomputers te weerstaan. Quantumcryptanalyse, inclusief de ontwikkeling van nieuwe quantumalgoritmes voor cryptanalyse, vormt een integraal onderdeel van de veiligheidsanalyse en zorgt voor een directe link tussen QT/e en QuSoft. Van de slechts 26 resterende algoritmen in de NIST-competitie voor een post-quantum cryptografie standaard, zijn er zes sterke kandidaten van de hand van QT/e. Sommige van deze kandidaten zijn in samenwerking met onder andere Cisco, IBM, NXP en Philips ontwikkeld.

Bovendien zijn Microsoft en QT/e recent een samenwerking aangegaan om Majorana-transport in topologische materialen verder te ontwikkelen. In deze samenwerking worden meerdere junior-onderzoeksposities gefinancierd. Ook de Topsector HTSM draagt aan deze samenwerking bij. In het Europese UNIQORN-project wordt onder andere met

Toekomstgerichte bescherming voor updates

Software-updates zijn afhankelijk van de authenticiteit en integriteit van de verstrekte patches. Als een cybercrimineel in staat is om deze bescherming te omzeilen dan kan hij alle computers infecteren die zijn patch downloaden. Huidige updates worden beschermd door elektronische handtekeningen. QT/e nam het initiatief bij het ontwerpen en het standaardiseren van XMSS, een nieuw elektronisch handtekeningenschema dat aanvallen van quantumcomputers kan weerstaan. XMSS is nu een IETF-standaard, snel op weg om een NIST- en ISO-standaard te worden⁴⁶, en wordt al in de praktijk gebruikt, bijvoorbeeld in QRL, een nieuwe cryptomunt.



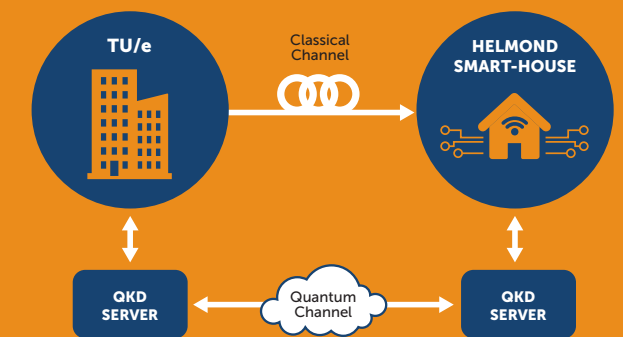
⁴⁵ Zie <https://quantum-uniqorn.eu>

⁴⁶ Zie <https://csrc.nist.gov/projects/stateful-hash-based-signatures>

Quantumveilig verbonden slimme woning in Brainport Smart District

In Helmond wordt het Brainport Smart District ontwikkeld. TU/e studententeam CASA bouwt in een van de eerste projecten in deze slimme wijk een nieuw soort huis, dat betaalbaar, comfortabel en duurzaam moet zijn. In deze woning worden de allernieuwste data- en domotica technologieën getest en ontwikkeld. De gegenereerde data moet overal veilig kunnen worden uitgelezen. Daarom wordt een quantumveilige verbinding gelegd tussen de woning in Helmond en de TU/e campus. Met behulp van quantumslutels wordt de te transporteren data beveiligd. Naast deze verbinding wordt ook een quantumveilige verbinding met het gemeentehuis in Waalre gemaakt.

Partners hierbij zijn onder andere domotica-leverancier BeNext BV, net-provider KT Waalre, SURF en de gemeente Waalre.



het Eindhovense Smart Photonics samengewerkt. Binnen QT/e ontwikkelt het High Capacity Optical Transmissions Lab een testbed voor een quantumveilige verbinding van slimme woningen binnen het Brainport Smart District in Helmond. Het Eindhovense lab test wat er aan technologieën al bestaat, en gaat een stap verder door ook de integratie van technologieën te testen.

Fotonica en geïntegreerde fotonica zijn net als quantumtechnologie erkende sleuteltechnologieën. Nieuwe technologie voor communicatiesystemen, data-veiligheid, maar ook nieuwe sensoren hebben een prominente plek in de Nationale Agenda Fotonica en in de plannen om ook voor geïntegreerde fotonica een sterk Nederlands ecosysteem te bouwen. Gezien de gedeelde expertise in zowel (geïntegreerde) fotonica en quantumtechnologie in Delft, Eindhoven, Nijmegen en Twente, is het niet ondenkbaar dat een groot ecosysteem op het raakvlak van deze sleuteltechnologieën zal ontstaan. Het Europese UNIQORN-project en de quantumveilig verbonden slimme woning van het Brainport Smart District zijn hier voorlopers van, net als de ontwikkelingen van een quantuminternet in Delft.

4.2.2 Nederlandse kennisinstellingen en universiteiten

Naast de hiervoor beschreven 'ruggengraat' van QuTech, QuSoft en QT/e heeft Nederland een uitgebreid 'zenuw-

stelsel' van universiteiten en instituten waar quantumtechnologie wordt ontwikkeld.

TNO De afgelopen vier jaar is quantumtechnologie binnen TNO sterk gegroeid en heeft deze technologie kritische massa en zichtbaarheid in de buitenwereld gekregen. De expertisegroep Quantum Technology richt zich volledig op quantumtechnologie en heeft als missie deze baanbrekende technologie niet alleen verder te ontwikkelen en beschikbaar te maken, maar deze ook toe te passen in applicaties voor verschillende andere markten zoals defensie, ICT en ruimtevaart. De afdeling werkt in QuTech-verband aan de ontwikkeling van quantumcomputers en quantuminternet, en houdt zich daarnaast onder andere bezig met de ontwikkeling en toepassing van quantumsensoren. Ook de expertisegroepen Radar Technology, Acoustics & Sonar, Distributed Sensor Systems, Optics, Optomechanics, Space Systems Engineering, Nano Instrumentation, Cyber Security & Robustness, Networks en Strategic Business Analysis zijn betrokken bij TNO's activiteiten op het gebied van quantumtechnologie. Zo werkt bijvoorbeeld de groep Optics aan de ontwikkeling van quantum photonic integrated circuits, samen met PhotonDelta, en werkt de groep Cyber Security & Robustness aan applicaties voor quantum computing en quantumcommunicatie, en aan de transitie naar post-quantum cryptografie. Ook is TNO actief op het gebied

van nanofabricage. Op al deze domeinen werkt TNO samen met bedrijven. In totaal zijn vele tientallen TNO-medewerkers direct of indirect betrokken bij quantumtechnologie.

CWI Op het CWI wordt al sinds de jaren '90 aan de fundamentele van quantum computing, quantumcommunicatie en cryptografie in een quantumwereld gewerkt. Er zijn verschillende groepen die hieraan werken en het is tevens de plek waar QuSoft gehuisvest is. Het CWI heeft bijgedragen aan het eerste communicatieprotocol dat liet zien dat quantumcommunicatie efficiënter kan zijn dan klassieke communicatie. Ook is een van de eerste quantumalgoritmes hier ontwikkeld, met een breed toegepaste techniek om over quantumalgoritmes te kunnen redeneren. Tevens wordt er gewerkt aan quantumcryptografische protocollen en aan post-quantum cryptografie, zowel met klassieke protocollen als met quantumprotocollen. Ook is er een sterke link met de klassieke optimalisatie en de klassieke complexiteitstheorie. Deze vormen het hart voor het ontwikkelen van nieuwe quantumapplicaties in de industrie.

AMOLF Binnen het NWO-Instituut AMOLF op het Amsterdam Science Park wordt in de Photonics Forces groep gewerkt aan quantum-nanofotonica, waarin licht en materie op nanoschaal sterk gekoppeld raken. De groep werkt aan de ontwikkeling van geheel nieuwe detectiemethodes in fotonische optomechanische systemen. Een van de doelen is om met dit soort systemen de quantumtoestand van kleine mechanische objecten precies te controleren. Deze groep werkt hierbij samen met zowel de TU Delft als met QT/e.

TU Delft Aan verschillende faculteiten in Delft zijn er diverse onderzoeksgroepen betrokken bij de ontwikkeling van quantumtechnologie. De afdeling Quantum Nanoscience van het Kavli Institute of Nanoscience in Delft, met vijftien hoofdonderzoekers, heeft als doel om quantumeffecten te onderzoeken en visualiseren zoals deze zich voordoen in materialen, om hun capaciteiten op een gecontroleerde manier in te zetten en in te richten, en om apparaten te ontwikkelen die deze mogelijkheden benutten voor maatschappelijke impact. Het gaat hierbij om thema's die niet binnen de roadmaps van QuTech vallen, zoals quantumsensoren, nieuwe quantummaterialen en funderend onderzoek voor qubits. Bij de faculteit Electrotechniek, Wiskunde en Informatica is er een

vakgroep Quantum Engineering die zich toelegt op de architecturen en software die nodig zijn voor quantum computing en de vertaling ervan naar klassieke ICT en vice versa. De groep richt zich op de technische uitdagingen bij het opschalen van de architectuur van quantumcomputers en quantuminternet, CryoCMOS, 3D-verbindingen, quantumsoftware en quantuminformatietheorie. Verder onderzoekt de vakgroep Software Technology hoe een quantumcomputer en een quantuminternet geprogrammeerd en getest kunnen worden. Tenslotte doet de vakgroep Techniekfilosofie en Ethiek van de faculteit Techniek, Bestuur en Management (TBM) onderzoek naar de maatschappelijke impact en acceptatie van quantumtechnologie. Hierbij wordt ook samengewerkt met de faculteit Industrieel Ontwerpen. Onder leiding van TBM en in samenwerking met QuTech heeft de TU Delft in juni een magazine uitgebracht over de maatschappelijke impact van het quantuminternet.⁴⁷

Universiteit Leiden In Leiden wordt onderzoek gedaan aan quantumapplicaties in het aQa-platform ('applied Quantum algorithms'), wat onderzoekers samenbrengt uit het Leids Instituut voor Onderzoek in de Natuurkunde (LION) en het Leiden Institute of Advanced Computer Science (LIACS). Samen met QuTech onderzoekt LION de interactie van licht en materie op quantschaal en hybride toepassingen van supergeleidende en topologische quantum computing technologieën. Daarnaast werkt een groep aan ultra-microscopie, waar met verschillende technieken materialen tot op atoom- en quantumniveau worden gekarakteriseerd. Leiden participeert ook in het Quantum Software Consortium en coördineert daarin het thema 'Cryptografie in een quantumwereld'. In Leiden werken vijftien hoofdonderzoekers aan deze onderwerpen. Leiden biedt een tweearig MSc-programma aan: Research in Physics, Quantum Matter and Optics.

Universiteit van Amsterdam In Amsterdam is quantumtechnologie een zwaartepunt in het Quantum Matter and Quantum Information onderzoeksthema. De participatie in QuSoft komt voort uit dit thema. In totaal zijn meerdere groepen binnen dit zwaartepunt geclusterd, deels experimenteel (Quantum Gases and Quantum information, Quantum Electron Matter) en deels theoretisch (Condensed Matter Theory en Algebra, Geometry and Mathematical Physics).

Een voorbeeld van een startup: QuiX

Het Enschedese bedrijf QuiX is een spin-off van de Universiteit Twente. Het bedrijf wil een eerste quantum-fotonische processor bouwen, die over een jaar of twee jaar klaar moet zijn. QuiX werkt daartoe nauw samen met PhiX, een andere spin-off van de UT en naar eigen zeggen het eerste bedrijf dat fotonische chips geautomatiseerd kan produceren. Dit is een mooi voorbeeld van hoe de wereld van quantumtechnologie en geïntegreerde photonics samenkomen. De afbeelding laat een artistieke impressie van een fotonische processor zien, waarin lichtquanta in een complexe optische schakeling interfereren (illustratie gemaakt door Florian Sterl, in opdracht van de Universiteit Twente).



Ruim dertig hoofdonderzoekers zijn bij dit onderzoek betrokken, waarvan een groot deel binnen QuSoft werkt. Amsterdam coördineert het Quantum Flagship-project iqClock alsook een recent NWO-programma over quantsimulatie, waarin ook UU, TU/e en RU deelnemen.

Universiteit Twente In Twente wordt quantumtechnologie ontwikkeld en onderzocht in de Quantum Transport in Matter (QTM) groep, in de Complex Photonic Systems (COPS) groep en in de Laser Physics and Nonlinear Optics (LPNO) groep. Binnen NanoElectronics (NE) wordt het gedrag van individuele spinqubits in silicium bestudeerd. Een belangrijk onderwerp binnen QTM vormen supergeleidende, topologische materialen voor Majorana-fysica en quantum computing applicaties. Hierbij wordt gebruik gemaakt van quantum dots en supergeleidende nanodraden, samen met QuTech en QT/e. Quantum Secure Authenticatie werd bij COPS gedemonstreerd en er wordt nu gewerkt aan het combineren van fysiek onkloonbare sleutels met quantumcommunicatieprotocollen. Samen met LPNO werkt COPS aan manieren om quantumberekeningen te doen op basis van geïntegreerde fotonische systemen. In 2018 ontwikkelden onderzoekers van Twente een fotonisch geïntegreerd systeem van 8x8 universele, programmeerbare 'gates' voor de implementatie van quantuminformatie-protocollen. Naar aanleiding daarvan is samen met Lionix International het bedrijf QuiX opgericht, met als doel 's werelds grootste quantum-fotonische processor te bouwen. Op de UT werken ongeveer tien hoofdonderzoekers aan thema's gerelateerd aan quantumtechnologie.

Radboud Universiteit In Nijmegen is het onderzoek naar quantummaterialen ondergebracht bij het Institute for Molecules and Materials (IMM), waarbij het gebruik van het High Field Magnet Laboratory (HFML) centraal staat binnen het thema Spectroscopy of Quantum Materials. Het gedrag van gecorreleerde elektronen systemen in materialen onder invloed van extreme magneetvelden en ultrasnelle interacties tussen licht en magnetische materialen vormen de kern van dit onderzoek. Van de twintig hoofdonderzoekers in het thema werkt ongeveer de helft aan quantumtechnologie. Ook wordt er onderzoek gedaan naar quantumchemie en participeert de Radboud Universiteit in het NWO-programma rondom koude atomen en moleculen met UvA, UU en TU/e. Daarnaast is de Digital Security Group in het Institute for Computing and Information Sciences (iCIS) actief op het vlak van de post-quantum cryptografie. Deze groep is onder andere nauw betrokken bij het NIST PQC-project. Ook is de groep betrokken bij experimenten van Google, rondom de ontwikkeling van post-quantum TLS-beveiligingsprotocollen. In een experiment van 2016 zette Google bijvoorbeeld het NewHope-algoritme in, dat mede is ontwikkeld aan de RU. In 2019 hebben Google en Cloudflare een nieuwe ronde experimenten aangekondigd, op basis van de eveneens mede aan de RU ontwikkelde NTRU-HRSS and SIKE-algoritmes.

