

QUANTUMVER- STRENGELING OP MENSELIJKE SCHAAL

Physicalezing 2022

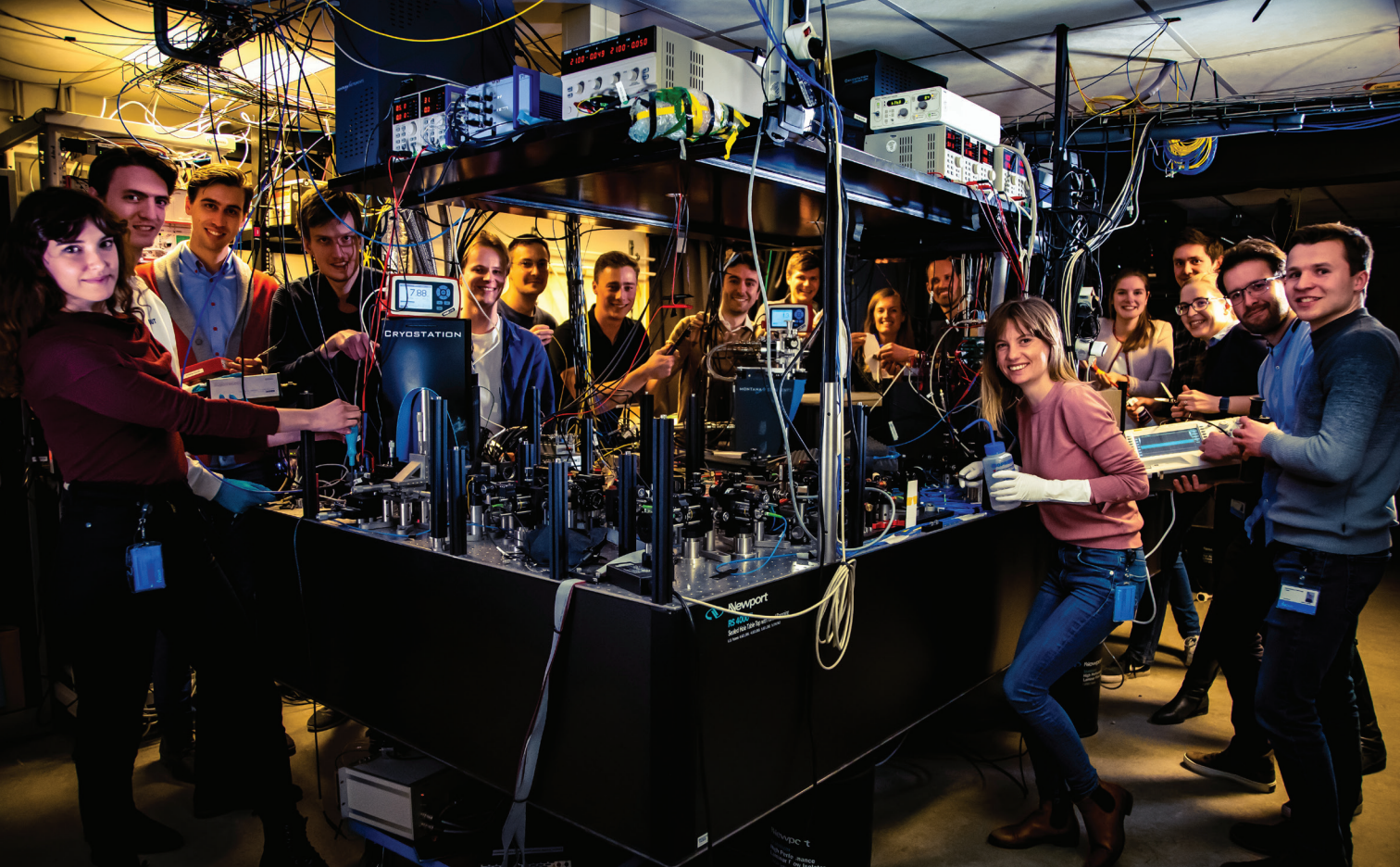
Quantumsuperpositie en -verstrengeling behoren tot de meest exotische en tegenintuïtieve fenomenen binnen de natuurkunde. Het afgelopen decennium zijn we erin geslaagd om een complex samenspel van individuele elektronspins, atoomkernspins en fotonen in vastestofchips naar onze hand te zetten. Hierdoor kunnen we nu verstrengeling maken op menselijke lengteschaal (meters) en ook superposities vasthouden op menselijke tijdschalen (tot aan minuten). Dit artikel schetst hoe we hier zijn gekomen en wat we de komende jaren met deze nieuwe mogelijkheden kunnen gaan doen.

