

97

De Technologie- monitor 2020 Quantum- technologie

Roland Ortt
TU Delft

Een onderzoek naar de
ontwikkeling en verspreiding
van quantumtechnologieën.



Stichting
Toekomstbeeld
der Techniek

Verken de toekomst



Wij presenteren hier een onderzoek naar de ontwikkeling en verspreiding van quantumtechnologieën. Welke factoren spelen daarbij een rol?

Hoewel quantumtechnologie gaat over de kleinste deeltjes in onze natuur is het goed voorstelbaar dat het grote gevolgen zal hebben. Niet alleen wetenschappelijk maar ook in technologisch, maatschappelijk en economisch perspectief. Een heldere analyse van de huidige stand van zaken rondom quantumtechnologieën en van de toekomstverwachtingen daarover zijn dus van groot belang voor het nemen van strategische beslissingen die zorgen dat quantumtechnologie zich in de goede richting en met het juiste tempo ontwikkelt.

Colofon

Onderzoek en projectleiding: dr. Roland Ortt (TU Delft)
Tekst en taalredactie: dr. Patrick van der Duin (STT)
Ontwerp & vormgeving: JUST, Den Haag

Eerder verschenen publicaties STT

STT 92_03 *AI heeft geen stekker meer. Over ethiek in het ontwerpproces*
 STT 92_02 *De computer zegt nee. Scenario's over onze toekomst met AI*
 STT 92_01 *Duikboten zwemmen niet. De zoektocht naar intelligent machines*
 STT 91 *Nationale Toekomst Monitor 2019. Hoe kijken Nederlanders naar technologie en de toekomst?*
 STT *Technologiemonitor 2018. Een nieuw perspectief op technologische doorbraken*

NUR-nr. 950

Trefwoorden:

Technologie, quantumtechnologie, innovatie, Nederland

Copyright STT

© 2020, Stichting Toekomstbeeld der Techniek, Den Haag

Publicaties van Stichting Toekomstbeeld der Techniek worden auteursrechtelijk beschermd zoals vastgelegd onder de Creative Commons Naamsvermelding Niet Commercieel-Geen Afgeleide Werken 3.0 Unported Licences.

U kunt dit werk toeschrijven aan Stichting Toekomstbeeld der Techniek, 2020.

Bezoek <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/nl/> voor de volledige tekst van de licentie.

ISBN: 978-94-91397-24-0

Stichting Toekomstbeeld der Techniek
 Koninginnegracht 19, 2514 AB, Den Haag
 070-302 98 30
info@stt.nl
stt.nl

Inhoud

	pag.
Voorwoord & Inleiding	04
<hr/>	
Hoofdstukken	
1 Quantumtechnologie en toepassingen	08
2 Patroon en factoren voor de ontwikkeling en verspreiding van quantumtechnologie	22
3 Verbanden tussen quantumtechnologieën	53
4 Conclusies	65
<hr/>	
Bronnen en geraadpleegde sites	76
Bijlagen	81
Over STT	97

Voorwoord

Er wordt wel gesteld dat we nu leven in het Antropoceen. De wereld om ons heen, en ook wijzelf, worden steeds meer bepaald door de mens zelf. Of dat een goede ontwikkeling is mag iedereen voor zichzelf bepalen. Het is wellicht een prettige gedachte dat als de wereld nu niet in 'goede doen' is dat het door onszelf komt en dat we daar dus ook zelf iets aan kunnen doen.

dr. Patrick van der Duin,
directeur
Stichting Toekomstbeeld
der Techniek

November 2020

Maar ik betwijfel of de term 'Antropoceen' de volledige werkelijkheid dekt. Ik introduceer hierbij graag de term 'Technoceleen'. Leven wij immers niet in een wereld en in een maatschappij die sterk technologisch geïnspireerd en bepaald zijn? Zijn snelle en impactvolle technologische ontwikkelingen niet de belangrijkste stuwende kracht geworden? En gaat het dus om de vraag hoe het antropoceen en het technoceleen zich tot elkaar verhouden, elkaar kunnen aanvullen en misschien stimuleren. En zijn technoceleen en antropoceen geen valse tegenstellingen? Techniek-filosoof Peter-Paul Verbeek (Universiteit Twente) stelt niet voor niets dat de mens en technologie niet los van elkaar kunnen worden gezien.

Een intrigerend voorbeeld van technoceleen is de ontwikkeling en verspreiding van quantumtechnologie, het onderwerp van deze studie. Quantumtechnologie is niet een technologie maar een verzameling technologieën, oftewel een 'discipline' zoals de auteur stelt. De stand van zaken van quantumtechnologie is dus niet enkelvoudig. Sommige delen van quantumtechnologie zijn al ver ontwikkeld, andere delen niet. Sommige toepassingen van quantum zijn al in de markt, andere toepassingen (nog) niet.

De keuze om de ontwikkeling en verspreiding van quantumtechnologie in kaart te brengen was niet zo moeilijk. De verwachtingen zijn namelijk hoog gespannen. Quantumtechnologie is namelijk een zogenaamde 'General Purpose Technology', een technologie die elke sector of domein raakt, zoals elektriciteit of het internet. Ook zal quantumtechnologie grote maatschappelijke invloed hebben. Zo kunnen met quantumtechnologie communicatieverbindingen opgezet worden die niet af te luisteren of af te tappen zijn.

De keuze werd ook vergemakkelijkt omdat de Technologiemonitor 2018 (over blockchain, autonome voertuigen, 3D-printen en 'augmented reality') van STT een groot succes was. Mede door de COVID-19-crisis bleek het dat het analyseren van een gehele discipline lastiger en tijdrovender was dan verwacht, maar

het resultaat mag er zijn. Quantumtechnologie is namelijk niet eenvoudig. De onderliggende wetenschappelijke principes verdragen zich moeilijk met zowel bestaande wetenschappelijke inzichten als met onze menselijke intuïtie. Stel je voor: een deeltje dat tegelijkertijd op twee plaatsen kan zijn.... Maar juist daarom roept quantumtechnologie zoveel fascinatie op en is het goed mogelijk dat het maatschappelijk en economisch potentieel ervan daaraan parallel loopt.

“Stel je voor: een deeltje dat tegelijkertijd op twee plaatsen kan zijn...”

Opnieuw heeft dr. Roland Ortt van de TU Delft (faculteit Techniek, Bestuur en Management) een heldere analyse gemaakt van de verschillende fasen (ontwikkeling, adaptatie, stabilisatie) van de verschillende technologieën die samen quantumtechnologie vormen. Duidelijk wordt dat geen enkel organisatie het zich kan permitteren om quantumtechnologie links te laten liggen of stilletjes af te wachten. Een betere motivatie om dit rapport te gaan lezen kan ik niet geven.

Inleiding

Dit rapport gaat over het patroon van ontwikkeling en verspreiding van een aantal quantumtechnologieën. Naast de huidige positie voor die technologieën in dat patroon wordt ook aangegeven welke factoren een verdere ontwikkeling en verspreiding van elke technologie belemmeren of bevorderen. Dit rapport geeft dus antwoord op de vraag hoe ver verschillende quantumtechnologieën in hun ontwikkeling zijn, hoe de verspreiding precies verloopt en wat hun voortgang belemmert.

Het rapport gaat tevens in de op de volgende onderwerpen:

- De onderliggende principes van een aantal quantumtechnologieën.
- De werking van deze technologieën.
- De toepassingen in de markt en eventuele grootschalige productie en gebruik van producten en diensten op basis van quantumtechnologieën.

Dit rapport richt zich dus op vier onderzoeksvragen:

1. Wat zijn quantumtechnologieën?
2. Wat is het patroon van ontwikkeling en verspreiding van de quantumtechnologieën en wat is hun huidige positie daarin?
3. Wat zijn de factoren die verdere ontwikkeling of verspreiding hinderen of stimuleren?
4. Wat zijn de verbanden of relaties tussen de technologieën?

Technologieverkenningen zijn van groot belang voor organisaties, zowel voor hightech als minder technologisch georiënteerde organisaties en voor zowel publieke als private organisaties. Hightech organisaties ontwikkelen zelf technologieën en gebruiken die vervolgens voor innovatieve producten en diensten. Hightech organisaties bepalen technologische ontwikkelingen of volgen die op de voet, maar vaak hebben ze moeite om maatschappelijke gevolgen en markt-

“Technologische doorbraken hebben gevolgen voor veel maatschappelijke domeinen en zijn op de langere termijn van invloed op het dagelijks leven...”

ontwikkelingen van hun technologie in te schatten. Voor andere organisaties zijn technologieverkenningen van belang omdat ze de gevolgen ondervinden van nieuwe technologieën en daarop hun bedrijfsprocessen moeten aanpassen. Technologische doorbraken hebben gevolgen voor veel maatschappelijke domeinen en zijn op de langere termijn van invloed op het dagelijks leven van burgers, op de wensen van klanten en de processen van vrijwel alle publieke en private organisaties. In het verleden was, bijvoorbeeld, de stoommachine niet alleen van belang voor de mijnbouw waar deze machines voor het eerst werden toegepast. Nadat Thomas Edison de stoommachine verbeterde werd die na verloop van tijd bepalend voor de inrichting van veel fabrieksorganisaties en uiteindelijk voor de inrichting van de gehele maatschappij. Quantumtechnologie zal hoogstwaarschijnlijk een dergelijk effect hebben op onze maatschappij.

Leeswijzer

In hoofdstuk twee wordt aangegeven wat quantumtechnologieën zijn en wat de toepassingen zijn van die technologieën. In het derde hoofdstuk wordt de Technologiemonitor toegepast op een aantal quantumtechnologieën. Dat betekent dat voor die technologieën de patronen van ontwikkeling en verspreiding en de belemmerende factoren op een rij worden gezet. In het vierde hoofdstuk wordt gekeken naar de verbanden tussen de patronen voor de onderzochte quantumtechnologieën. In het vijfde en laatste hoofdstuk, de conclusies, worden de antwoorden op de onderzoeksvragen op een rij gezet en worden aanbevelingen gedaan. In de bijlage staat de methode van de Technologiemonitor beschreven.

Hoofdstuk 1

Quantum- technologie en toepassingen



Inleiding

Quantum technologie is gebaseerd op quantum mechanische principes. De term quantumtechnologie wordt gebruikt om verschillende technologieën binnen die discipline aan te duiden. Het UK Defense Science and Technology Laboratory maakt onderscheid tussen een eerste en tweede generatie van quantumtechnologieën (Dowling and Milburn, 2003). De eerste generatie omvat technologieën die gebruikt worden in systemen zoals lasers, transistors, en MRI-imagers die gebaseerd zijn op quantum-mechanische principes. Deze technologieën zijn vanaf het begin van de twintigste eeuw wetenschappelijk onderzocht en hebben geleid tot producten die nu gemeengoed zijn geworden. De tweede generatie omvat technologieën die actief quantum toestanden creëren, manipuleren en observeren. Dit rapport gaat over de tweede generatie technologieën en over de producten die daarmee mogelijk worden.

Uitleg quantumtechnologieën

Technologisch principes

Quantumtechnologie is gebaseerd op verschillende technologische principes (zie bijvoorbeeld: Spiller en Munro, 2006). Wij beschrijven die principes aan de hand van de grootte en de kenmerken van quantumdeeltjes.

58 gram keukenzout (de chemische formule daarvoor is NaCl) is ongeveer 6 afgestreeken eetlepels zout. In die hoeveelheid zitten ongeveer $6 \cdot 10^{23}$ moleculen, dat is een 6 met 23 nullen. Ter vergelijking: 1 miljard heeft 9 nullen. Een miljard keer een miljard keer honderdduizend vormt een 1 met 23 nullen. Elk molecuul keukenzout bestaat uit 2 atomen: een Natrium en Chloride atoom. Die atomen op hun beurt bestaan uit subatomaire deeltjes zoals neutronen, protonen en elektronen. Daarnaast zijn er nog andere subatomaire deeltjes ontdekt in de Natuurkunde, zoals Higgsdeeltjes, quarks, etc. Quantumtechnologie is gebaseerd op de subatomaire deeltjes.

De grootte van een quantumdeeltje

Een quantumdeeltje is een subatomair deeltje. Het deeltje is kleiner dan een atoom.

De quantumdeeltjes bestaan op een veel kleinere schaal dan de schaal van de voor ons zichtbare wereld. Op die schaal gelden ook andere natuurkundewetten. Je zou kunnen zeggen dat onze bekende natuurkundewetten een bijzonder geval vormen van de meer algemeen geldende natuurkundewetten op subatomair niveau. Dat contrast tussen onze met het blote oog zichtbare wereld en de wereld van de quantumdeeltjes maakt de verschijnselen en de wetten in de wereld van de quantumtechnologie ook zo contra-intuïtief en dus moeilijk te begrijpen.

De kenmerken van een quantum deeltje

Een knikker is een deeltje in de zichtbare wereld. Een knikker kan bewegen met een bepaalde snelheid en richting. Die combinatie van snelheid en richting wordt ook wel aangeduid als momentum. Terwijl een knikker een momentum heeft, rolt de knikker. Als je een punt met een "+" boven en punt met een "-" onder de knikker tekent en daar denkbeeldig een as doorheen trekt, dat heeft de as van de knikker een bepaalde oriëntatie. Die oriëntatie wordt aangeduid als polarisatie. Tevens draait de knikker linksom of rechtsom rondom die as en dat wordt aangegeven door de spinsnelheid en richting.

Een quantum deeltje heeft dus een bepaalde positie (plaats), snelheid in een richting (momentum), een oriëntatie (polarisatie) en een draaisnelheid met een richting rond een as

(spin). Dat deel van de quantum wereld lijkt dus op de zichtbare wereld van de knikker. Er zijn ook verschillen. Een quantum deeltje heeft ook kenmerken van een golf naast de kenmerken van een (hard of massief) deeltje zoals een knikker. Dat gemengde golf/deeltje karakter heeft allerlei wonderlijke consequenties.

Een knikker met een bepaalde diameter kan je niet door een gaatje met een kleinere diameter duwen. Een quantumdeeltje kan wel met een bepaalde kans als een soort golf door een barrière. Dit is het zogenaamde 'tunnelling effect'.

Toch zijn quantum deeltjes geen pure golven zoals we die in onze zichtbare wereld zien. Golven in onze zichtbare wereld hebben namelijk een traploos variërende energie terwijl quantum deeltjes alleen bepaalde of discrete hoeveelheden van energie kunnen omvatten. Dit is het zogenaamde 'quantum size effect'. Je zou kunnen zeggen dat een quantum deeltje een pakketje energie is met bepaalde discrete waarden dat zich gedraagt als een hybride tussen een deeltje en een golf.

“Een quantum deeltje is een pakketje energie met bepaalde discrete waarden dat zich gedraagt als een hybride tussen een deeltje en een golf.”

Quantumdeeltjes kunnen ook worden opgeteld als een soort golven. Golven op zee bijvoorbeeld kunnen elkaar uitdoven of juist versterken en dat kunnen knikers niet. Het optellen van golven tot een nieuwe golf wordt superpositie genoemd. Het bijzondere daarvan is dat twee golven zich afzonderlijk in een bassin

kunnen verplaatsen en daarna mengen ze zich. Die vermenging leidt tot een nieuwe golf die hoger of juist lager kan zijn, al naar gelang ze elkaar versterken of dempen. Als nu die golven weer verder bewegen dan ontkoppelt de vermengde golf zich als het ware weer in de twee oorspronkelijke golven. De informatie van de twee oorspronkelijke golven was dus nog beschikbaar in de gemengde golf. Ook dat is een belangrijk aspect van superpositie in de zichtbare wereld. Als je twee mogelijke toestanden van een quantumdeeltje optelt dan blijft het deeltje met een bepaalde kans in de ene en met een bepaalde kans in de andere toestand. Dit is het zogenaamde quantum 'superposition effect', een effect dat we in de zichtbare wereld niet precies zo kennen.

Quantumdeeltjes zijn dus geen pure deeltjes of geen pure golven zoals we die kennen in onze zichtbare wereld. Als we namelijk de plaats meten van een quantumdeeltje dan is de snelheid onbekend. Dus je kunt van het quantumdeeltje niet al die bovengenoemde kenmerken met zekerheid tegelijkertijd weten. Dit is het zogenaamde onzekerheidsprincipe. Dit principe is moeilijk te begrijpen. Het is een voorbeeld van het gegeven dat de natuurkundewetten op het subatomair niveau niet hetzelfde zijn als de natuurkundewetten op het niveau van de voor ons zichtbare wereld.

Quantumdeeltjes zijn dus een soort mengsel van deeltjes en golven waardoor de quantumdeeltjes een combinatie van eigenschappen hebben die we in onze zichtbare wereld niet kennen. Voordat we quantum-technologie kunnen bespreken zijn er nog twee aspecten van quantumdeeltjes van belang.

Bijzonderheden van het werken met quantum deeltjes

Een eerste aspect is dat metingen aan quantumdeeltjes lastig zijn. Quantumdeeltjes hebben allerlei kenmerken die je afzonderlijk kan meten. Een probleem is dat een meting van een kenmerk van een quantumdeeltje een interactie met dat deeltje vereist. En bij een interactie treedt er een verstoring op. Dus als je een meting doet aan een kenmerk van een quantumdeeltje dan verandert de waarde van dat kenmerk. Dat principe kennen we ook uit de ons zichtbare wereld. Een

naald kan een bepaalde temperatuur hebben. Dat betekent dat de naald een hoeveelheid warmte-energie bevat. Als je de temperatuur van de naald wilt meten met een thermometer, dan hou je die thermometer tegen de naald, je onttrekt warmte aan de naald waarmee je het kwik opwarmt net zo lang tot het kwik en de naald dezelfde temperatuur hebben. De waarde van die temperatuur is dan af te lezen op de thermometer door de uitzetting van het kwik. Die waarde is echter veel lager dan de oorspronkelijke temperatuur van de naald omdat de energie die nodig is om het kwik op te warmen en de temperatuur weer te geven relatief groot is ten opzichte van de energie die de naald met een bepaalde temperatuur oorspronkelijk had. Je wilt een thermometer of meetinstrument dat een verwaarloosbare invloed heeft op de te meten waarde. Een soortgelijk probleem speelt ook met quantumdeeltjes. Quantumdeeltjes zijn zo klein dat je niet nog kleinere deeltjes hebt waarmee je de kenmerken van het quantumdeeltje kunt meten zonder die te meten kenmerken te verstoren. Dit is een lastige situatie: om quantumtechnologie te kunnen benutten moeten we de kenmerken van quantumdeeltjes kunnen meten, maar als we meten dan veranderen we die kenmerken. Anderzijds: die quantumdeeltjes zijn wel zo klein en gevoelig dat ze gebruikt kunnen worden voor extreem nauwkeurige metingen.

Een tweede aspect van quantumdeeltjes dat cruciaal is voor het gebruik in quantumtechnologie, is het 'entanglement effect'. Als je een paar quantumdeeltjes creëert zodat zij elkaars tegenpool zijn, dat wil zeggen dat de kenmerken van de quantumdeeltjes tegengesteld zijn, dan blijven die deeltjes onlosmakelijk verbonden, hoe ver ze ook uit elkaar zijn gehaald. In andere woorden: het is mogelijk om een paar quantumdeeltjes te creëren dat in al hun kenmerken tegengesteld is. Als het twee golven waren, dan zouden die golven, wanneer ze opgeteld worden, elkaar compleet opheffen. Als het twee deeltjes waren, dan zou momentum, spin, en polarisatie van die deeltjes precies tegengesteld zijn. Vanwege het gemengde golf/deeltje karakter van quantumdeeltjes geldt dit dus allemaal tegelijkertijd. Maar nu komt er iets onbegrijpelijks: als je die perfect tegengesteld gecorreleerde quantumdeeltjes uit elkaar haalt en je wijzigt de toestand van één

deeltje dan zal op hetzelfde moment de toestand van het andere deeltje, ook al is dat aan de andere kant van de wereld, ook wijzigen en wel zo dat de deeltjes perfect gecorreleerd blijven. Albert Einstein beredeneerde theoretisch dat dit zou moeten kunnen maar dacht dat dit onmogelijk was en dus voortkwam uit een fout in de theorie. Hij noemde dit fenomeen spookachtig ('spooky') omdat het volgens hem onmogelijk was dat informatie van het ene quantumdeeltje nog sneller dan de lichtsnelheid kan worden overgebracht naar het andere deeltje. Het effect is ondertussen echter meerdere keren experimenteel aangetoond. De theorie was dus goed en we moeten maar samen met Einstein accepteren dat dit spookachtige verschijnsel bestaat.

“We moeten samen met Einstein accepteren dat dit spookachtige verschijnsel bestaat.”

Om quantumtechnologie te begrijpen hebben we de bijzondere eigenschappen van quantumdeeltjes op de volgende pagina op een rij gezet. Quantumdeeltjes zijn extreem klein, hebben het gemengde karakter van een golf en een deeltje en voldoen niet aan de natuurkundewetten die we in het 'dagelijkse leven' kennen. De kenmerken van die quantumdeeltjes en de principes waaraan ze voldoen, zijn belangrijk voor het begrip van de functionaliteit van verschillende quantumtechnologieën.

Tabel 2-1: Kenmerken en principes van quantumdeeltjes op subatomair niveau

Kenmerken en principes van quantumdeeltjes	Korte Uitleg
1 Grootte	Een quantumdeeltje is een deeltje op subatomair niveau dat voldoet aan quantum-mechanische wetten die afwijken van de natuurkundewetten zoals wij die kennen uit ons dagelijkse leven.
2 Positie	Plaats van het deeltje.
3 Momentum	Snelheid * massa in een richting van het deeltje.
4 Polarisatie	Oriëntatie van het deeltje.
5 Spin	Rondtolsnelheid en richting van het deeltje om een as.
6 Gemengd golf/deeltje karakter	Een quantumdeeltje gedraagt zich soms als een deeltje en soms als een golf.
7 Tunnelling principe	Quantumdeeltje kan als een soort golf een barrière nemen met een bepaalde kans.
8 quantum size principe	Quantumdeeltje kunnen alleen bepaalde (discrete) hoeveelheden energie omvatten.
9 Superposition principe	Quantumdeeltjes toestanden kunnen als een soort golven worden opgeteld maar blijven dan met een kans in de ene en de andere toestand.
10 Onzekerheids principe	Van een quantumdeeltje kunnen niet alle kenmerken tegelijkertijd vastgesteld worden.
11 Observer principe	Als je een meting uitvoert om de toestand van een quantumdeeltje te bepalen, dan verandert die toestand.
12 Entanglement principe	Een paar van quantumdeeltjes, blijft altijd gekoppelde kenmerken houden (instantaan) hoe ver ze ook uit elkaar zijn gebracht.

Functionaliteiten

Functionaliteiten genoemd in de literatuur

Quantumtechnologieën zijn gebaseerd op de kenmerken en principes van quantum deeltjes of subatomaire deeltjes en kunnen benut worden voor het leveren van verschillende functionaliteiten. Quantumtechnologie is in feite een verzameling van verwante technologieën die verschillende functionaliteiten kunnen leveren. We zetten de meest genoemde functionaliteiten op een rij en geven op hoofdlijnen aan hoe elke functionaliteiten samenhangt met de kenmerken en principes. Tabel 2-2 geeft een overzicht met functionaliteiten van quantumtechnologieën.

Tabel 2-2: Functionaliteiten van quantumtechnologieën

Functionaliteit		Bron			
Term in literatuur	Korte omschrijving	Acin et al. (2018)	Spiller and Munro (2006)	Eureka	Physics World
Time-keeping	Super nauwkeurige tijdmeting				Time-keeping
Sensing and measuring	Super gevoelige metingen	quantum sensing and metrology	quantum sensing and detecting	Sensing and metrology	Sensing & measurement
Cryptography	Veilig versleutelen van data		Cryptography		
Key exchange	Verzenden van cryptogr. sleutel		quantum Key exchange		
Communication	Veilige en snelle telecommunicatie	quantum communication	quantum communication	Communication	Secure communication
Computing	Supersnelle berekeningen	quantum computation		Computing	Computing and AI
Simulation	Simulatie van complexe systemen	quantum simulation	quantum simulation	Simulation	
Imaging	-				Imaging
Games Auction	-		quantum games quantum auction		

Quantumtechnologieën zijn technologische doorbraken

Quantumtechnologieën kunnen worden gekarakteriseerd als technologische doorbraken. De verschillende technologieën zijn gebaseerd op een voor de wereld nieuwe technologische principes en kunnen leiden tot radicale innovaties. Quantumtechnologieën kunnen potentieel vele verschillende functionaliteiten leveren. Zowel de quantum communicatie als de quantum computertechnologieën kunnen leiden tot fundamentele veranderingen in de maatschappij omdat ze in meerdere domeinen van ons leven of in meerdere industrieën kunnen worden toegepast. De structuur van die domeinen of industrieën zal waarschijnlijk structureel veranderen bij gebruik van die technologieën (Roso, 2019, p.6). Quantumtechnologieën voldoen aan de definitie van een technologische doorbraak in bijlage 2.

De toepassingen van quantumtechnologieën zijn nog niet helemaal uitgekristalliseerd

De verschillende bronnen geven soortgelijke maar op detail verschillende verzamelingen van functionaliteiten. De functionaliteiten zijn niet allemaal van hetzelfde niveau. Computing is een generieke functionaliteit, terwijl tijdmeting een hele specifieke functionaliteit is. Soms overlappen functionaliteiten elkaar gedeeltelijk. Als computing mogelijk is dan maakt dat vervolgens allerlei computertoepassingen mogelijk, zoals games en simulatie. Verder vormen de functionaliteiten nog maar het begin van een heldere afbakening van mogelijke markttoepassingen.

Markttoepassingen, hoe omschrijf je die?