Universiteit Utrecht In Utrecht wordt door meer dan tien theoretische en experimentele hoofdonderzoekers gewerkt aan quantumverschijnselen en hun toepassingen. Er is een zeer sterke wisselwerking tussen theorie en experiment op het gebied van quantummaterialen, koude atomen en quantsimulatie; het onderzoek draagt bij aan het begrip van onder andere spintronica, supergeleiding, quantummagnetisme, topologische quantumtoestanden, en quantum computing, en aan de ontwikkeling van nieuwe

⁴⁷ Zie https://issuu.com/tudelft-mediasolutions/docs/quantum_magazine_june_2019

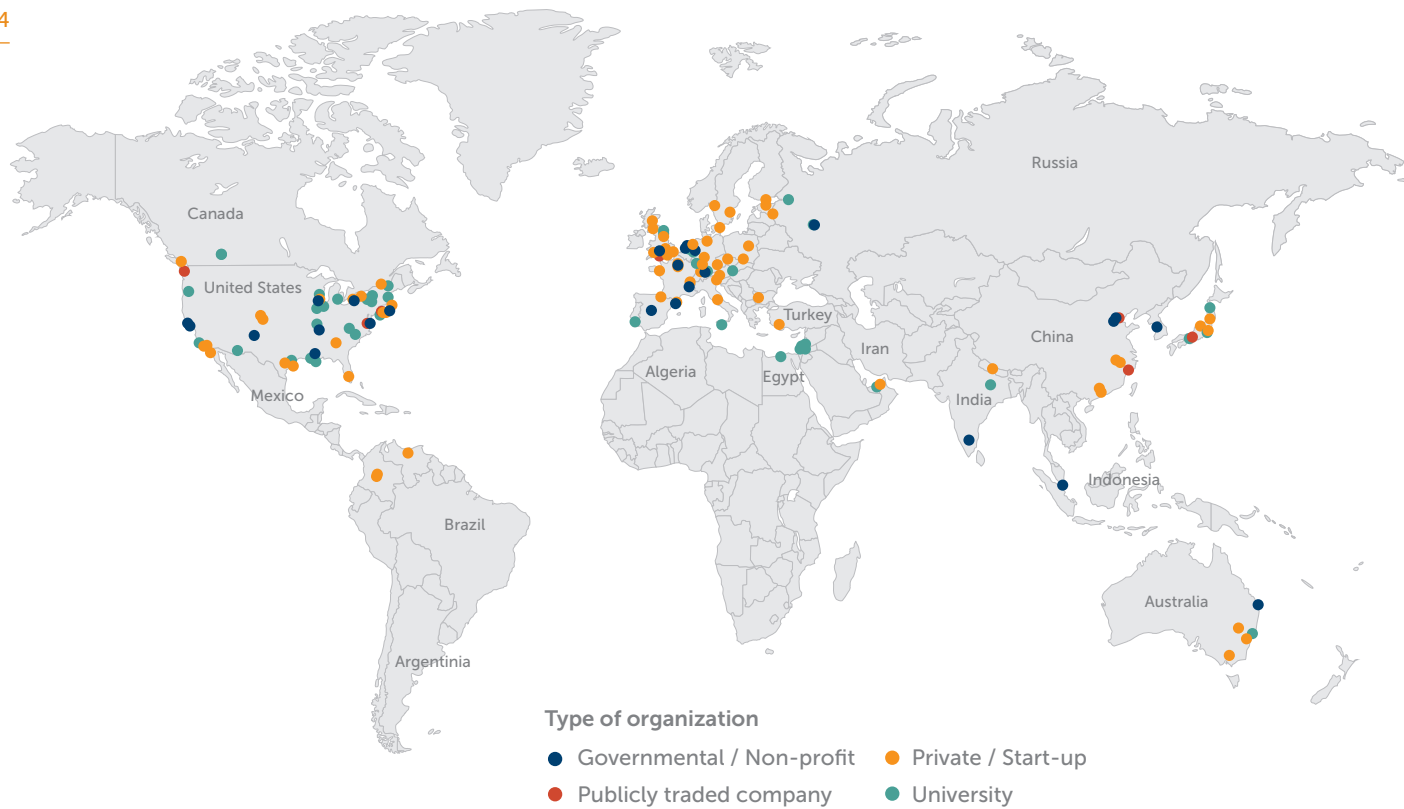
quantummaterialen. Zo participeert Utrecht in het NWO-programma rondom koude atomen en moleculen met UvA, TU/e en RU, en wordt een NWO-programma rond spintronica geleid vanuit Utrecht. De introductie van 'onderzoekshubs' op thema's als energie, gezondheid en duurzaamheid bieden een uitstekende positie om quantumonderzoek te verbinden met de wensen en behoeften van de beoogde gebruikers.

Rijksuniversiteit Groningen De Quantum Devices (QD) groep richt zich op fundamenteel onderzoek naar quantumcoherente dynamica in vaste-stof apparaten (inclusief organische moleculen en halfgeleiders). Dit onderzoek heeft duidelijke verbanden met spintronica en quantuminformatietoepassingen, geïllustreerd door de recente experimentele realisatie van een quantumtoestand ('bit') bij golflengtes in het telecommunicatiebereik. De QD-groep wordt geleid door één hoofdonderzoeker. De onderzoeksgroepen Fysica

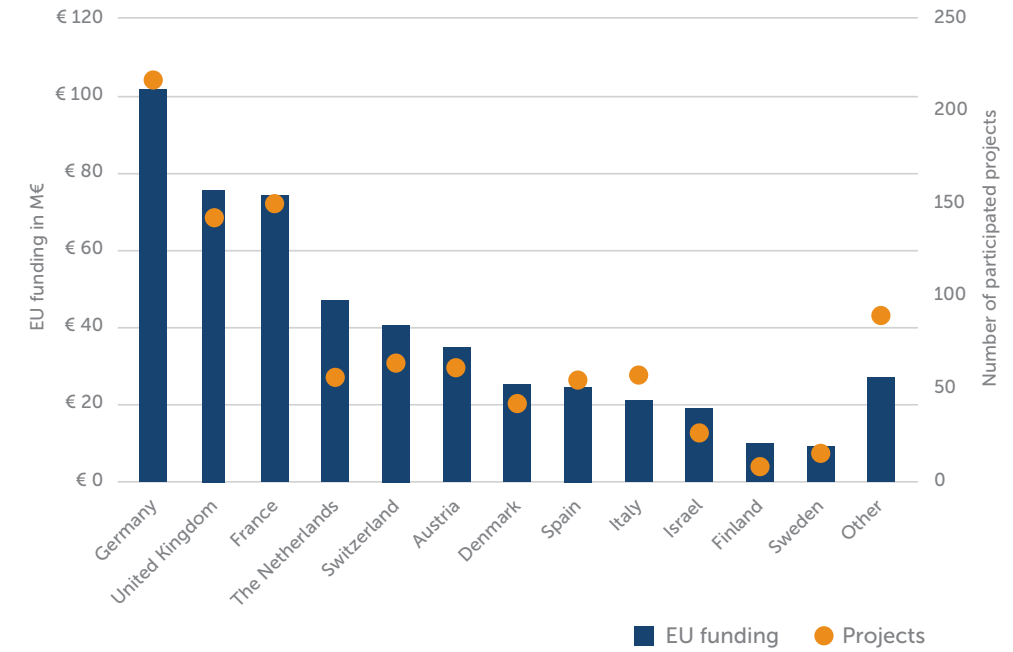
van Nano-systemen en Spintronica en Magneto-optica van Nanomaterialen (elk een hoofdonderzoeker) bestuderen de interactie tussen de quantummechanische vrijheidsgraden 'spin', 'lading', 'dal-' en 'foton-chiraliteit' in nieuwe 2D-materialen en hun heterostructuren.

4.3 Het wereldwijde speelveld

Nederland neemt een unieke positie in, maar is maar één speler in een grote internationale 'onderneming' rondom quantumtechnologie, waarin Europa, Noord-Amerika en China een prominente plaats innemen. Deze paragraaf beschrijft op hoofdlijnen wat er in die gebieden gebeurt op het gebied van quantumtechnologie.



FIGUUR 12 Noord-Amerika, Europa, Japan en China zijn de hotspots voor quantumtechnologie. (Bron: Innovatie Attaché Netwerk; data: Quantum Computing Report, stand augustus 2019)



FIGUUR 13 Europese financiering voor quantumtechnologie, per land. (Bron: Birch, 2018)

4.3.1 Ontwikkelingen in Europa

Europa stond begin twintigste eeuw aan de basis van de ontwikkeling van de quantummechanica en speelde ook in de laatste decennia een leidende rol met betrekking tot quantumtechnologie. In het in november 2016 gestarte ERA-Net Quanterra worden meerdere calls georganiseerd voor de financiering van projecten met de nadruk op basis-onderzoek voor quantumtechnologie. In de eerste call in 2017, waaraan NWO 1 miljoen euro bijdroeg, werden negen projecten toegekend waaraan Nederlandse partners deelnemen; een ongekend succes, met een hoge 'return on investment'.

Na de publicatie van het Quantum Manifesto in 2016, lanceerde de Europese Unie in 2017 een Quantum Technologies Flagship-programma van 1 miljard euro om Europese samenwerking (met bedrijven) te stimuleren en Europa wereldwijd tot onbetwist leider op het gebied van quantumtechnologie te ontwikkelen. In 2018 werden twintig projecten gefinancierd met in totaal 132 miljoen euro. Ontwikkelingen in quantumtechnologie worden ook gefinancierd vanuit andere EU-bronnen, zoals de Europese onderzoeksraad (ERC). Nederland scoort naar verhouding goed in deze EU-programma's, zoals Figuur 13 laat zien.

Investerings in quantumtechnologie lopen niet alleen via de EU, landen in de EU hebben ook hun eigen programma's, zoals Frankrijk, Zweden en Zwitserland. Twee nationale programma's zijn in het bijzonder het vermelden waard,

vanwege de pionierende rol (VK) en vanwege doelstellingen die dicht tegen die van onze agenda aanliggen (Duitsland).

Verenigd Koninkrijk Het VK investeerde als één van de eerste Europese landen in een samenhangend, nationaal programma voor quantumtechnologie. In de herfst van 2013 kondigde de Britse regering een investering aan van 270 miljoen pond (omgerekend ruim 300 miljoen euro) over vijf jaar, waarin de nadruk lag op de vertaling van quantumtechnologie naar de markt, het stimuleren van ondernemerschap en het vergroten van de impact op de maatschappij. Samenwerking tussen universiteiten, bedrijven en overheid werd aangemoedigd en de eerste fondsen kwamen begin 2015 vrij. Hiermee was het een van de eerste programma's waarin de vertaling van quantumtechnologie naar het bedrijfsleven (en de maatschappij) een hoofddoel was en waarin niet alleen in funderend onderzoek werd geïnvesteerd.

Onderdeel van het programma was de vorming van vier 'Quantum Hubs', één voor sensoren en metrologie, één voor op quantumtechnologie gestoelde beeldvormingstechnologie, één voor genetwerkte quantum computing applicaties en één voor quantuminformatienetwerken. Eind 2018 werd een extra investering in deze hubs aangekondigd, van 80 miljoen pond (omgerekend 93 miljoen euro), met een tweede tranche van 235 miljoen pond (omgerekend 273 miljoen euro) voor continuering en uitbreiding van het nationale programma. Hierin krijgen ook de 'enabling' technologieën en onderwijs een extra impuls.

De interactie met maatschappelijke partijen over de maatschappelijke en ethische implicaties van quantumtechnologie is in dit programma actief aangegaan. Een recent voorbeeld hiervan is een rapport uit 2018 geïnitieerd door de Britse Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC), over de publieke dialoog rondom quantumtechnologie.

Duitsland Duitsland is een van de belangrijkste partijen in het Quantum Flagship. Tegelijkertijd investeert het land 650 miljoen euro in een eigen nationaal programma met zes actielijnen, gericht op versterking en verbinding van het wetenschappelijke veld, op de ontwikkeling van nieuwe technologieën voor de markt, op het stimuleren van internationale samenwerking en op de acceptatie en adoptie van quantumtechnologie door de maatschappij. Inhoudelijk richt het programma zich vooral op de quantumcomputer, quantumcommunicatie, quantumsensoren en basistechnologieën voor quantumsystemen. Er zijn dus duidelijk parallellen tussen dit nationale programma in Duitsland en de thema's en inzet van onze nationale agenda.

De aandacht voor quantum computing en kunstmatige intelligentie wordt extra geïllustreerd door de financiering van ongeveer honderd onderzoeksposities aan het Forschungszentrum Jülich, waar een programma met een omvang van 36 miljoen euro wordt gestart voor onderzoek naar quantum en neuromorphic computing, wat een veelbelovende combinatie van technologieën is voor bijvoorbeeld quantum machine learning.

4.3.2 Ontwikkelingen in Canada en de Verenigde Staten

Canada De afgelopen tien jaar investeerde de Canadese overheid 1 miljard Canadese dollar (omgerekend 660 miljoen euro) in onderzoek en ontwikkeling van quantumtechnologie. Een bijzondere hotspot voor quantumtechnologie bevindt zich in Waterloo, waar op de campus van de University of Waterloo het Institute for Quantum Computing, het Perimeter Institute for Theoretical Physics en het Mike & Ophelia Lazaridis Quantum Nano Centre zijn gevestigd, waarin onderzoek naar quantuminformatie en quantum computing is gebundeld en waar bijna vierhonderd onderzoekers werken. Samen met infrastructuur- en labfaciliteiten, opleidingsinstituten voor tech-entrepreneurship en Quantum Valley Investment (QVI), vormt dit de Quantum Valley: een blauwdruk voor een quantumtechnologie-ecosysteem.

IBM kondigde begin 2019 aan dat Waterloo de enige Canadese universiteit is waarmee het bedrijf een samenwerking aangaat in het IBM Q-Network.

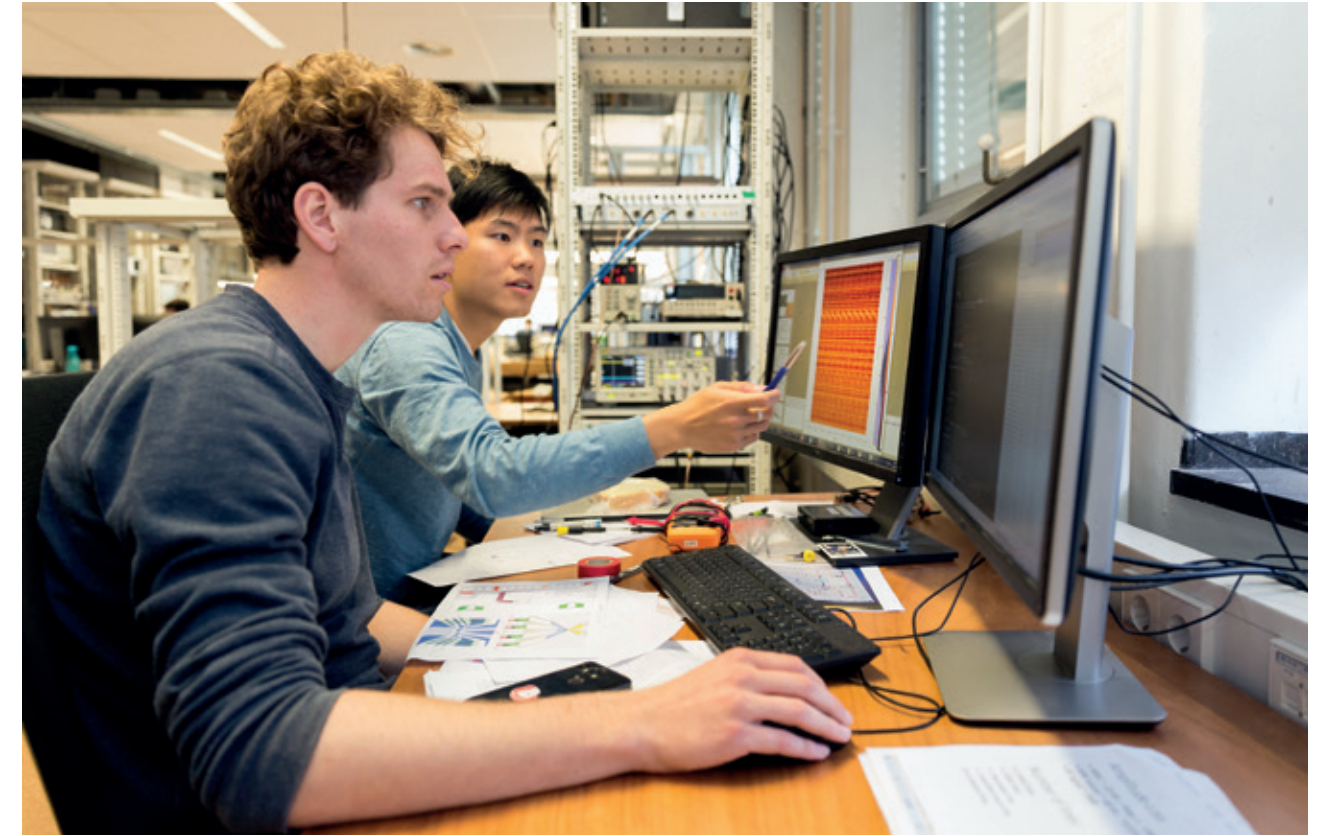
Via QVI kunnen private investeerders bijdragen aan onderzoek en ontwikkeling van quantumtechnologie. Bijzonder is dat onderzoekers die vanuit QVI worden gefinancierd, zelf het recht op de resultaten en de exploitatie ervan behouden. Vanuit Waterloo University zijn meer dan 160 startups voortgekomen, waarvan een snelgroeiend aantal zich op quantumtechnologie richt. Canada staat dan ook op de vijfde plaats in de wereldranglijst van octrooiaanvragen die betrekking hebben op quantum computing. Er is een sterke band met het onderzoek bij QuSoft en het CWI.

Verenigde Staten De VS heeft tientallen topuniversiteiten en -instituten die zich met quantumtechnologie bezighouden. Tegelijkertijd wordt er nog nergens over een Quantum Hub of ecosysteem gesproken. Daarom is het noemenswaardig dat in november 2018 de senaat een wet aannam, waarin ruim 1,2 miljard dollar (omgerekend ruim 1 miljard euro) aan bestaande middelen worden omgebogen in een National Quantum Initiative Act, waarin quantuminformatie en quantumcommunicatie centraal staan. In deze wet krijgen NIST en NASA een adviserende rol, krijgen NIST en NSF de opdracht programma's op te richten voor standaardisatie en onderzoek en krijgen NSF en het Department of Energy de opdracht een aantal Quantum Hubs op te richten. Ook IARPA, DARPA en ARO, organisaties binnen respectievelijk de Amerikaanse nationale inlichtingendienst en het Amerikaanse Ministerie van Defensie, spelen een belangrijke rol als het gaat om onderzoek op het gebied van quantumtechnologie.

Veel van de bedrijven die actief zijn in de ontwikkeling van de quantumcomputer en van quantum-informatietechnologie zijn Noord-Amerikaans, zoals 1Qbit, Atom Computing, D-Wave, Google, Honeywell, HP, HRL Labs, IBM, Intel, ionQ, Lockheed-Martin, Microsoft, Northrop Grumman, Raytheon en Rigetti. Deze bedrijven werken nationaal en internationaal op grote schaal samen met allerlei kennisinstellingen (waaronder QuTech en QT/e; vermeldenswaard is dat QuTech ook van IARPA steun heeft gekregen).

