

TEKST: DAYINTA PERRIER



Sneller en energiezuiniger rekenen

# Breincomputer

**Computers kunnen steeds beter patronen herkennen. Toch werkt het menselijk brein vaak nog sneller, efficiënter en zuiniger. Door net als in het brein data te verwerken én op te slaan op dezelfde plek, kunnen chips tot duizend keer minder energie gaan gebruiken, denken wetenschappers.**

De computer is ooit bedacht als een grote rekenmachine om de mens te ontlasten. Sinds de opkomst van kunstmatige intelligentie (AI) is de rol van chips fors uitgebreid. Dankzij AI kan een smartphone spraak herkennen en 'ziet' de software dat er bijvoorbeeld een hond staat op die leuke foto die je net nam.

Om goed te functioneren, moet een AI-algoritme eerst worden getraind. Voor het dat schattige hondje herkent op de foto, heeft het tienduizenden foto's doorgewerkt om te leren hoe zòh dier eruit ziet. Dat kost wat tijd, maar belangrijker nog: dat kost een hoop energie – bijna evenveel als een huishouden in twee weken verbruikt.

Ook als de training voorbij is, kost de beeldherkenning nog veel stroom. Dat komt doordat in de huidige computers de processoren en het geheugen fysiek van elkaar

zijn gescheiden. Voortdurend moet informatie heen en weer: een vertragend en energie-inefficiënt proces.

## Neuronennetwerk

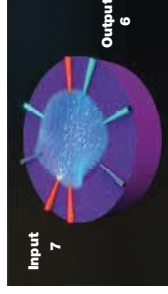
Iedereen die online weleens een captcha heeft ingevuld, heeft de grenzen van conventionele computers aan den lijve ondervonden, zegt hoogleraar Hans Hilgenkamp, één van de directeurs van het Center for Brain-Inspired Nano Systems (BRAINS) van de Universiteit Twente (UT). Zòh captcha wordt ingezet om ongewenste bots te weren en bestaat uit letters of cijfers die zo zijn vervormd dat de computer ze niet meer kan herkennen.

Voor het menselijk brein is dat daarentegen een fluitje van een cent, dankzij een communicerend netwerk van zenuwcellen (neuronen) in ons brein. Elke neuron mondt uit in meerdere (axon)uiteinden en geeft via

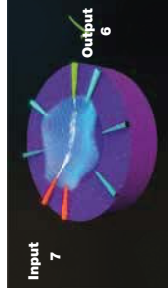
## Handgeschreven cijfers herkennen



De twee rode elektroden links zijn inputs, de rode elektrode rechts is de output. Op de overige (blauwe) elektroden kunnen controlespanningen worden gezet.



Op de inputs worden spanningen gezet die overeenkomen met eigenschappen van een handgeschreven cijfer ('7' in het voorbeeld).



De controlespanningen worden door een leerproces aangepast opdat de inputs resulteren in het juiste outputsignaal, overeenkomend met het antwoord '7'.

De hand symboliseert een diep neuraal netwerkmodel van een chip met meerdere elektroden (onderaan). Daarna is met *machine learning* efficiënt de juiste functionaliteit te realiseren. ILLUSTRATIE: BRAINS CENTER

## Materialen voor neurochips

Het maken van kunstmatige neurale netwerken voor chips kan op verschillende manieren. Maar wat al deze systemen gemeen hebben, is dat ze bestaan uit een invoerlaag, een 'neuraal netwerk' en een uitvoerlaag. In dat kunstmatige neurale netwerk zitten vele knooppunten, de kunstmatige neuronen, die via instelbare (leerbare) verbindingen met elkaar zijn verbonden. Hierdoor kunnen de chips vergelijkbaar met het brein leren en parallel processen draaien.

Daarnaast moeten de materialen energiezuinig, snel en klein zijn en goed op grote schaal te produceren. De Twentse

hoogleraar Wilfried van der Wiel en onderzoeksleider Alexander Khajetoorians van de Radboud Universiteit werken daarom aan de allerkleinste systemen opgebouwd uit atomen, die de data doorgegeven. Ook werken zij zoals de neurale netwerken in het brein. Door de chips te trainen leren ze taken uit te voeren zoals schrift- en spraakherkenning, waarbij ze minder energie verbruiken dan de traditionele computertechnologie. Voorlopig zitten deze chips nog in de experimentele fase en zullen ze eerst worden ingezet voor kleine elektronica.

