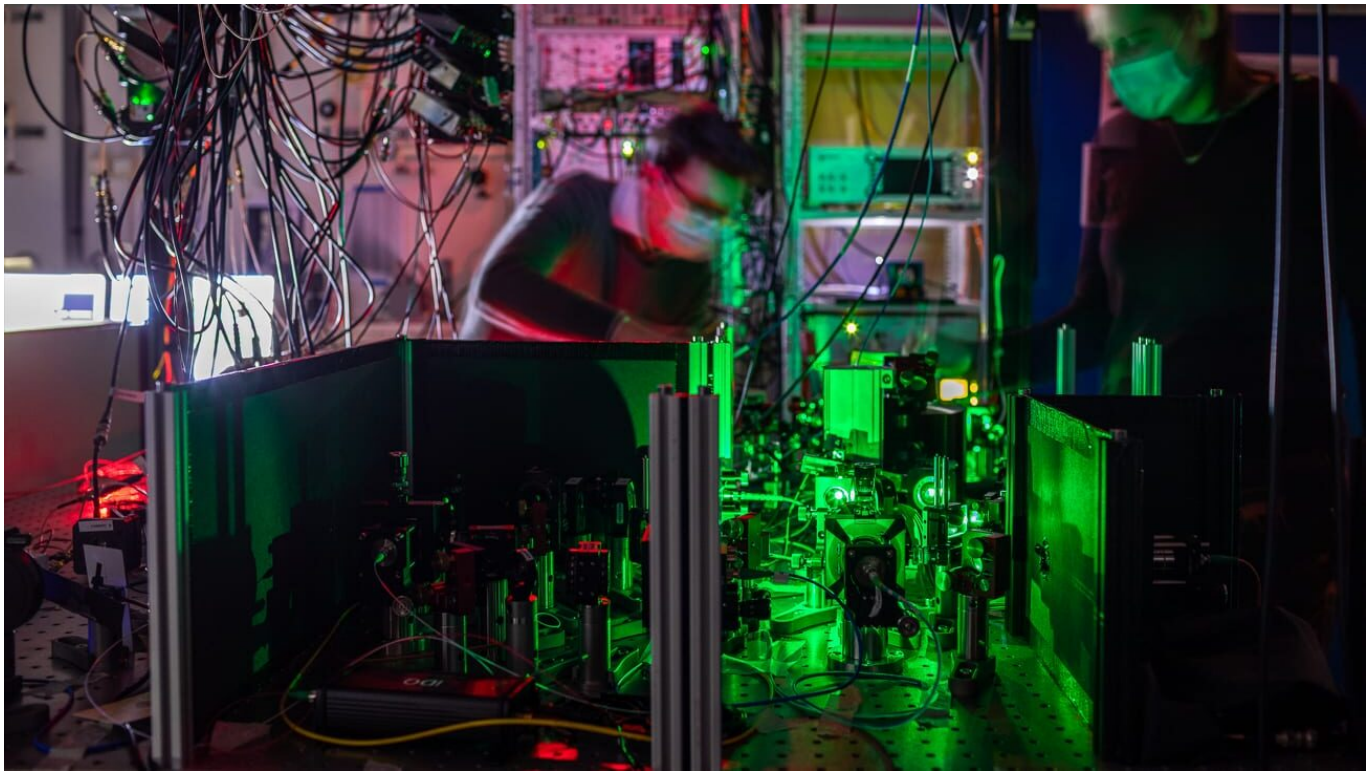
's Werelds eerste quantumnetwerk

Het quantuminternet komt steeds dichterbij. In Delft staat ’s werelds eerste quantumnetwerk, waarin drie quantumprocessoren, verspreid over twee laboratoria, met elkaar worden verstrengeld. Maak kennis met Alice, Bob en Charlie!



Afbeelding 1. Een quantumnetwerkknooppunt in het lab. Onderzoekers werken aan een van de quantumnetwerkknooppunten, waar spiegels en filters laserstralen naar een diamantchip (een quantumprocessor) leiden. Foto: Marieke de Lorijn voor QuTech.