4.3.3 Ontwikkelingen in China

De laatste paar jaar zijn opzienbarende resultaten uit China publiek bekend geworden. Zo ontwikkelden onderzoekers van de Chinese Academy of Sciences in tien jaar tijd de



Micius-satelliet, speciaal voor quantum-experimenten. De satelliet werd in 2016 gelanceerd. Met deze satelliet werd voor het eerst een verstrengelde toestand tussen grondstation en satelliet verstuurd over een afstand van 1400 kilometer. In een samenwerking met de universiteit van Graz werd de satelliet in 2018 gebruikt om een QKD-versleuteld signaal over een afstand van meer dan 7600 km te versturen. Dat is nog steeds het wereldrecord. Daarnaast speelt Micius een rol in de quantumverbinding tussen Beijing, Shanghai, Jinan en Hefei (waar overigens ook het langste quantum-fiber netwerk in de grond ligt).

Ook China wil als eerste een quantumcomputer bouwen. Hiertoe heeft het land aangekondigd het National Laboratory for Quantum Information Sciences nabij Hefei te bouwen, met een prijskaartje van 10 miljard US-dollar. Ook Chinese bedrijven mengen zich hierin. In 2015 werd aangekondigd dat Aliyun (de cloud computing tak van de Alibaba Group) samen met de Chinese Academy of Sciences het Alibaba Quantum Computing Laboratory ging bouwen in Shanghai. In februari van 2018 werd de eerste cloud quantumcomputer-service met een omvang van elf qubits in datzelfde laboratorium aangekondigd, destijds de op één-na-grootste quantumcomputer-service (na IBM).

4.4 De balans tussen nationale versterking en internationale samenwerking

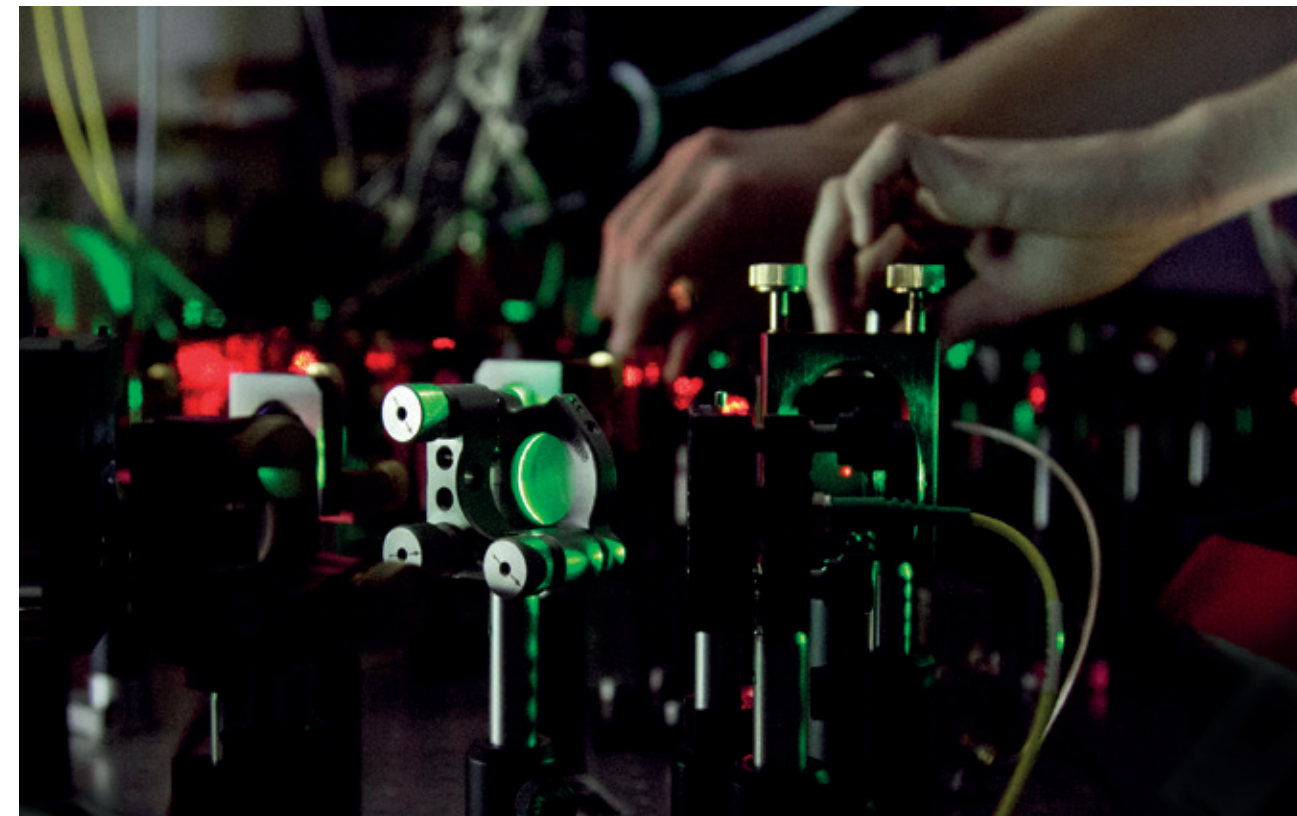
Nederland is in het internationale quantumtechnologie-veld een belangrijke speler en heeft door jarenlange investeringen in onderzoek en ontwikkeling een grote kracht opgebouwd op het vlak van kennis en innovatie. Nederland loopt voorop op het gebied van quantum computing, quantum communication en quantum simulation, en de ontwikkeling van de daarbij horende applicaties en protocollen die mede gericht zijn op veiligheid van data. Op dit moment worden de zaadjes geplant voor toenemende samenwerking met de industrie, de ontwikkeling van prototypes en de eerste concrete quantumproducten en -diensten, startups en spin-offs en een landelijk innovatie-ecosysteem.

Uiteraard is Nederland daarin niet het enige land; wereldwijd worden miljarden euro's geïnvesteerd, zowel in gecoördineerde programma's op continentale schaal (EU, VS en Canada, China), als op de schaal van individuele landen (zoals de UK, Duitsland en Frankrijk). In zekere zin betekent dit toenemende concurrentie, zeker waar het gaat om het aantrekken van externe partijen, zoals grote internationaal opererende bedrijven, maar ook waar het gaat om het aantrekken en behouden van talent. Tegelijkertijd zijn er belangrijke implicaties verbonden aan welke partij erin slaagt

quantumtechnologie volledig uit te ontwikkelen, zeker voor de veiligheid en het welzijn in onze maatschappij. Daarom vereist de ontwikkeling van quantumtechnologie in een democratische wereld per definitie samenwerking, al was het maar om goede afspraken te maken over het zorgvuldig omgaan met quantumtechnologie.

De wereldwijde investeringen bieden ook kansen; quantumtechnologie is uitermate complex en de volledige ontwikkeling vereist veel tijd, denkkraft, infrastructuur en middelen. Zelfs een groot land als de VS, en ook de EU als geheel, is waarschijnlijk niet in staat alle aspecten van quantumtechnologie zelfstandig te ontwikkelen van het huidige, relatief fundamentele niveau tot volledige introductie in het bedrijfsleven en de maatschappij. Dit betekent dus dat partijen wereldwijd ook op elkaar zijn aangewezen en (deels) samen moeten optrekken, op het vlak van het delen van resultaten, het delen en opbouwen van infrastructuur, het opleiden van wetenschappelijk talent en het opbouwen van een 'workforce' van quantumingenieurs die quantumtechnologie in de maatschappij helpen integreren.

In deze agenda wordt daarom gestreefd naar een balans tussen enerzijds het versterken van de nationale sterktes in quantumtechnologie, om Nederland (internationaal) zo aantrekkelijk mogelijk te maken voor investeringen en als vestigingsplaats voor internationaal opererende instituten en bedrijven, en anderzijds het vergroten van de mogelijkheden om in internationale samenwerking de kennis en kunde in Nederland te vergroten door deze te delen met spelers over de landsgrenzen heen. Het eerste wordt vormgegeven door investeringen in actielijnen en nationale katalysatorprogramma's, het tweede door in te zetten op (bilaterale) samenwerkingsverbanden, met bijvoorbeeld Japan, Canada en de VS en een actievere lobby voor de nationale quantumactiviteiten, bijvoorbeeld in Brussel.



4.5 Conclusie

Het feit dat in Nederland hoogwaardige expertise en faciliteiten op het gebied van quantumtechnologie geografisch dichtbij elkaar liggen maakt Nederland een uniek land in de wereld. Dat wordt versterkt door de Nederlandse cultuur van samenwerking. Nederland is buitengewoon goed in systems engineering en het combineren van technologieën tot werkende systemen, cruciaal voor innovatie. Dit trekt internationale bedrijven aan, die bereid zijn fors te investeren in de ontwikkeling van de quantumtechnologie van de toekomst. Lokaal ontstaan nu bovendien de eerste startups die quantumtechnologie commercialiseren. Deze smeltkroes van kennis, technologie, bedrijven en ondernemerschap leidt tot het ontstaan van groeikernen waaromheen zich een ecosysteem begint te vormen. Dat is een kans waar we op moeten doorpakken. Daarom investeren we met deze agenda in het versterken van de wetenschappelijke basis, in het creëren van marktkansen vanuit de technologie, in het op- en uitbouwen van een landelijk ecosysteem, in educatie, en in het verwerven van een leidende positie in de maatschappelijke dialoog over quantumtechnologie. Dit doen we, zoals verder uitgewerkt in hoofdstuk 5, in de vorm van actielijnen en nationale katalysatorprogramma's, waarin we onze krachten bundelen.

De ontwikkeling van quantumtechnologie is een internationale aangelegenheid. Vanwege de benodigde investeringen en de enorme complexiteit van de wetenschappelijke en technologische doorbraken die nodig zijn, is geen enkel land in staat de technologie in isolement te ontwikkelen. Er worden wereldwijd dan ook grote investeringen gedaan in quantumtechnologie: Europa investeert een miljard euro in het Quantum Flagship en individuele landen in Europa investeren daarnaast nog eens vele honderden miljoenen euro's in eigen programma's. De VS investeert ruim een miljard euro en ook China investeert fors. Dit leidt tot toenemende concurrentie maar biedt ook kansen voor samenwerking.

Om de kansen zo goed mogelijk te benutten, richt deze agenda zich ook op het intensiveren van de samenwerking over de grenzen heen. Daartoe zetten we onder andere in op nieuwe, bilaterale samenwerking met Canada, de VS en Japan. Ook beoogt deze agenda alle nationale spelers te verbinden en de organisatie te verbeteren, waardoor het makkelijker wordt om met één stem te spreken, bijvoorbeeld in Brussel waar belangrijke beslissingen worden genomen over de onderzoeks- en innovatieprogramma's van de toekomst.

Door de juiste balans van nationale versterking en internationale samenwerking, kunnen we Nederland optimaal positioneren. De ambitie om uit te groeien tot Quantum Delta NL, c.q. tot een internationaal toonaangevend centrum en knooppunt voor quantumtechnologie is groot, maar niet onhaalbaar gezien de uitstekende uitgangspositie van Nederland. Het vergt voor Nederland en Europa echter gelijklopende investeringen als elders in de wereld, en werkt alleen als alle partijen hun schouders onder deze agenda zetten en de ambitie ervan onderschrijven en met middelen ondersteunen.



'Deze agenda beschrijft de acties die nodig zijn voor de ontwikkeling van een Nederlandse quantumdelta: de QΔNL.'

05

TOEKOMSTAGENDA VOOR QUANTUM DELTA NL

5.1 Vier actielijnen en drie KAT-programma's

Nederland heeft het in zich uit te groeien tot een Quantum Delta met een soortgelijke rol en dynamiek als Silicon Valley ten tijde van de ontwikkeling van de transistortechnologie. Dit gaat niet vanzelf: er is een doelgerichte strategie en aanpak nodig waar alle partijen uit het ecosysteem gezamenlijk de schouders onder zetten. Deze agenda omvat de noodzakelijke acties om de technologie en de toepassingen verder te ontwikkelen in de Nederlandse Quantum Delta – een bruisende innovatiekookpot van talent, kennis en middelen en met sterke nationale en internationale verbindingen.

De toekomstagenda voor Quantum Delta NL kent twee dimensies:

Gerichte acties om de gehele keten van het kennis- en innovatie-ecosysteem te versterken. Deze acties grijpen aan op vier grote drivers van ontwikkeling:

Actielijn 1
Realiseren van doorbraken in onderzoek en innovatie;

Actielijn 2
Ecosysteemontwikkeling, marktcreatie en infrastructuur;

Actielijn 3
Human capital: educatie, kennis en vaardigheden;

Actielijn 4
Starten van een maatschappelijke dialoog rondom quantumtechnologie.

Drie katalysatorprogramma's met het doel veelbelovende toepassingsgebieden versneld rijp te maken voor applicaties in de markt en maatschappij. Het gaat om ambitieuze 'demonstrator' programma's die de technologie tastbaar maken en potentiële eindgebruikers in staat stellen te experimenteren met use cases. De programma's zorgen voor verbinding: tussen de verschillende technologieën en actielijnen, tussen de verschillende spelers in het ecosysteem en tussen wetenschap en toepassing. De drie KAT-programma's zijn:

KAT-1
Quantum Computing and Simulation;

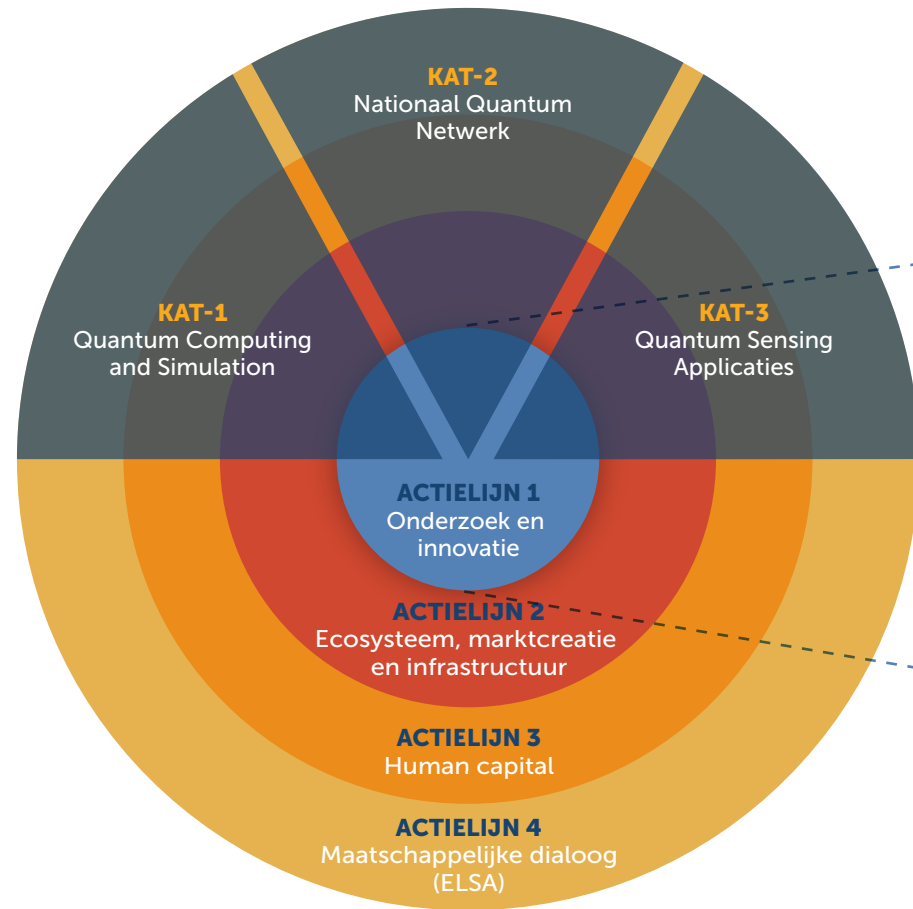
KAT-2
Nationaal Quantum Netwerk;

KAT-3
Quantum Sensing Applications.

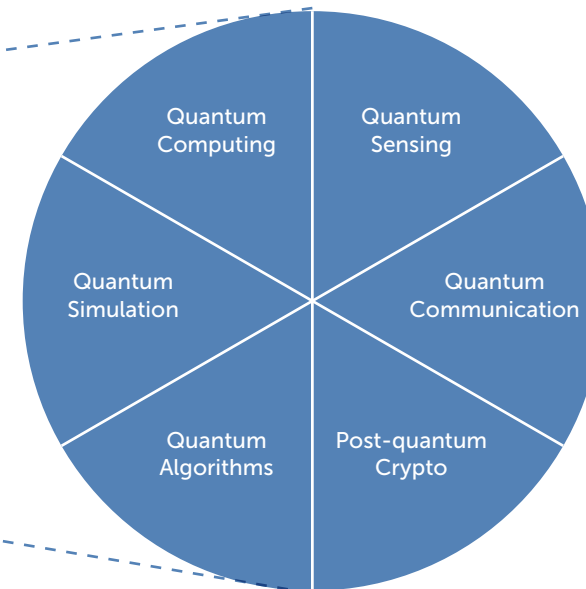
Daarbij wordt een nationaal loket ingericht dat ervoor zorgt dat geïnteresseerden op een efficiënte wijze toegang krijgen tot de actielijnen, de KAT-programma's en de partijen die in deze agenda verenigd zijn. Het loket fungeert als centraal aanspreekpunt en verwijst vragen door naar de juiste plek in het ecosysteem. Achter dit loket zijn alle kennisinstellingen en bedrijven die werken aan de ontwikkeling van systemen, use cases en algoritmes over de gehele stack van hardware tot software en applicaties verbonden. De loketfunctie wordt benut om de dialoog over 'use cases' tussen eindgebruikers en de ontwikkelaars van quantumhardware en quantumsoftware te faciliteren, bijvoorbeeld via workshops voor use case-ontwikkeling, werkbezoeken, informatiesessies, toegang tot testfaciliteiten enzovoorts.

