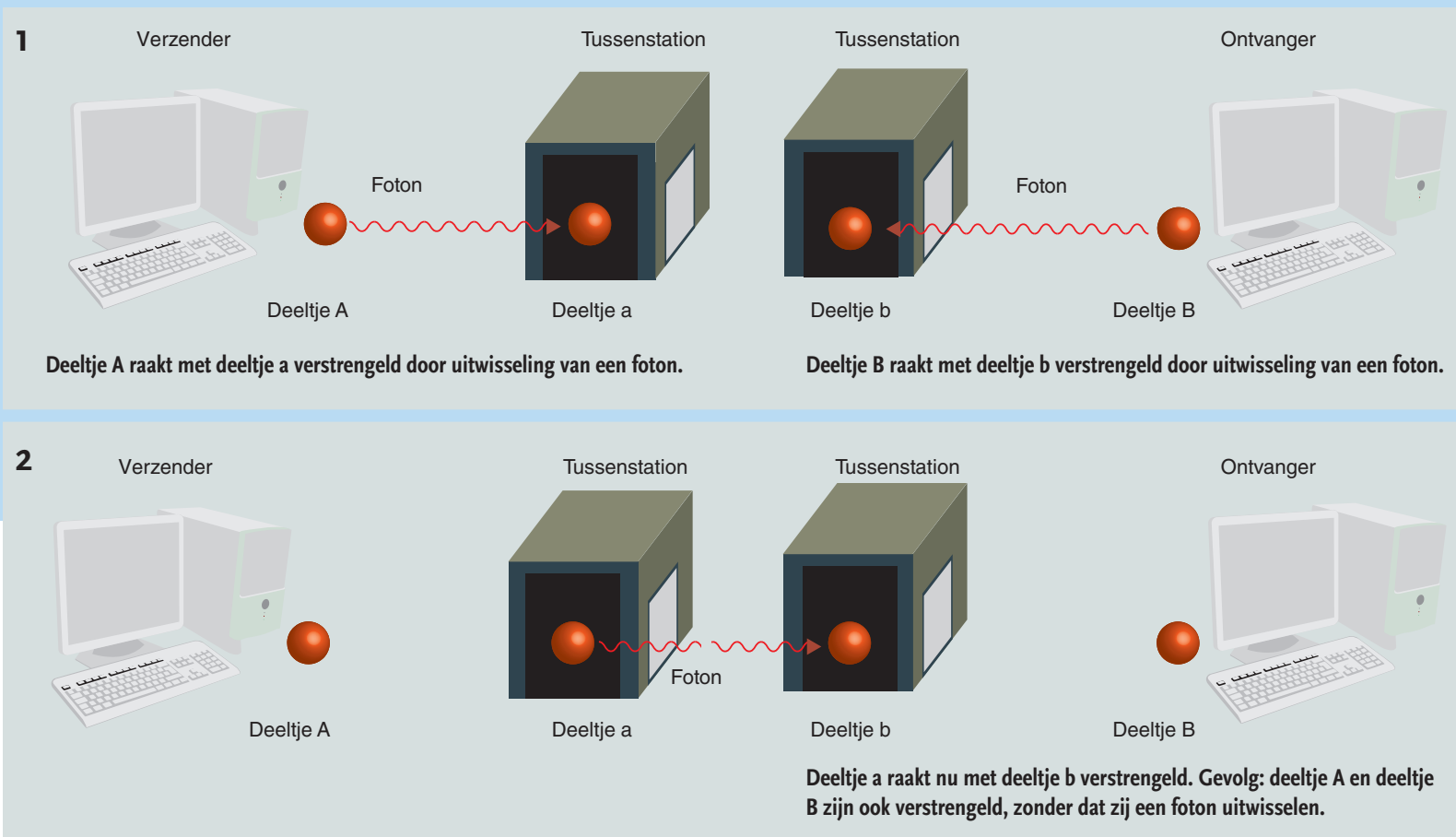


Informatie watervlug teleporteren

Surfen op het kwantuminternet

Als een supersnelle quantumcomputer eenmaal bestaat, wil je daar natuurlijk wel mee internetten. Fysici werken aan een kwantuminternet dat geen informatie meer verstuurt, maar teleporteert.



