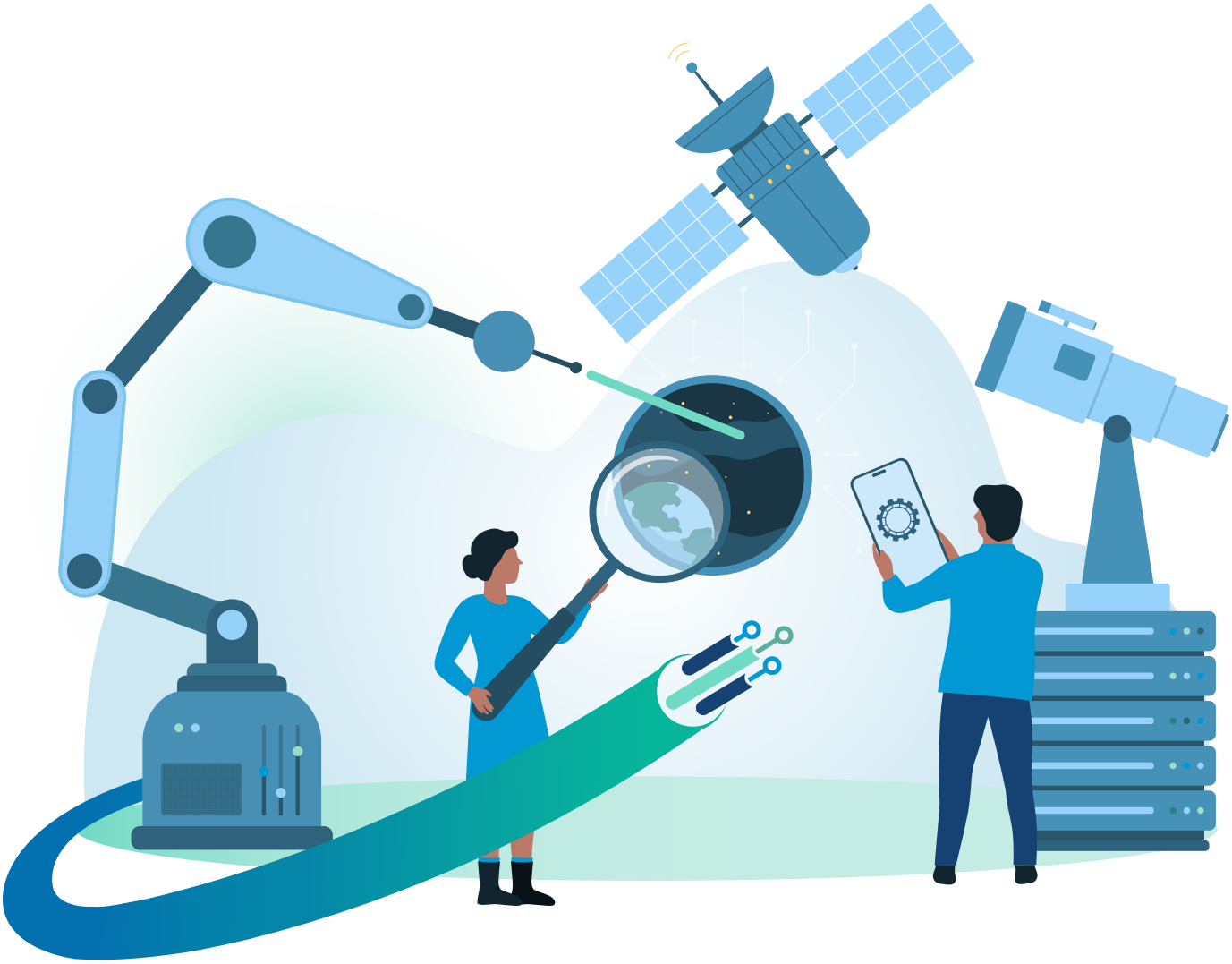
Ministerie van Economische Zaken
en Klimaat

De Nationale Technologiestrategie

Bouwstenen voor strategisch technologiebeleid



De Nationale Technologiestrategie

Bouwstenen voor strategisch technologiebeleid

Managementsamenvatting

Waarom nu?
- Internationale technologische competitie is sterk toegenomen
- Andere landen zetten gerichter (slimmer) in op strategische sleuteltechnologieën
- Technologie kan uitdagingen op gebied van bijv. zorg of veiligheid oplossen

Wat is de NTS?
De NTS prioriteert 10 sleuteltechnologieën die:
1 een grote bijdrage leveren aan ons verdienvermogen
2 cruciaal zijn voor maatschappelijke uitdagingen
3 belangrijk zijn voor de nationale veiligheid
4 Nederlands technologisch leiderschap mogelijk maken

Sterktes NL
- Hoge kwaliteit wetenschappelijk onderzoek
- Goed opgeleide bevolking
- Sterke internationale verbindingen
- Veel publiek-private samenwerking

Zwaktes NL
- R&D-investeringen lopen achter
- Toepassing van technologie (valorisatie)
- Beperkte gerichte inzet op sleuteltechnologieën

Wat doen we nog meer?
- Inzet op alle 44 sleuteltechnologieën via het missiegedreven innovatiebeleid
- Brede basis: Inzet op ontwikkeling, toepassing en opschaling van technologie met innovatie-, ondernemerschaps-, en industriebeleid

De 10 prioriteiten:
- Optical systems and integrated photonics
- Quantum technologies
- Process technology, including process intensification
- Biomolecular and cell technologies
- Imaging technologies
- Mechatronics and opto-mechatronics
- Artificial intelligence and data science
- Energy materials
- Semiconductor technologies
- Cybersecurity technologies

Agenda per prioriteit
Hierin formuleren we ambities: stippen op de horizon (hoe kunnen we Nederland positioneren in 2035) en wat is nodig om dit te bereiken

Wat is er nodig:

Talent Aantrekken, behoud en doorontwikkelen (top)talent, op alle niveaus

Faciliteiten Voldoende opschalingsfaciliteiten voor de ontwikkeling en toepassing van technologieën

Financiering en marktcreatie Zorg voor voldoende opschalingsfinanciering en goede markttoegang. Kijk waar de overheid als launching customer op kan treden

Inhoud

Inleiding 6

Analyse 8
De huidige positie van Nederland: voorhoedepositie onder druk 9
Nationale veiligheid en de EU in strategische technologie competitie 10
Innovatie is de basis voor een blijvend sterk verdienvermogen 11
Maatschappelijk belang van technologie 11
Conclusie analyse 12

Beleidscontext 14
Een brede basis voor innovatie: generiek beleid 15
Richting geven aan innovatie: specifieke inzet 16
Gericht inzetten op innovatie: strategische prioriteiten 16

Prioritaire sleuteltechnologieën 18
Deel 1 – Definitie 19
Deel 2 – Huidige positie 19
Deel 3 – Ambitie 19

1 Optical systems and integrated photonics 20
1.1 Definitie 20
1.2 Positie, sterktes/zwaktes 22
1.3 Ambitie 25

2 Quantum technologies 28
2.1 Definitie 28
2.2 Positie, sterktes/zwaktes 30
2.3 Ambitie 34

3 Process technology including process intensification 36
3.1 Definitie 36
3.2 Positie, sterktes/zwaktes 38
3.3 Ambitie 42

4 Biomolecular and cell technologies 44
4.1 Definitie 44
4.2 Positie, sterktes/zwaktes 46
4.3 Ambitie 48

5 Imaging technologies 52
5.1 Definitie 52
5.2 Positie, sterktes/zwaktes 54
5.3 Ambitie 58

6 Mechatronics en Optomechatronics 60
6.1 Definitie 60
6.2 Positie, sterktes/zwaktes 62
6.3 Ambitie 65

7 Artificial Intelligence and data 68
7.1 Definitie 68
7.2 Positie, sterktes/zwaktes 70
7.3 Ambitie 74

8 Energy materials 76
8.1 Definitie 76
8.2 Positie, sterktes/zwaktes 78
8.3 Ambitie 82

9 Semiconductor technologies 84
9.1 Definitie 84
9.2 Positie, sterktes/zwaktes 86
9.3 Ambitie 90

10 Cybersecurity Technologies 92
10.1 Definitie 92
10.2 Positie, sterktes/zwaktes 94
10.3 Ambitie 98

Bijlage – Procesbeschrijving aanpak prioritaire sleuteltechnologieën 100

Bronnen 104

Inleiding

De ontwikkeling van technologieën gaat razendsnel en nieuwe toepassingen van technologieën worden alleen maar belangrijker en talrijker. Dat komt omdat wij mensen er continu mee bezig zijn om ons leven gemakkelijker, duurzamer, beter, mooier en slimmer te maken. Snellere smartphones, betere weersvoorspellingen en zelfs de videoscheidsrechter in het voetbal zijn daar kenmerkende voorbeelden van. Nederland is goed in het ontwikkelen van nieuwe technologie: onze onderzoekers en bedrijven staan in de voorhoede van ontwikkelingen in de machinebouw, computerchips en medicijnen. Om te zorgen dat we hier goed in blijven, heeft het ministerie van Economische Zaken en Klimaat samen met bedrijven, maatschappelijke organisaties en kennisinstellingen de Nationale Technologiestrategie opgesteld.

We vinden het belangrijk dat Nederland kan blijven meedoen in de razendsnelle wereldwijde technologische ontwikkelingen. Verschillende landen, waaronder de Verenigde Staten, Japan, China, het Verenigd Koninkrijk en Duitsland, zijn bereid fors te investeren om hun eigen technologische positie te behouden of sterker te maken. Dit geldt in het bijzonder voor technologieën die strategisch zeer belangrijk zijn, zoals computerchips en kunstmatige intelligentie[1]. Tegelijkertijd maken we ons vanuit de overheid zorgen over de geopolitieke spanningen die hierbij kunnen komen kijken. Niet alle spelers spelen het spel even eerlijk. Daarbij kan een leidende positie van één land in een technologie ons disproportioneel afhankelijk maken van één partij voor deze technologie. Dat kan ons kwetsbaar maken, bijvoorbeeld doordat we de toegang tot deze technologie zouden kunnen verliezen.

Willen we als Nederland en als Europa blijven meedoen, dan moeten we inzetten op strategische technologieën en bijbehorende bedrijven om deze te blijven stimuleren. Innovatieve bedrijven moeten ruimte krijgen om te groeien, te ondernemen en internationaal concurrerend te blijven. Zo houden we Nederland welvarend en weerbaar.

Uiteindelijk raakt technologie ons allemaal. We moeten ervoor zorgen dat technologie wordt ingezet op een manier waarop wij er van profiteren als samenleving. Zo kunnen nieuwe doorbraken in de biotechnologie leiden tot nieuwe medicijnen tegen kanker en zorgt de ontwikkeling van nieuwe zaden voor betere oogsten en nieuwe gewassen. Technologische vooruitgang kan juist ook leiden tot ethische vraagstukken: hoe gaan we om met de opkomst van generatieve kunstmatige intelligentie en de rol daarvan in de klas en op de werkvloer? Ook oorlogsvoering krijgt een meer hybride en technologisch karakter, waardoor ontwikkeling van technologie de nationale veiligheid raakt.

Om onze voorhoedepositie te behouden en een positieve maatschappelijke impact te realiseren, moeten we ook keuzes maken. Nederland zal niet op alle gebieden voorop kunnen lopen; daar is ons land te klein voor. We zullen moeten blijven samenwerken, met partners in Europa en daarbuiten, bij voorkeur met die landen die onze normen en waarden delen.

We kunnen dat slimmer doen: door samen met het bedrijfsleven en de kennisinstellingen unieke kennis, producten en diensten te ontwikkelen waar niemand omheen kan. Zo hebben we met de in Nederland aanwezige kennisinstellingen en bedrijven op het gebied van apparatuur voor computerchipproductie een unieke positie in de wereldwijde markt.[2] We kunnen – we moeten – strategischer nadenken over hoe we dit soort posities blijven ontwikkelen. Dit vraagt niet alleen (nieuwe) overheidsinvesteringen, maar ook slim nadenken over hoe de overheid de juiste randvoorwaarden creëert om andere publieke en private partijen te laten investeren.

Deze Nationale Technologiestrategie geeft de bouwstenen voor een strategisch technologiebeleid door sleuteltechnologieën te identificeren waar het Nederlandse kennisveld en het Nederlandse bedrijfsleven een positieve impact mee kan maken en waar een unieke Nederlandse positie op mogelijk is. Deze technologieën zijn:

- Optical systems and integrated photonics;
- Quantum technologies;
- Process technology, including process intensification;
- Biomolecular and cell technologies;
- Imaging technologies;
- Mechatronics and opto-mechatronics;
- Artificial intelligence and data science;
- Energy materials;
- Semiconductor technologies;
- Cybersecurity technologies.

Leeswijzer

In deze strategie benoemen we allereerst de huidige positie van Nederland en de Europese Unie in het ontwikkelen en opschalen van technologieën, en de impact van technologie. Vervolgens gaan we in op de beleidscontext waar de NTS binnen kan vallen, namelijk van een strategisch technologiebeleid met een goede mix tussen brede stimulering en focus. Het grootste deel van deze strategie bestaat uit de agenda's op de technologieën, want elke technologie is maatwerk. Daarin wordt per technologie een schets gegeven van de technologie, het speelveld aan bedrijven – nationaal én internationaal – en de ambities die de benaderde partijen voorstellen op de diverse technologieën.

De ambities die geformuleerd worden zetten concrete stippen op de horizon: hoe kunnen we Nederland positioneren in 2035 op het gebied van de diverse sleuteltechnologieën, en wat is nodig om dit te bereiken? Dit laatste wordt uitgewerkt langs de lijnen van de kabinetsstrategie "Versterken van onderzoeks- en innovatie-ecosystemen" die in 2020 met de Tweede Kamer is gedeeld. Dit geeft een holistisch beeld, waarbij in ieder geval naar voren komen: 1) aandacht voor het aantrekken, behoud en door-ontwikkelen van (top)talent, 2) het faciliteren van voldoende opschalingsfaciliteiten voor de ontwikkeling en toepassing van technologieën, en 3) het dragen van zorg voor voldoende opschalingsfinanciering en goede markttoegang; met een rol voor de overheid als launching customer waar dat kan.

Analyse

Huidige positie van de EU en Nederland, en de impact van technologie

Onze toekomstige brede welvaart, welzijn en nationale veiligheid worden in grote mate bepaald door de manier waarop wij omgaan met de kansen die nieuwe technologieën bieden, de wijze waarop we eventuele risico's mitigeren en de manier waarop wij deze technologieën een plaats geven in onze maatschappij. De verscherpte internationale competitie in strategische technologieontwikkeling zorgt ervoor dat onze voorhoedepositie niet langer vanzelfsprekend is. Dit heeft op drie dimensies gevolgen voor de Nederlandse brede welvaart[3], namelijk (1) onze nationale veiligheid, (2) ons verdienvermogen en concurrentiekracht en (3) onze maatschappelijke uitdagingen en wensen.

Naast de nationale belangen draagt een technologisch vooraanstaand Nederland ook bij aan een sterkere internationale positie van de EU. Dit is van wederzijds belang: om in de technologieën van de toekomst een sterke positie in te nemen of te behouden is Europese en internationale samenwerking essentieel, bijvoorbeeld door een goede kennispositie te ontwikkelen, voldoende economische schaal te behalen, internationale normen te ontwikkelen of de toevoer tot benodigde kritieke grondstoffen te garanderen. Dit versterkt uiteindelijk onze internationale concurrentiepositie en nationale veiligheid en maakt dat wij beter technologie kunnen richten op onze maatschappelijke uitdagingen.

Dit deel van de strategie gaat allereerst in op de huidige positie van Nederland op het gebied van het ontwikkelen en toepassen van technologieën. Vervolgens beschrijven we de impact van technologie op de drie genoemde dimensies van (1) nationale veiligheid, (2) verdienvermogen en concurrentiekracht en (3) maatschappelijke uitdagingen en wensen. Daarnaast is in alle tekstpassages ook aandacht voor de Europese en internationale dimensie.

De huidige positie van Nederland: voorhoedepositie onder druk

Nederland is een kenniseconomie met een sterke internationale verbondenheid, hoge kwaliteit van onderzoek en wetenschap en een goede digitale en fysieke infrastructuur.[4] We scoren al jaren goed op internationale ranglijsten, zoals de European Innovation Scoreboard en de Global Innovation Index (zie tabel 1). Daarmee behoren we tot de kopgroep van Europese innovatieleiders, hoewel op de Global Innovation Index wel een dalende trend waarneembaar is.

	2018	2019	2020	2021	2022	2023
European Innovation Scoreboard	4	4	4	5	4	4
Global Innovation Index	2	4	5	6	5	7

Nederlandse positie op European Innovation Scoreboard en Global Innovation Index.

Bron: WIPO (2023) - Global Innovation Index 2023 & Europese Commissie (2023) – European Innovation Scoreboard 2023

Ook heeft Nederland goed ontwikkelde onderzoeks- en innovatie-ecosystemen met een aantrekkelijke onderzoeksomgeving[5], een goed opgeleide bevolking[6] en veel samenwerking tussen bedrijven en kennisinstellingen.[7] Bovendien huisvest Nederland in sommige internationale waardeketens een cruciale schakel ("control point"), bijvoorbeeld op het gebied van halfgeleiders.[8] Met ons brede wetenschappelijk fundament en sterke positie in het Europese en mondiale kennislandschap toont Nederland zich wereldwijd een sterke speler op het gebied van wetenschappelijk onderzoek en innovatie.[9] Daar komt bij dat Nederlandse onderzoekers erg succesvol zijn in Europese onderzoeksprogramma's en dat Nederlandse universiteiten internationaal hoog scoren.[10]

Nederland scoort qua *toppublicaties* op het gebied van sleutel-technologieën erg hoog binnen de EU, bijvoorbeeld op het gebied van biotechnologie en quantum. Het Nederlandse aandeel in publicaties op sleuteltechnologieën is met 28% internationaal vergeleken echter laag.[11] De EU-15 publiceert gemiddeld 34% van hun onderzoek op sleuteltechnologieën, waar bijvoorbeeld Chinees onderzoek voor meer dan de helft gericht is op sleuteltechnologieën. Dit beeld valt goed te verenigen met het lage Nederlandse relatieve aandeel in wetenschappelijke publicaties op het gebied van natuur en techniek, waarbinnen zich veel sleuteltechnologieën bevinden.[12] We zien daarnaast dat in Nederland te weinig wordt geïnvesteerd in R&D om de Europese R&D-doelstelling van 3% te halen, onder meer door een gebrek aan R&D-intensieve bedrijvigheid. Vooral op experimentele ontwikkeling waar R&D dichter bij de markt staat, gebeurt in Nederland in vergelijking met andere relatief kennisintensieve economieën te weinig[13]. Verder blijft Nederland achter op het gebied van *valorisatie* van kennis:[14] Nederlandse universiteiten weten kennis minder goed om te zetten in (deeptech) bedrijvigheid dan onze Europese buurlanden.[15] Hoewel het potentieel van samenwerking tussen ondernemers en kennisinstellingen groot is, weten ondernemers en kennisinstellingen elkaar niet altijd gemakkelijk te vinden en lopen ze vaak tegen praktische belemmeringen op zoals het commercialiseren van intellectueel eigendom en de daarvoor gehanteerde aandeelhoudersstructuren. Ook is de daaropvolgende ontwikkeling tot startups en scale-ups in Nederland en Europa een fundamenteel probleem door een tekort aan durfkapitaal, en dan met name voor kennis- en kapitaalintensieve startups en scale-ups[16]. Er is een groot tekort aan (hoogopgeleid) *technisch geschoold personeel*[17], mede doordat Nederland internationaal gezien relatief weinig technisch personeel opleidt.[18] Een belangrijke factor hierbij is dat door natuurlijke demografische ontwikkelingen steeds minder studenten uit Nederland zelf komen.[19] Ook van het wetenschappelijk personeel in de techniek aan de universiteiten is meer dan de helft afkomstig uit het buitenland, het grootste aandeel binnen alle gebieden.[20] Maatregelen die het Nederlands onderwijs minder aantrekkelijk maken voor internationale studenten, kunnen, indien geen rekening wordt gehouden met de nood aan technisch personeel, dus het tekort vergroten. Dit geldt ook voor maatregelen die gericht zijn op expats die hier willen komen werken.[21]

Naast bovenstaande punten, die vooral gaan over de mate waarop Nederland in staat is hoogwaardige technologie te ontwikkelen en toe te passen, zien we ook steeds vaker dat *basale randvoorwaarden* voor economische activiteiten in Nederland niet goed op orde zijn. Hoewel niet uitputtend, lichten we hier vier belangrijke randvoorwaarden kort toe:

- Toegang tot kritieke grondstoffen; bedrijvigheid op het gebied van zorg, hernieuwbare energie en digitalisering vraagt om kritieke grondstoffen zoals magnesium, titaan, lithium en gallium. De toegang tot deze grondstoffen is niet vanzelfsprekend, en daarom werkt het kabinet aan betere toegang tot grondstoffen en het verminderen van onze afhankelijkheid met de Nationale Grondstoffenstrategie en bijbehorende inzet in Europa[22];
- Toegang tot fysieke ruimte; deze staat vanwege de verschillende opgaven op het gebied van bijvoorbeeld landbouw, woningbouw en migratie ook steeds vaker onder druk. Zeker op technologische hotspots als de Zuidvleugel Randstad en de Brainportregio is het op dit moment al lastig om fysieke ruimte voor bedrijvigheid te realiseren of dreigt een tekort. Vanuit het Nationaal Programma Ruimte voor Economie wordt gewerkt aan gericht ruimtelijk programmeren om groei voor innovatieve technologie in Nederland mogelijk te houden[23];
- Toegang tot personeel; want de eerder geschetste uitdagingen voor technisch talent staan niet op zichzelf; er is sprake van historische arbeidsmarktkrapte die bovendien voor een groot deel structureel van aard is[24];
- Toegang tot energie; o.a. door de oorlog in Oekraïne zijn de energieprijzen in Europa fors gestegen. Hoewel de markt momenteel lijkt te stabiliseren, lijkt er sprake van structureel hogere gasprijzen[25] die met name druk leggen op het energie-intensieve deel van de economie. Vanwege de snel toegenomen elektrificatie is daarnaast nettoegang een groot probleem en kunnen nieuwe grootverbruikers zich in grote delen van Nederland niet vestigen.[26]

Nationale veiligheid en de EU in strategische technologie competitie

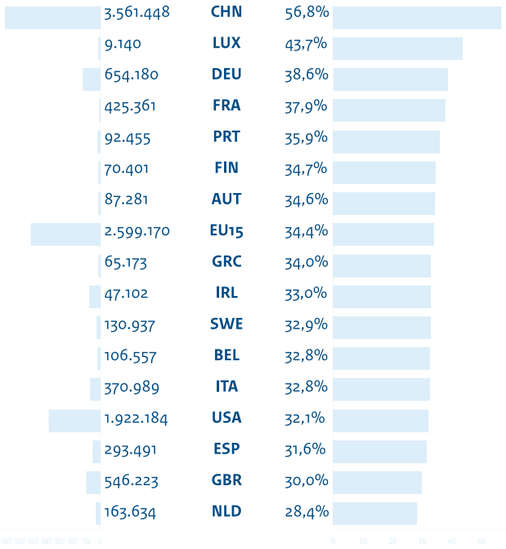
Technologische ontwikkeling is van direct belang voor de nationale veiligheid, zowel voor het ontwikkelen van eigen capaciteiten als door de ontwikkeling van nieuwe risico's. Technologie kan nieuwe dreigingen creëren of bestaande dreigingen combineren en versterken.[27] Specifieke dreigingen zijn onder meer spionage, sabotage, cyberaanvallen alsook ongewenste zeggenschap en ongewenste kennis- en technologieoverdracht. Daarmee kan de continuïteit, integriteit en veiligheid van (digitale) systemen en onze vitale infrastructuur onder druk komen te staan.

De internationale technologische competitie is sterk toegenomen. Hierbij worden economische instrumenten als machtsmiddel gebruikt.[28] Wereldwijd worden bijvoorbeeld grote subsidies verstrekt en investeringen gedaan door overheden om een leidende positie te verkrijgen in de waardeketens van onder meer halfgeleiders en kunstmatige intelligentie.[29] Daarnaast zien we dat de toevoer van kritieke grondstoffen – essentieel voor bijvoorbeeld batterijtechnologie – steeds meer een geopolitieke dimensie krijgt.[30]

In deze toegenomen strategische technologische competitie is de relatieve technologische positie van Nederland – en Europa –ten opzichte van China en de VS verslechterd.[31] We zien de bedrijfsprestaties van Europese bedrijven, met name op digitaal gebied, steeds verder achterlopen op die van Amerikaanse en Chinese bedrijven.[32] Een verslechterende economisch-technologische positie kan zich vertalen in nationale veiligheidsrisico's, bijvoorbeeld wanneer risicovolle afhankelijkheden ontstaan in de waardeketen, ongewenst zeggenschap ontstaat in strategische technologieën of wanneer commercieel ontwikkelde technieken ook militaire toepassingen hebben.

De afgelopen decennia heeft China gigantische stappen gezet op technologiegebied. Het aandeel Chinese wetenschappelijke publicaties is in 20 jaar vervijfvoudigd en heeft daarmee de EU ingehaald. Daarbij is de focus van China, veel meer dan de EU en in het bijzonder Nederland, gericht op strategische sleuteltechnologieën.[33] Zo valt op in figuur 1 dat China, in vergelijking met Nederland, bijna het dubbele aandeel van de totale wetenschappelijke publicaties op deze technologieën is gericht. Deze ontwikkelingen brengen zowel kansen voor samenwerking rondom innovatie, als risico's met zich mee. De nadruk van China's technologische ontwikkelingen ligt op zelfvoorzienendheid en technologische en wetenschappelijke onafhankelijkheid van het buitenland in strategische sectoren. Door zelf over de noodzakelijke technologie te beschikken, kan China de eigen risico's van afhankelijkheid zo klein mogelijk houden.[34] Deze focus heeft geopolitieke implicaties en betaalt zich voor China uit in een steeds sterkere economische en militaire positie in de meest complexe (digitale) technologieën.[35] In het geval van China, blijft de drieslag partner, concurrent en systeemrivaal gelden.[36]

Voor onze nationale veiligheid is het belangrijk dat Nederland de eigen capaciteit tot technologieontwikkeling blijft ontwikkelen en vrije toegang blijft houden tot elders ontwikkelde technologie. Dat stelt ons in staat om – langs de weg van wederzijdse afhankelijkheden – te blijven beschikken over de technologieën die we nodig hebben om ons te kunnen verdedigen, spelregels internationaal te beïnvloeden en de koers van technologische ontwikkeling mede te bepalen. Dit vraagt om een technologisch weerbaar Nederland en Europa. Om dit te bereiken, zal Nederland gerichter in moeten zetten om technologisch leiderschap in sleuteltechnologieën en control points in waardeketens te behouden en versterken.[37] Internationaal zien we dat verschillende landen, waaronder de VS en het VK, prioritering aanbrengen binnen de ontwikkeling van strategische technologieën.[38] Door als Nederland zelf, in navolging van China, de VS en VK, ook meer in te zetten op de ontwikkeling van sleuteltechnologieën en sleutelposities, verminderen we het risico van negatieve gevolgen van de internationale strategische technologiecompetitie voor onze nationale veiligheid.



Figuur 1. Onderzoeksoutput voor sleuteltechnologieonderzoek (linkerpaneel) en als onderdeel van de totale output (rechterpaneel) van NL en vergelijkbare landen, uit de periode 2013-2022. Bron: Elsevier (2023) – Quantitative analysis of Dutch research and innovation on key technologies / Scopus.

Innovatie is de basis voor een blijvend sterk verdienvermogen

De ontwikkeling en toepassing van nieuwe technologie levert een grote bijdrage aan onze economie en zorgt ervoor dat het verdienvermogen van Nederland op peil blijft en versterkt kan worden[39]. Samen met kennisontwikkeling, ondernemerschap, menselijk kapitaal zoals scholing en digitale vaardigheden, en goed werkende (internationale) markten zijn technologische ontwikkelingen en innovatie de motor achter een productievere bevolking. Innovatie leidt tot economische groei door slimmere en efficiëntere inzet van productiefactoren zoals arbeid en verhoogt daarmee de productiviteit, creëert nieuwe kansen en verbetert onze internationale concurrentiepositie.

Ruimte, grondstoffen en arbeid worden steeds schaarser. Door technologische innovaties en ondernemerschap te stimuleren, kunnen we het landgebruik verminderen, alternatieven ontwikkelen voor cruciale grondstoffen en werknemers productiever maken. Ook met het oog op de vergrijzing en de daarmee gepaarde kosten voor de zorg en de oude dag is het belangrijk dat we meer met minder mensen kunnen doen.

Investeren in technologie vereist naast kennisontwikkeling ook een industriële basis, aangezien deze sector meer investeert in R&D dan andere sectoren en bij uitstek is gelinkt aan productiviteitsgroei en onze internationale concurrentiepositie.[40] Gerichte investeringen in hoogwaardige technologieën en kennis- en innovatie ecosystemen helpt Nederlandse bedrijven bovendien om meer complexe en hoogwaardige producten en diensten te produceren. Hierbij moeten we specifiek letten op de uitdagingen en kansen van (deep tech) start-ups, scale-ups en innovatieve MKB-bedrijven, deze zijn namelijk extra kapitaalintensief en hoog-risicovol, maar in het algemeen ook extra R&D-intensief en kunnen de basis vormen voor het Nederlands verdienvermogen van de toekomst.[41]

Ook moeten we als klein land de (combinatie van) technologische niches vinden die wij als beste ter wereld kunnen produceren, zoals de lithografiemachines van ASML. Het gaat om niches die voortkomen uit onder meer onze kennispositie, (digitale) infrastructuur en publiek-private samenwerkingsverbanden. Daarnaast spelen ook onze dienstensector, wet- en regelgeving en internationale verbondenheid een belangrijke rol bij het innemen van hoogwaardige posities in waardeketens.

Maatschappelijk belang van technologie

Nieuwe technologie en de toepassing daarvan is essentieel voor het verbeteren van de brede welvaart en het behalen van onze transities. Onze levensverwachting, het comfort waarin we leven en de mogelijkheden die ons geboden worden, komen allemaal voort uit onderzoek en ontwikkeling over de afgelopen eeuwen.[42] Ook met een blik op de toekomst hebben nieuwe innovaties groot potentieel om onze levens te beïnvloeden en bij te dragen aan de oplossing van onze maatschappelijke uitdagingen.[43] Daarbij weten we dat voor de energietransitie en de transitie naar een circulaire economie, nieuwe technologische ontwikkelingen onmisbaar zijn als we deze willen bereiken met behoud van brede welvaart.[44] Deze uitdagingen zijn mondiaal en vergen dan ook dat wetenschappers, onderzoekers en innovatieve bedrijven uit de hele wereld met oplossingen te komen. De multilaterale aanpak en internationale samenwerking staat met de eerder genoemde geopolitieke ontwikkelingen, en daarmee het beschermen van kennis, echter onder druk.[45]

Nieuwe technologische ontwikkelingen, zoals de opkomst van kunstmatige intelligentie, dragen gevolgen met zich mee en leiden ook tot nieuwe ethische en maatschappelijke vraagstukken[46], waardoor technologisch leiderschap en maatschappelijke controle nodig is om de richting ervan te sturen.[47] De overheid heeft samen met kennisinstellingen, adviesraden, maatschappelijke organisaties en bedrijven de verantwoordelijkheid om de ontwikkeling van nieuwe (technologische) innovaties in goede banen te leiden, zodat deze positief bijdragen aan onze maatschappij. De ontwikkeling van nieuwe technologie speelt zich af op mondiaal niveau en gaat razendsnel. Door, samen met Europese partners, strategisch te investeren kunnen we voorkomen dat de ontwikkeling en

toepassing van deze technologieën worden overgelaten aan andere landen.[48] In de ontwikkeling en inzet van de geprioriteerde sleuteltechnologieën moet dus zorg worden gedragen dat deze naast hun positieve effecten ook geen significante schade doen aan het verdienvermogen, maatschappij en nationale veiligheid. Dit uitgangspunt sluit goed aan bij de Safe and Sustainable by Design aanpak die op dit moment nader wordt uitgewerkt in de EU.[49] Safe and Sustainable by Design is een werkwijze om duurzame stoffen en materialen te ontwikkelen met als doel dat ze geen schade toebrengen aan mens en milieu.[50]

Nieuwe sleuteltechnologieën zijn bovendien alleen succesvol als deze ook worden toegepast en daadwerkelijk hun weg weten te vinden naar de maatschappij. