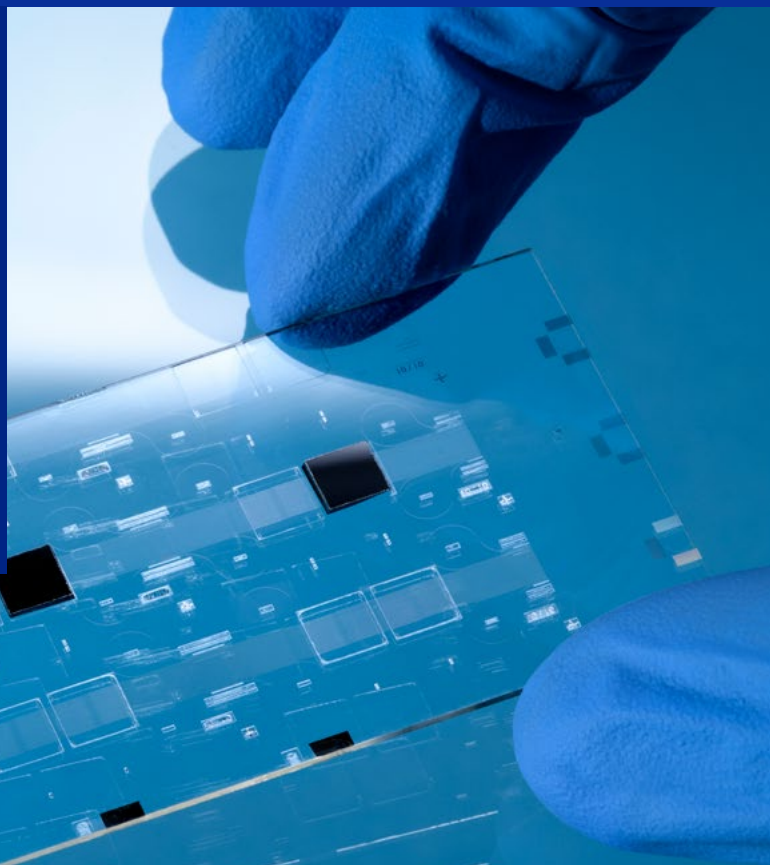


Verder kijken dan printplaten en chips

De onzichtbare revolutie in elektronica en de kansen voor Europa

- De groeiende vraag naar AI en rekenkracht biedt een kans om een overstap te maken van traditionele, chipgerichte architecturen naar sterk geïntegreerde, systeemgerichte oplossingen.
- Het beheersen van de convergentie van *advanced chip packaging*, geïntegreerde fotonica en nieuwe printplaattechnieken is de sleutel tot het ontsluiten van deze volgende generatie elektronische systemen.
- Door de industriële opschaling van deze technologieën te versnellen, kan Europa cruciale controlepunten veiligstellen en het voortouw nemen bij de ontwikkeling van toekomstbestendige AI-infrastructuur.



Nu de strategische controle in de elektronicasector verschuift, moeten Europa en Nederland evolueren van een chipgerichte industriepolitiek naar een systeemgerichte strategie. Dit is geen beleidsvoorkeur, maar een technische noodzaak: AI-workloads duwen elektrische verbindingen naar hun grenzen, waardoor de systeemcomplexiteit zich verplaatst van printplaten naar nauw geïntegreerde architecturen. Dit document richt zich op drie samenkomende antwoorden op deze ontwikkeling: *advanced chip packaging*, geïntegreerde fotonica en nieuwe printplaattechnieken ('*Beyond PCB*'-technologieën), en op de industriële routekaart die nodig is om Europa's toekomstige positie veilig te stellen. Het document behandelt drie stappen: het identificeren van de architectonische druk als gevolg van AI, energie en schaalvergroting; het laten zien hoe deze druk zich concentreert in nieuwe integratielagen; en het uitleggen waarom deze lagen de volgende strategische *control points* van Europa vormen.

Tegen 2035 zal de vooruitgang in elektronica niet langer primair worden bepaald door het toevoegen van meer verbonden apparaten, maar door de ontwikkeling tot een onzichtbare, intelligente laag die in de gehele fysieke wereld is ingebed. De snelle opkomst van AI versnelt deze verschuiving: waarneming, rekenkracht en besluitvorming worden steeds meer verdeeld over machines, infrastructuren en omgevingen, die continu en vaak autonoom opereren. Deze opkomende, door AI aangedreven elektronicalaag is voor gebruikers niet direct zichtbaar, maar is essentieel voor het functioneren van de samenleving doordat zij realtime interactie tussen de digitale en fysieke wereld mogelijk maakt op een ongekennde schaal.

Historisch gezien volgden grote infrastructuurrevoluties een vergelijkbaar patroon. Elektriciteit werd pas echt transformerend toen zij verdween in muren en machines, niet langer ervaren als een noviteit maar als een basisvoorwaarde voor het moderne leven. Digitale connectiviteit volgde hetzelfde pad en verdween naar de achtergrond als een permanent beschikbare dienst. Richting 2035 ondergaat elektronica een vergelijkbare transformatie. Zij wordt niet minder belangrijk; zij wordt juist essentiëler doordat zij overal wordt ingebed.

Naarmate elektronica een onzichtbare maar onmisbare maatschappelijke infrastructuur wordt, neemt de afhankelijkheid van haar betrouwbaarheid, prestaties en verdere ontwikkeling toe in vrijwel alle sectoren. In deze context verandert technologische vooruitgang niet alleen productmarkten; zij herverdeelt ook economische macht, strategische autonomie en concurrentievermogen op de lange termijn. Zoals bij eerdere infrastructuurrevoluties creëren architectuurverschuivingen nieuwe 'control points': moeilijk te vervangen posities in mondiale waardeketens die op systeemniveau winnaars en verliezers voortbrengen. Deze logica vormt de basis van Europa's concurrentieagenda na Draghi: in plaats van volledige zelfvoorziening na te streven, geeft het halfgeleiderbeleid prioriteit aan technologische soevereiniteit, leveringszekerheid en duurzaamheid door onmisbaar te worden in die delen van de waardeketen waarin Europa geloofwaardig een leidende positie kan innemen.

1. De structurele breuk: de complexiteit van het systeem herdefiniëren

De bepalende architecturale verandering in de aanloop naar 2035 is niet alleen miniaturisering, maar een ingrijpende verschuiving van de plaats waar functionele integratie plaatsvindt. Decennialang werden roadmaps voor elektronische systemen gedomineerd door schaalverkleining, terwijl *packaging* en integratie op printplaatniveau werden gezien als ondersteunende disciplines. Nu de opbrengsten van de wet van Moore afnemen, zijn prestaties en energie-efficiëntie in toenemende mate afhankelijk van de manier waarop chips worden geïntegreerd, waardoor chip *packaging* en *interconnects* niet langer louter afsluitende stappen zijn, maar centrale architecturale aandachtspunten worden.

AI als drijvende kracht

Zowel AI-training als -inferentie zorgen voor integratiedruk, maar op verschillende manieren. Training legt de nadruk op opschaling met hoge bandbreedte en energie-efficiëntie over grote clusters, terwijl inferentie in toenemende mate aanzet tot compacte integratie met lage latentie dicht bij sensoren, geheugen en *edge-computing*. In beide gevallen verschuift de belangrijkste beperking van rekenkracht naar gegevensverplaatsing, stroomvoorziening en thermisch beheer; domeinen waarin chip *packaging*, fotonica en heterogene integratie doorslaggevend worden. Soortgelijke beperkingen zijn al lang zichtbaar in telecom- en draadloze datacenters, maar AI breidt deze uitdagingen uit naar veel bredere systeemklassen.

Naarmate koperen *interconnects* hun grenzen bereiken wat betreft bandbreedtedichtheid en energie-efficiëntie, met name over afstanden op printplaatniveau en bij connectoren, worden traditionele, op printplaten gebaseerde systeemarchitecturen steeds inefficiënter. Het probleem ligt niet bij de technische kwaliteit, maar bij een architectonische mismatch: printplaten (PCB's) zijn nooit ontworpen voor de dichtheid van *interconnects*, stroomvoorziening en thermische koppeling die systemen op AI-schaal vereisen. Hoewel koper op korte afstanden effectief blijft, stijgen de energiekosten per bit sterk bij hogere datasnelheden, en neemt de signaalintegriteit af naarmate de afstanden en het aantal connectoren toenemen.

Elke extra PCB-laag of connector zorgt voor extra verlies, kosten en storingsrisico; nadelen die op grote schaal onoverkomelijk worden. Pogingen om dit te compenseren door steeds meer functionaliteit op één monolithische chip te integreren, hebben eveneens hun grenzen bereikt: grote chips bieden geen voordelen meer op het gebied van energie-efficiëntie, opbrengst, kosten, warmtebeheer of ontwerpcomplexiteit. Al deze beperkingen samen zorgen ervoor dat er een verschuiving plaatsvindt van zowel printplaat-gerichte architecturen als monolithische integratie naar nieuwe benaderingen voor integratie op systeemniveau.

System-in-Package (SiP) en heterogene integratie

Nu de traditionele integratie op printplaatniveau haar grenzen nadert, is noch het simpelweg plaatsen van meer chips op een printplaat, noch het voortdurend opschalen naar steeds grotere monolithische chips een haalbare optie voor systemen waarbij prestaties en energieverbruik van cruciaal belang zijn. Het antwoord van de industrie is daarom een structurele verschuiving: weg van het voornamelijk vertrouwen op integratie op printplaatniveau en met één chip, naar een veel diepere integratie op pakketniveau. *System-in-Package*-architecturen, die al lang ingeburgerd zijn binnen *More-than-Moore*-domeinen, breiden zich nu uit van gespecialiseerde toepassingen naar een centraal integratieparadigma op systeemniveau voor hoogwaardige en AI-gestuurde systemen. Meerdere *chipleths*, geheugenstacks, sensoren, RF-componenten en in toenemende mate fotonische elementen worden geïntegreerd in nauw gekoppelde assemblages die functioneren als complete systemen.

Heterogene integratie maakt deze overgang mogelijk. In plaats van alle functies in één enkele productietechnologie te persen, maakt heterogene integratie het mogelijk om elke functie met de meest geschikte technologie te vervaardigen en vervolgens fysiek te combineren door middel van geavanceerde stapeling of integratie naast elkaar binnen de *package*. Architecturale differentiatie verschuift daardoor van uitsluitend transistorschaling naar interfaces, dichtheid van *interconnects* en systeemontwerp op *package*-niveau.

Het resultaat is een structurele herverdeling van complexiteit: weg van monolithische chips en traditionele printplaten, en richting integratie op pakketniveau, chip-naar-chip-interfaces en heterogene stapeling. Het pakket wordt in toenemende mate de fysieke en architecturale kern van het systeem. Hoewel deze verschuiving misschien lijkt op eerdere overgangen van afzonderlijke componenten naar geïntegreerde schakelingen, is ze fundamenteel anders. Destijds werd de complexiteit grotendeels binnen één enkele chip opgevangen. Tegenwoordig is deze verspreid over meerdere gespecialiseerde chips en opnieuw geïntegreerd op het niveau van de *packaging* en de omliggende integratielagen, waar elektrische, optische, thermische en mechanische beperkingen gezamenlijk moeten worden ontworpen. Deze verplaatsing van complexiteit is doorslaggevend. Ze bepaalt niet alleen de systeemprestaties en energie-efficiëntie, maar ook waar economische waarde, marges en strategische invloed ontstaan in de hele waardeketen.

2. Drie samenkomende technologische pijlers

Het toekomstige elektronica-landschap wordt bepaald door de samenkomst van drie elkaar versterkende technologische ontwikkelingslijnen. Dit zijn geen op zichzelf staande ontwikkelingen, maar onderling afhankelijke elementen van één enkele architecturale transitie.

1. Geïntegreerde fotonica (licht als kern)

Aanvankelijk toegepast voor telecommunicatie en datacommunicatie over lange afstanden, maken AI-workloads fotonica nu tot een noodzaak in plaats van een optie, zelfs voor *interconnects* over korte afstanden. Dit is slechts één voorbeeld van hoe geïntegreerde fotonica in toenemende mate wordt toegepast voor gegevensoverdracht over kortere afstanden via koperen *interconnects*.

Naarmate de datasnelheden toenemen en de energiebudgetten krappere worden, worden optische *interconnects* steeds dichterbij de rekenkracht gebracht: van optica op printplaatniveau naar gezamenlijk verpakte optica en uiteindelijk opto-elektronische integratie op chipniveau. Optische *interconnects* verzenden veel meer data tegen aanzienlijk lagere energie per bit dan elektrische *interconnects*, vooral op systeemsschaal, waar honderden tot duizenden verbindingen met hoge bandbreedte moeten functioneren binnen strak begrensde stroom- en thermische budgetten.

Geïntegreerde fotonica speelt ook een steeds grotere rol in sensortechnologieën en datacommunicatiemodaliteiten zoals lidar, biosensoren en optische draadloze communicatie. Deze toepassingen bestaan al tientallen jaren, maar hun nauwe integratie met elektronica, rekenkracht en packagingtechnologie heeft de systeemarchitecturen fundamenteel veranderd, waardoor kleinere, goedkopere en beter schaalbare oplossingen mogelijk zijn geworden op het gebied van mobiliteit, robotica, gezondheidszorg en lasersatellietcommunicatie.

De focus is verschoven van het functioneren van afzonderlijke fotonische componenten naar de complexe taak om deze op grote schaal te integreren en te produceren. Dit komt doordat fotonica gebruikmaakt van een combinatie van verschillende materialen, die elk zijn gekozen vanwege hun specifieke sterke punten. Het combineert silicium (gebruikelijk in computerchips), siliciumnitride voor het geleiden van licht en speciale lichtemitterende materialen zoals indiumfosfide, die allemaal nauw samenwerken met elektronische schakelingen op dezelfde of onderling verbonden chips.

2. Advanced chip packaging (het nieuwe systeem)

Advanced chip packaging is nu de belangrijkste factor die heterogene integratie mogelijk maakt. Chiplets, gezamenlijk verpakte optische componenten, functionele integratie en 3D integratie verplaatsen de waardecreatie van zowel de printplaat als de afzonderlijke chiplets naar het packagingniveau. In dit paradigma is de *packaging* het systeem, zowel elektrisch, optisch, thermisch als mechanisch. Prestaties, energie-efficiëntie, betrouwbaarheid en produceerbaarheid hangen in toenemende mate af van de integratiekwaliteit op dit niveau.

Advanced chip packaging brengt niet alleen integratierisico's met zich mee, maar herverdeelt en versterkt ook de onderlinge afhankelijkheid tussen ontwerp, fabricage, assemblage en testen. Hoewel standaardisatie van interfaces sommige risico's beperkt, hangen opbrengstverbetering, teststrategieën en de toewijzing van verantwoordelijkheden in toenemende mate af van de uitvoering op packagingniveau.

Packaging wordt daarmee een strategische industriële capaciteit in plaats van een nabewerking, die hoge opbrengsten op schaal vereisen, nieuwe test- en meetmethoden voor heterogene systemen, en haalbare waardeketenmodellen die risico's verdelen over ontwerp, productie, *packaging* en testen. Deze transformatie versterkt ook de onderlinge afhankelijkheid binnen het halfgeleider-ecosysteem. Een *advanced chip package* kan niet worden geproduceerd als er ook maar één cruciaal onderdeel of één cruciale technologie ontbreekt. Als gevolg daarvan worden chipontwerpen steeds gespecialiseerder, worden toeleveringsketens steeds beter op elkaar afgestemd en wordt coördinatie tussen *foundries*, OSAT's, leveranciers van apparatuur en ontwerpers een structurele vereiste in plaats van een operationele keuze.

3. Verder dan de printplaat: twee trajecten voor structurele integratie

Naarmate de complexiteit van systemen zich steeds verder verwijderd van de traditionele assemblage op printplaatniveau, verwijst *Beyond-PCB*-integratie niet naar één enkele technologische richting. In plaats daarvan omvat het twee verschillende maar complementaire structurele verschuivingen, die elk worden gedreven door verschillende beperkingen en toepassingsbehoeften.

Traject A: van integratie op printplaatniveau naar integratie op packageniveau (prestatiegericht)

In hoogwaardige en AI-gestuurde systemen is de belangrijkste beperking niet langer de rekenkracht zelf, maar de gegevensoverdracht, stroomvoorziening en warmtebeheer. Om deze beperkingen aan te pakken, worden *interconnects* met een hogere dichtheid en verbindingen met hoge bandbreedte in toenemende mate van de printplaat naar *advanced chip packages* verplaatst.

Technologieën zoals 2,5D-interposers, 3D-stapeling, chiplets en gezamenlijk verpakte optica verplaatsen elektrische en optische *interconnects* naar compacte multichipassemblages die zijn geoptimaliseerd voor prestaties en energie-efficiëntie. In dit paradigma verdwijnt de printplaat niet, maar wordt haar rol beperkt: ze biedt voornamelijk mechanische ondersteuning, verbindingen met grofmazige interconnecties en stroomverdeling, terwijl het cruciale werk op het gebied van systeemintegratie plaatsvindt op packageniveau.

Deze overgang betekent een structurele verschuiving in de manier waarop elektronische systemen worden ontworpen. De prestaties, efficiëntie en betrouwbaarheid van systemen hangen in toenemende mate af van het ontwerp op pakketniveau, de interfaces en de assemblagekwaliteit, in plaats van uitsluitend van de bedrading op printplaatniveau.

Traject B: Van stijve printplaten naar dunne, flexibele en gedrukte elektronica (productgedreven)

Een tweede, onafhankelijk *Beyond-PCB*-traject ontstaat in toepassingen waar productintegratie, comfort, gewicht, vormfactor en duurzaamheid de systeemvereisten domineren. Hier worden traditionele stijve printplaten vervangen door dunne, flexibele of gedrukte elektronische substraten die direct in producten en materialen kunnen worden geïntegreerd.

Additieve en geprinte elektronica, die vaak met roll-to-roll-processen wordt vervaardigd, maakt het mogelijk om elektronica aan te passen aan gebogen of flexibele oppervlakken en in te bedden in textiel, kunststoffen of structurele componenten. Deze aanpak vermindert het materiaalverbruik, vereenvoudigt de assemblage en opent de weg naar nieuwe productcategorieën, zoals comfortabele draagbare gezondheidssensoren, slimme *packaging* en sensoren met een groot oppervlak.

In tegenstelling tot prestatiegerichte integratie op packageniveau, legt dit traject de nadruk op produceerbaarheid op grote schaal, mechanische integratie en duurzaamheid. Het vertegenwoordigt een fundamenteel andere architecturale logica, ook al verminderen beide trajecten de afhankelijkheid van traditionele printplaat-assemblages.

Vroege toepassingsankers

Beide *Beyond-PCB*-trajecten vertonen al vroege industriële verankering. Bij prestatiegedreven systemen komt de vraag voort uit AI-rekeninfrastructuur, hogesnelheidscommunicatie en heterogene computerplatforms. Bij productgedreven integratie ontstaan aanknopingspunten in domeinen zoals patiëntmonitoring op afstand, draagbare gezondheidszorg, logistiek en grootschalige sensortoepassingen, waar dunne, vormbare elektronica functionaliteit mogelijk maakt die starre printplaten niet kunnen bieden.

Samen herdefiniëren deze twee verschuivingen de rol van de printplaat, niet door deze te elimineren, maar door te differentiëren waar en waarom integratie plaatsvindt binnen toekomstige elektronische systemen.

3. Duurzaamheid als architectonische beperking

De schaal die de alomtegenwoordige elektronica met zich meebrengt – vaak omschreven als een “triljoen-sensoren-economie” – vormt een fundamentele uitdaging voor traditionele systeemarchitecturen. Het op die schaal repliceren van de huidige elektronische paradigma’s zou een vergelijkbare toename van printplaten, connectoren, *packaging* en afzonderlijke assemblages betekenen, wat zou leiden tot een onevenredige groei in materiaalgebruik, chemische verwerking, energieverbruik en e-afval.

Duurzaamheid kan daarom niet worden benaderd als een optimalisatie achteraf van bestaande ontwerpen. Het wordt een architectonische beperking van de eerste orde. De belangrijkste duurzaamheidswinst vloeit voort uit de plaats die functionaliteit inneemt in de systeemhiërarchie, en niet louter uit schonere processen of marginale efficiëntieverbeteringen. Door complexiteit te concentreren in sterk geïntegreerde chips en *packaging* neemt het aantal *interconnects*, materialen en assemblagestappen op systeemniveau af.

Deze architecturale verschuiving maakt duurzaamheid op meerdere fronten mogelijk. Optische *interconnects* verminderen het energieverbruik per verzonden bit naarmate de datavolumes toenemen. *Advanced chip packaging* technieken bundelen functionaliteit in minder, herbruikbare eenheden, waardoor de totale materiaalvoetafdruk van het systeem afneemt en producten een langere levensduur krijgen. Tegelijkertijd maken *Beyond-PCB*-benaderingen, zoals ingebedde en geprinte elektronica, het mogelijk om functionaliteit rechtstreeks in structurele substraten te integreren met behulp van additieve processen, waardoor materiaalverspilling wordt verminderd en recycling wordt vereenvoudigd dankzij meer homogene materiaalstructuren. Toekomstige flexibele en gedrukte elektronica kan de circulariteit eveneens verbeteren door een lager materiaalverbruik en nieuwe concepten voor recyclebare substraten, hoewel de verwerking aan het einde van de levensduur een actief innovatiegebied blijft. De uitdaging op het gebied van duurzaamheid in de elektronica is daarom structureel van aard en niet louter incrementeel. Deze hangt in de eerste plaats af van de systeemarchitectuur, waar functionaliteit wordt geplaatst en hoe de integratie is georganiseerd, in plaats van incrementele efficiëntiewinst of schonere versies van bestaande processen. Door complexiteit te concentreren waar deze kan worden beheerst en ontworpen met het oog op energie-efficiëntie en circulariteit, kan elektronica opschalen zonder dat het materiaalgebruik evenredig toeneemt. Alomtegenwoordige elektronica zal alleen duurzaam zijn als de systeemarchitecturen dienovereenkomstig worden herontworpen.

4. Strategische prioriteiten voor Europa en Nederland

Zoals benadrukt in het Draghi-rapport en de halfgeleiderstrategie van de EU, hangt het concurrentievermogen van Europa op de lange termijn in toenemende mate af van het innemen van onmisbare posities – zogenaamde ‘Control Points’ – in geselecteerde delen van de waardeketen, variërend van ontwerp en productie tot *packaging*. Hoewel geavanceerd chipontwerp en –fabricage essentieel blijven, wordt de industriële relevantie steeds meer bepaald door de manier waarop chips worden gecombineerd tot complete systemen. Leiderschap komt daarom niet langer alleen voort uit uitmuntendheid in afzonderlijke componenten, maar uit het vermogen om deze effectief te integreren in systeemoplossingen op een hoger niveau. Leiders op het gebied van geavanceerde logica, AI-accelerators en gespecialiseerde architecturen, zoals voor inferentie geoptimaliseerde of neuromorfe ontwerpen, zullen dominant blijven. Hun impact op systeemniveau hangt echter in toenemende mate af van toegang tot *advanced chip packaging* technieken, fotonische *interconnects* en testcapaciteiten. Strategische macht op de lange termijn ligt niet langer voornamelijk bij degenen die afzonderlijke componenten produceren, maar in toenemende mate bij actoren die onmisbare posities innemen in de integratielagen die complete systemen met elkaar verbinden. Dit leidt tot een cruciale strategische spanning tussen verticaal geïntegreerde spelers en gedecentraliseerde ecosystemen, en tussen *foundries* die zich uitbreiden naar *advanced chip packaging* technologieën en OSAT's die zich stroomopwaarts begeven.

Nieuwe control points

Nu *packaging* en integratie de belangrijkste drijfveren worden voor systeemprestaties en efficiëntie, worden chips zelf steeds meer standaardonderdelen, waarbij het concurrentievoordeel verschuift naar de manier waarop deze chips worden verbonden, verpakt en op grote schaal ingezet. De strategische relevantie op de lange termijn verschuift van individuele chips naar beheersbaarheid over de integratiemogelijkheden op pakageniveau die bepalend zijn voor prestaties, energie-efficiëntie, betrouwbaarheid en produceerbaarheid in de gehele waardeketen. Toekomstige controlepunten zullen niet in de eerste plaats liggen bij afzonderlijke technologieën zoals fotonica, *packaging* of *Beyond-PCB*. In plaats daarvan ontstaan ze in toenemende mate in het vermogen om deze technologieën te integreren in produceerbare, hoogwaardige systemen. Voor Europa en Nederland doen zich kansen voor op vier gebieden:

- Integratieplatforms op systeemniveau, waaronder

architecturen, co-designkaders en integratieregels die heterogene systemen mogelijk maken

- Hoogwaardige optische en elektrische *interconnect* technologieën, waaronder fotonische koppeling
- Test-, metrologie- en kwalificatiemogelijkheden voor heterogene systemen
- Ondersteunende apparatuur en productiesystemen voor hybride integratie, fotonische assemblage en in-line metrologie

Bestaande sterke punten

Europa, en met name Nederland, neemt een sterke positie in op het gebied van geïntegreerde fotonica, *advanced chip packaging* technieken en waarborgen van *front-end* en *back-end equipment*. Hoewel de meest geavanceerde capaciteiten voor *packaging* in grote volumes momenteel geconcentreerd zijn in Oost-Azië, met name in Taiwan, blijven fotonica en de integratie van *packaging* van de volgende generatie package-integratie inherent multimateriaal- en procesintensief. Dit sluit goed aan bij de sterke punten van Europa op het gebied van hybride integratie, apparatuur en gespecialiseerde productie. Strategische relevantie zal daarom niet worden bereikt door chips alleen, noch door het kopiëren van productiemodellen voor grote volumes, maar door het beheersen van systeemintegratie over meerdere materiaalplatforms heen en het innemen van onmisbare posities in de integratie-waardeketen.

Waarom dit nu belangrijk is

Tussen 2026 en 2028 zullen door AI aangestuurde beperkingen op systeemniveau de ontwikkeling van elektronische systemen in toenemende mate bepalen, hoewel de impact en timing hiervan per toepassingsdomein verschillen. Hyperscale-datacenters en AI-infrastructuur stuiten het eerst op beperkingen op printplaat- en *interconnect* niveau, wat een snelle invoering van *advanced chip packaging* technieken en fotonische integratie stimuleert. Edge-, industriële en IoT-systemen volgen andere trajecten, die meer worden bepaald door beperkingen op het gebied van kosten, stroomverbruik en vormfactor, maar uiteindelijk met vergelijkbare integratie-uitdagingen worden geconfronteerd naarmate de schaal en functionaliteit toenemen. In al deze domeinen is de gemeenschappelijke trend een geleidelijke verplaatsing van knelpunten – en daarmee van strategische invloed – van printplaten en afzonderlijke componenten op het gebied van *advanced chip packaging* technieken, fotonische integratie, testen en *Beyond-PCB*-technologieën, die in toenemende mate uitgroeien tot industriële control points voor de lange termijn.

Naarmate deze integratielagen zich tot strategische controlepunten consolideren, lopen actoren zonder integratiemogelijkheden op systeemniveau het risico op structurele afhankelijkheid naarmate de controle over het systeem zich concentreert. Productiekosten alleen vormen voor Europa al geen haalbare concurrentiestrategie meer. Concurrentievoordeel vloeit juist voort uit technologie-intensieve productie die nauw verweven is met ontwerp en veeleisende eindgebruikers, ondersteund door voortdurend onderzoek en ontwikkeling en een duidelijke strategische focus. Als dit op een samenhangende manier wordt uitgevoerd, stelt dit Europa en Nederland in staat om toekomstige opto-elektronische systeemarchitecturen vorm te geven in plaats van ervan afhankelijk te zijn.

5. Beleidsroutekaart: van uitvinding naar industriële toepassing

In deze zich snel ontwikkelende sector sluit het venster om strategische control points te veroveren in hoog tempo. Over de hele wereld versnellen overheden en het bedrijfsleven hun investeringen in *advanced chip packaging* technologieën, systeemintegratie en ondersteunende infrastructuur, omdat zij deze zien als strategische pijlers voor AI-gedreven economieën. Voor Europa en Nederland brengt uitstel het risico met zich mee dat niet alleen marktaandeel, maar ook industriële invloed op de lange termijn verloren gaat. De uitdaging is om de overgang van uitvinding naar industriële toepassing te versnellen. Door de integratie van elektronische en fotonische technologieën op systeemniveau onder de knie te krijgen, kan Europa strategische relevantie en onmisbaarheid verwerven binnen toekomstige waardeketens. Deze overgang vereist een fundamentele verschuiving in het industriebeleid: van een voornamelijk op chips gerichte focus naar een systeemgerichte strategie die draait om integratie, productie-uitvoering en coördinatie van het ecosysteem. Deze verschuiving vraagt om expliciete beleidskeuzes om structurele knelpunten aan te pakken die specifiek zijn voor integratietechnologieën op systeemniveau:

- Gefragmenteerde waardeketens: geen enkele speler beheerst het gehele proces van ontwerp, integratie en productie, waardoor coördinatiefouten waarschijnlijk zijn.
- Schaalkloof tussen R&D en de industrie: er zijn sterke pilotcapaciteiten, maar productie op industriële schaal ontbreekt of loopt vertraging op.
- Hoog risico op wederzijdse afhankelijkheid: systeemintegratie vereist de gesynchroniseerde beschikbaarheid van meerdere technologieën en leveranciers.
- Onvoldoende afzetmarkten in Europa: de vraag naar baanbrekende geïntegreerde systemen is niet structureel verankerd.
- Kapitaalintensiteit zonder duidelijke modellen voor risicodeling: dit is met name een groot probleem bij *advanced chip packaging* technieken en heterogene integratie.

Deze knelpunten doen zich niet in alle deep-tech-sectoren voor, maar zijn met name acuut bij integratie op systeemniveau, waar coördinatie tussen meerdere actoren en gesynchroniseerde opschaling structurele vereisten zijn.

De volgende maatregelen kunnen helpen om de technologische sterke punten van Europa op het gebied van systeemintegratie om te zetten in duurzame industriële posities:

- A. **Focus (pakt fragmentatie aan):** Europa en Nederland moeten weloverwogen beslissingen nemen om zich te richten op toekomstige integratiecapaciteiten op het niveau van elektronische systemen, die nauw zijn gekoppeld aan ontwerp en veeleisende eindgebruikers, ondersteund door aanhoudend onderzoek en ontwikkeling. Definieer belangrijke roadmaps voor concrete eindproducten, bijvoorbeeld in Europa ontworpen en geïntegreerde hoogwaardige computersystemen voor AI en data-intensieve toepassingen, waarbij belangrijke Europese spelers en technologieën worden samengebracht. De Nederlandse Nationale Technologiestrategie (NTS) richt zich op de belangrijkste toekomstige elektronica-technologieën. Het ministerie van EZK zou de impact ervan verder kunnen versterken door zich te richten op de NTS en de innovatie-instrumenten daarop af te stemmen.
- B. **Vraag (pakt het gebrek aan toonaangevende markten aan):** Er moet actief worden ingezet op vroege toezeggingen van veeleisende klanten in de defensie-, mobiliteits- of AI-infrastructuursector, aangezien dit van cruciaal belang is voor de industriële levensvatbaarheid – het waarborgen van schaalgrootte, betrouwbaarheidseisen en afstemming op de langetermijnroadmap. Dit omvat het benutten van toepassingsgebieden met dual-use, waar defensie-, veiligheids- en civiele markten gezamenlijk zorgen voor vroege schaalgrootte en prestatie-eisen. Het concept van het Nederlandse Ministerie van Defensie als eerste klant voor Future Electronics-toepassingen biedt duidelijk potentieel. Initiatieven zoals het 10x10-programma van het Ministerie van Defensie en TNO kunnen een belangrijke rol spelen bij het versnellen van de weg naar de markt.