Een technologie kan worden gedefinieerd aan de hand van de combinatie van drie onderdelen: een technologische principe + een functionaliteit + een set basiscomponenten

Een markttoepassing van een technologie betekent dat de technologie in de vorm van een product of dienst, door een doelgroep van klanten in een bepaalde context voor een bepaalde doel wordt gebruikt (voorbeelden van doelen: vervullen behoefte, oplossen probleem, ...)

Hoe kunnen quantumdeeltjes verschillende functionaliteiten leveren?

Om quantumtechnologie (enigszins) te begrijpen is het nodig om te begrijpen hoe de kenmerken en principes van de subatomaire quantumdeeltjes (zie tabel 2-1) die functionaliteit kunnen leveren

Tijdmeting

Een quantumdeeltje, zoals een elektron, kan in verschillende banen rond de kern van een atoom bewegen. Tijdmeting maakt gebruik van het principe dat elektronen in verschillende banen rond een atoom kunnen bewegen en dat de energie van de transitie van de ene toestand naar de andere toestand wordt opgenomen en wordt vrijgegeven door golven met een heel nauw begrensde frequentie. De meting van die frequentie wordt vervolgens gebruikt om de tijdseenheid van de seconde vast te stellen en te definiëren. Het Cesium-133 atoom bijvoorbeeld heeft een frequentie van 9192,631770 \pm 0.000020 MHz. Wanneer die frequentie gemeten wordt, dan kan heel precies een seconde worden vastgesteld als eenheid van tijd. Quantumtechnologie kan dus veel nauwkeuriger de tijd meten dan voor die tijd mogelijk was met allerlei geavanceerde klokken. Het nauwkeurig meten van de tijd is cruciaal in veel dagelijkse toepassingen, zoals het gebruik van GPS-systemen die dan nog nauwkeuriger kunnen worden. Op dit moment is standaard GPS nauwkeurig op een afstand van +/-2 meter. Dat is genoeg om veilig met een boot de haven van Scheveningen in te varen, maar absoluut onvoldoende om bij de bouw van een brug een onderdeel te plaatsen.

Sensoren en meetinstrumenten

Het feit dat quantumdeeltjes heel klein zijn, maakt ze ook zeer gevoelig en dus geschikt om metingen uit te voeren. Quantumtechnologie kan bijvoorbeeld gebruikt worden voor het heel precies meten van de zwaartekracht, van hele zwakke magnetische velden, van versnellingen of veranderingen in richting van bewegende voorwerpen. Dat lijkt op het eerste gezicht niet heel erg interessant maar het is goed om te bedenken dat het beter meten en waarnemen van fenomenen vaak leidt tot een enorme reeks nieuwe

uitvindingen. De microscoop heeft als nauwkeurig meetinstrument tot zeer belangrijke vindingen geleid zoals het detecteren van bacteriën en het daardoor kunnen verklaren en voorkomen van een hele reeks van ziektes. In de wetenschap worden vaak grote sprongen gemaakt als de meetmethode een factor nauwkeuriger wordt. Quantumtechnologie maakt metingen veel nauwkeuriger en kan dus ook leiden tot grote nieuwe vindingen (Arthur, 2009). Apparatuur die precies versnellingen en veranderingen van richting meet kan overigens gebruikt worden voor plaatsbepaling in vliegtuigen en auto's en kan dus veel praktische waarde hebben.

Cryptografie

Random keys zijn willekeurige of toevallige getallen die gegenereerd worden en die als basis dienen voor een protocol om een boodschap te versleutelen. Bijvoorbeeld, het getal "2" kan een sleutel vormen waarin alle letters van een tekstboodschap worden vervangen door letters die twee posities verder in het alfabet staan. Het woord "alfabet" wordt dan versleuteld tot "cuhcdgv". Voor cryptografie is het belangrijk dat de sleutel (het getal) echt random en dus moeilijk te achterhalen is. Iedere computer heeft een random number generator. Het probleem is dat die random number generator niet echt random is maar een ingewikkelde berekening die een benadering van een random getal oplevert. En die berekening is door een hele krachtige computer te achterhalen. Er wordt dan ook gezegd dat de NSA versleutelde berichten kan ontcijferen omdat ze beschikt over zeer krachtige computers¹ (zie Bone Castro, 1997, p.2). Quantumtechnologie kan gebruikt worden om de met gewone computers gegenereerde random numbers te ontcijferen. Quantumtechnologie kan echter ook gebruikt worden voor het genereren van échte random numbers en kan dus als basis dienen voor veilige versleuteling van data in telecommunicatie.

Key exchange

Het maken van een cryptografische sleutel is een belangrijke stap voor het veilig versleutelen van data. Het is echter belangrijk dat die sleutel niet alleen bij de

¹ <https://www.businessinsider.com/quantum-technology-2017-7?international=true&r=US&IR=T>

zender beschikbaar is om het bericht te versleutelen maar ook bij de ontvanger om haar te ontcijferen. De sleutel moet dus worden gedeeld maar mag niet in verkeerde handen vallen. Quantumtechnologie kan worden gebruikt om een dergelijke sleutel veilig te verzenden. Als iemand tijdens verzending de sleutel onderschept dan is dat zichtbaar bij de zender en ontvanger omdat de sleutel dan is veranderd (zie kenmerk 11 van tabel 2-1). Je zou als metafoor kunnen zeggen dat een sleutel verbuigt als iemand hem onbedoeld gebruikt. Als de sleutel is onderschept, dan verstuurt je het bericht gewoon niet met de sleutel maar maak je opnieuw een andere sleutel aan. Net zo lang tot de sleutel ongezien is gearriveerd. Daarna kun je veilig de versleutelde boodschap verzenden omdat alleen zender en ontvanger beschikken over de sleutel. Quantumtechnologie kan dus veilig dataverkeer mogelijk maken.

Communicatie

Het 'entanglement principe' beschrijft hoe een paar quantumdeeltjes volledig gekoppeld kan zijn en wel zo dat de beide deeltjes precies tegengestelde kenmerken hebben: dus de spin en polarisatie zijn precies omgekeerd. Het 'entanglement principe' beschrijft tevens dat als één van de beide deeltjes wordt gemanipuleerd waardoor de kenmerken van dat deeltje wijzigen, het andere deeltje, al is het aan de andere kant van de wereld, op hetzelfde moment ook een wijziging ondergaat. Dat effect betekent dus dat je oneindig snel een boodschap kunt doorgeven of kunt communiceren. Met de telecommunicatie die we nu kennen, wordt informatie gecommuniceerd met een maximale snelheid, de snelheid van het licht. Met quantumtechnologie kan dat dus veel sneller vandaar de functionaliteit 'communicatie'. Telecommunicatie kan een belangrijke toepassing van quantumtechnologie zijn. Er wordt al druk gewerkt aan een 'quantum Internet'.

Computing

Als je quantumdeeltjes kunt manipuleren om een eindig aantal duidelijk verschillende kenmerken te krijgen, waarbij als input het ene deeltje wordt gemanipuleerd en als output het andere deeltje een soortgelijke

verandering ondergaat, dan wordt veel mogelijk. Zoals met een grote verzameling deeltjes getallen te vormen, bewerkingen op dergelijke getallen uit te voeren en een computer te bouwen. Die computer is dan gebaseerd op het 'entanglement principe' en op het 'superposition principe'. De functionaliteit 'computing' kan tevens de basis vormen voor een groot aantal verschillende toepassingen. Computing is een belangrijk onderdeel van een aantal andere genoemde toepassingen zoals 'cryptografie', 'simulation', 'imaging' en 'gaming'.

Quantum computing op basis van qubits maakt het mogelijk om veel sneller te rekenen dan met een gewone computer op basis van bits. Bits kunnen de waarde "0" of "1" aannemen. Die waarden corresponderen met een schakeling waar "wel" of "geen" stroom door loopt. Als je nu meerdere dergelijke schakelingen combineert, dan kun je berekeningen uitvoeren zoals optellingen. Een qubit verschilt van een bit omdat het meerdere waarden tegelijkertijd kan aannemen. In de quantumtechnologie kan een subatomair deeltje een superpositie van meerdere waarden representeren. Je kan dus als het ware meerdere berekeningen tegelijkertijd uitvoeren en dat gaat een stuk sneller dan met de huidige computer.

Het vergroten van de capaciteit van computers is bijvoorbeeld van belang in de medische wetenschap. Voor het ontwikkelen van medicijnen is het belangrijk om het precieze gedrag van een molecuul in het menselijke lichaam te weten. De huidige supercomputers kunnen het gedrag van een eenvoudig molecuul, bestaande uit maximaal 4 atomen, simuleren. Medicijnen kunnen echter uit veel grotere moleculen bestaan en voor het simuleren van hun effect op het menselijke lichaam, of op een virus of bacterie, zal een quantum computer nodig zijn.

Quantum technologieën als discipline

Definitie van quantum discipline

Een discipline kan slaan op een combinatie van technologieën, op kennis, op processen of op een netwerk van actoren. Centraal in een discipline staan een aantal samenhangende technologische principes en de functionaliteiten die met die principes kunnen worden geleverd. Tabel 2-3 toont de uitsplitsing van de discipline quantumtechnologie in verschillende generieke en specifieke functionaliteiten.

Tabel 2-3 beschrijft een discipline als een verzameling samenhangende technologieën die wordt weergegeven als vertakkingen. De eerste vertakkingen vormen technologieën met generieke functionaliteiten, zoals we die in dit rapport beschrijven. De volgende vertakkingen zijn specifieke functionaliteiten; in de

praktijk zijn dat vaak productvarianten van een bepaalde technologie. Die eerste vertakkingen vormen dus afzonderlijke technologieën elk met hun eigen patroon van ontwikkeling en verspreiding en elk met hun eigen factoren die de verder ontwikkeling en verspreiding beïnvloeden.

Tabel 2-3: Het boomdiagram van quantumtechnologie

Discipline	Generieke Functionaliteiten	Specifieke Functionaliteiten	Discipline als boomdiagram van functionaliteiten
quantum	Measuring/sensing	Tijdmeting Zwaartekracht meting Meting van magnetisme Meting van trillingen	
	Communicating	Cryptography Random number creatie quantum Key distribution quantum Internet	
	Computing	Computing specifiek Computing generiek Simulation	

Voorspellingen over quantumtechnologie

Het belang van de quantum discipline uit zich bijvoorbeeld in allerlei voorspellingen. In het onderstaande tekstblok staat een selectie van voorspellingen.

“De potentiële toekomstige impact van quantum op de informatietechnologie en daardoor ook op de maatschappij is enorm.” — Jean-Louis Roso, Senior business development manager TNO. *Essay Verkenning quantum Technologie (2019)*, p.6.

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 semicondustrie 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. (*Nationale agenda quantumtechnologie, 2019, samenvatting*)

Via het quantuminternet kunnen quantumcomputers informatie uitwisselen met behoud van quantumeigenschappen en zonder dat deze quantuminformatie afgeluisterd kan worden: de eerste quantum backbone in Nederland is naar verwachting binnen enkele jaren operationeel (*Computable, 2019*).

Batteries that last 10 years per charge. MRI scanners the size of smartphones. Medical sensors that diagnose disease with nothing more than a breath sample. At Moscow's fourth annual International Conference on quantum Technologies, the world's quantum physics community acknowledges this fantastic-sounding stuff as completely realistic. <https://www.businessinsider.com/quantum-technology-2017-7?international=true&r=US&IR=T> (2019-11-12)

Recent efforts are being made to engineer quantum sensing devices, so that they are cheaper, easier to use, more portable, lighter and consume less power. It is believed that if these efforts are successful, it will lead to multiple commercial markets, such as for the monitoring of oil and gas deposits, or in construction.

https://en.wikipedia.org/wiki/quantum_technology (visited 2019-11-12)

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. (*Nationale agenda quantumtechnologie, 2019, p.21*)

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. (*Nationale agenda quantumtechnologie, 2019, p.29*)

Voorspellingen kunnen heel belangrijk zijn voor de ontwikkeling van een technologische discipline. De voorspellingen kunnen doelen aangeven en een onderdeel vormen van een visie die verschillende partijen richting kan geven en die partijen kan laten samenwerken zodat die doelen bereikt worden. Voorspellingen scheppen verwachtingen die partijen in beweging kunnen brengen. Dat is belangrijk omdat de toepassing van quantumtechnologieën vereist dat een breed scala van marktpartijen en overheden hun activiteiten op elkaar afstemmen. Verder kunnen voorspellingen ook een rol spelen in de informatievoorziening over een nieuwe discipline naar de bevolking. Deze effecten van voorspellingen lijken een beetje op het effect van de voorspelling “we are putting a man on the moon”.² Die voorspelling (of visie), uitgesproken door Kennedy, vormde een doel dat richting gaf aan de samenwerking van veel organisaties om uiteindelijk de eerste maanlanding mogelijk te maken. Het probleem met nieuwe technologie is dat de verschillende toepassingen en productvormen vaak slecht te voorzien zijn in het begin van de ontwikkeling van de technologie en dat visies dus ook vaak beperkend en misleidend kunnen zijn. Het doel van quantumtechnologie is minder eenduidig dan een mens op de maan zetten.

De informatie en de voorspellingen over quantumtechnologie komen op dit moment hoofdzakelijk van wetenschappers en goed geïnformeerde experts en beleidsmakers. In dit stadium gaan de voorspellingen vooral over de (technische) mogelijkheden van quantumtechnologie, over de termijn waarin die mogelijkheden beschikbaar komen en over de verwachte toepassingen en de voordelen van quantumtechnologie in onze maatschappij. Dat geeft een nogal rooskleurig beeld van de technologie.

Het is waarschijnlijk door de complexiteit van quantumtechnologie dat er ook onzinnige voorspellingen zullen ontstaan. Zoiets is zo oud als het fenomeen van technologische innovatie. Snel rijdende treinen in de 19de eeuw (die reden wel 40 kilometer per uur!!) zouden koeien zo van slag maken dat ze geen melk

meer zouden geven. Magnetrons zouden eten radioactief maken en dus kankerverwekkend zijn. Corona zou veroorzaakt zijn door 5G-straling. Allemaal onzinnige voorspellingen. Ook voor quantumtechnologie gaan zulke onzinnige voorspellingen komen en die kunnen zich via het Internet en social media snel verspreiden. De verschillende voorspellingen zullen waarschijnlijk leiden tot een debat tussen groepen die elkaars taal niet spreken.

Op het moment dat de eerste toepassingen van quantumtechnologie tot problemen zullen leiden, zullen de negatieve voorspellingen aan. Er is zelden een technologie ontwikkeld zonder dat er dingen fout gingen of ongelukken gebeurden. Het vakgebied ‘geschiedenis van de technologie’ laat vele voorbeelden zien. Met het ontstaan van problemen, onbedoelde bijeffecten en ongelukken blijkt vaak dat de experts nogal rooskleurige voorspellingen hebben gedaan. Die constatering levert brandstof voor de mensen die onzinnige voorspellingen deden en zal nu worden ondersteund door mensen met kennis van zaken die zich zorgen maken. Het debat verschuift dan.

Het verloop van de verwachtingen over een nieuwe technologie wordt gestileerd weergegeven in de Gartner’s Hype Cycle (Dedehayir en Steinert, 2016). Die curve geeft aan dat in het begin van een technologische ontwikkelingen hele hoge verwachtingen bestaan. Echter wanneer de ontwikkeling veel langer duurt dan verwacht, of wanneer beperkingen, problemen, negatieve bijeffecten en ongelukken optreden bij de eerste toepassingen dan stort de huizenhoge verwachting in als een kaartenhuis. Pas na verloop van tijd groeien de verwachtingen weer. Het lijkt wel of de verwachtingen eerst ver voor de realiteit uitlopen, terwijl ze later enorm achterlopen. Als je het feitelijke patroon van ontwikkeling en verspreiding naast het patroon van de Hype Cycle zet, kun je concluderen dat verwachtingen niet gesynchroniseerd zijn met de realiteit en dat dit zo is tot ver in de laatste fase, de stabilisatiefase, van het patroon.

² De speech waarin de voorspelling werd gedaan werd gegeven door president John F. Kennedy in het Rice Stadion in Houston, Texas, op 12 September 1962.

De maatschappelijke verwachtingen over quantumtechnologie lijken zich nog in het eerste stadium, de zogenaamde hype te bevinden. Feit is dat mogelijke negatieve effecten van quantumtechnologie nog te weinig worden belicht en dat er nog nauwelijks sprake is van een debat of een afweging van voor- en nadelen van het gebruik van de nieuwe technologie. Wel wordt de mogelijkheid genoemd dat quantum computers versleutelde berichten kunnen ontcijferen en dat daarmee veiligheid en privacy in het geding komen. In 'Essay Verkenning quantum Technologie' (2019) wordt een voorzichtig begin gemaakt met afwegingen tussen voor- en nadelen (zie bijgaande tekst).

Goede informatie en een rustige afweging van alle belangen van betrokken stakeholders is een belangrijk onderdeel van het broodnodige debat over nieuwe technologie. Daar is veel ervaring mee in het wetenschappelijke domein van "Technology Assessment" (Banta, 2009; Grunwald, 2009; Tran and Daim, 2008) of meer recent van "Responsible Innovation" (bijvoorbeeld Ortt et al., 2020). Voor quantumtechnologie is een voorzichtig begin gemaakt onder wetenschappers, maar het maatschappelijk debat moet eigenlijk nog beginnen.

"Zo kan quantumtechnologie mogelijk ook leiden tot een grotere economische ongelijkheid (tussen have's en have not's), criminele netwerken die niet meer afgeluisterd kunnen worden ('is dat gewenst?') of drastisch veranderende geopolitieke verhoudingen (economisch, maar ook militair). Quantumtechnologie wordt daarom algemeen beschouwd als een strategisch zeer belangrijke asset; door landen, maar ook door bedrijven. Ook de rol van quantumcomputers in de ontwikkeling van artificial intelligence kan vragen oproepen."

Essay Verkenning quantum Technologie (2019), p.24.

Hoofdstuk 2

Patroon en factoren

voor de ontwikkeling
en verspreiding van
quantumtechnologie



Inleiding

Dit hoofdstuk gaat over de patronen van ontwikkeling en verspreiding van afzonderlijke quantumtechnologieën. We besteden aandacht aan factoren die de ontwikkeling en verspreiding van quantumtechnologie belemmeren of juist stimuleren.

We focussen op drie basisfunctionaliteiten van quantumtechnologie:

1. Meet- en waarnemingstechnologie.
2. Communicatietechnologie.
3. Computertechnologie.

We kijken naar een paar specifieke varianten:

- Meet- en waarnemingstechnologie met specifieke aandacht voor de atoomklok;
- Communicatietechnologie met specifieke aandacht voor cryptografie;
- Computertechnologie met specifieke aandacht voor de eerste generieke computer.

De atoomklok en andere quantum meet- en waarneming technologie

Definitie van de technologie van de atoomklok

De atoomklok meet de tijd (om precies te zijn: de lengte van een seconde) door gebruik te maken van het principe dat elektronen in verschillende banen rond een atoom kunnen bewegen en dat de energie van de transitie van de ene toestand naar de andere toestand wordt opgenomen en wordt vrijgegeven door golven met een heel nauw begrensde frequentie. De meting van die frequentie wordt vervolgens gebruikt om de tijdseenheid van de seconde vast te stellen en te definiëren.

Een atoomklok bestaat uit twee hoofdcomponenten. De eerste is een uiterst nauwkeurige quartz klok en de tweede component meet de frequentie die een atoom opneemt of uitzendt wanneer elektronen van baan veranderen rond het atoom. De tweede component kalibreert de quartz klok als het ware. Die tweede hoofdcomponent bestaat uit een aantal delen, allereerst een deel dat het mogelijk maakt om atomen in een bepaalde toestand te selecteren (dat gebeurt vaak met een magnetisch veld in vacuüm en in extreem gekoelde toestand). Die geselecteerde atomen worden vervolgens middels golven (met een frequentie die een beetje schommelt rond de juiste waarde) in een aangeslagen toestand gebracht. De frequentie waarbij de golven worden geabsorbeerd is precies de juiste frequentie. Daarna vallen de elektronen weer terug naar de basistoestand terwijl ze golven uitzenden met opnieuw die hele specifieke frequentie. Die frequentie vormt de basis voor het meten en definiëren van de tijd.

De technologie van de atoomklok kan als volgt worden gedefinieerd:

Functionaliteit:

Meting van frequentie en meting van tijdseenheid.

Technologisch principe:

Meting van de frequentie van de golven die worden opgenomen of uitgezonden als elektronen rond een atoom van baan veranderen. Hier kunnen verschillende atomen voor worden gebruikt maar de standaard waarmee de seconde wordt gemeten wordt bepaald met het Cesium 133 atoom.

Basiscomponenten:

Quartz klok en component om frequentie van transitie van elektron in atoom te meten en vervolgens te gebruiken om de Quartz klok te kalibreren.

Patroon van ontwikkeling en verspreiding van de atoomklok

Het exact definiëren en meten van basisgegevens zoals de seconde (tijd) de meter (afstand) en de kilo (gewicht) werd in de VS belangrijk gevonden voor het algemeen functioneren van de maatschappij en ook van de industrie en wetenschap. In 1901 werd daarom het National Bureau of Standards (NBS) opgericht. In dat bureau werd ook wetenschappelijk onderzoek gedaan dat de basis vormde voor verschillende standaarden. In 1948 werd het principe van de atoomklok gedemonstreerd (Forman, 1985; Lombardi et al., 2007; Sullivan, 2001).

De klok was gebaseerd op de frequentie die door ammonia wordt afgegeven of opgenomen als de elektronen van baan veranderen. De eerste atoomklokken werden niet gebruikt voor officiële tijdmetingen. Ze waren in het begin ook minder nauwkeurig dan de op dat moment gangbare standaard tijdmeting met geavanceerde quartz klokken. Na de uitvinding en demonstratie van het principe van de atoomklok volgde een lange periode waarin het technologische principe stapsgewijs werd verbeterd.

In 1956 wordt dan de eerste atoomklok als product verkocht. De klok werd geproduceerd door de "National Company of Malden" (in het kort: Natco) en van dit type atoomklok, dat werd gemaakt onder de productnaam 'Atomichron', zijn er ongeveer 50 verkocht. De klok was groot, duur, onhandig maar heel nauwkeurig. De financiering voor het ontwikkelen en maken van dergelijke klokken kwam hoofdzakelijk uit militaire hoek en 90% van de klokken werd dan ook gebruikt voor militair

doeleinden. Een klein gedeelte ging naar andere delen van de overheid in binnen- en buitenland. De klok is commercieel gezien geen groot succes, Natco gaat in 1969 failliet (Forman, 1985).

In dezelfde periode, in 1964, komt Hewlett-Packard met een atoomklok, de 5060 geheten, op de markt die de basis vormt voor een reeks van atoomklokken tot nu toe (Lombardi, 2017). In 1967 wordt wereldwijd een standaard vastgelegd voor de tijd met een atoomklok op basis van Cesium 133. Vanaf dat moment wordt de atoomtijd op grote schaal gebruikt, ook al zijn er nog maar een paar atoomklokken. Vanaf 1967 komen er allerlei diensten op de markt om de tijd aan te geven. Het "National Bureau of Standards" (NBS), later het "National Institute for Science and Technology" (NIST) geheten, komt met allerlei diensten op de markt. Vanaf 1974 wordt de tijd via geostationaire satellieten doorgegeven, vanaf halverwege de jaren '80 wordt de tijd meegezonden met het GPS-sigitaal via andere

satellieten, In 1988 volgt een automatische computer tijd service en vanaf 1993 is er een Internet tijd service. Daarnaast kan de tijd via de telefoon, radio en televisie worden verkregen.

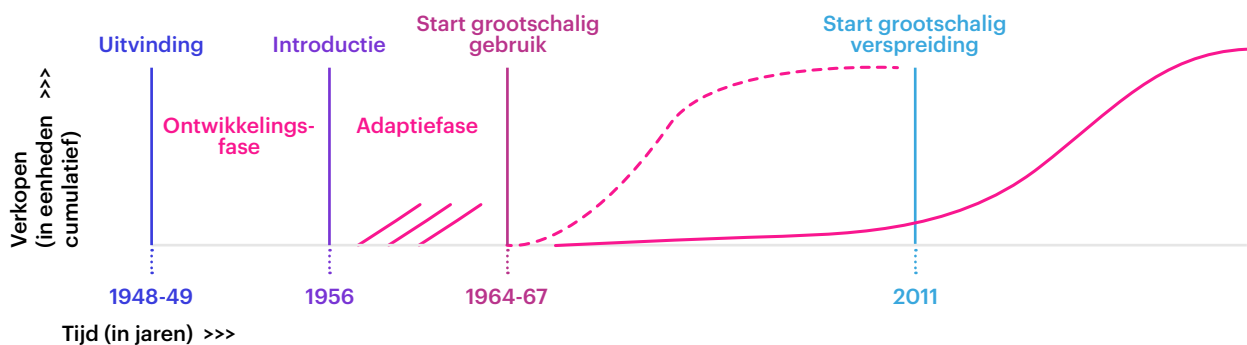
De periode tussen 1964-1967 is het begin van de grootschalige verspreiding van *het gebruik* van een klein aantal atoomklokken. We beschouwen de periode rond 1967 als de start van grootschalige diffusie van de "atoomtijd", maar de grootschalige productie en verspreiding van grote aantallen *atoomklokken* begint pas veel later, ongeveer vanaf 2011.