VEILIG SURFEN MET EEN KWANTUMINTERNET

Een van de belangrijkste verschillen tussen het klassieke internet en een kwantuminternet is dat de informatie bij een kwantuminternet zich niet laat kopiëren. 'Als je nu iets zoekt op Google, houdt de zoekmachine die informatie in de gaten en slaat hij je zoekopdracht op in een database', zegt fysicus prof.dr. Gerhard Rempe. 'Maar op het kwantuminternet zou dat onmogelijk zijn.' Kwantuminformatie is niet te kopiëren omdat het vervliegt zodra je het probeert waar te nemen. 'Het kwantuminternet kan daardoor niet alles onthouden', zegt Rempe.

Fysicus dr. Ronald Hanson verwacht dat een kwantuminternet vooral te gebruiken is als iets veilig moet. 'Ik kan me dat goed voorstellen bij bijvoorbeeld verkeer tussen banken of bij militaire toepassingen', zegt Hanson. 'Maar die hebben misschien juist geen behoefte aan een openbaar kwantuminternet. Die maken dan hun eigen netwerk.' Overigens bestaan er nu al kwantummechanische manieren om gegevens te versleutelen. Veel commer-

ciële partijen werken bijvoorbeeld aan kwantumcryptografie, waarbij informatie versleuteld wordt in fotonen. Het voornaamste verschil is echter dat die informatie direct wordt uitgelezen, waardoor alleen de klassieke uitkomst overblijft. 'Dit soort 'simpele' kwantumsystemen hebben dus geen geheugen nodig', zegt Rempe, terwijl dat voor een toekomstig kwantuminternet juist een van de voornaamste vereisten is.



'DIT BERICHT VERNIETIGT ZICHZELF OVER vijf microseconden.' Deze waarschuwing komt niet uit de nieuwe James Bond-film, maar biedt een blik op een mogelijke toekomst waarin we allemaal een kwantumcomputer op ons bureau hebben staan. Fysici sleutelen al decennialang aan een computer die niet rekent met enen en nullen, maar met de kwantumtoestanden van elementaire deeltjes.

Het leuke van kwantumcomputers is namelijk dat ze in theorie onwaarschijnlijk veel meer rekenkracht hebben dan een gewone computer. De kwantumcomputer maakt daarvoor gebruik van een wonderlijke eigenaardigheid van de kwantummechanica: dat deeltjes zich tegelijkertijd in meerdere toestanden kunnen bevinden. Zo laat de theorie het bijvoorbeeld toe dat een elektron op meerdere plaatsen tegelijk is, of dat een minuscuul stemvorkje tegelijk trilt én niet trilt.

Het verplaatsen van kwantum informatie mondde uit in een heuse wapenwedloop

Door die gekke eigenschap – fysici noemen dat superpositie – krijgen natuurkundigen het voor elkaar om de nullen en enen van klassieke informatie naar het kwantumdomein te tillen. Zij creëren dan zogeheten qubits, kwantummechanische versies van de klassieke bits. Deze qubits kunnen niet alleen nul of een zijn, maar ook nul én een. Wie daarmee rekent, kan dan ook snel zeer complexe berekeningen doen, omdat qubits tegelijkertijd verschillende rekenstappen doorlopen.

Een groeiende groep natuurkundigen wil echter nog een stap verder. Zij dromen van een internet dat toekomstige kwantumcomputers met elkaar kan verbinden. Met zo'n netwerk zou je extreem zware berekening kunnen uitvoeren. 'Het doel is om problemen op te lossen die je met klassieke computers nooit kunt aanpakken, ook niet als zij onderling verbonden zijn via een netwerk', zegt fysicus prof.dr. Gerhard Rempe, verbonden aan het Duitse Max Planck-instituut voor kwantumoptica.