Ons huidige model van de wereld is gebaseerd op grofweg twee theorieën, die elk voor ons bijzondere, bijna magische fenomenen beschrijven. Op grote schaal en met gigantisch zware objecten zoals sterren en zwarte gaten zien we dat ruimte en tijd vervormd kunnen worden. Op kleine schaal, of misschien beter gezegd, in geïsoleerde systemen, zien we dat deeltjes in een quantsuperpositie van meerdere toestanden kunnen zijn. Ook kunnen deeltjes zodanig met elkaar ‘verstrengeld’ raken dat ze hun individuele eigenschappen verliezen – alleen gezamenlijk zijn de deeltjes dan nog in een goed gedefinieerde toestand. Superpositie en verstrengeling worden ook gezien als de basis van toekomstige quantumtechnologieën die zich richten op een fundamenteel andere manier van rekenen (quantum computing), communiceren (quantuminternet) en meten (quantum sensing) [1]. Het is lastig voor ons mensen om ons concreet iets voor te stellen bij quantsuperpositie en verstrengeling.

Ook zijn generaties fysici opgeleid met het idee dat deze quantumfenomenen alleen meetbaar zijn op heel kleine (atomaire) lengteschaal en korte tijdschalen (heel veel korter dan de typische reactietijd van een mens van 0,2 s). Er leek een gapend gat te zijn tussen de quantumwereld en de menselijke schaal. Fascinerend is dat dit gat het afgelopen decennium volledig gedicht is, en sterker nog, dat we nu zo veel controle hebben over superposities en verstrengeling dat quantumtechnologieën niet meer alleen een droom zijn. In dit artikel zal ik een aantal ontwikkelingen beschrijven in mijn onderzoek die hebben geleid tot waar we nu staan. Ik zal daarna een schets geven van de uitdagingen waar wij (als veld) de komende jaren aan gaan werken en waartoe dat onderzoek mogelijk kan leiden.

Controle over individuele elektronen in een vaste stof

Veel pionierswerk in het onderzoek naar individuele quantumtoestanden is gedaan met systemen die van nature goed geïsoleerd zijn



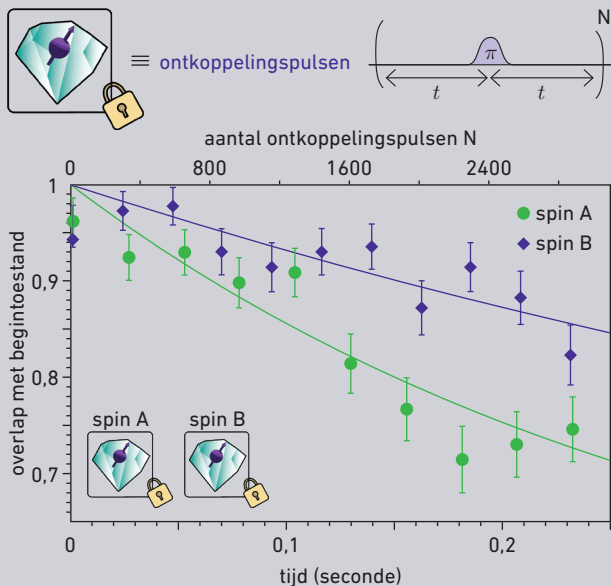
van omgevingsruis: fotonen (die nauwelijks interactie hebben met andere fotonen) en atomen/ionen in vacuümkamers (die dus letterlijk niets in de buurt hebben). In een vaste stof is de startsituatie compleet anders: een elektron heeft een groot aantal andere deeltjes dicht om zich heen, die superposities van het elektron kunnen verstoren via elektrische en magnetische interacties, of door roostertrillingen. Dankzij grote vooruitgang in de materiaalkunde en nanotechnologie sinds de eeuwwisseling is de situatie voor vaste stoffen gekanteld en werd het onderzoeken en controleren van individuele quantumtoestanden mogelijk. Optisch actieve roosterdefecten in halfgeleiders zijn een mooi voorbeeld: als de concentratie daarvan laag genoeg is, gedragen die zich als ionen die gevangen zijn in het kristalrooster van de vaste stof. De elektrontoestanden zijn goed zichtbaar door de fotonen die ze uitzenden bij excitatie met laserlicht. Het *nitrogen-vacancy* (NV) centrum in diamant is een van de eerste en bekendste voorbeelden, maar

er zijn tegenwoordig tientallen van dit soort centra in diamant, siliciumcarbide, silicium et cetera, waarvan individuele elektrontoestanden gecontroleerd en optisch uitgelezen kunnen worden.