Figuur 3-1 is een gestileerde versie van het patroon van ontwikkeling en verspreiding op basis van historische gegevens. Het geeft een indruk van het aantal atoomklokken in de loop van de tijd in het verleden. Figuur 3-2 (onderstaand) daarentegen geeft een inschatting van het aantal atoomklokken voor civiel gebruik in de naaste toekomst. Figuur 3-1 impliceert op basis van onze gegevens dat industriële productie en grootschalige diffusie al enige tijd geleden (vanaf 2011) is begonnen. Figuur 3-2 geeft de verwachting dat de verkoop van atoomklokken voor civiel gebruik fors zal groeien, tot ongeveer 1 miljard exemplaren in de komende 10 jaar.

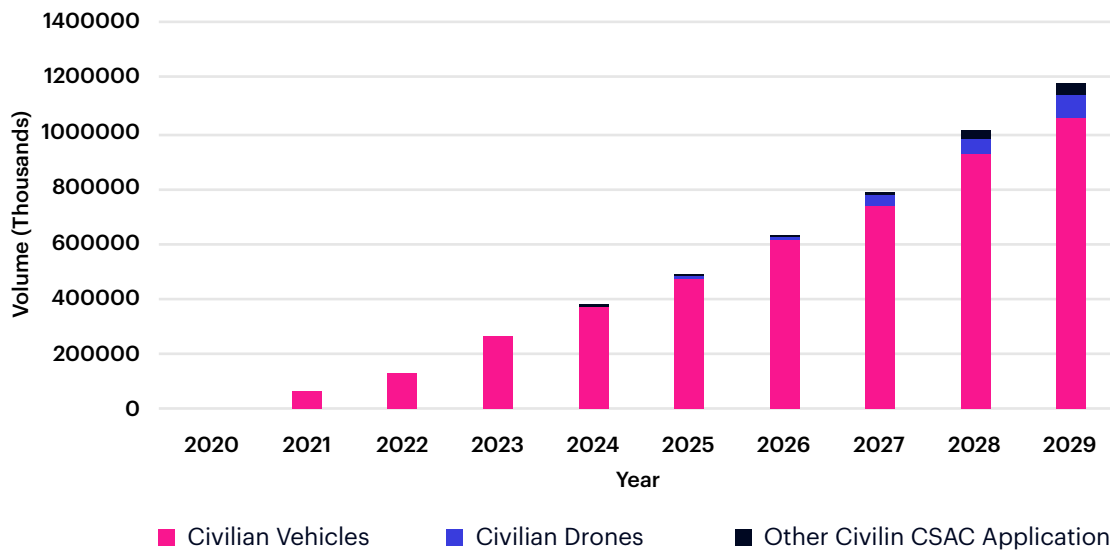
Tabel 3-1: Data van het patroon voor atoomklokken

Jaar	Gebeurtenis	Lengte van fasen		Bron
1948-49	Uitvinding	Ontwikkelings-fase	+/- 8 jaar	(Sullivan, 2001; Forman, 1985)
1956	Introductie	Adaptatiefase deel 1	+/- 10 jaar	(Lombardi et al., 2007)
1964-1967	Start grootschalig gebruik van de "atoomtijd" met klein aantal klokken.	Adaptatiefase deel 2	+/- 45 jaar	(Kitching, 2018)
2011	Start industriële productie en grootschalige diffusie van atoomklokken.			

Figuur 3-1: Patroon van ontwikkeling en verspreiding van atoomklokken



Figuur 3-2: Verkopen van atoomklokken voor civiel gebruik



<https://www.globenewswire.com/news-release/2020/03/09/1997369/0/en/Inside-quantum-Technology-Report-Shows-Atomic-Clock-Market-Accelerating-Towards-1-billion.html>

Opvallend in figuur 3-2 is, naast de verwachte groei van de verkopen, de onderverdeling van de markt voor atoomklokken. Hierbij is verreweg het grootste gedeelte verkocht voor voertuigen, en een veel kleiner gedeelte voor drones en andere toepassingen. Klokken in voertuigen en drones worden gebruikt voor plaatsbepaling. Een precieze tijdmeting is van belang voor verschillende systemen van plaatsbepaling. De tijdmeting is cruciaal in GPS-systemen. De tijdmeting is ook cruciaal voor plaatsbepaling als GPS niet beschikbaar is of niet is toegestaan. Figuur 3-2 geeft verwachte aantallen atoomklokken voor civiel gebruik, maar de verwachte aantallen zijn veel groter en de curve begint ook waarschijnlijk eerder te stijgen als je militair gebruik zou meenemen. Wij hebben daar geen data over.

Onder figuur 3-2 staat CSAC, dat staat voor Chip-Scale-Atomic-Clocks. In begin 2000 werd het mogelijk om een atoomklok op chipformaat te maken. Onderzoek en ontwikkeling van dergelijke klokken in de VS was aanvankelijk primair voor militair gebruik. De chips werden zo klein en goedkoop dat ze ook konden worden gebruikt voor plaatsbepaling van militairen op het slagveld, voor drones, en zelfs voor eenmalig gebruik op projectielen. In 2011 volgde een commerciële civiele introductie van dergelijke Chip-Scale-Atomic-Clocks (CSACs). Atoomklokken zijn dus beschikbaar op een chip als component die in allerlei systemen kan worden gebruikt en dat betekent ook dat vanaf 2011 goedkopere kleinere atoomklokken beschikbaar kwamen op grote schaal (Kitching, 2018).

For example, the Aluminum ion logic clock's world-record time-keeping performance was due in part to this clock's insensitivity to changes in magnetic fields, electrical fields, and temperature. This insensitivity is highly desirable for the best timekeeping results. But it also means the aluminum ion clock is not a good candidate for measuring magnetic and electrical fields or temperature, whereas other NIST atomic clocks have greater sensitivity to those quantities. <https://www.nist.gov/news-events/news/2014/02/new-era-atomic-clocks> (2020-02-05)

Andere quantum meet- en waarnemingstechnologieën

De atoomklok vormt de start van een reeks van gerelateerde technologieën waarmee heel precies metingen kunnen worden verricht. De atoomklok is extreem nauwkeurig maar daardoor ook gevoelig voor de kleinste afwijkingen of verstoringen. Verstoringen kunnen ontstaan door variatie in de zwaartekracht op verschillende plaatsen op aarde, maar ook door elektromagnetische velden (zoals door de magnetische Noordpool) versnellingen of veranderingen van richting van een platform waarop de atoomklok staat. Die verstoring zijn vervelend voor het meten van de tijd maar kunnen juist goed gebruikt worden als het doel is om die verstoringen zelf precies te meten.

Naast de tijdmetingen ontstaat dus een aantal verwante technologieën gebaseerd op quantumtechnologie voor het meten van zaken zoals de exacte zwaartekracht op een bepaalde locatie of precieze metingen aan magnetische velden. Dergelijke metingen zijn belangrijk voor wetenschappelijk werk. Het precies meten van versnellingen of verande-

ringen van richting daarentegen is belangrijk voor systemen die de positie van vliegtuigen en andere voertuigen bepalen, in aanvulling op het gebruik van GPS. Dergelijke metingen zijn dus belangrijk voor ons dagelijks leven.

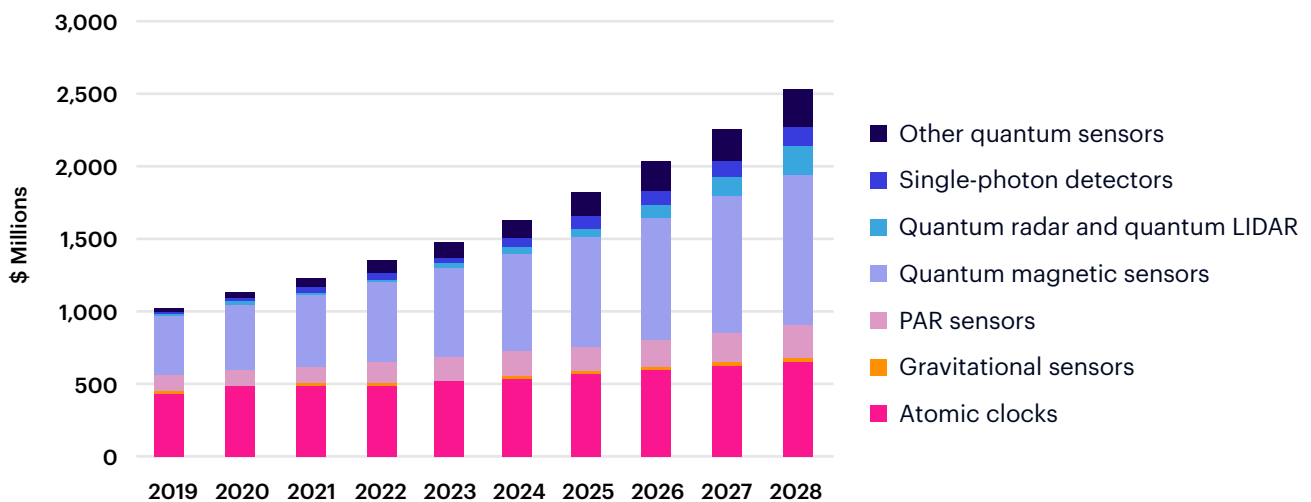
“De atoomklok is extreem nauwkeurig maar daardoor ook gevoelig voor de kleinste afwijkingen of verstoringen.”

Figuur 3-3 geeft een inschatting van de toekomstige markt voor quantum sensortechnologie.

Figuur 3-3 geeft aan dat er verschillende markten zijn voor quantum sensortechnologie afhankelijk van de specifieke functionaliteit. De technologieën met specifieke functionaliteiten zoals de atoomklokken, zwaartekracht sensoren (gravitational sensors) en magnetische sensors spreken voor zich. Een PAR-sensor meet fotosynthetische actieve straling. Fotosynthese vindt plaats in planten als ze lichtenergie gebruiken om koolstofdioxide om te zetten in koolhydraten, zoals glucose. Hier komt zuurstof bij vrij. Dit soort sensoren wordt bijvoorbeeld in de tuinbouw gebruikt.³ Een foton detector (single foton detectors) meet de aanwezigheid van minieme pakketjes licht (fotonen). Foton detectors worden commercieel aangeboden door verschillende bedrijven.⁴

De markt voor atoomklokken is nu samen met de markt voor zwaartekrachtmetingen het grootst, maar ook andere toepassingen van de sensoren komen langzaam op volgens deze voorspelling. Figuur 3-3 duidt behalve de relatieve grootte van deelmarkten ook op een volgorde in de tijd van toepassingen voor quantum sensortechnologie. De atoomklok was de eerste toepassing, snel daarna ontstonden de magnetische en zwaartekracht sensoren. Daarna volgden andere toepassingen.

Figuur 3-3: Voorspelde verkopen van quantum sensoren



https://www.insidequantumtechnology.com/51544829_754765628238106_4068148771723149312_n/

³ <https://www.nieuwkoopbv.nl/nl/product/par-sensor-lp471par/>

⁴ <https://www.idquantique.com/quantum-sensing/products/id230>

Belemmerende en stimulerende factoren voor quantum meet- en waarnemings-technologie

De atoomklok wordt op grote schaal gebruikt en is in de loop van de jaren verder geperfectioneerd. Dat is ook zichtbaar in het dashboard van alle relevante technische, sociale en markt-factoren die ontwikkeling en verspreiding kunnen belemmeren of stimuleren. Al die factoren staan al een tijd op groen. Alleen de prijs kan nog een belemmering vormen, een atoomklok is niet goedkoop, maar is tegenwoordig voor ongeveer 1000 Euro te koop.⁵ Een PAR-sensor is te koop voor ongeveer 400 Euro. Deze en andere quantum sensor systemen worden met name in professionele markten verkocht.

Toelichting bij de Tabel 3-2:

(1) De factoren worden gedefinieerd en hun gebruik wordt uitgelegd in Bijlage 1 waarin de methode van de technologie monitor op een rij wordt gezet.

(2) Een groene kleur betekent dat de factor een positieve invloed heeft of geen belemmering vormt voor grootschalige toepassing en verspreiding van de technologie.

Tabel 3-2: Factoren voor meet- en waarnemings quantumtechnologie⁶

Kernfactoren		Beïnvloedende factoren	
1 Productprestatie	■	8 Kennis van technologie	■
2 Productprijs	■	9 Kennis van toepassingen	■
3 Productiesysteem	■	10 Werknemers en grondstoffen	■
4 Complementaire producten en diensten	■	11 Financiële middelen	■
5 Actoren en netwerkvorming	■	12 Macro-economische en strategische aspecten	■
6 Klanten	■	13 Socio-culturele aspecten	■
7 Normen, regels en wetten	■	14 Ongelukken en onverwachte gebeurtenissen	■

⁵ <https://www.electronicdesign.com/technologies/analog/article/21806867/cant-afford-an-atomic-clock-get-a-molecular-one>

⁶ Naast deze tabel geven we geen uitsplitsing van alle data. Dat zullen we wel doen voor quantum communicatie en quantum computing omdat die technologieën nog te maken hebben met aanzienlijke barrières voor grootschalige verspreiding.

Quantum cryptografie en andere quantum communicatie technologie

Definitie van de technologie: quantum communicatie

Quantum communicatie is een verzameling van technologieën die razendsnelle en veilige vormen van (tele)communicatie mogelijk maakt. In de toekomst zou er bijvoorbeeld een volledig quantum Internet kunnen komen waarin nog sneller dan de lichtsnelheid wordt gecommuniceerd op een compleet veilige manier.

Er zijn verschillende manieren of principes van quantum-communicatie. Een eerste principe is het verzenden van quantumdeeltjes via glasvezelkabel of met lichtbundels door de lucht (ook wel 'line-of-sight' genoemd) waarbij bepaalde karakteristieken van het deeltje, zoals de spin worden gebruikt om informatie over te dragen met de snelheid van het licht. Een tweede principe is het overdragen van informatie via gekoppelde deeltjes volgens het 'entanglement' principe (dit wordt ook wel teleportatie genoemd).

In de praktijk zijn voor telecommunicatie via telefonie, satellieten of Internet allerlei

componenten nodig die samen een communicatiesysteem vormen, zoals randapparatuur (tablets, pc's, mobiele telefoons), een netwerk met vertakkingen, schakelingen en versterking om het signaal over grote afstand te versterken. Dat geeft ook aan hoe verweven quantum computing en quantum communicatie zijn. Het probleem is alleen dat niet al die componenten al gemaakt kunnen worden met of voor quantumtechnologie. Bij het eerste principe (het verzenden van quantumdeeltjes via glasvezelkabel of via de lucht) is het probleem dat die deeltjes heel gevoelig zijn voor de omgeving. Dat betekent dat een versterker of schakeling die nodig is om de informatie van

gebruiker een naar gebruiker twee te routeren tevens leidt tot verstoring van de informatie ('observer principe'). Bij het tweede principe is het probleem dat de twee gekoppelde quantumdeeltjes maar heel kort stabiel zijn en dus maar kort gebruikt kunnen worden.

Dat is de reden dat specifieke onderdelen van het communicatiesysteem worden gemaakt en geleverd met behulp van quantumtechnologie en dat die technologie in een hybride combinatie met bestaande communicatiesystemen wordt gebruikt. Een hybride combinatie van oude en nieuwe technologie is in de geschiedenis van de technologie heel vaak een manier geweest om nieuwe technologie stapsgewijs in te voeren. Kijk naar de eerste vrachtschepen in het begin van de twintigste eeuw die zowel een motor als zeilen hadden en naar de huidige auto's met hybride aandrijving. De hybride strategie kan een logische strategie zijn om een nieuwe technologie in te voeren als de infrastructuur rond de oude technologie op die manier kan worden hergebruikt voor de nieuwe technologie. Dat is in het geval van quantum communicatie heel verstandig omdat niet alle componenten van een compleet quantum communicatiesysteem beschikbaar zijn en omdat het heel kostbaar is om een compleet nieuw systeem op te bouwen en daar voldoende gebruikers voor te winnen.

Definitie van de technologie: Cryptografie met quantumtechnologie

Eén van de eerste onderdelen van het communicatiesysteem waar quantumtechnologie voor is gebruikt is cryptografie. Cryptografie is het versleutelen van data zodat die veilig van zender naar ontvanger kan worden verzonden zonder dat iemand ongemerkt de data kan bekijken of wijzigen. We kijken naar twee componenten van cryptografie: (1) de random number generator om een sleutel te maken waarmee data wordt versleuteld, en (2) de verzending van die sleutel van zender naar ontvanger van de boodschap.

Cryptografie is een omvangrijk domein en een van de belangrijke principes is dat met een random number generator een sleutel wordt gevormd waarmee data wordt versleuteld. In de praktijk zijn veel random number generators in computers niet echt random; zij benaderen een random number generator met een bepaald algoritme.⁷ Dat betekent dat met een hele krachtige computer dat algoritme en dus ook de huidige versleuteling van data kan worden gekraakt en dat ons dataverkeer dan niet meer veilig is. Quantumtechnologie kan enerzijds leiden tot computers waarmee de huidige sleutels te kraken zijn, anderzijds kan quantumtechnologie ook een echte random number generator vormen en daarmee een zogenaamde quantum Key (QK) vormen die niet meer te kraken is. Er zijn partijen die claimen gratis via Internet quantum random number generators aan te bieden.⁸

Zwakke schakel in het gebruik van die generator, aangenomen dat hij echt random is, is natuurlijk het communiceren van die sleutel via Internet. Dat brengt ons op het tweede deel van cryptografie. Wanneer een zender zijn data met behulp van een random number generator versleutelt dan moet die sleutel wel naar de ontvanger van de boodschap worden gestuurd, anders kan de ontvanger de versleutelde data niet terugzetten naar de oorspronkelijke boodschap. Dat verzenden van de sleutel kan via hetzelfde communicatiekanaal als de versleutelde boodschap maar dat maakt onderscheppen gemakkelijker. Beter is het daarom om de sleutel via een ander kanaal te versturen omdat die sleutel cruciaal is voor de veiligheid van het dataverkeer. Als je de sleutel verzendt met behulp van quantum communicatie (dus apart van het verzenden van de versleutelde boodschap) dan kan deze stap van cryptografie op een veilige manier lopen.

⁷ Dit is ook aan de orde geweest in het vorige hoofdstuk, in paragraaf 2.2.

⁸ Zie bijvoorbeeld: <http://qrng.anu.edu.au/index.php>

Waarom verloopt die stap op een veilige manier via quantum communicatie? quantum communicatie is gebaseerd op het 'entanglement principe'. Twee gekoppelde subatomaire deeltjes op afstand hebben gekoppelde eigenschappen en behouden dat als je de deeltjes op afstand van elkaar brengt (Acin et al., 2018). Dus als de zender iets verandert aan een deeltje, dan kan de ontvanger van het andere deeltje dat merken, en zo kun je communiceren. Daarnaast is die communicatie ook gebaseerd op het principe dat waarneming van een deeltje haar toestand doet veranderen, het 'observer principe'. Als nu iemand de informatie in het deeltje onderschept en haar bekijkt dan verandert ook het andere deeltje en wordt dus ontdekt dan de informatie is onderschept. De verzending van de quantum Key is dus beveiligd tegen onderschepping.

Er zijn verschillende configuraties mogelijk om quantum Key Distribution (QKD) mogelijk te maken. Dat kan via lasertechnologie via satellieten, of via glasvezelnetwerken. Op dit moment is het belangrijk om goede repeaters (versterkers) te creëren en om schakelen van communicatiekanalen mogelijk te maken zodat de QKD niet via aparte dedicated verbindingen hoeft te gebeuren. Het probleem is echter dat versterkers en schakelingen de qubits beïnvloeden en daarmee de informatie verminderen. Op dit moment wordt hard gewerkt aan versterkers en schakelingen.

De technologie van de quantumcryptografie kan als volgt worden gedefinieerd:

Functionaliteit:

Beveiligen van dataverkeer en telecommunicatie.

Technologisch principe:

Met een quantum number generator wordt een quantum Key gemaakt waarmee data wordt versleuteld die via quantum communicatie wordt gedeeld tussen zender en ontvanger.

Basiscomponenten:

Random number generator voor het maken van een quantum Key (QK); Netwerk voor het verzenden van een quantum Key (QKD).

Patroon van ontwikkeling en verspreiding van quantum cryptografie

Het idee, de uitvinding en verdere ontwikkeling

Het idee om quantumtechnologie te benutten voor communicatie is rond 1968 geopperd door Stephen Wiesner in een gesprek met zijn vriend Charles Bennet (Broadbent & Schaffner, 2016). Wiesner en Bennet waren studievrienden die contact hielden toen ze op verschillende universiteiten hun master deden. Wiesner opperde het idee dat quantumtechnologie gebruikt zou kunnen worden voor communicatie en voor het creëren van een nieuw soort geld (crypto-currency) (Brassard, 2006).

Zowel voor de communicatie als voor het creëren van geld is het belangrijk dat een code kan worden gevormd die beveiligd is tegen diefstal. Het verschil tussen geld en communicatie is dat die code bij geld veilig moet worden opgeslagen en dat voor communicatie die code wordt verzonden van zender naar ontvanger. Wiesner's idee is dus een manier om dergelijke "veilige" codes te vormen. In de verdere ontwikkeling van quantumtechnologie blijkt het verzenden van informatie middels quantumtechnologie makkelijker dan het voor langere tijd opslaan van informatie met die technologie en dat is misschien wel de reden dat aanvankelijk maar een van Wiesner's ideeën verder is uitgewerkt. Overigens: als we een veilig en stabiel quantum geheugen kunnen maken dan wordt ook het andere idee van Wiesner weer actueel.

Wiesner probeert vervolgens begin jaren 70 de ideeën gepubliceerd te krijgen in een artikel met de naam "Conjugate coding" maar zijn artikel wordt afgewezen (meer dan tien jaar later wordt het artikel alsnog gepubliceerd: Wiesner, 1983). Bennet blijft nadenken over het afgewezen idee van zijn vriend en bespreekt het geheel ongeveer 10 jaar later met Brassard op een conferentie. Bennet werkt op dat moment bij IBM en Brassard werkt op dat moment bij 'the University of Montreal' (Gisin et al., 2002). Samen werken ze in

een paar uur de ideeën voor veilige quantum communicatie verder uit en publiceren die later (Bennett et al, 1982). Hun idee wordt aanvankelijk met scepsis ontvangen maar nadat ze in 1989 een experimentele opstelling hebben gemaakt en QKD in de praktijk demonstreren komt er meer belangstelling. De opstelling laat zien hoe fotonen (een soort hele kleine pakketjes licht) op verschillende manieren gepolariseerd kunnen worden zodat je informatie kunt verzenden via de fotonen. Vervolgens worden de gepolariseerde fotonen over een afstand verzonden (met de snelheid van licht). Als iemand de fotonen met de informatie onderschept dan wordt de toestand van de fotonen gewijzigd en daarmee wordt de informatie verminkt. Deze opstelling van quantum communicatie demonstreert het eerste principe van quantum communicatie, verzending van quantumdeeltjes met de snelheid van het licht. Kortom, de opstelling is een demonstratie van veilige quantum communicatie. We beschouwen deze demonstratie als de uitvinding. Dit hele verhaal wordt door Brassard in een enorm leuk artikel opgeschreven (Brassard, 2005; 2006).

Met dit principe ontstaat veilige communicatie met de lichtsnelheid. Die communicatie kan op verschillende manieren worden ingezet. Ten eerste kan de communicatie worden gebruikt om een volledige boodschap veilig te versturen. Ten tweede kan de communicatie ook worden gebruikt om alleen een sleutel te verzenden waarmee informatie die via een ander kanaal wordt verzonden veilig kan worden versleuteld bij de zender en weer kan worden "ontsleuteld" bij de ontvanger. Omdat quantumcommunicatie nogal omslachtig is, en omdat de technologie nog in een beginstadium zit waarbij het moeilijk is om grote hoeveelheden data te verzenden, wordt veelal gekozen voor de tweede optie. Kortom de sleutel wordt verzonden via een ander kanaal dan de versleutelde boodschap. De versleutelde boodschap kan gewoon via het Internet

worden verstuurd, zonder de sleutel is de data waardeloos. Een voordeel is nu dat de sleutel voorafgaand aan het verzenden van de boodschap kan worden verstuurd. Als de sleutel veilig aankomt, dan kun je hem gaan gebruiken om de boodschap veilig te versturen. In dit proces voorkom je af luisteren in plaats van dat je het achteraf vaststelt.

Een paar jaar later stelt Ekert (1991) voor om “entanglement” te gebruiken waarbij informatie instantaan (dus niet met de snelheid van het licht) tussen gekoppelde quantumdeeltjes wordt gedeeld. De informatie van het ene gekoppelde quantumdeeltje wordt instantaan doorgegeven aan het ander quantumdeeltje op afstand. Dit idee betekent dat er geen fotonen (of licht) meer hoeven te worden verzonden via vacuüm of via een glasvezelkabel. In 1993 wordt dit principe verder toegelicht door Bennet, Brassard en collega’s (Bennett et al., 1993) en wordt de term ‘teleportation’ gebruikt. De quantum Key die nodig is om data veilig te versleutelen kan nu dus op grote afstand worden gedeeld zolang je op die afstand twee gekoppelde quantumdeeltjes hebt. Dit idee wordt gedemonstreerd in 1997 (Bouwmeester et al., 1997). Die demonstratie kan gezien worden als de uitvinding van het tweede principe voor quantumcommunicatie. Immers het technologisch principe van deze teleportatie technologie wijkt af van het verzenden van informatie in quantumdeeltjes via fotonen of licht.