Het internet is tegenwoordig onmisbaar voor wereldwijde communicatie, de economie, en natuurlijk de talloze schattige kattenvideo’s die velen dagelijks voorgeschoteld krijgen. Onze afhankelijkheid van dit fantastische netwerk brengt echter ook nadelen met zich mee, waarvan de grootste is dat hackers misbruik maken van hetzelfde netwerk om data en geld te stelen. Het zogeheten ‘quantuminternet’ zou dit probleem kunnen oplossen, omdat communicatie met behulp van quantumbits (*qubits*) veel veiliger uitgevoerd kan worden. (Zie hierover ook onze eerdere serie artikelen over quantumcomputers.)

Sinds ons laatste artikel over het quantuminternet zijn er alweer belangrijke stappen gezet in de richting van het realiseren ervan. Onderzoekers van QuTech in Delft hebben namelijk sinds vorig jaar de beschikking over een werkend netwerk van drie quantumprocessoren. Dat houdt in dat qubits in drie verschillende systemen (quantum-) informatie kunnen uitwisselen, ook al liggen ze meters uit elkaar. De stap naar drie communicerende quantumchips was een belangrijke, omdat hiervóór alleen maar experimenten waren uitgevoerd met twee chips. En tja, twee knooppunten vormen nog geen netwerk.

Video 1. Het quantumnetwerkVideo van Slimplot voor QuTech.

De video hierboven is een korte samenvatting van wat het quantumnetwerk is, en wat er tot nu toe mee is gedaan. Dit is allemaal gebaseerd op dit wetenschappelijke artikel, gepubliceerd in *Science* (**372**, 259–264 (2021)).

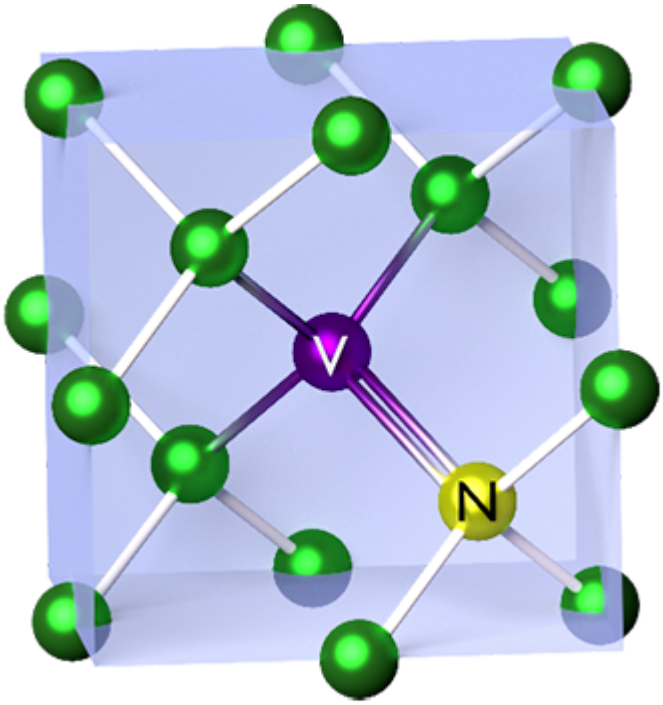
Wie of wat zijn Alice, Bob en Charlie?

De drie knooppunten in het netwerk worden Alice, Bob en Charlie genoemd. Zoals te zien is in afbeelding 1, bestaan deze netwerkknooppunten letterlijk uit een grote tafel met daarop lasers, vele optische componenten zoals spiegels en filters, magneten, en ergens in het midden een minuscule chip (afbeelding 2) met daarop een of meerdere qubits. De quantummagie zit hem in die qubits: kleine objecten die zich in twee quantumtoestanden kunnen bevinden ($|0\rangle$ en $|1\rangle$), of in een superpositie van de twee ($a\,|0\rangle + b\,|1\rangle$, waar a en b complexe getallen zijn). Dit in tegenstelling tot de ‘klassieke’ bits die normale computers gebruiken, en die alleen de waarde 0 of 1 kunnen hebben.