Als je een kwantuminternet optuigt, duikt echter een probleem op. De vreemde wetten van de kwantummechanica schrijven namelijk voor dat kwantum informatie meteen verdwijnt als je het waarneemt. Alleen de klassieke informatie blijft over. Wie bijvoorbeeld kijkt waar een elektron zit, vindt het slechts op één plek, niet op alle plekken tegelijkertijd. En wie een qubit bekijkt, ziet dat deze 0 of 1 is, en niet beide.

Daarom maakt het onmogelijk om kwantum informatie over het klassieke internet te versturen. Een qubit kun je niet over je wifi-netwerkje heen en weer laten lopen, omdat de klassieke informatie in die netwerken continu wordt gemeten. Op het huidige internet draagt een pakketje gegevens altijd informatie bij zich over waar het naartoe moet. Een router, een soort digitale wegwijzer, leest die informatie uit en stuurt het pakketje de juiste kant op. En dat kan met kwantum informatie niet.

TELEPORTEREN

'Een kwantuminternet is in feite gewoon een netwerk dat kwantum informatie verstuurt', zegt dr. Ronald Hanson, fysicus verbonden aan het Kavli-instituut van de TU Delft. Het opbouwen van dat netwerk begint bij de keuze van de informatiedrager – de qubit. Zo'n qubit kan in principe van alles zijn, zolang het maar klein genoeg is om onderhevig te zijn aan de wetten van de kwantummechanica en in twee aparte toestanden kan voorkomen. Een bij experimenten veel gekozen drager van kwantum informatie is daarom het foton. Dat lichtdeeltje verplaatst zich razendsnel (met de lichtsnelheid) en heeft onder meer in zijn polarisatie een eigenschap met twee zogeheten smaken (links of rechts gepolariseerd) die kunnen dienstdoen als de '0' en de '1'.

Naar het verplaatsen van kwantum informatie met fotonen is al veel onderzoek gedaan, dat zelfs uitmondde in een heuse wapenwedloop. Dat gebeurde tussen de Oostenrijkse fysicus

prof.dr. Anton Zeilinger en zijn voormalige leerling prof. dr. Jian-Wei Pan, die in China werkt. De natuurkundigen probeerden de in fotonen opgesloten kwantum informatie zo ver mogelijk te verplaatsen. Het huidige afstandsrecord in die wedloop, 144 km, staat op naam van Zeilinger, die dat bereikte bij een experiment op de Canarische Eilanden. Daarbij stuurde hij de fotonen door de vrije ruimte en niet door een kabel waarin ze al vrij snel zouden worden geabsorbeerd. 'Zo kon hij een grotere afstand overbruggen,' zegt Hanson, 'maar er is altijd een limiet.'

KOPIËREN

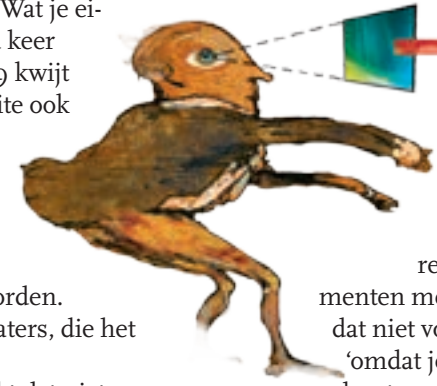
Om die limiet op te rekken, zijn twee tactieken mogelijk. De eerste is het signaal versterken. Hanson: 'Wat je eigenlijk zou willen is dat je een foton honderd keer kan kopiëren. Zelfs als je er dan onderweg 99 kwijt raakt, komt er nog één aan.' Zo gaat het in feite ook in ons huidige internet, waarbij de bits en bytes eveneens worden verstuurd met fotonen door optische kabels. Onversterkt zouden die fotonen nooit door de gigantische kabels van bijvoorbeeld Europa naar de VS komen, zonder onderweg geabsorbeerd te worden. En dus gebruikt ons internet zogeheten repeaters, die het signaal onderweg kopiëren en zo versterken.