De eerste toepassingen van quantum cryptografie op basis van principe 1

Er zijn commerciële marktrapporten die aangeven dat overheden en militairen in de jaren na 2000 de eerste klanten waren van quantum cryptografie.⁹ We dateren de eerste toepassingen rond 2002 (in ieder geval tussen 2000 en 2005). Die militaire toepassingen waren niet commercieel en de data is slecht valideerbaar. Uiteindelijk duurt het tot 2010 voordat een kleine university spin-off met de naam ID Quantique, een commercieel quantum cryptografie product op de markt brengt.¹⁰ De markt is weliswaar wereldwijd volgens de site van het bedrijf, maar de grootte van de markt is nog beperkt, en dat betekent dat er sprake lijkt van een nichemarkt, in ieder geval ten tijde van de introductie in 2010.

Partijen die quantum communicatie en cryptografie producten aanbieden of ontwikkelen

Aurea Technologies, Crypta Labs, Fujitsu Electric, HP Enterprises, IBM, Infineon, ISARA, MagiQ, Microsoft, Mitsubishi, NEC, Nokia, NTT, Nucrypt, Oki, Post-quantum, quantumCTek, quantum Xchange, Qasky, Qinetik, Qubitekk, Quintessance Labs, QuNu Labs, qutools, Raytheon, SeQureNet, Toshiba, Universal quantum Devices and ZTE
<https://www.24-7pressrelease.com/press-release/439317/quantum-encryption-market-to-reach-25-billion-revenues-by-2022-mobile-systems-will-ultimately-dominate>
 (site gedateerd in 2017)
 (visited 2020-03-06)

⁹ <https://www.24-7pressrelease.com/press-release/439317/quantum-encryption-market-to-reach-25-billion-revenues-by-2022-mobile-systems-will-ultimately-dominate> (site is gedateerd op juni 2017)(bezoekt op 2019-11-12)

¹⁰ From 2010 onwards IDQ rolled out quantum-safe crypto solutions in both commercial and government markets worldwide.
<https://www.idquantique.com/>

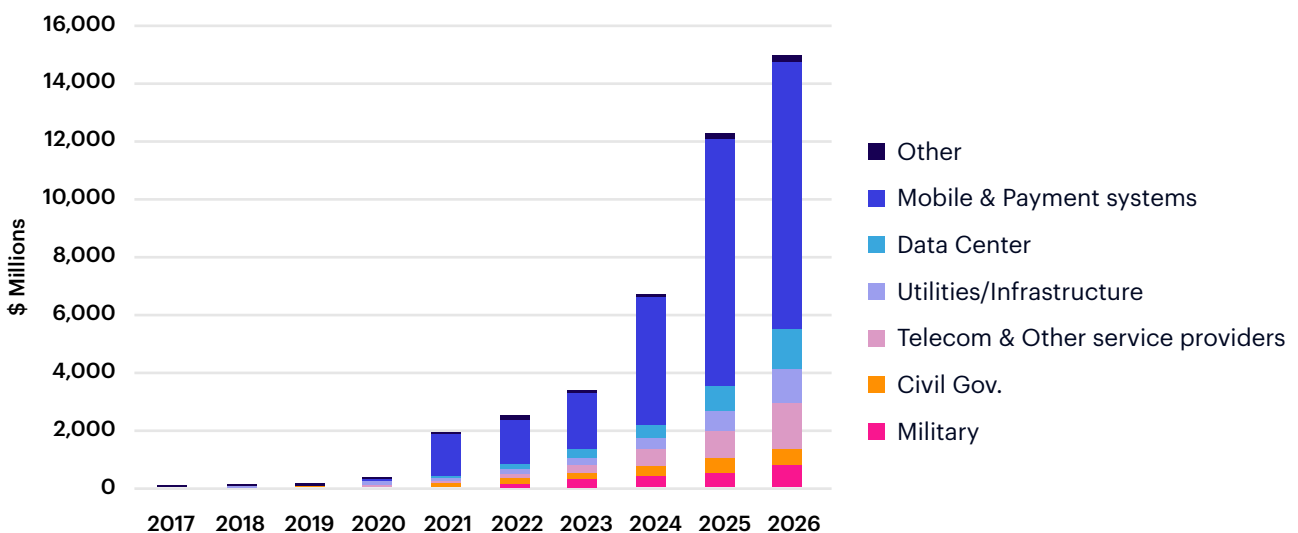
Grootschalige verspreiding van quantum cryptografie op basis van principe 1?

Het vaststellen of grootschalige verspreiding nu wel of nog net niet is begonnen is heel lastig aan te geven. Er zijn wel flink wat indicatoren die aangeven dat de grootschalige verspreiding snel begint of al is begonnen. Allereerst is er al sinds een paar jaar een toename van publicaties (een maat voor de hoeveelheid onderzoek) en patenten (een maat voor de hoeveelheid toegepast onderzoek). Daarnaast is er een groot aantal bedrijven actief in quantum communicatie (zie onderstaand tekstblok) en dat zijn niet alleen startups zoals het eerdergenoemde IDQuantique maar ook grote bedrijven zoals IBM, Toshiba, Fujitsu, Mitsubishi, NEC, Nokia, NTT, Raytheon en HP. Wat verder opvalt is dat die grote bedrijven uit verschillende sectoren komen: militaire (communicatie en navigatie) technologie (zoals Raytheon), telecommunicatie (zoals NTT en Nokia) en computersystemen (zoals IBM, HP en NEC).

De voorspelde markt in opeenvolgende gebruikersgroepen

Als figuur 3-4 juist is, dan geeft dit een indicatie van de relatieve grootte van verschillende deelmarkten die quantum Key Distribution (QKD) gaan gebruiken. De grootste markt wordt gevormd door bedrijven die mobiele betalingssystemen aanbieden. Figuur 3-4 duidt tevens op een specifieke volgorde van toepassingen of gebruikersgroepen tijdens de ontwikkeling van de markt. Allereerst militaire gebruikers daarna overheden en dan een lijst met civiele gebruikersgroepen waarbij veilige datacommunicatie cruciaal is zoals bedrijven die mobiele en betalingssystemen aanbieden, telecommunicatiebedrijven, datacenters.

Figuur 3-4: Voorspelde omzet voor quantum Key Distribution (QKD)



<https://www.24-7pressrelease.com/press-release/439317/quantum-encryption-market-to-reach-25-billion-revenues-by-2022-mobile-systems-will-ultimately-dominate> (site gedateerd in 2017)(visited 2020-03-06)

Tabel 3-3: Data van het patroon quantum communicatie cryptografie (principe 1)

Jaar	Gebeurtenis	Lengte van fasen		Bron
1989	Uitvinding	Ontwikkelings-fase	+/- 13 jaar	(Brassard, 2005, 2006)
2002 (tussen 2000-2005)	Waarschijnlijk eerste (militaire) toepassingen	Adaptatiefase	+/- 20 jaar	
2010?	Introductie in de civiele markt	Adaptatiefase	+/- 20 jaar	Zie voetnoot 8
2021-22?	Start industriële productie en grootschalige diffusie	Stabilisatiefase		Eigen waarneming op basis van indicatoren.

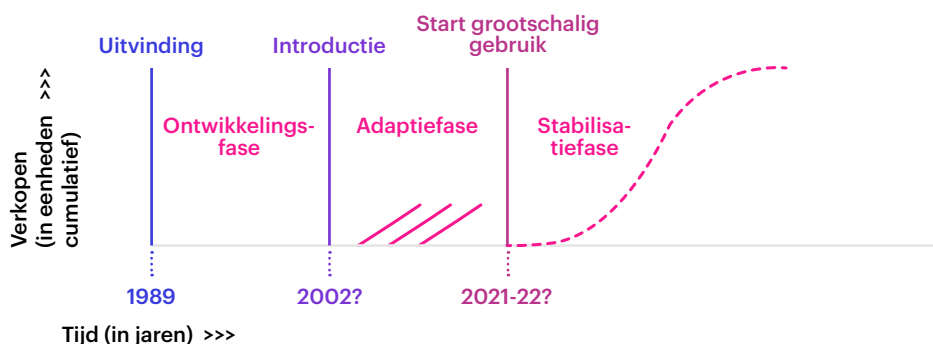
De eerste toepassingen van quantum communicatie op basis van principe 2 (teleportatie)

Teleportatie slaat op het instantaan (dus sneller dan het licht) overdragen van een object. In de context van quantumtechnologie betekent teleportatie dat informatie instantaan wordt overgedragen, dus geen materie, zoals bij teleportatie in science-fiction vaak wordt voorgesteld. Experimenteel is teleportatie aangetoond met fotonen maar ook met atomen en moleculen en tevens is het fenomeen experimenteel over steeds grotere afstanden gemeten, tot over afstanden van meer dan 1000 km (Pirandola et al., 2015). Er heeft dus na de uitvinding veel ontwikkeling plaatsgevonden.

Het belang van teleportatie met quantumtechnologie, kortweg quantum teleportatie, is groot omdat quantum teleportatie een belangrijke rol kan spelen in alle drie basis functionaliteiten van de quantum discipline, namelijk meten en waarnemen, communiceren en computing.

Van teleportatie zijn op dit moment nog geen daadwerkelijke toepassingen bekend, anders dan experimentele opstellingen op verschillende plaatsen in de wereld. Dat betekent dus dat quantum teleportatie na de uitvinding in 1997 nog steeds in de ontwikkelingsfase zit. Het is nog onduidelijk wanneer de eerste marktintroductie plaatsvindt en de adaptatiefase begint.

Figuur 3-5: Patroon van ontwikkeling en verspreiding van quantum communicatie cryptografie (principe 1)



Belemmerende en stimulerende factoren voor quantumcommunicatie

Overzicht van de condities

Het overzicht van de belemmerende en stimulerende factoren geeft aan dat op alle kernfactoren die nodig zijn om een systeem op te bouwen rond quantum communicatie grote vorderingen zijn gemaakt maar dat geen van die factoren echt compleet is. Dat is ook de reden dat quantum communicatie nog niet grootschalig wordt toegepast. De oorzaken van de belemmeringen zijn zichtbaar in de lijst met beïnvloedende factoren. De kennis van de technologie en de beschikbaarheid van werknemers met kennis van quantumtechnologie zijn beperkingen. Opvallend is verder dat het maatschappelijke debat over socioculturele aspecten van de technologie nog nauwelijks is begonnen en dat er nog nauwelijks ongelukken, onverwachte gebeurtenissen of misbruik zijn gerapporteerd. Die laatste twee hangen sterk samen. Onze analyse geeft overigens wel aan dat voor specifieke quantum communicatietechnologie, zoals quantum Key Distribution, grootschalige verspreiding wel waarschijnlijk is binnen een (paar) jaar.

Toelichting bij de Tabel 3-4:

(3) De factoren worden gedefinieerd en hun gebruik wordt uitgelegd in Bijlage 1 waarin de methode van de technologie monitor op een rij wordt gezet.

(4) Een groene kleur betekent dat de factor een positieve invloed heeft of geen belemmering vormt voor grootschalige toepassing en verspreiding van de technologie.

Tabel 3-4: Factoren voor quantum communicatie

Kernfactoren	Beïnvloedende factoren
1 Productprestatie	8 Kennis van technologie
2 Productprijs	9 Kennis van toepassingen
3 Productiesysteem	10 Werknemers en grondstoffen
4 Complementaire producten en diensten	11 Financiële middelen
5 Actoren en netwerkvorming	12 Macro-economische en strategische aspecten
6 Klanten	13 Socio-culturele aspecten
7 Normen, regels en wetten	14 Ongelukken en onverwachte gebeurtenissen

Gedetailleerde informatie over de condities

1. Productprestatie

De afstand waarover quantum communicatie kan plaatsvinden, wordt nog beperkt door het ontbreken van veilige en betrouwbare repeaters van het signaalrichting¹¹ (Vermaas et al., 2019). Daarnaast is ook het routeren van signalen van een of meerdere zenders naar verschillende andere ontvangers nog moeilijk (Essay Verkenning quantum Technologie 2019, p.40). In de praktijk is quantum communicatie begonnen met het aanmaken en verzenden van quantum Keys (QKD) waarmee data versleuteld kan worden die via gewone communicatiekanalen wordt verzonden. Ook voor het verzenden van die quantum Keys gelden nog beperkingen door de afwezigheid van repeaters en switches.

2. Productprijs

quantum Key Distribution (QKD) is nu nog duur,¹² maar grotere bedrijven werken nu aan prototypes van goedkopere systemen.¹³

3. Productiesysteem

Er zijn verschillende kleine bedrijfjes die al enkele jaren QKD-oplossingen aanbieden. Grotere bedrijven werken nu aan het leveren van QKD-oplossingen op grotere schaal (zie voetnoot 13).

4. Complementaire producten en diensten

Veel complementaire producten en diensten ontbreken nog. Nieuwe software is nodig en nieuwe hardware moet nog ontwikkeld worden, zoals betrouwbare quantum geheugens waarin langdurig veel informatie kan worden opgeslagen. Daarnaast zijn protocollen en regels nodig

om alle complementaire producten en diensten te integreren (Riedel et al., 2017; Al Natsheh et al., 2015).

5. Actoren en netwerkvorming

Overheden van verschillende landen brengen partijen bij elkaar om quantumtechnologie te ontwikkelen en toe te passen. Bijvoorbeeld, het Flagship initiatief van de EU helpt om activiteiten van researchinstututen en bedrijven op elkaar af te stemmen. Het quantum manifesto is een belangrijke intentieverklaring van een groot aantal wetenschappers en bedrijven in Europa die actief zijn op het gebied van quantumtechnologie¹⁴ (De Touzalin e al., 2016). Er zijn roadmaps gemaakt in de EU en de VS om richting te geven aan activiteiten van alle verschillende actoren. Al deze initiatieven maken initiatieven in de ontwikkelingsfase transparant en beschikbaar. Toch werken groepen van bedrijven nog aan verschillende standaarden en dat betekent dat er bij het in de markt zetten van de technologie er nog veel versplintering is (Al Natsheh et al, 2015).

6. Klanten

Er zijn nog veel kleine en versplinterde niche-markten en de kennis van potentiële consumenten over quantum communicatie is nog laag (Al Natsheh et al, 2015).

7. Normen, regels en wetten

Op het gebied van technologie certificatie en standaardisatie is nog veel werk te doen. Dat is ook begrijpelijk omdat certificatie en standaardisatie vereist dat de technologie een bepaalde mate van technologische 'maturity' heeft. Als de technologie nog niet stabiel is en voortdu-

¹¹ <https://www.technologyreview.com/s/612964/what-is-quantum-communications/>

¹² https://en.wikipedia.org/wiki/quantum_key_distribution

https://www.photonics.com/Articles/Chip-Based_quantum_Key_Distribution_Could_Secure/a65655

<https://www.ncsc.gov.uk/whitepaper/quantum-security-technologies>

¹³ <https://www.toshiba.eu/eu/Cambridge-Research-Laboratory/quantum-Information/quantum-Key-Distribution/Toshiba-QKD-system/>

¹⁴ https://qt.eu/app/uploads/2018/04/93056_Quantum-Manifesto_WEB.pdf

rend wijzigt dan is standaardisatie en certificatie moeilijk. Tevens werkt overheidsregulering vaak remmend naast alle stimulerende initiatieven die overheden starten (Al Natsheh et al., 2015; Essay Verkenning quantum Technologie, 2019, p.41; Riedel et al., 2017).

8. Kennis van technologie

De kennis van de technologie neemt enorm snel toe door de ruime financiering en de coördinatie van technologieontwikkeling in verschillende delen van de wereld. Maar de kennis is nog ontoereikend om een volledig quantum internet te maken. De huidige kennis van de technologie maakt dat onderdelen van een later te vormen quantum internet nu in een hybride combinatie met het bestaande internet worden toegepast.

9. Kennis van toepassingen

Voor quantum Key Distribution (QKD) de functionaliteit is beschikbaar in nichemarkten. Daarnaast is zowel in de VS als in de EU een roadmap gevormd voor quantum communicatie. De kennis van de toepassingen lijkt de verdere ontwikkeling en verspreiding van quantum communicatie of QKD, niet te belemmeren.

10. Werknemers en grondstoffen

Er is een groot tekort aan werknemers met de juiste kennis over quantumtechnologie.¹⁵

11. Financiële middelen

Enorme budgetten zijn beschikbaar in China, Rusland, de US, en in Europe (Acin et al., 2018).

12. Macro-economische en strategische aspecten

quantum communicatie en computing en alle daarmee samenhangende technologie is van strategische waarde, zowel wetenschappelijk, economisch als militair. Dat is ook de reden dat de grote machtsblokken in de wereld hard werken aan quantumtechnologie.

13. Socio-culturele aspecten

Aan socioculturele aspecten van quantumtechnologie is nog nauwelijks aandacht besteed. In veel technische artikelen wordt wel vermeld dat de privacy kan worden gegarandeerd met quantum communicatie maar dat die privacy ook weer ruimte biedt voor terroristen en criminelen. De socioculturele aspecten komen langzaam in beeld bij wetenschappers (zie bijvoorbeeld Vermaas et al., 2019) maar het maatschappelijke debat over de wenselijkheid en de gevolgen van quantumtechnologie is nog niet begonnen en dat betekent dat het effect van de socioculturele aspecten op ontwikkeling en verspreiding van quantum communicatie technologie nog moeilijk is in te schatten. Het 'Essay Verkenning quantum Technologie' (2019) levert een agenda voor het debat waarin sociaal culturele en maatschappelijke effecten aan bod komen.

14. Ongelukken en onverwachte gebeurtenissen

Er is nauwelijks of geen informatie te vinden over ongelukken met quantum communicatie technologie.¹⁶

¹⁵ <https://www.technologyreview.com/s/612964/what-is-quantum-communications/>

¹⁶ Een zoekopdracht in Google scholar met de zoektermen 'accident' en 'quantum communication' (in de titel van bronnen) levert geen hits op. Als de termen algemeen worden gebruikt zijn er veel hits maar die hebben betrekking op 'by accident' (toeval) in plaats van 'accidents' (ongelukken).

De quantum computer

Definitie van de technologie van quantum computer

De definitie van de technologie quantum computer omvat drie aspecten: de functionaliteit, het technologisch principe en de basiscomponenten waaruit de technologie bestaat.

Quantum computers maken op een slimme manier gebruik van quantum-mechanische 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. (Nationale agenda quantumtechnologie, 2019, p.21)

Functionaliteit

De functionaliteit van de computer is het uitvoeren van bewerkingen. Dat is een heel breed geformuleerde functionaliteit en dus bestaan er vele varianten computers. Er zijn computers die alleen hele specifieke, op een logische deelverzameling gerichte berekeningen uitvoeren. Daarnaast heb je meer generieke multifunctionele computers, die afhankelijk van de software, vele verschillende functionaliteiten ondersteunen.

Technologische principes

De Nationale agenda quantumtechnologie geeft een korte beschrijving van de technologische principes van een quantum computer.

Basiscomponenten van een quantum computer

De basiscomponenten van een quantum computer zijn behalve de gebruikelijke randapparatuur, een geheugen zowel voor data als software, een processor en een besturingssysteem. De processor is de meest centrale component die je met behulp van quantumtechnologie wilt maken.

Configuraties

Van een quantum computer bestaan allerlei configuraties en varianten. Een quantumprocessor kan bijvoorbeeld een hybride combinatie vormen met een klassieke processor. Dat betekent dat de quantum processor alleen wordt gebruikt voor die berekeningen die niet met de klassieke processor kunnen worden verricht (zie Nationale agenda

quantumtechnologie, 2019, p.24). Er bestaan verschillende technologische platformen van quantum computers: (1) zogenaamde 'ions traps' (ook wel supergeleidende qubits genoemd); (2) 'quantum dots in Silicium' of (3) topologische quantum computers. Bedrijven werken aan verschillende platformen. IBM en Google werken aan het eerste platform, Intel werkt aan zowel de eerste als de tweede type platformen en Microsoft werkt aan het derde platform (zie Nationale agenda quantumtechnologie 2019, p.27).

Patroon van ontwikkeling en verspreiding van de quantum computer

Het idee, de uitvinding en de introductie

Het eerste idee van de quantum computer wordt vaak toegeschreven aan Richard Feynman (Bone Castro, 1997, p.2). Zijn idee, uitgesproken in 1981 in een lezing op MIT, was dat die computer zo krachtig zou zijn dat hij ook de quantum fenomenen zelf zou kunnen simuleren.¹⁷ Anno 2020 (dus ongeveer 40 jaar na zijn voorspelling) zijn 'gewone' supercomputers in staat om moleculen van ongeveer vier atomen te simuleren met alle subatomaire effecten. Een quantum computer zou zo krachtig zijn dat het gedrag van veel grotere moleculen te simuleren is. De datering van het idee van de quantum computer is opvallend als je bedenkt dat Weisner al in 1970 het idee had om quantumtechnologie te gebruiken voor veilige communicatie en voor crypto currencies. Weisner was op dat moment totaal onbekend en zijn publicatie hierover werd afgewezen, terwijl Feynman al een beroemde natuurkundige was met een Nobelprijs (verkregen in 1965).

Het idee van de quantum computer is in stappen verder uitgewerkt door verschillende mensen. De principes van de quantum computer zijn een voor een beschreven. In 1998 wordt voor het eerst het principe van een quantum computer gedemonstreerd door Isaac Chuang van het Los Alamos National Laboratory, Neil Gershenfeld van het Massachusetts Institute of Technology (MIT), en Mark Kubinec van de University of California in Berkeley.¹⁸

Twintig jaar later in 2017 presenteert IBM de eerste commercieel bruikbare quantum computer.¹⁹ IBM biedt reken capaciteit aan op de computer, tevens wordt

het principe van de quantum computer uitgelegd en wordt aangegeven hoe geïnteresseerde gebruikers zelf een programma voor de quantum computer kunnen maken.²⁰ Google heeft ook een quantum computer gebouwd en claimt dat die computer enorm veel sneller is dan bestaande supercomputers. Daar ontstaat dan weer discussie over omdat IBM deze claim bestrijdt.²¹

De introductiedatum van 2017 is misschien wel een schatting die jaren achterloopt op de werkelijke eerste toepassing van de quantum computer. In 2017 is de IBM quantum computer commercieel beschikbaar maar het is goed mogelijk dat de quantum computer al eerder is gebruikt voor militaire en overheidsdoel-einden en dan zou de introductie datum verder terug liggen in de tijd. We hebben daarover echter geen informatie.

Grootschalige verspreiding?

Net als bij quantum communicatie, in het bijzonder cryptografie, is het lastig om aan te geven of grootschalige verspreiding nu wel of nog niet is begonnen. Er zijn echter wel indicatoren. Dat verschillende grote bedrijven (onder andere Intel, Microsoft en Google) al enorme investeringen doen in quantum computing zou kunnen betekenen dat het begin van grootschalige verspreiding nabij of al gepasseerd is. Maar door deze grote partijen wordt nog gewerkt aan verschillende soorten quantum computers. Er is nog geen dominante vorm of standaard voor de quantum computer. Natuurlijk: er zullen vast verschillende soorten quantum computers komen voor verschillende toepassingen, maar een dergelijke verdeling van de markt is nog niet

¹⁷ <https://pursuit.unimelb.edu.au/articles/a-brief-history-of-quantum> (2019-11-26)

¹⁸ <https://www.britannica.com/technology/quantum-computer> (2019-11-26)

¹⁹ <https://medium.com/@markus.c.braun/a-brief-history-of-quantum-computing-a5babea5d0bd> (2019-11-26)

²⁰ <https://www.ibm.com/quantum-computing/> (2020-03-10)

²¹ <https://www.rtlz.nl/tech/artikel/4895646/google-quantumcomputer-intel-quantumsuperioriteit>

zichtbaar. Wij verwachten dat de start van grootschalige verspreiding iets later zal vallen dan die voor quantum cryptografie. Dat is bijvoorbeeld ook zichtbaar in de schatting voor de marktgrootte voor cryptografie (zie eerder) in 2021 van 2000 miljoen dollar, tegen een schatting van ongeveer 400 miljoen dollar voor de markt van quantum computing in 2021.

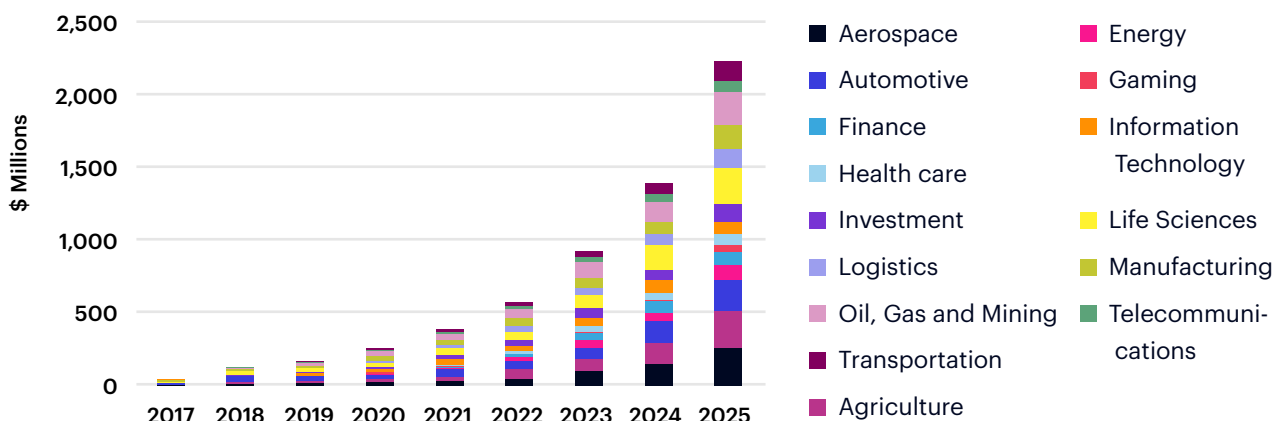
technologieën. Dat is heel begrijpelijk, een computer is immers een generieke technologie die in bijna alle industrieën een rol speelt. Opvallend is ook dat er geen overduidelijk grootste toepassing is zoals bij de eerdere besproken technologieën, quantum meet- en waarnemingstechnologie en quantum communicatietechnologie.

In Figuur 3-6 een inschatting van de toekomstige markt voor quantum computing. Opvallend is dat er veel verschillende markten zijn voor de quantum computer. Zeker als je dat vergelijkt met het aantal toepassingen voor de eerder besproken quantum-

Tabel 3-6: Data van het patroon van de quantum computer

Jaar	Gebeurtenis	Lengte van fasen		Bron
1998	Uitvinding	Ontwikkelingsfase	19	Britannica
2017 (of eerder?)	Introductie	Adaptatiefase		
?	Start industriële productie en grootschalige diffusie	Stabilisatiefase		

Figuur 3-6: Voorspelling van de omzet voor quantum computing per industrie (wereldwijd)



<https://tractica.ondia.com/newsroom/press-releases/enterprise-quantum-computing-market-to-reach-2-2-billion-by-2025/>

Belemmerende en stimulerende factoren voor quantum computer

Overzicht van de condities

Opvallend in het overzicht is dat de kernfactoren die nodig zijn om een compleet ecosysteem rond quantum computing te vormen, allemaal nog aangevuld moeten worden. Quantum computers zijn technisch wel mogelijk, als principe, maar praktisch werkende systemen die grootschalige verspreiding mogelijk maken, zijn nog niet beschikbaar. In dat opzicht is quantum computing technologie minder ver dan quantum Key Distribution als onderdeel van quantum communicatie. De oorzaak van die lage product prestatie ligt primair in ontbrekende kennis van de technologie, bijvoorbeeld kennis hoe het aantal quantum-bits van een quantum computer kan worden uitgebreid en kennis hoe die quantum-bits lang genoeg stabiel kunnen blijven. De verdere ontwikkeling en verspreiding van quantum computing wordt verder beperkt door een gebrek aan gekwalificeerd personeel. Daarnaast is ook bij quantumtechnologie het maatschappelijk debat over socioculturele aspecten nog niet van de grond gekomen. De toepassing van quantum computing is nog zo beperkt dat negatieve of onverwachte effecten, misbruik, ongelukken en onverwachte gebeurtenissen nog nauwelijks zichtbaar zijn. Als die zichtbaar worden dan zal dat het maatschappelijk debat aangezwengeld worden.

Toelichting bij de Tabel 3-7:

(5) De factoren worden gedefinieerd en hun gebruik wordt uitgelegd in Bijlage 1 waarin de methode van de technologie monitor op een rij wordt gezet.

(6) Een groene kleur betekent dat de factor een positieve invloed heeft of geen belemmering vormt voor grootschalige toepassing en verspreiding van de technologie.

Tabel 3-7: Factoren voor quantum computer

Kernfactoren		Beïnvloedende factoren	
1 Productprestatie		8 Kennis van technologie	
2 Productprijs		9 Kennis van toepassingen	
3 Productiesysteem		10 Werknemers en grondstoffen	
4 Complementaire producten en diensten		11 Financiële middelen	
5 Actoren en netwerkvorming		12 Macro-economische en strategische aspecten	
6 Klanten		13 Socio-culturele aspecten	
7 Normen, regels en wetten		14 Ongelukken en onverwachte gebeurtenissen	?

Gedetailleerde informatie over de condities

1. Productprestatie

quantum systemen zijn extreem instabiel en gevoelig voor verstoringen. Om hun quantum gedrag te bewaren moeten quantum-bit chips worden afgesloten in een soort vacuüm box die gekoeld wordt tot nabij het absolute nulpunt. Het is dan ook onduidelijk of grotere systemen met veel quantum-bits ooit langere tijd stabiel gemaakt kunnen worden, zodat ze kunnen functioneren.²² Daarnaast zijn quantum-bits gevoelig voor ruis en dat betekent dat er foute antwoorden kunnen ontstaan. Daarvoor worden dan weer foutcorrecties ontwikkeld, maar die gebruiken wel weer extra quantum-bits. Het maken van een grootschalige en universele quantum computer is een uitdaging waar waarschijnlijk nog vele technische doorbraken voor nodig zijn.²³ Opvallend is wel dat het bedrijf D-wave al een computer op de markt brengt die naar eigen zeggen 2000 quantum-bits omvat.²⁴ Daarnaast is een 5000 quantum-bits computer aangekondigd.²⁵ Verder is er al sinds najaar 2019 veel te doen over de vraag of quantum computers veel sneller zijn dan "gewone" supercomputers. Dit wordt wel quantum suprematie genoemd.²⁶ Wij concluderen dat de productprestatie op korte termijn nog geen grootschalige verspreiding toelaat.

2. Productprijs

De prijs voor een quantum computer is commercieel gezien nog heel hoog. Er zijn schattingen dat een dergelijke computer 10.000 dollar per

quantum-bit kost, en dat betreft dan nog alleen de hardware. Het op de markt aangeboden D-Wave systeem kost ongeveer tien tot vijftien miljoen dollar.²⁷ Veel radicale innovaties zijn aanvankelijk duur en dus commercieel niet interessant. Maar gegeven de huidige kosten is het onduidelijk wanneer de quantum computer wel commercieel concurrerend wordt.²⁸ Wij concluderen dat de productprijs op korte termijn nog geen grootschalige verspreiding toelaat.

3. Productiesysteem

Volgens een schatting kost een quantum computer fabriek ongeveer 100 miljoen dollar.²⁹ Fabrieken voor grootschalige productie bestaan nog niet, het is niet bekend hoeveel quantum computers het bedrijf D-wave precies produceert.

4. Complementaire producten en diensten

Microsoft ontwikkelt quantum algoritmes die toepasbaar zijn op verschillende platformen en werkt aan een programmeertaal (Nationale agenda quantumtechnologie, 2019). Verder wordt er heel hard gewerkt aan verschillende soorten quantum geheugens die zowel efficiënt zijn (zodat er geen informatie verloren gaat) en schaalbaar (Acin et al., 2018, p. 5). Toch zijn er nog vele barrières zichtbaar bij de complementaire producten en diensten. Voorbeelden zijn het maken van software die te controleren (debuggen) is, iets wat nu niet mogelijk is, en de ontwikkeling van intuïtieve gebruikersinterfaces, specifiek voor quantum computers.

²² <https://www.theguardian.com/technology/2019/aug/02/quantum-supremacy-computers>

²³ Deze en andere technologische uitdagingen worden uitgebreid besproken in de Nationale agenda quantum technologie, 2019, p.27-30.

²⁴ <https://www.theverge.com/circuitbreaker/2017/1/25/14390182/d-wave-q2000-quantum-computer-price-release-date>

²⁵ <https://www.hpcwire.com/2019/09/24/d-waves-path-to-5000-qubits-googles-quantum-supremacy-claim/>

²⁶ <https://www.hpcwire.com/2019/09/24/d-waves-path-to-5000-qubits-googles-quantum-supremacy-claim/>

²⁷ <https://www.quora.com/How-much-does-a-quantum-computer-cost>

<https://www.theverge.com/circuitbreaker/2017/1/25/14390182/d-wave-q2000-quantum-computer-price-release-date>

²⁸ <https://www.theguardian.com/technology/2019/aug/02/quantum-supremacy-computers>

²⁹ <https://www.quora.com/How-much-does-a-quantum-computer-cost>

5. Actoren en netwerkvorming

Aan de aanbodzijde van de markt zijn partijen betrokken bij het ontwikkelen van quantumtechnologie. Naast een groot aantal researchinstellingen over de hele wereld zijn de grote bedrijven, Intel, IBM, Google, Microsoft, actief met de ontwikkelingen. Dat betekent dat er vaart komt in de ontwikkeling. Er wordt geëxperimenteerd met veel verschillende systemen en dat vergroot de kans dat een goed-werkend systeem kan worden ontwikkeld of dat dedicated systemen voor verschillende toepassingen door al die parallelle onderzoekstrajecten kunnen worden gevormd. Grootschalige verspreiding wordt nog wel gehinderd door het ontbreken van een technische standaard of een dominant soort quantum computer. In tegenstelling tot ontwikkeling is voor de grootschalige verspreiding juist niet te veel variëteit vereist. Een andere barrière op het gebied van netwerkvorming is belangrijke onderdelen zoals special kabels of belangrijke complementaire producten zoals Helium-3 maar door een beperkt aantal bedrijven kunnen worden geleverd.³⁰

7. Klanten

Er zijn wel groepen klanten die als eerste belangstelling hebben voor quantum computers zoals, overheden, militaire organisaties en gespecialiseerde bedrijven in onderzoek en ontwikkeling. Maar op dit moment zijn er gefragmenteerde nichemarkten en is er een groot gebrek aan kennis onder potentiële klanten.

8. Normen, regels en wetten

Er bestaan verschillende technologische platformen van quantum computers: (1) zogenaamde 'ions traps' (ook wel supergeleidende qubits genoemd); (2) 'quantum dots in Silicium' of (3) topologische quantum computers. Bedrijven werken aan verschillende platformen (zie Nationale

agenda quantumtechnologie 2019, p.27). Er is dus nog geen standaard. Dat is lastig omdat allerlei randapparatuur afhankelijk kan zijn van het platform en dus verdere ontwikkeling en verspreiding kan stikken vanwege parallelle platformen (Nationale agenda quantumtechnologie, 2019). Naast standaarden ontbreken ook regels en wetten voor het gebruik van quantum computers.

9. Kennis van technologie

Technologisch gezien ontbreekt nog veel kennis die nodig is voor een compleet systeem rond quantum computers.

10. Kennis van toepassingen

De kennis van de belangrijke toepassingen voor quantum computers begint duidelijker te worden. Overheden, militaire instanties, maar ook gespecialiseerde onderzoeksinstituten in de farmaceutische industrie bijvoorbeeld vormen voorbeelden van markttoepassingen en gebruikers.

11. Werknemers en grondstoffen

Er is een gebrek aan gekwalificeerde werknemers voor het ontwikkelen van quantumtechnologie in het algemeen en dus ook voor quantum computing.³¹

12. Financiële middelen

In verschillende delen van de wereld zijn grote fondsen beschikbaar voor het ontwikkelen van quantum computers (Acin et al., 2018).

13. Macro-economische en strategische aspecten

Macro-economisch en strategisch wordt quantum computing gezien als uiterst belangrijk. Dat is ook waarom alle grote machtsblokken in de wereld massaal investeren in quantumtechnologie (Acin et al., 2018).

³⁰ https://en.wikipedia.org/wiki/quantum_computing

³¹ <https://thequantumdaily.com/2020/03/06/now-hiring-the-quantum-hr-challenge/>

14. Socioculturele aspecten

Het maatschappelijke debat over de wenselijkheid en de gevolgen van quantumtechnologie in het algemeen is nog niet begonnen en dat betekent dat het effect van de socioculturele aspecten op ontwikkeling en verspreiding van quantum computertechnologie nog moeilijk is in te schatten. Het 'Essay Verkenning quantum Technologie' (2019) levert een agenda voor het debat waarin sociaal culturele en maatschappelijke effecten aan bod komen.

15. Ongelukken en onverwachte gebeurtenissen

Er is, net als bij quantum communicatie, nog nauwelijks of geen informatie te vinden over ongelukken met quantum computers. Feit is wel dat ongelukken potentieel mogelijk zijn: terroristen of kwaadwillende regimes kunnen met quantum computers beveiligde datasets inzien. Verder zijn quantum computers door de ruis in quantum-bits nog niet foutloos en dat kan ook leiden tot ongelukken.

Conclusie en discussie patroon en factoren

Verschillen tussen de quantumtechnologieën

Opvallend is dat de verschillende quantumtechnologieën zich in heel verschillende fasen van het patroon van ontwikkeling en verspreiding bevinden. In dit rapport gebruiken we een model van dat patroon met drie opeenvolgende fasen: ontwikkelingsfase, adaptatiefase en stabilisatiefase. Tijdmetering met quantumtechnologie is een technologie die al sinds decennia de standaard voor tijdmetering vormt en dus al lang in de stabilisatiefase zit, terwijl quantum communicatie, met name cryptografie, waarschijnlijk op punt van doorbreken staat en dus bij de overgang van adaptatie naar stabilisatiefase zit. Wij denken dat voor quantum computing grootschalige toepassing nog enkele jaren op zich zal laten wachten. Deze technologie zit nog midden in de adaptatiefase waarin verschillende experimentele computervarianten nog alleen in gespecialiseerde marktniches door een heel beperkt aantal zakelijke klanten en overheden worden gebruikt.

Opvallend is dat de atoomklok al lang in stabilisatiefase zit en dat er al vele klokken worden verkocht, met name sinds die klokken op een chip kunnen worden gemaakt. Terwijl iedereen denkt dat quantumtechnologie nog experimenteel is, is die technologie voor tijd- en plaatsbepaling al lang onderdeel van ons dagelijks leven. Het is al meer dan een halve eeuw de standaard voor onze tijd. De grootschalige verspreiding van tijdmeting middels quantumtechnologie heeft een vlucht genomen met de introductie van de tijdmeting op een chip in 2011. In het kielzog van de tijdmeting wordt quantumtechnologie ook vaak in sensor- en meetapparatuur gebruikt. De verschillende technologieën van de discipline lopen dus uit fase. Buiten ons blikveld is een quantumtechnologie gemeengoed geworden terwijl andere nog experimentele quantumtechnologieën publiek veel meer aandacht krijgen.

Om het verschil te verklaren in de fase van het patroon van ontwikkeling en verspreiding waarin de verschillende quantumtechnologieën zitten, kan worden gekeken naar de geschiedenis van de ontwikkeling en verspreiding. Dat is in dit rapport gedaan. Er kan ook gekeken worden naar belemmerende en stimulerende factoren. In dit rapport gebruiken we daarvoor een framework met 14 factoren. De lijst van belemmerende en stimulerende factoren is vooral bedoeld om aan te geven in welke mate bij een beginnende markt het systeem van actoren en factoren rond een technologie compleet is en of grootschalige verspreiding van die technologie dus mogelijk wordt. Bij het ontstaan van markten, wanneer de eerste producten op basis van een nieuwe technologie worden verkocht en gebruikt, zijn vaak meerdere van die factoren incompleet. In die situatie kunnen organisaties kiezen om de technologie in specifieke productvarianten en niche-toepassingen te introduceren die vaak sterk afwijken van latere producten en grootschalige toepassingen. Dat is niet altijd omdat die later grootschalige toepassingen nog onbekend zijn, maar vooral omdat die toepassingen nog niet mogelijk zijn met de beperkte ontwikkeling van het marktsysteem of de beperkte stand van de technologie. Bijgaand een citaat dat aangeeft hoe dit patroon van specifieke niche-toepassingen naar grootschalige toepassingen verloopt.

There is no good reason for assuming that the ‘killer applications’—those with big markets, that will eventually dominate QIT (quantum Information Technology) revenue—will emerge early on in the life of QIT. This certainly did not happen in the IT industry, which started small and with, relatively speaking, very crude technology, before expanding and evolving to where it is today. The first suggested application for the transistor was in hearing aids. Then came various specialist military and defence applications. All the consumer stuff we are familiar with today came much later on. After being invented, the laser was basically a research tool for many years. The inventors of the laser did not immediately predict DVD players and laser surgery. So there is no harm in trying to think big about QIT at this very early stage, but we should be prepared for the fact that we may be totally off the mark. On this basis, it could be argued that something—a quantum hearing aid(!)—is needed to kickstart the QIT industry. The market can be small, by present day IT standards, but it has to be sufficient for things to start. This could then enable the QIT industry to bootstrap itself into existence, starting to grow and evolve as the IT industry did in its infancy.

Spiller and Munro (2006) V5

Hoofdstuk 3

Verbanden

tussen quantum-
technologieën



Inleiding

In dit hoofdstuk kijken we naar relaties tussen quantumtechnologieën. De gerelateerde quantumtechnologieën vormen een discipline. In de tweede paragraaf kijken we naar het ontstaan en de ontwikkeling van de quantum discipline. In de derde paragraaf kijken we naar de ontwikkelings- en adaptatiefase van afzonderlijke quantumtechnologieën in die discipline. Daarin wordt aangegeven dat het denken in een patroon van ontwikkeling en verspreiding leidt tot een ‘hindsight bias’ als je niet kijkt naar de bredere discipline waarin die technologieën ontstaan. In de vierde paragraaf kijken we naar verschillende relaties tussen de ontwikkeling en verspreiding van afzonderlijke quantumtechnologieën. In de vijfde paragraaf kijken we naar de gevolgen van de verbanden tussen technologieën voor de methode “Technologiemonitor”.

Ontstaan en ontwikkeling van de quantum discipline

Het ontstaan van een discipline uit andere disciplines

Quantum communicatie is ontstaan door verschillende bestaande disciplines te combineren. Gisin et al. (2002) beschrijven dat het nodig was voor de ontwikkeling van quantum communicatie dat allerlei wetenschappelijke domeinen ver genoeg ontwikkeld waren om ze te kunnen combineren. Gisin et al. (2002) noemen als domeinen informatie theorie, klassieke cryptografie, quantum fysica, en quantum optica. De nieuwe discipline ontstaat dus uit een combinatie van verschillende bestaande disciplines, die elk ver genoeg ontwikkeld moeten zijn om ze zinvol te kunnen combineren.

Voorbeelden van combinaties van disciplines die hebben geleid tot nieuwe disciplines en de uitvinding van veel nieuwe technologieën zijn de combinatie van informatica en telecommunicatie (waaruit ICT ontstond) of de combinatie van informatica en werktuigbouw (waaruit robotics ontstond).

Om die combinatie daadwerkelijk te maken was in het geval van quantumtechnologie een groep van verschillende wetenschappers nodig, namelijk computer wetenschappers en wiskundig georiënteerde fysici met een bredere interesse dan de traditionele fysica. De nieuwe discipline ontstaat dus wanneer een multidisciplinaire groep van wetenschappers

gaat samenwerken. Die samenwerking is niet vanzelfsprekend en kan zelfs rekenen op stevige weerstand vanuit traditionele disciplines zoals Rosenberg (2009) laat zien aan de hand van voorbeelden van technologische doorbraken in de medische wetenschap.

De bovenstaande twee redenen geven aan hoe een nieuwe discipline voortkomt uit een combinatie van bestaande disciplines en welke wetenschappers een dergelijke combinatie maken. Maar waarom worden die combinaties gemaakt? Spiller and Munro (2006) en Dowling and Milburn (2003) geven aan dat ontwikkelingen in de bestaande discipline van informatica onafwendbaar leiden tot barrières.

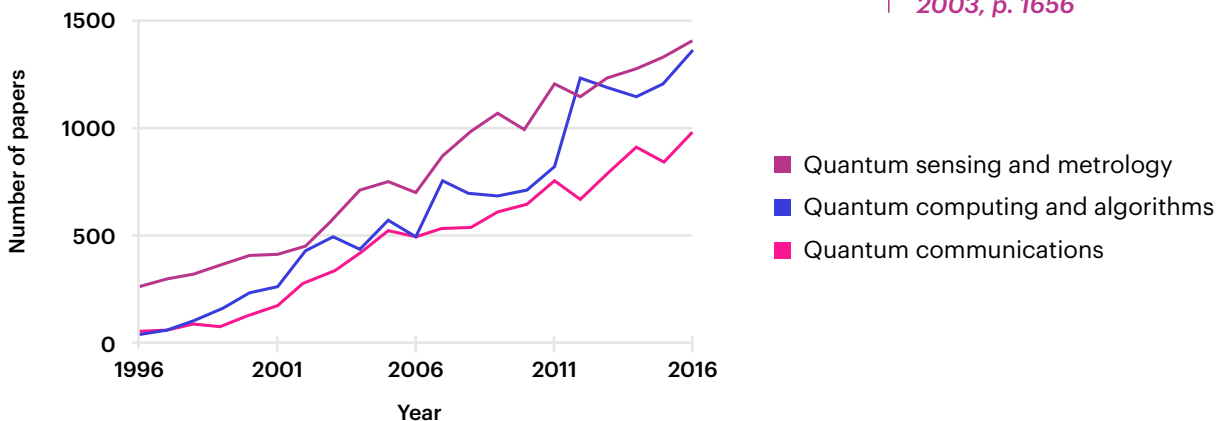
De wet van Moore (Moore, 2006) die aangeeft dat chips iedere 18 maanden in capaciteit verdubbelen, bereikt nu onafwendbaar het einde omdat de miniaturisering niet eindeloos door kan gaan. Dit betekent dat een nieuwe discipline kan ontstaan als een oude discipline tegen zijn grenzen aanloopt.

Tenslotte, de reden om al die combinaties te maken kan ook gewoon gemotiveerd worden door de potentiële mogelijkheden van de nieuwe combinatie.

De ontwikkeling van onderzoek naar toepassing

De verdere ontwikkeling van een discipline is goed te volgen in de tijd, bijvoorbeeld door te kijken naar aantallen publicaties en naar patenten. In figuur 4-1 staat het aantal publicaties voor drie technologieën binnen de discipline.

Figuur 4-1: Aantallen research papers in de loop van de tijd voor verschillende quantumtechnologieën



<https://www.nap.edu/read/25196/chapter/4#28>

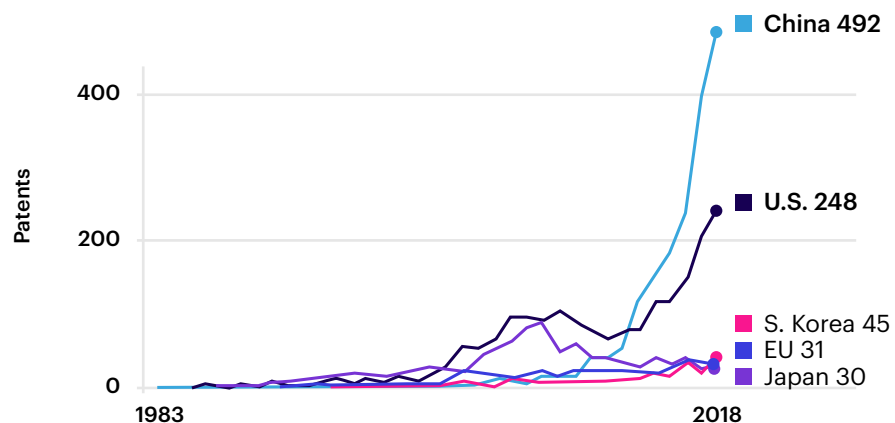
De drie publicatiestromen komen overeen met de driedeling zoals we die in dit rapport hebben gekozen. Uit de informatie van dit rapport blijkt dat quantum sensing en metrologie als eerste is toegepast. Opvallend is dat figuur 4-1 ook aangeeft dat in het begin (1996) het aantal publicaties uit die hoek het grootste was. In de loop van de tijd echter beginnen de drie publicatiestromen behoorlijk gelijk op te lopen. Verder valt op dat de publicatie stroom al in de jaren '90 van de vorige eeuw begint.

“There are two imperatives driving quantum technology. The first is practical. The dominant trend in a century of technological innovation is miniaturization: building devices on a smaller and smaller scale. Ultimately this will deliver devices at length-scales of nanometres and action scales approaching Planck’s constant. At that point, design must be based on quantum principles. The second imperative is more fundamental. The quantum mechanics appear to offer the promise of a vastly improved performance over what can be achieved within a classical framework.”

Dowling and Milburn, 2003, p. 1656

In figuur 4-2 staan de aantallen patenten voor quantumtechnologie in de loop van een aantal jaren.

Figuur 4-2: Aantallen patenten in de loop van de tijd voor verschillende quantumtechnologieën



<https://www.stripes.com/news/pacific/the-quantum-revolution-is-coming-and-chinese-scientists-are-at-the-forefront-1.594814>

De figuur laat duidelijk zien dat het aantal quantumtechnologie patenten na 2010 een enorme vlucht neemt. Opvallend is ook dat China daar duidelijk de leiding in heeft genomen. De patenten zijn een maat voor de kennisopbouw door organisaties die vervolgens technologie in de markt willen introduceren of voordeel willen halen uit het feit dat anderen dat doen. Opvallend is dat de aantallen patenten pas 10-20 jaar later op gang komen dan de publicatiestroom over quantumtechnologie, maar dat de aantallen patenten dan ook gelijk exponentieel toenemen.

De verder ontwikkeling van en samenwerking binnen de quantum discipline is ook zichtbaar. Zie bijvoorbeeld een jaarlijkse conferentie over quantumtechnologie. Daarnaast hebben maar liefst 3400 wetenschappers in Europa een quantum Manifesto getekend waarin ze aangeven dat ze initiatieven tussen wetenschap en industrie nastreven en dat ze professionals willen opleiden om zo toepassingen te stimuleren. Het Manifesto vormt eigenlijk de brug tussen de publicaties van wetenschappers, de patenten van toegepaste wetenschappers in de industrie en de ontwikkeling en het daadwerkelijke gebruik van producten en diensten.

Quantumtechnologieën in de ontwikkelings- en adaptatiefase

Het belang van andere technologieën in de discipline

Uit de quantumtechnologie discipline zijn verschillende gerelateerde technologieën ontstaan. In deze paragraaf bespreken we waarom het belangrijk is om in het begin van het patroon van een afzonderlijke technologie ook te kijken naar verwante technologieën uit dezelfde discipline.

