

Neuromorphic technologies

Perspectief op nieuwe sleuteltechnologie

In opdracht van Topsector ICT

25-1-2024

Auteurs: Serina Contente, Tom Greenhead, Myrthe Maas
& Bas van der Starre



TOPSECTOR
ICT
dutch digital



Birch

Inhoud

- Inleiding [p 3](#)
- Afbakening [p 4](#)
- Stand van zaken [p 7](#)
 - 1. Onderzoek [p 8](#)
 - 2. Onderwijs [p 13](#)
 - 3. Toepassing [p 14](#)
- Technologie in perspectief [p 20](#)
- Aanbevelingen [p 28](#)
- Bijlagen [p 30](#)

Inleiding

Verkenning van Neuromorphic Technologies als nieuwe sleuteltechnologie

Topsector ICT heeft als missie het bedrijfsleven, overheid en kennisinstellingen te helpen innovaties in en met ICT te realiseren en daarmee de internationale positie van Nederland als land te verstevigen. Zij doen dat door een breed palet aan publieke en private partijen bijeen te brengen in innovatie-coalities met een focus op digitale sleuteltechnologieën. Als onderdeel van de nieuwe Nationale Technologie Strategie en het aankomende Kennis en Innovatie Convenant 2024-2027 zijn twee nieuwe digitale sleuteltechnologieën aan de vijf bestaande (Big Data, Blockchain, AI, Cybersecurity, Future Network Services) toegevoegd:

- Digital twinning & immersive technologies
- **Neuromorphic technologies**

Dit rapport dient als analyse van de stand van zaken van neuromorphic technologies in Nederland om in kaart te brengen wat de Nederlandse positie is, wat de potentie is van deze technologie en wat de huidige uitdagingen zijn voor zowel ICT als andere topsectoren.

Dit rapport bestaat uit de volgende onderdelen:

- Een **afbakening** van Neuromorphic Technologies voor deze verkenning.
- Een overzicht over wat de **stand van zaken** is in Nederland op het vakgebied Neuromorphic Technologies aan onderzoek, onderwijs en toepassing.
- Gebaseerd op die stand van zaken een **perspectief op de technologie** vanuit zes invalshoeken van het afwegingskader voor sleuteltechnologieën van het missiegedreven innovatiebeleid, te weten:
 1. De kans op maatschappelijke impact
 2. De kans op economische impact
 3. De relatieve positie van Nederland in EU-12 en in de wereld
 4. De krachtenbundeling met andere initiatieven
 5. De potentie voor meerjarige samenwerking over de gehele keten
 6. Het doorsnijdend karakter
- **Aanbevelingen** over mogelijke acties van Topsector ICT.

Afbakening



Inleiding

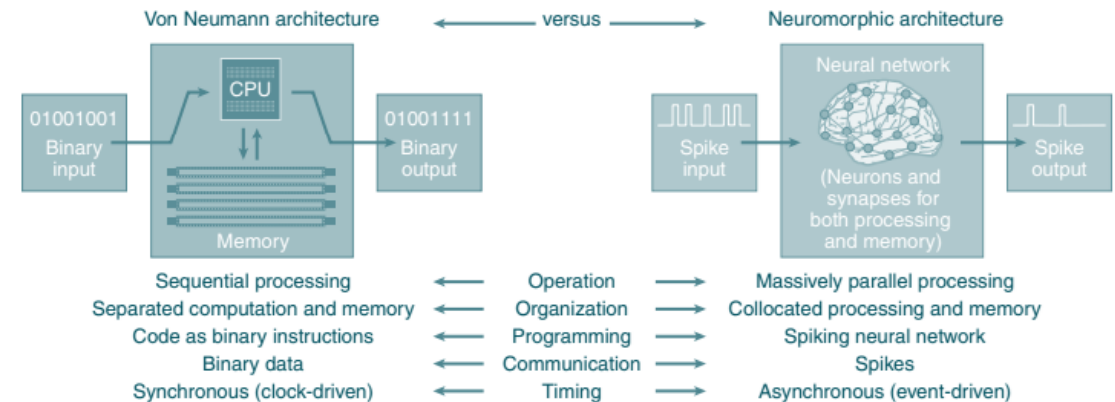
Neuromorphic technologies bieden bio-geïnspireerde architectuur voor efficiëntere berekeningen

Neuromorphic technologies verwijst naar een groep technologieën die **bio-geïnspireerde hardware en algoritmen** gebruiken voor het energie-efficiënt verwerken van informatie.

- De **hardware** wordt ontworpen als een op neurale netwerken lijkende architectuur, wat parallelle processing, gecombineerde processing en opslag en non-binaire signalen (spikes) mogelijk maakt.
- De **algoritmen** zijn ontworpen als neurale processen, wat flexibele en veranderende verbindingen mogelijk maakt. Deze algoritmen kunnen ook draaien op klassieke computer architectuur, maar werken beter op neuromorphic hardware.
- De **architectuur** is zodanig dat geheugen en processor op dezelfde locatie zitten, wat ervoor zorgt dat dataverplaatsing geminimaliseerd wordt.

Dit biedt **voordelen ten opzichte van klassieke computer** architectuur:

- Hogere energie-efficiëntie van de processor.
- Snelle en adaptieve verwerking van informatie.
- Robuustere systemen tegen schade, ruis en onzekerheden in data
- Compacte, lokaal-inzetbare hardware, waardoor de technologie minder afhankelijk is van externe processoren en cloud-opslag.
- Flexibiliteit bij herconfiguratie van hardware.
- Krachtiger lerend vermogen voor o.a. AI toepassingen.

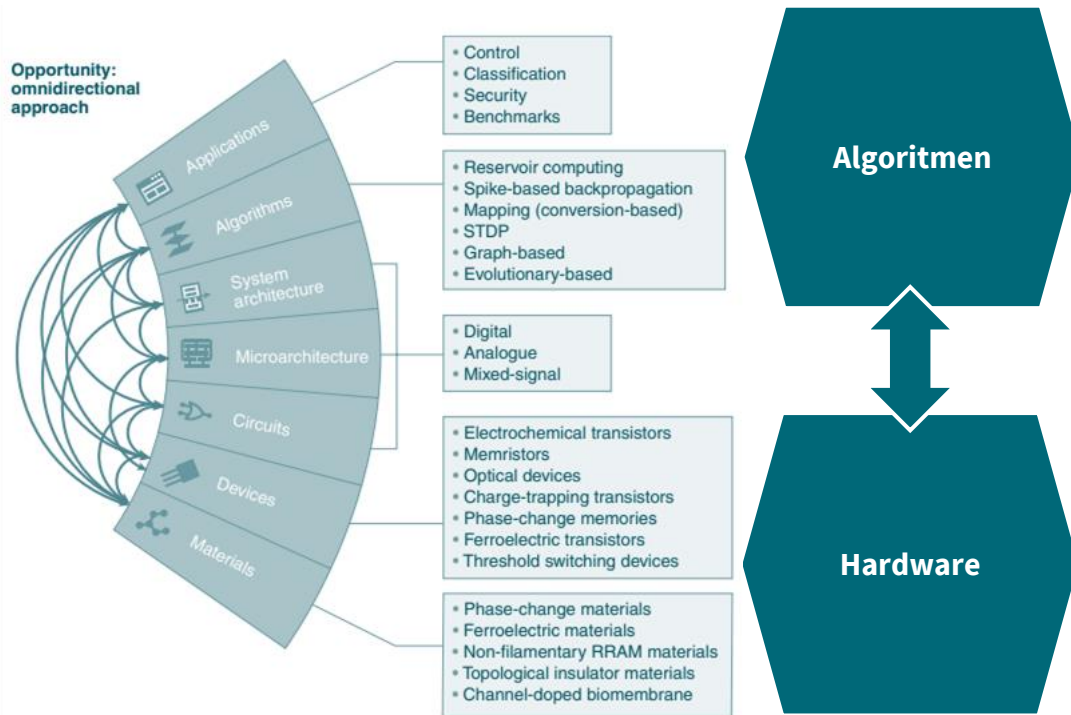


Vergelijking van de klassieke (von Neumann) architectuur met de neuromorphic architectuur. Deze twee architectuurtypes vertonen fundamentele verschillen op het gebied van werking, organisatie, programmering, communicatie en timing.

Opmerking: De term *neuromorphic* wordt ook gebruikt in de context van toepassingen met het aansturen van prothesen of brain-computer interfaces. Hier kijken we alleen naar als er ook op het gebied van hardware of algoritme innovaties plaatsvinden

Afbakening

In neuromorphic architectuur beïnvloeden hardware en algoritmen elkaar in het ontwerp



In neuromorphic architectuur werken hardware en algoritmen op een andere manier samen. Wetenschappers zien een kans voor een toekomstige co-ontwerpbenadering. Alle aspecten van de architectuur hebben invloed op andere componenten. Toepassingen hebben direct invloed op de gekozen materialen en algoritmen hebben direct invloed op de gebruikte schakelingen.

