

Nationale Agenda Quantumtechnologie

Waar staan we, waar gaan we heen?

In september 2019 was de Nationale Agenda Quantumtechnologie gereed. Kort erna gaf het kabinet het financiële startschot voor de uitvoering ervan met de toekenning van een startimpuls van 23,5 miljoen euro. Het is tijd voor een update: hoe zijn we van start gegaan, wat hebben we bereikt, wat zijn onze plannen voor de toekomst met de recent toegekende middelen (615 miljoen euro voor zeven jaar) uit het Nationaal Groeifonds?

Doel van het programma is om Nederland te positioneren als een internationaal toonaangevend centrum en knooppunt voor quantumtechnologie. Nederland is niet het enige land met die ambitie, niet in de wereld en ook niet in Europa. Wie het nieuws volgt, heeft de Europese plannen langs zien ko-

men: in januari van dit jaar kondigde Frankrijk een investering aan van 1,8 miljard euro in quantumtechnologie, in de voetsporen van Duitsland (2 miljard euro) en Groot-Brittannië (153 miljoen pond). Deze nationale initiatieven haken aan bij het Quantum Flagship van de Europese Unie, wat over een periode van een tiental jaren een miljard euro wil investeren in technologische toepassingen van quantumverstrengeling. De Verenigde Staten hebben een vergelijkbaar bedrag klaargezet en China een veelvoud hiervan.

Vanwaar deze mondiale focus op een natuurkundig verschijnsel dat al bijna honderd jaar bekend is? Quantumverstrengeling was lang een onderwerp voor fundamentele bespiegelingen over het rare van de quantumfysica; een ‘spookachtige’ band (in de woorden van Einstein) die uit elkaar gelegen deeltjes verbindt. Pas op het einde van de twintigste eeuw drong het door dat die onzichtbare band gebruikt kan worden voor het doen van berekeningen en voor het versturen van berichten (zie [1]). Deze twee toepassingen, quantumcomputers en quantuminternet, zijn in deze eeuw op kleine schaal werkelijkheid

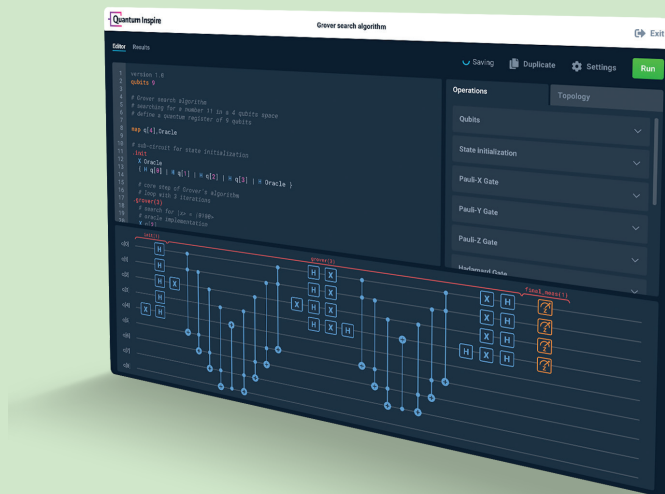
geworden. Quantumverstrengeling is een product geworden, wat je kunt verkopen waar je een bedrijfstak op kunt baseren met uitdagende carrièrekansen voor fysici, ingenieurs en informatici.

De vergelijking met de transistor ligt voor de hand. Is er een kans voor Nederland om een Silicon Valley van de quantumtechnologie te worden? Wij denken van wel en we hebben een naam voor een Europese toegangspoort tot de quantumindustrie: Quantum Delta the Netherlands, kortweg QDNL. De Nationale Agenda Quantumtechnologie [2] legt onze plannen uit en met de toegekende startimpuls aan het QDNL-consortium [3] hebben we een begin gemaakt met de verwezenlijking ervan. Wat hebben we bereikt?

De drie zwaartepunten van het programma betreffen drie toepassingen van quantumverstrengeling: voor snelle berekeningen (quantumcomputer), voor veilige communicatie (quantuminternet) en voor gevoelige waarnemingen (quantumsensoren). We bespreken deze drie afzonderlijk.