In het geval van een kwantuminternet blijkt dat niet mogelijk. Daar gooit het zogeheten *no cloning*-theorema roet in het eten. Dat fundamentele en door experimenten bewezen principe stelt namelijk dat je kwantumtoestanden nooit kunt kopiëren, omdat daar altijd een waarneming voor nodig is. Signaalversterking is dus uitgesloten. Daarom moeten pioniers als Hanson, die bouwen aan de eerste stukken van een kwantuminternet, de hulp inroepen van een bizarre mogelijkheid die de kwantumfysica biedt: het teleporteren van kwantum informatie. 'Bij teleportatie verplaatst je informatie van A naar B zonder dat het daadwerkelijk de weg tussen die twee punten moet afleggen. Zo kan er onderweg ook geen verlies optreden', zegt Hanson.

Om kwantum informatie te kunnen teleporteren, moeten twee (of meer) kwantumdeeltjes zich met elkaar kunnen verstrengelen. Twee verstrengelde deeltjes zijn zozeer met elkaar verbonden, dat een verandering aan het ene ook direct invloed heeft op het andere – zelfs al zitten de twee deeltjes honderden kilometers uit elkaar. Wie de ene verstrengelde qubit meet

in toestand '0', weet dat de andere '1' is, en omgekeerd. Daardoor kunnen twee verstrengelde deeltjes dienstdoen als de uiteinden van een soort kwantumtelefoonlijn, waarmee je kwantum informatie direct van het ene naar het andere uiteinde verplaatst.

Wie kwantum informatie kan teleporteren, heeft dus een belangrijke horde naar het kwantuminternet genomen. Volgens Hanson en Rempe ontbreekt dan nog een belangrijke schakel: een kwantumgeheugen. 'Als je een kwantuminternet wilt bouwen, moet je de verstrengelde toestanden kunnen opslaan in iets vast', zegt Hanson. En dat is niet voor elkaar te krijgen met de teleportatie-experimenten van Zeilinger en



Pan, die alleen fotonen gebruiken. 'Fotonen vliegen alle kanten op', zegt Hanson. 'Je kunt daarmee geen geheugen bouwen.' Informatie van A naar B versturen in de vorm van een qubit lukt nog wel. Het is echter geen sinecure om die informatie vervolgens ongemeten op te slaan en daarna weer verder te stu-

