

# Quantumtechnologie in de samenleving



## Rathenau Scan

### Introductie

Quantumtechnologie roept het beeld op van een digitale revolutie die een nieuw tijdperk in de digitale samenleving inluidt. Quantumcomputers zouden veel sneller rekenen dan klassieke computers met haast onbegrensde mogelijkheden. Een quantuminternet zou veel veiliger en functioneler zijn dan het huidige internet. Nederland heeft de ambitie uitgesproken om een *Silicon Valley* voor quantumtechnologie te worden.

Gaat quantumtechnologie inderdaad zo'n *gamechanger* zijn? In deze Rathenau Scan beantwoorden we die vraag in een aantal stappen. Eerst kijken we naar de technologische ontwikkeling (*Wat is het?*), dan brengen we de mogelijke toepassingen in kaart (*Wat kan het?*), vervolgens beschrijven we het innovatielandschap (*Wie doet het?*) en besteden we aandacht aan de maatschappelijke vragen die quantumtechnologie oproept (*Waar moeten we op letten?*). Ten slotte beantwoorden we de hoofdvraag en blikken we vooruit (*Hoe verder?*).

### Inhoud

1. Wat is het?  
Quantumtechnologie 2.0 2
2. Wat kan het? Kansrijke toepassingen 7
3. Wie doet het? Het Nederlandse innovatiesysteem 12
4. Waar moeten we op letten? Publieke waarden 15
5. Hoe verder? 23
6. Geraadpleegde bronnen 25

# Quantumtechnologie in de samenleving



## Specifieke toepassingen

## Maatschappelijke zorgen

### Computing

Grotere rekenkracht



Oplossen van complexe wiskundige problemen

$$\pm \sqrt{x} \%$$

Patroonherkenning



Optimalisatie



### Communicatie



Veiligheid & meer functionaliteit



Quantum internet

© Rathenau Instituut

### Simulatie

Modelleren van natuurlijke processen:



Biochemische processen

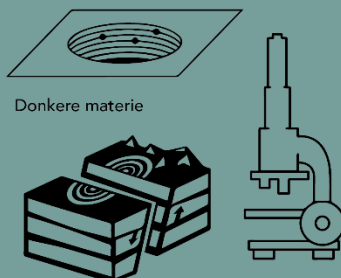
Gezondheidszorg



Simulaties

### Sensing

Precisiemeting, hogere resolutie:



Donkere materie

Seismologie

Microscopie

### Cyberveiligheid



- Online versleuteling kan worden gekraakt
- Quantum Key Distribution: internet mogelijk waterdicht

### Militaire veiligheid



- Ontwikkeling biologische wapens
- Verhoogde precisie wapens
- Uitbreiding van observatiemiddelen

### Strategische autonomie



- Machtconcentratie intellectueel eigendom
- Vermarktning fundamentele kennis
- Gelijk speelveld nodig

### Vertrouwen in experts



- Expertise gap: afhankelijkheid zeer kleine groep experts
- Talent gap: tekort gekwalificeerde professionals

### Privacybescherming



- Decryptie: persoonsgegevens openbaar
- Surveillance door overheden en bedrijven

### Rechtvaardigheid



- Intensivering van zorgen om profilering met AI
- Toename oneerlijke verdeling van macht en welvaart ('quantum divide')

### Kennisveiligheid



- Internationale kennisdeling is nodig, maar kan veiligheid, privacy en economische kansen schaden

### Duurzaamheid



- Het is nog onzeker of quantumtechnologie het energieverbruik terugdringt of juist verhoogt

## 1. Wat is het? Quantumtechnologie 2.0

### 1.1. Quantumtechnologie is niet nieuw

Begin 20<sup>e</sup> eeuw kwam de moderne natuurkunde tot stand. Naast een nieuw begrip van de zwaartekracht via de relativiteitstheorie, stoelt de moderne natuurkunde op de studie van het kleine: materie en energie op de schaal van moleculen, atomen en subatomaire deeltjes (zoals elektronen, protonen, fotonen en quarks). De kleinste, ondeelbare, eenheden van materie of energie worden aangeduid met de term 'quantum'; vandaar dat dit vakgebied de quantummechanica is gaan heten.

Met kennis uit de quantummechanica is ook quantumtechnologie op gang gekomen. Die wordt bijvoorbeeld gebruikt in halfgeleiders (bouwsteen van vrijwel alle elektronische apparaten), lasers, MRI-scanners en voor het opladen van batterijen. Computers, smartphones en het internet zouden niet bestaan zonder quantumtechnologie. We moeten bij die technologie denken aan magneetveldresonantie (MRI-scanners), gestimuleerde fotonemissie (lasers) en dotering: het opzettelijk 'vervuilen' van basismateriaal door er vreemde atomen aan toe te voegen, waardoor het materiaal instabiel wordt en elektrische lading zich gaat verplaatsen (halfgeleiders).

Deze quantumtechnologie maakt echter nog geen gebruik van een aantal specifieke eigenschappen van quantumdeeltjes, zoals superpositie, interferentie en verstrengeling. De technologie waar het hier om gaat – soms aangeduid als quantumtechnologie 2.0 – doet dat wel.

### 1.2. 'Vreemde' quantumeigenschappen

De quantummechanica geeft een beschrijving van de werkelijkheid in termen van waarschijnlijkheden die niet aansluit bij de alledaagse ervaring van de dingen om ons heen. Op quantumniveau spelen zich fysische processen af, die wiskundig wel goed te vatten zijn, maar intuïtief moeilijk te begrijpen blijven.<sup>1</sup> Om de toepassingen van quantumtechnologie en de maatschappelijke vragen die deze technologie oproept te begrijpen, is wel een basaal begrip van drie quantumeigenschappen nodig.

#### Superpositie

Klassieke computers gebruiken bits om informatie op te slaan en berekeningen uit te voeren. Een bit heeft altijd de waarde 1 of 0. Met dit binaire stelsel (bit is een samentrekking van *binary* en *digit*) is in principe alle informatie vast te leggen én te bewerken. Quantumtechnologie 2.0 werkt niet met bits, maar met qubits. Qubits maken gebruik van het fenomeen superpositie uit de quantummechanica, dat bepaalt dat deeltjes zich in meerdere toestanden tegelijk bevinden, totdat er een meting plaatsvindt. De toestand van een qubit kan derhalve zowel 1 als 0 zijn. Pas door meting krijgt de qubit de waarde 1 of 0. Qubits zijn dus als opgegooide munten die, tot ze een kant opvallen, zowel kop als munt kunnen zijn. Hoe de metingen precies fysiek worden

---

<sup>1</sup> In de filosofie van de natuurkunde gaat dan ook veel aandacht uit naar de quantummechanica, zie bijvoorbeeld <https://plato.stanford.edu/entries/qt-issues/>.

uitgevoerd hangt af van het soort qubit. Diverse soorten zijn nog in ontwikkeling, voor een overzicht zie tabel 1.

### Interferentie

De kans dat een qubit zich bij meting in positie 1 of 0 bevindt, levert een kansverdeling op die wordt uitgedrukt in een golfpatroon. Door golfpatronen van meerdere qubits op elkaar in te laten werken (te interfereren), versterken ze elkaar of doven ze elkaar uit. Zo wordt de toestand van de qubits in kwestie bepaald. Het gedrag van qubits wordt dus via wiskundige modellen van golf functies voorspeld en berekend.

### Verstrengeling

Als deeltjes direct contact met elkaar hebben gemaakt, kunnen ze op afstand informatie blijven delen. Het maakt daarbij niet uit hoe groot deze afstand is. Dit fenomeen wordt verstrengeling (in het Engels *entanglement*) genoemd en is experimenteel aangetoond. Als twee deeltjes verstrengeld zijn, en de spin (de richting van het impulsmoment van een deeltje) van het éne deeltje is opwaarts, dan weten we bijvoorbeeld direct dat het andere deeltje een neerwaartse spin moet hebben.

Een qubit kan met één of meer andere qubits verstrengeld zijn. Meting van één qubit kan daardoor automatisch informatie verschaffen over de met deze qubits gecorreleerde andere qubits. Let wel dat uit verstrengeling *alleen* complementaire informatie is af te leiden (dus één spin omhoog, dan ook één omlaag). Het is dus niet zo dat willekeurig welke informatie via verstrengeling gedeeld kan worden en het bijvoorbeeld mogelijk is om sneller dan de lichtsnelheid informatie uit te wisselen.

## 1.3. De quantumcomputer

Deze drie quantumeigenschappen worden gebruikt in de drie toepassingsgebieden van quantumtechnologie: computing (waaronder simulatie), communicatie en sensing. Een overzicht van toepassingen volgt in deel 2, we gaan hier iets dieper in op de quantumcomputer.

### Quantumalgoritme

Door de superpositie van qubits neemt de hoeveelheid informatie dat een systeem kan vertegenwoordigen exponentieel toe. Met twee qubits zijn er immers 4 toestanden mogelijk, met drie worden dat er 8, en zo verder. Met qubits kunnen berekeningen bovendien parallel aan elkaar worden uitgevoerd. De TU Delft gebruikt het beeld van een mierenkolonie als metafoor voor een quantumalgoritme. Vergelijk mieren die *gezamenlijk* en *tegelijktijd* een uitweg zoeken uit een doolhof (bijvoorbeeld het antwoord op een som) met één lieveheersbeestje dat alle mogelijke paden moet nalopen.<sup>2</sup> Er ontstaat tijdswinst als de mieren die op verkeerde paden zoeken snel uitdoven. Die uitdoving gebeurt door interferentie, dat de meest waarschijnlijke oplossing naar boven brengt.

De kansrekening met interferentie wordt door quantumalgoritmen gemaakt, die zijn toegesneden op het oplossen van specifieke rekenproblemen. Quantumalgoritmen

maken ook gebruik van slimme manieren van verstrengeling. Het resultaat is dat quantumalgoritmen sneller bij correcte oplossingen komen dan voor het nalopen van alle mogelijke combinaties (zoals het lieveheersbeestje doet) nodig zou zijn.<sup>3</sup>

## Software

Quantum computing betreft een fundamenteel andere manier van rekenen. Toch bestaan quantumalgoritmes net als klassieke algoritmes uit een reeks instructies waarmee de computer een probleem oplost. Er moet een fysiek circuit van logische operatoren (*gates*) in beweging gezet worden die het netwerk van qubits manipuleren. Zo zijn er bijvoorbeeld gates die qubits van 0 naar 1 kunnen flippen maar ook die juist een superpositie-toestand creëren.

Ook bestaat quantumsoftware net als klassieke software uit diverse lagen. Naar al deze lagen vindt momenteel onderzoek plaats. Vanaf de machinetaal zijn vertalingen nodig naar hogere orde programmeerinstructies en uiteindelijk naar speciale programmeertalen en applicaties. De lagen in de hogere orde zijn hardware-agnostisch, wat betekent dat ze op elk type qubit kunnen draaien.<sup>4</sup> De lagere orde machinetaal verschilt wel per type hardware.