Quantumcomputers

Vanwege de gespecialiseerde infra-



Figuur 1: De programmeeromgeving van Quantum Inspire toont de qubits op de horizontale lijnen en de bewerkingen als verticale lijntjes met bolletjes die aangeven welke qubits met elkaar wisselwerken. Een vierkantje met een letter erin is een operatie op één enkele qubit. De X-operatie is een bitflip (0 wordt 1 en 1 wordt 0), de H (= Hadamard) operatie brengt een qubit in een quantumsuperpositie van 0 en 1. Het +-teken is een operatie op drie qubits (flip de qubit indien de twee qubits waarmee het plusje verbonden is beide de waarde 1 hebben). Credits: QuTech.

structuur die een quantumcomputer nodig heeft (zoals de afkoeling tot dicht bij het absolute nulpunt) wordt deze technologie als een centrale faciliteit via het internet aan gebruikers aangeboden. IBM, Amazon, Google en Microsoft hebben hun eigen platform, maar er was tot voor kort nog geen publieke partij die een quantumcomputer voor algemeen gebruik aanbood. In april vorig jaar werd Quantum Inspire [4] gelanceerd, de eerste Europese publieke quantumcomputer, ontwikkeld door het Delftse QuTech, een samenwerking tussen TU Delft en TNO. Quantum Inspire is een verzamelaar voor een internetplatform waarop je programma's kunt ontwikkelen (gebruikmakend van speciale softwarepakketten), testen op een klassieke computer en uitvoeren op één of meerdere quantumcomputers. Op dit moment zijn er twee types quantumprocessors beschikbaar, een 5-qubit supergeleidende chip en een 2-qubit processor gebaseerd op elektronenspinnen in silicium. Het aantal qubits is nog gering (Google heeft een supergeleidende chip met 53 qubits), maar de siliciumchip is een primeur en heeft veel potentie: deze

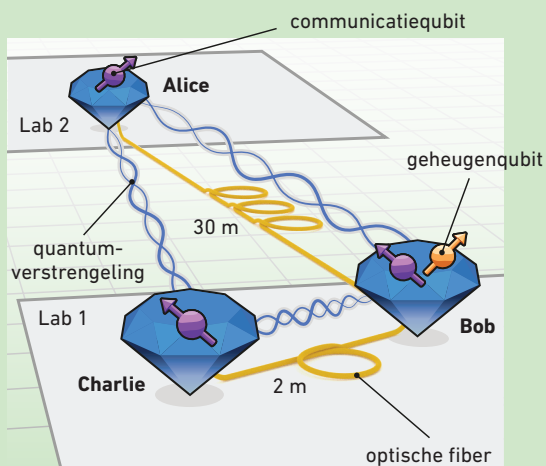
quantumprocessor is gebaseerd op dezelfde technologie die voor gewone computers gebruikt wordt. Een samenwerking met chipfabrikant Intel maakt het mogelijk om te profiteren van de enorme hoeveelheid ervaring die de elektronische industrie heeft met silicium als platform voor een computerchip.

Er zijn meer typen qubits in ontwikkeling in andere laboratoria: fotonische qubits (PsiQuantum, Quix), qubits van ionen (IonQ, Honeywell) en Majoranaqubits (Microsoft). We hebben dus een keuze gemaakt, enerzijds op een technologie die al ver ontwikkeld is (supergeleidende qubits) en anderzijds op een technologie die veelbelovend is vanwege de grote overlap met bestaande CMOS-technologie (halfgeleider-spinqubits). Een derde type qubits, gebaseerd op Rydbergatomen, is in ontwikkeling in Eindhoven en Amsterdam en kan in de Quantum Inspire-faciliteit geïntegreerd worden (zodat gebruikers éénzelfde programma op verschillende typen qubits kunnen uitproberen). Ditzelfde geldt voor spinqubits in diamant, die in Delft ontwikkeld worden.

