

De quantumcomputer een stap dichterbij

Over qubits en de manipulatie van elektronen

Sommige ogenschijnlijk eenvoudige problemen vragen meer rekenkracht dan de sterkste computers van vandaag beschikbaar hebben.

Wetenschappers hopen dat quantumcomputers een uitweg zullen bieden. Leo Kouwenhoven en zijn onderzoeksgroep bouwden een veelbelovende qubit. door Geertje Dekkers

S

TEL,

u bent koerier en u brengt uw pakjes graag op een efficiënte manier rond. Dan zult u willen weten welke route door het land het kortst is. Dit ogenschijnlijk makkelijke probleem blijkt behoorlijk lastig op te lossen, vooral als u wat meer pakketjes hebt om af te leveren op verschillende adressen.

Laten we ervan uitgaan dat u op iedere splitsing van wegen kunt kiezen uit twee opties: naar links of naar rechts. In het echt is de situatie vaak complexer maar voor deze uitleg zijn twee mogelijkheden per keer lastig genoeg.

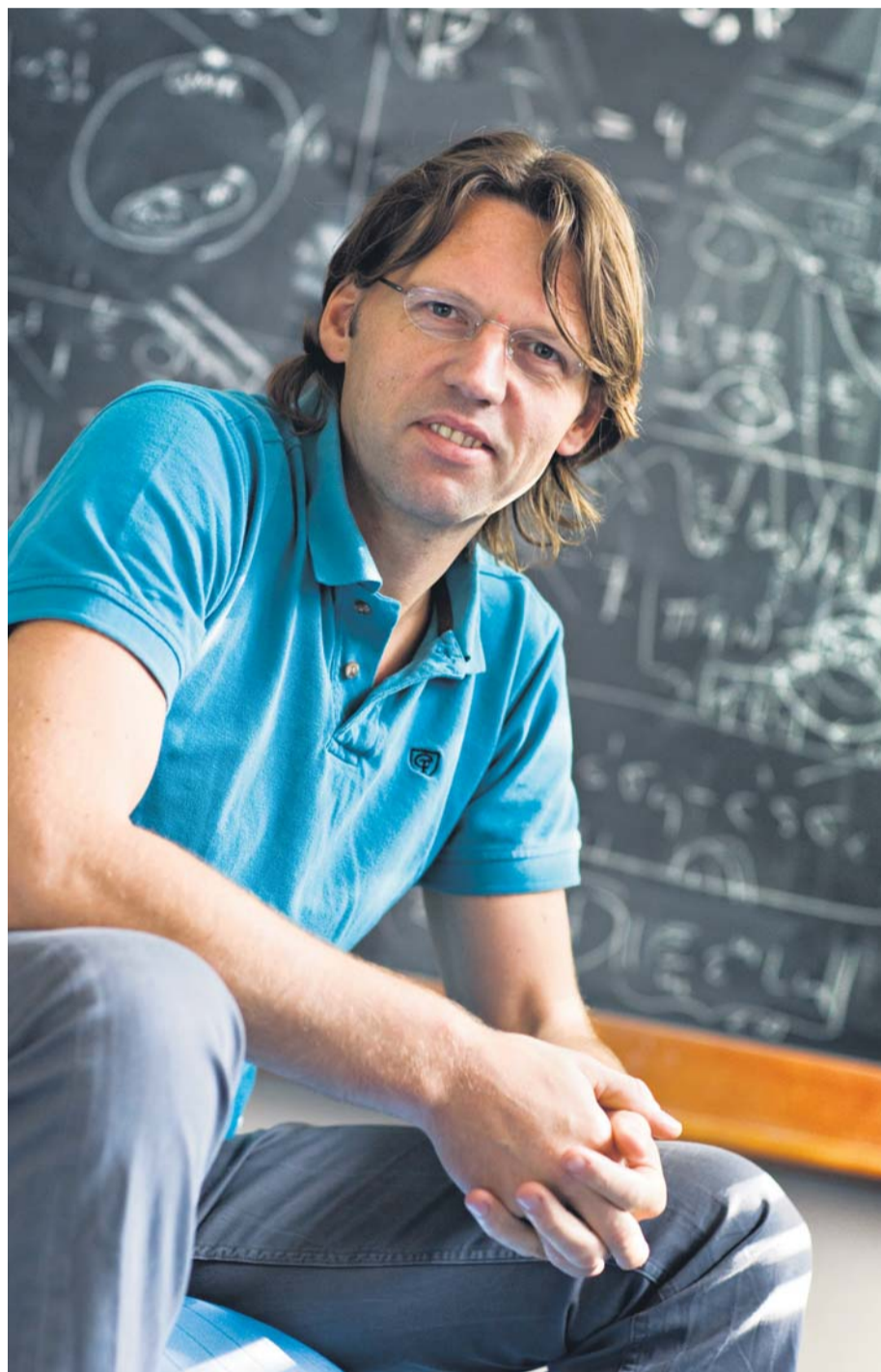
Het aantal mogelijke routes dat u onderling moet vergelijken loopt namelijk snel uit de hand. Na één keer kiezen is het aantal nog beperkt tot twee – rechtsaf of linksaf. Bij de tweede splitsing hebt u

