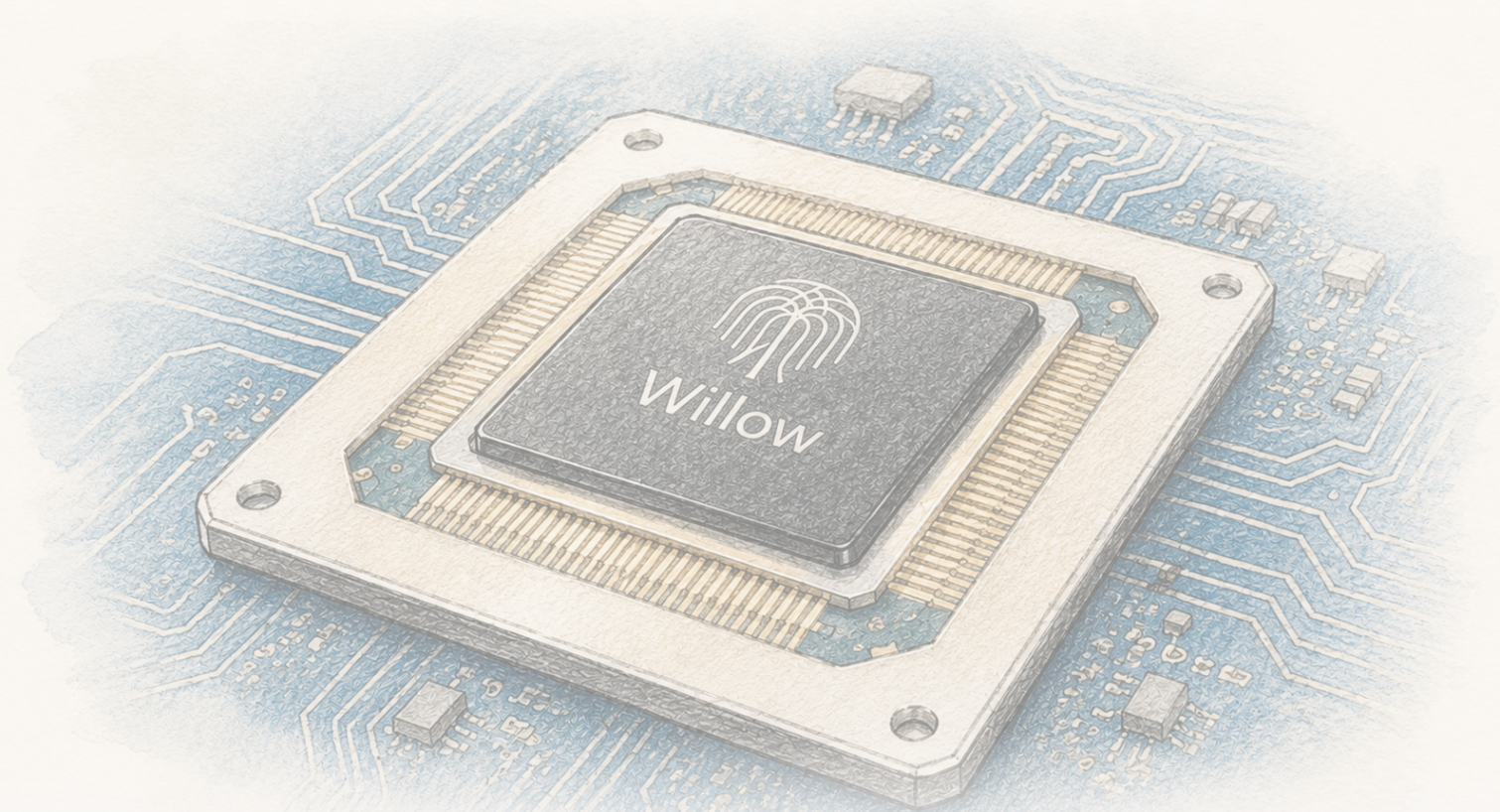




The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Een kwantumgeheugen werd eindelijk beter naarmate het groeide — de echte mijlpaal, en de machine die het niet is