Quantumsuperposities op menselijke tijdschalen

Toen ik in 2007 mijn eigen onderzoeksgroep startte stond het proces van decoherentie hoog op de onderzoekslijst: hoe verliest de spin-toestand van het NV-elektron door wisselwerking met haar omgeving langzaam haar quantumeigenschappen, waardoor het ogenschijnlijk terugvalt naar een klassieke toestand? Dit is niet alleen een fundamenteel interessante vraag, maar de verkregen inzichten zouden ook gebruikt kunnen worden om dat verlies tegen te gaan en zo de fragiele quantumtoestanden veel langer in stand te houden. Uit experimenten bleek dat de NV-spin vooral gevoelig is voor de andere spins in de directe omgeving (het zogenoemde spinbad). Het lukte ons om de NV-spin via magnetische

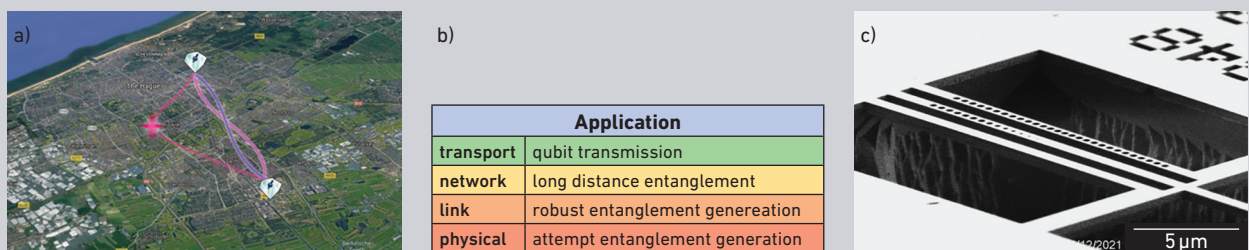
resonantie veel sneller te manipuleren (< 100 nanoseconden) dan de typische tijdschaal van de dynamica van dat spinbad ($>> 1$ microseconde), waardoor we de interacties tussen de NV-spin en het spinbad dynamisch konden ontkoppelen [2]. Het basisidee is om de (ons onbekende) fase ϕ die het elektron oppikt in een tijd t door interactie met de omgeving precies teniet te doen door de spin-toestand te inverteren (waardoor de fase ook invertteert naar $-\phi$) en voor eenzelfde tijd t de interactie weer haar werk te laten doen (waardoor er weer ϕ wordt opgeteld bij de fase (zie figuur 1). Door deze truc snel en vaak genoeg toe te passen, konden we de coherentietijd van een paar microseconde flink verlengen – in de eerste demonstratie met een factor 25 voor ongeveer honderd spininversies. Deze technieken zijn het afgelopen decennium verder verbeterd en geoptimaliseerd naar het precieze gedrag van het spinbad en vandaag de dag kunnen we quantumsuperposities van de NV-elektronspin zo rond een seconde behouden (zie figuur 1).



Figuur 1. Quantumsuperposities op menselijke tijdschalen. Door de spintoestand van het NV-elektron met specifieke periode te invertieren wordt het dynamisch ontgekoppeld van de omgevingsruis. Data voor twee NV-centra laten zien dat bij een paar duizend ontkoppelingspulsen de spin-quantumtoestanden behouden blijven richting een seconde. Data uit [3].



Figuur 2. Verstrengeling op menselijke lengteschaal. Overzichtsfoto van de campus van de TU Delft, waarop de locaties van de twee NV-centra zijn aangegeven met diamanten en de glasvezelverbindingen naar het centrale punt waar de (met spin verstrengelde) fotonen vanuit de NV-centra heen gestuurd worden met de rode lijn. Detectie van de fotonen in het centrale punt projecteert de NV-spins, die 1,3 kilometer uit elkaar zitten, in een verstrengelde toestand. Afbeelding: QuTech.