## Technische uitdagingen

Het fysiek realiseren van de hardware van (netwerken van) qubits is ook een actief onderzoeksgebied. Het is namelijk moeilijk om een quantumcomputer te bouwen.

Ten eerste zijn qubits zeer gevoelig voor verstoring van buiten. De kleinste microscopische vibratie of temperatuurwisseling kan het qubitnetwerk al uit balans brengen (zogenoemde decoherentie).

Ten tweede is het lastig om qubits in een vaste toestand te houden. Als rekenoperaties niet snel genoeg worden uitgevoerd, verliest het systeem dus informatie.

Ten derde doen qubits niet altijd wat ze opgedragen wordt, doordat ze een verkeerde rotatie maken (*phase flips*) of verstoord raken door het uitlezen van informatie. Ook een omslag naar een verkeerde definitieve toestand komt voor. Klassieke computers vertonen zulke *bit flips* soms ook, maar qubits zijn er veel gevoeliger voor.

Ten vierde is het moeilijk om veel qubits een netwerk te laten vormen dat logische operaties foutloos kan uitvoeren. Deze schaalbaarheid hangt af van beschikbare materialen en van de mate van foutgevoeligheid van het soort qubit.

Er worden momenteel diverse paden bewandeld voor de ontwikkeling van qubits, om deze uitdagingen het hoofd te bieden (zie tabel 1 voor het bestaande qubit assortiment). Het is nu nog onzeker welke qubits het uiteindelijk gaat worden, of er

---

3 Dit stuk geeft slechts een globaal overzicht van superpositie, verstrengeling en interferentie. Voor dieper begrip van quantum computing is kennis nodig van onder meer lineaire algebra, een vakgebied dat zich bezighoudt met vectorruimtes en transformaties, zoals het ontbinden van een wiskundige functie in een continu spectrum van frequenties.

4 Qiskit (qiskit.org) is bijvoorbeeld een open source Python omgeving waarin opdrachten voor quantumberekeningen gencodeerd kunnen worden die vervolgens door meerdere hardware providers kunnen worden uitgevoerd. Toch worden er ook speciale hogere orde programmeertalen voor specifieke soorten hardware ontwikkeld zoals Q# van Microsoft.

misschien meerdere soorten quantumcomputers naast elkaar gaan bestaan, of zelfs door elkaar gebruikt gaan worden.

### **Foutcorrectie**

Vanwege de foutgevoeligheid van qubits is foutcorrectie nodig. In sommige gevallen kan het aantal fouten worden opgespoord met behulp van klassieke algoritmen. Maar daar zit een limiet aan. Een belangrijkere manier is het herhalen van de berekening met andere qubits. Omdat quantuminformatie niet direct kopieerbaar is, kan dit alleen door informatie te spreiden, en daar hebben onderzoekers methoden voor ontwikkeld. Bij supergeleidende qubits zijn er naar schatting een factor 1000 meer fysieke qubits nodig om 1 logische qubit foutloos te laten werken.<sup>5</sup> Quantumcomputers halen voor sommige type rekenproblemen, bijvoorbeeld voor het ontsleutelen van encryptie (zie verder deel 2), pas voordeel ten opzichte van klassieke computers (*quantum advantage*) bij een paar duizend logische qubits. Bij de supergeleidende variant zijn er dan dus miljoenen fysieke qubits nodig om die computers foutloos te laten werken. Daar zijn we nog lang niet. Op dit moment lijkt IBM het verst met de eind 2022 gelanceerde quantumcomputer Osprey die bestaat uit 433 *fysieke* qubits.

### **Snelheid, schaalbaarheid en kwaliteit**

Het overzicht in tabel 1 laat zien dat de diverse ontwikkelpaden elk hun plus- en minpunten hebben.<sup>6</sup> Sterke isolatie van qubits vermijdt verstoring door de omgeving, maar het is veel moeilijker snelheidsvoordeel te halen en goed op te schalen. Grote technologiebedrijven zetten in op het type qubit dat zij het meest kansrijk achten. Zo werken Google en IBM aan supergeleidende quantumcomputers en Microsoft aan de topologische variant. Het zal naar de meest voorkomende schattingen 15 tot 25 jaar duren voordat er quantumcomputers zijn die schaalbaar zijn en snel, nauwkeurig én foutvrij werken. Ofschoon er nog veel hordes te nemen zijn op zowel hardware- als softwaregebied, kunnen we al een redelijke inschatting maken van de toepassingen die quantumtechnologie belooft én stilaan ook al laat zien.

---

5 Helemaal foutloos gaat waarschijnlijk nooit lukken. Fouten en ruis kunnen naar verwachting wel zodanig worden beperkt dat het voor de berekeningen niet meer uitmaakt.

6 Dit zijn de belangrijkste ontwikkelpaden, op kleinere schaal wordt er daarnaast nog een aantal uitgeprobeerd.

Tabel 1 Het qubit-assortiment

Type qubit	Techniek/materiaal	Pluspunten	Minpunten
Supergeleidend	Elektronen gevangen op supergeleide chips;  Meting door snelheid van elektronen te bepalen.	Qubits makkelijk te controleren;  Hoge circuitsnelheid;  Zelfde materiaal als klassieke chips > productie makkelijk/goedkoop.	Extreme koeling nodig (-273°C), cyrostaten zijn groot en duur;  Korte coherentietijd;  Veel fysieke qubits nodig voor foutcontrole;  Moeilijk schaalbaar.
Fotonisch	Lichtbronnen zenden fotonen door netwerk in processor;  Rekenoperaties door wisselwerking tussen fotonen;  Meting door lichtdetectors.	Qubits op kamertemperatuur;  Extreem lange coherentietijd;  Extreem snel;  Fotonen zijn makkelijk te genereren;  Geschikt voor communicatie.	Voor bronnen en detectoren van fotonen wel extreme koeling nodig;  Qubits moeilijk te manipuleren en te controleren;  Moeilijk schaalbaar;  Lage nauwkeurigheid.
Gevangen ionen	Geladen atomen en elektronen die om hun kern draaien, gevangen in vacuümkamers met behulp van magnetische velden;  Emissie en manipulatie via lasers of microgolffbronnen;  Meting via fluorescentiedetectors.	Nauwkeurige controle;  Lange coherentietijd;  Verstrengeling makkelijk;  Kleine kans op productiefouten.	Extreme koeling nodig;  Veel lasers nodig;  Qubits moeten individueel gecontroleerd worden in vacuümkamer;  Moeilijk schaalbaar;  Lage snelheid.
Topologisch	Anionen (negatief geladen ionen) draaien als vlecht en en beïnvloeden zo elkaar.	Lange coherentietijd;  Weinig fysieke qubits nodig voor foutcontrole.	Bestaan van benodigde anion (bijvoorbeeld het 'Majorana-deeltje') nog niet experimenteel bewezen.
Quantum dots	Elektronen worden met elektromagnetische velden gevangen op siliconen (halfgeleiderdeeltjes op nanometerformaat);  Spin drukt toestand van de qubit uit.	Zelfde materiaal als klassieke halfgeleiders > productie makkelijk/goedkoop;  Schaalbaarheid;  Hoge circuitfideliteit (accuraat).	Qubits moeilijk te initialiseren;  Qubits moeilijk te manipuleren;  Extra gevoelig voor ruis van de elektromagnetische lading.

Bron: Rathenau Instituut

## 2. Wat kan het? Kansrijke toepassingen

### 2.1. Quantumvoordeel bij specifieke toepassingen

Quantumtechnologie bevindt zich voor een groot deel nog in de ontwikkelfase; veel beoogde toepassingen hebben hun weg nog niet naar de samenleving gevonden. Alhoewel we dus nog voor dit omslagpunt staan, is er al veel te zeggen over de beloften van quantumtechnologie 2.0. Die beloften zitten in *specifieke* toepassingen. Het is namelijk onwaarschijnlijk dat quantum computing het nieuwe paradigma van digitaal rekenen gaat worden. Klassieke computers blijven nodig naast quantumcomputers. Excel en Word gaan niet sneller of beter draaien op een quantumcomputer en voor de verwerking van data én het aansturen en controleren van quantumberekeningen zijn klassieke computers nodig. Klassieke computers zijn ook al heel snel; ze kunnen miljarden operaties per seconde uitvoeren. Het quantumvoordeel moet daarom komen van specifieke toepassingen. De uitdaging daarbij is effectieve combinaties van klassieke rekenkracht en quantumrekenkracht te realiseren.

### 2.2. Vier toepassingsgebieden

De specifieke toepassingen zitten hem in gebruik van quantumrekenkracht, optimalisatie, simulatie van natuurlijke processen, precisiemeting en communicatie op afstand. We bespreken de toepassingen langs de veelgebruikte indeling van vier toepassingsgebieden: computing, simulatie, communicatie en sensing. Simulatie is eigenlijk onderdeel van computing. Ook communicatie en sensing kunnen overlap hebben met computing, maar deze gebieden kennen hun eigen ontwikkelpaden.

#### Computing

Er is een klasse van complexe rekenproblemen die gekenmerkt wordt door een exponentiële toename van het aantal mogelijkheden. Dat zijn bijvoorbeeld zoekproblemen zoals het handelsreizigersprobleem: gegeven een  $x$  aantal steden, vind de kortste weg waarbij je één keer langs iedere stad komt en weer eindigt bij de eerste stad. Bij een hoog getal voor  $x$  wordt het ondoenlijk om alle mogelijkheden langs te lopen. Er is dus een slim algoritme nodig dat je bij het kortste pad brengt. Maar ook met zo'n algoritme duren berekeningen met klassieke computers extreem lang, als ze al tot een oplossing komen.<sup>7</sup>

Een voorbeeld van een dergelijk zoekprobleem voor het digitale domein is het ontbinden in factoren van een getal. Vaststellen van welke twee priemgetallen een getal een product is, is bij grote getallen praktisch onuitvoerbaar, omdat het aantal mogelijkheden dan exponentieel groot wordt. Veel van wat er op internet gebeurt (websites, e-mails, bankverkeer) is beveiligd via sleutels die alleen gekraakt kunnen worden door grote getallen te ontbinden in priemgetallen. Gewone computers kunnen dat niet oplossen, maar quantumcomputers zullen dit rekenprobleem naar verwachting wel aankunnen. Daarom is de versleuteling van nu waarschijnlijk straks niet veilig genoeg meer. Sinds 1994 is er al een algoritme beschikbaar (*Shor's algorithm*)

---

<sup>7</sup> Een netwerk van 100 processoren heeft 22,6 jaar (!) gerekend aan een oplossing voor een versie van het probleem met circa 15.000 steden: <https://www.math.uwaterloo.ca/tsp/d15sol/index.html>.



waardoor er ook quantumsoftware voor dit rekenprobleem voorhanden is. Wanneer quantumcomputers sterk genoeg worden, betekent dit dus een grote bedreiging voor de cyberveiligheid.