‘De quantummechanica is moeilijk te doorgronden doordat zij een aantal contra-intuïtieve sprongen vereist.’

weer twee opties en dat brengt het totale aantal mogelijke routes op vier: rechts en dan rechts; rechts en dan links; links en dan rechts en links en dan links. Na drie keer kiezen zit u op $2 \times 2 \times 2 = 2^3 = 8$ routes enzovoorts. Na n splitsingen zijn er 2^n routes mogelijk. Met andere woorden: het aantal routes groeit exponentieel met het aantal splitsingen. En dat gaat hard. Na tien keer kiezen zit u op 1024 mogelijke routes; na twintig keer op 1.048.576 en na dertig keer op 1.073.741.824, ruim een miljard.

Een beetje koeriersroute is dus al snel te ingewikkeld voor een mens met alleen pen en papier. Maar ook voor een huidige computer wordt het aantal opties snel te groot, want hoe meer routes er mogelijk zijn, hoe meer geheugen hij nodig heeft om die allemaal binnen een bepaalde tijd door te rekenen. De benodigde hoeveelheid bits groeit exponentieel met het aantal splitsingen, net als het aantal mogelijke routes. Dit voorbeeld illustreert hoe eenvoudige keuzeproblemen kunnen uitgroeien tot complexe rekenproblemen.

Sinds een jaar of tien werken wetenschappers aan apparaten die het groei-



Leo Kouwenhoven.

ende aantal routes wel kunnen bijhouden. Deze quantumcomputers kunnen moeilijke problemen zoals die van de koeriersroute aan doordat ze handig gebruikmaken van de vreemde wetten van de quantummechanica. Ze zijn ook goed in het ontbinden van een getal in zijn zogenaamde priemfactoren, een rekenvaardigheid die een belangrijke rol speelt bij de beveiliging van informatie op internet.

Voorlopig bestaan quantumcomputers nog vooral in de hoofden van weten-

schappers. De exemplaren die de afgelopen jaren zijn gebouwd, bevatten hoogstens een paar ‘qubits’ (kortweg qubits), die bovendien vaak instabiel zijn.

Onderzoekers van de technische universiteiten in Delft en Eindhoven hebben de realisatie van een echte, bruikbare quantumcomputer onlangs een stap dichterbij gebracht. Onder leiding van Spinozapremiewinnaar Leo Kouwenhoven (Kavli Instituut voor Nanowetenschappen, TU Delft) bouwden ze een nieuw type qubit,

SPIN-ORBIT QUBIT IN A SEMI-CONDUCTOR NANOWIRE

In: NATURE, 23 december 2010, vol. 468:1084-1087.

door S. Nadj-Perge, S.M. Frolov, E.P.A.M. Bakkers en L.P. Kouwenhoven.

dat stukken bruikbaar is dan zijn voorgangers. Een artikel over hun onderzoek haalde *Nature* van afgelopen december.

‘De quantummechanica beschrijft de fundamentele wetten van de natuur’, zegt Kouwenhoven. ‘Elementaire deeltjes voldoen eraan, maar wij ook. We zijn immers opgebouwd uit elementaire deeltjes. In het dagelijks leven kunnen we op onze schaal prima vooruit met de klassieke natuurkunde maar in feite is dat een vereenvoudigde vorm van de quantummechanica.’