Uitvindingen en de hindsight bias

In de ontwikkelingsfase is het vaak lastig om specifiek naar één technologie te kijken. In de praktijk is er veelal sprake van een verzameling van verschillende technologieën die in dezelfde periode worden ontwikkeld en die nog niet volledig als “aparte technologie hun eigen patroon van ontwikkeling en verspreiding volgen. In die ontwikkelingsfase is nog niet duidelijk welke technologische varianten daadwerkelijk verder ontwikkeld zullen worden en later op grote schaal zullen verspreiden. Alleen als een van die technologieën later succesvol blijkt, kun je vrij gemakkelijk de uitvinding van die specifieke technologie en de eerste introductie van producten op basis van die technologie, historisch terugvinden. De ontwikkelingsfase van een succesvolle technologie is als het ware later met terugwerkende kracht helder te beschrijven, terwijl dat in de periode waarin die fase plaatsvond veel moeilijker was. Op het moment van de

uitvinding, wordt de werking van een technologie soms gedemonstreerd te midden van vele andere technologieën. Later als een van die technologische varianten succesvol blijkt, wordt de betekenis van die eerste demonstratie opeens veel groter: het is een belangrijke uitvinding geworden. Kortom, in het begin van de ontwikkelingsfase is het beter om te kijken naar een bredere verzameling verwante technologieën. De onduidelijkheid welke van die technologieën werkelijk succesvol zal worden ontwikkeld en op grote schaal zal verspreiden, geeft ook aan dat de onzekerheid groter is dan de onzekerheid in het verloop van één afgebakende technologie.

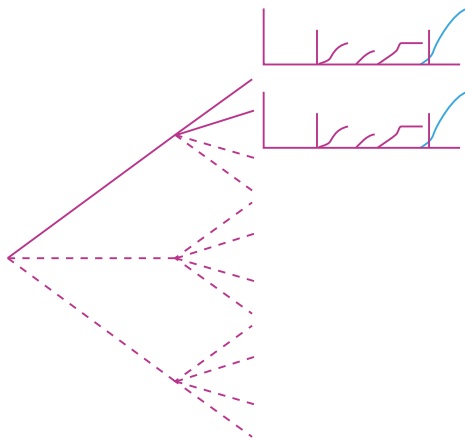
Pad-afhankelijkheid in ontwikkeling en toepassing

De eerste resultaten en successen in de ontwikkeling van een technologie kunnen een groot effect hebben op de aandacht voor een bepaalde technologie en de verdeling van de

middelen voor verder onderzoek over verschillende technologieën. Een voorbeeld is het verhaal van Brassard waarin hij enorm verbaasd is over het enorme effect dat de eerste werkende opstelling heeft waarin quantum communicatie wordt gedemonstreerd (Brassard, 2005). In zijn beleving was het veel belangrijker dat het fenomeen theoretisch was uitgelegd. Voor de buitenwereld bleek de praktische demonstratie het meest belangrijk. Kortom: bij onderzoek naar meerdere technologieën zijn de eerste resultaten bepalend voor de keuze aan welke technologieën verder wordt gewerkt. Dat betekent dat er een belangrijke pad-afhankelijkheid zit in de ontwikkeling.

Een soortgelijke pad-afhankelijkheid is ook zichtbaar na de eerste toepassingen van technologieën. Immers het verder ontwikkelen van een technologie die al wordt toegepast is op korte termijn rendabeler dan het investeren in een technologie die pas veel later kan worden toegepast of waarvan onduidelijk is dat hij ooit wordt toegepast. Bijgaand een tekst die de pad-afhankelijkheid illustreert die voortkomt uit de toepassing van technologie.

Figuur 4-3: Patronen van ontwikkeling en verspreiding van technologie die voortkomen uit een discipline



In feite bepaalt dus het eerste succes in een aantal parallelle ontwikkelpaden waar de financiering en ontwikkelcapaciteit zich op gaat richten. Stel we kijken nu naar de metafoor van het boomdiagram dat in hoofdstuk 2 (in Tabel 2-3) werd gepresenteerd als model van discipline ontwikkeling. We zien dat de pad-afhankelijkheid maakt dat maar een paar specifieke paden

“It remains a mystery to me that this successful prototype made a world of difference to physicists, who suddenly paid attention. In particular, it gave us the opportunity to publish in Scientific American [15]. The funny thing is that, while our theory had been serious, our prototype was mostly a joke. Indeed, the largest piece in the prototype was the power supply needed to feed in the order of one thousand volts to Pockels cells, used to turn photon polarization. But power supplies make noise, and not the same noise for the different voltages needed for different polarizations. So, we could literally hear the photons as they flew, and zeroes and ones made different noises. Thus, our prototype was unconditionally secure against any eavesdropper who happened to be deaf! :-)”

(Brassard, 2005, p.6.)

worden afgelopen in plaats van alle parallelle paden tegelijkertijd. Dat betekent dat in de eerste ontwikkeling de technologie gevormd wordt door hele specifieke ontwikkelpaden.

Valley of Death

Door de pad-afhankelijkheid in ontwikkeling en toepassing van technologieën blijven bepaalde technologieën vaak onbenut. Er zijn heel veel technologieën die het stadium 'proof of concept' hebben bereikt maar nooit (of pas veel later) worden ontwikkeld tot een product. Dat kan verschillende redenen hebben, de kloof tussen 'proof of concept' en productontwikkeling wordt wel de 'Valley of Death' genoemd. Dit concept komt oorspronkelijk uit de Farmaceutische industrie. In die industrie wordt veel onderzoek gedaan naar moleculen die werkzaam zijn als medicijn voor specifieke ziekteverschijnselen. Als voor specifieke moleculen 'proof of principle' bestaat, is er voor verdere ontwikkeling en klinische testen een groot ontwikkelbudget nodig. Omdat dat budget niet altijd wordt vrijgemaakt, blijven veel potentiële medicijnen steken op het niveau 'proof of principle'. Ze blijven als het ware steken in de Valley of Death.

"Given these, it is clear that the QIT(*) application area at least in part determines the technology. If quantum communication is to be the initial application focus area, then the technology focus is on quantum optics. Furthermore, if the focus is tightened to quantum key distribution (QKD), it is possible to define engineering goals such as improved sources and detectors, and to begin the construction of a technology roadmap for this area. A next step from simple QKD is to consider few-qubit quantum processing, either for quantum repeaters to extend the operating distance of QKD, or for implementing distributed quantum communication protocols such as games, auctions, voting. There is now some technology choice. Conversion from optical (communication) qubits to some sort of static matter-based qubits for processing, or doing everything all-optically. Given the open questions on qubit interconversion at this time, it is our view that the all-optical route should certainly be considered."

Spiller and Munro (2006) V8

(*) QIT refers to quantum Information Technology

Relaties tussen quantumtechnologieën

Wat zijn de relaties tussen verschillende patronen van ontwikkeling en verspreiding van afzonderlijke quantumtechnologieën?

1. Uit een nieuwe discipline ontstaan vaak meerdere technologieën, maar in het begin is de lijst van technologieën nog niet volledig bekend. Quantumtechnologie begon al vrij vroeg met de atoomklok. Voor de tijdmeting wilde men kleine fouten door verschillen in zwaartekracht en magnetische velden compenseren. Toen ontstond het lumineuze idee dat je die fouten ook zelf weer kunt gebruiken als meetinstrument. Zo ontstond uit de atoomklok de quantum apparatuur voor het meten van zwaartekracht en magnetische velden. De vertakkingen van het boomdiagram zijn dus niet gelijk duidelijk in het begin: de ene technologie kan ook ontstaan uit ontwikkelingen in de andere technologie.

in de basiscomponenten die in meerdere technologieën worden gebruikt.
2. De basisprincipes zijn gelijk voor de verschillende technologieën, en die worden in het begin bij het ontstaan van een discipline vaak onvoldoende beheerst. Een verbetering in één technologie kan ook vaak gebruikt worden in andere technologieën. Ook nadat technologieën apart ontwikkeld worden, kan er een verbetering worden ontdekt
3. Het hele proces van discipline ontwikkeling duurt vaak lang. In geval van quantumtechnologie heeft de ontwikkeling van de verschillende technologieën meer dan 70 jaar geduurd. De atoomklok bijvoorbeeld is uitgevonden in 1948. Ook de ontwikkeling van afzonderlijke technologieën tot een eerste introductie neemt veel tijd in beslag. Voor de atoomklok was dat ongeveer 8 jaar (van 1948-1956) voor cryptografie was dat ongeveer 13 jaar (van 1989 tot 2002). Voor de quantum computer was dat ongeveer 19 jaar (van 1998 tot 2017). De betrokken organisaties zijn vaak niet stabiel over zulke lange periodes. De geschiedenis van de ontwikkeling van de atoomklok laat zien hoe reorganisaties, verhuizingen, nieuwe beleid en nieuwe strategieën alsmede bezuinigingen een enorm effect hebben op de ontwikkeling en toepassing van een technologie. Een soortgelijk fenomeen is ook al eerder gesignaleerd door een onderzoeksgroep met de naam Minnesota Innovation Rese-

arch Program die mee gingen lopen met innovatieprojecten in bedrijven. Zij vonden dat het proces in de praktijk totaal niet leek op een geordend sequentieel project zoals de theorie beweerde (Schroeder et al., 1986).

4. Tussen quantum computing en quantum communication, en in het bijzonder cryptografie, bestaat een typische relatie. Wanneer quantum computing steeds breder beschikbaar komt zal er een probleem ontstaan met de huidige cryptografische technieken (Bone Castro, 1997). De sleutels van de standaard cryptografische methodes kunnen namelijk ontcijferd worden door een quantum computer. Dat is een enorme stimulans om quantum cryptografie te gaan toepassen. De twee technologieën stimuleren elkaars verdere ontwikkeling (zie het tekstblok).

Belousov points to a major function of quantum computing of breaking cryptographic codes, which makes it potentially a major weapon in the hands of hackers. It is in this regard that the RQC has worked at a pre-emptive level to develop quantum communications, or quantum cryptography, to secure systems against the threat posed by quantum computers.³²

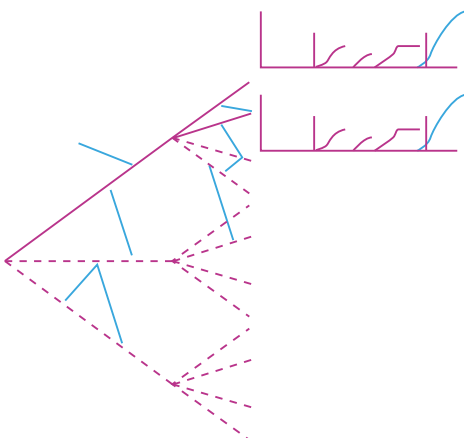
³² <https://economictimes.indiatimes.com/news/science/quantum-communication-devices-bring-complete-privacy-dilemma-to-fore/articleshow/59616712.cms?from=mdr> (2019-11-24)

De gevolgen van relaties tussen technologieën

Gevolgen voor de Technologiemonitor

De conclusie uit de vorige paragraaf, dat er allerlei dwarsverbanden zijn tussen de ontwikkeling en verspreiding van verschillende technologieën binnen een discipline maakt duidelijk dat het boomdiagram als metafoor een versimpeling is, immers een boomdiagram heeft geen relatie tussen zijn takken nadat ze uit elkaar gegroeid zijn. Maar de technologieën hebben dat dus wel.

Figuur 5-4: Van boomdiagram naar kluwen



- Kijk in het begin van het patroon niet naar één sterk afgebakende technologie maar naar een verzameling van technologieën die aanvankelijk binnen een discipline ook gezamenlijk worden ontwikkeld.
- Als de eerste technologie een hoog maturity level heeft (dan is het aannemelijk dat die technologie als eerste wordt toegepast in een niche-toepassing) dan kun je voor die technologie het patroon in kaart gaan brengen. Tot die tijd zit de technologie verweven in een kluwen waar je nog geen apart patroon in kunt zien.
- De grootste onduidelijkheid zit in het begin van het patroon. Een aanpassing is mogelijk door de eerste fase, de ontwikkelingsfase, in twee subfasen te verdelen:

Subfase 1:

Verdergaande technologische en wetenschappelijke ontwikkeling (zoals je dat kan meten middels het aantal publicaties).

Subfase 2:

Investering in productontwikkeling en introductie (zoals je dat kan meten in het aantal patenten, maar ook aankondigingen van nieuwe producten, het bouwen van productiecapaciteit, etc.).

De discipline van de quantumtechnologie is een mooi voorbeeld van een science-based discipline waar technologische doorbraken ontstaan uit fundamenteel wetenschappelijk onderzoek. Het is interessant of soortgelijke disciplines, zoals nanotechnologie, biotechnologie en de organische chemie, ook een soortgelijke ontstaansgeschiedenis kennen.

Conclusies



Inleiding

In dit hoofdstuk vatten we de antwoorden op de vier onderzoeksvragen samen:

1. Wat zijn quantumtechnologieën?
2. Wat is het patroon van ontwikkeling en verspreiding van de quantumtechnologieën en wat is hun huidige positie daarin?
3. Wat zijn de factoren die verdere ontwikkeling of verspreiding hinderen of stimuleren?
4. Wat zijn de verbanden of relaties tussen de technologieën?

De laatste paragraaf geeft praktische aanbevelingen.

Antwoorden op de onderzoeksvragen

Wat zijn quantumtechnologieën?

Quantumtechnologie is een verzameling technologieën waarin op subatomair niveau, dus binnen atomen, de kenmerken van deeltjes zoals elektronen worden benut en gemanipuleerd om specifieke functionaliteiten te leveren. We onderscheiden drie functionaliteiten: (1) het meten van de tijd, zwaartekracht en magnetisme, (2) communicatie en cryptografie, en (3) computerbewerkingen.

Quantumtechnologie is een discipline die bestaat uit verschillende technologieën die nog behoorlijk verweven zijn (als in een kluwen) en waarin de afzonderlijke technologieën nog beperkt een geheel eigen patroon van ontwikkeling en verspreiding laten zien. De kluwen is dus nog niet ontward.

Wat zijn quantumtechnologieën?

Onderstaand een tabel met de belangrijkste data voor de drie quantumtechnologieën die we onderzocht hebben.

Tabel 5-1: Het patroon van de drie quantumtechnologieën

	quantum tijdmeting en sensoren	quantum cryptografie & communicatie	quantum computing
Uitvinding	1948	1989	1998
Eerste toepassing	1956	2002	2017
Start grootschalig gebruik	1967	2020-2021?	-

De atoomklok is het meest ver in het patroon. De uitvinding was al in 1948, de eerste toepassingen in 1956 en grootschalige verspreiding van het gebruik van de atoomklok begon rond 1967 toen de atoomklok de wereldwijde standaard werd voor het precies vaststellen van de tijd. In die tijd waren er maar weinig atoomklokken, maar de atoomklok vormde wel de standaard voor de tijdmeting die overal gebruikt werd. Na 2011 neemt ook het aantal atoomklokken toe wanneer die op een chip kunnen worden gebouwd. Cryptografie en quantum communicatie volgen later, we verwachten dat het grootschalig gebruik snel zal beginnen. Quantum computing begint weer later en we verwachten dat het begin van grootschalige verspreiding nog een paar jaar op zich zal laten wachten.

Opvallend is dat de tijd tussen uitvinding en eerste toepassing voor de drie opeenvolgende technologieën gestaag toeneemt (van 8 jaar voor de atoomklok, 13 jaar voor quantum communicatie en 19 jaar voor quantum computing. Ook de tijd tussen eerste introductie en grootschalig gebruik lijkt toe te nemen (van 11 jaar voor de atoomklok, tot 18-19 jaar voor quantum communicatie, voor de quantum computer is die datum nog niet bekend).

Opvallend is dat in de media veel aandacht gericht is op quantum computing terwijl die tak van de quantumtechnologie eigenlijk nog het minst ver is. De maturity van de quantumtechnologieën lijkt wel omgekeerd evenredig aan de aandacht die ze krijgen.

Wat zijn de factoren die een verdere ontwikkeling of verspreiding hinderen?

In het rapport kijken we naar veertien factoren die de verdere ontwikkeling en verspreiding van quantumtechnologie kunnen belemmeren. Die factoren vormen samen een soort dashboard. Voor iedere factor is in de kleurcode groen (geen belemmering voor grootschalige verspreiding), oranje (gedeeltelijk belemmering voor grootschalige verspreiding) en rood (forse belemmering voor grootschalige verspreiding) aangegeven wat het effect is voor verdere ontwikkeling en verspreiding. De belemmering varieert natuurlijk in de tijd, sommige barrières worden in de loop van de tijd weggewerkt. We hebben de staat van de barrières op dit moment, dus november 2020, in kaart gebracht. In de onderstaande tabel worden de resultaten voor de drie quantumtechnologieën naast elkaar gezet.

Tabel 6-2: de belemmeringen van de quantumtechnologieën naast elkaar

Kernfactoren	Meting sensing	Communicatie	Computing
1 Productprestatie	Orange	Orange	Red
2 Productprijs	Orange	Orange	Red
3 Productiesysteem	Green	Orange	Orange
4 Complementaire producten en diensten	Green	Orange	Orange
5 Actoren en netwerkvorming	Green	Orange	Orange
6 Klanten	Green	Orange	Orange
7 Normen, regels en wetten	Green	Orange	Orange
Beïnvloedende factoren	Meting sensing	Communicatie	Computing
8 Kennis van technologie	Green	Orange	Red
9 Kennis van toepassingen	Green	Green	Green
10 Werknemers en grondstoffen	Green	Orange	Orange
11 Financiële middelen	Green	Green	Green
12 Macro-economische en strategische aspecten	Green	Green	Green
13 Socio-culturele aspecten	Green	Orange	Orange
14 Ongelukken en onverwachte gebeurtenissen	Green	Black ?	Black ?

Een aantal zaken valt op als je kijkt naar de belemmeringen voor de drie quantumtechnologieën.

Allereerst de “lege” factoren. De mogelijke negatieve bijeffecten van technologie (zoals ongelukken en andere onverwachte zaken), zijn nog onvoldoende onderzocht. Gezien het enorme maatschappelijke belang van de technologieën is dat een belangrijk aandachtspunt.

De technologieën laten een heel verschillende beeld zien. De atoomklok heeft eigenlijk nauwelijks barrières meer, zelfs de prijs is snel omlaaggegaan nu er atoomklokken op een enkele chip beschikbaar zijn. Voor quantum communicatie en computing is dat beeld anders. Technisch gezien is er nog veel werk te doen: de prestatie moet behalve snel ook betrouwbaar worden, de grootschalige productiesystemen om de technologie te leveren moeten nog worden gebouwd en er zijn nog maar beperkt complementaire producten en diensten. Vanuit marktperspectief geldt dat veel netwerken van actoren die de technologieën gaan ontwikkelen, produceren en leveren nog moeten worden gevormd. Klanten missen de kennis die nodig is om de technologieën te kunnen inzetten. Normen, regels en wetten zijn nog niet aangepast. Het grootschalig gebruik van de technologieën vereist allerlei certificaten, testen, instituties die controleren of alles goed gaat. Op dat vlak is er nog veel te doen. Dit beeld was overigens ook zichtbaar voor eerdere technologieën die in het kader van de technologie monitor zijn onderzocht.

Wat zijn de verbanden of relaties tussen de technologieën?

In het rapport is ook gekeken naar de ontwikkeling van de overkoepelende discipline van quantumtechnologie waarbinnen de afzonderlijke technologieën zijn ontstaan en zich ontwikkelen. Duidelijk is geworden dat met name bij een nieuwe discipline en in de eerste fase van ontwikkeling en verspreiding de verschillende technologieën nog sterk zijn verweven als in een kluwen. De oorzaken van die verwevenheid en de consequenties daarvan zijn in het rapport besproken. Duidelijk is dat het onderzoek naar disciplines, dus een niveau hoger dan het niveau van afzonderlijke technologieën, nog verder onderzocht moet worden.

Praktische aanbevelingen op basis van het onderzoek

In deze paragraaf wordt allereerst voor de drie quantumtechnologieën gekeken wat praktische aanbevelingen zijn voor organisaties die met die technologie in aanraking komen. Daarna volgen een aantal algemene aanbevelingen.

Praktische aanbevelingen quantum meet- en waarnemingstechnologie

Quantum technologie lijkt voor veel mensen en organisaties nog heel ver weg. Dat is echter een misvatting. Onze tijd wordt al jaren precies vastgesteld door atoomklokken, we gebruiken dagelijks gps-apparatuur die al decennia werkt op deze tijdmeting. Ook quantum sensoren om magnetische velden, zwaartekracht of richtingsveranderingen van

een bewegend voorwerp vast te stellen, zijn al jaren beschikbaar. Voor die organisaties waarbij dergelijke sensoren onderdeel vormen van het kernproces, is het nu tijd om zich te verdiepen in deze technologie, omdat de producten op basis van die technologie steeds goedkoper en kleiner worden en daarmee bereikbaar worden op grote schaal.

Praktische aanbevelingen quantum communicatie

De misvatting dat een brede toepassing van quantumtechnologie nog lang op zich laat wachten, lijkt nog redelijk ongevaarlijk als je kijkt naar de atoomklok. Die misvatting wordt echter gevaarlijker als het gaat om quantum communicatie en computers. Kijk maar eens naar de bijgaande tekst (uit 2015!!).

Quantum computers maken onze huidige technologie om data te versleutelen en vervolgens te versturen via internet, onveilig. De eerste quantum computers zijn via het web beschikbaar. Quantum computers zijn beschikbaar op de markt. Het is wachten op de eerste hacks van normaal beveiligd dataverkeer. Wanneer dat (massaal) kan gebeuren is moeilijk precies in te schatten. In bijgaand Nederlands citaat uit 2019 wordt aangegeven dat het nog een paar jaar kan duren. In bijgaand Amerikaans citaat uit 2015 wordt echter aangegeven dat dat snel gaat gebeuren.

De precieze datum waarop quantum computers bruikbaar zijn voor het ontcijferen van normaal beveiligde data, is eigenlijk niet van belang als nu goed beveiligde data wordt ontvreemd en opgeslagen totdat de data wel te ontcijferen is. Dit betekent in de praktijk dat iedere organisatie die belangrijke informatie veilig wil kunnen versturen en uitwisselen met klanten, moet gaan uitwerken hoe hun data ook in de toekomst veilig kan worden verzonden.

Dat kan bijvoorbeeld door de volgende stappen na te lopen:

1. Niet alleen te kijken naar huidige data maar ook naar de termijn waarop data moet worden beveiligd. Versleutelde data kan al worden ontvreemd zonder dat de sleutel beschikbaar is. Als later quantum computers beschikbaar zijn om de sleutel te vinden op een moment dat die informatie nog gevoelig en belangrijk is dan heeft het stelen en opslaan van informatie die nog niet ontcijferd kan worden, dus nu al zin.
2. Zich te oriënteren op beschikbare quantum cryptografie technologie of methodes die cryptografie sleutels gebruiken die zelfs voor quantum computers niet te breken zijn, zogenaamde Post-quantum cryptografie.
3. Vaststellen welke acties nodig zijn bij een bepaalde stand van de technologie. Volgen van de stand van de technologische ontwikkeling.

At the same time, today's security technologies are not keeping up with the sophistication of modern-day hackers, as well as advanced technologies, such as quantum computing. The US National Security Agency (NSA) recently advised US agencies and businesses that all email, medical and financial records, and online transactions, will soon be vulnerable to quantum computing technology threats, and that today's encryption technologies will not protect them in the future. As a result, the NSA has announced plans to move to quantum-resistant algorithms for greater protection in the future. (article from 2015-09-29)

Het is nog niet mogelijk een goede inschatting te geven wanneer quantumcomputers krachtig genoeg zijn om encryptie te breken. Schattingen lopen uiteen van 2025 tot 2040. Een aandachtspunt vormt het 'store now decrypt later'-scenario: kwaadwillenden die nu versleutelde informatie opslaan, met als doel de encryptie te verbreken als quantumcomputers krachtig genoeg zijn.

Essay Verkenning quantum Technologie (2019), p.18.

Praktische aanbevelingen quantum computing en simulatie

Op de wat langere termijn zal quantumtechnologie hele positieve effecten kunnen hebben op de ontwikkeling in domeinen waar berekeningen tot nu toe niet konden worden uitgevoerd. Denk daarbij aan de ontwikkeling van moleculen voor medicijnen in de farmaceutische industrie.

Het is belangrijk voor organisaties die berekeningen uit (willen) voeren met supercomputers, om de ontwikkeling van quantum computers nauwgezet te volgen. Quantumcomputers zijn beschikbaar via Internet en dat betekent dat goedkoop ervaring kan worden opgedaan met deze nieuwe technologie.

De eerste quantumcomputers die op kleine schaal deze berekeningen kunnen uitvoeren, zijn nu al beschikbaar. Verwachting is dat de ontwikkeling van krachtiger computers snel zal gaan.

Bedrijven die zich richten op materialen, chemische stoffen of medicijnen doen er daarom verstandig aan op korte termijn de mogelijkheden van quantumcomputers te verkennen.

Met krachtiger (en minder foutgevoelige) quantumcomputers kunnen op termijn mogelijk ook de interacties tussen stoffen in het menselijk lichaam worden gesimuleerd, waardoor medicijnen op maat gemaakt kunnen worden. Verder kunnen zogenaamde metamaterialen gesimuleerd worden: materialen met eigenschappen die we niet kennen van de natuurlijke materialen en stoffen (de Ingenieur, 2019): denk aan onzichtbare materialen, nog scherpere lenzen, materiaal dat geluid en licht op nieuwe manieren absorbeert of transformeert. Metamaterialen kunnen voor grote veranderingen zorgen op allerlei vlakken, van de auto-industrie (nieuwe frames) tot in de energiesector (kamertemperatuursupergeleiders of veel efficiëntere zonnepanelen).

De vernieuwingen die dit met zich meebrengt voor de gezondheidszorg, energiesector en het materiaalonderzoek zullen doorwerken naar vele andere sectoren

Essay Verkenning quantum Technologie (2019), p.35.