Figuur 3. Drie onderzoeksrichtingen voor de komende jaren. a) Verstrengeling opschalen naar tientallen kilometers. Rechtsonder is het lab in Delft, linksboven een KPN-gebouw in Den Haag, dat via glasvezel in de grond is verbonden met Delft via een tussenstation in Rijswijk. b) Het ontwikkelen en experimenteel testen van een controle-‘stack’ voor een toekomstig quantuminternet. c) Ontwerpen, fabriceren en gebruiken van nanofotonische structuren (hier een fotonisch-kristaltrilholte) met geïntegreerde optisch actieve centra als zeer efficiënte licht-materie-interface. Afbeelding: QuTech.

Verrassing met nieuwe mogelijkheden

Snel na onze eerste experimenten met dynamische ont koppeling stuiten we op meetdata die we totaal niet begrepen: voor heel specifieke tijdsintervallen tussen de ont koppelingspulsen werkte de ont koppeling helemaal niet. Deze ‘foute’ parameters leken per NV-centrum dat we bekeken te verschillen. De condities waaronder het ‘foute’ gedrag opkwam waren scherp afgebakend: een tijdsinterval van een paar nanoseconden langer of korter maakte al het verschil. Al snel kwamen we erachter dat deze signalen het gevolg waren van resonanties ten gevolge van de hyperfijninteractie van de NV-elektronspin met individuele kernspins in het rooster (diamant bevat ongeveer 1% van de koolstof-13-isotoop die spin-1/2 heeft) [4]. Omdat deze kernspins willekeurig verdeeld zijn over het rooster, zijn de parameters voor elk NV-centrum anders.

Al snel werden de enorme mogelijkheden van deze ontdekking duidelijk: de dynamische ont koppeling maakt het mogelijk om individuele kernspins met atomaire resolutie te detecteren: zeer interessant voor quantumsensoren op nanoschaal. Daarnaast kunnen volledig gecontroleerde kernspins rond een NV-centrum gebruikt worden als een register van qubits. Deze kernspins hebben intrinsiek al relatief lange coherentietijden van orde grootte milliseconde. Door quantuminformatie op te slaan in specifieke combinaties van kernspintoestanden die ongeveer zijn voor omgevingsruis (zogenoemde decoherentie-beschermde subruimtes) kan decoherentie bijna geheel uitgeschakeld worden – analoog aan kloktoestanden in atoomfysica [5]. Met deze techniek is er recent in het lab van mijn collega Tim Taminiau een coherentietijd – zonder dynamische ont koppeling – van maar liefst twee minuten gemeten [6]: een wereldrecord! Met andere woorden, we kunnen nu een quantumsuperpositie maken, koffie halen en bij terugkomst is de superpositie nog intact.

“Al snel werden de enorme mogelijkheden van deze ontdekking duidelijk.”

Verstrengeling op menselijke lengteschalen

Bij de bovengenoemde experimenten onderzochten we spins die erg dicht bij elkaar zaten – typisch binnen een paar nanometer – en die via hun directe magnetische interactie met elkaar verstrengeld konden worden. Om verstrengeling te genereren tussen twee afzonderlijke spins over menselijke lengteschalen is een fundamenteel andere aanpak nodig. De oplossing is om fotonen te gebruiken als ‘tussenpersoon’: we maken eerst verstrengeling tussen elke NV-spin en een foton, brengen de fotonen vervolgens samen en doen een gezamenlijke meting op ze. Als de fotonen beide gedetecteerd worden, projecteert de meting de spins op een verstrengelde toestand (zie [7] voor een uitgebreide beschrijving). In 2012 lukte het ons voor het eerst om NV-spins over een afstand van een paar meter te verstrengelen. In 2015 gebruikten we dezelfde techniek over 1,3 km voor een ‘loophole-vrije’ Bell-test [8] (zie figuur 2). Bijzonder aan deze metingen – en het grote verschil met alle eerdere verstrengelingsexperimenten over lange afstanden die alleen met fotonen werkten – is dat we live weten wanneer de verstrengeling gemaakt is en dat die verstrengeling van de spins vervolgens ook nog ‘levend’ is, zodat er verdere experimenten mee gedaan kunnen worden. Dit aspect is cruciaal voor het gebruik en opschalen van quantumnetwerken. Deze experimenten brengen verstrengeling naar menselijke schaal – je kunt letterlijk tussen de verstrengelde NV-spins in gaan staan (wat overigens geen effect blijkt te hebben op de verstrengeling).

