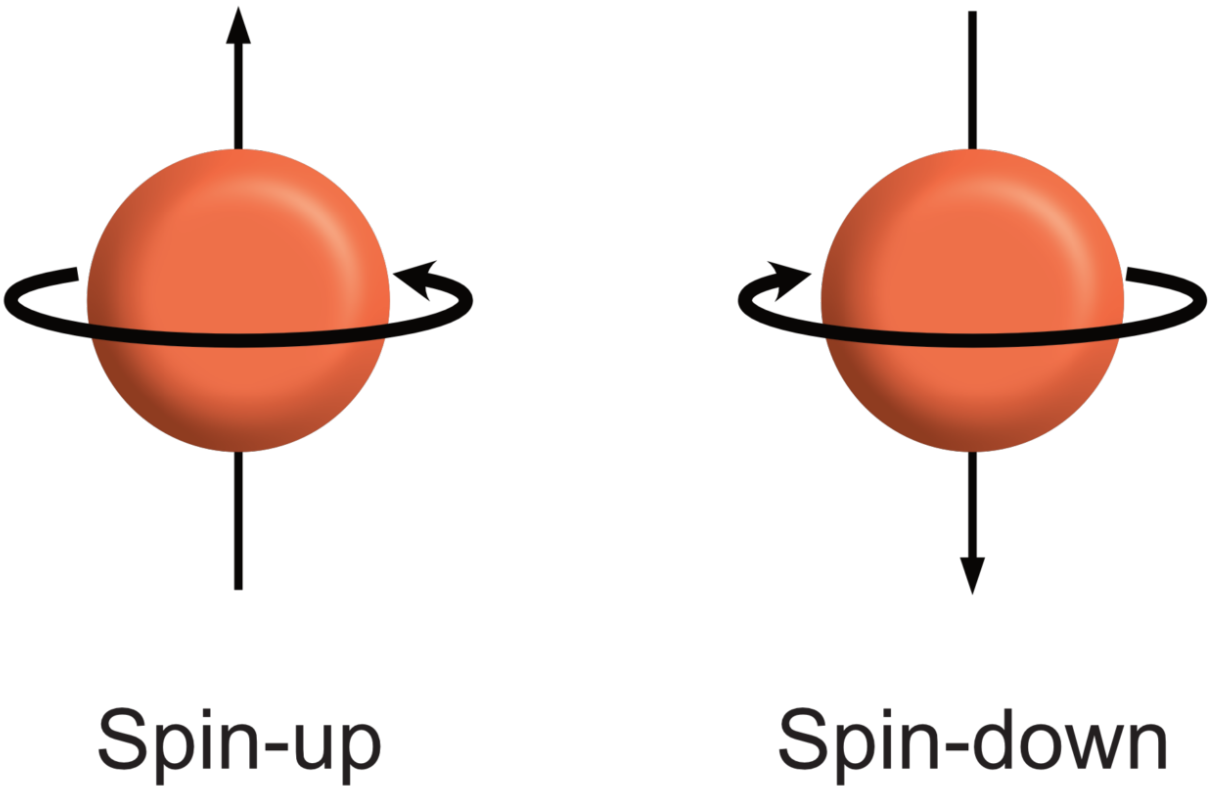
Verstrengelingsdistillatie

Een belangrijke rol in de ontwikkeling van quantumcomputers wordt gespeeld door quantumverstrengeling. Dit bijzondere fenomeen, waarbij twee of meer deeltjes op bijna magische wijze met elkaar 'verbonden' zijn, stelt quantumcomputers in staat om complexe berekeningen uit te voeren die voor traditionele computers onhaalbaar zijn. Helaas is perfecte quantumverstrengeling in de praktijk onhaalbaar, maar *verstrengelingsdistillatie* kan helpen om de verstrengeling te verbeteren.

Een whiskydistilleerderij. Whisky kun je distilleren, maar verstrengeling? Foto: Petter Strandmark, via Wikimedia Commons.