Aanbevelingen in het algemeen

Organisaties en overheden zullen in de naaste toekomst mogelijk te maken krijgen met snelle ontwikkelingen op het gebied van quantumtechnologie. Organisaties en ondernemingen kunnen een aantal zaken uitzoeken voor de quantumtechnologieën zodat steeds bij een bepaalde stand van de technologie snel beslissingen kunnen worden genomen (zie onderstaand tekstblok).

Organisaties en ondernemingen kunnen voor de quantumtechnologieën een aantal zaken al uitzoeken: Ze kunnen

- Zich verdiepen in technologie om te begrijpen wat voor mogelijkheden de technologie biedt of om te begrijpen welke bedreigingen ze met zich mee brengt.
- Blijven vaststellen in de tijd waar de technologie staat, bijvoorbeeld met de instrumenten van de technologie monitor.
- Identificeren wat mogelijke effecten van quantumtechnologie op kernprocessen van de organisatie zijn.
- Acties inventariseren om die toekomstige effecten te benutten of te beperken.
- Vaststellen wanneer (bij een bepaalde staat van de technologie of de markt) welke acties nodig zijn. Dat kan bijvoorbeeld met de indicatoren die in ons framework zijn geformuleerd.
- De technologieontwikkeling en verspreiding van quantumtechnologieën in de tijd gaan volgen.

De overheid speelt een belangrijke rol bij de financiering van onderzoek en ontwikkeling en bij de vorming van een ecosysteem waarin alle complementaire partijen bij elkaar worden gebracht die nodig zijn om quantumtechnologie in de markt te zetten. Dat gebeurt nu al.

Omdat de overheid ook te maken heeft met grote hoeveelheden gevoelige data, moet zij zich ook voorbereiden op de consequenties van de quantumtechnologie op haar eigen organisatie. Dat betekent bijvoorbeeld dat vanuit de overheid gezorgd kan worden dat er een centraal punt komt met informatie en advies voor (overheids-)organisaties.

Quantumtechnologieën vormen een enorme doorbraak met potentieel grote maatschappelijke consequenties. Het is uiterst belangrijk om te volgen hoe de verschillende quantumtechnologieën zich verder zullen ontwikkelen en verspreiden!

Bronnen

Acín, A. et al. (2018). The quantum technologies roadmap: a European community view *New J. Phys.* 20 080201

Al Natsheh, A., Gbadegeshin, S. A., Rimpiläinen, A., Imamovic-Tokalic, I., & Zambrano, A. (2015). Identifying the challenges in commercializing high technology: A case study of quantum key distribution technology. *Technology Innovation Management Review*, 5(1).

Arthur, W. B. (2009). The nature of technology: What it is and how it evolves, Simon and Schuster.

Banta, D. (2009). What is technology assessment? *International journal of technology assessment in health care*, 25(S1): 7-9.

Belkom, R. (2019a). Duikboten zwemmen niet. De zoektocht naar intelligente machines. Deel I in de reeks 'De toekomst van artificiële intelligentie (AI)'. Stichting Toekomstbeeld der Techniek (STT), Den Haag.

Belkom, R. (2019b). De computer zegt [Nee]. Scenario's over onze toekomst met AI. Deel II in de reeks 'De toekomst van artificiële intelligentie (AI)'. Stichting Toekomstbeeld der Techniek (STT), Den Haag.

Bennett, C.H., Brassard, G., Breidbart, S. and Wiesner, S. (1982). "Quantum cryptography, or Unforgeable subway tokens", *Advances in Cryptology: Proceedings of Crypto '82*, Santa Barbara, Plenum Press, pp. 267 – 275, August 1982.

Bennett, C.H., Brassard, G., Crépeau, C., Jozsa, R., Peres A., and Wootters, W.K. (1993). "Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein–Podolsky–Rosen channels", *Physical Review Letters* 70(13), pp. 1895 – 1899.

Bijker, W. E. (1995). *Of Bicycles, Bakelites, and Bulbs; Toward a Theory of Sociotechnical Change.* Cambridge, The MIT Press.

Bone, S., & Castro, M. (1997). A brief history of quantum computing. Imperial College in London.

Bouwmeester, D., Pan, J-W., Mattle, K., Eibl, M., Weinfurter, H. and Zeilinger, A. (1997). "Experimental quantum teleportation". *Nature*. 390 (6660): 575–579.

Brassard, G. (2005). "Brief history of quantum cryptography: A personal perspective", *Proceedings of IEEE Information Theory Workshop on Theory and Practice in Information Theoretic Security*, Awaji Island, Japan, pp. 19 – 23, October 2005.

Brassard, G (2006). Een aangevulde versie van bovenstaand artikel is te vinden via <https://arxiv.org/pdf/quant-ph/0604072v1.pdf>

Broadbent, A., & Schaffner, C. (2016). Quantum cryptography beyond quantum key distribution. *Designs, Codes and Cryptography*, 78(1), 351-382.

Dedehayir, O., & Steinert, M. (2016). The hype cycle model: A review and future directions. *Technological Forecasting and Social Change*, 108, 28-41.

De Touzalin, A., Marcus, C., Heijman, F., Cirac, I., Murray, R., & Calarco, T. (2016). Quantum manifesto. A new era of technology. European Commission.

Dowling, J. P., & Milburn, G. J. (2003). Quantum technology: the second quantum revolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 361(1809), 1655-1674.

Ekert, E.K. (1991). Quantum cryptography based on Bell's theorem, *Physical Review Letters* 67(6), pp. 661 – 663.

Essay Verkenning quantum Technologie; Aanbevelingen ter voorbereiding op een gezamenlijke toekomst met quantumtechnologie (2019). Uitgegeven door: Platform voor de InformatieSamenleving.

<https://ecp.nl/wp-content/uploads/2020/04/Essay-Verkenning-quantumtechnologie.pdf>

Forman, P. (1985). The first atomic clock program: NBS, 1947-1954. SMITHSONIAN INSTITUTION WASHINGTON DC.

N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel, and H. Zbinden, "quantum cryptography," *Rev. Mod. Phys.* 74, pp. 145-195, Mar 2002.

Grunwald, A. (2009). Technology Assessment: Concepts and Methods. *Philosophy of Technology and Engineering Sciences*: 1103-1146.

Kitching, J. (2018). Chip-scale atomic devices. *Applied Physics Reviews*, 5(3), 031302.

Lombardi, M. A., et al. (2007). "NIST primary frequency standards and the realization of the SI second." *NCSLI Measure* 2(4): 74-89.

Lukkien, C. (2020). Voorkomen is toch beter dan genezen? Een onderzoek naar kansen en uitdagingen voor preventieve gezondheidszorg. Door Frisse Blikken in opdracht van STT. Stichting Toekomstbeeld der Techniek (STT), Den Haag.

Moore, G. (2006). Chapter 7: Moore's law at 40. In Brock, David (ed.). *Understanding Moore's Law: Four Decades of Innovation*. Chemical Heritage Foundation. pp. 67-84.

Nationale agenda quantumtechnologie (2019). Uitgegeven door: quantum Delta Nederland. <https://www.nwo.nl/actueel/nieuws/2019/09/nationale-agenda-quantum-technologie-nederland-internationaal-centrum-quantumtechnologie.html>

Ortt, J. R. (2010). Understanding the Pre-diffusion Phases. *Gaining Momentum Managing the Diffusion of Innovations*. J. Tidd. London, Imperial College Press: 47-80.

Ortt, J. R., & Smits, R. (2006). "Innovation management: different approaches to cope with the same trends." *International Journal of Technology Management* 34(3/4): 296-318.

Ortt, R. & Dees, B. (2018) *Technologiemonitor 2018*. Een nieuw perspectief op technologische doorbraken. Stichting Toekomstbeeld der Techniek (STT), Den Haag.

Ortt, J. R., van Putten, D., Kamp, L. M., & van de Poel, I. (Eds.). (2020). *Responsible Innovation in Large Technological Systems*. Routledge.

Pirandola, S., Eisert, J., Weedbrook, C., Furusawa, A., & Braunstein, S. L. (2015). Advances in quantum teleportation. *Nature photonics*, 9(10), 641.

Riedel, M. F., Binosi, D., Thew, R., & Calarco, T. (2017). The European quantum technologies flagship programme. *Quantum Science and Technology*, 2(3), 030501.

Rogers, E.M. (1986). *Communication Technology. The New Media in Society*. New York: The Free Press.

Rogers, E.M. (2010). *Diffusion of innovations*. Simon and Schuster.

Rosenberg, N. (1982). *Inside the Black Box: Technology and Economics*. Cambridge, Cambridge University Press.

Rosenberg, N. (2009). Some critical episodes in the progress of medical innovation: An Anglo-American perspective. *Research policy* 38: 234-242.

Schroeder, R., Van de Ven, A., Scudder, G., Polley, D. (1986). Managing innovation and change processes: findings from the Minnesota Innovation Research Program. *Agribusiness* (1986-1998) 2(4): 501.

Short, J., Williams, E. & Christie, B. (1976). The Social Psychology of Telecommunications. London: Wiley & Sons.

Snijders, D. (2018) (redactie). Het Eeuwige Leren – Over Leren, Technologie en de Toekomst. Stichting Toekomstbeeld der Techniek (STT), Den Haag.

Spiller, T. P., & Munro, W. J. (2005). Towards a quantum information technology industry. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 18(1), V1.

Sullivan, D.B. (2001). “Time and frequency measurement at NIST: The first 100 years”. 2001 IEEE International Frequency Control Symposium. NIST. pp. 4-17.

Tran, T. A., & Daim, T. (2008). A taxonomic review of methods and tools applied in technology assessment. *Technological Forecasting and Social Change*, 75(9): 1396-1405.

Van Den Ende, J., Ravesteijn, W., De Wit, D. (1997/1998). “Shaping the Early Development of Television.” *IEEE Technology and Society Magazine* (Winter): 13-26.

Vermaas, P., Nas, D., Vandersypen, L., Elkouss, Coronas, D. (2019). Quantum Internet; The internet's next big step. TU Delft. https://pure.tudelft.nl/portal/files/56766989/quantum_20magazine_20june_202019.pdf

Wiesner, S. (1983). Conjugate coding. *ACM Sigact News*, 15(1), 78-88.

Geraadpleegde sites

Hoofdstuk 1

1. https://www.eurekalert.org/pub_releases/2019-02/ip-etg022119.php
2. <https://physicsworld.com/a/mapping-the-commercial-landscape-for-quantum-technologies/>
3. <https://www.businessinsider.com/quantum-technology-2017-7?international=true&r=US&IR=T>
4. https://en.wikipedia.org/wiki/quantum_technology

Hoofdstuk 2

5. <https://www.globenewswire.com/news-release/2020/03/09/1997369/0/en/Inside-quantum-Technology-Report-Shows-Atomic-Clock-Market-Accelerating-Towards-1-billion.html>
6. <https://www.nist.gov/news-events/news/2014/02/new-era-atomic-clocks>
7. https://www.insidequantumtechnology.com/51544829_754765628238106_4068148771723149312_n/
8. <https://www.nieuwkoopbv.nl/nl/product/par-sensor-lp471par/>
9. https://www.idquantique.com/quantum-sensing/products/id230/?gclid=Cj0KCQjw9ZzzBRCKARIsANwXaeKhLfZaeHJ84oQh5-3Aily-jomOYxb4Vs8fbkOxCuF1rOt_pyvY8gwaAi6AEALw_wcB
10. <https://www.electronicdesign.com/technologies/analog/article/21806867/cant-afford-an-atomic-clock-get-a-molecular-one>
11. <http://qrng.anu.edu.au/index.php>
12. <https://www.24-7pressrelease.com/press-release/439317/quantum-encryption-market-to-reach-25-billion-revenues-by-2022-mobile-systems-will-ultimately-dominate>
13. <https://www.24-7pressrelease.com/press-release/439317/quantum-encryption-market-to-reach-25-billion-revenues-by-2022-mobile-systems-will-ultimately-dominate>
14. <https://www.idquantique.com/>
15. <https://www.24-7pressrelease.com/press-release/439317/quantum-encryption-market-to-reach-25-billion-revenues-by-2022-mobile-systems-will-ultimately-dominate>
16. <https://www.technologyreview.com/s/612964/what-is-quantum-communications/>
17. https://en.wikipedia.org/wiki/quantum_key_distribution
18. https://www.photonics.com/Articles/Chip-Based_quantum_Key_Distribution_Could_Secure/a65655
19. <https://www.ncsc.gov.uk/whitepaper/quantum-security-technologies>
20. <https://www.toshiba.eu/eu/Cambridge-Research-Laboratory/quantum-Information/quantum-Key-Distribution/Toshiba-QKD-system/>
21. https://qt.eu/app/uploads/2018/04/93056_quantum-Manifesto_WEB.pdf
22. <https://thequantumdaily.com/2020/03/06/now-hiring-the-quantum-hr-challenge/>
23. <https://pursuit.unimelb.edu.au/articles/a-brief-history-of-quantum>
24. <https://www.britannica.com/technology/quantum-computer>
25. <https://medium.com/@markus.c.braun/a-brief-history-of-quantum-computing-a5babea5d0bd>
26. <https://www.ibm.com/quantum-computing/>
27. <https://www.rtlz.nl/tech/artikel/4895646/google-quantumcomputer-intel-quantumsuperioriteit>
28. <https://tractica.omdia.com/newsroom/press-releases/enterprise-quantum-computing-market-to-reach-2-2-billion-by-2025/>
29. <https://www.theguardian.com/technology/2019/aug/02/quantum-supremacy-computers>
30. <https://www.theverge.com/circuitbreaker/2017/1/25/14390182/d-wave-q2000-quantum-computer-price-release-date>
31. <https://www.hpcwire.com/2019/09/24/d-waves-path-to-5000-qubits-googles-quantum-supremacy-claim/>
32. <https://www.quora.com/How-much-does-a-quantum-computer-cost;>
33. https://en.wikipedia.org/wiki/quantum_computing

34. <https://thequantumdaily.com/2020/03/06/now-hiring-the-quantum-hr-challenge/>

Hoofdstuk 3

35. <https://www.nap.edu/read/25196/chapter/4#28>

36. <https://www.stripes.com/news/pacific/the-quantum-revolution-is-coming-and-chinese-scientists-are-at-the-forefront-1.594814>

37. <https://www.businessinsider.com/quantum-technology-2017-7?international=true&r=US&IR=T>

38. https://en.wikipedia.org/wiki/quantum_technology

39. <http://www.convergenceasia.com/story/acronis-partners-id-quantique-bring-quantum-safe-encryption-cloud>

Bijlagen De Techno- logiemonitor 2020 Quantum- technologie

Bijlage 1

De Technologiemonitor als methode

Inleiding

De Technologiemonitor brengt de ontwikkeling en verspreiding van een technologie in kaart. De methode bestaat uit drie samenhangende onderdelen:

1. Het definiëren van de technologie zodat duidelijk is wat er precies in kaart wordt gebracht.
2. Het algemene patroon van ontwikkeling en verspreiding van een technologie zodat duidelijk is hoe de technologie zich heeft ontwikkeld en waar die nu staat.
3. Het systeem van factoren die een belangrijke rol spelen bij de ontwikkeling en verspreiding van de technologie zodat we kunnen aangeven welke factoren de verdere ontwikkeling en verspreiding belemmeren of bevorderen

De definitie van technologie

Een technologie kan worden gedefinieerd aan de hand van drie aspecten:

1. Het technologisch principe
2. De functionaliteit
3. De componenten

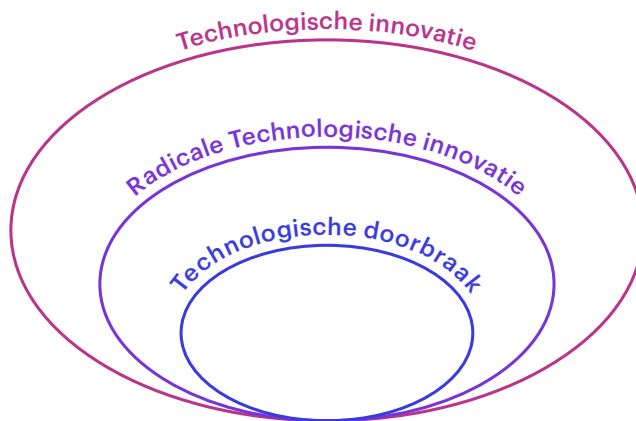
A solar cell is based on the photo-voltaic principle (technical principle). It consists of two types of semi-conductors close to each other (main components) that, when struck by light or other radiant energy, produce an electrical voltage or current when connected by a conducting wire (extra component). The cell can continue to provide voltage and current autonomously i.e., without external power source, as long as light continues to fall on the two materials. This current can be used to measure the brightness of the incident light or as a source of power in an electrical circuit, as in a solar power system (functionality).

Het technologisch principe geeft het principe van de werking, de functionaliteit geeft aan wat je met de technologie kunt doen of bereiken, de componenten vormen de basale onderdelen van de technologie. Een voorbeeld van een definitie van een technologie, de zonnecel, staat in het tekstblok.

Een technologische innovatie is een technologie die voor een organisatie nieuw is op een of meer van de drie aspecten. Een radicale technologische innovatie is een specifieke technologische innovatie waarbij de functionaliteit en/of het technologisch principe nieuw zijn voor de wereld. Een technologische doorbraak is op zijn beurt een specifieke radicale technologische innovatie, waarbij verwacht wordt dat die leidt tot een fundamentele maatschappelijke verandering. Met die fundamentele verandering wordt bedoeld dat de technologie in meerdere domeinen van ons dagelijks leven (of in meerdere industrieën) kan worden toegepast en dat de technologie daar een structurele verandering realiseert.

Radicale technologische innovaties vormen dus een deelverzameling van de technologische innovaties. Technologische doorbraken vormen op hun beurt weer een deelverzameling van de radicale technologische innovaties (zie figuur B-1).

Figuur B1-1: Technologische doorbraak als speciale (radicale) technologische innovatie.



De definitie van technologische doorbraak

Een technologische doorbraak is een speciaal soort (radicale) technologische innovatie.

Een technologie kan worden gedefinieerd in termen van technologisch principe, functionaliteit en componenten.

Een radicale technologische innovatie is een, voor de wereld, nieuwe combinatie van een technologisch principe en een bepaalde functionaliteit. Die radicale technologische innovatie wordt tevens gezien als doorbraak als verwacht wordt ze leidt tot fundamentele verandering in de maatschappij. Dat betekent dat:

1. De technologie in meerdere domeinen van ons dagelijks leven of in meerdere industrieën kan worden toegepast.
2. De technologie in elk van die domeinen of industrieën een structurele verandering in gang kan zetten.

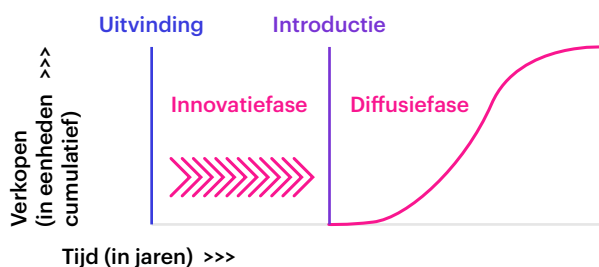
Het patroon van ontwikkeling en verspreiding van een technologie

Het standaardmodel van ontwikkeling en verspreiding

Het standaard model voor de ontwikkeling en verspreiding van een technologische innovatie staat in figuur B-2. Het model heeft twee fasen na de uitvinding van een technologie: de **innovatiefase** en de **diffusiefase**. De innovatiefase begint met de uitvinding van een technologie: de eerste demonstratie van de werking van een technologie. De innovatiefase omvat

het productontwikkelingsproces waarin op basis van de uitvinding een nieuw product of systeem wordt ontwikkeld dat kan worden toegepast in de praktijk. De tweede fase, de diffusiefase omvat het diffusieproces waarbij het nieuwe product of systeem zich verspreidt in de markt. Dit wordt vaak gemeten aan de hand van het aantal verkopen in de loop van de tijd. In de figuur worden die verkopen cumulatief in de loop van de tijd weergegeven.

Figuur B1-2: Het standaard innovatie-diffusie model



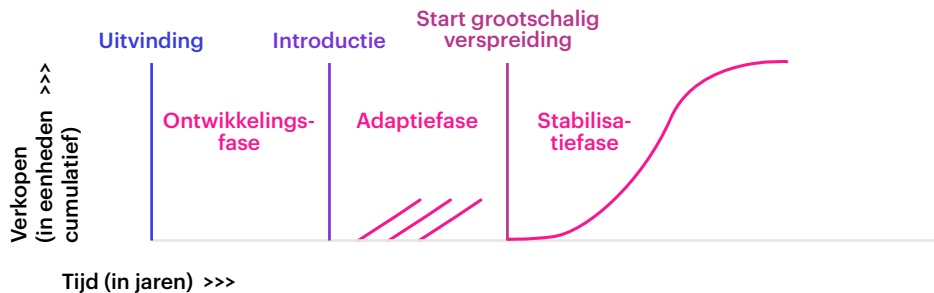
Het patroon als verbeterd model van ontwikkeling en verspreiding

Het standaard innovatie-diffusie model heeft een aantal beperkingen die het model minder geschikt maken voor technologische innovaties. Het standaardmodel versimpelt het proces van uitvinding tot eerste introductie, door die fase te zien als een soort project. In de praktijk is er zelden sprake van één project en is de voortgang zelden zo gestructureerd

als een normaal project. Het standaardmodel versimpelt ook de start van de diffusiefase. In de praktijk is er zelden sprake van een gestaag oplopende diffusie.

In de Technologiemonitor 2018 van STT is een model gepresenteerd dat een realistischere weergave vormt van de ontwikkeling en verspreiding van een technologische doorbraak in de loop van de tijd (zie figuur B-3).

Figuur B1-3: Het meer realistische patroon van ontwikkeling en verspreiding van technologische doorbraken



In het patroon van ontwikkeling en verspreiding worden drie belangrijke momenten in de tijd onderscheiden:

1. De uitvinding: De eerste demonstratie van de werking van de technologische doorbraak.
2. De eerste introductie in de markt: De eerste keer dat de technologische doorbraak wordt verkocht en toegepast.
3. De start van de industriële productie en grootschalige verspreiding en toepassing van de technologische doorbraak.

Met deze belangrijke momenten kunnen drie opeenvolgende fasen worden onderscheiden:

1. De ontwikkelingsfase:

Deze fase loopt van de uitvinding tot een eerste introductie van producten op basis van de technologische uitvinding. De uitvinding is de demonstratie van een werkend principe dat in vaak nog niet productie- en marktrijp is. In de ontwikkelingsfase vindt onderzoek plaats om het principe te verbeteren en verder zijn er vaak een of meerdere ontwikkeltrajecten om op basis van het principe een product te maken dat kan worden verkocht en toegepast.

2. De adaptatiefase:

Deze fase loopt van de eerste introductie tot de start van productie en grootschalige verspreiding van producten op basis van de technologie. Deze fase is veelal een trial-en-error proces waarin verschillende productvarianten in uiteenlopende marktniches worden geïntroduceerd. Er vindt aanpassing (adaptatie) plaats tussen het product,

verschillende klantgroepen en verschillende toepassingen. Die adaptatie kan uiteindelijk leiden tot een standaardproduct. Innovatie van producten, (productie)processen en onderzoek naar verbetering van de technologie blijven in deze fase gewoon doorgaan.

3. De stabilisatiefase:

Deze fase begint met industriële productie en grootschalige verspreiding. Deze fase start met een standaardproduct dat op grote schaal geproduceerd kan worden en dat op grote schaal wordt toegepast en verkocht. De productvarianten en toepassingen zijn dan gestabiliseerd. Vaak blijft in deze fase de innovatie van producten, processen en onderzoek naar de verbetering van de onderliggende technologie gewoon doorgaan.

Het patroon is een generiek model waarbij in de praktijk de lengten van de fasen sterk kunnen variëren. De gemiddelde lengte van de ontwikkelingsfase is ongeveer 10 jaar en voor de adaptatiefase is een soortgelijke gemiddelde lengte gevonden (zie Ortt, 2010). Elke fase kan wegvallen of korter dan wel langer dan gemiddeld zijn. Er zijn technologieën waarbij zowel de ontwikkelings- als de adaptatiefase maar een jaar in beslag namen (zoals bij dynamiet) en er zijn technologieën waarbij die fasen een eeuw duren (zoals bij de fax). Het patroon kan in ieder fase stoppen of worden afgebroken. Het patroon vormt een basis voor een groot aantal scenario's die zich in de praktijk kunnen voordoen.

Innovatie vindt niet alleen in de ontwikkelingsfase plaats maar tijdens alle fasen van het patroon. In de ontwikkelingsfase wordt vaak fundamenteel onderzoek gedaan naar het verbeteren van het technologische principe. Maar in die fase wordt ook vaak toegepast onderzoek gedaan naar het ontwikkelen van toepassingen met producten en diensten op basis van het technologische principe. In de adaptatiefase loopt het fundamenteel onderzoek vaak door terwijl met toegepast onderzoek verschillende producten en toepassingen worden ontwikkeld en verbeterd. Omdat het systeem van actoren en factoren dat nodig is voor grootschalige verspreiding, vaak nog niet compleet is gedurende de adaptatiefase, zie je veelal specifieke nichetoepassingen die anders zijn dan de latere grootschalige toepassingen van technologie. Ook tijdens de stabilisatiefase loopt het fundamentele onderzoek vaak door, terwijl toegepast onderzoek wordt gedaan naar het verbeteren of aanvullen van producten, productiemethodes, of complementaire producten en diensten.