De huidige verwachtingen zijn dat neuromorphic processors energie-efficiënt zijn en goed zijn in **taken met neurale kenmerken**, zoals machine learning. Daardoor ziet men tenminste drie potentiële use cases voor processoren:

1. Door het lage energieverbruik kunnen de processoren ingezet worden in ‘**edge-computing**’ applicaties, zoals autonome voertuigen, robots, sensoren, wearables en IoT componenten.
2. De processoren kunnen ingezet worden als lokale **kunstmatige intelligente accelerator** in allerlei apparaten zoals laptops en smartphones. Dit biedt een potentiële snelheidsvergroting voor sommige taken en zal ook batterijgebruik kunnen optimaliseren.
3. De processoren kunnen ingezet worden als **accelerator in high performance computing**, waar ze specifieke problemen sneller kunnen oplossen (zoals simulaties, grafen en differentiaalvergelijkingen).

Voor elk van deze use cases zullen **specifieke ontwerpisen** aan de hardware en software ontstaan die tot een grote diversiteit aan neuromorphic apparatuur en algoritmen kan leiden.

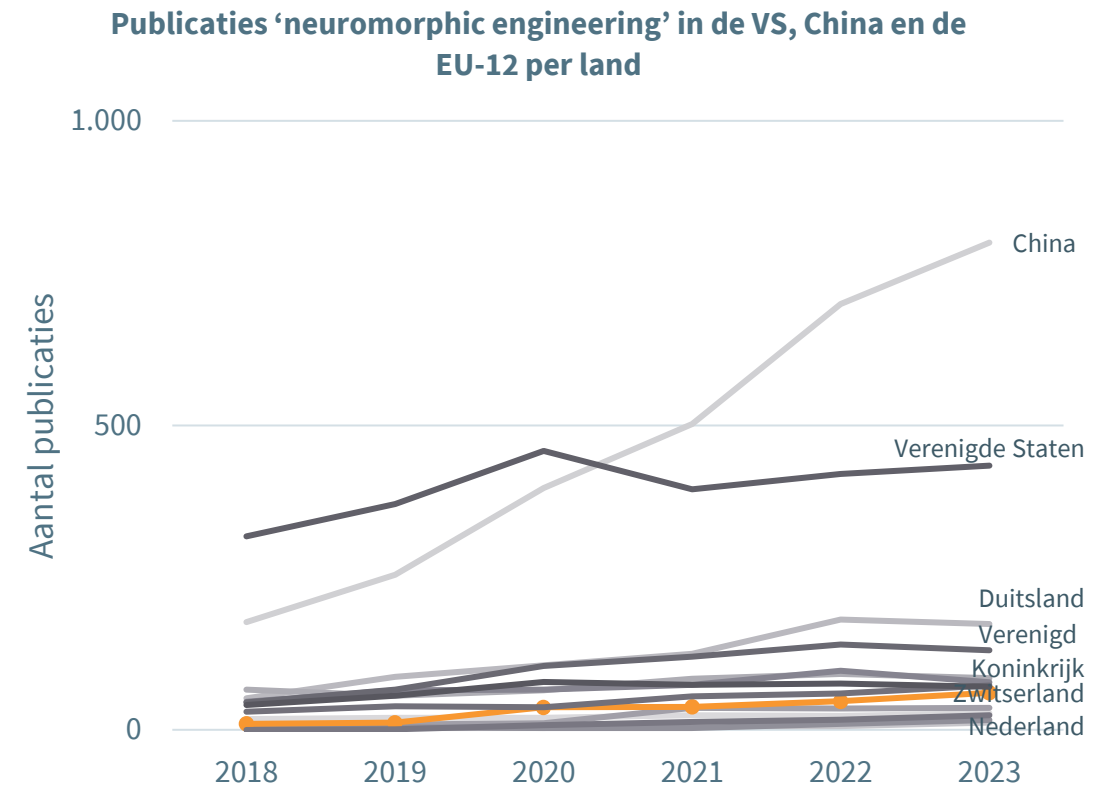


Stand van zaken ontwikkeling

1. Onderzoek

Nederland heeft ondanks haar grootte wel een significante positie in wetenschappelijke output

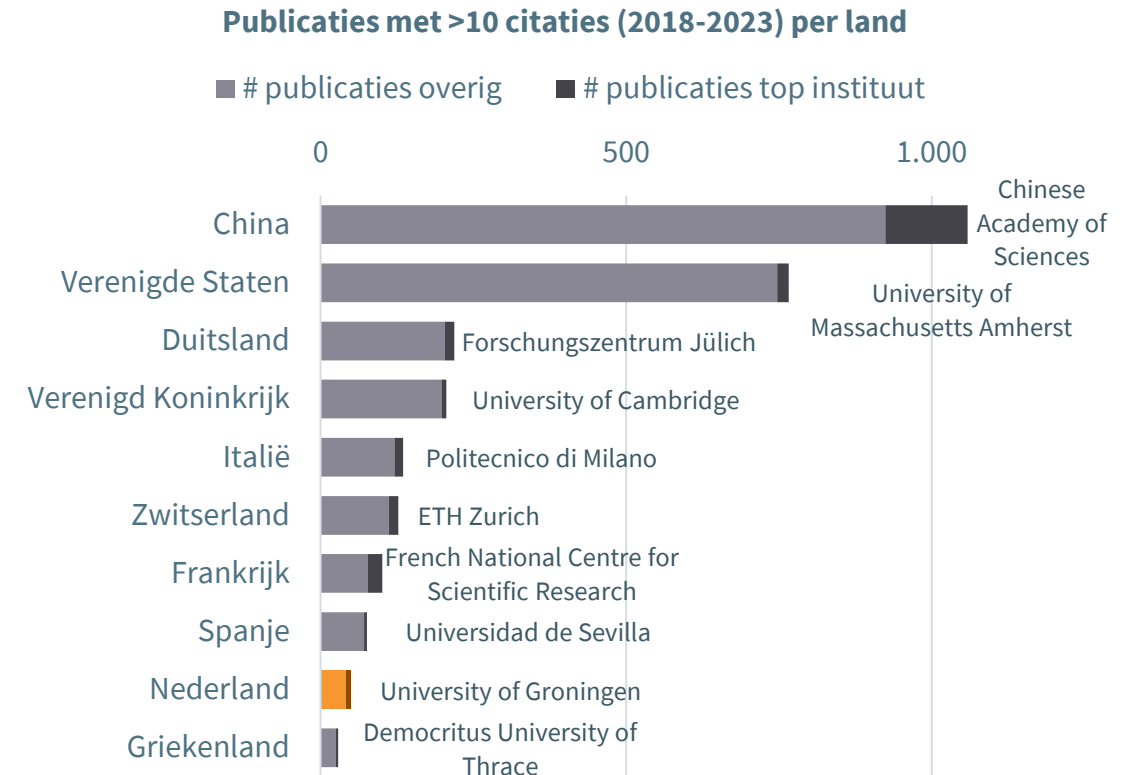
- Omdat neuromorphic technologies vaak een **geïntegreerde benadering** kiezen is het niet altijd mogelijk om onderscheid te maken in expliciet hardware of software gedreven onderzoek.
- Neuromorphic technologie is een snel groeiend kennisveld, met een **groei in aantal publicaties van ~150% tussen 2018 en 2023**.
- Die massale groei wordt **gedreven door China**, andere grote landen zoals de VS en Duitsland kunnen dit tempo maar moeilijk kunnen bijhouden.
- Tussen 2018 en 2023 publiceerde wetenschappers uit Nederland 205 publicaties rond neuromorphic technologies. Nederland heeft met 1,7% van de wereldwijde output een **relatief groot aandeel publicaties** en maakte ondanks de kleine massa een hogere procentuele groei door dan China. De meest geconcentreerde output komt uit Zwitserland, maar dit land groeit minder snel. Daarmee staat Nederland van deze selectie landen op de **negende plaats**.



1. Onderzoek

In de voorhoede van wetenschappelijk onderzoek speelt Nederland een kleine rol

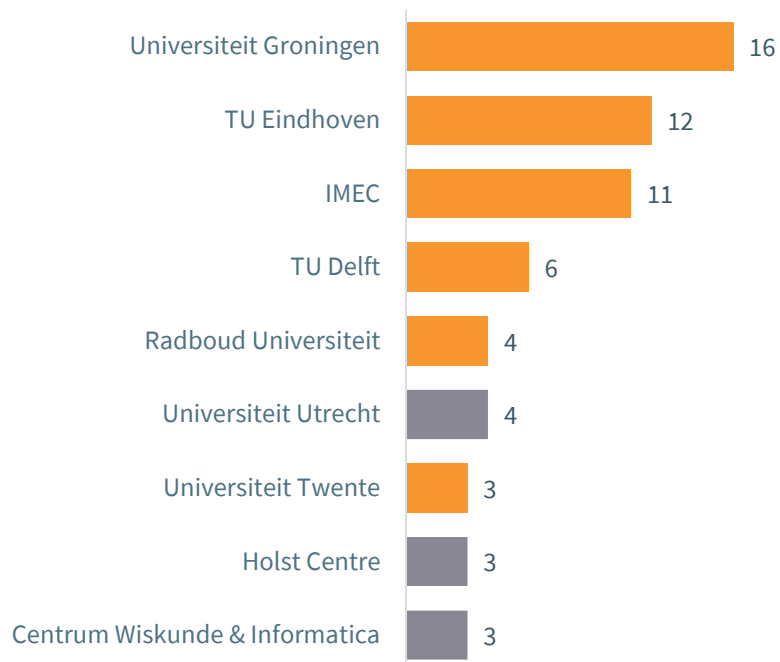
- Nederland schrijft (mee aan) invloedrijke publicaties maar is **in massa hierin niet opgewassen tegen landen als de VS of China**. De top 10 van sterkste instituten komt uit China met o.a. Chinese Academy of Sciences, Shenzhen University en het Institute of Microelectronics. Hier is de wetenschap sterk geconcentreerd.
- In de VS, Duitsland, VK en Italië is de activiteit **meer verspreid over verschillende instellingen**. Ook in Nederland is er geen echt dominante universiteit maar zijn er meerdere instellingen met een eigen focus op neuromorphic technologies.
- Respondenten merken op dat Nederland in de **voorhoede staat als het gaat om materialen, algoritmen en ontwerp van chips**, maar dat andere landen beter zijn in het ontwikkelen van o.a. de bijbehorende software frameworks. De Nederlandse positie wordt volgens respondenten sterker als we deze kennis beter weten te integreren met de bestaande halfgeleiderindustrie.
- Volgens respondenten is er *“in Nederland een actieve community op het terrein van neuromorphic technology, die wel nog beter moet gaan samenwerken.”*



1. Onderzoek

Meerdere concentraties van neuromorphic expertise in Nederland verspreid over instellingen

Instellingen met een concentratie aan neuromorphic technology experts (n=67)



We identificeren 67 experts in Nederland op het gebied van neuromorphic technologies. Deze wetenschappers zijn primair ingenieurs, fysici of computerwetenschappers, met een kleinere rol voor wiskundigen, chemici en biologen. Binnen de universiteiten zijn verschillende groepen actief op het gebied van neuromorphic technologies. Een niet uitputtende selectie van de belangrijkste groepen:

- **Rijksuniversiteit Groningen** - Bernoulli Institute for Mathematics, Computer Science and Artificial Intelligence en het CogniGron center richten zich op Neuromorphic algoritmen.
- **TU Delft** – BioMorphic Intelligence Lab, richt zich op embodied intelligence met neuromorphic hardware in drones & CE-lab richt zich breed op emerging computing.
- **TU Eindhoven** – het Hendrik Casimir Institute richt zich op memristor nanodevices voor edge computing, fotonica voor neuromorphic hardware en bio-geïnspireerde data opslag op basis van DNA.
- **Radboud Universiteit** – het Institute for Molecules and Materials richt zich op materialen en algoritmen die daar bij passen.
- **IMEC** - werkt aan Spiking Neural Network chips en de SENECA architectuur.
- **Universiteit van Twente** – het MESA+ Institute Nanolab en het Center for Brain-Inspired NanoSystems werken brain-inspired chips met een specifieke focus op Neuromorphic Electronics voor energie en duurzaamheid.

Gerelateerd hieraan is Mission 10-X: een structurele samenwerking tussen UTwente, TU/e, Radboud Universiteit en Rijksuniversiteit Groningen voor onderzoek naar allerlei vormen van energie-efficiënte computatie met aandacht voor neuromorphic technologies. Als onderdeel van de sleuteltechnologie call van NWO heeft de Radboud Universiteit financiering binnengehaald voor duurzame neuromorphic computing.

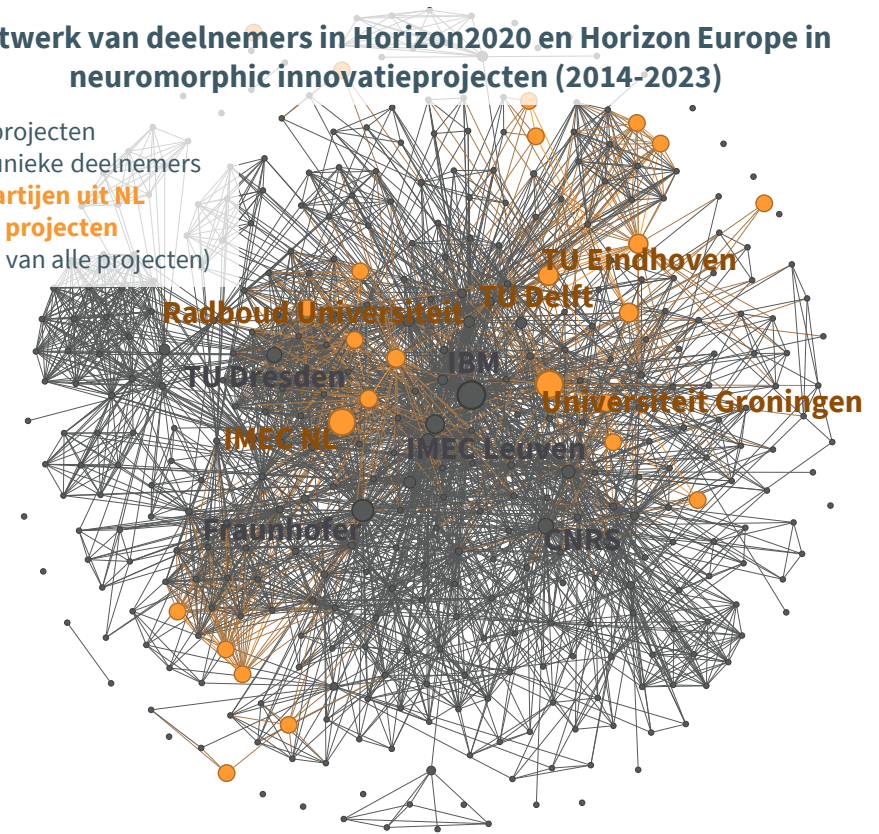
1. Onderzoek

Nederland heeft een centrale positie in het Europese kennisnetwerk door leiderschap universiteiten

- Nederland **heeft een centrale positie in het kennisnetwerk** van neuromorphic tech en is betrokken (geweest) bij ruim 20% van alle projecten.
- Zowel in Nederland als Europa zijn deze netwerken voornamelijk gedreven door kennisinstellingen, die de centrale posities op zich nemen.
- De Nederlandse instellingen die **meerdere projecten coördineren** zijn TU/e (met 4 projecten), RUG (met 2 projecten) en TU Delft (met 2 projecten). De TU/e focust in deze projecten op memristor(circuit)optimalisatie, nieuwe computing paradigma's en energiezuinige system-on-chip ontwerpen. Universiteit Groningen richt zich op kunstmatige neuronen en draadloze neuromorphic implantaten. TU Delft onderzoekt energy-efficiënt computation en neuromorphic architecturen ten behoeve van human-activity-detection.
- De 3 grootste en meest recente Europese projecten met NL spelers (gestart in 2023) zijn onder meer gericht op **energy-efficient computing voor onder andere IoT en AI toepassingen**, integratie van diverse soorten platformtechnologieën en nieuwe computing paradigma's. Hier zijn onder meer de TU/e, Lionix, Single Quantum, TU Delft, en de Universiteit Groningen bij betrokken.

Netwerk van deelnemers in Horizon2020 en Horizon Europe in neuromorphic innovatieprojecten (2014-2023)

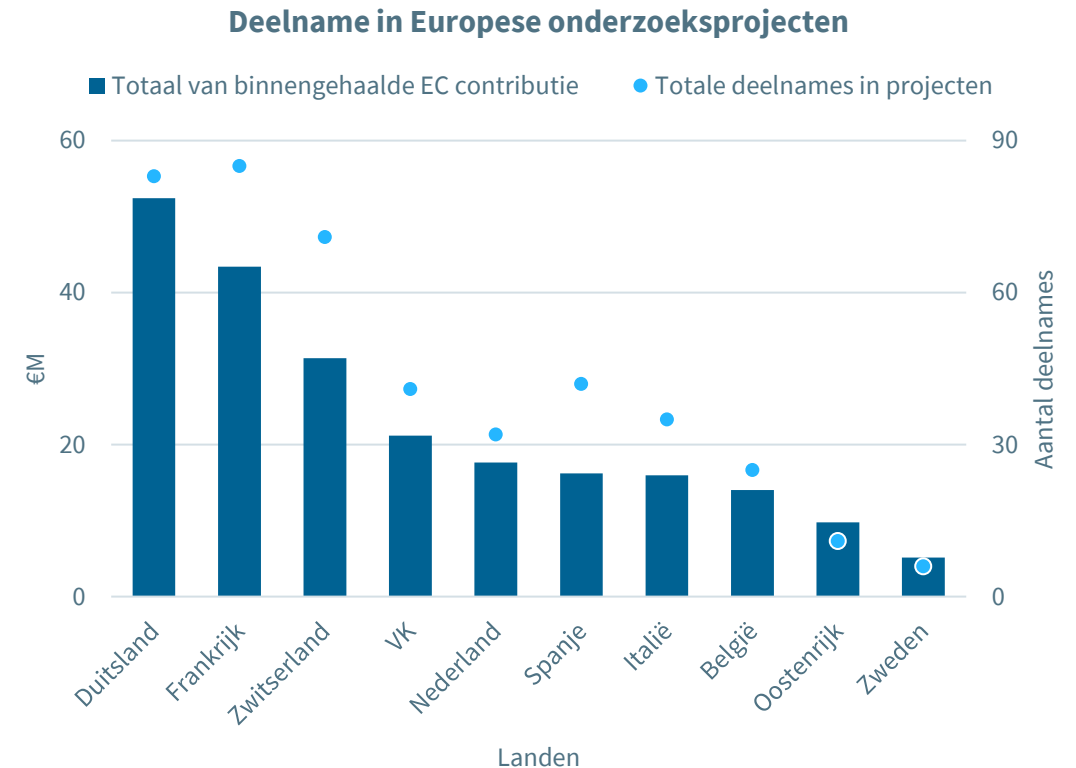
175 projecten
407 unieke deelnemers
25 partijen uit NL
in 36 projecten
(21% van alle projecten)



1. Onderzoek

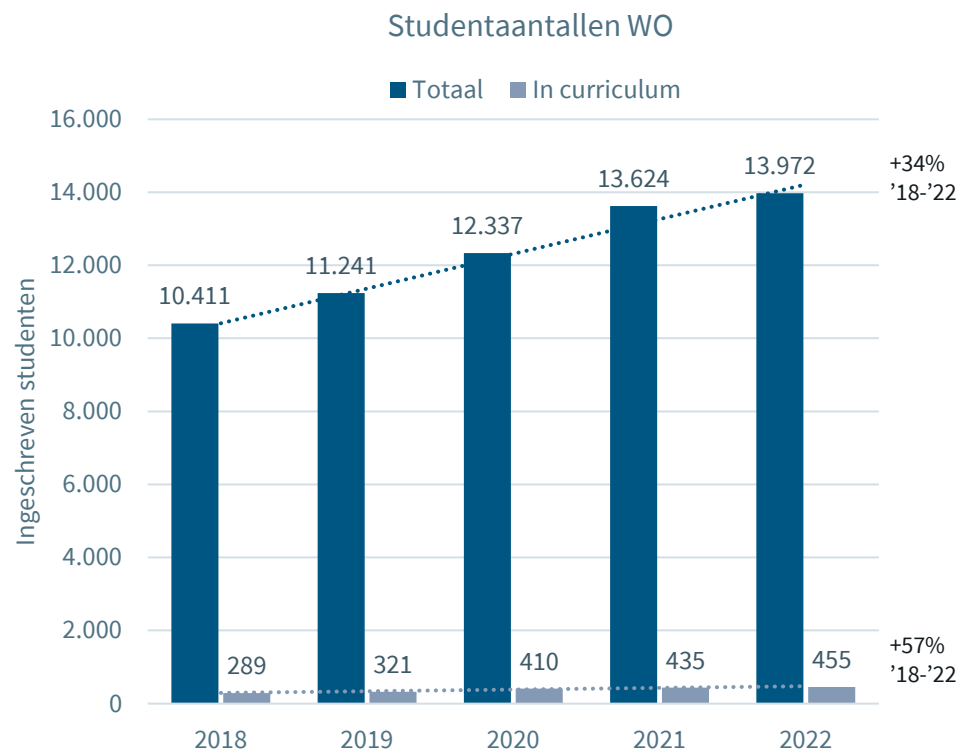
Nederland hoort bij de top 5 Europese spelers die actief zijn in onderzoeksactiviteiten

- Op Europees niveau **begint de neuromorphic technologies gemeenschap zich te organiseren in 2007**, dankzij de CapoCaccia Workshop over Neuromorphic Intelligence. Deze is gericht op het begrijpen van biologische intelligentie principes en het toepassen hiervan in technologie, om zo maatschappelijke impact te creëren.
- Binnen Europa zijn er duidelijke verschillen tussen landen die geïnvesteerd hebben in Europese NMT projecten. Zwitserland, Duitsland, Frankrijk, Verenigd Koninkrijk, Italië, Nederland, Spanje en België zijn sterk betrokken.
- Als we kijken naar de positie van Nederland in Europa, zien we dat **Nederland, na Duitsland, Frankrijk, Zwitserland en het Verenigd Koninkrijk**, de meeste EC contributie binnenhaalt in publiek-private onderzoeksprojecten. Spanje en Italië hebben meer deelgenomen in projecten, maar hebben minder EC contributie binnengehaald.
- Nederland is **goed verbonden met koplopers in Europa** en heeft afgelopen jaren 14 projecten gecoördineerd met publieke en private partijen uit binnen- en buitenland.



2. Onderwijs

Aantal WO-studenten groeit, klein aandeel komt direct in aanraking met neuromorphic technology

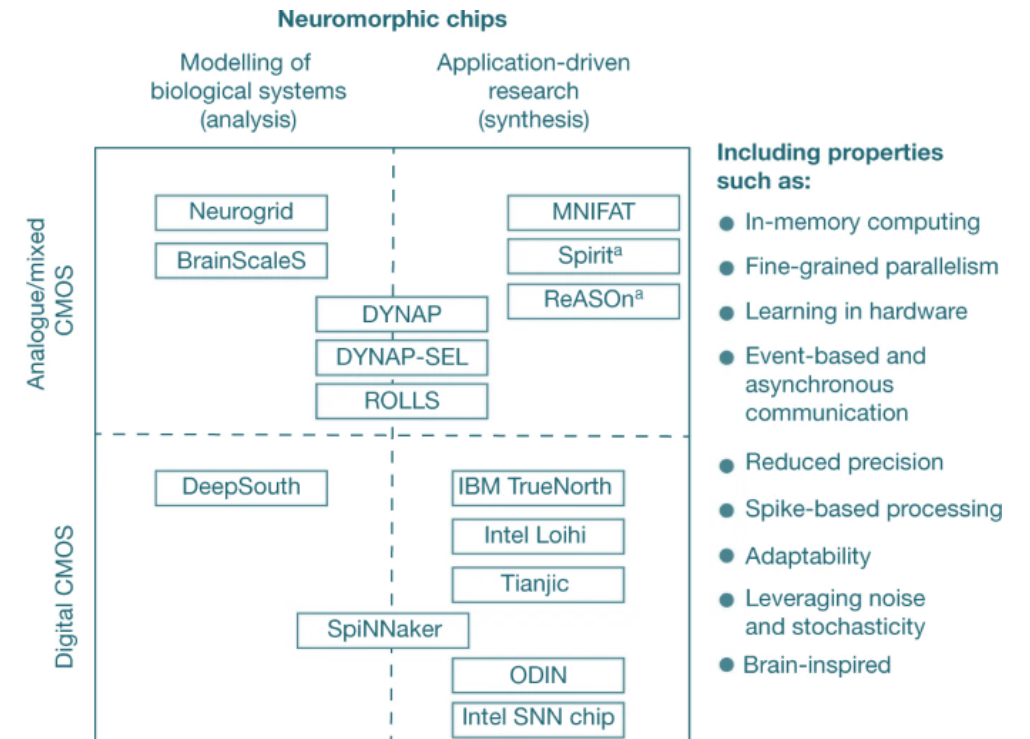


- We maken hier onderscheid naar het totale pakket aan opleidingen dat benodigde kennis verschaft en een subset daarvan waar neuromorphic onderwerpen direct in het curriculum voorkomen. Dit zijn Applied Physics, Artificial Intelligence en Nanoscience op de Rijksuniversiteit Groningen en Artificial Intelligence aan de Radboud Universiteit Nijmegen.
- Er is een stevige stijging van studenten die in aanraking kunnen komen met neuromorphic technologies via de studie. Die **focus ligt vooral aan de kant van software en algoritme**. Met de groeiende populariteit van computerwetenschap, kunstmatige intelligentie en gerelateerde vakgebieden leren studenten steeds meer over bio-geïnspireerde algoritmen zoals deep learning.
- Neuromorphic technologies is als vakgebied nog **te klein voor specialistische opleidingen** rondom dit thema: *“Neuromorphic technology is in de ontwikkeling nog niet ver genoeg om hier daadwerkelijk verschillende vakken (en dus opleidingen) in op te zetten”*. Nieuwe opleidingen die worden opgezet, waarin neuromorphic technologies een component zal zijn, zijn:
 - Brain Sciences – Universiteit van Maastricht
 - Neurotechnology – Radboud Universiteit Nijmegen

3. Toepassing

Markt lijkt veelbelovend maar er zijn nog veel technologische uitdagingen om te overwinnen

- De primaire drijvende kracht om neuromorphic computing te gaan gebruiken is dat de klassieke computer architectuur steeds minder geschikt is voor de huidige computationele behoeften. De samenleving vraagt **steeds meer en steeds complexere berekeningen (met name in AI)** die met klassieke architectuur zeer veel energie zal gaan kosten.
- Naast een aantal inherente voordelen dat neuromorphic architectuur kan bieden voor gespecialiseerde toepassingen als AI, **is de efficiëntieslag in energie de belangrijkste use case**. Dit komt voort uit het gebruik van passieve sensoren, edge computing en efficiëntere berekeningen. Respondenten stellen dat de huidige neuromorphic architectuur nog te kapitaalintensief is om de business case sluitend te maken. Neuromorphic systemen **zijn niet per definitie een vervanging van conventionele computers**. In gevallen waar data ongestructureerd of onvolledig is, waar classificatie nodig is of waar interactie met de cloud minimaal moet zijn, biedt neuromorphic architectuur een mogelijk voordeel.
- De **mondiale markt** van neuromorphic computing wordt door analisten geschat op 47 miljoen USD in 2021 en groeit naar schatting naar tussen de ~9 en ~19 miljard USD in 2030. Dit is een voorspelling die echter helemaal afhangt van nog te maken wetenschappelijke en technische doorbraken. Verschillende partijen werken nu aan neuromorphic chip roadmaps, met elk verschillende ontwerpprincipes (zie illustratie rechts).
- Op Europees niveau wordt gediscussieerd over de neuromorphic computing roadmap, geleid door Zwitserland (met o.a. ETH Zürich, IBM en Intel) en gesteld dat de “killer app” voor het potentieel van neuromorphic computing nog gedemonstreerd moet worden.



Verschillende roadmaps voor neuromorphic chips die nu in ontwikkeling zijn of gebruikt kunnen worden. Er is nog veel variatie in kenmerken en potentiële toepassingen. (illustratief)

3. Toepassing

Toepassingen van neuromorphic technologies zitten overwegend nog in de R&D fase

Toepassing	Perspectief op ontwikkeling met neuromorphic technologie	Technologische uitdagingen	Verwachting tijdlijn	Topsector relevantie
“Event-based” camera’s	Neuromorphic sensoren die alleen energie verbruiken als er verandering optreedt in het blikveld worden steeds meer gebruikt.	Ontwerpen van efficiëntere data transfer uit de sensor en betere processing algoritmen op neuromorphic architectuur.	Eerste gebruik vindt nu plaats	HTSM, Logistiek, Water & Maritiem
Chemische detectie	Met een combinatie van sensoren en algoritmen die goed omgaan met ruis kunnen betere ‘reuksensoren’ gemaakt worden.	Verbeteren van algoritmen en interactie met de hardware.	>2025	Chemie, Water & Maritiem, LSH
Geluidssensoren	Sensoren die alleen energie verbruiken als geluid een bepaalde grens of frequentie overschrijdt, gecombineerd met taalherkenning.	Samenspel van begrip over gehoor, verwerken van signalen en machine learning.	>2025	Creatieve industrie, LSH
Robotica	Neuromorphic technologie kan robots betere dynamische sensoren en controlemechanismen bieden en meer zelflerend maken.	Vertaling van neuromorphic control systemen naar fysieke robots, complexiteit van onderdelen, flexibele elektronica.	>2030	HTSM, Logistiek
Zelfrijdende auto’s	Hoger niveau perceptie aan zelfrijdende auto’s door een combinatie van “event-based” sensoren en neuromorphic (edge) processing	Verbeteren van huidige sensor kwaliteit en modellen.	>2030-2035	Logistiek
EMG wearables	Directe interface met neuronen die spieren aansturen op basis van Elektromyografie (EMG) signalen en lage energie verwerking hiervan.	Hardware progressie nodig om prothesen met deze technologie vanuit klinische toepassingen naar het dagelijks leven te brengen.	>2030-2035	LSH
“Cobots” & Multi-agent systems	Robots die samenwerken met mensen kunnen neuromorphic technologie gebruiken voor precisie en aanpassingsvermogen.	Betere planning van taken, coöperatieve controle over systemen, hogere fout-tolerantie en zelflerend vermogen.	>2035	Tuinbouw, Agrifood, HTSM, Logistiek

Niet uitputtend: De kansen zijn zeer breed. Van medische toepassingen via brain-computer interfaces, allerlei vormen van AI recognition (spraak, beeld, patronen), autonome navigatie in drones en allerlei voertuigen of robots en verbeteringen in andere deep learning en Internet of Things. Daarmee is de technologie in de toekomst voor alle topsectoren relevant. Op basis van een eerste inschatting geven we hier weer in welke topsectoren grote kansen liggen.

3. Toepassing

Bedrijven in de Verenigde Staten en China zijn koplopers op het gebied van neuromorphic hardware

- **Verenigde Staten, China** en Europese landen zoals **Zwitserland** en **Duitsland** worden vaak beschouwd als koplopers in de ontwikkeling en toepassing van neuromorphic computing.
- In de Verenigde Staten spelen **technologiebedrijven** een cruciale rol. Partijen als Intel, Qualcomm en Apple investeren hevig in de ontwikkeling van hardware. In China investeert de **overheid** aanzienlijk in onderzoek en ontwikkeling. Hier is Huawei een grote speler op het gebied van hardware.
- Qua kennis en bedrijvigheid in Europa wordt Zwitserland vaak genoemd, en tevens gezien als **bakermat** van de technologie. IBM doet hier haar onderzoek.
- In Nederland komt interesse van bedrijven als ASM, ASML, NXP en Thales. Zij investeren zelf nog weinig in R&D maar zien **“een noodzaak dat de eerste productie van chips op gang komt, zodat er meer op kan worden doorontwikkeld en de toepassingenkant overtuigender wordt.”**

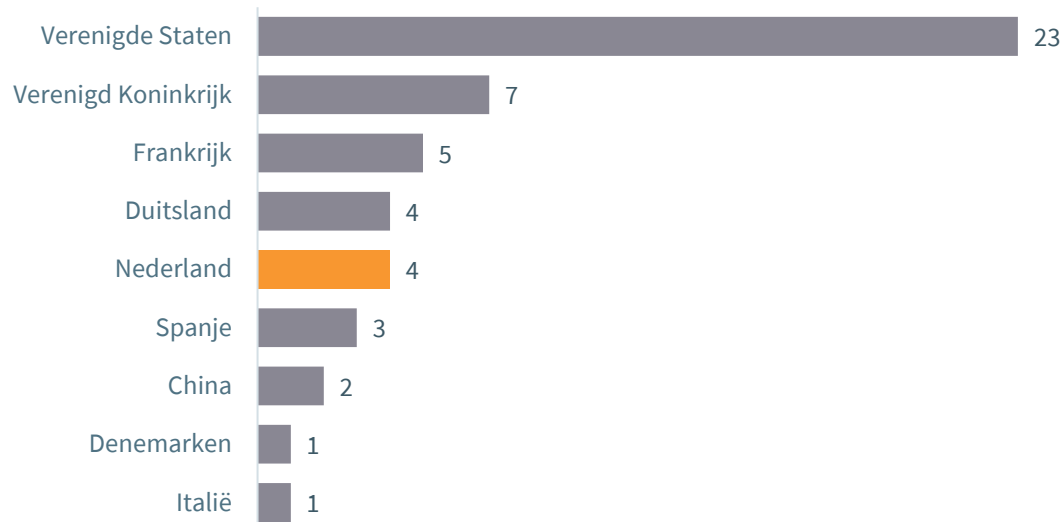


3. Toepassing

De startupsector staat in de beginfase, Nederland is relatief gezien goed vertegenwoordigd

- Startups richten zich voornamelijk op de life science kant en de sensor gerelateerde applicaties van neuromorphic technologies. Het zijn primair deep tech startups met complexe technologie en lange verwachte ontwikkeltijden.

Aantal neuromorphic gerelateerde startups wereldwijd



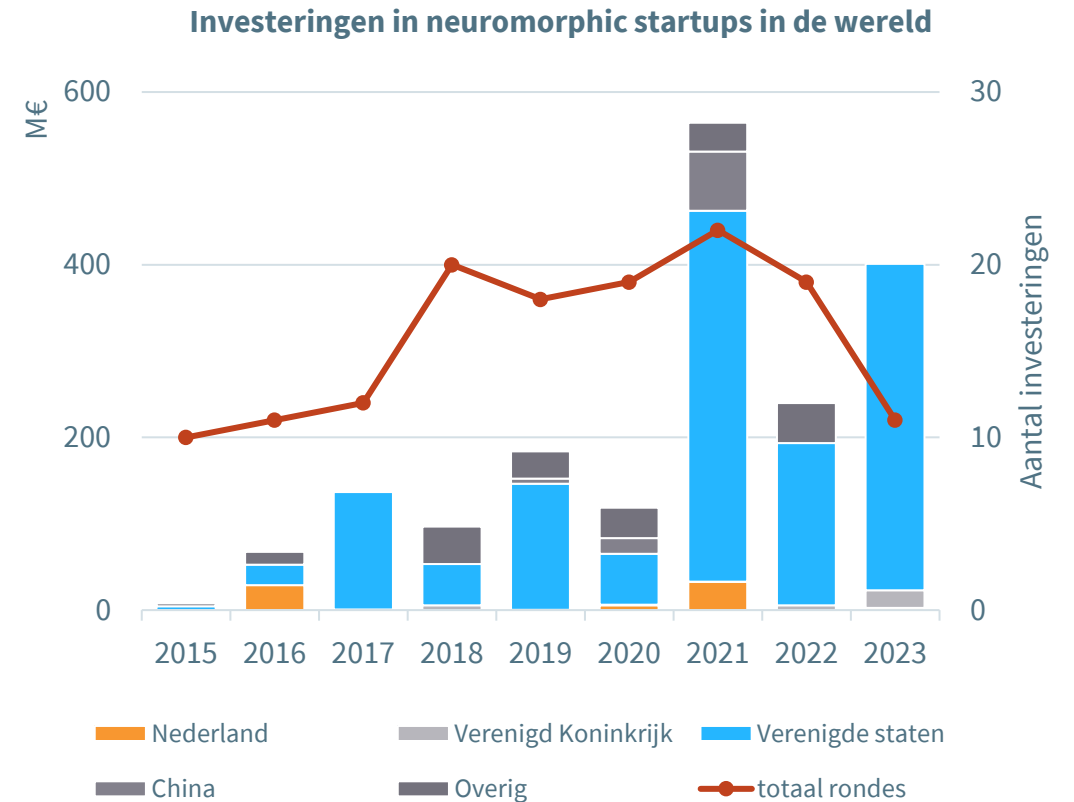
- Onward**; ontwikkelt innovatieve therapieën, waaronder ARC Therapy™, gericht op het herstellen van beweging en functies bij mensen met een ruggenmergletsel. De therapieën omvatten zowel externe, niet-invasieve (ARCEX) als implanteerbare (ARCIM) platforms.
- Innatera** ontwikkelt neuromorphic processors die de hersenmechanismen nabootsen voor efficiënte patroonherkenning in sensorische gegevens. Met hogere prestaties per watt, laag energieverbruik en eenvoudige programmeerbaarheid.
- Zander Labs** – verbetert mens-computerinteractie door het onderbewuste brein te benutten met SAMANAI, een passief Brain-Computer Interface (BCI) systeem. Werken aan implementatie voor o.a. Airbus, Volkswagen en Microsoft TLAB. (van origine Duits)
- Ourobionics** maakt gebruik van technologie om menselijke weefsels cyborgisch te transformeren, waardoor geavanceerde structuren met biosensoren ontstaan die real-time informatie verstrekken over fysiologische processen.



3. Toepassing

Grootste deel van de investeringen in VS, in Nederland voornamelijk geïnvesteerd in gezondheidszorg

- De Verenigde Staten nemen de leiding in de totale investeringen en zijn historisch gezien in elk jaar het land waarin neuromorphic startups de meeste investeringen binnenhalen.
- De meest substantiële investeringen in Nederlandse startups vonden plaats in 2016 en 2021, waarbij respectievelijk 28,6 miljoen euro en 33 miljoen euro werd geïnvesteerd in met name medische apparaten. **Het overgrote deel van deze investeringen ging naar Onward**, met bedragen van 26 miljoen euro in 2016 en 30 miljoen euro in 2021.
- Het aantal investeringsrondes nam in 2018 scherp toe en piekt in 2021. het aantal rondes middelt daarna weer uit naar het gemiddelde ingezet sinds 2018. Daarmee volgen de investeringen in neuromorphic technologies de algemeen trend van durfkapitaal, tot 2023, waar een significante stijging van investeringen waar te nemen is in de VS.

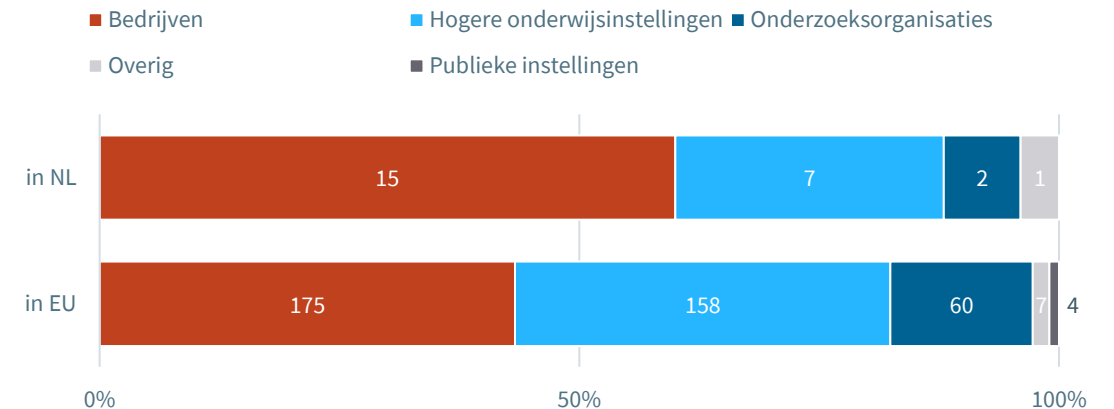


3. Toepassing

Private bijdragen komen meer op gang, Nederland laat activiteit zien en heeft gerelateerde kansen

- Er zijn in de afgelopen Europese samenwerkingen tenminste 15 bedrijven geweest met een bijdrage in R&D netwerken. Van de bedrijven die hebben meegedaan aan Europese publiek-private samenwerkingen, hebben alleen Grai Matter Labs en Philips (zie tabel) in meer dan één project meegedaan.
- Belangrijkste publiek private samenwerking is op dit moment **NL-ECO** (34 partijen). Dit programma valt onder de NWA-ORC vlag. Geleid door de UTwente brengt het partners bijeen rond neuromorphic technologie, met niet alleen Europese kennisinstellingen maar ook fotonica bedrijven als LioniX en SMART en grote bedrijven als ASML, IBM, Toyota en Thales.
- **PhotonDelta**: neuromorphic technologie is ook gerelateerd aan fotonica vanwege het belang van energiebesparing voor Photonic Integrated Circuits (PICs). Dit programma heeft 471 miljoen gekregen van het Nationaal Groeifonds.
- Het netwerk en de agenda van **Computational Science NL** zou voor het doorontwikkelen van use cases relevant kunnen zijn.
- Samenwerking met de **Nederlandse AI Coalitie** ligt voor de hand bij het onderzoeken van de potentiële toepassingen rond AI.

Unieke deelnemers betrokken in NMT projecten naar type



Nederlands bedrijf	Focus	Deelnames
GrAI Matter Labs (deels Frans)	Neuromorphic hardware en het bouwen van hardware/software platforms	2
Philips (Electronics & Medical Systems)	Neuromorphic hardware en uitbreiden van roadmap voor neuromorphic implementaties	2



Technologie in perspectief

Afwegingskader

Zes dimensies om nieuwe sleuteltechnologieën op te beoordelen

1. Potentie voor maatschappelijke impact

- Verwachte bijdrage aan de missies voor maatschappelijke uitdagingen.

2. De kans op economische impact

- Verwachte groei van de technologie, adoptie in het Nederlands bedrijfsleven en het aandeel van Nederland in ondernemerschap.

3. De relatieve positie van Nederland in de EU-12 en in de wereld

- De kennisbasis van Nederland in vergelijking tot andere landen en het strategisch belang van die kennisbasis.

4. Krachtenbundeling

- Onderzoekssamenwerkingen in Nederland en positie in samenwerkingen in Europa.

5. Potentie voor meerjarige samenwerking over de gehele keten

- Betrokkenheid van bedrijven en overheden bij onderzoekssamenwerkingen.

6. Doorsnijdend karakter

- Interdisciplinariteit en integratie met andere sleuteltechnologieën van het kennisveld.

1. De kans op maatschappelijke impact

Energie-efficiënte en decentrale eigenschappen van neuromorphic technologies dragen bij aan missies



Neuromorphic technologie heeft de potentie om bij te dragen aan verschillende maatschappelijke uitdagingen en missies.

- Door deze **energie-efficiënte** en decentrale manier van computing gaan andere sleuteltechnologieën zoals AI veel minder energie kosten.
- In de **landbouw** kan het gebruikt worden om grondstoffengebruik en productieprocessen te optimaliseren.
- In de **gezondheidszorg** kunnen neuromorphic toepassingen gebruikt voor patiënten met een chronische ziekte of beperking, in de vorm van protheses en ondersteunende apparaten. Daarnaast kan het bijdragen aan hersenonderzoek.
- Deze tech kan bijdragen aan (digitale) **veiligheid**, met betere sensoren en robotica en doordat meer data in ‘the edge’ verwerkt wordt.

Klimaat en energie	Landbouw, water en voedsel	Gezondheid en zorg	Veiligheid
Verminderen broeikasgasuitstoot door energy-efficiënt computing.	Verminderen grond- en hulpstoffen door betere AI en IoT voor precisielandbouw.	5 jaar langere levensverwachting.	Integrale aanpak voor georganiseerde ondermijnde criminaliteit
CO2-vrij elektriciteitssysteem door energiezuinige slimme energiesystemen.	Klimaatneutraal Landbouwsysteem door efficiëntere sensoren en robotica.	Wearables en protheses kunnen zorgen voor een afname van ziektelast .	Meer edge-computing (i.p.v. cloud) kan cyberveiligheid verhogen.
<i>CO2-vrije gebouwde omgeving</i>	<i>Klimaatbestendigheid</i>	Wearable healthcare en goede voice assistance bieden zorg in eigen leefomgeving .	Veiligheid in en vanuit de ruimte door het verminderen van benodigde energie en transmissiecapaciteit.
Klimaatneutrale industrie door digitalisering en optimalisatie met o.a. edge computing en robotica.	<i>Duurzaam voedsel en eerlijke voedselketens</i>	Wearable healthcare en betere protheses verbeteren participatie met een chronische ziekte of beperking .	Maritieme hightech voor een veilige zee door slimmere maritieme industrie en toepassingen in autonoom varen.
Emissieloze mobiliteit door verminderen energieverbruik en bijdrage smart mobility.	<i>Balans tussen ecologie en economie</i>	<i>Verbeterde kwaliteit van leven van mensen met dementie</i>	Informatiegestuurd optreden en high-performance materialen dankzij NMT dragen bij aan hightech landoptreden .
<i>Circulaire economie</i>	<i>Best leefbare delta ter wereld</i>		
Heeft directe invloed op het bereiken van missies.	Is ondersteunend voor het bereiken van missies.	Geen directe bijdrage	

2. De kans op economische impact

Markt lijkt veelbelovend als er technische doorbraken gerealiseerd worden in R&D



Dimensie	Conclusie	
Wereldwijde marktpotentie	De huidige markt is nu nog klein, maar wordt in 2030 geschat op 9-19 miljard USD wereldwijd.	
Potentie voor Nederlandse sectoren	We zien in vrijwel elke topsector mogelijke toepassingen voor de technologie.	
Gebruik en investering door grote bedrijven	Er is potentie (in e.g. halfgeleiders), maar het vergt grote voorinvesteringen om huidige systemen te veranderen.	
Gebruik door mkb	Technologie staat nog niet op de radar van mkb bedrijven.	
Startup activiteit	Nederland heeft een kleine groep startups, maar wel relevant aandeel in de wereld.	
Startup investeringen	Nederland blijft achter op investeringen.	

- Neuromorphic sensoren, chips, architecturen en algoritmen kunnen naar verwachting in de volle breedte van de economie tot impact leiden, door hun mogelijke integratie met al bestaande platformtechnologieën zoals Internet of Things en kunstmatige intelligentie.
- De technologie zit nog in een vroege fase van ontwikkeling, wat de onzekerheid voor deze applicaties vergroot. Er zijn nog eigenschappen die verbeterd moeten worden aan neuromorphic systemen zelf en de manier waarop deze geïntegreerd worden met bestaande systemen.
- Door deze vroege fase en complexiteit bij integratie is er op dit moment vaak nog geen business case. De investeringen die nog nodig zijn in het ontwerpen, testen en implementeren van nieuwe hardware wegen nog niet op tegen de potentiële efficiëntiewinst.

3. De relatieve positie van Nederland in de EU-12 en in de wereld


Nederland is qua kennis kwalitatief sterk maar loopt het risico om snel ingehaald te worden

- Neuromorphic technologie is een snel groeiend kennisveld, met een groei in aantal publicaties van ~150% tussen 2018 en 2023. Die massale groei wordt gedreven door China, andere grote landen zoals de VS en Duitsland kunnen dit tempo maar moeilijk kunnen bijhouden.
- Nederland heeft een relatief groot aandeel publicaties en maakte ondanks de kleine massa een hogere procentuele groei door dan China. Op Europees niveau neemt Nederland relatief vaak deel in samenwerkingsprojecten.
- Respondenten kenmerken het Nederlandse onderzoek als kwalitatief hoogstaand maar onderkennen dat we die positie niet over de hele keten van neuromorphic technologies kunnen vasthouden.
- Door de integrale benadering die nodig is bij het maken van neuromorphic technologie (van hardware tot software en interactie in de architectuur) is er een grote mogelijke afhankelijkheid van andere landen bij de ontwikkeling.

Dimensie	Conclusie	
Wetenschappelijke kwaliteit	Nederland heeft een aantal niches waar het sterk in is, maar geen duidelijke voorsprong ten opzichte van de wereld.	
Internationale ranking	Nederland is relatief veel betrokken bij kennisontwikkeling en dit groeit snel, maar het verschil in massa met andere landen in output van kennis is groot.	
Technologische kennis van strategisch belang	Analoog aan de halfgeleider waardeketen kunnen neuromorphic technologies belangrijk worden voor strategische autonomie, met name gekoppeld aan AI toepassingen.	

4. Krachtenbundeling

Binnen Nederland en Europa zijn er sterke samenwerkingsverbanden opgebouwd, er is meer potentie




Dimensie	Conclusie
Samenwerking met ander nationaal onderzoek	Er zijn een aantal structurele samenwerkingen, maar respondenten vinden dat dit naar een hoger niveau kan worden getild. 
Samenwerking met internationaal onderzoek	Nederland heeft een centrale positie in Europees onderzoek met zowel kennisinstellingen als industrie. 
Aansluiting op regionale innovatie strategieën	Neuromorphic technologies zijn nog in een te vroege fase van ontwikkeling om in regionale strategieën te verschijnen. 

- Neuromorphic technologies onderzoek is geconcentreerd bij een aantal universiteiten en instellingen. Deze werken nu al samen in verschillende Nederlandse en Europese programma's (e.g. Mission 10-X, NL-ECO). Deze samenwerking kan nog intensiever worden gemaakt volgens respondenten.
- Deze samenwerkingen zijn voornamelijk nog naar binnen gericht. Naarmate de technologie volwassen wordt, zullen er kansen ontstaan om te gaan samenwerken met andere velden (e.g. fotonica en AI).

5. Potentie voor meerjarige samenwerking over de gehele keten

Technologieën in vroege fase van ontwikkeling zorgen voor een door kennis gedreven ecosysteem



- Neuromorphic technologies zijn nog veelal in een ‘technology push’ fase die wordt geleid door kennisinstellingen en soms wordt gematcht door R&D intensieve bedrijven. Er is een lagere betrokkenheid van corporates en MKB in Nederland en Europa, met uitzondering van hightech producenten die nu al verkennend onderzoek doen.
- Er is nog geen consensus over de nationale roadmap(s) van neuromorphic technologies, zoals die er wel rond andere sleuteltechnologieën is. Door de breedte van de potentiële use cases, die verschillende eisen hebben aan de technologie, is dit een complexe opgave. Op Europees niveau zijn hiervoor de eerste projecten en programma’s op gang met betrokkenheid van private partijen als IBM en Intel, daar is een kans voor samenwerking.

Dimensie	Conclusie
Publiek private samenwerking	Is nog niet grootschalig binnen Nederland, maar Nederlandse halfgeleider industrie biedt mogelijkheden. 
Leiderschap	Wetenschappers spreken zich wel uit over de ontwikkelrichting van componenten, maar er is nog geen leidende agendavorming in Nederland. 
Valorisatie	Met de betrokkenheid van partijen als IMEC en TNO kan er steeds meer gekeken worden naar valorisatiekansen. 

6. Doorsnijdend karakter

Neuromorphic technologies vereisen samenwerking tussen vele vakgebieden

- Neuromorphic technologies hebben een zeer interdisciplinair karakter. De Nederlandse wetenschappers zijn primair ingenieurs, fysici of computerwetenschappers, met een kleinere rol voor wiskundigen, chemici en biologen. Fysici, chemici en ingenieurs werken aan nieuwe materialen en vormen van transistoren en chips, in samenwerking met computerwetenschappers en biologen die bio-geïnspireerde architectuur en algoritmen ontwerpen.
- Op de lange termijn ziet men ook benodigde samenwerkingen met wetenschappers en ontwikkelaars van andere computer architecturen (klassiek, quantum) omdat neuromorphic technologies ook met deze architecturen moeten gaan samenwerken en integreren.

Dimensie	Conclusie
Snijvlakken met andere technologie en toepassingen	Neuromorphic technologies kunnen een onderdeel worden van een breed palet aan (digitale) systemen. 
Diversiteit van disciplines	Alhoewel geïnspireerd op biologische ideeën wordt de bulk van het werk in Nederland gedaan door computerwetenschappers en materiaalkundigen. 



Aanbevelingen

Aanbevelingen

Neuromorphic technologies zijn deep tech waar Nederland een wereldwijde positie in kan pakken

Er zijn drie hoofdredenen om als Topsector ICT mee te sturen op de ontwikkeling van neuromorphic technologies:

1. Deze technologieën hebben een hoge maatschappelijke relevantie. In de breedte van de Nederlandse missies dragen ze bij aan een vermindering van energieverbruik met behoud of vergroting van de vereiste computationele complexiteit.
2. Deze technologie vergt een integrale aanpak die (nog) niet aan de markt overgelaten kan worden. Alle schakels van de keten die nodig is bij het ontwikkelen van neuromorphic architectuur van hardware tot algoritmen zijn cruciaal in het succes van de technologie en dit moet gecoördineerd worden om tot het best mogelijke resultaat te leiden.
3. Net als bij reguliere halfgeleiders en quantumtechnologie kunnen neuromorphic technologies een belangrijke rol spelen in de strategische autonomie. Als neuromorphic chips steeds belangrijker worden in onze computerarchitectuur heeft Nederland met haar kennispositie en rol in de halfgeleider industrie een belangrijke rol te spelen in de Europese Unie.



Het huidige veld is gebaat bij een gezamenlijke agenda en roadmap, op tenminste Europees niveau gevoed door wetenschap en industrie, met een duidelijke positionering voor Nederland.



Versterking van de R&D positie van Nederland door het stimuleren en coördineren van meer (interdisciplinaire) samenwerking. De belangrijkste focus daarbinnen is ketenintegratie voor het maken van nieuwe hardware-software combinaties.



Versterken van valorisatie door sectorgericht te gaan samenwerken (met andere topsectoren) om applicaties te testen. Er is een “kennismakelaar” nodig in het ecosysteem die vragen uit sectoren verbindt aan R&D.

Bijlagen

Methode

Open Alex

Open Alex is een openbare dataset die meer dan 250 miljoen wetenschappelijke werken uit 250.000 bronnen indexeert. Het koppelt deze werken aan 90 miljoen auteurs en 100.000 instellingen, en verrijkt ze met onderwerpinformatie, SDG's, citatietellingen en meer.

- Binnen Open Alex zoeken we op basis van keywords of concepten. Met keywords zoeken we in de titel en abstract van wetenschappelijke publicaties om te selecteren. Met concepten maken we gebruik van labels die Open Alex zelf heeft toegekend naar aanleiding van een tekstanalyse van artikelen. Alle artikelen binnen Open Alex zijn voorzien van tenminste 1 concept.
- De geselecteerde publicaties verfijnen we door te filteren op jaartal en op land van de gerelateerde instelling van de publicatie om tellingen per land te realiseren.

Op basis hiervan positioneren we Nederland in termen van wetenschappelijke output.

Global campus

Global Campus biedt een geavanceerde zoekfunctionaliteit met behulp van AI om academische experts te identificeren. Het platform gebruikt data van OpenAlex en matches worden gebaseerd op de relevantie van de inhoud in plaats van op bibliometrische factoren. Om experts te identificeren op het gebied van neuromorphic technologies zijn als afbakening de definities hieronder gebruikt, gefilterd voor Nederland en tenminste 5 relevante publicaties gekoppeld aan een expert. Op basis van deze gevonden experts en hun publicaties geven we kwalitatieve invulling aan de expertisegebieden van de Nederlandse instellingen.

Afbakening

Neuromorphic engineering: *Neuromorphic computing is an approach to computing that is inspired by the structure and function of the human brain. A neuromorphic computer or chip is any device that uses physical artificial neurons to do computations.*

Neuromorphic materials: *various materials have been introduced for the development of neuromorphic devices to build a ferroelectric, electrochemical or charge-trapping transistor, with phase changing memories (PCM) or ferroelectric tunnel junctions (FTJ).*

Neuromorphic hardware: *The implementation of neuromorphic computing on the hardware level can be realized by oxide-based memristors, spintronic memories, threshold switches, transistors, among others.*

Neuromorphic algorithms: *Programming a neuromorphic computer entails creating a spiking neural network. Algorithms for neuromorphic implementations entail how to define an SNN for a given application.*

Methode

Neuromorphic technologies als curriculumonderdeel bij vier WO-opleidingen

- Twee methodes zijn toegepast om een ruwe inschatting te maken van het aantal studenten wat in aanraking komt met en/of tot een toekomstige doelgroep behoort omtrent Neuromorphic technologies:
 - Achterhalen van opleidingen waarin deze technologieën een component zijn door middel van passende **zoektermen**: e.g. opleidingen met Neuromorphic Computing als keuzevak in curriculum: Groningen (Applied Physics, Artificial Intelligence, Nanoscience), Nijmegen (Artificial Intelligence).
 - Achterhalen welke opleidingen aansluiting hebben tot de technologieën door middel van het doorspitten van **scriptiebanken** van (technische) universiteiten
- Deze zoektocht geeft het overzicht aan relevante WO-opleidingen in de tabel. Voor relevante HBO-opleidingen is er een doorvertaling gemaakt vanuit de geselecteerde WO-opleidingen, naast deskresearch. Wij zien nog geen signalen dat de technologie nu al een rol speelt in deze opleidingen.

	Geselecteerde opleidingen
WO	Opleidingen met onderwerp in curriculum: Applied Physics, Artificial Intelligence en Nanoscience van Rijksuniversiteit Groningen, Artificial Intelligence van Radboud Universiteit Nijmegen Overige: Mechanical Engineering, Electrical Engineering, Computer Engineering, Aerospace Engineering, Cognitive Neuroscience, Applied Physics, Artificial Intelligence, Chemistry, Nanoscience, Computer Science
HBO	Robotica, Chemie, Engineering, Chemische Technologie, Embedded Systems Engineering, Civiele Techniek, Engineering Systems, Applied Nanotechnology, Robotics Systems Engineering, Next Level Engineering

Methode

CORDIS

Ter indicatie van activiteiten in publiek private samenwerkingen in onderzoeksprojecten binnen Europa is gebruik gemaakt van CORDIS. Deze database bevat **alle onderzoeksprojecten die zijn gehonoreerd** in het Europese Horizon 2020 programma en het Horizon Europe programma vanaf 2014. en wordt beheerd door de Europese Commissie.

- Deze data is doorzoekbaar op trefwoorden in de projectdoelen. Voor neuromorphic technologies is gezocht op de volgende termen: “neuromorphic, artificial synaps/neuron, memristor, brain-machine interface en spiking neural network” . Op basis daarvan selecteren we projecten en daarbij behorende kenmerken van organisaties, financiering en netwerk.
- Voor de netwerkanalyse maken we gebruik van “betweenness centrality” om de positie van organisaties te beoordelen. Deze maat meet het aantal keer dat een knooppunt op het kortste pad ligt tussen andere knooppunten en meet daarmee in hoeverre een organisatie een ‘brug’ is tussen delen van het netwerk.
- De data heeft ook bepaalde beperkingen. De sterke focus van grote Europese onderzoeksprojecten op grote consortia leidt tot een bias naar grotere organisaties die slagkracht hebben om de bureaucratie van een aanvraag te doorlopen. Daarnaast zijn kennis- en onderzoeksinstellingen sterk vertegenwoordigd. Dit betekent dat de data mogelijk een ondervertegenwoordiging vertoont van kleinere (nationale) samenwerkingen.

Dealroom

Dealroom is een internationale startup database die wereldwijd sinds 2010 ~370.000 startups heeft geverifieerd en **in Nederland ongeveer 10.400 startups volgt**. Van deze startups zijn allerlei kenmerken op te vragen, waaronder bijbehorende rondes investeringen.

- Binnen Dealroom maken we gebruik van de door de beheerder gegenereerde ‘tags’ om bedrijven te vinden. Voor dit onderzoek gebruikten we de tags “neuromorphic chips and processors” en “brain computer interfaces”.
- Dit resulteert in een lijst van 50 startup profielen wereldwijd die we vervolgens handmatig hebben geverifieerd.

Respondenten interviews

Lijst geïnterviewde personen

Naam	Functie	Organisatie
Berry Vetjes	Directeur digitale innovatie	TNO
Hans Hilgenkamp	Professor	Universiteit Twente / Mission 10-X
Sander Bohte	Professor	CWI
Elisabetta Chicca	Professor	Rijksuniversiteit Groningen
Johan Mentink	Assistant professor	Radboud Universiteit
Sagar Dolas	Programmamanager	SURF
Yoeri van de Burgt	Associate Professor	TU Eindhoven
Chang Gao	Associate Professor	TU Delft
Ali Osman Ors	Global Director	NXP
Nuria Barcelo Peiro	Programme manager	NXP
Said Hamdioui	Professor	TU Delft
Yvette Tuin	Afdelingshoofd High Tech Systems	NWO
Paul Blank	Program Officer ICT	NWO

Colofon

Versie: 25-01-2024 (definitief).

Auteurs: Serina Contente, Tom Greenhead, Myrthe Maas & Bas van der Starre (bas.vanderstarre@birch.nl)

Onder begeleiding van **Topsector ICT:** Frits Grotenhuis, Jasper Renema & Inald Lagendijk