Het bouwen van een complete breincomputer zal nog zeker jaren duren.

### Koolstofnanobuizen

Onderzoekers in Eindhoven en Groningen werken aan meer experimentele materialen. 'Yoeri van de Burgt (TU/e) werkt aan chips van geleidende polyme-



Ontwerp van een energiezuinige chip.  
FOTO: IBM RESEARCH

de synapsen – de verbindingstukjes tussen neuronen – informatie door aan andere neuronen. Hier zijn de werking en het geheugen met elkaar verweven, wat een hoop energie scheelt en het proces versnelt. Een krachtige chip die met zoals het brein data op dezelfde plek kan verwerken en opslaan, opent een nieuwe wereld aan mogelijkheden, zegt Hilgenkamp. Een chip die volgens deze principes van het brein werkt, zou voor bepaalde processen duizend keer minder energie verbruiken dan de huidige chips.

### Hertrainbare chip

Wereldwijd werken wetenschappers aan universiteiten en in bedrijven aan dergelijke neuromorfische chips, ofwel chips die zijn geïnspireerd op de werking van het brein. Het gaat daarbij niet om nieuwe software om de traditionele computer steeds complexere handelingen te laten uitvoeren, maar om materialen en ontwerpen die functioneren zoals het brein. De focus ligt daarbij op het mogelijk maken van meerdere processen tegelijk en op het combineren van het geheugen en de verwerking van informatie.

De Amerikaanse chipfabrikant Intel maakt kunstmatige neuronenchips van silicium. Deze zogenaamde Lothi-chips bevatten rond de 130.000 neuronen en zijn al in staat chemische stoffen te 'ruiken' in geurmonsters. Door 768 chips aan elkaar te schakelen bouwde Intel al een groot neuraal netwerk dat werkt als een snellere en energiezuiniger computer voor bepaalde AI-processen. Aangezien de complete chipindustrie is gebouwd op silicium zijn deze chips geschikt voor grootschalige productie. Hertrainbaar zijn ze echter niet. 'De neurale netwerken staan begraven in silicium en zijn daarom niet plastisch zoals in het brein', zegt Yoeri van de Burgt, hoofddocent aan de Technische Universiteit Eindhoven (TU/e). Ook zijn onderzoeksgroep werkt aan neuromorfische chips. 'Doordat het brein plastisch is, kunnen er constant nieuwe netwerken worden aangelegd of bestaande netwerken versierd: op die manier leer je, zegt Van de Burgt. 'Chips gemaakt van materialen die dit ook kunnen, zijn in staat ook weer nieuwe taken te leren.'

### Lokaal leren

Samen met onderzoekers in Groningen, Twente en Nijmegen werkt Van de Burgt aan alternatieve mate- ▶

## Functionaliteit van siliciumchips uitbreiden

De *neuromorphic devices* and *systems*-groep van het technologiebedrijf IBM in Zürich zoekt naar manieren om de bestaande siliciumtechnologie uit te breiden door nieuwe materialen op het silicium aan te brengen. Daarbij gaan ze uit van apparatuur, materialen en processen die nu worden gebruikt in de industrie.

De Twentse masterstudent technische natuurkunde Fieke ten Kate doet daar momenteel een half jaar onderzoek. Ze brengt haar labdagen meestal door in de cleanroom, op zoek naar nieuwe materialen. 'Samen met de groep maak ik componenten met steeds een andere samenstelling, geïntegreerd op siliciumchips,' vertelt ze.

Deze componenten bestaan uit twee elektroden, gescheiden door een aanvankelijk isolerend materiaal. De elektrische geleidbaarheid van iedere component kan worden ingesteld met een elektrische spanning. Hierdoor ondervindt

de elektrische stroom meer of minder weerstand.