Van quantumrekenkracht worden vele vormen van optimalisatie verwacht. Zo kan quantumtechnologie binnen de logistiek ingezet worden voor de optimalisatie van routes, waarmee *supply chain management* verbeterd kan worden. In de financiële sector wordt vooral gekeken naar het verbeteren van risico-analyses, bijvoorbeeld door het gebruik van zogenaamde Monte Carlo simulaties: het vele malen nabootsen van een proces waarbij met de startcondities wordt gevarieerd. Bij kunstmatige intelligentie gaat het om verbetering van patroonherkenning, van bijvoorbeeld spraak of beeld. Er wordt al gewerkt aan verbeterde objectherkenning voor zelfrijdende auto's en aan klimaatmodellen voor de weervoorspelling.<sup>8</sup> Verder is er het zogeheten *Grover's search algorithm*, waarmee snel gezocht kan worden in grote, ongestructureerde datasets.

### Simulatie

Ook voor de simulatie van natuurlijke processen wordt veel van quantumtechnologie verwacht.<sup>9</sup> Biochemische processen zijn moeilijk te vatten op quantumniveau vanwege de interacties van grote hoeveelheden deeltjes. De nieuwe quantumtechnologie maakt het volgens verwachting mogelijk om processen met een hogere nauwkeurigheid te simuleren.<sup>10</sup> Praktische toepassingen van quantumsimulatie worden dan ook in de geneeskunde voorzien.<sup>11</sup> Als moleculaire interacties binnen cellen gesimuleerd kunnen worden, kan dat zowel leiden tot een beter begrip van ziekten als tot betere bestrijding ervan. Daarnaast wordt binnen de computationele biologie, materiaalwetenschappen en de scheikunde aan simulatietoepassingen gedacht, bijvoorbeeld met betrekking tot chemische reacties of specifieke eigenschappen van stoffen. Deze kennis kan weer gebruikt worden voor optimalisatie van bijvoorbeeld energiewinning uit natuurlijke hulpbronnen, of om de levensduur van batterijen te verlengen.<sup>12</sup>

### Communicatie

Quantumeigenschappen worden ook benut voor communicatie. Een netwerk van qubits, of op grotere schaal van quantumcomputers, kan door verstrengeling de basis vormen van een in de toekomst te realiseren quantuminternet.<sup>13</sup> Bij het bestaande internet communiceren computers met elkaar via lichtsignalen die als een soort morsecode series van 0-en en 1-en doorsturen. Bij het quantuminternet wordt informatie via qubits verstuurd. Quantuminternet werkt met een keten van tussenstations waarbij verstrengelde fotonen naar buurstations worden gestuurd. Satellieten kunnen een

---

8 Autovista24 (2022), 1Qubit (z.d.).

9 We hebben al laten zien dat niet-natuurlijke processen ook worden nagebootst maar doorgaans wordt daar in de quantumtechnologie niet de term simulatie voor gebruikt.

10 Precies dit idee om natuurlijke quantumsystemen met quantummiddelen te simuleren deed de eminente natuurkundige Richard Feynman aan een quantumcomputer denken: Feynman (1982).

11 Een handig overzicht geeft Schuurmans (2022).

12 Een nuttig overzicht van de stand van het onderzoek op dit terrein anno 2022 is hier te vinden: Paudel et al. (2022).

13 Voor de weg daarnaartoe zie dit stappenplan: TU Delft (z.d.b) en ook Bouwmeester (z.d.).

belangrijke rol gaan spelen in zulke quantumnetwerken, omdat qubits in de ruimte veel minder last hebben van verstoring dan op aarde én de quantumnetwerken op aarde via satellieten over grote afstanden met elkaar verbonden kunnen worden.<sup>14</sup>

Voor beveiliging van dataverkeer is de eigenschap van qubits dat ze zich niet (perfect) laten kopiëren (*no cloning property*) belangrijk. Daardoor kan quantuminformatie niet onderschept worden zonder dat de integriteit ervan verloren gaat. Reeds in 1984 is een protocol ontwikkeld voor zogeheten *Quantum Key Distribution* (QKD). Daarbij worden encryptiesleutels verzonden via een afzonderlijk informatiekanaal gebaseerd op de quantumkenmerken van licht. Iedere inmenging van een derde partij wordt dan direct opgemerkt. QKD kent al een aantal succesvolle implementaties. Een nieuw type quantumnetwerk wordt sinds eind 2022 getest voor de beveiliging van communicatie in de haven van Rotterdam.<sup>15</sup>

### Sensing

Een laatste toepassingsgebied waarop nieuwe quantumtechnologie doorbraken belooft, is sensing. Quantumtechnologie wordt al langer gebruikt voor sensing, bijvoorbeeld in MRI-scans en in lasers. Door quantumeigenschappen van deeltjes te meten kan naar verwachting een hogere resolutie bereikt worden dan met bestaande sensorsystemen. Quantumsensoren vervangen bestaande meetsystemen niet, maar worden daar onderdeel van. Quantum sensing vertoont overlap met andere vormen van quantumtechnologie, zoals simulatie,<sup>16</sup> en is sterk verwant aan vakgebieden als fotonica en optica.

Van quantum sensing worden veel toepassingen verwacht, bijvoorbeeld in de microscopie en de seismologie. Onder de toepassingen valt het nog nauwkeuriger krijgen van tijdmeting. Sinds de jaren '50 zijn atoomklokken daarvoor de standaard. Deze klokken gebruiken trillingen van atomen als basis voor tijdmeting. Die trillingen zijn extreem constant, zeer lichte afwijkingen zouden tot slechts 1 seconde tijdsverschil in 5 miljard jaar leiden. Het synchroon krijgen van twee atoomklokken is echter een stuk moeilijker. In 2022 is dat natuurkundigen voor het eerst met quantumverstremeling gelukt. Synchronisatie maakt atoomklokken nog preciezer, wat belangrijk is voor gps-metingen. Het is ook nuttig voor het verrichten van extreem precieze metingen naar zwaartekracht en in het onderzoek naar donkere materie. Een andere belangrijke toepassing die kan ontstaan, is navigatie door heel precieze meting van het magneetveld van de aarde, waar géén gps voor nodig is. Die navigatie kan bijvoorbeeld onder water worden gebruikt, waar geen gps-signalen mogelijk zijn.

---

14 Aliro Quantum (2021).

15 TU Delft (2022).

16 Liu (2021).

### 2.3. Doorbraken op korte en lange termijn

De toekomst van quantumtechnologie is nog met veel onzekerheden omgeven.<sup>17</sup> Toch tekenen zich wel verschillen in tempo af. Zo zijn quantumsensoren in een gevorderd stadium van ontwikkeling en kent sensing al veel praktische toepassingen. Ook bij quantumencryptie zien we de eerste praktische toepassingen doorbreken. Een volledig quantuminternet zal er echter niet binnen afzienbare tijd zijn.

Verder lijken bepaalde toepassingen met betrekking tot simulatie en optimalisatie op korte termijn kansrijk. Opvallend is wel dat de verwachtingen op het gebied van machine learning sterk uiteen lopen. Sommigen verwachten hier de meest spectaculaire doorbraken, terwijl anderen dit enthousiasme juist temperen, omdat er nu nog nauwelijks quantumsoftware is die zowel nuttig werk doet *als* duidelijk sneller resultaten oplevert dan 'gewone' software. Zo'n *killer application* is volgens hun ook niet binnen afzienbare termijn in zicht.<sup>18</sup>

Schattingen over wanneer we een quantumcomputer hebben met een groot genoeg aantal logische qubits, om bijvoorbeeld *Shor's algorithm* uit te voeren, lopen sterk uiteen. Een veel voorkomende indicatie is tussen de 15 en 25 jaar. Op de weg daarnaartoe zullen er sterkere quantumcomputers komen die echter nog veel ruis zullen hebben, de zogeheten *Noisy Intermediate Quantum-Scale era* (NISQ). Het is nog lastig te voorspellen hoe die computers met ruis nuttig toepasbaar zullen zijn.

Dat neemt niet weg dat er al kleine werkende quantumcomputers zijn. IBM heeft er bijvoorbeeld een stuk of 20 draaien die via een cloud toegankelijk zijn en waar diverse *use cases* (een business case op experimentele en kleine schaal) op worden uitgetoet. IBM heeft inmiddels meer dan 460.000 geregistreerde gebruikers die samen sinds 2016 meer dan 2 triljoen quantumcircuits hebben uitgevoerd. Quantumvoordeel bieden deze berekeningen nog niet. Ze worden ook voor wetenschappelijk onderzoek gebruikt dat sinds 2016 rond de 1750 wetenschappelijke publicaties heeft opgeleverd.<sup>19</sup>

Doorbraken met betrekking tot de tijdswinst van quantum computing gaan waarschijnlijk het langst op zich laten wachten. We moeten er echter op bedacht zijn dat op lange termijn de impact hiervan wel het grootst kan zijn gezien de vele optimalisatie en simulatietoepassingen die in het verschiet liggen.

---

17 Voorspellingen over doorbraken in de komende 5 jaar of tussen 5 en 10 jaar zijn daarom buitengewoon onzeker en laten we hier achterwege.

18 Quantum.Amsterdam (z.d.).

19 Gegevens beschikbaar gesteld door IBM.

Tabel 2 Toepassingen van quantumtechnologie

Toepassingsgebied	Beloftes	Voorbeelden
Computing	<ul style="list-style-type: none"> <li>• grotere rekenkracht</li> <li>• oplossen van complexe wiskundige problemen</li> <li>• optimalisatie</li> <li>• patroonherkenning</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• factoriseren van grote getallen, kraken van encryptie</li> <li>• patroonherkenning in datasets</li> <li>• objectherkenning zelfrijdende auto's</li> <li>• routeoptimalisatie voor supply chain management</li> <li>• risico-analyse in de financiële sector</li> <li>• klimaatmodellen</li> </ul>
Simulatie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• modelleren van natuurlijke processen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• simuleren van interacties in cellen voor bestrijding van ziektes</li> <li>• modellering van biochemische processen, onder meer voor energiewinning</li> <li>• (duurzame) materiaalontwikkeling</li> </ul>
Communicatie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• veiligheid</li> <li>• meer functionaliteit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• quantuminternet (netwerk van quantumcomputers)</li> <li>• Quantum Key Distribution (quantum cryptografie)</li> </ul>
Sensing	<ul style="list-style-type: none"> <li>• precisiemeting, hogere resolutie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• microscopie</li> <li>• seismologie</li> <li>• zwaartekrachtmeting</li> <li>• tijdmeting (atoomklokken)</li> <li>• navigatie met én zonder gps</li> <li>• onderzoek naar donkere materie</li> </ul>

Bron: Rathenau Instituut

## 3. Wie doet het? Het Nederlandse innovatie-systeem

### 3.1. Financiering door de Nederlandse overheid

#### Nationale agenda Quantumtechnologie

De ontwikkeling van quantumtechnologie vindt plaats in een internationaal speelveld. Nederland speelt daarin een belangrijke rol vanwege zijn sterke kennispositie op quantumgebied. Daar is een ambitieus investeringsprogramma aan gekoppeld. Sinds 2019 is de Nationale Agenda Quantumtechnologie richtinggevend voor dit programma.<sup>20</sup> De Nationale Agenda past in het Meerjaren Programma Sleuteltechnologieën en is op verzoek van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat opgesteld in samenwerking met een aantal kennisinstellingen en bedrijven. Sinds 2020 is voor de uitvoering van de agenda 23,5 miljoen euro voor 5 jaar beschikbaar gesteld. Dit geld is gegaan naar de bestaande kennisinstututen op het gebied van quantumtechnologie, zoals QuTech, een samenwerking van de TU Delft en TNO, en QuSoft van de Universiteit van Amsterdam en het CWI.