Voor de menselijke geest is de quantummechanica moeilijk te doorgronden doordat zij een aantal contra-intuïtieve sprongen vereist. Zo kunnen dingen – in dit verhaal zal het steeds over elektronen gaan – zich volgens de quantummechanica in twee toestanden tegelijk bevinden, ook al sluiten die toestanden elkaar

‘Het geheugen van een quantumcomputer groeit exponentieel met het aantal qubits.’

in onze alledaagse wereld uit. ‘We maken hier bijvoorbeeld ringetjes, waar we een elektron doorheen sturen. Dat elektron kan rechtsom of linksom gaan’, zegt Kouwenhoven: ‘Je zou verwachten dat zo’n elektron ófwel linksom gaat, ófwel rechtsom. Maar het blijkt het allebei tegelijk te doen. Superpositie heet dat. Daarmee bedoel ik niet dat vijftig procent van de elektronen rechtsom gaat en vijftig procent linksom. Eén elektron gaat tegelijkertijd beide kanten op. We kunnen ons dat niet voorstellen maar het gebeurt echt, want bij de uitgang van het ringetje botst het elektron met zichzelf.’ Ook dat is moeilijk voorstelbaar – een elektron dat zichzelf tegenkomt – maar de Delftse

onderzoekers doen experimenten die dat zichtbaar maken.

Quantumcomputers zijn gebaseerd op het principe van superpositie. Net als andere computers slaan ze informatie op in de vorm van nullen en enen. In de gewone computer op uw bureau bevat een bit één getal: nul of één. Maar een quantumbit kan tegelijkertijd zowel een nul als een één bevatten. Twee quantumbits kunnen samen in vier toestanden tegelijk zijn (nul en nul; nul en één; één en nul; één en één) en zo groeit het geheugen exponentieel met het aantal qubits; even snel dus als het aantal mogelijke routes voor u als koerier.

“Het bijzondere aan onze qubit is dat er in de nanodraad maar één elektron zit dat op en neer kan bewegen.”

Kouwenhoven: ‘Voor onze qubits maken we gebruik van het feit dat elektronen “spin” hebben: ze draaien om hun as. In de qubits zit een enkel elektron waarvan we de beweging heel precies kunnen controleren. Draait het de ene kant op, dan heeft de qubit waarde één en draait het andersom, dan is de waarde nul. Nu kan

de spin van een elektron volgens de quantummechanica tegelijkertijd zowel linksom als rechtsom zijn: een superpositie van de spin. Zo kan de waarde van onze qubit op hetzelfde moment nul en één zijn.’

Fysiek ziet dat er als volgt uit: Kouwenhovens qubits bestaan uit een draadje van enkele nanometers (miljardste meters) lang, van de halfgeleider indiumarsenide. ‘Dat materiaal hebben we zelf ontwikkeld’, zegt Kouwenhoven: ‘Het heeft de bijzondere eigenschap dat de spin van elektronen die erdoorheen bewegen gekoppeld is aan de weg die ze afleggen. Dat wil zeggen dat de spin verandert als het elektron een stukje door de draad beweegt. “Spinbaankoppeling” heet dat, en het is minder vreemd dan het klinkt. Denk bijvoorbeeld aan een jojo. Daarbij is de draaiing om de as ook gekoppeld aan de beweging naar boven of naar beneden.’

In het artikel in *Nature* leggen de onderzoekers uit dat ze met een negatief geladen elektrode een elektron (ook negatief geladen) door het nanodraadje op en neer kunnen bewegen en zo de spin kunnen manipuleren. Aan het ene einde van het draadje gaat de spin rechtsom en aan het andere einde linksom. Daartussen is de spin in superpositie: in het midden draait het elektron evenveel links- als rechtsom.

‘Deze qubit is erg stabiel en we kunnen het elektron heel gecontroleerd bewegen’, zegt Kouwenhoven. ‘Eerder deden we dat met magneetvelden maar

een elektrode werkt veel beter. Het bijzondere aan onze qubit is dat er in de nanodraad maar één elektron zit dat op en neer kan bewegen. Dat is onze exper-

‘Ook voor een computer is het moeilijk het snelgroeiende aantal mogelijke koeriersroutes bij te houden.’

tise hier in Delft: manipulatie van enkele elektronen. Daar zijn we erg goed in.’ Kouwenhoven verwacht dat de quantumcomputers van de toekomst gebruik zullen maken van de principes die zijn groep heeft ontwikkeld en hij gaat ervan uit dat binnen een paar decennia een bruikbaar exemplaar zal worden gebouwd: ‘Ik ben vast van plan de eerste toepassing mee te maken waarin we de quantummechanica voor ons laten werken. Dat kan een computer zijn, maar ook een ander apparaat. Voorlopig is een quantumcomputer een mooie heilige graal om naartoe te werken. Dat doen we met nieuwe wetenschap, die we gaandeweg ontwikkelen.’