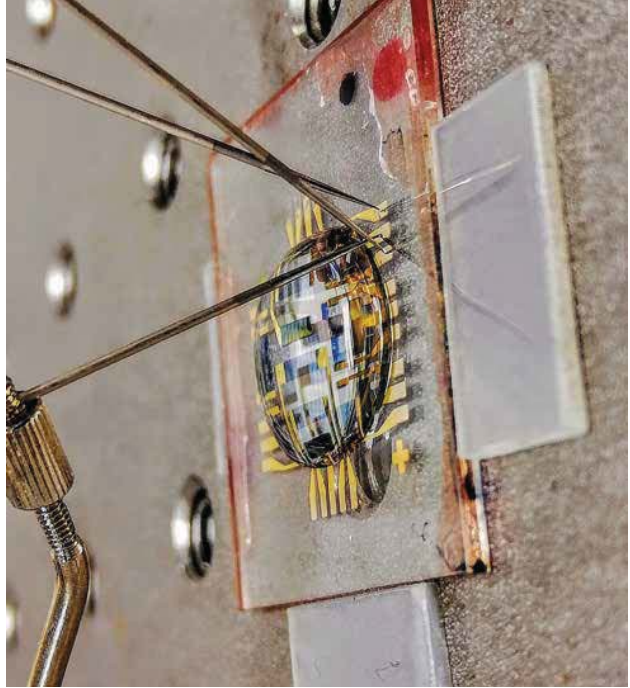
'Die variatie in de elektrische geleidbaarheid hebben we een neuraal netwerk toe te passen', zegt Ten Kate. 'Hiermee is de basis voor de chip gelegd en kan ik experimenteel bepalen of de componenten de gewenste eigenschappen hebben.'

Om de werking van de synapsen in het neurale netwerk te imiteren, moeten er onder andere meerdere geleidbaarheidsstanden kunnen worden ingesteld. Hiervoor kijkt ze hoe de componenten reageren op elektrische pulsen.

'Het onderzoeken van de elektrische eigenschappen van de componenten is het spannendste deel van het onderzoek', zegt Ten Kate. 'Ik hoop dat ik met mijn experimenten kan bijdragen aan een verbetering van de siliciumtechnologie, zodat deze in de toekomst voor energiezuinige neurale netwerken kan worden gebruikt.'



Masterstudent Fieke ten Kate werkt in de cleanrooms van IBM in Zürich aan nieuwe materialen die zijn aan te brengen op siliciumchips.  
FOTO: IBM

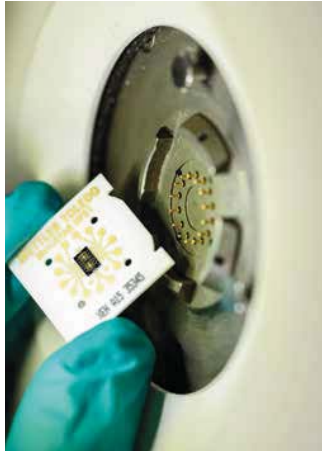


Een 'chip' met organische kunstmatige synapsen met elektrolyt (water met zoutionen) erdoorheen.  
FOTO: EVELINE VAN DOREMAELE

## Trillen voor stroom

Chips die zelfstandig data kunnen opslaan en verwerken zijn handig voor kleine elektronica of mobiele apparatuur. Chips hebben echter ook stroom nodig. Batterijen zijn daarvoor lang niet altijd de handigste optie. Denk bijvoorbeeld aan een prothese in het lichaam: het vervangen van een lege batterij is dan lastig. Daarnaast hebben de meeste chips die data verwerken meer energie nodig dan een standaardbatterij kan bieden.

Beatriz Noheda, hoogleraar aan de RUG, werkt daarom aan piezomaterialen die de chips van voldoende energie moeten voorzien. Dit zijn materialen die trillingen omzetten in elektriciteit. 'Als dit lukt kunnen de chips zelfstandig werken, zonder batterijen', zegt Noheda. 'Het is de bedoeling dat de passagiers zelf genoeg energie opwekken om de data te kunnen weergeven en de data te leveren en of de chips energie zuinig genoeg zijn.'