De samenhang tussen actielijnen en KAT-programma's is weergegeven in Figuur 14.

FIGUUR 14
Vier actielijnen en drie ambitieuze, verbindende KAT-programma's.



FIGUUR 15
Actielijn 1 bestaat uit een zestal onderzoeks- en innovatieprogramma's.



De eerste actielijn is opgesplitst in de verschillende technologieën die deze agenda omvat: quantum computing, quantum simulatie, quantum communicatie, quantum sensing, quantum algoritmes en post-quantum cryptografie. Al deze gebieden vereisen hun eigen onderzoek en ontwikkeling; paragraaf 5.2 beschrijft wat nodig is. De actielijnen 2, 3 en 4 zijn generiek van aard en niet technologie-afhankelijk; zij staan beschreven in de paragrafen 5.3 tot en met 5.5.

Paragraaf 5.6 beschrijft de KAT-programma's. Het zijn ambitieuze programma's, met als doel de ontwikkelingen te versnellen en quantumtechnologie aan de hand van demonstrators tastbaar te maken in toepassingen, te valoriseren en te industrialiseren.

5.2 Actielijn 1 | Realiseren van doorbraken in onderzoek en innovatie

De ontwikkeling van quantumtechnologie rust op een solide basis van innovatief onderzoek. De voorziene toepassingen van quantumtechnologie vergen onderzoeks- en ontwikkeltrajecten in de vroege fase, waarin de bestaande ideeën en perspectieven worden uitgewerkt en doorontwikkeld en

waarin de wetenschappelijke en technologische doorbraken en capabilities die daarvoor nodig zijn worden gerealiseerd. Als voorbeeld: om quantum computing en quantumcommunicatie op grote schaal mogelijk te maken is het nodig de specificaties van qubit-systemen, quantumsimulators en quantumnetwerken te verbeteren en deze systemen significant op te schalen. Bovendien liggen er belangrijke vragen over de ontwikkeling van algoritmes en protocollen die de mogelijkheden van quantuminformatie optimaal benutten. We brengen deze ontwikkeltrajecten onder actielijn 1 samen in een zestal onderzoeks- en innovatieprogramma's: quantum computing, quantum simulation, quantum algorithms, quantum sensing, quantum communication en post-quantum cryptografie. Figuur 15 schetst de opbouw van actielijn 1.

Om te garanderen dat Nederland ook in de toekomst toonaangevend blijft, is het noodzakelijk om intensief samen te werken aan en te investeren in onderzoek en innovatie. Doel is om de broodnodige wetenschappelijke en technologische doorbraken te blijven realiseren. Bij het vroege fase onderzoek speelt de Nederlandse organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO) een belangrijke rol. Aandachtspunten zijn het opzetten van fundamentele, maar ook multidisciplinaire programma's, in samenwerking met het bedrijfsleven, de aansluiting op de Nationale

Wetenschapsagenda (NWA) en Europese onderzoeksprogramma's (zoals het ERA-Net QuantERA, het Quantum Flagship en diverse ICT-programma's), het maken van keuzes om focus te houden en het voorkomen van (onnodige) overlap tussen verschillende projecten en programma's. Daarnaast moeten programma's bij NWO en TNO ruimte bieden voor (onderzoek naar) de toepassing van quantumtechnologie. Kernwoorden die bij de programmering voor innovatiedoorbraken horen zijn dus: funderend onderzoek, multidisciplinariteit, samenwerking met industrie, maatschappelijke inzet en internationale samenwerking.

5.2.1 Quantum computing

Het maken van een grootschalige universele quantumcomputer is een enorme technologische uitdaging, die onderzoek vereist op het gebied van de verschillende qubit-platforms, foutcorrectie en quantumcomputerarchitectuur en -elektronica.

Qubit-platforms: Om over een aantal jaren een universele quantumcomputer kunnen te realiseren is het noodzakelijk om de reeds bestaande qubit-platforms uit de wetenschappelijke laboratoria te vertalen en op te schalen naar operationele systemen die betrouwbaar beheerd en geëxploiteerd worden. Hier zijn nog belangrijke wetenschappelijke vragen mee gemeoid, zoals bijvoorbeeld:

- Voor silicon spin-qubits is de ambitie om te schalen van de huidige 2-qubit-systemen naar systemen met in eerste instantie circa 10 qubits, en daarna naar 100 en 1000 qubits.

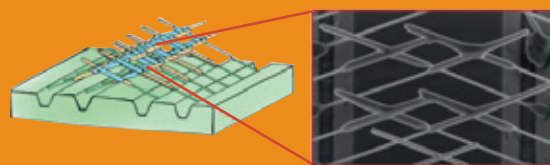
Uitdaging is om tot nieuwe ontwerpen te komen die voorbij de klassieke-lijn-geometrie gaan en daarmee ruimte geven aan meer quantum dots per device.

- Voor transmon-qubits zal het surface code design worden geïmplementeerd in een testplatform met 49 qubits, en daarna zal ook hier een opschalingslag naar 100 en 1000 qubits gemaakt moeten worden. Wetenschappelijke uitdagingen hierbij zijn onder andere hoe om te gaan met crosstalk en de fabricage van de 'interconnects', verbindingen tussen de qubit.
- Voor NV-centers in diamant is de uitdaging om tot modulaire quantumcomputers met vele nodes van elk zo'n 10 qubits te komen, waarbij bijvoorbeeld een open vraag is hoe de nodes het meest effectief via optische kanalen aan elkaar gekoppeld kunnen worden.

Foutcorrectie: Door vele fysieke qubits te laten samenwerken in logische qubits kunnen met een universele quantumcomputer grootschalige berekeningen worden gedaan, zelfs met qubits die af en toe een fout maken. Hiervoor moet het foutpercentage van de huidige systemen nog met een factor tien tot honderd verder worden teruggebracht. Bovendien moet het aantal (fysieke) qubits met minstens honderdduizend stuks vergroot worden om voldoende logische qubits te creëren, opdat de quantuminformatie lang genoeg wordt vastgehouden om er langere berekeningen mee te kunnen uitvoeren. Een van de grootste uitdagingen hiervoor is de 'connectivity', oftewel het aanleggen van verbindingen tussen de verschillende qubits.

Nanohashtags om Majorana-deeltjes mee te vlechten

Een van de promovendi aan de TU/e ontwikkelde tijdens haar promotieonderzoek in Eindhoven en Delft een piepkleine structuur van elkaar kruisende nanodraden in de



vorm van 'hashtags'. In deze structuur moeten paren van Majorana-deeltjes tot stand komen, en zich 'vervlechten'. Het waarnemen van dit fenomeen, ook wel braiding genoemd, zou het sluitende bewijs zijn van het bestaan van Majorana-deeltjes en vormt een cruciale stap in de ontwikkeling van op Majorana's gebaseerde quantumcomputers.⁴⁸

Architectuur en elektronica: En derde uitdaging voor het bouwen van universele quantumcomputers is het systeemontwerp en integratie van alle hardware en control software. Net zoals de klassieke computer is de quantumcomputer opgebouwd uit diverse lagen, waarin abstracte (quantum-) algoritmes stap voor stap vertaald worden naar de controle-signalen waarmee de qubits aangestuurd worden. We zitten nu pas in de conceptiefase van deze technologie maar met het toenemen van het aantal qubits zullen vele aspecten invloed op elkaar hebben: qua chipdesign zullen materiaalkeuzes en processtappen invloed hebben op de coherentietijd en nauwkeurigheid van de qubits. De thermische last van de stuursignalen naar de quantumchips is gekoppeld aan de beschikbare koelcapaciteit. De complexiteit van de elektronica en control software hangt samen met de kwaliteit van de chips en de analyse van de meetsignalen voor foutencorrectie vereist krachtige computers en slimme algoritmes met een grote dataverwerkingscapaciteit en een zeer snelle feedback.

Het ontwerpen en realiseren van een dergelijk complex product vereist een systems engineering aansturing waarbij trade-offs optreden en systeemkeuzes gemaakt worden – in samenhang en niet alleen op de deelelementen. Binnen deze agenda worden deze aspecten verder samengebracht in het eerste katalysatorprogramma: Quantum Computing and Simulation. De funderende resultaten uit deze actielijn zullen binnen dit KAT-1 programma opgepakt worden en daar verder doorontwikkeld worden naar een volwassen quantumcomputer.

5.2.2 Quantum simulation

Quantumsimulaties gaan een grote impact hebben op de quantumchemie, op het materialenonderzoek en op het ontrafelen van fundamentele problemen in de natuurkunde. Deze simulaties worden uiteraard niet uitgevoerd op klassieke computers, maar op specifieke quantum devices: quantumsimulators. Deze quantumsimulators maken op een slimme manier gebruik van de quantummechanische interacties tussen microscopische deeltjes, zoals koude atomen, moleculen, ionen en lichtdeeltjes, om superpositie en verstrengelde toestanden te realiseren. Door deze deeltjes vervolgens op te sluiten in krachtvelden, te manipuleren met bijvoorbeeld lasers en door de specifieke interacties tussen de deeltjes te controleren, kunnen hiermee andere (quantum-)materialen worden nagebootst. Dit simuleren van het quantumgedrag van complexe moleculen en materialen is op dit moment door de enorme kosten aan rekenkracht in klassieke computers alleen toepasbaar op zeer kleine modelsystemen. Steeds meer praktische technologische toepassingen en systemen worden ontworpen op basis van natuurlijke materialen, waarvoor juist grote moleculaire systemen nodig zijn. Quantumsimulators bieden hier unieke kansen voor het berekenen en ontwikkelen van deze complexe materialen, omdat ze vergelijkbare quantum- en schalingskarakteristieken hebben als de te onderzoeken materialen.

Zo kan een quantumsimulator inzicht verschaffen in de onderliggende fysica, maar bijvoorbeeld ook in fundamentele quantumsystemen, zoals het vroege universum dat zich in een sterk gecorreleerd quantumregime bevond.

In Nederland wordt gewerkt aan quantumsimulators op basis van koude Rydberg-atomen, dipolaire moleculen en koude ionen (of een mengsel daarvan) en optische cavity arrays (Eindhoven en Amsterdam), aan quantum dots en superconducting circuits (Delft), en aan fotonische clusters (Leiden). Deze systemen leveren samen de grote diversiteit die nodig is om doorbraken te realiseren in de quantumchemie, in de ontwikkeling van nieuwe materialen en in het onderzoek naar fundamentele natuurkunde.

5.2.3 Quantum communication

Een mondiaal quantuminternet zal in de toekomst nieuwe communicatieprotocollen mogelijk maken, die onder meer kunnen leiden tot veilige communicatie en dataopslag en veilige positie-verificatie, en zal daarnaast quantum computers op verschillende locaties via verstrengeling met elkaar kunnen verbinden. Voordat dit quantuminternet op grote schaal uitgerold kan worden, zijn er nog verschillende uitdagingen die opgelost moeten worden: bijvoorbeeld om verstrengeling over langere afstanden te realiseren en de functionaliteit van quantumnetwerken te vergroten.

Verstrengeling over langere afstanden: Door de demping in optische fibers kunnen qubits die bestaan uit enkele fotonen slechts beperkte afstanden afleggen voordat zij hun quantuminformatie verliezen. Om met een quantumlink afstanden groter dan honderd kilometer te overbruggen zijn quantumversterkers en quantumgeheugensystemen nodig – quantuminformatie kan immers niet met klassieke systemen versterkt worden, aangezien elke bewerking 'onderweg' de quantuminformatie verstoort. Zowel quantumversterkers als quantumgeheugens zijn nog volop in ontwikkeling. Uitdagingen voor de komende jaren liggen onder andere op het gebied van materialen, efficiënte interfaces tussen quantumgeheugens en licht- en golflengte-aanpassingen op enkel-foton niveau. Een Europees of zelfs mondiaal quantumnetwerk zal vermoedelijk zowel uit verbindingen over glasvezel als uit verbindingen via satellieten door de ruimte bestaan. Qubits bestaande uit fotonen zullen door deze twee media anders beïnvloed worden; koppeling van de twee is dus een andere uitdaging voor de langere termijn.

Verhogen van de functionaliteit van een quantumnetwerk:

Voor de eerste nuttige toepassingen van een quantuminternet – bijvoorbeeld veilige identificatie en communicatie – is het voldoende dat de eindpunten van een quantumverbinding (de quantumprocessors) uit een enkel qubit bestaan. Voor complexere bewerkingen en extra functionaliteit zoals bij-

voorbeeld het anoniem aansturen van een quantumcomputer zijn quantumprocessors van enkele qubits en een quantumgeheugen nodig. Het kunnen uitvoeren van foutcorrectie in de eindpunten van de quantum-links is een volgende stap in complexiteit. Hiervoor zijn processors met meerdere onderling verstrengelde qubits nodig. Ook het efficiënt verstrengelen van qubits in quantum computing-systemen en de fotonen in de quantum-link vereist aanvullend onderzoek. Een belangrijke uitdaging is het robuuster maken van qubits in de processors tijdens quantumnetwerk-operaties.

Tenslotte liggen er nog fundamentele vraagstukken op het gebied van software die de hardware aanstuurt en het internetverkeer regelt. Andere onderwerpen zijn het ontwerp van de volledige quantuminternet stack, waarbij zowel hardware als software een rol spelen, evenals de interoperabiliteit tussen de verschillende netwerklagen. En omdat het quantuminternet fundamenteel anders opereert dan het gewone internet, is een nieuwe 'network stack' architectuur benodigd, die kan samenwerken met de stack van het huidige internet maar die ook optimaal gebruik kan maken van de exclusieve voordelen van quantumcommunicatie. Binnen deze nationale agenda worden deze aspecten verder samengebracht in het tweede katalysatorprogramma: het Nationale Quantum Netwerk. De wetenschappelijke resultaten uit deze actielijn zullen binnen dat KAT-2 programma opgepakt worden en daar verder doorontwikkeld worden naar een volwassen quantuminternet.

5.2.4 Quantum sensing

Quantumsensoren bieden mogelijkheden die klassieke sensoren niet bieden. Zoals in paragraaf 2.2.4 beschreven worden enkele toepassingen van de technologie al commercieel aangeboden. Het betreft een eerste generatie producten; er zijn volop mogelijkheden om betere en nieuwe typen quantumsensoren te maken en nieuwe applicatiedomeinen en markten aan te boren. Om de mogelijkheden van quantumsensoren ten volle te kunnen benutten, is verder onderzoek nodig.

Dit onderzoek zal enerzijds gericht zijn op het ontwikkelen van nieuwe sensortechnologieën. De inzet van andere materialen, het bedenken en ontwikkelen van nieuwe werkingsprincipes (zoals de superstralende klokken uit het iqClock-project), het detecteren van geoptimaliseerde quantumtoestanden (waarmee een bepaalde grootheid gemeten kan worden terwijl de sensor ongevoelig is voor andere grootheden): het zijn slechts enkele van de onderwerpen

⁴⁸ Zie <https://www.nrc.nl/nieuws/2019/05/10/met-nanohekjes-bouw-je-stabiele-qubits-a3959834>

waaraan gewerkt wordt. Anderzijds richt het onderzoek zich op het verbeteren van bestaande quantumsensoren. Onderwerpen zijn bijvoorbeeld het verkleinen van sensoren, het vergroten van de snelheid en detectie-efficiëntie van sensoren, de integratie van hardware en software, de ontwikkeling van nieuwe software om quantumsensoren aan te sturen en uit te lezen en de ontwikkeling van nieuwe en betere atoomklokken.

Het onderzoek op het gebied van quantumsensoren is sterk toepassingsgericht. Nederlandse onderzoeksgroepen werken samen met bedrijven en andere gebruikers aan de ontwikkeling van nieuwe toepassingen van quantumsensoren. Voorbeelden zijn atoom-interferometers voor de detectie van zwaartekrachtgolven en voor andere fundamentele experimenten in de natuurkunde, netwerken van atoomklokken voor toepassingen in de geodesie of voor de synchronisatie van radiotelescopie, quantumsensoren voor het meten van de versnelling en rotatie van een object (bijvoorbeeld van belang voor het zonder gps bepalen van een positie), verbetering van de prestaties van Global Navigation Satellite Systems, en het gebruik van atoomklokken om uiterst nauwkeurige navigatie door mobiele telefoonnetwerken mogelijk te maken. Ook aan toepassingen als quantumradar wordt gewerkt. Andere applicaties die verbeterd kunnen worden zijn medische beeldvorming door MRI: door het detecteren van minieme magnetische velden door quantumsensoren kunnen veel betere beelden gegenereerd worden. Ook in de halfgeleiderindustrie zou het meten van zeer kleine magneetvelden van waarde kunnen zijn, bijvoorbeeld bij het testen van microchips tijdens en na hun fabricage.