Google Quantum AI liet voor het eerst schoon zien dat een surface-code-kwantumgeheugen onder de drempel kan draaien: terwijl ze de code lieten groeien van afstand 3 via 5 naar 7, daalde het logische foutpercentage exponentieel (ongeveer $2,14\times$ per twee stappen), en de grootste, een afstand-7-geheugen met 101 qubits, overleefde zijn beste fysieke qubit — beyond breakeven — met foutcorrectie in realtime. Het is een lang gezochte technische mijlpaal. Het is ook één logische qubit die als geheugen dienstdoet, met een foutpercentage nog ver van wat echte algoritmen nodig hebben, zonder uitgevoerde logische operaties, met een onverklaarde foutvloer die de auteurs zelf benoemen, en ordes van grootte aan schaling in het verschiet. Een drempel overgestoken, geen computer afgeleverd.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Quantum error correction below the surface code threshold*, Google Quantum AI and Collaborators, Nature 638, 920 (2025) · DOI: 10.1038/s41586-024-08449-y

Het moment dat de curve de goede kant op boog

Dertig jaar lang rustte kwantumfoutcorrectie op een belofte die nooit netjes was ingelost. De theorie zegt: verspreid één eenheid kwantuminformatie — één *logische* qubit — over veel ruisende fysieke qubits, en als die fysieke qubits goed genoeg zijn, dan zou het toevoegen van *meer* qubits de logische qubit *beter* moeten maken, met fouten die exponentieel dalen naarmate de code groeit. De adder zit in het “als”: onder een kritische ruisdrempel helpen meer qubits; erboven voegen meer qubits alleen meer ruis toe. Elk eerder experiment had aan de verkeerde kant van die lijn geleefd, of liet de trend niet schoon zien. De code groter maken maakte de zaken slechter, niet beter.

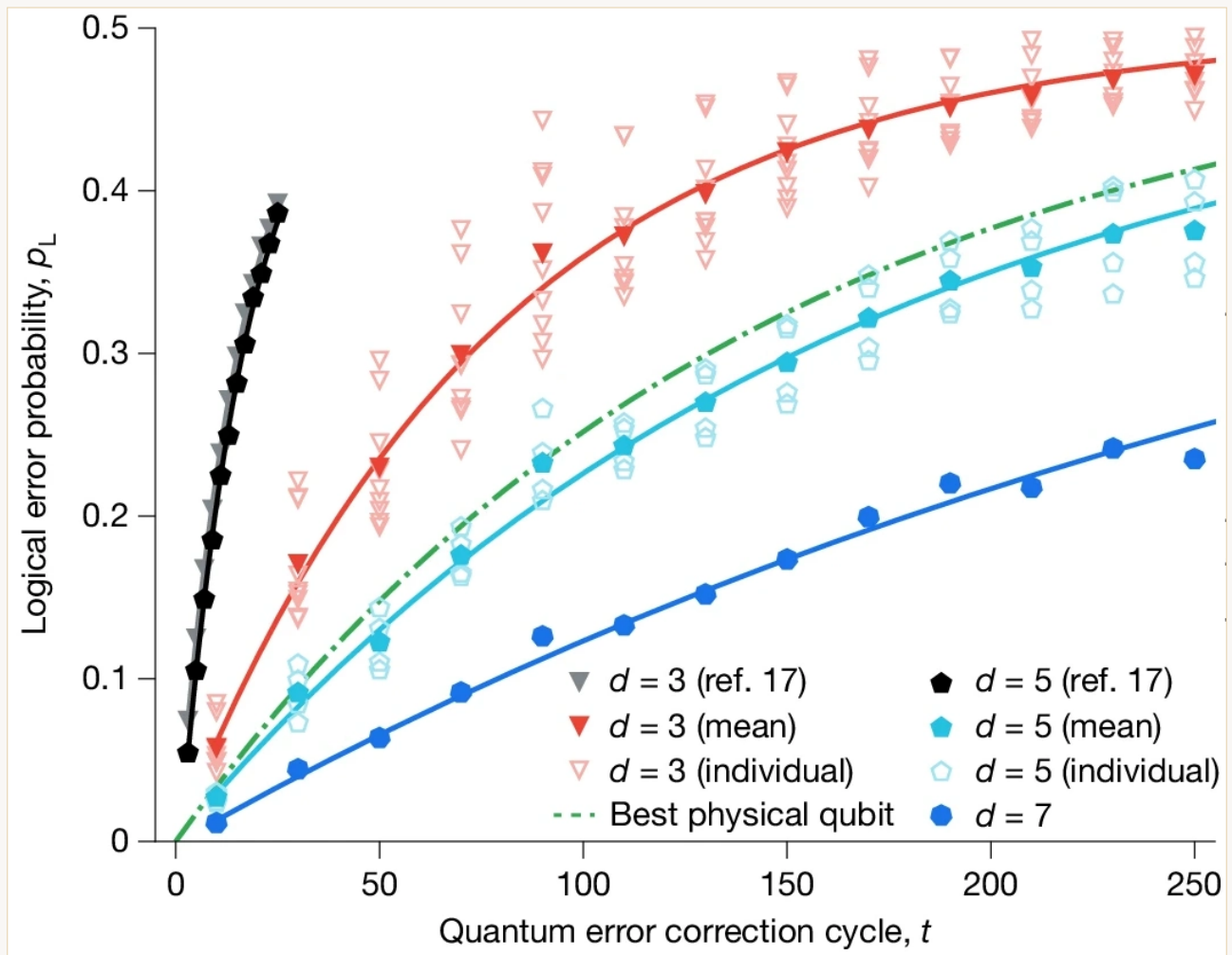
In december 2024 rapporteerde Google Quantum AI de eerste duidelijke demonstratie van het andere regime. Op Willow, hun nieuwste generatie supergeleidende processors, bouwden ze surface-code-geheugens op code-afstanden 3, 5 en 7, en zagen ze het logische foutpercentage *dalen* telkens als de code groter werd — met een factor $\Lambda = 2,14 \pm 0,02$ per twee stappen omhoog in afstand. Hun grootste, een afstand-7-geheugen met 101 qubits, hield een logische qubit vast met een fout van $0,143\% \pm 0,003\%$ per correctiecyclus, en — de kop binnen de kop — het overleefde *langer dan zijn eigen beste fysieke qubit*, met een factor $2,4 \pm 0,3$. Dat heet “beyond breakeven”, en het is de eerste keer dat het hele apparaat van foutcorrectie zichzelf op deze hardware heeft terugverdiend.