Bij CogniGron in Groningen werken ze aan nieuwe materialen voor neuromorfische chips.  
FOTO: SYLVIA GERMES

rielen voor de chips (zie kader: Materialen voor neurochips). Hij maakt het neurale netwerk van geleidende polymeren. Deze materialen zijn geschikt om lerend vermogen van het brein na te bootsen met weinig stroom. Ze bevatten vele knooppunten en worden geplaatst tussen een laag voor input en een laag voor output. Van de Burgt maakte al een chip met drie kunstmatige synapsen met een vloeistofsensoren. Aan de hand van het chloorgehalte van het zweet kan die vaststellen of een patiënt al dan niet ziek is.

De geleidende polymeren worden niet door elektrische stroom aangestuurd, maar door tonen. Daarmee lijken ze op neuronen. 'Deze chips kunnen direct door het lichaam worden aangestuurd', zegt Van de Burgt. 'Dat maakt ze geschikt voor bijvoorbeeld armprothesen. Ze kunnen ook leren van het lichaam.'

Wilfried van der Wiel, hoogleraar nano-elektronica aan de UT en mededirecteur van het onderzoekscentrum BRAINS, ziet daarom met name toepassingen voor neuromorfische chips in zelfrijdende auto's. Zijn auto moet per seconde tientallen beelden kunnen analyseren. Er is simpelweg te weinig tijd om informatie voor verwerking door te sturen naar een cloud. 'Maar denk ook aan toepassingen bij spraak- en patroonherkenning van de telefoon. Daarvoor zijn krachtige en zuinige chips noodzakelijk.'

Daarnaast maakt het heen en weer slepen van data chips gevoelig voor hacks. 'Om data van kleine elektronica te verwerken, komen alle persoonlijke gegevens online in een cloud', zegt Van de Burgt. 'Als alles lokaal gebeurt op het apparaat zelf, dan hoeft deze niet langer aangesloten te zijn op internet. Dat is een stuk veiliger.'

### Atomair berglandschap

Om deze powerchips te maken werken de onderzoekers van BRAINS aan chips op basis van atomaire netwerken. De atomen van het element boor worden lukraak geplant in silicium. 'Het ligt aan de rangschikking van de atomen hoe de netwerken eruit zien', zegt Van der Wiel. 'Afhankelijk van de instelbare elektrische velden beweegt de elektrische stroom zich door dit netwerk als een rivier door een berglandschap, de weg van de minste weerstand volgende.'