5.2.5 Quantumalgoritmes

Binnen actielijn 1 wordt een vroege-fase onderzoek- en ontwikkelprogramma ingericht voor de ontwikkeling van quantumalgoritmes en -applicaties.

Quantumsoftware ontwikkelen is volstrekt anders dan klassieke software ontwikkelen, waarbij fundamentele onderzoeksvragen leven op het terrein van nieuwe programmeertechnieken en strategieën voor het ontwerp, de validatie en het debuggen van quantumsoftware. Daarnaast is het uiterst belangrijk om inzicht te krijgen in de problemen waarvoor daadwerkelijk een efficiëntere quantumoplossing bestaat. Daarbij draait het steeds om de volgende vragen:

1. Welke problemen kunnen in principe efficiënter met quantumtechnologie aangepakt worden?

2. Hoe lossen we ze met nieuwe en bestaande algoritmen en software daadwerkelijk op?
3. Hoe zorgen we ervoor dat hardware- en software-ontwikkelingen elkaar optimaal versterken?

Deze vragen zijn van toepassing op de ontwikkeling van quantumsimulators en -computers, maar zeker ook voor quantumnetwerken. In het laatste geval spelen nieuwe cryptografische functionaliteiten ook een rol, die op klassieke netwerken niet mogelijk zijn, zelfs niet met behulp van klassieke quantumveilige cryptografie. Daarnaast gaat het om het toepassen en uitbreiden van bestaande technieken voor bijvoorbeeld optimalisatie, machine learning, simulatie van quantumsystemen voor nieuwe materialen en andere bekende technieken en toepassingsgebieden.

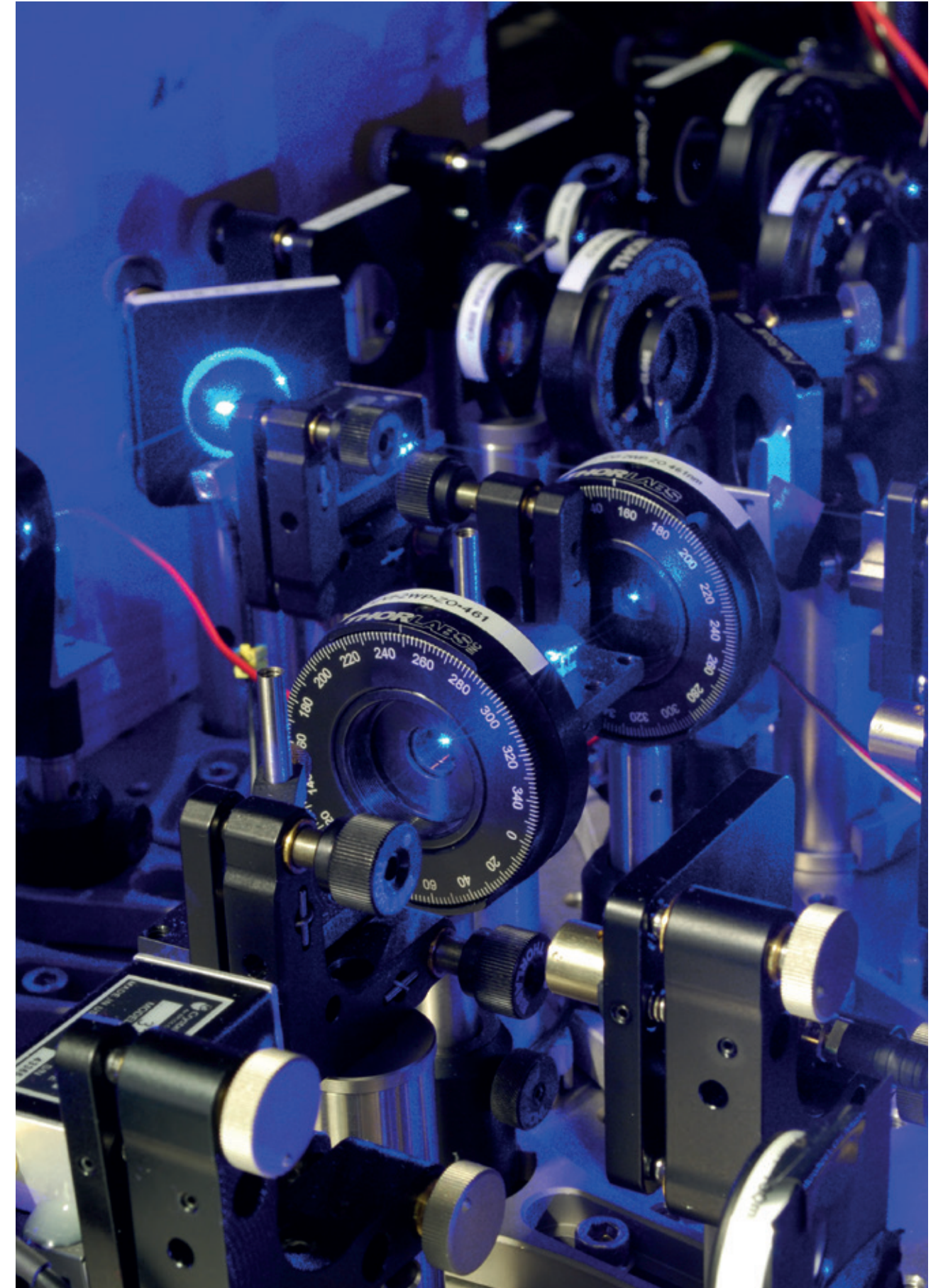
Met deze nieuwe capabilities wordt een quantum toolbox ontwikkeld. Met deze toolbox kunnen use cases doorgelicht worden, om te bepalen of het inzetten van quantumtechnologie (voor de eindgebruiker) voordeel biedt boven het gebruik van bestaande, klassieke toepassingen. Deze zogenaamde fine-grained analyse staat bijvoorbeeld voor quantumcomputers nog in de kinderschoenen.

Bovenop bovenstaande platform-agnostische ontwikkelingen worden programmeertechnieken voor quantumtechnologie toegespitst op de beschikbare hardware; binnen deze agenda bijvoorbeeld op de ontwikkelde demonstrators in de KAT-programma's. Daarbij worden vragen geadresseerd als: 'Hoeveel qubits zijn beschikbaar en welke logische bewerkingen (quantum gates) zijn mogelijk?' en 'Hoe stabiel zijn de qubits, is actieve foutcorrectie nodig?'

5.2.6 Post-quantum cryptografie

De ontwikkeling van quantumcomputers heeft een grote invloed op onze digitale veiligheid. Het onderzoek aan en de ontwikkeling van post-quantum cryptografie richt zich daarom op het ontwerpen en analyseren van cryptosystemen, die veilig zijn in gevallen waarin de aanvalleur, maar niet de gebruiker, beschikt over een quantumcomputer.

Op dit moment bestaan er verschillende kandidaatssystemen, die zijn gebaseerd op computationele problemen uit de wiskunde waarvoor geen efficiënte quantumalgoritmes bekend zijn. Het vereist veel onderzoek en ontwikkeling om een dergelijk computationeel probleem om te zetten in een veilig cryptosysteem. De kernvragen hierbij zijn:



1. Hoe kun je een dergelijk computationeel probleem omzetten in een cryptosysteem, zodanig dat een eventuele aanval alleen succesvol kan zijn wanneer de aanvaller het computationeel probleem oplost? Welke aanvals- en veiligheidsmodellen zijn van toepassing op de applicaties die worden gebruikt?
2. Wat is de moeilijkheidsgraad van het betreffende computationele probleem, en wat zijn de belangrijkste parameters die dat bepalen? Er moet nauwgezet worden gezocht naar nieuwe manieren om het onderliggende computationeel probleem op te lossen en de complexiteit van mogelijke aanvalsalgoritmes moet worden geanalyseerd en begrepen.
3. Hoe efficiënt kunnen de benodigde operaties in het cryptosysteem door de gebruiker uitgevoerd worden? Wat zijn de belangrijkste parameters die deze efficiëntie bepalen?
4. Hoe kunnen de benodigde cryptografische algoritmes efficiënt en veilig worden geïmplementeerd in software en hardware?
5. Wat is de exacte hoeveelheid rekenkracht die nodig is voor een succesvolle aanval gebruikmakend van klassieke of quantumcomputers? Dit bepaalt hoe groot de cryptografische sleutels moeten zijn om digitale veiligheid te garanderen.
6. Welke impact hebben deze nieuwe cryptografische algoritmes op bestaande communicatie-infrastructuren en businessprocessen, en hoe kunnen deze infrastructuren worden voorbereid op een snelle en adequate implementatie ervan?

Al deze vragen moeten worden beantwoord om tot een veilig systeem te komen. Merk op dat de cryptografie, en daarmee dus ook post-quantum cryptografie, zich niet beperkt tot de vertrouwelijkheid van bilaterale communicatie. De cryptografie beschouwt namelijk ook scenario's met meerdere, elkaar mogelijk onderling wantrouwende partijen die gezamenlijk een functionaliteit willen realiseren. Denk hierbij aan cryptografische protocollen zoals multi-party computation of gedistribueerde grootboekprotocollen.

Bij het bestuderen van de tweede vraag gaat post-quantum cryptografie verder dan pre-quantum cryptografie, in de zin dat ook quantumalgoritmes die op toekomstige quantumcomputers draaien onderdeel zijn van de analyse. De derde vraag hangt samen met de tweede vraag: het gaat erom de vrije parameters op zo'n manier te optimaliseren dat het systeem moeilijk te breken is voor een aanvaller, maar effi-

ciënt te gebruiken door de gebruiker. Overwegingen over de implementatie (vraag 4) leiden vervolgens vaak alsnog tot herontwerp, in het belang van snelheid en veiligheid.

De punten 2 en 5 verschillen ten aanzien van het detailniveau waarin de crypto-algoritmes worden geanalyseerd. In punt 2 gaat het vooral om de vraag hoe een verandering in bepaalde parameters de veiligheid van het systeem beïnvloedt. In punt 5 gaat het erom het aantal quantum gates of de hoeveelheid quantumgeheugen die nodig is voor het uitvoeren van een aanval te bepalen. Hierbij worden ook de mogelijkheden beschouwd van quantum co-processoren, die bestaan uit enkele qubits en die er veel eerder zullen zijn dan een volwaardige, universele quantumcomputer. Andere interessante vragen die hierbij spelen zijn hoe de diepte van quantumcircuits gereduceerd kan worden en hoe circuits gebouwd kunnen worden met gates die minder fysieke qubits vereisen.

Onderzoek en ontwikkeling aan post-quantum cryptografie moet leiden tot betere en veiliger systemen voor het beschermen van data en communicatie. Dit heeft een directe invloed op de Nederlandse digitale veiligheid.

5.3 Actielijn 2 | Ecosysteemontwikkeling, marktcreatie en infrastructuur

Quantumtechnologie bevindt zich nog in een relatief vroeg stadium van ontwikkeling en de verwachting is dat de groei de komende vijf jaar voornamelijk geconcentreerd zal zijn op onderzoek en ontwikkeling. Nederland heeft al diverse sterke kernen van waaruit één groot Nederlands ecosysteem kan ontstaan. Onder de gezamenlijke noemer van de Quantum Delta NL wordt verkend of met regionale partners geïnvesteerd kan worden in samenwerkingsverbanden die de positie van Nederland op het gebied van quantumtechnologie versterken. De KAT-programma's spelen daar een belangrijke rol in en vormen een centraal element in de ecosysteemontwikkeling. Daarnaast worden de volgende acties opgezet:

1. Internationale positionering van QΔNL en internationale inbedding van de nationale agenda

- **Internationaal positioneren van Nederland als Quantum Delta NL**, door het organiseren van en deelnemen aan clusterbijeenkomsten, workshops, conferenties en netwerkdagen. In september 2019

staat Nederland met een paviljoen op een Quantumconferentie in Boston en de eerste 'Inside Quantum Technology'-conferentie in Europa vindt in oktober 2019 plaats in Den Haag. Daarnaast wordt gedacht aan de organisatie van een internationaal TED quantum-evenement, en een jaarlijks evenement voor de gehele Nederlandse quantumgemeenschap ('Veldhovendagen QT').

- **Inbedding binnen Europa** | Het ontwikkelen van deze technologie en markt kan Nederland niet alleen. We zetten daarom sterk in op de samenwerking in Europees verband, waar quantumtechnologie ook hoog op de agenda staat. In het Europese Quantum Flagship speelt Nederland een voortrekkende rol op het gebied van quantuminternet en atomic clocks, en momenteel staat er een call open voor quantumsoftware en silicium qubits, waarin Nederlandse kennisinstellingen meedoen. Daarnaast wordt vanuit de EU ingezet op de ontwikkeling van een Europese Quantum Communication en Quantum Computation Infrastructure. Voor dat eerste heeft Nederland in juni een verklaring ondertekend samen met zeven andere lidstaten. Inzet is om binnen tien jaar een operationeel Europees quantumnetwerk te hebben, deels via satellieten en deels via glasvezel, met het doel publieke use cases te bedienen, zoals het verbinden van overheidsdiensten of de beveiliging van kritieke infrastructuren. Met ook ESA/ESTEC binnen de landsgrenzen kunnen wij hierin een sterke rol spelen.
- **Inbedding wereldwijd** | De inzet op samenwerking in Europa betekent niet dat we de deuren sluiten voor trans-Atlantische samenwerking. Nederland is traditioneel een open economie en kennisland, en we hebben sterke partnerschappen met internationale bedrijven zoals Microsoft, Bosch, Shell en Intel, en ook met publieke onderzoeksinstellingen over de wereld wordt nauw samengewerkt. Uitgangspunt hierbij is altijd de vraag of samenwerking de technologieontwikkeling en positie van Nederland op een duurzame wijze kan versterken. Hiervoor is het van belang te investeren in de ecosystemen die ervoor zorgen dat partijen wortel schieten in Nederland en niet zomaar 'opgepakt en verplaatst' kunnen worden. De campusontwikkeling in Delft is daarbij van strategisch belang.

- **Bilaterale samenwerkingsprogramma's met Noord-Amerika en Japan** | NWO beoogt bilaterale programma's op te zetten met de Verenigde Staten, Canada en Japan, waarbij de door NWO ingebrachte middelen worden gematcht door de buitenlandse wetenschapsfinancier. In deze programma's moet funderend onderzoek gedaan worden over de volle breedte van onderwerpen in de quantumtechnologie. De calls binnen deze programma's zijn bedoeld voor het opzetten van internationale consortia en het uitwisselen van (jong) talent. Van 16 tot 18 september 2019 vindt een wetenschappelijke Japan-NL-conferentie plaats in Delft om gezamenlijk de thema's voor de call met Japan te definiëren.
- 2. **Opzetten van fieldlabs**, als praktijkomgevingen (zoals populair sinds de Smart Industry Actieagenda) waarin bedrijven en kennisinstellingen doelgericht oplossingen voor de uitdagingen uit de verschillende sectoren ontwikkelen, testen en implementeren. Onderwerpen komen voort uit de use cases en de samenwerking die plaatsvindt in de faciliteiten die in de KAT-programma's worden opgebouwd. Een nationaal plan zorgt voor de coördinatie en afstemming aan de voorkant. Een voorbeeld van een fieldlab is het QuantumLab (paragraaf 3.2.4) dat momenteel wordt opgezet: het richt zich in eerste instantie op de watersector maar zal zich in de toekomst ook over andere domeinen uitstrekken, mogelijk met een nationaal karakter. Door middel van fieldlabs en de vorming van lokale samenwerkingsverbanden van studenten, onderzoekers, ondernemers en scholen (hbo en mbo) kan ook in dit vroege ontwikkelstadium al economische bedrijvigheid ontstaan. Een belangrijk element in het werk van de fieldlabs is het samenbrengen van 'mensen uit de quantumtechnologie', bijvoorbeeld in de vorm van clusterbijeenkomsten waarin per domein wordt onderzocht welke kansen quantumtechnologie kan bieden. Ook wordt verbinding gelegd met andere sleuteltechnologieën (zoals kunstmatige intelligentie, fotonica en ICT) waarin Nederland sterk is, bijvoorbeeld via workshops en gezamenlijke projecten.
- 3. **Uitbreiden van de voor de agenda benodigde nationale cleanroom-faciliteiten**. Voorwaarde voor de groei van het nationale ecosysteem zijn investeringen in de nationale cleanroom-infrastructuur. NanoLabNL heeft deze infrastructuur, met vestigingen in Delft, Eindhoven, Groningen, Amsterdam en Enschede, onder

zijn hoede. Investerings zijn nodig om deze infrastructuur op peil te houden en uit te breiden voor de groei van quantumtechnologie in Nederland. Prioriteit hierbij is het NanoLab3 voorstel met investeringsbudget voor onder andere nieuwe apparatuur in de cleanrooms van TNO, TU Delft, MESA+ en TU/e.