Een eerste quantumnetwerk

Deze experimenten gaven ons toegang tot een recordafstand: de 1,3 km staat nog steeds als het wereldrecord voor

‘live’-verstrengeling. Die was essentieel in de Belltest om de achterdeurtjes te dicht te maken [8]. De kans dat in een gegeven verstrengelingspoging de vereiste fotondetectie plaatsvond – en daarmee de poging lukte – was daarentegen erg klein. Voor twee spins op een paar meter afstand van elkaar was de slaagkans per poging ongeveer één op tien miljoen, wat resulteerde in grofweg één verstrengelde toestand per minuut. Met deze slaagkans is het praktisch onmogelijk om meer dan twee NV-centra met elkaar te verbinden in een netwerk. Door over te schakelen op een ander verstrengelingsprotocol, waarin detectie van één foton in plaats van twee fotonen volstaat, konden we in 2018 de slaagkans flink verhogen en haalden we tot aan veertig verstrengelde toestanden per seconde [3]. In dat experiment konden we ook voor het eerste sneller verstrengelde toestanden maken dan dat we ze door decoherentie kwijtraakten. Dit opende de deur naar een echt netwerkje van knooppunten en in 2021 rapporteerden we over het eerste quantumnetwerk gebaseerd op verstrengeling [9]. Dit netwerk, bestaande uit drie knooppunten, geeft ons een unieke opstelling voor het onderzoeken van meer-deeltjesverstrengeling en het testen van protocollen en softwarelagen voor een toekomstig quantuminternet en gedistribueerde quantumcomputer.

Nieuwe vragen en een nieuwe technologie

Veel van het hierboven beschreven onderzoek wordt gedreven door diepe fundamentele vragen: ‘hoe verandert een quantumsuperpositie in een ogenschijnlijk klassieke toestand (decoherentie)?’, ‘hoe kunnen we met quantummetingen specifieke quantumtoestanden maken?’, ‘leidt verstrengeling echt tot een instantane

invloed op afstand?'. Tegelijk gloren er toepassingen van de nieuw verkregen controle over verstrengelde deeltjes. Al in 1991 liet Artur Ekert zien dat een Belltest gebruikt kan worden om een sleutel uit te wisselen tussen twee partijen op een manier waarbij af luisterende partijen onherroepelijk ontdekt worden. Tegenwoordig wordt er breder onderzoek gedaan naar toepassingen van verstrengelde toestanden in

kan de kans op fotondetectie enorm verhoogd worden, waarschijnlijk richting de 90%. Onderzoekslabs over de hele wereld zijn hard bezig deze nieuwe devices te ontwikkelen. Hierbij wordt intensief gekeken naar andere roosterdefecten in diamant zoals het SiV-defect en het SnV-defect, en ook in andere materialen zoals siliciumcarbide. De technieken en inzichten van de afgelopen vijftien jaar kun-

nen hebben hier optimaal gebruik van gemaakt; zij gebruiken hun expertise ondertussen in hun eigen labs in Europa en in de Verenigde Staten. Ik kijk uit naar de komende jaren, waarin we weer een nieuwe fase van onderzoek ingaan en hopen nieuwe vragen te beantwoorden en flinke stappen te zetten om die bijzondere, fundamentele quantumfenomenen echt toepasbaar te maken.

“De experimenten zijn complex en uitdagend en het veld is sterk interdisciplinair.”

netwerken, met interessante voorbeelden zoals gegarandeerde dataprivacy bij quantumberekeningen in de cloud en synchronisatie van atoomklokken. Verstrengelde toestanden vormen ook de basis van quantumcomputers en netwerken vormen een interessante manier om de kracht van de huidige bescheiden quantumprocessors op te schalen (zie [10] voor een overzichtartikel).

De komende periode gaan we samen met collega's en bedrijven verder werken aan het verleggen van de grenzen, bijvoorbeeld door de technologie te ontwikkelen om verstrengeling te maken over tientallen kilometers via glasvezelkabels die al in de grond liggen (figuur 3a), en door het ontwikkelen en testen van een controle-‘stack’ met verschillende abstractielagen voor quantumnetwerken (figuur 3b). Om de volgende generatie experimenten mogelijk te maken en door te ontwikkelen tot technologieën, is ook een nieuwe generatie hardware nodig. De prestaties van de huidige NV-centrum-devices zijn gelimiteerd door de relatief inefficiënte optische interface: bij optische excitatie is de kans dat we een uitgezonden foton (waarmee we verstrengeling kunnen maken) detecteren slechts 0,1%. Door de optisch actieve centra te integreren in nanofotonische structuren (zie figuur 3c)

nen vaak direct gebruikt worden op deze nieuwe devices. Maar de nieuwe hardware levert ook nieuwe vragen en kansen op, bijvoorbeeld omdat de interactie tussen de nauw opgesloten fotonen en het defect binnen in de fotonische nanostructuren veel sterker kan zijn dan de spontane emissie en dan het lekken van de fotonen uit de nanostructuren. Doordat de reflectie van licht op de nanostructuur in dit regime afhankelijk gemaakt kan worden van de spintoestand van het defect – wat een quantumtransistor voor licht oplevert – geeft het ook fundamenteel nieuwe mogelijkheden.