Afbeelding 2. Bob, een diamantchip in het quantumnetwerk Bob is geïnstalleerd in een cryogene confocale microscoop, en wordt bewaard bij een temperatuur van 4 Kelvin. In het midden is de printplaat te zien die wordt gebruikt om elektrische signalen aan de qubits te leveren. Foto: QuTech.

De qubits die in Alice, Bob en Charlie gebruikt worden, bestaan uit een speciaal soort onzuiverheid (een *defect*) in diamantkristallen. Diamant bestaat uit koolstofatomen die ieder chemische bindingen maken met vier buren. Een defect in dit kristal ontstaat wanneer een koolstofatoom vervangen wordt door een ander atoom, in dit geval een stikstofatoom. Stikstof heeft één elektron meer dan koolstof, waardoor het maar drie chemische bindingen kan vormen. Hierdoor gaat het stikstofatoom altijd gepaard met een missend atoom (oftewel: een *vacature*) in het rooster. Het geheel noemen we een *stikstof-vacaturecentrum*, oftewel



NV-centrum.

Afbeelding 3. Een NV-centrum.De qubits in het quantumnetwerk bestaan uit deze defecten in een diamantkristal. Een stikstof-vacaturecentrum (NV-centrum) ontstaat wanneer een stikstofatoom (N, geel) een koolstofatoom (groen) vervangt in het atoomrooster. Omdat stikstof maar drie chemische bindingen kan vormen, ontstaat naast het N-atoom een gat (vacature V, paars), waar een elektron in vast komt te zitten. Afbeelding: NIST.

Op ieder NV-centrum komt (netto) één elektron vast te zitten. De |0⟩ en |1⟩ van een NV-centrum-qubit bestaan uit twee verschillende (lage-energie-) toestanden waar het elektron zich in kan bevinden. Met behulp van microgolven kan het elektron, met een bepaalde waarschijnlijkheid, van de ene naar de andere toestand gebracht worden. Zo hebben Alice, Bob en Charlie ieder een qubit die naar verschillende toestanden gebracht kan worden. Zoals in de video hierboven te zien is, gebruiken de onderzoekers in Bob ook nog een tweede, ‘memory-qubit’ oftewel geheugen-qubit. Dat is niet een elektrontoestand van het NV-centrum, maar de spin van een naburig koolstofatoom dat een extra neutron bevat. Net zoals toestand van het NV-centrum kan de spin van een koolstof-13-isotoop zich in twee toestanden bevinden: ‘spin-up’ of ‘spin-down’, grofweg ‘linksom’ of ‘rechtsom tollend’; of in een superpositie van de twee, wederom een combinatie met complexe getallen. De toestand van Bobs elektron kan hiermee opgeslagen worden in deze geheugen-qubit, waarna de elektrontoestand gebruikt kan worden voor communicatie en verstrengeling met de NV-centra van Alice en Charlie.

Qubits meten en verstrengelen

Nu weten we dus wat Alice, Bob en Charlie zijn, maar wat kunnen we ermee? Ten eerste kun je per NV-centrum meten in welke toestand het zich bevindt. Meten speelt in de quantummechanica een speciale rol, omdat een meting de superpositie van een toestand breekt. Wanneer een qubit zich in de toestand $a\,|0\rangle + b\,|1\rangle$ bevindt, zul je bij het meten met een waarschijnlijkheid van $|a|^2$ de toestand $|0\rangle$ meten, en met waarschijnlijkheid $|b|^2$ de toestand $|1\rangle$. Na een meting is de toestand van een qubit altijd $|0\rangle$ of $|1\rangle$, en nooit een superpositie daarvan.