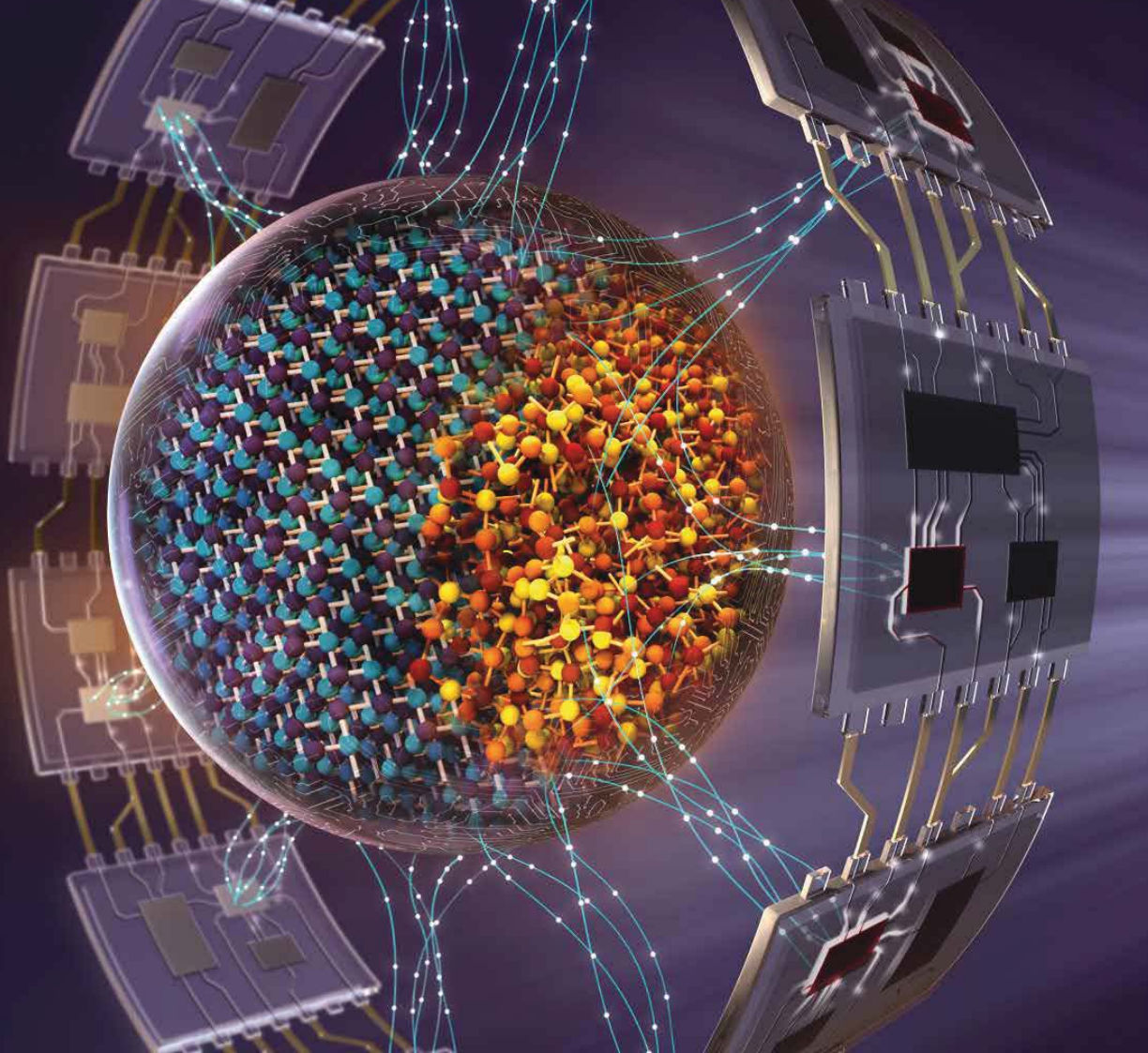
Omdat de booratomen willekeurig geordend liggen, werkt iedere chip net iets anders. Voor de productie is dit makkelijker en volgens Van der Wiel maakt het voor de werking niet uit. 'Net als ieders brein ziet iedere chip er niet wat anders uit, maar ze kunnen dankzij hun eigenschappen toch hetzelfde leren. De chips zijn af te stellen door het berglandschap, en zo de route van de rivier, te veranderen tot de chips goed werken.' Het afstellen van iedere chip vereist misschien een extra handeling. Daar staat tegenover dat dit één van de kleinste neuromorfische systemen is. Nadat deze chips tienduizenden beelden van handgeschreven cijfers hebben gezien, kunnen ze de cijfers al herkennen. Wordt de spanning van de chips afgehaald, dan gaat die kennis echter nog verloren. Het realiseren van intern geheugen is de volgende stap.