Quantumverstrengeling

De fundamentele bouwstenen van quantumcomputers zijn qubits, quantumsystemen die in twee verschillende toestanden kunnen zijn. Vaak gaat het daarbij om toestanden met een verschillend impulsmoment – grofweg: een verschillende ‘hoeveelheid draaiing’. Je kunt een qubit in die gevallen dus vergelijken met een tol die linksom of rechtsom kan tollen. De twee toestanden worden dan ‘spin-up’ en ‘spin-down’ genoemd. De vergelijking met een tol gaat niet helemaal op, want in tegenstelling tot een tol hoeft een qubit niet in de spin-up- óf de spin-downtoestand te zijn, maar kan hij zich in een superpositie van beide toestanden bevinden. De qubit kan bijvoorbeeld met een kans van 40% spin-up hebben en met een kans van 60% spin-down. Maar let op: waar in de ‘klassieke’ wereld een kans vaak betekent dat we iets niet zeker weten (de spin van de qubit is onbekend) is het hier echt zo dat de toestand van de qubit onbepaald is: in zekere zin is de qubit in beide toestanden een beetje! Als we de toestand van de qubit meten, dan worden de percentages omgezet in echte kansen: we hebben 40% kans dat we spin-up meten en 60% kans hebben dat we spin-down meten.



Een eenvoudige qubit. Toestanden van een qubit: spin-up en spin-down. Afbeelding: Sarah Jansen.

Stel nu dat we *twee* qubits hebben. Dan zijn er vier toestanden mogelijk: up-up, up-down, down-up en down-down. Net als wanneer we een enkele qubit hebben, zal het tweetal van qubits zich in een superpositie van deze vier toestanden kunnen bevinden. Wat bijzonder is, is dat de twee qubits met elkaar verstrengeld kunnen zijn. Er is dan een sterke connectie tussen de toestanden van de twee afzonderlijke qubits.

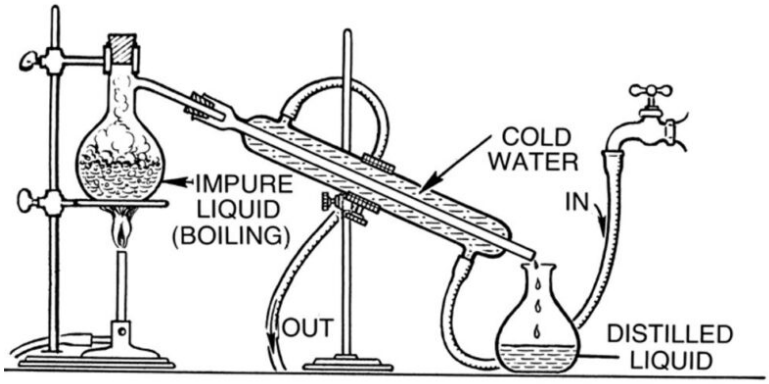
In het ideale geval zijn de twee verstrengelde qubits perfect gecorreleerd: als we een meeting aan één van de twee qubits doen, dan weten we ook meteen de toestand van de andere qubit. Dit wordt *maximale verstrengeling* genoemd. Een belangrijk voorbeeld van zo'n maximaal verstrengeld qubitpaar is het *Bellpaar*, waarin alleen de toestanden waarin de spins hetzelfde zijn voorkomen. Als we de toestand van een van de twee qubits van zo'n Bellpaar meten, hebben we 50% kans om spin-up te meten en 50% kans om spin-down te meten. Na deze meting ligt de toestand van de tweede qubit ook vast: deze is gelijk aan de toestand die we gemeten hebben voor de eerste qubit.

In de meeste praktische toepassingen is zo'n sterke verstrengeling echter bijna onmogelijk om te maken, en zal de correlatie tussen de toestanden van de twee qubits kleiner zijn. Voor goed functionerende quantumcomputers is een hoge mate van verstrengeling echter cruciaal. Er wordt dan ook veel onderzoek gedaan naar het verbeteren van de apparatuur en de methodes waarmee verstrengeling wordt gecreëerd. In tegenstelling tot veel van deze methodes ligt de focus bij verstrengelingsdistillatie niet op het creëren van *nieuwe* goed verstrengelde paren, maar op het verbeteren van de bestaande verstrengelingen.