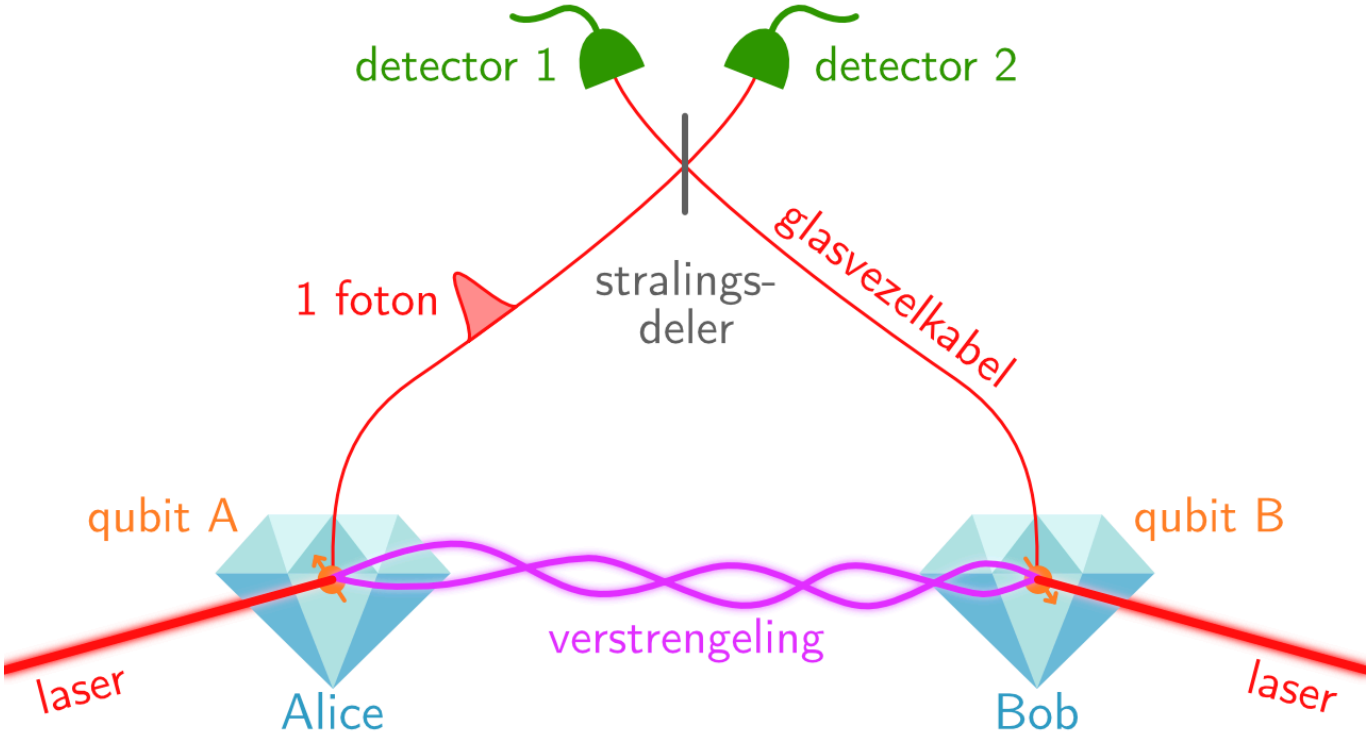
Zo'n meting voer je uit met behulp van lasers en heel gevoelige fotondetectoren. Met een laser breng je het lage-energie-elektron (oorspronkelijk in toestand $a\,|0\rangle + b\,|1\rangle$) naar een aangeslagen, hoge-energietoestand. Hierbij is belangrijk dat deze overgang alleen mogelijk is vanuit de $|0\rangle$-toestand, en niet vanuit de $|1\rangle$-toestand, dus de waarschijnlijkheid dat het elektron naar de hoge-energie toestand gaat hangt af van de grootte van a. Wanneer het elektron weer terugvalt naar een lagere-energietoestand, zendt het een lichtdeeltje (een *foton*) uit. Door te meten of er daadwerkelijk een foton wordt uitgezonden, meet je dus of de overgang geslaagd is, en leer je iets over de oorspronkelijke toestand van de qubit. Meet je een foton, dan is de uitkomst van de meting $|0\rangle$, en meet je geen foton, dan is de toestand van de qubit $|1\rangle$.