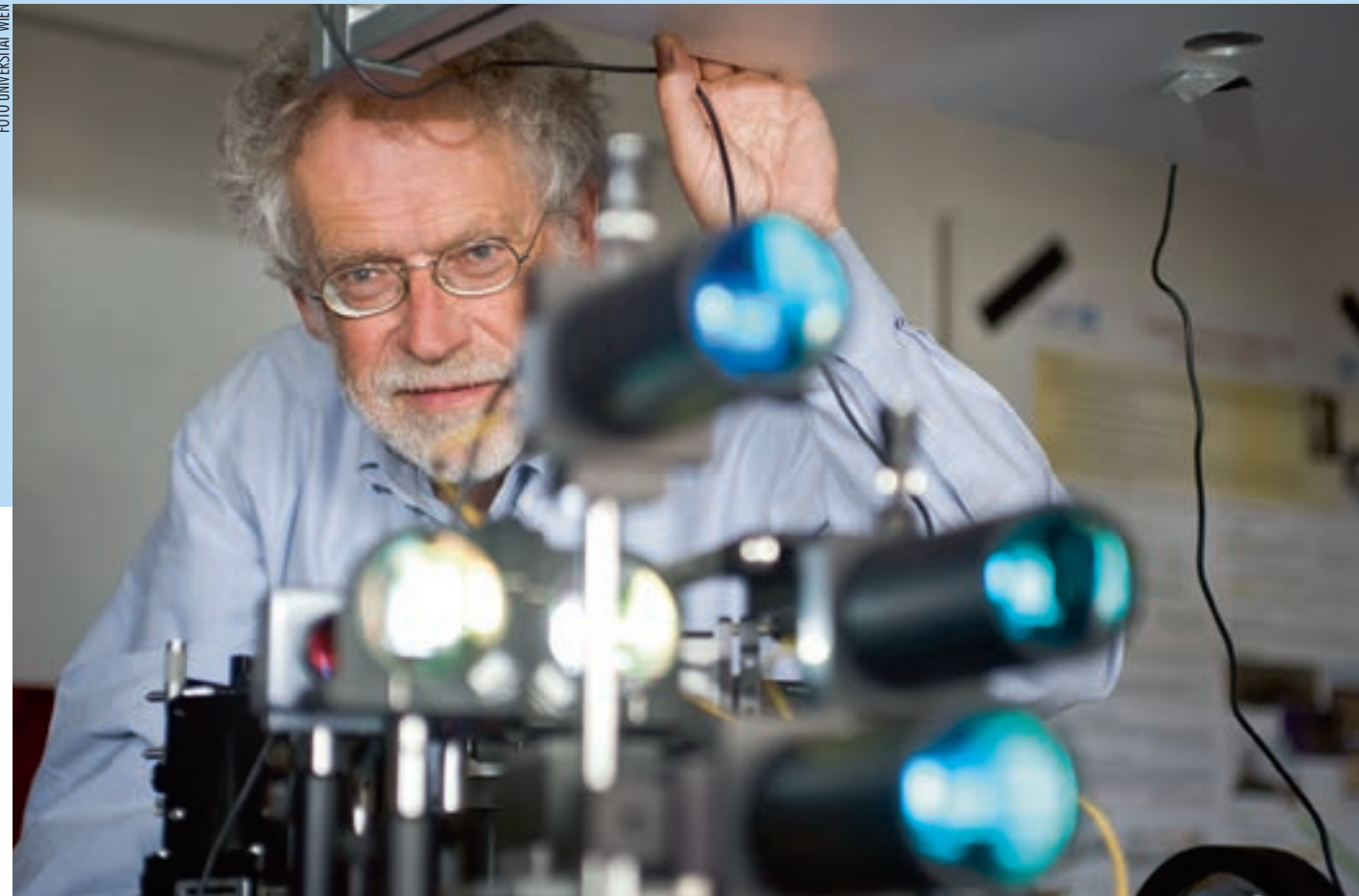
ren van B naar C. 'Experimenten met alleen fotonen krijgen dat niet voor elkaar,' zegt Rempe, 'omdat je zo de informatie niet kunt opslaan.' Of althans: niet langdurig. Zo kan Rempe zich voorstellen dat je een foton met kwantum informatie rondjes laat draaien in een cirkelvormige optische kabel. Dat is echter maar een tijdelijke oplossing. Rempe: 'De maximale lengte van zo'n rondje, voordat het foton wordt geabsorbeerd, is ongeveer 1 km. Dat geeft je 5, 10, misschien 20 µs de tijd om de informatie op te slaan. Dat is niet heel lang.'