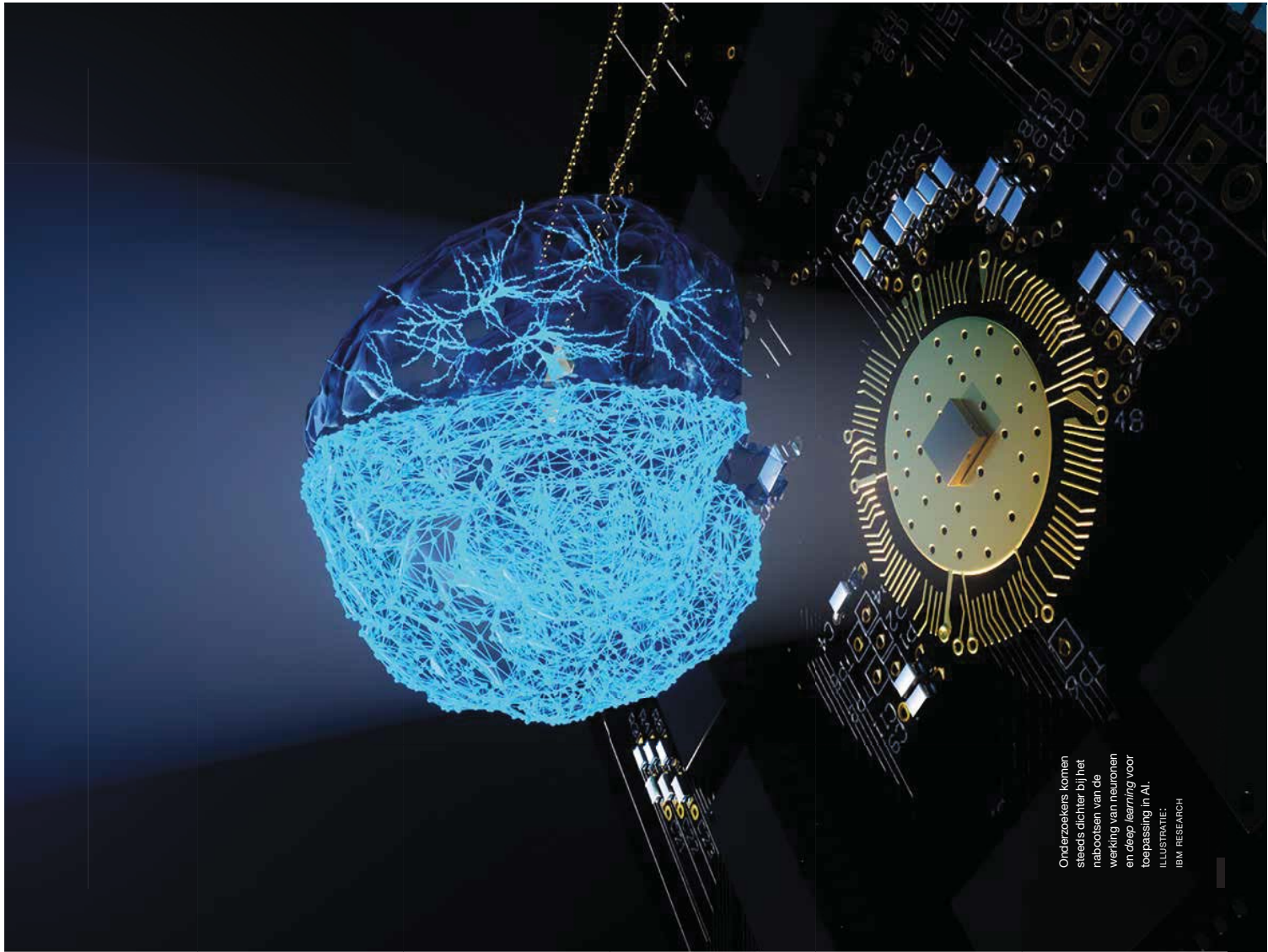
### Op de rand van chaos

De chips waaraan de meeste onderzoekers in Neder-

In-memory computing is het nieuwe concept waarbij geheugen en verwerking op de een of andere manier naast elkaar bestaan, net als in het brein.

ILLUSTRATIE: IBM RESEARCH





Onderzoekers komen steeds dichterbij het nabootsen van de werking van neuronen en *deep learning* voor toepassing in AI.

ILLUSTRATIE: IBM RESEARCH

land werken, zijn nog slechts een eerste stap richting een computer die werkt als het brein, stelt hoogleraar Beatriz Noheda, hoofd van het instituut *Groninger Cognitive Systems and Materials Center* (Cognigrom) van de Rijksuniversiteit Groningen (RUG). De onderzoekers van dit multidisciplinaire instituut, opgericht in 2018, houden zich onder andere bezig met materialen die zich op de rand van chaos bevinden. Een voorbeeld hiervan zijn kristalstructuren waarin verschillende krachten met elkaar de strijd aangaan om een intern geordend systeem te creëren, zoals ferromagneten met geordende spins of ferro-elektrische materialen met geordende dipolen. Deze materialen ordenen zich volgens externe parameters, zoals een elektrisch veld of temperatuur.