Dit is een echte mijlpaal, en het loont precies te zijn over welke soort. Het is een bewijs dat de schaling nu de goede kant op gaat. Het is geen werkende kwantumcomputer, en de paper claimt dat ook niet.

Wat “surface code”, “afstand” en “onder de drempel” betekenen

Een **logische qubit** is één beschermde eenheid kwantuminformatie, gecodeerd over veel fysieke qubits. De **surface code** is een bepaalde manier om die codering op een 2D-rooster te doen, waarbij extra “meet”-qubits voortdurend op fouten controleren zonder de opgeslagen informatie te verstoren. De code-**afstand** d is geen fysieke afstand: het is het kleinste aantal goed geplaatste fouten dat de logische qubit kan bederven zonder dat de code het merkt. Een grotere d is een groter, robuuster vlak — het kost meer fysieke qubits (ruwweg $2d^2 - 1$) en corrigeert meer gelijktijdige fouten, tot $(d - 1)/2$ ervan. De drie hier geteste maten, afstanden 3, 5 en 7, corrigeren dus 1, 2 en 3 gelijktijdige fouten en kosten ruwweg 17, 49 en 97 fysieke qubits — het afstand-7-geheugen dat Google bouwde gebruikte er 101, iets boven dit schoolboekminimum.

“**Onder de drempel**” (“below threshold”) is de cruciale formule. Foutcorrectie helpt alleen als je fysieke foutpercentage onder een kritische waarde ligt; daar onderdrukt elke toename in afstand het logische foutpercentage exponentieel. De onderdrukingsfactor Λ meet dit — $\Lambda > 1$ betekent dat de code laten groeien helpt, en hoe hoger Λ , hoe beter. Google rapporteert $\Lambda \approx 2,14$: elke toename van twee in afstand halveerde het logische foutpercentage ongeveer. Dat Λ comfortabel boven 1 ligt, is het hele resultaat.