4. Doorontwikkelen van het Delftse quantumcluster voor het Nederlandse ecosysteem. Het Delftse quantumcluster (werknaam Q-campus) is met QuTech, de bedrijven, het QuantumLab en het op te richten 'House of Quantum' het grootste kristallisatiepunt van het nationale ecosysteem. Hier wordt door bedrijven, startups, onderzoekers en studenten uit de hele Quantum Delta NL en uit alle windstreken lokaal samengewerkt aan de ontwikkeling van de technologie, met toegang tot onderzoeksinfrastructuur en de nationale quantum computing faciliteit, onderdeel van KAT-1. Voor de verdere ontwikkeling van het cluster zijn investeringen nodig in het team voor acquisitie en accountmanagement, de huisvesting en de gedeelde onderzoeksfaciliteiten waar-

onder cleanrooms en werkplaatsen. Het Delftse cluster werkt als internationale magneet met uitstraling op de gehele QΔNL-community en draagt bij aan de duurzame vestiging van hightech bedrijvigheid in Nederland. De Q-campus groeit in een gemiddeld scenario van nu zo'n 300 fte tot 650 fte in 2023.

Ten dienste van QΔNL wordt in Delft een nationaal 'House of Quantum' opgericht, een fysieke, open ontmoetingsplek rondom quantumtechnologie waar verschillende functies worden geïntegreerd: ruimte voor wetenschappers, startups en bedrijfsleven, gecombineerd met ruimtes voor ontmoeting en interactie. Een inspirerende plek waar onverwachte ontmoetingen tussen ondernemende mensen op het grensvlak van disciplines en werelden mogelijk worden, een plek waar ooploopies, recepties, conferenties en workshops kunnen worden georganiseerd door de quantumgemeenschap. Voor bezoekers uit het buitenland zal het huis een landingsplek zijn van waaruit zij het Nederlandse quantumveld kunnen verkennen, want ook op andere plaatsen in



Nederland zullen vele 'quantum ontmoetingen' plaatsvinden. Kortom: het huis is een plek 'waar altijd iets gebeurt' en een natuurlijke ontmoetingsplek. Precieze locatiekeuze in Delft en een gedetailleerd concept zal worden uitgewerkt. Hierbij wordt gekeken naar best practices, zoals het vectorinstitute.ai in Toronto.⁴⁹

5. Uitbouwen en versterken van de lokale kernen binnen het nationale landschap. Op verschillende plaatsen in Nederland lopen initiatieven op het gebied van quantumtechnologie, die als onderdeel van deze agenda worden versterkt en samenwerken. Naast de hierboven geschetste ontwikkelingen in Delft zijn dat onder andere:

- **Opzetten van een Quantum Applicatie en Software Hub in Amsterdam.** Door het bundelen van denkkracht en capabilities van academische partijen in Amsterdam, de ondersteunende faciliteiten van het Amsterdam Science Park en samenwerking met partners uit de regio, wordt een Hub opgericht waarin partijen elkaar kunnen vinden om use cases en applicaties voor quantumtechnologie te ontwikkelen. Binnen de Hub wordt de samenwerking gestructureerd langs verschillende thema's (dat kunnen ook fieldlabs zijn), zoals Quantum Applications in Finance, Quantum Applications in Chemistry and Materials, en Quantum Applications for Operations Research. De Hub staat open voor en bevordert samenwerking met alle partijen in de Quantum Delta (en daarbuiten) en heeft expliciet als doel om via (inter-)nationale samenwerking innovatie van software en applicaties voor quantumtechnologie te versnellen.
- **Versterken van het ecosysteem in de Brainportregio, rondom quantumveilige communicatieverbindingen en quantumveilige authenticatiesystemen** in het Brainport Smart District. In de regio Eindhoven wordt de verbinding gezocht tussen de quantumactiviteiten en het internationaal toonaangevende HTSM-cluster.
- **Ontwikkelen van het Leidse aQa-platform** (applied Quantum algorithms, zie <http://aqa.universiteit leiden.nl>), dat theoretische quantumalgoritmen aanpast aan praktische hardware, om zo korte en middellange termijn toepassingen te realiseren voor eindgebruikers.

Dit platform bouwt voort op succesvolle industriële samenwerkingen met Shell (quantumchemie) en Volkswagen (quantumoptimalisatie).

- **Versterken en verbinden van het quantumtechnologisch onderzoek binnen het Quantum Centre op de Universiteit Twente.** Zwaartepunten zijn te vinden binnen het MESA+ Institute for Nanotechnology op de gebieden van supergeleidende devices, silicon quantum electronics en photonic quantum information processing. Versterken van de link tussen quantumtechnologie en integrated photonics, gericht op de bedrijvigheid op het Kennispark Twente. Dit bouwt voort op de succesvolle samenwerking tussen de UT en het hightech MKB in de regio.

6. Opzetten van een technology transferprogramma en stimuleren van startups. Startende ondernemingen spelen een uiterst belangrijke rol in de vorming van een ecosysteem, en wel om twee redenen. Ten eerste zijn ze belangrijk voor de opbouw van een Nederlandse quantumindustrie. Ten tweede zijn startups belangrijk voor het behouden van talent: ze creëren banen voor bijvoorbeeld uitstromende PhD's en geven deze talenten de mogelijkheid om het ecosysteem blijvend te versterken, in plaats van te verdwijnen naar het buitenland. Daarom wordt een programma opgezet dat wetenschappers en ondernemers stimuleert en ondersteunt bij het opzetten van startups, die nieuwe kennis en technologie naar de markt brengen. De ambitie is groot, met Silicon Valley als voorbeeld, maar de eerste puzzelstukjes zijn er al: hoogwaardige kennis, verschillende startups die specifieke onderdelen leveren voor quantumcomputers, quantumnetwerken en quantumsensoren, en de bereidheid van grote bedrijven om te investeren in Nederland. Dit programma voorziet in de ontwikkeling van een goed startupbeleid rondom quantumtechnologie, met de bijbehorende IP-raamwerken, voorzieningen voor risicodragend kapitaal, ruimte voor startups op de campussen en toegang tot infrastructuur zoals laboratoria en cleanrooms.

⁴⁹ Zie: www.vectorinstitute.ai

5.4 Actielijn 3 | Human capital: educatie, kennis en vaardigheden

Naar verwachting wordt ‘talent’ de komende jaren een van de bottlenecks voor een verdere groei van quantumtechnologie en de aanverwante industrie. Doordat quantumtechnologie relatief nieuw is en bovendien is gestoeld op kennis die zeer tegen-intuïtief is, zijn de huidige opleidingen niet toereikend om aan de groeiende vraag naar quantum-engineers en systems engineers te voldoen. Volledig hierop toegespitste academische of technische opleidingen zijn er nog niet. Hierin moet geïnvesteerd worden, voordat quantumtechnologie effectief in de industrie en maatschappij kan landen. De QuTech Academy in Delft, de Quantum Information Module en QuSoft Master in Amsterdam en het bij QT/e in Eindhoven in ontwikkeling zijnde Quantum Materials & Technologies Certificate kunnen hiervoor de bouwstenen leveren.

7. Versterken van educatie, samenwerking en kennisuitwisseling, waarbij verschillende activiteiten worden overwogen, zoals het stimuleren van uitwisseling van studenten en opleidingen binnen Nederland en met andere landen en het opzetten van een gedeeld curriculum voor quantumopleidingen aan verschillende universiteiten, hogescholen en instituten. Delen van (online) lesmateriaal en online materiaal maken voor ‘bereik’ naar buiten. Stageplekken van studenten bij bedrijven zijn belangrijk, en ook omgekeerd - ‘teach quantum to engineers, and engineering to scientists’. Bedrijven kunnen hierbij nauw worden betrokken, bijvoorbeeld door gastlezingen te verzorgen over ondernemerschap, software, hardware, enzovoort – de bereidheid is er.

Het organiseren van aansprekende internationale hackathons and challenges op het gebied van quantumtechnologie kan de technologie (basisprincipes) toegankelijker maken voor geïnteresseerden. Een ander idee is het opzetten van programma’s met en voor docenten, waardoor quantumtechnologie onderdeel wordt van het lespakket op middelbare (en mogelijk zelfs lagere) scholen, zodat Nederland voorbereid is op een toekomst met quantumtechnologie. Het House of Quantum kan dienen als inspirerende en open locatie voor kennisuitwisseling tussen wetenschappers onderling en met ontwikkelaars uit het bedrijfsleven. Daarbij wordt samenwerking gezocht met de QuTech Academy en het Talent

and Outreach Committee van het Quantum Software Consortium.

8. Aantrekken en behouden van talent uit het buitenland.

Talent wil werken bij de topinstituten van de wereld, en de topinstituten en -groepen in Nederland kunnen daarom dienen als magneet voor talent van buitenaf en voor Nederlandse onderzoekers die voor een of meerdere postdoc-posities naar het buitenland zijn vertrokken en geïnteresseerd zijn om weer terug te komen. Een sterke magneet heeft een sterk ecosysteem nodig, en dit sterke ecosysteem zal op zijn beurt weer nieuw talent en extra bedrijvigheid aantrekken. Voor het aantrekken van internationaal talent kunnen bijvoorbeeld hooglerarenposities worden opgezet, posities voor quantum engineers en ondernemers worden gecreëerd en beurzen worden aangeboden aan excellente studenten en promovendi.

9. Communitybuilding, conferenties en workshops, summer schools, uitwisseling studenten. NWO reserveert binnen deze agenda onder andere budget voor activiteiten die de verbinding binnen de quantum community versterken en het veld helpen zich te organiseren. Het slaan van bruggen naar andere wetenschapsgebieden waaronder de alfa- en gammawetenschappen staat daarbij voorop. Hieronder vallen ook de organisatie van conferenties en workshops en van summer schools en uitwisselingsprogramma’s voor junior-onderzoekers en studenten.

5.5 Actielijn 4 | Starten maatschappelijke dialoog over quantumtechnologie

Quantumtechnologie is een jonge technologie. Onderzoeksgroepen wedijveren om eerste ontdekkingen, patenten en academische eer. Sommige overheden zijn al aangesloten bij strategische discussies, met visiedocumenten (zoals het Europese Quantum Manifesto en Quantum Software Manifesto) en subsidieregelingen. Ook de industrie begint zich bewust te worden van de potentie en toekomstige economische impact van quantumtechnologie. Enerzijds natuurlijk de grote tech-bedrijven in hun race om de eerste quantumcomputer te maken, anderzijds eindgebruikers zoals banken en bouwers van vliegtuigen. De technologische ontwikkelingen gaan snel en kunnen door de grote investeringen wereldwijd

wel eens in een stroomversnelling geraken. Om te zorgen dat de maatschappij de vruchten kan plukken van quantumtechnologie, is het cruciaal dat er voldoende maatschappelijk draagvlak is. Doordat de toepassingen van quantumtechnologie echter nog beperkt zijn, zijn er nog weinig maatschappelijke, ethische en juridische kaders ontwikkeld. De ontwikkeling van die kaders kan een belangrijke rol spelen in het creëren van maatschappelijk draagvlak.

Praten met stakeholders kan echter meer opleveren dan maatschappelijke acceptatie alleen, zo hebben ELSA-bijeenkomsten die de TU Delft heeft georganiseerd aangetoond. De waarde van toegang tot technologie, zoals ‘net neutrality’ voor het klassieke internet, werd door stakeholders ook genoemd als maatschappelijk belangrijk. Sommige stakeholders gingen zelfs verder en konden toepassingen van quantumtechnologie noemen die zij zouden willen hebben. Met andere woorden, ELSA kan ook tot (open) innovatie leiden, en waardevolle input teruggeven aan alle KAT’s en actielijnen in deze nationale agenda.

Acties in deze actielijn zijn:

10. Starten van een (internationale) dialoog over quantumtechnologie. Nederland verkeert in een uitstekende positie om internationaal het voortouw te nemen en een leidende rol te nemen in de ontwikkeling van regelgeving en ethiek met betrekking tot quantumtechnologie. Het Quantum Vision team van de TU Delft en de Legal & Societal Sounding Board van het Quantum Software Consortium kunnen samen het voortouw nemen. Wellicht kan het House of Quantum dienen als fysieke plek voor de dialoog. Het organiseren van een internationale tafel over ELSA-onderwerpen kan een eerste initiatief zijn, met toonaangevende filosofen, wetenschappers, bestuurskundigen om het onderwerp ook internationaal te agenderen. Daarbij is het zaak om aansluiting te vinden en houden bij wat binnen het Europese Quantum Flagship speelt op dit gebied.

11. Oprichten van een nationale ELSA-commissie en -leerstoel voor quantumtechnologie. Haar taak zou zijn om de nationale dialoog over quantumtechnologie en de implicaties ervan te starten en faciliteren. Ook kan zij een nationaal programma opzetten, dat erop gericht is alle lagen van de bevolking te informeren en betrekken bij de discussie, startend bij basisschoolleeringen. Ook wordt gedacht aan de instelling van een

academische leerstoel op het gebied van de ELSA-aspecten van quantumtechnologie. Deze leerstoel kan instituut- en vakverbredend zijn en Nederland vertegenwoordigen in een beginnend vakgebied.

12. Ontwikkelen van juridische en ethische kaders voor quantumtechnologie, mede met het oog op het creëren van maatschappelijk draagvlak. Zo dienen bestaande juridische kaders met betrekking tot de versleuteling en ontsleuteling van informatie en communicatie aan de ontwikkelingen in quantumtechnologie te worden aangepast. Daarnaast kan de hoge verwerkingscapaciteit van quantumcomputers leiden tot grootschalige en geavanceerde analyse van grote hoeveelheden privacygevoelige gegevens – ‘quantum big data’ – en ook dit roept juridische en ethische vragen op. Er komen meer ethische en juridische vragen met betrekking tot quantumtechnologie op. Zo ontstaan nieuwe vragen op het gebied van beperkingen in de ontwikkeling, productie, distributie en export van quantumtechnologie, zoals handelsbeperkingen en exportrestricties, welke grote gevolgen kunnen hebben voor de markt in quantumtechnologie. Daarnaast spelen er vragen met betrekking tot de verantwoordelijkheid van aanbieders van cloud-based quantumtechnologie, met betrekking tot het rechtmatig en ethisch handelen van gebruikers. Voor het ontwikkelen van de benodigde ethische en juridische kaders wordt een aanpak voorgesteld die is gebaseerd op verantwoordelijke innovatie (‘responsible innovation’). Een landelijke aanpak langs deze lijnen kan de maatschappelijke inbedding en acceptatie van quantumtechnologie stimuleren en versnellen.

5.6 Drie KAT-programma’s

De drie overkoepelende KAT-programma’s hebben tot doel de technologie versneld naar de markt en maatschappij te brengen. Zij creëren open testomgevingen en faciliteiten waar universiteiten, instituten, bedrijven en eindgebruikers op nationale schaal samenwerken en experimenteren met de technologie en haar toepassingen. Systeemintegratie, demonstrators, use cases, outreach en multidisciplinaire samenwerking zijn hierbij sleutelwoorden. Dankzij faciliteiten die in de KAT’s worden ontwikkeld, kunnen bestaande en nieuwe bedrijven op een eenvoudige manier toegang krijgen tot quantumnetwerken, quantumcomputers en quantumsimulators. Zij hoeven voor het ontwikkelen en testen van

(componenten van) quantumtechnologie zelf geen nieuwe investeringen in dure, eigen infrastructuur te doen. Zo kan er een grote community van ontwikkelaars en potentiële gebruikers ontstaan als voedingsbodemp voor de ontwikkeling van een innovatieve en bruisende quantumindustrie.

5.6.1 KAT-1 | Quantum Computing and Simulation

Dit katalysatorprogramma heeft als doel om de technologie van quantumcomputers en quantumsimulators versneld door te ontwikkelen en naar de markt en maatschappij te brengen, en om daarbij toepassingen van deze technologie te exploreren en uit te werken. Het biedt een omgeving waar alle capabilities die Nederland op dit terrein heeft toegankelijk worden gemaakt en het stelt de overheid, het bedrijfsleven, technologieontwikkelaars en studenten in staat om de mogelijkheden van quantum computing in de breedte te verkennen. Hierbij kan hands-on ervaring opgedaan worden met implementaties op echte hardware en daarvoor ontwikkelde userinterfaces en op basis van hardware-agnostische implementaties. Belangrijk is de ontwikkeling van gebruikersfaciliteiten en demonstrators van voldoende kwaliteit (een combinatie van het aantal qubits, de kwaliteit van de qubits en de aansturing), die vervolgens beschikbaar komen om baanbrekende toepassingen in de maatschappij en de industrie te realiseren om zo grote maatschappelijke en economische uitdagingen op te lossen. De weg die uiteindelijk naar de universele quantumcomputer leidt, passeert belangrijke tussenstations, waaronder kleinere ('few qubit') systemen en ruizige computing systemen (Noisy Intermediate Scale Quantum (NISQ) systemen), bijvoorbeeld op basis van quantumsimulators.