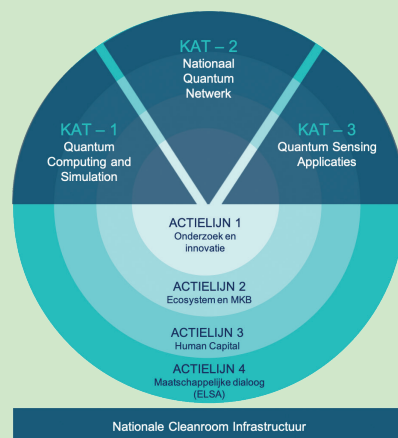
In het kader van de Nationale Agenda Quantumtechnologie werken

Amsterdam en Leiden samen met onderzoekers van Delft en Eindhoven aan de ontwikkeling van programmatuur voor de Quantum Inspire-faciliteit. We hebben gemerkt dat er onder studenten veel belangstelling bestaat voor deze nieuwe richting in de informatica. Voor de ouderen onder ons roept het herinneringen op aan hoe spannend het was om op ponskaarten de eerste computers te programmeren.

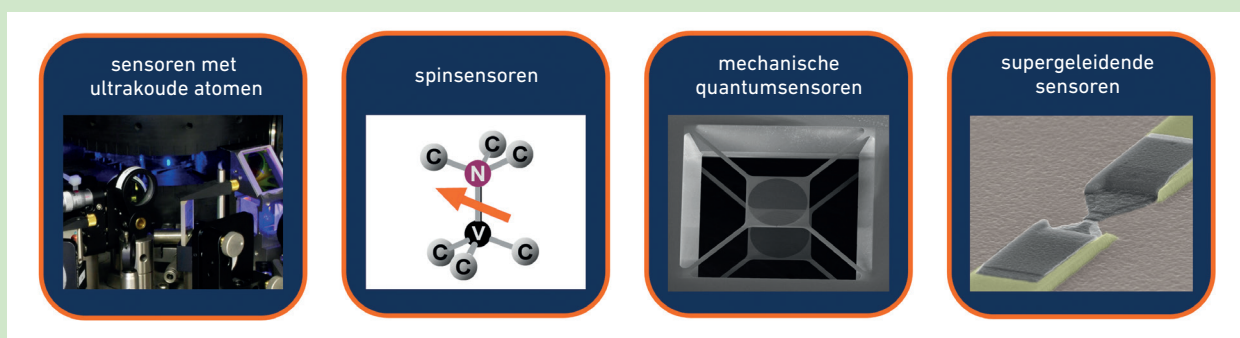
Het programmeren van een quantumcomputer gaat op een heel andere manier dan op een gewone computer. Er zijn fundamentele en praktische verschillen. Een fundamenteel verschil is dat elke quantumoperatie omkeerbaar moet zijn, dus zo iets eenvoudigs als het optellen van twee getallen is niet toegestaan: 5 is de som van 2 en 3 maar ook de som van 1 en 4, dus deze bewerking is niet omkeerbaar. Een praktisch verschil is dat alleen quantumbits (qubits) die fysiek dicht bij elkaar geplaatst zijn kunnen wisselwerken. Om deze beide redenen bestaat een quantumprogramma uit maar een handvol elementaire bewerkingen, steeds op niet meer dan twee of drie qubits tegelijkertijd (zie figuur 1).



Figuur 2: Drie knooppunten, genaamd Alice, Bob en Charlie, bevinden zich in twee afzonderlijke laboratoria op de Delftse campus. Elk knooppunt bevat een communicatiequbit (paars) gebaseerd op een roosterdefect in een diamantje. Bij Bob wordt bovendien een kernspinqubit (oranje) gebruikt als geheugen. Optische fiberverbindingen tussen de knooppunten maken het mogelijk om quantumverstrengeling te genereren tussen alle drie de knooppunten (kronkelende lijnen). Figuur aangepast uit [7].



Figuur 4: De opzet van de Nationale Agenda Quantumtechnologie.



Figuur 3: Vier types sensoren die gebruikmaken van quantumeffecten (zoals verstrengeling en superpositie) voor een vergrote gevoeligheid. Credits: F. Schreck, T. van der Sar, N. Haider, S. Gröblacher.