- C. Opschaling (pakt de schaalbreuk aan):** Proeflijnen moeten worden gepositioneerd als voorlopers van industriële faciliteiten, vergezeld van vroege toezeggingen voor opschaling en de vorming van een toeleveringsketen. Nederland zou zijn positie verder kunnen versterken door te investeren in pilot lines als katalysatoren voor hightech-megaclusters op het gebied van Future Electronics, bijvoorbeeld door de ontwikkeling van unieke faciliteiten voor *Beyond-PCB*- en geavanceerde chippackagingtechnologieën. De realisatie van de *Advanced Chip Packaging*-lijn (pijler 4 van ChipNL) zou een belangrijke stap zijn om de Nederlandse kennisbasis op deze gebieden te valoriseren.
- D. Toegangsmodellen (gericht op risicodeling en coördinatiefalen):** Investerings in hightech-megaclusters rond open foundries – gedefinieerd als gedeelde, vrij toegankelijke productie- en integratiefaciliteiten die gestandaardiseerde processen aanbieden aan meerdere externe ontwerpers en systeembouwers – moeten worden gestimuleerd. Dergelijke modellen kunnen toetredingsdrempels verlagen, deelname van meerdere actoren mogelijk maken en wereldwijde spelers op het gebied van ontwerp aantrekken zonder dat verticale integratie nodig is. Nederland zou nieuwe regelingen kunnen onderzoeken om de vorming van ecosystemen rond open faciliteiten te stimuleren. Zo zou het ministerie van EZK kunnen overwegen financieringsmodellen voor onderzoeksinfrastructuur te ontwikkelen die de drempels voor bedrijven om toegang te krijgen tot deze faciliteiten verlagen, terwijl subsidie-instrumenten voor R&D de vorming van flexibelere consortia zouden kunnen ondersteunen. Dit kan ertoe bijdragen dat Future Electronics-ecosystemen zich ontwikkelen tot nieuwe industrieën.

Electronica ecosystemen in Nederland



Lijst van begrippen en definities

3D integratie – Het verticaal stapelen van chips om de prestaties te verbeteren en de benodigde ruimte te verminderen.

Advanced chip packaging – Technologieën waarmee meerdere chips en componenten in één hoogwaardige *packaging* worden geïntegreerd.

Chiplet – Een kleine, gespecialiseerde chip die is ontworpen om te worden gecombineerd met andere chiplets in één *packaging*.

Edge computing – Het verwerken van gegevens dicht bij de plek waar ze worden gegenereerd, in plaats van in een centraal datacentrum.

Foundry – Een bedrijf dat halfgeleiderchips produceert die door anderen zijn ontworpen.

Gezamenlijk verpakte optica – Integratie van optische en elektronische componenten in een nauw gekoppelde *packaging* om snelle, energiezuinige datacommunicatie met hoge bandbreedte mogelijk te maken.

Geïntegreerde fotonica – Technologie die licht in plaats van elektriciteit gebruikt om informatie op een chip te verwerken, over te dragen of te detecteren.

Heterogene integratie – Het combineren van chips, componenten of technologieën die met verschillende processen zijn vervaardigd tot één systeem.

Inferentie – Het gebruik van een getraind AI-model om voorspellingen of beslissingen te genereren op basis van nieuwe gegevens.

Interconnects – Elektrische verbindingen tussen componenten op een chip of tussen verschillende chips in een *package*.

Interposer (2,5D-interposer) – Een tussensubstraat dat meerdere chips binnen een *package* met elkaar verbindt.

Lidar – Een sensortechnologie die gebruikmaakt van laserlicht om afstanden te meten en 3D-kaarten te maken.

Metrologie – De wetenschap en technologie van het meten, gebruikt om de productiekwaliteit te controleren.

Monolithische chip – Een chip waarin alle functies op één enkel stuk silicium zijn geïntegreerd.

Neuromorfische computing – Computerarchitecturen die zijn geïnspireerd op de manier waarop het menselijk brein informatie verwerkt.

Optische interconnects – Datacommunicatie waarbij gebruik wordt gemaakt van licht in plaats van elektrische signalen.

OSAT – Een (Outsourced Semiconductor Assembly and Test) bedrijf dat halfgeleidercomponenten verpakt, assembleert en test in opdracht van chipfabrikanten.

Printplaat/ PCB – Een (Printed Circuit Board) printplaat waarop elektronische componenten zoals chips, weerstanden en condensatoren zijn gemonteerd en via geleidende banen met elkaar zijn verbonden om een elektronisch systeem te laten functioneren.

System-in-Package (SiP) – Een behuizing waarin meerdere chips en componenten, vaak met verschillende functies, worden geïntegreerd tot één oplossing op systeemniveau.