#### Het Nationaal Groeifonds

De tot nu toe beschikbaar gestelde financiering valt in het niet bij de 615 miljoen euro die medio 2021 uit het Nationaal Groeifonds zijn toegekend aan het Quantum Delta NL programma. Van dit bedrag is 282 miljoen inmiddels definitief toegekend en 333 miljoen gereserveerd 'voor een derde fase' binnen de totale termijn van 7 jaar. De investering vanuit het Groeifonds is vooral bedoeld om te zorgen dat Nederland in quantumtechnologie een toonaangevend ecosysteem opbouwt, waardoor technologie wordt ontwikkeld, bedrijvigheid ontstaat en talent en ondernemers worden aangetrokken. Dat past in de in 2019 uitgesproken ambitie om een Silicon Valley voor quantumtechnologie te creëren. Het is de bedoeling dat na de 7-jarige impuls een ecosysteem is ontstaan met voldoende economisch en maatschappelijk verdienvermogen om zonder additionele overheidssteun door te groeien.

### 3.2. Een nationaal quantum-ecosysteem

#### Waarom een innovatie-ecosysteem?

De term ecosysteem wordt gebruikt om een netwerk van partijen aan te duiden die in een organisatiestructuur samenwerken om een bepaald doel te bereiken. Bij quantumtechnologie is gekozen voor een ecosysteembenadering als innovatiestrategie, omdat er veel partijen nodig zijn om de technologie zowel werkend als dienstbaar te maken. Zowel de hardware als de software bestaan uit verschillende onderdelen en meerdere partijen zijn betrokken bij de ontwikkeling van die onderdelen. Verder moet voor het realiseren van effectieve toepassingen in veel gevallen een combinatie gezocht worden tussen quantumtechnologie en (aanverwante) technologieën uit andere sectoren.

---

<sup>20</sup> Quantum Delta Nederland (2019).

Er zijn dus veel actoren bij de ontwikkeling van quantumtechnologie betrokken. De ecosysteembenadering moet zorgen voor een goede afstemming tussen de verschillende soorten kennis, expertise én behoeften van samenwerkende partijen. Naast de universiteiten met hun gespecialiseerde instituten spelen zowel grote bedrijven als kleinere leveranciers en startups daarbij een rol. Daarnaast is er voorzien in talentontwikkeling en heeft ook de ELSA-aanpak een plaats gekregen via de actielijn Quantum & Society, waarvoor 20 miljoen is gereserveerd.<sup>21</sup>

### Quantum Delta

De investering uit het Groeifonds is gegaan naar Quantum Delta. Quantum Delta is één nationaal ecosysteem dat bestaat uit vijf verschillende clusters. Belangrijk zwaartepunt is het Delftse quantumcluster, met onderzoeksinstituut QuTech, het QuantumLab, het House of Quantum en een aantal gelieerde bedrijven. De andere vier clusters van Quantum Delta zijn gesitueerd aan de Universiteit van Amsterdam, Universiteit Leiden, Universiteit Twente en de TU Eindhoven.

De vijf clusters hebben hun eigen specialisatie en kunnen ook afzonderlijk als een ecosysteem worden gezien. Amsterdam richt zich bijvoorbeeld primair op algoritme- en applicatieontwikkeling samen met eindgebruikers en met aanbieders van qubitplatforms. De netwerkorganisatie die partijen bij elkaar brengt heet Quantum.Amsterdam. Naast de UvA zijn CWI, TNO, e-Science Center, SURF, Quantum Inspire (met IBM) en ook QuiX van de Universiteit Twente betrokken.

### Inspanningen

Veel geld wordt gestoken in wetenschappelijk onderzoek.<sup>22</sup> De resultaten daarvan zijn vaak nog niet zichtbaar in bruikbare toepassingen. Een mooie doorbraak is de realisatie van een werkende fotonische quantumcomputer door QuiX. Belangrijk is ook de vorig jaar via verstrengeling geslaagde teleportatie in Delft.<sup>23</sup> QuTech werkt hierbij samen met private partijen als KPN en Eurofiber aan een netwerk van knooppunten die verstrengelde qubits kunnen uitwisselen.<sup>24</sup> Dat Nederland voorop loopt in de ontwikkeling van quantuminternet zien we ook aan een recent toegekende, grote EU-subsidie om een veilige communicatie-infrastructuur te ontwikkelen.<sup>25</sup>

### 3.3. Internationale onderzoeksfinanciering

De EU coördineert haar quantumprogramma via het Quantum Flagship, Horizon 2022-projecten en EuroQCI, dat speciaal voor quantumcommunicatie is opgezet. Nederland is succesvol met het binnenhalen van Europees geld voor quantumcommunicatie. De

---

21 ELSA staat voor Ethical, Legal en Social Aspects van technologie. Een ELSA-aanpak beoogt maatschappelijk verantwoorde technologische ontwikkeling en innovatie.

22 Het is misschien niet helemaal juist om dit fundamentele (of pure) wetenschap te noemen, omdat het onderzoek plaatsvindt in de context van te realiseren toepassingen als een quantumcomputer.

23 Henke (2022).

24 Monerie (2022), TU Delft (2019a), zie ook <https://www.tu-delft.nl/2019/tu-delft/kpn-en-qutech-slaan-handen-ineen-om-quantum-internet-te-realiseren>. Zie ook QuTech (z.d.).

25 Meijer (2022).

EU stimuleert ook projecten over landsgrenzen heen. Nederland heeft met het oog daarop een partnerschap met Frankrijk en Duitsland aangekondigd.<sup>26</sup>

Veel landen hebben een innovatie-agenda voor quantumtechnologie en koppelen die aan publieke investeringen. Een wereldwijd overzicht laat zien dat er weinig landen zijn die meer dan Nederland investeren.<sup>27</sup> Binnen de EU zijn dat alleen Frankrijk en Duitsland, daarbuiten de Verenigde Staten, Canada en het Verenigd Koninkrijk met iets meer dan een miljard dollar. Alleen China steekt er veel meer geld in – circa 15 miljard dollar. Na China is de Europese Unie met afstand de grootste investeerder van publiek geld, rond de 7 miljard dollar (investeringen van lidstaten opgeteld). Maar de private investeringen in Canada, het Verenigd Koninkrijk en met name de Verenigde Staten liggen veel hoger dan in Europa en China. Onlangs heeft Nederland met de Verenigde Staten een verklaring ondertekend waarmee de twee landen intensievere samenwerking en kennisuitwisseling beogen.<sup>28</sup>

---

26 De la Rie (2022).

27 Qureca (2022), zie ook McKinsey & Company (2022).

28 U.S. Department of State (2023).

## 4. Waar moeten we op letten? Publieke waarden

De nieuwe quantumtechnologie is nog niet ver doorgedrongen in de samenleving. Toch roept de technologie al veel maatschappelijke vragen op. In dit deel bespreken we de maatschappelijke vragen door een aantal publieke waarden langs te lopen. We hebben ervoor gekozen om de vragen die quantumtechnologie oproept niet per toepassingsgebied te bespreken, omdat computing bij alle kwesties speelt en voor sommige kwesties geldt dat ze op alle toepassingsgebieden betrekking hebben.

Op het gebied van veiligheid zijn er uiteenlopende zorgen die te maken hebben met cyberveiligheid, privacybescherming en militaire middelen. Ook is het de vraag of quantumtechnologie gaat bijdragen aan meer duurzaamheid. Verder spelen er vragen omtrent rechtvaardigheid, strategische autonomie, kennisveiligheid en het borgen van expertise. Sommige van de kwesties die hier aan bod komen, bijvoorbeeld rondom surveillance, spelen bij kunstmatige intelligentie en de digitale transitie in het algemeen. De ontwikkeling van quantumtechnologie kan die kwesties wel intensiveren.<sup>29</sup>

### 4.1. Veiligheid

#### Cyberveiligheid

Dat de huidige versleuteling van het online dataverkeer met quantumcomputers gekraakt kan worden is misschien wel de grootste zorg die er over quantumtechnologie leeft. Vijandelijke staten of criminelen kunnen dan inbreken in allerlei systemen met beveiligde informatie. Dat kan de politieke en economische stabiliteit sterk ondermijnen.

Deze dreiging wordt naar verwachting pas manifest als er quantumcomputers zijn die bestaan uit miljoenen fysieke qubits, en eerder werd gesteld dat dit nog wel 15 tot 25 jaar gaat duren. Toch betekent dit, dat versleutelde data die nu al wordt opgeslagen, straks mogelijk te ontsleutelen is (*'harvest now, decrypt later'*). Voor realtime bankverkeer is dat niet zo relevant, maar voor gevoelige overheids- en bedrijfsinformatie wel.<sup>30</sup> Daar komt bij dat de overheid wettelijk verplicht is om staatsgeheimen 20 jaar geheim te houden. Aan die verplichting kan de overheid mogelijk niet meer voldoen.

Er zijn dus alternatieve beveiligingsstandaarden en protocollen nodig voor de huidige versleuteling via factoriseren, die niet door quantumcomputers gekraakt kunnen worden. Momenteel is een aantal alternatieven in ontwikkeling. Alternatieven die met klassieke computers worden ontwikkeld, worden aangeduid als post-quantum encryptie. Quantumtechnologie kan echter ook *zelf* nieuwe standaarden leveren zoals het hierboven besproken *Quantum Key Distribution* (QKD).

---

<sup>29</sup> Zie het white paper Quantum Delta Nederland (2023a). Ook de Exploratory Quantum Technology Assessment tool (Quantum Delta Nederland 2023b) leunt sterk op het WRR advies *Opgave AI* (WRR 2021).

<sup>30</sup> AIVD (2021).