Hoe de logische fout zich opbouwt over de correctiecyclus, voor de afstand-3-, -5- en -7-geheugens (van boven naar beneden). De lijn om in de gaten te houden is de groene stippellijn — de *beste enkele fysieke qubit* op de chip. Het afstand-7-geheugen (blauw, laagste) stapelt fouten langzamer op dan die lijn, dus de gecodeerde qubit overleeft de beste fysieke qubit waaruit hij is gebouwd — “beyond breakeven”, met een factor 2,4×. Dit is het levensduurresultaat; de onderdrukking onder de drempel zelf ($\Lambda = 2,14$, terwijl de code groeit van afstand 3 naar 5 naar 7) zit in de getallen in de tekst.

Google Quantum AI and Collaborators / Nature CC BY-NC-ND 4.0

Wat de auteurs deden

- Bouwden surface-code-geheugens op twee Willow-chips: een 105-qubit-processor waarop de afstand-3-, -5- en -7-codes achter de schaaltest draaiden (de grootste daarvan het afstand-7-geheugen met 101 qubits en 49 data-qubits), en een 72-qubit-processor die een afstand-5-geheugen draaide met een realtime-decoder plus de repetitiecodes op hoge afstand.
- Maten hoe de logische fout *per cyclus* veranderde toen ze de code-afstand verhoogden van 3 via 5 naar 7, en haalden daar de onderdrukkingsfactor Λ uit.
- Vergeleken de levensduur van de logische qubit met de beste individuele fysieke qubit op dezelfde chip, als test op “breakeven”.

- Draaiden de afstand-5-code met een **realtime-decoder** — klassieke hardware die de foutcontroles interpreteert zo snel als ze binnenkomen — tot een miljoen cycli lang, om te laten zien dat de foutcorrectie de machine kan bijhouden.
- Duwden eenvoudigere **repetitiecodes** door tot afstand 29 om te jagen op de zeldzame, diepe foutbronnen die een vloer onder de prestaties leggen.

Wat ze vonden

- **De code zit onder de drempel.** De logische fout per cyclus daalde met $\Lambda = 2,14 \pm 0,02$ per toename van twee in afstand — duidelijke exponentiële onderdrukking, het gedrag dat de theorie beloofde en dat geen processor definitief had laten zien.
- **Het afstand-7-geheugen haalde $0,143\% \pm 0,003\%$ fout per cyclus** en leefde $2,4 \pm 0,3$ keer langer dan zijn beste fysieke qubit — beyond breakeven.
- **Realtime-decoding hield het bij.** De decoder zat op afstand 5 gemiddeld op 63 microseconden latentie tegenover een cyclustijd van 1,1 microseconde, volgehouden over een miljoen cycli — de foutcorrectie liep live, niet alleen in analyse achteraf.
- **Er blijft een zeldzame, diepe foutbron.** In de repetitiecode-tests werden de prestaties uiteindelijk begrensd door gecorreleerde foutuitbarstingen die ruwweg **eens per uur** optreden (ongeveer één per 3×10^9 cycli), met een foutvloer nabij 10^{-10} waarvan de oorsprong volgens de auteurs **nog niet begrepen** is.

Wat dit niet bewijst

- Het is **geen** kwantumcomputer die rekt. Dit is een kwantum-geheugen: het bewaart en beschermt één logische qubit. Het voert geen logische operaties (poorten) uit tussen logische qubits en draait geen algoritme.
- Het is **niet** één qubit verwijderd van nuttige machines. Een logische afstand-7-qubit kost zo'n 101 fysieke qubits; een foutpercentage van 0,1% per cyclus ligt nog ver boven de ruwweg 10^{-6} tot 10^{-10} die echte algoritmen nodig hebben. Die kloof dicht betekent doorduwen naar veel grotere afstanden — veel meer fysieke qubits per logische qubit — en nuttige algoritmen hebben *duizenden* logische qubits tegelijk nodig. Het budget aan fysieke qubits daarvoor loopt in de miljoenen.
- Het **“indien geschaald” doet echt werk**. De eigen conclusie van de paper is dat de apparaatprestaties, *indien geschaald*, aan de eisen van grote algoritmen zouden kunnen voldoen. Laten zien dat de trend klopt op één logische qubit is niet hetzelfde als de geschaalde machine gebouwd hebben, en niets hier garandeert dat de trend overleeft tot veel grotere maten.
- De **onverklaarde foutvloer is een levend probleem**. De gecorreleerde uitbarstingen die de repetitiecode-prestaties aftoppen zijn, in de woorden van de auteurs, ordes van grootte groter dan verwacht en zouden grotere fouttolerante toepassingen uitsluiten tot ze begrepen zijn — een open gebrek, onomwonden benoemd, geen opgelost detail.
- Het zegt niets over **het breken van encryptie of “kwantumsuprematie” voor nuttige taken**. Daarvoor is de volledige fouttolerante machine nodig waarvoor dit een fundamentsteen is — niet een

demonstratie ervan.