In de komende paar jaar zullen we ons vooral richten op training, educatie en het ontwikkelen van toepassingen, zodat voldoende mensen met de quantumcomputer aan de slag kunnen als deze eenmaal verder doorontwikkeld en breder beschikbaar is. Dan kan de technologie snel geïntroduceerd worden in de maatschappij.

Quantuminternet

De onzichtbare band die quantumverstrengeling heet geeft ook fundamenteel nieuwe mogelijkheden voor communicatie. Dat zijn de beloftes van het quantuminternet [5]. Zo is het in principe mogelijk om berichten te

versturen die niet ongemerkt onderschept kunnen worden. Ook kan met een quantuminternet een quantumcomputer in de cloud met volledige privacy benut worden: de server kan dan namelijk onmogelijk de inputdata, de berekening en outputdata ontcijferen. Verder kunnen bijvoorbeeld door verstrengeling netwerken van sensoren, van telescopen en van atoomklokken krachtiger worden gemaakt.

In het voorjaar kwam het nieuws naar buiten van een Nederlandse primeur: [6] het eerste netwerk dat drie onafhankelijke quantumprocessors verbindt (zie figuur 2). Dit is een

mijlpaal op de weg naar een quantumnetwerk dat verschillende steden in de Randstad zal verbinden. Een van de volgende uitdagingen is het opschalen van de quantumlink tussen twee processoren over een optische fiber tot afstanden van tien à vijftig kilometer. Hiervoor zijn aanpassingen van de frequentie en stabilisatie van de fotonen noodzakelijk. Ook zullen deze processoren, nu niet meer dan twee qubits bevattend, worden uitgebreid om meer geavanceerde toepassingen te testen.

Ondertussen worden de eerste fotonische opstellingen die geoptimaliseerd zijn voor sleuteluitwisseling al

getest in netwerken rond Eindhoven en Delft/Den Haag; op deze korte afstanden kunnen de opstellingen werken zonder quantumprocessor. De netwerken bieden de mogelijkheid om deze eerste generatie quantumtechnologie te testen buiten de beschermde labomgeving, om de integratie met de bestaande interstructuren te onderzoeken en om eerste eindgebruikers aan te sluiten. Voor nog grotere afstanden zijn quantumversterkers nodig. Deze zijn fundamenteel anders dan klassieke versterkers, aangezien elke bewerking ‘onderweg’ de verstrengeling tussen de qubits verbreekt. De oplossing is een proces van ‘wisseling van verstrengeling’ in een tussenstation: als eindpunt A is verstrengeld met versterker R, en versterker R ook verstrengeld is met eindpunt B, dan kan R de verstrengeling tussen A en B aan elkaar ‘lijmen’. Daartoe is gedurende een korte tijd een quantumgeheugen noodzakelijk in versterker R.

Quantumsensoren

Omdat quantumverstrengeling zo extreem gevoelig is voor verstoring kan van de nood een deugd gemaakt worden: de gevoeligheid van een sensor kan sterk verbeterd worden door quantumeffecten zoals verstrengeling en superpositie te benutten, waardoor nieuwe toepassingen mogelijk worden. De Nationale Agenda Quantumtechnologie voorziet in de realisatie van vier testlocaties, met het doel om deze technologie van het laboratorium naar de gebruikers te brengen (figuur 3). Voortbouwend op het iQClock-project [8] van het Quantum Flagship worden in Amsterdam atoomklokken ontwikkeld en zal een ultranauwkeurig tijd- en frequentiesignaal worden gedeeld met academische en industriële partners. Deze technologie maakt telecomnetwerken weerbaar tegen uitval van GPS en maakt navigatie via netwerken van mobiele telefoons mogelijk met een precisie van tien centimeter. Deze klokken zijn zó nauwkeurig dat ze in een tijdsbestek van de levensduur van het heelal (bijna veertien miljard jaar) minder dan één