Als met QKD versleutelde informatie inderdaad niet meer kan worden opengebroken, dient zich weer een ander probleem aan: dan kunnen inlichtingendiensten of klokkenluiders er ook niet meer bij. En als het internet niet meer aftapbaar is, ontstaat er mogelijk een groot en ontoegankelijk *dark web* waar criminelen ongestoord hun gang kunnen gaan. Bij de huidige vorm van encryptie speelt de discussie al in hoeverre de deur voor ontsluiting op een kier moet blijven staan – bij QKD dringt die vraag zich nog indringender op.

Of QKD inderdaad niet te hacken is en dezelfde functionaliteit kan leveren als andere vormen van encryptie, is nog onzeker. Zeker is wel dat de overgang naar een andere manier van encryptie een enorme logistieke, kostenintensieve en tijdrovende operatie is, omdat er een nieuwe infrastructuur voor opgetuigd moet worden. Het vervangen van alle bankpassen, dat dan ook zal moeten gebeuren, is daarmee vergeleken maar klein bier.

### **Privacybescherming**

De mogelijkheid van decryptie heeft ook gevolgen voor privacybescherming, omdat persoonsgegevens ermee op straat kunnen komen te liggen. Quantumcomputers kunnen de privacy ook aantasten doordat ze via data-analyse nieuwe verbanden tussen datasets kunnen leggen, waarmee ze burgers kunnen categoriseren. Belangrijke vraag is of quantumalgoritmen grotere surveillancerisico's met zich meebrengen dan de huidige AI-systemen. De zorg is dat zowel overheden als bedrijven hun controle over burgers en consumenten versterken.<sup>31</sup>

Die zorg is er ook bij quantum sensing: de nieuwe sensoren kunnen nauwkeuriger meten en op plaatsen kijken die nu nog verborgen blijven. Opsporingsdiensten gebruiken nu bijvoorbeeld al infraroodcamera's om wietplantages op te sporen zonder ergens naar binnen te hoeven. Met quantum sensing komen er naar verwachting nog betere mogelijkheden om 'naar binnen' te kijken.<sup>32</sup> De vraag is wie dat mag doen en op welke manier dat wenselijk is. Door de nieuwe mogelijkheden van sensing en computing worden de grenzen van privacy opnieuw uitgedaagd. Dat vraagt om doordenking van de regulering van de nieuwe observatie- en analysemiddelen met quantumtechnologie.<sup>33</sup>

### **Militaire veiligheid**

Tenslotte zijn er veiligheidszorgen op militair terrein.<sup>34</sup> Quantumtechnologie gaat naar verwachting nieuwe biologische wapens mogelijk maken.<sup>35</sup> Raketten kunnen door snellere berekening met meer precisie doelen raken en kunnen door nauwkeurigere

---

31 Krishnamurthy (2022) p.4 en Quantum Delta Nederland (2019) p.83.

32 UK National Quantum Technologies Programme (z.d.).

33 Bruno & Spano (2021). Voor overkoepelende juridische benaderingen van quantumtechnologie zie: Van Daalen (2022), Krishnamurthy, V. (2022), Hoofnagle & Garfinkel (2021) en Kop, M (2021a).

34 Krelina (2021).

35 Quantum Delta Nederland (2019) p. 52.

meting van zwaartekracht en elektromagnetische velden naar verwachting beter reageren op hun omgeving en dus ook beter autonoom gaan werken.<sup>36</sup>

Sensing kan het arsenaal van het leger verder vergroten, bijvoorbeeld door de infrastructuur van kabels die onder de grond ligt zichtbaar te maken, of door spionage met gravitatie-sensoren waarmee bijvoorbeeld onderzeeërs die nucleaire wapens vervoeren gevolgd kunnen worden waar gps-signalen ontbreken. Of militaire quantumtoepassingen een kans of een risico zijn hangt onder meer af van wie deze toepassingen (als eerste) in handen heeft.

Zowel de militaire toepassingen als de cyberveiligheid nopen tot het intensiveren van internationale diplomatie, waarbij het voor de hand ligt dat Nederland in EU en NAVO-verband zal optreden.<sup>37</sup> Het maken van internationale afspraken is moeilijk, gezien de oplopende geopolitieke spanningen. Een andere complicerende factor is, dat het onderscheid tussen technologische ontwikkeling en innovatie voor civiele en militaire doelen steeds meer vervaagt (*dual use*). Een verbod op een bepaalde technologie kan dus ook een verbod op wenselijke toepassingen inhouden.<sup>38</sup> Om dat te voorkomen, heeft regulering steeds meer de vorm van principes en normen voor verantwoord gebruik van technologie, in plaats van een volledig verbod. Hoe lastig ook, het is noodzakelijk om dergelijke internationale afspraken voor quantumtechnologie na te streven.<sup>39</sup>

## 4.2. Duurzaamheid

'*Quantum computing saves the planet.*' Dit soort slogans suggereert dat quantumtechnologie beslissend gaat zijn in de transitie naar een duurzame samenleving. Omdat quantumcomputers sneller rekenen, moet rekenen minder energie gaan kosten. Van het chemisch materiaalonderzoek worden efficiëntere batterijen en efficiëntere zonnecellen verwacht. Tenslotte kunnen quantumalgoritmen helpen om al het energieverbruik in elektriciteitsnetwerken te optimaliseren.

Helemaal duidelijk is de netto energiewinst van quantumtechnologie echter niet. Quantumcomputers gaan het aantal rekenopdrachten misschien verhogen, wat juist tot tot hoger energieverbruik kan leiden. Het koelen van supergeleidende computers tot vlakbij het absolute nulpunt kost veel energie. Ook de nieuwe post-quantum encryptietechnieken hebben mogelijk een hoog energieverbruik.<sup>40</sup> Tenslotte doet het bouwen van quantumcomputers, overigens net als bij andere artefacten zoals elektrische auto's, een beroep op zeldzame materialen. Dat kan gepaard gaan met milieuschade. Het is dus nog onbekend of quantumtechnologie gaat bijdragen aan een duurzame samenleving. Hoe dan ook lijkt het verstandig om quantumtechnologie nu al

---

36 Van Weerd & Lassche (2021) p. 13, Krelina (2021) p.2, Adviesraad Internationale Vraagstukken (2021) pp. 20-21.

37 Reding et al. (2023) en Riekeles (2023).

38 Rathenau Instituut (2021b).

39 Relevant in deze context is dat het Europese Ruimteagentschap partner is van EuroQCI: European Commission (z.d.).

40 Voor onderzoek daarnaar zie Roma, Tai & Hassan (2021) en Beckwith, Kaps & Gaj (z.d.).

onderdeel te maken van een integrale visie op de digitale infrastructuur en het energiegebruik dat daarmee gepaard gaat.<sup>41</sup>

### 4.3. Rechtvaardigheid

Intensivering van data-analyse met quantummiddelen versterkt de huidige zorgen over rechtvaardigheid. Net als bij AI-systemen kan profilering met quantumtechnologie gelijke behandeling onder druk zetten en discriminatie in de hand werken. Specifieker is het de vraag wie er straks kan profiteren van de toepassingen van quantumtechnologie. De zorg bestaat dat de *digital divide* – de ongelijke toegang tot digitale middelen – zich zal verbreden met een *quantum divide*. In wezen gaat deze zorg over een eerlijke verdeling van welvaart en macht.<sup>42</sup>

Toegang tot de eerste sterke quantumcomputers zal vrijwel zeker schaars zijn. Met klassieke computers is een brede distributie, uiteindelijk naar iedere huiskamer, op gang gekomen. Of dat met quantumcomputers zal gebeuren, is onzeker. Welke partijen kunnen als eerste gebruik maken van quantumcomputers? En belangrijker: waar gaan die dan voor worden ingezet? Dit loopt over in vragen die betrekking hebben op het blokje strategische autonomie, want wie beslist daarover? Ligt de bal straks bij een paar grote technologiebedrijven als die de eerste quantumcomputers in bezit hebben? En als quantumcomputers toegankelijk worden via clouddiensten, krijgt de partij die controle heeft over die toegang dan niet teveel macht?

Omtrent cloudtoegang is nog een probleem geopperd dat de andere kant op werkt, het zogeheten *blind computing*. De partij die de opdrachten uitvoert op de quantumcomputer weet mogelijk niet waarvoor dat gebeurt, omdat de opdrachtgever dit met behulp van QKD kan afschermen. Zo kan die partij dus ongewild meewerken aan ongewenste quantumtoepassingen.

Meer politiek en publiek debat over deze vragen is gewenst, zodat belangen en waarden rondom de ontwikkeling van quantumtechnologie aan het licht komen.<sup>43</sup> Zowel overheid, bedrijven, wetenschap, maatschappelijke organisaties als burgers moeten kunnen meepraten over het gebruik van quantumtechnologie en de regulering ervan.<sup>44</sup>

Omdat de omslag naar de samenleving nog plaats moet vinden is er nu een goede uitgangspositie om de maatschappelijke impact van de nieuwe technologie al vroeg mee te nemen in het ontwikkelproces. Een belangrijk initiatief in dit verband is de actielijn Quantum & Society dat onderdeel is van Quantum Delta. Quantum & Society heeft 20 miljoen euro te besteden om de maatschappelijke impact van quantumtechnologie te onderzoeken, kennis te verspreiden en die kennis te verbinden aan missiegedreven innovatie.

---

41 Rathenau Instituut (2022b).

42 Hidary & Sarkar (2023) en Ten Holter et al. (2022).

43 Seskir et al. (2023), De Jong (2022) en DiVincenzo (2017).

44 Specifieke toepassingen zullen hun eigen vragen oproepen, denk bijvoorbeeld aan ethische kwesties die opkomen als quantumsimulatie gebruikt kan worden om genetische manipulatie te optimaliseren. Per toepassing zullen er ook sectorspecifieke regels en kwaliteitsnormen spelen die nu al van kracht zijn en die voor quantumtechnologie onverminderd van toepassing zullen blijven.