Verstrengelingsdistillatie

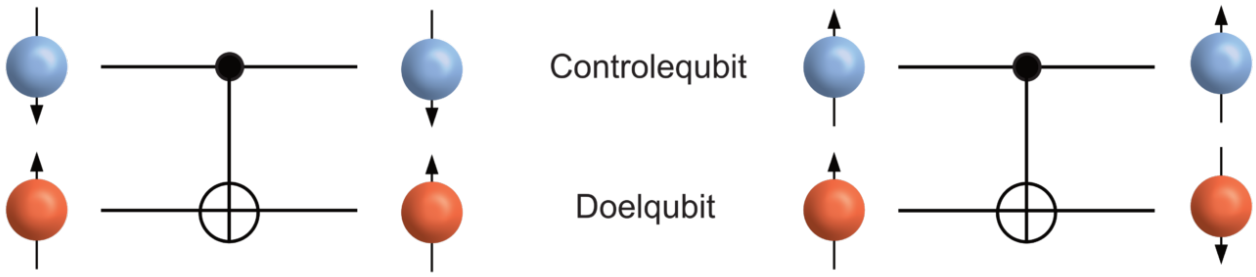
In een verstrengelingsdistillatieprotocol begint men met een aantal paren van qubits met zwakke verstrengeling. Deze qubitparen ondergaan een aantal operaties, waarna een kleiner aantal paren overblijft. De resterende qubitparen hebben wél een sterkere verstrengeling dan de paren waarmee het protocol begon. Je kunt dit vergelijken met de distillatie (of destillatie) van vloeistoffen. Deze techniek, die twee of meer vloeistoffen van elkaar scheidt op basis van hun verschil in kookpunt, wordt onder andere toegepast om sterke dranken zoals whisky te produceren. In een whiskydistilleerderij wordt een grote hoeveelheid

alcoholhoudende vloeistof verhit totdat deze begint te verdampen. Omdat alcohol een lager kookpunt heeft dan water, zal de damp relatief veel alcohol bevatten. Vervolgens voert men de damp af en laat deze afkoelen. Het resultaat is een kleinere hoeveelheid vloeistof met een hoger alcoholpercentage. Door dit proces een aantal keer te herhalen, kan het alcoholpercentage nog verder verhoogd worden.



Distillatie van vloeistoffen. Links: schematisch overzicht van een laboratoriumopstelling voor distillatie (afbeelding: Pearson Scott Foresman, via Wikimedia Commons). Rechts (en boven dit artikel): whiskydistilleerderij (foto: Petter Strandmark, via Wikimedia Commons).

Dit idee van distillatie kan dus ook worden toegepast op paren van qubits, maar de operaties zijn nu niet verhitten en koelen, maar logische quantum-operaties (denk aan operaties voor gewone bits, zoals AND en OR) en metingen. Het bekendste en eenvoudigste distillatieprotocol is het BBPSSW protocol, vernoemd naar zijn ontwerpers: Bennet, Brassard, Popescu, Schumacher, Smolin en Wooters. Voor dit protocol hebben we maar één quantum-operatie nodig: de CNOT-operatie. CNOT staat voor ‘controlled not’. Dit is een operatie die op twee qubits tegelijk werkt. De ene qubit wordt de *controlequbit* genoemd, de andere de *doelqubit*. Als de controlequbit zich in de spin-uptoestand bevindt, dan draait de CNOT-operatie de toestand van de doelqubit om – net zoals een gewone NOT-operatie dat voor een gewone computerbit doet. Als de controlequbit zich in de spin-downtoestand bevindt, dan gebeurt er niets met beide qubits. Zoals we gezien hebben, hoeft de controlequbit zich niet te beperken tot een van de twee toestanden ‘spin-up’ of ‘spin-down’, maar kan hij zich ook in een superpositie van beide bevinden. De CNOT-operatie verandert dan ook in superpositie wel én niet de toestand van de doelqubit. Deze quantum-operatie zorgt daarmee voor een correlatie tussen de toestanden van de twee qubits.