Hoe sterk is het bewijs

- **De kernclaim is solide en belangrijk.** Werking onder de drempel met duidelijke exponentiële onderdrukking over drie code-afstanden, plus een levensduur voorbij breakeven en een werkende realtime-decoder — precies de combinatie die het veld probeerde te bereiken, en direct gedemonstreerd in plaats van afgeleid. Dit is geen hype-artefact; het is een echt ingenieursresultaat van een leidende groep.
- **De auteurs zijn zorgvuldig over de reikwijdte.** Ze framen het als *geheugen* onder de drempel, benoemen zelf de onverklaarde gecorreleerde foutvloer, en hangen de toekomst aan dat opvallende “indien geschaald”. De overdrijving, waar die opduikt, zit in de omringende berichtgeving die “een foutgecorrigeerde geheugenqubit werd beter naarmate hij groeide” afrondt naar “de kwantumcomputer is er”.
- **De eerlijke status: een funderingsstap, netjes gezet.** Eén logische qubit, goed genoeg beschermd dat redundantie eindelijk helpt — met een lange, zware en nog niet gegarandeerde weg van schaling, logische poorten en onverklaarde fouten in het verschiet.

Waarom het ertoe doet

Fouttolerant kwantumcomputeren had altijd iets van een kip-en-ei: de machines die nuttig zouden zijn hebben foutpercentages nodig die geen fysieke qubit haalt, en de remedie — foutcorrectie — werkt alleen als de hardware al goed genoeg is om onder de drempel te zitten. Die lijn oversteken, al is het één keer, al is het met één logische qubit, verandert de vraag van “kan dit überhaupt?” naar “hoe ver valt het te schalen, en hoe snel?”. Dat is een echte, betekenisvolle verschuiving, en daarom verdient het resultaat aandacht.

Maar dezelfde zorgvuldigheid die het resultaat betrouwbaar maakt, hoort het verhaal eromheen te temperen. Dit is de eerste steen van een fundament, goed gelegd. Het is niet het gebouw, en de mensen die hem legden zeggen dat als eersten. De juiste manier om kwantumcomputeren de komende jaren te volgen is precies deze onglamoureuze curve: of de onderdrukkingsfactor standhoudt terwijl de codes groeien, of logische poorten net zo schoon lukken als logisch geheugen, en of die mysterieuze eens-per-uur-fout ooit verklaard raakt.

Heldere samenvatting

Google Quantum AI liet voor het eerst schoon zien dat een surface-code-kwantumgeheugen *onder de drempel* kan werken: terwijl ze de code lieten groeien van afstand 3 via 5 naar 7, daalde het logische foutpercentage exponentieel (met ongeveer $2,14\times$ per twee stappen), en de grootste, een afstand-

7-geheugen met 101 qubits, overleefde zijn beste fysieke qubit — beyond breakeven — terwijl de foutcorrectie in realtime draaide. Dit is een echte, lang gezochte mijlpaal in de bouw van kwantumcomputers. Het is ook één enkele logische qubit die als geheugen dienstdoet, met een foutpercentage nog ver van wat echte algoritmen eisen, zonder uitgevoerde logische operaties, met een onverklaarde foutvloer die de auteurs zelf benoemen, en met een schalingsweg van vele ordes van grootte in het verschiet. Een echte drempel overgestoken — geen kwantumcomputer afgeleverd.

Bronnen

Google Quantum AI and Collaborators, Quantum error correction below the surface code threshold, Nature 638, 920 (2025)

<https://doi.org/10.1038/s41586-024-08449-y>

Author Correction: Quantum error correction below the surface code threshold, Nature 653, E5 (2026) — corrects a Fig. 3a axis label and legend keys; does not affect the below-threshold (Fig. 1) results

<https://www.nature.com/articles/s41586-026-10559-8>