#### 4.4. Strategische autonomie

Quantum Delta is een samenwerkingsverband tussen publieke en private partijen. Een aantal grote buitenlandse bedrijven, zoals IBM, Google en Microsoft, is daar ook bij betrokken. De belangen van overheden, wetenschappers en private partijen vallen niet altijd samen. Daarom is het zaak dat er goede afspraken gemaakt worden, bijvoorbeeld over cloudtoegang, of over de rol van betrokken partijen wanneer publieke waarden zoals veiligheid en duurzaamheid in het geding zijn. Om bijvoorbeeld tot afspraken over missiegedreven innovatie te komen, is sturing vanuit de overheid nodig.<sup>45</sup>

Het maken van goede afspraken moet ook betrekking hebben op het waarborgen van een gelijk speelveld, dat start ups voldoende ruimte geeft om nieuwe producten en diensten te ontwikkelen en op de markt te brengen. Het is daarbij nog de vraag of de huidige regulering van intellectueel eigendom wel maatschappelijke wenselijke uitkomsten heeft.<sup>46</sup>

In het algemeen is het de vraag of Nederland geen kansen laat liggen bij de vermarkting van fundamentele kennis. Nederland bezit kennis van de hoogste orde op het gebied van post-quantumcryptografie, maar lijkt het initiatief voor de vermarkting daarvan aan andere landen over te laten. Het Amerikaanse National Institute of Standards and Technology (NIST) geeft de toon aan voor de ontwikkeling van nieuwe encryptiestandaarden; bedrijven die daarop inspringen zijn buiten Nederland gevestigd, denk aan PQshield (Brits) en SandboxAQ (Amerikaans).<sup>47</sup>

De ontwikkeling van de quantumtechnologie is een kwestie van lange adem. Het stimuleringspakket uit het Nationaal Groeifonds is weliswaar groot, maar kent toch een beperkte horizon. Of Quantum Delta na zeven jaar sterk genoeg is om op eigen benen te staan, is nog niet bekend. In het algemeen is het de vraag of instellingen voldoende absorptievermogen hebben om de toekenning van grote subsidierondes te verwerken en ook of ze in staat zijn om, wanneer dit gelukt is, na afloop van de financiering de ontwikkelde kennisinfrastructuur in stand te houden.<sup>48</sup>

#### 4.5. Kennisveiligheid

Fundamentele kennisontwikkeling is gebaat bij samenwerking. Het lastige is dat het openbaar delen van kennis, zowel commercieel als uit veiligheidsoverwegingen, gevoeliger wordt naarmate praktische toepassingen dichterbij komen. In de Tweede Kamer kwam dit dilemma al aan de orde bij de vraag of quantumtechnologie als zeer sensitief moet worden aangemerkt.<sup>49</sup> De Wet VIFO (veiligheidstoets investeringen,

45 De 'governance principles' van het World Economic Forum liggen in het verlengde van de 17 Sustainable Development Goals: World Economic Forum (2022).

46 Kop (2021b). Volgens Kop kunnen 'first movers' (meestal enkele universiteiten en grote bedrijven) door handig gebruik te maken van huidige IP-regimes exploitatierechten voor onbepaalde tijd aan zich binden. Dat kan leiden tot onwenselijke concentratie van marktmacht.

47 Nederlandse Instituten als de TU Eindhoven en het CWI zijn wel bij de totstandkoming van winnende protocollen betrokken geweest.

48 Rathenau Instituut (2022a).

49 Kamerstukken II (2022/2023).

fusies en overnames) heeft alleen betrekking op apparaten en producten en niet op wetenschappelijke kennis zonder vertaling naar een product. Maar die harde lijn tussen pure kennisontwikkeling en toegepaste kennis is niet altijd te trekken. Moet alle kennis over quantumtechnologie, met de verwachte toepassingen in gedachten, dan als zeer sensitief worden aangemerkt? Dit is een lastig dilemma. Als quantumtechnologie als zeer sensitief zou worden aangemerkt, zullen hogere barrières opgeworpen worden voor internationale samenwerking in fundamenteel onderzoek en voor veiligheidsbeleid. Die zouden ook contraproductief kunnen zijn.<sup>50</sup>

De geopolitieke situatie dwingt ons om goed na te denken over kennisveiligheid. Nederland is voorstander van open science en speelt wereldwijd een voorstrektersrol op dit gebied.<sup>51</sup> Binnen de open science-beweging realiseert men zich dat openheid alleen onder voorwaarden kan bestaan: privacy, veiligheid en economische belangen moeten worden beschermd. Dergelijke voorwaarden kunnen ook voor quantumbeleid relevant zijn. Het zal hoe dan ook een uitdaging blijven om te navigeren tussen enerzijds samenwerking met andere landen en partijen, en anderzijds waarborging van de speciale positie van Nederland.

#### **4.6. Vertrouwen: de rol van experts**

Een laatste punt betreft de zogeheten *expertise gap*. Er zijn maar weinig mensen die op expertniveau doorgronden hoe quantumtechnologie werkt. Als de toepassingen hun weg naar de samenleving vinden, is de afhankelijkheid van deze kleine groep mensen groot. Dat roept vragen op over betrouwbaarheid, vertrouwen en verantwoordelijkheid. Hoe betrouwbaar zijn de quantumcomputers? Hoe zit het met de uitlegbaarheid van quantumalgoritmen? Wie kan inschatten of de resultaten van berekeningen juist zijn en daarover communiceren? Wie is er verantwoordelijkheid voor beslissingen die met quantumtechnologie worden genomen? Wat is de rol van experts in dit opzicht?

Quantumwetenschappers zijn niet altijd bezig met de praktische toepassingen waarvoor hun wetenschappelijke bevindingen uiteindelijk gebruikt kunnen gaan worden. Toch zijn er toegankelijk geschreven teksten over quantumtechnologie beschikbaar voor een groter publiek.<sup>52</sup> Ook komt er binnenkort een Nationale Cursus Quantumtechnologie uit. Verder zijn er tools ontwikkeld als Quantum Chess, waarmee op een speelse manier over rekenen met quantumeigenschappen kan worden geleerd, en Qiskit, waarmee iemand zelf met quantum computing aan de slag kan.

Maar veel mensen weten nog niet wat quantumtechnologie is en wat het allemaal kan betekenen. Meer bewustzijn in de samenleving, bij burgers, bedrijven en andere organisaties, is nodig. Weten bedrijven en organisaties hoe zij het beste kunnen acteren op informationele veiligheidsrisico's? En waar moeten ze aan denken als ze maatschappelijke verantwoord willen innoveren met quantumtechnologie?<sup>53</sup>

---

50 Van den Broek (2022).

51 Zie Dijkgraaf (2023) voor het recent door OCW en 15 kennisinstellingen ondertekende convenant open science.

52 Zoals de Nationale Agenda Quantumtechnologie, ook Van der Starre et al. (2021) is toegankelijk geschreven.

53 Nuttige handleidingen voor bedrijven (en andere organisaties) zijn recent uitgekomen: Attema et al. (2023) en Quantum Delta Nederland (2023b).

Naast de *expertise gap* is er ook nog sprake van de zogeheten *talent gap*: er zijn niet genoeg gekwalificeerde mensen om de ambities rondom quantumtechnologie waar te kunnen maken. Het is moeilijk om mensen te vinden die in relevante disciplines voor quantumtechnologie thuis zijn – voor softwareontwikkeling bijvoorbeeld zowel in de wiskunde, de informatica als in de natuurkunde. Er staan inmiddels twee masterprogramma's in de steigers, aan de TU Delft in samenwerking met de Universiteit Leiden (startjaar 2023) en aan de UvA (startjaar 2024). Deze opleidingen moeten helpen om het tekort aan gekwalificeerde arbeidskrachten op te lossen.

Tabel 3 Maatschappelijke vraagstukken bij quantumtechnologie

Publieke waarde	Maatschappelijke zorgen
Cyberveiligheid	Huidige online versleuteling kan worden gekraakt; politieke en economische instabiliteit dreigt;  <i>Quantum Key Distribution</i> maakt het internet mogelijk waterdicht; inlichtendiensten kunnen er dan ook niet meer bij.
Privacybescherming	Door decryptie kunnen persoonsgegevens openbaar worden;  Meer surveillancemogelijkheden door overheden en bedrijven;  Met <i>quantum sensing</i> kan gekeken worden op plaatsen die nu nog ontoegankelijk zijn.
Militaire veiligheid	Ontwikkeling van nieuwe biologische wapens;  Verhoogde precisie van, onder meer, autonome wapens;  Uitbreiding van observatiemiddelen door quantumsensoren.
Rechtvaardigheid	Intensivering van zorgen om profilering met AI;  Toename van oneerlijke verdeling van macht en welvaart (' <i>quantum divide</i> ').
Strategische autonomie	Huidige wetgeving voor intellectueel eigendom leidt mogelijk tot machtsconcentratie;  Afhankelijkheid van grote technologiebedrijven neemt toe;  Gelijk speelveld moet worden gewaarborgd;  Missiegedreven innovatie komt niet vanzelf op gang;  Nederland mist mogelijk kansen om fundamentele kennis te vermarkten.
Kennisveiligheid	Internationale kennisdeling is nodig, maar kan veiligheid, privacy en economische kansen schaden.
Vertrouwen: de rol van experts	<i>Expertise gap</i> : toename van afhankelijkheid van een zeer kleine groep experts;  <i>Talent gap</i> : tekort aan gekwalificeerde professionals om ambities op quantumgebied waar te maken.
Duurzaamheid	Het is nog onzeker of quantumtechnologie het energieverbruik terugdringt of juist verhoogt.

Bron: Rathenau Instituut

## 5. Hoe verder?

### 5.1. Voorbij de hype

Potentieel is de impact van quantumtechnologie op de samenleving groot. Er zijn ook substantiële economische belangen mee gemoeid. Naar schatting van het adviesbureau McKinsey zal het anno 2035 wereldwijd gaan om 700 miljard dollar. Zo ver is het echter nog niet. De eerste toepassingen van de nieuwe quantumtechnologie breken weliswaar door, maar de technologie bevindt zich in veel opzichten nog in de ontwikkelfase. Het idee van quantumtechnologie als *gamechanger* past daar niet zo goed bij. Uit deze Rathenau Scan blijkt ook dat quantumvoordeel vooralsnog alleen verwacht wordt voor specifieke toepassingen. Een volledige paradigmawisseling in digitaal rekenen is niet waarschijnlijk. Bij een afgewogen oordeel over de impact van quantumtechnologie moeten bovendien een flink aantal maatschappelijke kwesties worden betrokken.

Aanvankelijk is een soort hype ontstaan rond quantumtechnologie. Die hype heeft mensen en middelen in beweging gezet. Diverse auteurs hebben er inmiddels op gewezen dat de overspannen verwachtingen van quantumtechnologie ook negatieve gevolgen hebben.<sup>54</sup>

Ten eerste blokkeert een overdreven positief verhaal het zicht op de uitdagingen die er nog zijn om quantumtechnologie, en dan met name quantum computing, werkend te krijgen.

Ten tweede ontnemt de hype ruimte voor een goed geïnformeerde dialoog over kansrijke toepassingen en maatschappelijke risico's. Conflicterende waarden nopen hierbij tot lastige beleidskeuzes. Denk aan de noodzaak tot het borgen van kennisveiligheid en intellectueel eigendom tegenover de behoefte aan kennisuitwisseling en internationale samenwerking. Ook binnen een specifieke publieke waarde kan zich een spanning voordoen; quantumtechnologie kan op bijvoorbeeld duurzaamheid zowel een positief als een negatief effect hebben.