Omdat we bij het meten de superpositie van de qubit kapotmaken, verwijderen we daarmee ook alle nuttige quantumeigenschappen die daarvan afhankelijk zijn. Door naar meerdere qubits tegelijk te kijken, kunnen we echter interessante dingen doen. Neem twee qubits, A en B, die zich bevinden in toestanden $|A\rangle = (1/\sqrt{2})(|0\rangle_A + |1\rangle_A)$ en $|B\rangle = (1/\sqrt{2})(|0\rangle_B + |1\rangle_B)$. (De notatie is wat gecompliceerd, maar de factoren van wortel 2 doen niets anders dan zorgen dat we a en b inderdaad kunnen vertalen in waarschijnlijkheden, die optellen tot 100%.) We kunnen deze twee qubits ook als één gezamenlijke toestand beschouwen, als $|AB\rangle = (1/2)(|0_A0_B\rangle + |1_A1_B\rangle + |1_A0_B\rangle + |0_A1_B\rangle)$. Als we nu een meting uitvoeren aan beide qubits tegelijkertijd, kunnen we in totaal nul, één, of twee fotonen meten:

- $|0_A0_B\rangle$ → beide detectoren meten 0 fotonen
- $|1_A1_B\rangle$ → beide detectoren meten 1 foton, dus 2 in totaal
- $|1_A0_B\rangle$ → detector A meet 1 foton, detector B meet 0 fotonen

- $|0_A1_B\rangle$ → detector A meet 0 fotonen, detector B meet 1 foton

Zo'n gelijktijdige meting kunnen we gebruiken om de twee qubits met elkaar te verstrengelen, Dit houdt in dat ze in een superpositie terechtkomen waarbij je maar een van de twee qubits hoeft te meten om de toestand van de andere qubit te weten. Verstrengeling is wat alle voordelen van het quantuminternet mogelijk maakt. Een voorbeeld van een verstrengelde toestand is $a\ |1_A0_B\rangle + b\ |0_A1_B\rangle$: als we een van de qubits meten, dan weten we meteen dat de andere qubit zich in de tegenovergestelde toestand bevindt. We weten dat het systeem zich in deze verstrengelde toestand bevindt wanneer we één foton meten, maar niet weten van welke qubit deze afkomstig is. Dit kan gedaan worden met een stralingsdeler; zie afbeelding 4.



Afbeelding 4. Hoe twee qubits met elkaar verstrengeld kunnen raken.Als we, na het beschijnen van beide qubits met een laser, een enkel foton meten in een van de twee detectoren, weten we dat de qubits zich in de verstrengelde toestand $a\ |1_A0_B\rangle + b\ |0_A1_B\rangle$ bevinden. Dit werkt echter alleen als we niet weten welke van de twee qubits het foton heeft uitgezonden. Dit kun je bereiken met behulp van een stralingsdeler, die met 50% kans het foton doorlaat naar één van de detectoren, en met 50% kans het foton reflecteert richting de andere

detector. Afbeelding: Jans Henke.

Van twee naar drie

Wat we hierboven hebben beschreven, is het soort procedure dat in Delft gebruikt wordt om paren van qubits met elkaar te verstrengelen. Met behulp van Bobs extra geheugen-qubit hebben de onderzoekers Alice, Bob en Charlie in één gezamenlijke verstrengelde toestand kunnen brengen, iets wat zeker nodig zal zijn voor het delen van quantuminformatie tussen meer dan twee knooppunten tegelijk. Ook zijn ze erin geslaagd om Alice met Charlie te verstrengelen, hoewel deze twee knooppunten geen directe informatie met elkaar kunnen uitwisselen omdat ze geen onderlinge glasvezelverbinding hebben. Dit laat zien dat verstrengeling in een toekomstig quantuminternet ook mogelijk is als twee qubits een of meerdere knooppunten van elkaar verwijderd zijn.

Deze demonstraties met een driedelig quantumnetwerk zijn belangrijk, omdat ze laten zien dat het in principe mogelijk moet zijn om een quantuminternet te realiseren. Het zal nog wel even duren tot het echte quantuminternet online komt, maar wij kijken in ieder geval al uit naar de komst van Dave, Erin, Frank en al hun vrienden.

Uitgelichte afbeelding: artistieke impressie van het drieknoops-kwantumnetwerk. Afbeelding gemaakt door Matteo Pompili voor QuTech.