Het type onderzoek voor een technologie gedurende de opeenvolgende fasen kan sterk afwijken. Soms vindt namelijk fundamenteel onderzoek naar een technologie plaats na het toegepaste onderzoek. Dat is bijvoorbeeld het geval als een principe al wordt toegepast en verbeterd voordat het wetenschappelijk gezien wordt begrepen. Mensen ontwikkelden bijvoorbeeld vliegtuigen voordat ze begrepen hoe de aerodynamica van het vliegtuig precies werkte, mensen bouwden zeilboten die optimaal zeilden lang voordat

de luchtstromen rond de zeilen en de daaruit volgende krachten volledig werden begrepen. Soms worden dus in een trial en error proces natuurlijke principes benut en wordt apparatuur ontwikkeld en verbeterd, zonder dat het technologische principe volledig wordt begrepen. Opvallend is dat voor veel verschillende technologieën de totale omvang van het onderzoek (zowel fundamenteel als toegepast) sterk toeneemt gedurende de opeenvolgende fasen van het patroon. Dat heeft verschillende oorzaken. Eén oorzaak is dat onderzoek naar een technologie vaak pas rendabel wordt als die verbeterde technologie vervolgens op grote schaal kan worden toegepast. Dat laatste is het meest waarschijnlijk gedurende de stabilisatiefase. De toename van de hoeveelheid onderzoek in de opeenvolgende fasen is in tegenspraak met het zogenaamde 'pijplijnmodel' van innovatie waarin fundamenteel onderzoek alleen in het begin plaatsvindt.

De belangrijkste aannames van het verbeterde model van ontwikkeling en verspreiding

Het standaard innovatie-diffusie model is verouderd. We hebben nieuwe kennis die aangeeft hoe het patroon van ontwikkeling en verspreiding van technologische doorbraken daadwerkelijk verloopt. Ook het verbeterde model heeft aannames en het is belangrijk om die expliciet te maken. Als niet aan de aannames van het model wordt voldaan, is het model een onbruikbare simplificatie.

→ Aanname 1:

De eerste aanname is dat de technologie eenduidig valt te definiëren. Dat definiëren is een stuk makkelijker als je terugkijkt, dus als je een historische casus analyseert. In de praktijk lopen in de beginfase vaak meerdere onderzoeks- en ontwikkeltrajecten parallel en is het nog onduidelijk wat voor soort product een bepaalde technologie eigenlijk wordt. Toen Baekeland in 1907 Bakeliet uitvond wist hij niet zeker of hij nu een constructiemateriaal (een plastic), een vernis of een lijm had gevonden. Later werd duidelijk hoe zijn vinding in de praktijk werd gezien en toegepast, namelijk als constructiemateriaal (Bijker, 1995). Met terugwerkende kracht wordt Baekeland dus ge-

zien als een uitvinder van een plastic. Een soortgelijke onduidelijkheid over de aard van de technologie is ook zichtbaar na de uitvinding van de beeldcommunicatie in de jaren 30 van de vorige eeuw (Van den Ende et al., 1997/8). De Bell labs, een telecommunicatie researchinstituut in de VS, zag de technologie als beeldtelefonie. Een logische visie als je werkt voor een telefoonmaatschappij. Andere partijen echter zagen de technologie als een manier om op afstand films te kunnen kijken. Een logische visie voor partijen die meer gericht waren op de toenmalige filmindustrie. De technologie leidde eind jaren dertig tot de introductie van de televisie. Met terugwerkende kracht lijkt de uitvinding van beeldcommunicatie dus de uitvinding van de televisie te worden. Meer recent ontstaat soortgelijke onduidelijkheid over de aard van uitvindingen. Is Blockchain, bijvoorbeeld, een crypto-currency of toch vooral een contract vorm? Deze voorbeelden geven aan dat het na de uitvinding van een technologie vaak moeilijk is om een eensluidende visie te formuleren op de producten en toepassingen van die technologie. Misschien moet je voor technologieën die veel toepassingen en productvormen kunnen krijgen in scenario's denken in plaats van in één visie.

→ **Aanname 2:**

De tweede aanname is dat de gedefinieerde technologie blijft veranderen, maar wel blijft vallen binnen die definitie van de technologie gedurende alle fasen van het patroon van ontwikkeling en verspreiding. Als de technologie zo snel verandert dat steeds, voordat een fase is afgerond, alweer een nieuwe technologie is uitgevonden of geïntroduceerd en de ontwikkeling van de vorige technologie stopt, dan ontstaat een chaotische situatie waarin het model niet gebruikt kan worden.

→ **Aanname 3:**

De derde aanname is dat drie belangrijke momenten (uitvinding, eerste introductie, start van industriële productie en grootschalige verspreiding), in de tijd vastliggen met een nauwkeurigheid die groter is dan de lengte van de fasen tussen die momenten. Dus als de uitvinding en eerste introductie niet preciezer vast te stellen zijn dan in een tijdsinterval dat groter is dan de tijd tussen deze belangrijke momenten, dan ontstaat een onoverzichtelijke situatie waardoor het model niet zinvol kan worden toegepast. Er zijn dan geen duidelijk fasen in de tijd te onderscheiden.

De factoren die ontwikkeling en verspreiding belemmeren

Het patroon van ontwikkeling en verspreiding van technologische doorbraken geeft een *beschrijving* van het proces van ontwikkeling en verspreiding. Het geeft geen *verklaring* waarom dat patroon in een specifieke vorm optreedt. We zoeken met name naar verklaringen die aangeven waarom de eerste twee fasen in het patroon, de ontwikkelingsfase en de adaptatiefase, soms heel veel en soms heel weinig tijd kosten.

Wij hebben een lijst samengesteld van algemene factoren die nodig zijn voor grootschalige verspreiding van technologische doorbraken. Wanneer de factoren aanwezig zijn kunnen ze de ontwikkeling en verspreiding stimuleren, wanneer ze incompleet of afwezig zijn kunnen ze een barrière vormen. De factoren zijn verdeeld in veertien categorieën. Zeven categorieën vormen het sociaal, economisch en technisch systeem: de kernfactoren. De andere zeven factoren kunnen de kernfactoren beïnvloeden of een verklaring leveren voor de belemmering in die kernfactoren.

Deze verzameling factoren vormen een aanzienlijk uitbreiding op de factoren die Rogers (2010) gebruikt om diffusie te verklaren in het standaard innovatie-diffusie model. Rogers kijkt primair naar factoren aan de vraagzijde van de markt, met name de karakteristieken van de (potentiële) consumenten, en hoe die consumenten een innovatie percipiëren

en beoordelen. Dat is begrijpelijk als je het ontstaan van de diffusie-theorie kent. Rogers was landbouwsocioloog die, in navolging van zijn begeleiders, Ryan en Gross, in de jaren 60 van de vorige eeuw onderzoek deed naar de acceptatie van 'hybrid corn', een nieuw soort graan, onder boeren in de Verenigde Staten. Omdat alle factoren aan de aanbodzijde van de markt op orde waren, richtte de aandacht zich terecht op de vraagzijde van de markt. Echter, toen iedereen het diffusie model ging gebruiken in andere situaties en voor andere innovaties, werd niet gecheckt of die aanbodfactoren ook in die situaties op orde waren en van belang waren voor de verspreiding. We zijn een model, dat ontwikkeld is voor een bijzondere situatie, ook in andere situaties gaan gebruiken. In die andere situaties vormt het diffusiemodel een vertekende vereenvoudiging die leidt tot onjuiste conclusies. Als bijvoorbeeld na introductie van een innovatie, de diffusie niet gestaag toeneemt dan kun je

Tabel B1-1: Kernfactoren voor grootschalige verspreiding van technologische doorbraken

op basis van het standaard diffusiemodel denken dat die innovatie gewoon niet goed (succesvol) is en dus verdere ontwikkeling en verspreiding staken. Het verbeterde model echter geeft aan dat een dergelijke moeizame start van de diffusie heel gewoon is bij meer radicale innovaties en dat je daar gewoon door heen moet. Tabel B1-1 beschrijft de zeven kernfactoren die op orde moeten zijn om grootschalige verspreiding mogelijk te maken.

Kernfactoren	Beschrijving
1 Product prestatie	Een product (met alle componenten en software) met een voldoende goede prestatie en kwaliteit (absoluut of relatief ten opzichte van concurrerende producten) is nodig voor grootschalige verspreiding. Een lage prestatie, kwaliteit of onbedoelde bij-effecten van, of ongelukken met, producten kunnen grootschalige verspreiding hinderen.
2 Product prijs	De prijs van een product omvat financiële en niet-financiële investeringen (bijvoorbeeld de tijd en moeite) om een product te verkrijgen en gebruiken. Een product (met alle componenten en software) met een redelijke prijs (absoluut of relatief ten opzichte van concurrerende producten) is nodig voor grootschalige verspreiding. Een hoge prijs kan grootschalige verspreiding hinderen.
3 Productie system	Een productiesysteem dat grote hoeveelheden producten van voldoende kwaliteit en prestaties kan leveren (absoluut of relatief ten opzichte van concurrerende producten) is nodig voor grootschalige verspreiding. Ontbreken van een dergelijk systeem, onbedoelde bij-effecten van, of ongelukken bij, productie kunnen grootschalige verspreiding hinderen.
4 Complementaire producten en diensten	Complementaire producten en diensten voor de ontwikkeling, productie, distributie, adoptie, gebruik, reparatie, onderhoud en het afdanken van producten zijn nodig voor grootschalige verspreiding. Afwezige of incompatibele systeem onderdelen, onbedoelde bij-effecten van, of ongelukken met, complementaire producten en diensten kunnen grootschalige verspreiding hinderen.
5 Actoren en netwerkvorming	Beschikbaarheid van benodigde actoren en voldoende coördinatie van hun activiteiten voor de ontwikkeling, productie, distributie, adoptie, gebruik, reparatie, onderhoud en het afdanken van producten zijn nodig voor grootschalige verspreiding. Coördinatie kan emergent en impliciet zijn (bijv. het marktmechanisme) of kan formeel en expliciet zijn (bijv. een industrie-associatie). Als bepaalde actoren of coördinatie mechanismen nodig zijn maar ontbreken, dan kan dat grootschalige verspreiding hinderen.
6 Klanten	Klanten zijn nodig voor grootschalige verspreiding. Klanten moeten kennis hebben van het product en haar gebruik en moeten het product willen en kunnen betalen en gebruiken. Als klanten ontbreken, wordt grootschalige verspreiding gehinderd.
7 Normen, regels en wetten	Normen, regels en wetten met betrekking op het product, productie, complementaire producten en diensten, of hoe actoren (aan vraag- en aanbodzijde van de markt) moeten omgaan met het product en het omringende socio-technische systeem zijn nodig voor grootschalige verspreiding. Het ontbreken van normen, regels en wetten kan grootschalige verspreiding hinderen.

De **kernfactoren** vormen een compleet systeem rond een nieuwe technologie. Al die factoren moeten op orde zijn om grootschalige verspreiding van producten of diensten op basis van die technologie mogelijk te maken. Anders geformuleerd: als een of meer van de kernfactoren onvolledig of afwezig zijn, of als de factoren onvoldoende op elkaar zijn afgestemd, dan wordt grootschalige verspreiding belemmerd.

De **beïnvloedende factoren** kunnen verklaren waarom een of meer van de kernfactoren onvolledig zijn, afwezig zijn, of niet passend zijn. Deze beïnvloedende factoren verklaren dus problemen in het systeem van kernfactoren, en geven tevens een indicatie van (toekomstige) veranderingen in de kernfactoren. Oftewel: de beïnvloedende factoren kunnen belemmeringen verklaren in de kernfactoren en kunnen veranderingen in die kernfactoren zichtbaar maken. Tabel B1-2 beschrijft de zeven beïnvloedende factoren.

Tabel B1-2: Beïnvloedende factoren voor grootschalige verspreiding van technologische doorbraken

Beïnvloedende factoren	Beschrijving
8 Kennis van technologie	Dit omvat fundamentele en toegepaste kennis van de technologie. Fundamentele kennis heeft betrekking op technologische principes in het product, productie, complementaire producten en diensten en het omringende socio-technische systeem. Toegepaste kennis heeft betrekking op kennis voor het ontwikkelen (design), produceren, en beheersen van technologische principes. Als relevante actoren belangrijke kennis van technologie voor hun rol ontberen, kan dat grootschalige verspreiding hinderen.
9 Kennis van toepassingen	Dit omvat kennis van potentiële toepassingen, kennis van de markt(structuur) en de betrokken actoren. Deze kennis is nodig voor alle actoren, inclusief klanten, om strategieën te vormen, productvereisten te formuleren en om andere actoren te vinden. Als relevante actoren relevante kennis van toepassingen voor hun rol ontberen, kan dat grootschalige verspreiding hinderen.
10 Werknemers en grondstoffen	De beschikbaarheid van werknemers met de benodigde kennis en vaardigheden, en de beschikbaarheid van grondstoffen en inputs zoals componenten en materialen, zijn nodig voor de productie en het gebruik van een product, voor productie, complementaire producten en diensten. Organisaties met een rol in het verzorgen van deze aspecten, zoals vakbonden, vallen hier ook onder. Een gebrek aan dergelijke inputs kan de kernfactoren beïnvloeden en daarmee grootschalige verspreiding hinderen.
11 Financiële middelen	Financiële middelen en de organisaties (bijv. banken) of platforms (bijv. crowd funding) om deze middelen te leveren zijn nodig voor de ontwikkeling en verspreiding van nieuwe producten, productiesystemen, complementaire producten en diensten en voor de adoptie, implementatie en het onderhoud van de producten. Een gebrek aan financiële middelen bij actoren aan de vraag- of aanbodzijde van de markt (twee belangrijke kernfactoren) kan grootschalige verspreiding hinderen.

Beïnvloedende factoren	Beschrijving
12 Macro-economische en strategische aspecten	Macro-economische en strategische aspecten refereren naar de algehele economische situatie in een land of industrie, zoals een recessie of een industrie-brede stagnatie. Strategische aspecten refereren naar belangen van landen en industrieën. Macro-economische en strategische aspecten van landen en industrieën kunnen de kernfactoren beïnvloeden en daarmee grootschalige verspreiding hinderen.
13 Socio-culturele aspecten	Socioculturele aspecten refereren naar normen en waarden in een bepaalde cultuur of industrie. Ze omvatten methodes en gewoontes in een industrie of land en kunnen ook betrekking hebben op belangengroepen buiten de supply chain. Deze aspecten zijn vaak minder geformaliseerd dan de formele normen, regels en wetten. Socio-culturele aspecten kunnen de kernfactoren beïnvloeden en daarmee grootschalige verspreiding hinderen.
14 Ongelukken en onverwachte gebeurtenissen	Dit omvat ongelukken en gebeurtenissen buiten het socio-technische systeem met een grote impact, zoals oorlogen, nucleair incidenten, natuurrampen of politieke omwentelingen. Deze zaken, of het risico erop, kunnen de kernfactoren beïnvloeden en daarmee grootschalige verspreiding hinderen.

Een voorbeeld geeft aan waarom die combinatie van kernfactoren en beïnvloedende factoren zo belangrijk is. Als een kernfactor ontbreekt, bijvoorbeeld omdat er geen consumenten zijn, dan is grootschalige verspreiding niet mogelijk. Consumenten vormen een belangrijke kernfactor, die beïnvloed kan worden door verschillende factoren. Het kan bijvoorbeeld zijn dat de kennis bij consumenten over de technologie en haar toepassingen ontbreekt (beïnvloedende factoren 8 en 9) of dat de technologie is te duur voor de consumenten (beïnvloedende factor 11). Elk van die beïnvloedende factoren heeft een ander effect op de kernfactor 'consumenten' en vraagt dus ook om een ander beleid van regulerende organisaties of overheden of vraagt om een andere strategie van organisaties die de technologie in de markt willen zetten.

“Consumenten vormen een belangrijke kernfactor, die beïnvloed kan worden door verschillende factoren.”

De factoren kunnen gebruikt worden als een dashboard. De status van de factoren geeft aan of factoren belemmerend of stimulerend zijn voor de ontwikkeling en grootschalige verspreiding van een technologie. De status is vertaald naar een soort verkeerslicht:

- **Rood:** belemmerend;
- **Groen:** stimulerend;
- **Oranje:** licht belemmerend.

Tabel B1-3: Illustratie van het dashboard met factoren voor grootschalige verspreiding van de technologische doorbraak.

Kernfactoren		Beïnvloedende factoren	
1 Productprestatie		8 Kennis van technologie	
2 Productprijs		9 Kennis van toepassingen	
3 Productiesysteem		10 Werknemers en grondstoffen	
4 Complementaire producten en diensten		11 Financiële middelen	
5 Actoren en netwerkvorming		12 Macro-economische en strategische aspecten	
6 Klanten		13 Socio-culturele aspecten	
7 Normen, regels en wetten		14 Ongelukken en onverwachte gebeurtenissen	

Het bovenstaande overzicht van een fictieve technologie laat een situatie zien waarin een gebrekkige kennis van de technologie (die beïnvloedende factor 'staat op oranje') leidt tot een probleem bij het maken van een productiesysteem. Verder is er een probleem met normen, regels en wetten die een remmend effect hebben op ontwikkeling en verspreiding van de technologie.

Beperkingen en mogelijke uitbreidingen van de methode technologie monitor
 Het toepassen van de Technologiemonitor methode, bestaande uit drie delen (1) een definitie van technologie, (2) een patroon van ontwikkeling en verspreiding van technologie, en (3) een framework van factoren die verdere ontwikkeling en verspreiding kunnen stimuleren, heeft zijn beperkingen en kan verder uitgebreid worden. Hieronder de belangrijkste discussiepunten die tevens de agenda vormen voor toekomstig werk.

Een discipline bestaat uit meerdere verwante technologieën die in het begin vaak sterk verweven zijn. De definitie van afzonderlijke technologieën is als het ware nog niet stabiel omdat er binnen de nieuwe discipline nog allerlei technologische combinaties worden uitgetoetst. Pas als de verschillende

technologieën in een discipline zichtbaar worden, heeft het zin om afzonderlijke technologieën te definiëren en apart te bestuderen.

Het patroon van ontwikkeling en verspreiding van een technologie geeft een overzicht met een zogenaamde hindsight bias, dat geldt met name voor het begin van het patroon. Omdat technologieën in het begin van het ontstaan van een discipline nog verweven zijn, is het bestuderen van afzonderlijke patronen nog niet zinvol. Er wordt van alles geprobeerd en gedemonstreerd en dat heeft niet altijd het karakter van een grote uitvinding. Echter als mainstream technologieën zijn ontstaan na verloop van tijd, dan is het best mogelijk om terug te kijken en vast te stellen wanneer die technologie voor het eerst werkend werd gedemonstreerd. Dan kun je als het ware met terugwerkende kracht vaststellen dat er sprake was van een grote uitvinding.

Ook voor het framework met factoren gelden beperkingen. De factoren zijn nog maar gedeeltelijk bruikbaar aan het begin van het patroon. Veel factoren zijn incompleet en in het begin is er bij 'science-based' technologische innovaties vooral veel kennisopbouw en onderzoek.

Veel van deze beperkingen van de Technologiemonitor en haar drie delen komen voort uit allerlei verbanden tussen verschillende technologieën in een discipline. In het derde hoofdstuk worden die verbanden daarom nader onderzocht.

Bijlage 2

Wetenschappelijke relevantie van onderzoek naar quantumtechnologieën

Het onderzoek naar quantumtechnologie heeft een aantal wetenschappelijke zaken weer opnieuw op de agenda gezet.

Allereerst maakt het onderzoek duidelijk dat technologieontwikkeling en verspreiding een complex fenomeen is dat je beter kunt begrijpen als je het fenomeen bestudeert op meerdere niveaus. Technologische innovatie is een multi-level probleem. Je kunt het fenomeen bestuderen op het niveau van een project, zoals heel veel organisaties en wetenschappers doen. Je kunt het fenomeen ook bestuderen op het niveau van een technologie waarvan heel veel varianten in nog veel meer projecten en organisaties in de loop van decennia ontwikkelen en verspreiden. Dat gebeurt ook door veel wetenschappers, maar wel andere wetenschappers dan de eerdergenoemde. De Technologiemonitor kijkt naar dit niveau. Je kunt het fenomeen ook bestuderen op het niveau van een discipline, waar we in dit rapport een aanzet toe maken.

“Technologische innovatie is een multi-level probleem.”

In plaats van het op ieder niveau apart bestuderen van het fenomeen technologieontwikkeling en verspreiding is het zowel praktisch als wetenschappelijk relevant om de relatie tussen die niveaus zichtbaar te maken. Een R&D-project ziet er anders uit wanneer de technologie zich in de ontwikkelingsfase, de adaptatiefase of de stabilisatiefase van het patroon bevindt. Ook de organisatie van productie en marketing van technologische producten verloopt anders in de adaptatiefase dan in de stabilisatiefase. Marktstrategieën van organisaties en beleid van de overheid hebben een heel verschillend effect en moeten dus

anders worden geformuleerd in die opeenvolgende fasen van het patroon. Kortom, technologische innovatie op projectniveau, zoals dat centraal staat in veel organisaties, wordt sterk beïnvloed door het hoger liggende niveau van technologieontwikkeling en verspreiding. Eenzelfde relatie tussen het niveau van technologieontwikkeling en verspreiding (het patroon) en het hoger gelegen niveau van discipline ontwikkeling is in dit rapport onderzocht. In het begin van een discipline hebben trajecten van ontwikkeling en verspreiding van verschillende technologieën uit die discipline nog meer onderlinge relaties.

Het onderscheiden van niveaus maakt duidelijk waar je op moet letten. Het maakt ook duidelijk waarom innovatie over het algemeen niet lineair maar meer chaotisch verloopt. Met name in het begin is er op elk van die niveaus een bepaalde mate van chaos zichtbaar. Die chaos ontstaat door beïnvloeding van buiten de discipline op het moment dat die discipline kwetsbaar is en nog nauwelijks economisch bestaansrecht heeft naast de bestaande disciplines. Die chaos ontstaat ook door de onderlinge verbanden van technologieën binnen een discipline. Die technologie waarvan de aanvankelijke ontwikkeling snel resultaat oplevert trekt alle aandacht en op die manier zijn er moeilijk voorspelbare volgtijdelijke effecten die de voortgang van afzonderlijke technologieën in een discipline bepalen. In het begin zijn de ontwikkelingen op de niveaus nog sterk verweven, later ontstaan er afzonderlijke paden met op elk niveau een eigen dynamiek.

STT kijkt al 50 jaar vooruit

Stichting Toekomstbeeld der Techniek (STT) is een onafhankelijke stichting in 1968 opgericht door het Koninklijk Instituut van Ingenieurs (KIVI). STT voert al meer dan 50 jaar brede toekomstverkenningen uit (domeinoverstijgend en interdisciplinair) op het snijvlak van technologie en samenleving.

Terugkijken doen we niet vaak

Ons verhaal

Terugkijken doen we niet vaak bij de Stichting Toekomstbeeld der Techniek. Liever kijken we vooruit, op zoek naar nieuwe ontwikkelingen op technologisch en maatschappelijk gebied. We proberen voortdurend in te schatten wat die ontwikkelingen kunnen betekenen. STT bestaat als sinds 1968. Op gezette tijden is het goed om terug te kijken. Lees hier wat er in meer dan 50 jaar allemaal is gebeurd en wat STT voor elkaar heeft gekregen.

dr. Patrick van der Duin,
directeur
Stichting Toekomstbeeld
der Techniek

Van nanotechnologie naar oceanen, van big data naar hoe mensen zichzelf in de verre toekomst zien, van vervoer naar zorg, van quick scan naar horizonscan, er zijn weinig gebieden waarover STT niet een beeld en oordeel heeft gevormd. Maar altijd was de insteek naar de verre toekomst te kijken, om breed te kijken dus zowel naar technologische als maatschappelijke ontwikkelingen. En om toekomstbeelden te schetsen die gedurfd en inspirerend zijn. Niet uit een ingeboren recalcitrantie maar vanuit de oprechte overtuiging dat de toekomst zich vaak schuilhoudt in hoeken en gaten die in het heden nog niet voorstelbaar zijn.

Natuurlijk laat de geschiedenis van STT een ontwikkeling zien. Begonnen we ooit met het publiceren van rapporten, tegenwoordig doen we dat nog steeds, maar vullen we dat aan met 'visuals' zoals filmpjes, kunstwerken en andere digitale uitingen.

En ook wat betreft de onderwerpen van onze toekomstverkenningen bekijken en beoordelen we nieuwe technologieën niet slechts op de technologische merites, maar zijn we ook bijzonder nieuwsgierig naar hoe deze technologieën zich in de toekomst verhouden tot maatschappelijke ontwikkelingen en aan welke societal challenges ze zouden kunnen bijdragen. Hoewel STT nog steeds meer dan graag gebruik maakt van de kennis van experts gaan we ook steeds vaker te rade bij

unusual suspects en peilen we zelfs graag de mening van burgers wat betreft hun verwachtingen over technologie in de toekomst.

STT beseft zich terdege dat toekomstverkenningen geen doel op zich zijn maar bedoeld zijn om de maatschappij, overheidsorganisaties en commerciële partijen te ondersteunen en te inspireren bij het ontwikkelen van hun strategie, beleid en innovatie. STT wordt actief ondersteund door meer dan zestig organisaties, zoals technologiebedrijven, infrabeheerders, kennisinstellingen, overheden, bedrijven in de fast-moving consumer goods en financiële instellingen. Het is juist deze diversiteit aan partners die niet alleen het werk van STT een solide basis verschaft, maar die tevens de toekomstverkenningen de vereiste verscheidenheid aan input geeft zodat we in onze ontdekkingsreis langs die eerdergenoemde onvoorstelbare hoeken en gaten van de toekomst komen. Hoewel de toekomst complex en onzeker is, weten we wel zeker dat STT met de steun van onze huidige en toekomstige partners de toekomst zal blijven verkennen.



stt.nl