Ten derde bepaalt de hype mede de investeringen die in quantumtechnologie worden gedaan. Wereldwijd steken bedrijven en overheden samen verreweg het meeste geld in quantum computing.<sup>55</sup> Dat is logisch, omdat op dat vlak nog fundamentele stappen gedaan moeten worden. Maar computing gaat mogelijk pas als laatste van de toepassingsgebieden concrete toepassingen opleveren. Moet Nederland zich voor de vermarkting van zijn kennis misschien niet meer op sensing en communicatie richten? Is bekend welke toepassingen het beste passen bij onze economie?

Ten vierde werkt een overspannen perspectief op quantumtechnologie competitiegedrag en de internationale *rat race* in de hand om als eerste een

---

<sup>54</sup> Waters (2023), Sarma (2022), Ezratty (2022), Coenen (2022), Roberson (2021).

<sup>55</sup> McKinsey & Company (2022). Let wel dat de investering in Nederland gelijkmatiger is verdeeld over de drie toepassingsgebieden computing, sensing en communicatie via de drie katalysator programma's (KAT 1-3).



quantumcomputer te hebben. Competitie is deels onvermijdelijk, omdat zowel de universitaire wereld, de markteconomie als de geopolitiek sterk competitief van aard zijn. Die competitie is uiteraard productief. Een *rat race* in de ontwikkeling van quantumtechnologie versterkt echter ook de maatschappelijke risico's voor (kennis)veiligheid, rechtvaardigheid en strategische autonomie. Waar mogelijk en wenselijk kan daarom het beste naar samenwerking worden gezocht.

## **5.2. Naar meervoudig quantumbeleid**

Ofschoon de ontwikkeling van quantumtechnologie nog veel onzekerheden kent, tekenen zich wel indringende maatschappelijke vragen af. Experts en beleidsmakers hebben al veel aandacht voor veiligheidskwesties rondom quantumtechnologie. Maar quantumtechnologie raakt ook publieke waarden als rechtvaardigheid, strategische autonomie, duurzaamheid en vertrouwen. De ontwikkeling van de technologie gaat diverse beleidsterreinen tegelijkertijd aan. Dat vereist op al die terreinen politiek én publiek debat over de keuzes die nodig zijn om quantumtechnologie 2.0 op een maatschappelijk verantwoorde manier te ontwikkelen.

## 6. Geraadpleegde bronnen

### Geïnterviewde experts

- Dr. Victor Land, Centrum voor Wiskunde en Informatica (CWI) en QuSoft Amsterdam;
- Prof. ir. Deborah Nas, Technische Universiteit Delft;
- Prof. dr. Christian Schaffner, Universiteit van Amsterdam;
- Dr. Armand Stekelenburg, International Business Machines Cooperation (IBM);
- Dr. Pieter Vermaas, Technische Universiteit Delft.

### Tools

- <https://qiskit.org/>
- <https://quantumchess.net/>

### Geraadpleegde literatuur en websites

1Qbit (z.d.) 'Forecasting the weather using quantum computers'.

<https://1qbit.com/blog/quantum-computing/forecasting-the-weather-using-quantum-computers/>.

Adviesraad Internationale Vraagstukken en Commissie van Advies inzake Volkenrechtelijke Vraagstukken (2021). *Autonome wapensystemen. Het belang van reguleren en investeren*, AIV-advies 119, CAVV-advies 38. Den Haag.

AIVD (2021). *Bereid je voor op de dreiging van quantumcomputers*. Den Haag: Algemene Inlichtingen en Veiligheidsdienst.

Aliro Quantum (2021). 'Quantum Communication Satellites. Timeline of Progress'. <https://www.aliroquantum.com/blog/quantum-communication-satellites-timeline-of-progress>

Attema, T., J. D. Duarte, V. Dunning, M. Lequesne, W. van der Schoot & M. Stevens (2023). *Het PQC-migratie handboek. Richtlijnen voor migreren naar post-quantumcryptografie*. Den Haag: TNO, CWI en AIVD.

Autovista24 (2022). 'Hyundai Bets on Quantum Computing to Improve Autonomous-Driving Tech'. <https://autovista24.autovistagroup.com/news/hyundai-ionq-quantum-computers/>.

Barker W., (2021). *Getting Ready for Post-Quantum Cryptography: Exploring Challenges Associated with Adopting and Using Post-Quantum Cryptographic Algorithms*. White Paper NIST CSWP 15. <https://csrc.nist.gov/publications/detail/white-paper/2021/04/28/getting-ready-for-post-quantumcryptography/final>

Beckwith, L., J. Kaps & K. Gaj (z.d.). 'FPGA Energy Consumption of Post-Quantum Cryptography', NIST, <https://csrc.nist.gov/csrc/media/Events/2022/fourth-pqc-standardization-conference/documents/papers/fpga-energy-consumption-of-pqc-pqc2022.pdf>.

Bouwmeester, D. (z.d.) 'Nadenken over het quantuminternet'. <https://www.universiteitleid.nl/wetenschapsdossiers/de-quantumcomputer/nadenken-over-het-quantuminternet>.

- Bruno, L. & I. Spano (2021). 'Post-Quantum Encryption and Privacy Regulation. Can the Law Keep Pace with Technology?'. In: *European Journal of Privacy Law and Technologies*, <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3920272>.
- Coenen, C. & A. Grunwald (2017). 'Responsible Research and Innovation in Quantum Technology'. In: *Ethics and Information Technology* 19-4, pp.277-294.
- Coenen, C., A. Grinbaum, A. Grunwald, C. Milburn & P. Vermaas (2022). 'Quantum Technologies and Society: Towards a Different Spin'. In: *NanoEthics* 16-1, pp.1-6.
- Cook, W. (2013) 'Solution of a 15,112-city TSP'. <https://www.math.uwaterloo.ca/tsp/d15sol/index.html>.
- De Jong, E. (2022). 'Own the Unknown: An Anticipatory Approach to Prepare Society for the Quantum Age.' In: *DISO* 1, article 15.
- De la Rie, J. (2022) 'The Netherlands, France and Germany Intend to Join Forces to Put Europe Ahead in the Quantum Tech Race'. <https://quantumdelta.nl/news/the-netherlands-france-and-germany-intend-to-join-forces-to-put-europe-ahead-in-the-quantum-tech-race>.
- De Wolf, R. (2017) 'The Potential Impact of Quantum Computers on Society'. *Ethics and Information Technology* 19-4, pp.271-276.
- Dijkgraaf, R. (2023). 'Kamerbrief over covenant Open Science'. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2023/03/29/open-science-nl-versnelt-transitie-naar-open-science>.
- DiVincenzo, D. P. (2017). 'Scientists and Citizens: Getting to Quantum Technologies'. In: *Ethics and Information Technology* 19-4, pp.247-251.
- ECP & TNO (2019). *Verkenning quantumtechnologie. Aanbevelingen ter voorbereiding op een gezamenlijke toekomst met quantumtechnologie*. Den Haag: ECP | Platform voor de InformatieSamenleving.
- European Commission (z.d.) 'Quantum'. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/quantum>.
- European Commission (2022). *The EU's Quantum Technologies Flagship. Taking the Lead in the Quantum Revolution. An Overview of Major Achievements in 2018-2021 (Ramp-Up Phase)*. Brussel: European Union.
- Ezratty, O. (2022). 'Mitigating the Quantum Hype'. <https://arxiv.org/abs/2202.01925>.
- Ezratty, O. (2021). Understanding quantum technologies 2022. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2111/2111.15352.pdf>.
- Feynman, R. P. (1982). 'Simulating Physics with Computers'. In: *International Journal of Theoretical Physics* 21, pp. 467–488.
- Henke, J. (2022) 'Teleportatie, geslaagd!'. <https://www.quantumuniverse.nl/teleportatie-geslaagd>.

Hidary, J. & A. Sarkar (2023). 'The World is Heading for a 'Quantum Divide'. Here's Why it Matters'. <https://www.weforum.org/agenda/2023/01/the-world-quantum-divide-why-it-matters-davos2023/>.

Hoofnagle, C. J. & S. L. Garfinkel (2021). *Law and Policy for the Quantum Age*. Cambridge: Cambridge University Press.

IBM Institute for Business Value (2022). *The Quantum Decade. A Playbook for Reaching Awareness, Readiness and Advantage. Third Edition*. Armonk: IBM Corporation.

Inglesant, P., C. ten Holter, M. Jirotko & R. Williams (2021a). 'Asleep at the Wheel? Responsible Innovation in Quantum Computing'. In: *Technology Analysis & Strategic Management* 33-11, pp.1364-1376.

Kamerstukken II (2022/2023). 35880, nr. 17.  
<https://www.tweedekamer.nl/kamerstukken/detail?id=2022Z23277&did=2022D54158>.

Khan I. (2021). 'Will Quantum Computers Truly Serve Humanity?'.  
<https://www.scientificamerican.com/article/will-quantum-computers-truly-serve-humanity/>

Kop, M. (2021a). 'Establishing a Legal-Ethical Framework for Quantum Technology.' In: *Yale Journal of Law & Technology*.

Kop, M. (2021b). 'Quantum Computing and Intellectual Property Law.' In: *Berkeley Technology Law Journal* 35-3, pp. 101-115.

Krelina, M. (2021). 'Quantum Technology for Military Applications'. In: *EPJ Quantum Technology* 8, article 24.

Krishnamurthy, V. (2022). 'Quantum Technology and Human Rights. An Agenda for Collaboration'. In: *Quantum Science and Technology* 7, nr. 044003.

Liu, X.Y. (2021). *Hamiltonian Engineering for Quantum Sensing and Quantum Simulation*. MIT, Ph.D. thesis, <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/130799>.

McCormick K. (2022). 'Quantum Computing and Society-Interview with Pieter Vermaas'. <https://thequantuminsider.com/2022/12/08/quantum-computing-and-society-interview-with-pieter-vermaas/>

McKinsey & Company (2022). *Quantum Technology Monitor*.  
<https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/quantum%20computing%20funding%20remains%20strong%20but%20talent%20gap%20raises%20concern/quantum-technology-monitor.pdf>

Meijer, E. (2022). 'Nederland krijgt honderden miljoenen euro's voor digitalisering van EU'. <https://www.agconnect.nl/artikel/nederland-krijgt-honderden-miljoenen-euros-voor-digitalisering-van-eu>.

Monterie, A. (2022). 'Eurofiber bouwt quantum-internet verder uit'.  
<https://www.computable.nl/artikel/achtergrond/infrastructuur/7442693/1444691/fiber-bouwt-quantum-internet-verder-uit.html>.

Mosca M. & M. Piani (2022). *Quantum Threat Timeline Report*. Toronto: Global Risk Institute & EvolutionQ.

Ortt, R. (2020) *De technologiemonitor 2020. Quantumtechnologie. Een onderzoek naar de ontwikkeling en verspreiding van quantumtechnologieën*. Den Haag: Stichting Toekomstbeeld der Techniek.