Via het nationale loket kunnen partijen uit de triple helix elkaar vinden om de dialoog aan te gaan over concrete use cases en over de nodige interactie bij de ontwikkeling van hardware- en softwareoplossingen. Zo kunnen brede, nationale samenwerkingsvormen ontstaan voor verschillende toepassingsgebieden, waaronder quantumchemie en materiaalontwikkeling, applicaties in de financiële sector en procesoptimalisatie in de industrie en in logistieke processen. Hierbij zal het in eerste instantie draaien om die use cases waarmee quantumvoordeel boven klassieke computationele oplossingen aangetoond kan worden.

Om deze versnelling van technologie mogelijk te maken, richt het programma zich op de volgende elementen:

1. **Uitbouw en openstelling van de fysieke computing facility in Delft**, inclusief Quantum Inspire en ontwikkeling van een online platform dat gebruikers en ontwikkelaars toegang biedt tot state-of-the-art quantumcomputers en quantumsimulators in de cloud. Via dit online platform krijgen onderzoekers toegang tot verschillende faciliteiten in Nederland en de EU, voor de ontwikkeling van algoritmes, software en concrete use cases. De faciliteit kan zo gezien worden als de eerste Europese quantumcomputer en kan worden bezocht door de gebruikers ervan en door publiek, zodat de technologie zichtbaar en tastbaar wordt. Deze Europese quantumcomputer biedt de mogelijkheid om ervaring op te doen met het programmeren op allerlei demoversies van quantumcomputers met een beperkt aantal qubits. Dit zijn in de komende jaren ruizige systemen (NISQ), zonder foutcorrectie, bijvoorbeeld op basis van de hybride quantum-klassieke simulators die in dit KAT worden ontwikkeld. Door de parallelle ontwikkeling van de computing capability in Delft en de simulator capabilities in de hele Quantum Delta NL, wordt de ontwikkeltijd van NISQ-systemen naar een universele quantumcomputer verkort. Ter ondersteuning van de ontwikkeling van de daadwerkelijke quantumplatforms worden quantumemulatoren ontwikkeld en ontsloten. Dit zijn klassieke computersystemen waarmee quantumsystemen tot enkele tientallen qubits klassiek kunnen worden gesimuleerd. Deze emulatoren spelen een belangrijke rol bij de vroegtijdige ontwikkeling van algoritmes en protocollen die later op fysieke systemen worden geïmplementeerd.
2. **Het programma voorziet in de ontwikkeling van quantumsimulator capabilities** voor het ontwikkelen van nieuwe materialen voor een breed scala van toepassingen en in een R&D-netwerk waarin de verschillende simulatorplatforms in de Quantum Delta NL zijn verbonden. Via dit netwerk van platforms in Eindhoven, Twente, Delft, Amsterdam en Leiden wordt de expertise op het gebied van quantumsimulators ontsloten en toegankelijk gemaakt voor eindgebruikers, mede via de te ontwikkelen online userinterface. De simulatorplatforms bieden een rijk scala aan systemen gebaseerd op koude atomen, ionen en moleculen, maar ook op basis van optische cavity arrays, quantum dots en supergeleidende circuits en fotonische clusters. In Eindhoven wordt een demonstrator ontwikkeld van een quantum-klassieke simulator op basis van Rydberg-atomen met enkele tientallen tot honderd ruizige qubits. Deze komt beschikbaar voor



eindgebruikers die hiermee onopgeloste problemen uit de materiaalwetenschappen aan kunnen pakken.

3. De ontwikkeling van use cases binnen dit KAT gebeurt op verschillende locaties en op verschillende manieren, die voor eindgebruikers door het nationale loket toegankelijk worden gemaakt, zoals:

- a) De Quantum Applicatie en Software Hub Amsterdam draagt binnen dit KAT bij aan de ontwikkeling van applicaties en software die op NISQ-systemen toegepast kunnen worden, bijvoorbeeld voor procesoptimalisatie-vraagstukken of materiaalontwikkeling;
- b) Het Leidse aQa-platform ontwikkelt samen met de eindgebruiker use-case-specifieke benchmarks voor quantumalgoritmes, en onderzoekt de schaalbaarheid ervan zowel met simulatoren als op hardware. Zo krijgt de eindgebruiker inzicht in het 'rendez-vous-moment' waarop de quantumcomputer de klassieke computer zal inhalen.
- c) In fieldlabs, die een belangrijke rol spelen bij het vertalen van de groeiende quantum computing en quantumsimulator capabilities naar concrete oplossingen in relevante toepassingsgebieden. Zo wordt in het fieldlab Zuid-Holland bijvoorbeeld gekeken hoe quantum computing succesvol toegepast kan worden in watermanagement-vraagstukken.
- d) Door het slim inzetten van quantumemulatoren kan het bedrijfsleven in een vroeg stadium gevoel krijgen voor de (on-)mogelijkheden van toepassingen van quantum computing. Hierdoor kunnen geschikte use cases voor diverse sectoren sneller worden geïdentificeerd en kan beter richting gegeven worden aan het ontwikkelen van de juiste capabilities.

4. Bouwen aan de waardeketen. Het ontwikkelen, in de lucht houden en exploiteren van de faciliteiten vraagt een scala aan spelers, ook buiten het wetenschappelijke laboratorium, denk aan: leveranciers van control-elektronica, softwareontwikkelaars, fabricage en beheer van devices, klantcontact, app-ontwikkelaars etc. Een deel van deze rollen is nog niet aanwezig en vraagt om nieuwe startups en andere partijen die zich manifesteren in de keten. Hiermee ontwikkelt het ecosysteem zich gaandeweg steeds verder tot een 'waardeketen' voor quantum computing. Wat betreft laboratoriuminfrastructuur zijn investeringen nodig in de qubit-platforms, een testopstelling voor functionaliteiten alvorens deze 'live' te brengen en ondersteunende faciliteiten, zoals cleanrooms en werk-

plaatsen. Daarnaast zijn er toolkits voor algoritmes en applicaties nodig, een standaardbibliotheek van quantumsoftware-modules, en testfaciliteiten voor emulatie op supercomputers.

Korte termijn impact (0-4 jaar):

De korte termijn impact van dit KAT-programma wordt vooral voorzien in de ontwikkeling van de eerste Europese quantumcomputer en een nieuwe, multidisciplinaire gemeenschap daaromheen. De use cases die ontwikkeld worden leiden tot de vorming van nieuwe samenwerkingsverbanden, ook tussen partners uit sectoren die normaliter weinig met elkaar in contact staan. Dit leidt tot nieuwe inzichten en ideeën voor commercialisatie van hardware en software. Voor de ontwikkeling van een bruikbaar platform zullen bestaande toeleveranciers (van bijvoorbeeld vacuüm-systemen, koelsystemen, lasersystemen en magneetsystemen) betrokken worden.

Middellange termijn impact (5-8 jaar):

Op de middellange termijn is een nieuwe quantumindustrie te verwachten die zorgt voor de ontwikkeling en het beheer van de faciliteiten. Maatschappelijke impact is voorzien door nieuwe chemische processen en materialen en slimme productiesystemen die kunnen worden ontwikkeld. Dit is primair interessant voor marktsegmenten die zich bezighouden met biologische en chemische processen, zoals de productie van grondstoffen voor de (land)bouw, de productie van brandstoffen, de productie van biomaterialen, of de productie van medicijnen.

Lange termijn impact (8 jaar en verder):

De doorontwikkeling van de faciliteiten leidt op termijn tot NISQ-technologie voor het uitvoeren van steeds complexere berekeningen, waaronder schaalbare prototypes van onderdelen van de gehele stack, zoals de qubit platforms en de control-elektronica. Dit leidt tot toepassingen in diverse sectoren waaronder de chemie, logistiek, ICT (kunstmatige intelligentie, machine learning) en gezondheidszorg. Nederland positioneert zich als de plaats waar de toon wordt gezet voor de ontwikkeling van zowel de technologie als de toepassingen. Hiermee wordt een sterke basis gelegd voor de ontwikkeling van de uiteindelijk universele quantumcomputer in de verdere toekomst.

5.6.2 KAT-2 | Nationaal Quantum Netwerk

Nederland heeft een internationale voortrekkersrol op het gebied van quantumcommunicatie-netwerken. QuTech

bouwt in de Randstad in samenwerking met onder meer KPN aan 's werelds eerste quantuminternet gebaseerd op verstrengeling. In Eindhoven worden de eerste stappen gezet richting een QKD-netwerk in de Brainportregio. In Europa werkt de Quantum Internet Alliance onder aanvoering van QuTech aan een blauwdruk voor een Europees quantuminternet en is QKD een kerntechnologie voor de Digital Single Market, zowel over land als via satelliet.

Het Nationaal Quantum Netwerk zal gaan dienen als testbed voor de nieuwe technologie en voor toepassingen binnen het ecosysteem. Een van de redenen dat het klassieke internet zo snel kon groeien, is dat het van begin af aan gemakkelijk en goedkoop toegankelijk was voor netwerk engineers, programmeurs en gebruikers. Om het quantuminternet naar een volgend niveau te brengen, kan eenzelfde aanpak een 'boost' geven aan de ontwikkeling ervan. Met dit programma wordt onder meer een basis gelegd voor nationale quantumveilige verbindingen, inclusief landelijke toegang voor het testen van relevante innovatievragen en industriële applicaties. Daarnaast biedt het Nationale Quantum Netwerk een ideaal uitgangspunt om uit te groeien tot een Europees netwerk. Binnen de EU worden eind 2019 de eerste plannen

opgesteld voor een Europese quantumcommunicatie-infrastructuur (QCI), en dit is het moment om hierop in te spelen en een leidende rol te pakken.

Geïnteresseerde eindgebruikers, burgers en maatschappelijke instellingen kunnen via het nationale loket in contact komen met verschillende partijen die werken aan het nationale quantumnetwerk, en de betrokken onderzoekers uit de Quantum Delta NL.

Het beoogde Nationaal Quantum Netwerk bestaat uit de volgende drie pilaren:

- 1. Een quantuminternet-infrastructuur gebaseerd op verstrengeling,** waarbij de eerste quantum-link tussen Delft en Den Haag zal worden uitgebreid over de Randstad en wellicht in de toekomst heel Nederland kan omvatten. Hierin is ruimte voor funderende innovatie, voor verdere technische ontwikkelingen, alsmede voor krachtenbundeling met de hardware- en software-industrie voor de ontwikkeling van verschillende componenten van de infrastructuur. Deze tak beoogt een 'moon-shot' te zijn en fungeert als een sterk uithangbord voor de hightech-



mogelijkheden die quantumcommunicatie gaat brengen voor Nederland. We kunnen hierbij voortbouwen op een ijzersterke basis: nadat in Delft in 2015 voor het eerst een quantumlink over een langere afstand is aangetoond, zijn onderzoekers uit dezelfde groep in 2018 er voor het eerst in geslaagd 'verstregeling on demand' te leveren. Dit nieuwe verstregelingsprotocol maakt het mogelijk drie of meer quantumprocessors met elkaar te verbinden en opent de deur voor de daadwerkelijke uitrol van het quantuminternet.

2. Een development testbed, met open access voor gebruikers en ontwikkelaars. Een dergelijk open testbed maakt de ontwikkeling mogelijk van een innovatieve en bruisende software- en security-industrie rondom een toekomstig quantuminternet. Bestaande en nieuwe software- en security-bedrijven krijgen via een userinterface op een eenvoudige manier toegang tot het quantumnetwerk, zonder dat zij hoeven investeren in (nu nog) dure quantum-hardware en glasvezelinfrastructuur. Op deze

manier kan een grote community van ontwikkelaars en potentiële gebruikers ontstaan. Het testbed zal in eerste instantie gebaseerd zijn op een emulatie van een quantumnetwerk via recent in QuTech ontwikkelde simulatie-tools. Hiermee kan op een klassieke supercomputer een quantumnetwerk worden gesimuleerd. Wanneer de technologie voor dit quantumnetwerk voldoende ontwikkeld is en klaar is voor gebruikerstesten, zal deze middels de tussenliggende software stack met de gebruikersinterface van het testbed worden verbonden.

3. Aansluiten van 'early adopters' (of: 'bridging the gap in de value chain'). Sommige facetten van de quantumnetwerk-technologie zijn op dit moment al ver genoeg ontwikkeld om getest te worden door vroege gebruikers. Eerste initiatieven in Nederland zijn (zie ook Figuur 16):

a) Het QKD-netwerk in de regio Eindhoven waar quantumveilige point-to-point verbindingen gelegd worden tussen een woning in Helmond en de campus van de TU/e, om met quantumslutels de verzonden data te

beveiligen. Naast deze verbinding wordt ook gewerkt aan een quantumveilige verbinding met het gemeentehuis in Waalre. Behalve de realisatie van quantumveilige verbindingen, is een ander kernaspect het doorontwikkelen van quantumveilige authenticatieconcepten naar schaalbare applicaties, toepassingen en producten.

b) Een MDI-QKD-netwerk in de regio Delft/Den Haag, waarbij stervormige quantumveilige netwerken worden aangelegd. Met Measurement Device Independent-QKD kunnen via een centrale 'node' meerdere gebruikers met elkaar verbonden worden, en hoeft geen gebruik gemaakt te worden van zogenaamde 'trusted repeaters' tussen de verschillende delen van de quantumverbindingen. Dit geeft een hogere flexibiliteit dan standaard QKD-systemen: de centrale node fungeert als switchbord en kan telkens andere gebruikers met elkaar verbinden. Ook maakt deze MDI-QKD de aanname van standaard QKD over de correcte werking van lichtdetectoren overbodig: MDI-QKD is niet via de detectoren te kraken. Deze methode maakt het op termijn ook mogelijk verschillende quantumnetwerken met elkaar te verbinden, om letterlijk een quantuminternet ('internetworking' is het verbinden van verschillende netwerken) te creëren.

Korte termijn impact (0-4 jaar):

Een nationaal quantumnetwerk als showcase van het Nederlandse quantumveld. Door middel van het Nationaal Quantum Netwerk en het ontwikkelen van nieuwe security-systemen en applicaties, worden de mogelijkheden van quantumtechnologie ook zichtbaar voor het grote publiek. Daardoor kan het Nationale Quantum Netwerk zowel als een showcase van het gehele Nederlandse quantumveld dienen, alsook een platform zijn voor educatie en de opleiding van toekomstige software- en security-engineers.

Middellange termijn impact (5-8 jaar):

Uitbreiding tot en aansluiting met een Europees quantum netwerk. De opzet van ons Nationale Quantum Netwerk kan als blauwdruk gebruikt worden voor een uitbreiding op Europees niveau, en aansluiten op de netwerken die zullen worden uitgerold in de andere landen. Op deze grotere schaal zullen eerst point-to-point QKD links met elkaar worden verbonden, waarna ook de functionaliteit zal worden vergroot door het inbrengen van de innovaties uit het fundamentele onderzoek.

Lange termijn impact (8 jaar en verder):

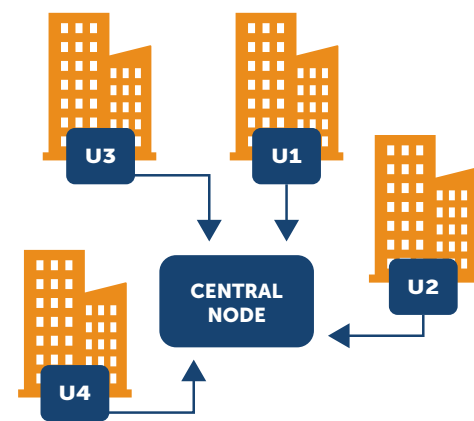
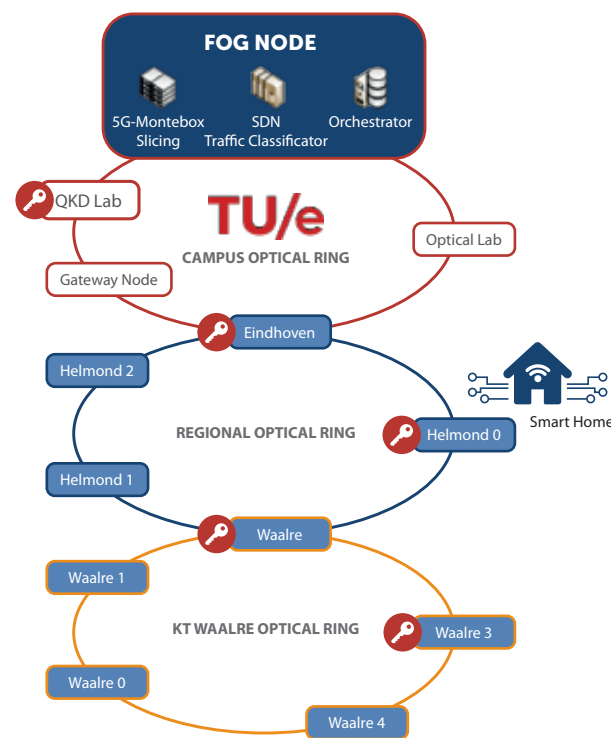
Een mondiaal quantumnetwerk. In de toekomst zal het quantuminternet diverse quantum nodes en quantumcomputers met elkaar verbinden, zowel via optische fibers als via satellieten in de ruimte. Dit gaat leiden tot ongeëvenaarde mogelijkheden voor de gebruikers ervan: van ongeëvenaarde rekenkracht tot een volledig veilige communicatie-infrastructuur. Het Nationaal Quantum Netwerk bereidt potentiële gebruikers, het grote publiek en het bedrijfsleven voor op dat komende quantumtijdperk.