TUSSENSTATIONS

Zelf werkt Rempe daarom met een fysiek geheugen – in zijn geval atomen. 'Daarin hebben we een geheugen van ongeveer 200 µs. Dat is al 10 keer zo lang.' De slimmigheid van Rempe is dat hij kwantum informatie weliswaar vervoert met fotonen, maar dat hij kwantumdeeltjes van fysiek materiaal gebruikt om die informatie in op te slaan. In zijn geval zijn dat atomen, die een bepaalde 'spinwaarde' hebben, oftewel een soort intrinsiek draaimoment van deeltjes. En die spin kan 'op' of 'neer' zijn, zodat die toestanden ook dienst kunnen

'Fotonen vliegen alle kanten op. Daarmee kun je geen geheugen bouwen'

FOTO UNIVERSITÄT WIEN



Fysicus Anton Zeilinger is recordhouder op het gebied van kwantuminformatie. Het lukte hem om kwantuminformatie over een afstand van 144 km te transporteren.

doen als 'o' of als '1'. Belangrijk is bovendien dat Rempé en zijn collega's de kwantuminformatie uit zo'n atoom kunnen overdragen aan een foton, waarna dat foton die informatie weer kan overdragen aan een ander atoom. 'In ons experiment lukt dat over een afstand van 60 m, maar het zou in principe ook 600 m of 6 km kunnen zijn', zegt Rempé.

Aan het Kavli-instituut probeert Hanson iets soortgelijks, door kwantum-informatie op te slaan in elektronen. De elektronen zitten in kwantumchips, gemaakt van laagjes diamant, en gebruiken ook de spin om kwantuminformatie op te slaan. 'Het is ons gelukt twee chips te verstrengelen over een afstand van een paar meter', zegt Hanson. Die resultaten zijn inmiddels geaccepteerd voor publicatie in het vakblad Nature.

In de praktijk verkrijgen Rempé en Hanson hun verstrengeling door op plek A een deeltje (een atoom of elektron) te verstrengelen met een foton. Dan sturen ze dat foton naar plek B, waar het wordt geabsorbeerd door een tweede deeltje, dat daardoor ook verstrengeld raakt met dat foton. De wetten van de kwantummechanica dicteren echter dat nu ook de deeltjes in A en B met elkaar verstrengeld zijn. Het gevolg is dat je beide uiteinden van de kwantumtelefoonlijn hebt gemaakt en je kwantuminformatie direct tussen beide locaties kunt teleporteren.

'Het is ons gelukt om twee kwantumchips te verstrengelen over een paar meter afstand'

Het enige probleem is dat je, om de atomen bij A en B te verstrengelen, nog altijd een foton door een kabel moet sturen. 'Dan heb je alsnog last van signaalverzwakking', zegt Hanson. Maar ook daar hebben fysici iets op bedacht. Ze delen grotere afstanden op door middel van tussenstations, die ze kwantumrepeaters noemen. Daardoor hoeft je niet meer A in één keer met B te verstrengelen, maar kan het in tussenstappen (zie infografiek op p. 20).