Naast de combinatie van zeer fundamentele natuurkunde met mogelijk impactvolle toepassingen, is er een andere reden waarom ik dit veld zo interessant vind. De experimenten zijn complex en uitdagend en het veld is sterk interdisciplinair. Maar tegelijkertijd is dit geen *big science* zoals deeltjesfysica of zwaartekrachtgolvendetectie: de experimenten zijn door één of een paar personen uit te voeren, en dat betekent dat je als individu een grote impact op het onderzoek en het veld kunt hebben. Dat biedt de mogelijkheid voor getalenteerde promovendi en postdocs om zich snel en breed te ontwikkelen en het veld een flinke duw te geven in een bepaalde richting. Meerdere van

Ronald Hanson is distinguished professor in quantum computing en quantuminternet aan de TU Delft, groepsleider bij QuTech en voorzitter van het bestuur van Quantum Delta NL. Hij was directeur van QuTech en ontving in 2019 de Spinozapremie. R.Hanson@tudelft.nl

REFERENTIES

1. Carlo Beenakker, Ronald Hanson, Servaas Kolkman en Kareljan Schoutens, *Nationale Agenda Quantumtechnologie*, NTvN juli (2021).
2. G. de Lange, Z.H. Wang, D. Ristè, V.V. Dobrovitski, R. Hanson, *Universal dynamical decoupling of a single solid-state spin from a spin bath*, *Science* **330**, 60 (2010).
3. P.C. Humphreys, N. Kalb, J.P.J. Morits, R.N. Schouten, R.F.L. Vermeulen, D.J. Twitchen, M. Markham en R. Hanson, *Deterministic delivery of remote entanglement on a quantum network*, *Nature* **558**, 268 (2018).
4. T.H. Taminiau, J.J.T. Wagenaar, T. van der Sar, F. Jelezko, V.V. Dobrovitski en R. Hanson, *Detection and control of individual nuclear spins using a weakly coupled electron spin*, *Physical Review Letters* **109**, 137602 (2012).
5. A. Reiserer, N. Kalb, M.S. Blok, K.J.M. van Bemmelen, T.H. Taminiau, R. Hanson, D.J. Twitchen en M. Markham, *Robust Quantum-Network Memory Using Decoherence-Protected Subspaces of Nuclear Spin*, *Phys. Rev. X* **6**, 021040 (2016).
6. H.P. Bartling, M.H. Abobeih, B. Pingault, M.J. Degen, S.J.H. Loenen, H.P. Bartling, C.E. Bradley, J. Randall, M. Markham, D.J. Twitchen, T.H. Taminiau, *Coherence and entanglement of inherently long-lived spin pairs in diamond*, *Phys. Rev. X* **12**, 011048 (2022).
7. T.H. Taminiau en R. Hanson, *Door meten tot quantumverstrengeling*, NTvN november (2013).
8. B. Hensen, H. Bernien, A.E. Dréau, A. Reiserer, N. Kalb, M.S. Blok, J. Ruitenber, R.F.L. Vermeulen, R.N. Schouten, C. Abellán, W. Amaya, V. Pruneri, M.W. Mitchell, M. Markham, D.J. Twitchen, D. Elkouss, S. Wehner, T.H. Taminiau en R. Hanson, *Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres*, *Nature* **526**, 682-686 (2015).
9. M. Pompili, S.L.N. Hermans, S. Baier, H.K.C. Beukers, P.C. Humphreys, R.N. Schouten, R.F.L. Vermeulen, M.J. Tiggelman, L. dos Santos Martins, B. Dirkse, S. Wehner en R. Hanson, *Realization of a multinode quantum network of remote solid-state qubits*, *Science* **372**, 259 (2021). Zie ook: R. Hanson en S. Hermans, *Een netwerk van verstrengelde quantumbits*, NTvN, augustus (2021).
10. S. Wehner, D. Elkouss en R. Hanson, *Quantum internet: A vision for the road ahead*, *Science* **362** (6412), eaamg288 (2018).