'Bij bepaalde waarden van deze krachten vallen deze eigenschappen weg en komt het materiaal in een chaotische of ongeordende toestand terecht', legt Noheda uit. Bij het omslagpunt tussen geordend en chaotisch is het materiaal erg beïnvloedbaar. 'Dat is de crux', zegt Noheda. 'Een klein duwtje de ene of de andere kant op is alles wat je nodig hebt om het materiaal te laten reageren. Dat bespaart een hoop energie. Daarnaast kunnen kleine veranderingen in de begintoonstand het materiaal in verschillende toestanden brengen. Op die manier kunnen deze materialen de vele uiteinden van een neuron imiteren.'

### Siliciumverslaafd

Op het moment is het nog de vraag welke van deze materialen de basis zal vormen voor toekomstige chips. Al deze verschillende systemen hebben hun voordelen, vindt Noheda. 'Neuromorfische chips opgebouwd uit atomen die informatie overdragen zijn klein. Maar ferro-elektrische materialen reageren misschien sneller.'

In Groningen maken ze chips die ze uitproberen op een testlocatie op het stationsplein van de plaats Zuidhorn (zie kader Trillen voor stroom). 'Door voor kleine elektronica allerlei verschillende chips te gebruiken die data direct verwerken, kunnen we leren welke soort chips het beste zijn voor welke processen, zegt Noheda. 'Met deze kennis kunnen we uiteindelijk op zoek naar een groot systeem voor een breincomputer.'

Het ontwikkelen van nieuwe materialen is een belangrijke stap in de zoektocht naar de nieuwe computer, voegt Noheda toe. 'Maar we moeten ook al verder denken, zoals over de integratie van deze materialen in daadwerkelijke computerchips. En vergeet ook niet de complexe wiskunde achter deze systemen en de kennis om deze systemen te trainen.'

### Losse module

Niet voor alle processen zullen neuromorfische chips straks beter zijn dan het siliciumalternatief. Zowel Van der Wiel als Van de Burgt denkt dat er voorlopig een losse module komt die naast de huidige computer bestaat. 'Een losse module in je computer zal vol zitten met neuromorfische chips en deze zal worden gebruikt als er specifieke AI-processen plaatsvinden, voorspelt Van de Burgt. ●

## Communicerende kobaltatomen

Aan de Radboud Universiteit maakt hoogleraar Alexander Khajetoorians een eerste stap naar de ontwikkeling van materialen die kunnen 'leren'. Het netwerk – bestaande uit enkele atomen – past zichzelf aan in reactie op het voltage van de omgeving. 'De verbindingen tussen de neuronen (atomen) in ons netwerk worden zelf sterker of zwakker, afhankelijk van het voltage. Andere chips die in ontwikkeling zijn, kunnen zichzelf niet aanpassen, maar moeten worden voor-geprogrammeerd met hulp van een externe computer.'

Met verschillende voltages kan zijn onderzoeksteam kobaltatomen op zwart fosfor in twee stabiele toestanden brengen en zo informatie opslaan in deze atombits. 'De kobaltatomen werken als bits, we kunnen ze beschrijven met enen en nullen', zegt Khajetoorians. 'Doordat we deze informatie in de toestand van de atomen vastleggen, blijft de informatie ook behouden als de stroom weg valt.'

Naast het opslaan van informatie in atomen, kan het onderzoeksteam van Khajetoorians de kobaltatomen ook in rasterstructuren plaatsen, zodat ze met elkaar 'communiceren' op een manier die lijkt op neuronen en synapsen in het brein. De atomen die horizontaal gerangschikt liggen, communiceren heel snel en hun gedrag lijkt op dat van neuronen. De atomen die verticaal ten opzichte van elkaar liggen, zijn trager en doen denken aan het lerend vermogen van het brein.

Volgens Khajetoorians gaat dit systeem een stap verder dan de neuromorfische computer. Bij de opslag van informatie op de kobaltatomen worden namelijk de quantummechanische eigenschappen van de atomen gebruikt. Als ze dat compleet leren begrijpen, kunnen ze volgens de onderzoeker misschien zelfs een combinatie maken tussen een breinachtige computer en een quantumcomputer: het quantumbrein.



Het QuantumBrein-onderzoeksteam: Werner van Weerdenburg, Brian Kiraly en Elze Krof (van links naar rechts).

FOTO: ALEXANDER KHAJETOORIANS