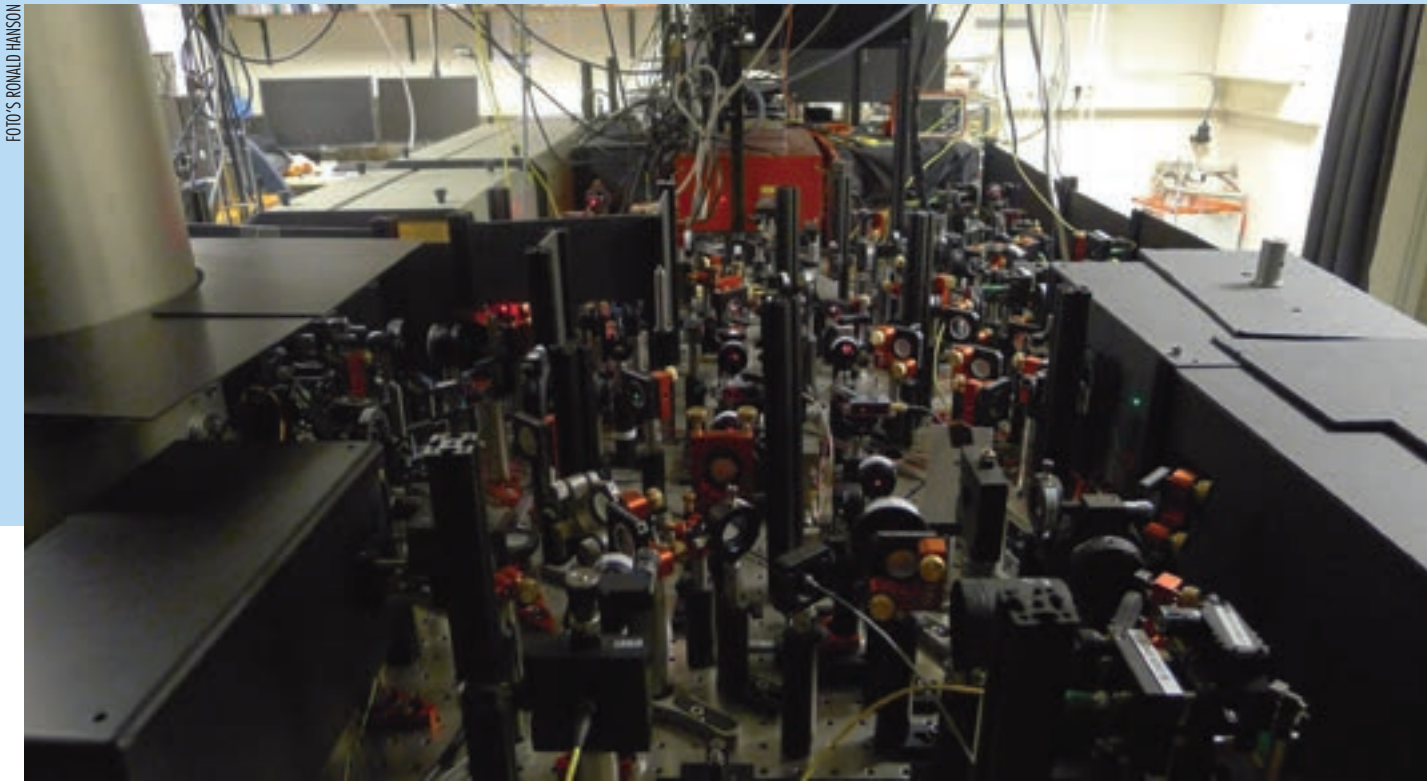


Dat gaat ongeveer zo. Stel dat je een lijn hebt waar tussen de plaatsen A en B twee tussenstations staan – noem de tussenstations voor het gemak a (vlak na A) en b (vlak voor B). Nu verstrengel je eerst de linker twee stations (A en a, door een foton van A naar a te sturen) en dan de rechter twee stations (b en B). Als je vervolgens ook de middelste twee met elkaar verstrengelt (a en b), stellen de wetten van de kwantumfysica dat direct ook A en B met elkaar verstrengeld zijn – zonder dat je een foton helemaal van A naar B hebt moeten sturen.