Paudel, H. P., M. Syambal, S. E. Crawford, Y. Lee, R. A. Shugayev, P. Lu, P. R. Ohodnicki, D. Mollot & Y. Duan (2022). 'Quantum Computing and Simulations for Energy Applications. Review and Perspective'. In: *ACS Engineering* 2, pp. 151-196.

Perrier, E. (2022). 'The Quantum Governance Stack: Models of Governance for Quantum Information Technologies'. In: *DISO* 1, article 22.

Perrier, E. (2021). 'Ethical Quantum Computing: A Roadmap'. <https://arxiv.org/abs/2102.00759>

Quantum.Amsterdam (z.d.) 'A Professional's Guide to Quantum Technology. Part 2: The Application of Quantum Computing. How Will These Machines Change Society?'. <https://www.quantum.amsterdam/part-2-the-applications-of-quantum-computing-how-will-these-machines-change-society/>.

Quantum Delta Nederland (2023a). *Lessons from AI. Risk Management*, whitepaper. <https://quantumdelta.nl/news/qdnl-white-paper-3-3-lessons-from-ai-risk-management>.

Quantum Delta Nederland (2023b). *Exploratory Quantum Technology Assessment*. <https://quantumdelta.nl/news/quantum-delta-nl-launches-exploratory-quantum-technology-assessment-egta>.

Quantum Delta Nederland (2019). *Nationale Agenda Quantumtechnologie*. <https://open.overheid.nl/documenten/ronl-61f96d64-5471-48e7-aaeb-aad21a953d2c/pdf>.

Qureca (2022). 'Overview on Quantum Initiatives Worldwide. Update 2022'. <https://qureca.com/overview-on-quantum-initiatives-worldwide-update-2022>.

QuTech (z.d.). 'Quantum Internet Milestones'. <https://qutech.nl/research-engineering/quantum-internet/quantum-internet-milestones/>.

Rathenau Instituut (2022a). *Beheers de impulsen. Zicht op langetermijneffecten van grote investeringsimpulsen in onderzoek en innovatie*. Den Haag: Rathenau Instituut.

Rathenau Instituut (2022b). *Beter beslissen over datacentra - De noodzaak van een breed publiek perspectief op de digitale infrastructuur*. Den Haag: Rathenau Instituut (auteurs: E. Masson, G. van Rooijen & R. van Est).

Rathenau Instituut (2021a) *Grip op de digitale samenleving van morgen*. Den Haag: Rathenau Instituut.

Rathenau Instituut (2021b). *Kennisveiligheid in hoger onderwijs en wetenschap: een gedeelde verantwoordelijkheid*. Den Haag: Rathenau Instituut.

Rathenau Instituut (2020). *Cyberweerbaar met nieuwe technologie – Kans en noodzaak van digitale innovatie*. Den Haag: Rathenau Instituut (auteurs: P. van Boheemen, G. Munnichs, L. Kool, G. Diercks, J. Hamer & A. Vos).

Reding, D.F., A. de Lucia, Á. M. Blanco, C. L. A. Regan & D. Bayliss (2023). *Science & Technology Trends 2023-2043. Across Physical, Biological and Information Domains*, Volume I: Overview & Volume 2: Analysis. Brussel: NATO Science & Technology Organization.

Riekeles, G.E. (2023). *Quantum Technologies and Value Chains: Why and How Europe Must Act Now. A Test Case for the EU's Technological Competitiveness and Industrial Policies*. Brussel: European Policy Centre.

Roberson, T.M. (2021). 'On the Social Shaping of Quantum Technologies. An Analysis of Emerging Expectations through Grant Proposals from 2002-2020'. In: *Minerva* 59, pp.379-397.

Roberson, T. M., J. Leach & S. Raman (2021). 'Talking about Public Good for the Second Quantum Revolution. Analysing Quantum Technology Narratives in the Context of National Strategies'. In: *Quantum Science and Technology* 6, article 025001.

Roma, C., C. A. Tai & M. A. Hasan (2021). 'Energy Efficiency Analysis of Post-Quantum Cryptographic Algorithms'. In: *IEEE Access* 9, pp. 71295-71317.

Sarma, S. D. (2022). 'Quantum Computing has a Hype Problem'. <https://www.technologyreview.com/2022/03/28/1048355/quantum-computing-has-a-hype-problem/>.

Schuurmans, U. (2022) 'Quantum Computing in Healthcare'. <https://icthealth.nl/blog/quantum-computing-in-healthcare/>.

Seskir, Z., S. Umbrello, C. Coenen & P. Vermaas (2023). 'Democratization of Quantum Technologies'. In: *Quantum Science and Technology* 8, nr. 024005.

Stanford Encyclopedia of Philosophy (2022). 'Philosophical Issues in Quantum Theory'. <https://plato.stanford.edu/entries/qt-issues/>.

Ten Holter, C., P. Inglesant, R. Srivastava & M. Jirotko (2022). 'Bridging the Quantum Divides. A Chance to Repair Classic(al) Mistakes?'. In: *Quantum Science and Technology* 7, nr. 044006.

Ten Holter, C., P. Inglesant & M. Jirotko (2021). 'Reading the Road: Challenges and Opportunities on the Path to Responsible Innovation in Quantum Computing'. In: *Technology Analysis & Strategic Management* DOI: 10.1080/09537325.2021.1988070.

TU Delft (z.d.a). 'Ants in a Maze'. <https://www.tudelft.nl/over-tu-delft/strategie/vision-teams/quantum-computing/what-is-quantum/ants-in-a-maze>.

TU Delft (z.d.b) 'The Six Stages of Quantum Networks'. <https://www.tudelft.nl/over-tu-delft/strategie/vision-teams/quantum-internet/basics-of-quantum-mechanics/the-six-stages-of-quantum-networks>.

TU Delft (2022). 'Onaftapbaar internet voor Rotterdamse haven door Delftse quantumtechnologie'. <https://www.tudelft.nl/2022/tu-delft/onaftapbaar-internet-voor-rotterdamse-haven-door-delftse-quantum-technologie>.

TU Delft (2019a). 'KPN en QuTech slaan handen ineen om quantum internet te realiseren'. <https://www.tudelft.nl/2019/tu-delft/kpn-en-qutech-slaan-handen-ineen-om-quantum-internet-te-realiseren>.

TU Delft (2019b). 'Quantum Internet: The Internet's Next Big Step'. [https://issuu.com/tudelft-mediasolutions/docs/quantum\\_magazine\\_june\\_2019?utm\\_medium=referral&utm\\_source=qutech.nl](https://issuu.com/tudelft-mediasolutions/docs/quantum_magazine_june_2019?utm_medium=referral&utm_source=qutech.nl)

UK National Quantum Technologies Programme (z.d.). 'Look around Corners with the Quantum Periscope'. <https://uknqt.ukri.org/wp-content/uploads/2021/10/Look-Around-Corners-With-The-Quantum-Periscope.pdf>.

UKRI (2021). *Creating a Responsible Quantum Future. The Case for a Dedicated National Resource for Responsible Quantum Computing*. Oxford: Oxford University.

U.S. Department of State (2023). 'Joint statement of the United States of America and the Netherlands on Cooperation in Quantum Information Science and Technology'. <https://www.state.gov/joint-statement-of-the-united-states-of-america-and-the-netherlands-on-cooperation-in-quantum-information-science-and-technology/>.

Van Daalen, O. (2022). *Making and Breaking with Science and Conscience. The Human Rights-Compatibility of Information Security Governance in the Context of Quantum Computing and Encryption*, Universiteit van Amsterdam, Ph.D. thesis (niet openbaar toegankelijk).

Van den Broek, J. (2022), 'Deep tech moet de ruimte krijgen in Nederland'. <https://www.nrc.nl/nieuws/2022/09/15/deep-tech-moet-de-ruimte-krijgen-in-nederland-a4141984>.

Van der Starre, B., C. Bos, E. Cloosterman & J. P. van den Toren (2021). *De impact van quantum. Scenario's voor de toekomst van quantumtechnologie in Zuid-Holland*. Driebergen: Birch.

Wack, A. et al. (2021). 'Scale, Quality and Speed. Three Key Attributes to Measure the Performance of Near-Term Quantum Computers'. <https://arxiv.org/pdf/2110.14108.pdf>.

Van Weerd C. & D. Lassche (2021). *National Security Implications of Quantum Technology and Biotechnology*. Den Haag: The Hague Centre for Strategic Studies & TNO.

Waters, R. (2023). 'Hype around Quantum Computing Recedes over Lack of Practical Uses'. <https://www.ft.com/content/d64e45b4-692a-429e-bc64-146303ec7fdf>.

Wimmer M. & T. Moraes (2022). 'Quantum Computing, Digital Constitutionalism, and the Right to Encryption: Perspectives from Brazil'. In: *DISO* 1, article 12.

WRR (2021). *Opgave AI. De nieuwe systeemtheorie*, WRR-rapport 105, Den Haag: Wetenschappelijke Raad voor het Regeringsbeleid.

Wolbring, G. (2022). 'Auditing the 'Social' of Quantum Technologies: A Scoping Review'. In: *Societies* 12-41

World Economic Forum (2022). *Quantum Computing Governance Principles*.  
[https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Quantum\\_Computing\\_2022.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_Quantum_Computing_2022.pdf).



## Auteurs

Bart Karstens, Bo Hijstek en Linda Kool

## Illustratie

Rathenau Instituut

## Foto omslag

Model van een quantumcomputer op een computerbeurs in Hannover in 2018.  
flowgraph / Shutterstock

## Bij voorkeur citeren als:

Rathenau Instituut (2023). *Quantumtechnologie in de samenleving*. Den Haag.  
Auteurs: Karstens, B., B. Hijstek en L. Kool

## © Rathenau Instituut 2023

Verveelvoudigen en/of openbaarmaking van (delen van) dit werk voor creatieve, persoonlijke of educatieve doeleinden is toegestaan, mits kopieën niet gemaakt of gebruikt worden voor commerciële doeleinden en onder voorwaarde dat de kopieën de volledige bovenstaande referentie bevatten. In alle andere gevallen mag niets uit deze uitgave worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie of op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming.

## Open Access

Het Rathenau Instituut heeft een Open Access beleid. Rapporten, achtergrondstudies, wetenschappelijke artikelen, software worden vrij beschikbaar gepubliceerd. Onderzoeksgegevens komen beschikbaar met inachtneming van wettelijke bepalingen en ethische normen voor onderzoek over rechten van derden, privacy, en auteursrecht.

## Contactgegevens

Anna van Saksenlaan 51  
Postbus 95366  
2509 CJ Den Haag  
070-342 15 42  
info@rathenau.nl  
www.rathenau.nl

Het Rathenau Instituut stimuleert de publieke en politieke meningsvorming over de maatschappelijke aspecten van wetenschap en technologie. We doen onderzoek en organiseren de dialoog over wetenschap, innovatie en nieuwe technologieën.

**Rathenau Instituut**