Implementatie, conform de actielijnen van deze agenda:

Naast het fundamentele onderzoek aan quantumnetwerken, zoals beschreven in actielijn 1 in paragraaf 5.2, zal dit KAT-2 programma bij uitstek zorgen voor ecosysteemontwikkeling, marktcreatie en infrastructuur. Een Nationaal Quantum Netwerk creëert mogelijkheden voor het opbouwen van zowel een quantumcommunicatie-industrie als voor het ontstaan van serviceproviders zoals die ook bestaan voor het huidige internet. Daarnaast verbinden de pilaren van het Nationaal Quantum Netwerk de verschillende universiteiten en instituten en de daarbij betrokken hard- en softwarebedrijven en toeleveranciers letterlijk en figuurlijk met elkaar. Bovendien biedt de open quantuminternet 'testbed'-infrastructuur toegang aan potentiële gebruikers (zoals banken, overheidsinstellingen en de beveiligingsbedrijven) en ontwikkelaars. Nieuwe gebruikers kunnen ervaring opdoen met de mogelijkheden van quantumtechnologie. Zij kunnen zo alvast gebruik maken van en wennen aan technologieën die voor vele andere bedrijven nog niet beschikbaar zijn. Dit alles resulteert in een concurrentievoordeel voor bedrijven in Nederland.

Een 'open' quantum internet-testbed kan dienen als middel voor educatie van toekomstige quantum-engineers en -gebruikers en als 'showcase' voor de mogelijkheden van quantumtechnologie. Het netwerk kan bijvoorbeeld worden opengesteld voor studenten aan universiteiten en hogescholen, maar ook voor projecten op het mbo en op middelbare scholen.

Tenslotte zijn verschillende aspecten van het quantuminternet, zoals het verbeteren van privacy, governance, net neutrality en toegankelijkheid belangrijke onderdelen van de maatschappelijke dialoog over quantumtechnologie. Een andere dialoog is bijvoorbeeld die van standaardisatie en (internet) protocollen. De Europese organisatie voor standaarden ETSI heeft de QKD Industry Specification Group



FIGUUR 16 Eerste initiatieven voor het testen van QKD-netwerken in Nederland. Links een illustratie van het QKD-netwerk in de regio Eindhoven, rechts een illustratie van een MDI-QKD-netwerk zoals de regio Delft – Den Haag wordt gebouwd.

opgestart, en ook bij de Internet Engineering Task Force IETF worden al protocollen voor het toekomstig quantum-internet ingediend. Met de groei van het quantuminternet is het belangrijk dat deze en andere maatschappelijke aspecten voldoende aandacht krijgen, hetgeen binnen dit KAT-programma georganiseerd zal worden.

5.6.3 KAT-3 | Quantum Sensing Applicaties

De klassieke sensoren die vandaag de dag worden gebruikt in bijvoorbeeld mobiele telefoons, auto's en in de lucht- en ruimtevaart maken over het algemeen gebruik van elektrische, magnetische, piezoresistieve of capacitieve effecten. Vaak zijn ze gebaseerd op het principe van de mechanische oscillator, waarmee een veelheid aan parameters kan worden gemeten, zoals druk en temperatuur, lading, massa of versnelling. Hoewel dit type sensoren zeer gevoelige en efficiënte metingen mogelijk maakt, worden ze fundamenteel beperkt door onder andere klassieke en externe ruis. Toekomstige sensortoepassingen vereisen een significant hogere gevoeligheid dan met bestaande sensoren haalbaar is; idealiter worden ze enkel nog begrensd door de ultieme limieten van de quantummechanica. Bovendien vereisen verschillende toepassingen sensoren die ongevoelig zijn voor elektromagnetische strooivelden, die volop aanwezig zijn in en om bijvoorbeeld MRI-scanners, elektrische voertuigen en allerhande andere apparatuur. Quantumsensoren bieden een oplossing.

Van de vier toepassingsgebieden van quantumtechnologie zijn quantumsensoren waarschijnlijk het verst gevorderd als het gaat om de toepassing in industrie en samenleving. Desondanks is er ook voor quantumsensoren nog veel onderzoek nodig. Dat onderzoek richt zich op de fundamenteën (het ontdekken van nieuwe en verbeteren van bestaande quantumsensoren), op het identificeren van nieuwe applicaties en op het ontwerpen en ontwikkelen van rendabele en duurzame toepassingen. Verschillende organisaties en groepen in Nederland werken aan dit soort uitdagingen, vaak in samenwerking met opdrachtgevers vanuit het bedrijfsleven. Het speelveld is echter versnipperd, de stap van de wetenschappelijke systemen in laboratoria naar rendabele commerciële systemen in de industrie is vaak groot, en hoewel er ook ten aanzien van quantum sensing voor- aanstaand onderzoek wordt gedaan, kan Nederland internationaal nog geen vuist maken. Dit KAT-programma richt zich daarom op het verbinden van het veld en op het versnellen van de ontwikkeling van quantumsensoren.

Daartoe wordt een multidisciplinair samenwerkingsplatform opgericht, waarin onderzoekers en ontwikkelaars ervaringen uit kunnen wisselen, resources kunnen delen en samen met bedrijven en andere gebruikers use cases voor de technologie definiëren en uitwerken tot prototypes. Het KAT-programma richt zich nadrukkelijk op gebruikers in verschillende domeinen: defensie, ruimtevaart, industrie, mobiliteit, landbouw, enzovoorts. Onderdeel van het KAT worden faciliteiten waarin nieuwe typen quantumsensoren gedemonstreerd kunnen worden, en aan de hand waarvan partijen gezamenlijk verder kunnen werken aan de ontwikkeling ervan. In dit KAT-programma worden volledig functionele prototypes ontwikkeld, die zijn gebaseerd op technologieën waarin Nederland uitblinkt, zoals systemen op basis van quantummechanische oscillators, ultrakoude atomen, NV-centers in diamant of transmon-qubits.

Toegepast onderzoek, systeemintegratie, domeinkennis en benchmarking ten opzichte bestaande sensoren zijn belangrijke elementen in dit programma. Ze zijn nodig om te kunnen bepalen wat er na de conceptfase nodig is voor doorontwikkeling naar producten waar een eindgebruiker wat mee kan en die een (toekomstige) sensorfabrikant goedkoop genoeg kan produceren. Dit KAT-programma richt zich bij het ontwikkelen van prototypes daarom ook op het identificeren van kritische ondersteunende technologieën (zoals fotonen- en atomenbronnen en -detectoren, quantummechanische resonators, fotonica en elektronica) die nodig zijn om quantum sensing naar een volgend niveau te tillen. Bedrijven die werken aan dergelijke technologie worden betrokken bij de ontwikkeling van de prototypes, waardoor een start gemaakt wordt met het ontwikkelen van een supply chain voor quantum sensing.

Dit KAT-programma bestaat uit twee onderdelen:

1) Het opzetten van een platform voor gezamenlijke innovatie op het gebied quantum sensing, waarin wetenschappers, systems engineers, bedrijven uit de hardware- en software-industrie en eindgebruikers samen werken aan de ontwikkeling van nieuwe toepassingen voor quantumsensoren. Door het organiseren van workshops, netwerkbijeenkomsten en innovatiebeurzen worden commerciële partijen in contact gebracht met wetenschappelijke groepen en instituten. Organisaties die gespecialiseerd zijn in het uitvoeren van toegepast onderzoek, zoals TNO, helpen met het samenbrengen en verbinden van deze partijen. Het platform geeft mede

richting aan het wetenschappelijk onderzoek dat nodig is en omgekeerd vormen de bevindingen uit lopende onderzoeken input voor het identificeren van nieuwe toepassingsgebieden en use cases. Het platform is een netwerk waarin partijen elkaar vinden en waarin nieuwe samenwerkingen ontstaan. Ook onderwijsinstellingen worden betrokken bij het platform, om de werknemers van de toekomst voor te bereiden op het gebruik van quantum(sensor)technologie.

2) Het opzetten van een test- en gebruikersfaciliteit voor quantumsensoren, met als doel om bedrijven en andere organisaties te helpen de technologie marktrijp te maken. Dit moet resulteren in een breed toegankelijke, nationale gebruikersfaciliteit. Deze kan gespreid zijn over de locaties van de verschillende partijen in het platform, waarin zij elk hun eigen faciliteiten ontsluiten. Het platform dient als het ware als een loket voor deze gedistribueerde faciliteit. Door het betrekken van wetenschappers, systems engineers en ontwikkelaars uit het bedrijfsleven ontstaat een levende gemeenschap, waarin samen met eindgebruikers de mogelijkheden van de test- en gebruikersfaciliteit steeds verder worden uitgebreid.

Korte termijn impact (0-4 jaar):

Het ontstaan van een nieuwe, multidisciplinaire gemeenschap rondom quantum sensing is een resultaat dat binnen een termijn van vier jaar bereikt moet zijn. Daarmee wordt de huidige versnippering van het veld opgeheven en kan Nederland ook op het gebied van quantum sensing een stevig profiel ontwikkelen, dat is gericht op het versnellen van de ontwikkeling en toepassing van quantumsensoren in diverse domeinen en op het oplossen van de (technologische) uitdagingen die daarbij optreden. Dit moet leiden tot nieuwe samenwerkingen en nieuwe ideeën, en tot het ontstaan van nieuwe producten en diensten. De eerste stappen met betrekking tot de vorming van een nationale test- en gebruikersfaciliteit voor quantumsensoren worden binnen deze termijn gezet.

Middellange termijn impact (5-8 jaar):

Op de middellange termijn worden nieuwe sensortechnologieën die in ontwikkeling zijn vertaald in markttoepassingen. Bestaande oplossingen worden verbeterd en er wordt gericht toegewerkt naar het industrialiseren van productieprocessen voor quantumsensoren. Nieuwe Nederlandse bedrijven ontstaan en komen tot wasdom. De nationale test- en gebruikersfaciliteit is ondertussen een volwaardig onderdeel van de Nederlandse quantumdelta, en is toegankelijk voor partijen uit binnen- en buitenland.

Lange termijn impact (8 jaar en verder):

Nederland heeft zich ook wat betreft quantumsensoren ontwikkeld tot een internationaal vooraanstaande partij. Nederlandse bedrijven zijn actief in de gehele keten, van ontwikkeling tot en met levering van sensoroplossingen aan eindgebruikers, en werken daarbij nauw samen met het wetenschapsveld.



'Om onze voorhoedepositie vast te houden en de kansen te benutten is een additionele impuls nodig.'

06

VOORWAARDEN VOOR HET UITVOEREN VAN DE AGENDA

6.1 Organisatie en governance

Een breed samengesteld kernteam uit de gouden driehoek heeft deze agenda in een eensgezinde samenwerking tot stand gebracht. Hierbij is expertise ingeroepen van een klankbordgroep waarin meer dan vijftig experts deelnamen. De agenda is een startpunt, het komt aan op het vervolgproces waarin deze wordt omgezet in een concreet actieprogramma. De vormgeving daarvan hangt samen met de keuzes die nog in Den Haag genomen moeten worden hoe het sleuteltechnologieën-beleid handen en voeten te geven. Het kernteam is als coalitie in ieder geval bereid en voornemens de regie van de uitvoering van de agenda voortvarend ter hand te nemen.

6.2 Financiering

Dat Nederland zo vooroploopt is naast de topwetenschap mede te danken aan politieke en bestuurlijke moed van voorgaande regeringen en partijen als FOM, NWO, TNO en de universiteiten in Delft, Amsterdam en Eindhoven. Hierdoor is er de afgelopen jaren al flink publiek en privaat geïnvesteerd bij QuTech, QuSoft, TU Eindhoven en het Zwaartekrachtprogramma. Door deze basis zijn we uitstekend gepositioneerd in Europese programma's zoals het Quantum Flagship, dat onder Nederlands EU-voorzitterschap is gelanceerd.

Maar, zoals verwoord door Robbert Dijkgraaf bij de presentatie van de excellente midterm review van QuTech: Nederland heeft iets unieks in de wereld in handen, dat is een voorrecht en tegelijk een verantwoordelijkheid. Om deze voorhoedepositie vast te houden en de kansen die quantumtechnologie biedt voor de wetenschap, economie en maatschappij te benutten, is een additionele impuls nodig voor de beschreven actielijnen.

De totale jaarlijkse omvang van het programma inclusief lopende programma's wordt geschat op 102 miljoen euro per jaar, waarvan 69 miljoen reeds is gedekt door bestaande programma's. De nieuwe actielijnen vragen om een investering van 34 miljoen per jaar. In vergelijking met de potentie en impact van de agenda, gaat het hier om een zeer bescheiden bedrag. De onderstaande tabel geeft een indicatief overzicht van de middelen verdeeld over de KAT's en actielijnen. Dit is gebaseerd op het Meerjaren Programma Sleuteltechnologieën dat door de QuantumNL coalitie is ingediend in het KIA/KIC-traject.

KAT / Actielijn	Totaal € mln/jaar
KAT-1: Quantum Computing and Simulation	7,0
KAT-2: Nationaal Quantum Netwerk	4,5
KAT-3: Quantum Sensing Applicaties	2,0
Actielijn 1: Doorbraken in onderzoek en innovatie	8,0
Actielijn 2: Ecosysteemontwikkeling, marktcreatie en infrastructuur	9,0
Actielijn 3: Human capital	2,5
Actielijn 4: Maatschappelijke dialoog	1,5
Totaal	34,5

Colofon

Lijst van de bij de ontwikkeling van deze agenda betrokken personen en organisaties, in alfabetische volgorde.

Kernteam

Carlo Beenakker (Lorentz Instituut), Freeke Heijman (voorzitter kernteam; QuTech, EZK), Hans Bos (Microsoft Nederland), Jesse Robbers (AMS-IX), Job Nijs (StartupDelta), Kareljan Schoutens (QuSoft), Rogier Verberk (TNO), Ronald Hanson (QuTech), Servaas Kokkelmans (QT/e).

Projectteam

Arina Schrier (NWO), Floor van de Pavert (QuSoft), Freeke Heijman (QuTech, EZK), Hugo Gelevert (TNO), Ingrid Romijn (QuTech), Victor Land (QT/e, QuSoft), Wieteke de Boer (NWO).

Klankbordgroep

Axel Berg (SURF), Bart van Wees (RUG), Berry Vetjens (TNO), Bert Kappen (Radboud Universiteit), Charlotte Rutgers (Ministerie van Defensie), Cor van der Struijff (IBM), Daniël Frijters (ECP | Platform voor de InformatieSamenleving), Dimitri van Esch (ABN AMRO), Dirk Smit (Shell), Eamonn Murphy (ESA/ESTEC), Erik Bakkers (TU/e, QTe), Florian Schreck (UvA, QuSoft), Franco Ongaro (ESA/ESTEC), Frank de Jong (FEI, topsector HSTM), Frederik Kerling (ATOS), Gerrit-Jan Zwenne (Universiteit Leiden), Hans van den Vlekkert (QuiX), Harry Buhrman (UvA, QuSoft, CWI), Inald Lagendijk (TU Delft), Ingmar Swart (Universiteit Utrecht), Jan de Boer (NWO), Jaya Baloo (KPN), Jeremy Butcher (Fox-IT), Jérémy Veltin (TNO), Joris van Hoboken (IvIR), Jos Littel (Gemeente Delft), Julia Cramer (Universiteit Leiden), Karin Poels (Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties), Kees Eijkel (QuTech), Kemo Agovic (TNO), Lieven Vandersypen (TU Delft, QuTech), Lucas Visscher (VU), Marcin Dukalski (Aramco Overseas Company BV), Melchior Aelmans (Juniper Networks), Mikhail Katsnelson (Radboud Universiteit), Nico van Eijk (UvA, IvIR), Niels Bultink (Qblox), Paola Gori-Giorgi (VU), Pepijn Pinkse (UT), Peter Schwabe (Radboud Universiteit), Pieter Vermaas (TU Delft), Rembert Duine (Universiteit Utrecht), Ronald Cramer (Universiteit Leiden, CWI), Sal Bosman (Delft Circuits), Shairesh Algoe (ABN AMRO), Simon Gröblacher (TU Delft), Srijit Goswami (TU Delft, QuTech), Stacey Jeffery (UvA, QuSoft), Stephanie Wehner (QuTech), Tamalika Banerjee (RUG), Tanja Lange (TUE/QTe), Thomas Grosfeld (VNO-NCW MKB Nederland), Wolfgang Löffler (Universiteit Leiden).

Vormgeving: Raijmakers Ontwerp, Inge Raijmakers

Vertaling: Taalcentrum-VU

Druk: Xerox Communicatie Service Dienstverlening voor de Rijksoverheid

Fotografie: met dank aan onder andere QuTech, QT/e, QuSoft, Qblox, QuiX, Delft Circuits, Marieke de Lorijn, Andrea Kane, Florian Schreck, Pim Top en Pepijn Pinkse.