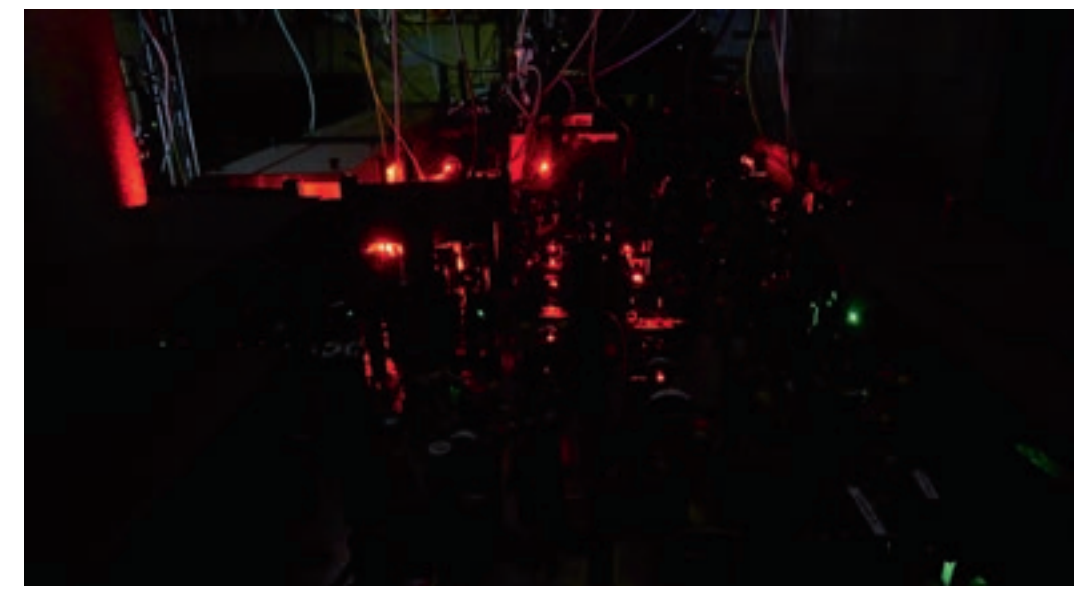
DOWNLOADEN

De grote uitdaging die nu nog resteert, is het overbrengen van kwantuminformatie betrouwbaar te maken. 'We willen kwantumteleportatie nu graag op een deterministische manier doen', zegt Hanson. 'Dat wil zeggen: als ik een qubit heb die ik wil teleporteren, moet ik honderd procent zeker weten dat dat proces altijd werkt.'

FOTO'S RONALD HANSON



De optische tafel waarmee fysicus Ronald Hanson zijn kwantuminternet opbouwt.



De experimenten van Zeilinger – zonder kwantumgeheugen – zijn daarvoor niet geschikt. 'Ze kunnen hun experiment een miljoen keer doen en daarvan lukt het misschien duizend keer,' zegt Hanson, 'maar deterministisch kan in hun opstelling fundamenteel niet.'

Dat zit bij het experiment van Rempé anders. 'De door ons gebruikte techniek is in principe deterministisch,' zegt Rempé, 'maar in de praktijk is er nog wel sprake van verlies'. Zo gaat bijvoorbeeld de vertaling van de kwantumtoestand van de atomen naar de fotonen nog niet altijd goed. Rempé: 'Het gaat alleen om technische belemmeringen, geen fundamentele problemen. Die kunnen we in de toekomst wellicht dus nog wel oplossen.' Ook Hanson heeft daarin wel vertrouwen, al denkt hij dat zijn groep de primeur zal hebben. 'Ik denk dat deterministische kwantumteleportatie dit jaar al in Delft zal lukken', aldus de Delftse onderzoeker.

Toch verwacht Hanson niet dat we binnenkort allemaal op het kwantuminternet zullen zitten. 'Als we zoiets bouwen,

wordt het echt een nichemarkt, boven op het gewone internet', meent hij. Rempé ziet echter meer toepassingen. 'Je wilt straks bijvoorbeeld ook kwantumsoftware kunnen downloaden. Met het kwantuminternet kun je meer informatie versturen, op efficiëntere wijze. Dat ligt allemaal nog in de toekomst. Nu kunnen we nog maar één qubit versturen, met één spin en één foton. Onze droom is om ook complexere toestanden te versturen, met behulp van meerdere atomen en meerdere fotonen. Misschien kunnen we zelfs acht atomen gebruiken – een qubyte – en die qubyte overdragen aan acht fotonen. Daar zou dan onvoorstelbaar veel informatie in zitten', zegt hij.

De enige vraag die volgens Rempé nu rest is of we ook daadwerkelijk ooit zo'n groot kwantumsysteem kunnen bouwen. 'Wie weet zit er toch nog ergens een verborgen waarner verscholen', aldus de onderzoeker. En als dat het geval is, zal alle kwantuminformatie alsnog direct verdampen. ●

'Je wilt straks ook kwantumsoftware kunnen downloaden'