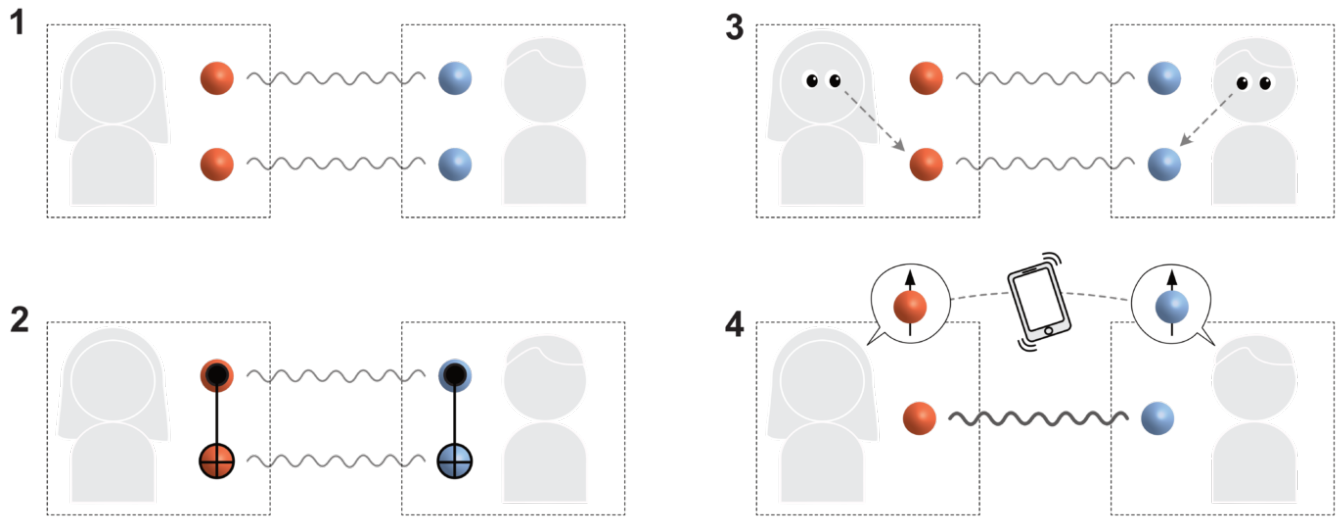


De werking van de CNOT-poort. Als de controlequbit zich in de spin-downtoestand bevindt, verandert de toestand van beide qubits niet. Als de controlequbit zich in de spin-uptoestand bevindt, dan draait de toestand van de doelqubit om. Afbeelding: Sarah Jansen.

Het BBPSSW-protocol

Het BBPSSW-protocol werkt nu als volgt. Er zijn twee partijen, Alice en Bob, die twee paren van verstrengelde qubits delen. Geen van beide paren is echter perfect verstrengeld. In het protocol zullen Alice en Bob een van de twee paren opofferen om zo de verstrengeling in het andere paar te verhogen. In de eerste stap van het protocol voeren Alice en Bob, beiden in hun eigen lab, een CNOT-operatie uit op hun qubits. Hierbij kiezen ze de qubits zo dat de controlequbit van Alice verstrengeld is met die van Bob, en net zo voor de doelqubits. Zoals hierboven uitgelegd, zorgt de CNOT-operatie voor een correlatie tussen de twee qubitparen.

Vervolgens voeren Alice en Bob beiden een meeting uit van de doelqubit en communiceren zij de uitkomst van hun metingen met elkaar. Als ze dezelfde uitkomst meten, dan is het protocol succesvol en houden ze hun controlequbits. Als ze verschillende uitkomsten meten, is het protocol onsuccesvol en gooien ze beide qubitparen weg. Met het nodige rekenwerk valt nu te bewijzen dat een succesvol protocol resulteert in een qubitpaar dat meer op het Bellpaar lijkt[1], en dus meer verstrengeld is dan elk van de twee qubitparen waarmee het protocol begon. Helaas is er zoals we gezien hebben ook wel een kans dat het protocol mislukt, en Alice en Bob opnieuw moeten beginnen.



Het BBPSWW protocol. 1. Alice en Bob (beiden in hun eigen lab) delen twee paren van verstrengelde qubits. De verstrengeling is hier geïllustreerd met de golvende lijn. 2. Alice en Bob voeren allebei een CNOT-operatie uit op hun qubits. 3. Alice en Bob meten hun doelqubit. 4. De meetuitkomsten worden gecommuniceerd. In dit geval zijn de uitkomsten gelijk en was het protocol dus succesvol. De verstrengeling tussen de twee controlequbits is sterker geworden. Afbeelding: Sarah Jansen.

Verder onderzoek

Sinds de publicatie van het BBPSSW-protocol in 1996 zijn er verschillende generalisaties onderzocht en verbeteringen gevonden. Zo is er onderzoek gedaan naar protocollen met andere quantum-operaties. Ook zijn er protocollen ontworpen waarbij men begint met meer dan twee qubitparen, en een of meer qubitparen overhoudt. Tot slot is het mogelijk om – net als bij whiskydistillatie – meerdere rondes van het protocol toe te passen, om zo de verstrengeling steeds sterker te maken. In al deze protocollen speelt de wisselwerking tussen de kans op succes en de toename van verstrengeling een belangrijke rol: protocollen die zorgen voor een grotere toename van de verstrengeling, hebben in het algemeen een kleinere kans op succes. Het vinden van goede distillatieprotocollen blijft dan ook een uitdagend probleem!

Wil je meer weten over verstrengelingsdistillatie? Op de QuTube-website van het Delfste onderzoeksinstituut QuTech staan enkele (Engelstalige) video’s over verstrengelingsdistillatie.

[1] Hoeveel twee quantumtoestanden op elkaar lijken wordt gemeten door hun *fidelity*.