seconde verkeerd lopen. Tot dusver zijn zulke atoomklokken complexe experimentele opstellingen die een kamer vullen en door meerdere personen moeten worden aangestuurd. Met hulp van expertise in de Nederlandse industrie, onder andere op geïntegreerde fotonica, zullen de klokken compacter en robuuster worden gemaakt, zodat toepassingen veel gemakkelijker worden. Sensoren gebaseerd op quantumspins in diamant of silicium kunnen elektromagnetische velden met grote gevoeligheid en hoge resolutie detecteren. Zulke sensoren zijn robuust en hebben allerhande toepassingen. Denk aan medische apparatuur (bijvoorbeeld voor het meten van hersenactiviteit) of aan materiaalkunde. Mechanische quantumsensoren meten versnelling, druk of magneetvelden met grote precisie. Ze kunnen met hulp van halfgeleidertechnologie in grote aantallen geproduceerd worden en worden bijvoorbeeld gebruikt in navigatie en in systemen die waarschuwen voor aardverschuivingen of vulkaanuitbarstingen. Ten slotte ontwikkelt TNO supergeleidende sensoren, bijvoorbeeld ten behoeve van gevoelige radarsystemen, met toepassingen voor veiligheid en defensie, en in de ruimtevaart.

Katalysatorprogramma's

De drie beschreven activiteiten staan in de Nationale Agenda onder de noemer katalysatorprogramma's (KAT). Kenmerk ervan is een nauwkeurig omschreven doel en een vrij strikt tijdpad. Figuur 4 vat samen dat deze KAT's aangevuld worden met een viertal actielijnen, die tot doel hebben om de deelname aan het programma te verbreden (naar onderzoekers die niet deelnemen aan de KAT's) en vooral om bedrijvigheid aan te jagen: doorbraken in onderzoek en innovatie moeten leiden tot de ontwikkeling van toepassingen die de Nederlandse economie versterken. We verwachten dat quantumtechnologie voor nieuwe banen zal zorgen, hiervoor moeten mensen worden opgeleid, en één van de actielijnen heeft specifiek de talentontwikkeling als doel. Er is ook een

actielijn gericht op de dialoog met de maatschappij, inclusief onderzoek naar de ethische en juridische aspecten van deze nieuwe technologie. En ten slotte is er een grote investering voorzien in de nationale cleanroominfrastructuur, die uitgevoerd wordt via de NanoLab-NL-organisatie onder leiding van de Twentse hoogleraar Guus Rijnders. Het is duidelijk dat we spannende jaren tegemoet gaan waarin we op alle aspecten rond quantumtechnologie stappen willen zetten. We zullen de lezers van het NTvN uiteraard op de hoogte houden van tussentijdse mijlpalen en voortgang!

Carlo Beenakker is hoogleraar theoretische natuurkunde aan het Instituut-Lorentz (UL) en vicevoorzitter van QDNL's Raad van Toezicht. Hij onderzoekt topologische quantumcomputers, met steun van een ERC Advanced Grant.

Ronald Hanson is distinguished professor in quantumcomputing en quantuminternet aan de TU Delft en voorzitter van QDNL's Raad van Toezicht. Hij was directeur van QuTech en ontving in 2019 de Spinozapremie.
R.Hanson@tudelft.nl

Servaas Kokkelmans is universitair hoofddocent quantumgassen en quantumsimulatoren aan de TU Eindhoven. Hij is directeur van QT/e en zit in QDNL's Raad van Toezicht.

Kareljan Schoutens is hoogleraar theoretische fysica aan de Universiteit van Amsterdam, waar hij onderzoek doet naar quantummaterie en quantumsimulatie. Hij is co-directeur van QuSoft en lid van QDNL's Raad van Toezicht.

REFERENTIES

- 1 Quantuminformatie: van fundamenteel tot toepassing, NTvN 80-06 (2014).
- 2 www.rijksoverheid.nl/documenten/brochures/2020/02/17/nationale-agenda-quantumtechnologie.
- 3 <http://quantumdelta.nl>.
- 4 www.quantum-inspire.com.
- 5 Sébastien de Bone en Gianluca de Bruin, Routekaart voor het quantuminternet, NTvN 85-02 (2019).
- 6 www.nature.com/articles/d41586-021-00420-5.
- 7 M. Pompili, S.L.N. Hermans et al., Realization of a multinode quantum network of remote solid-state qubits, *Science* 372, 259-264 (2021).
- 8 www.iqclock.eu.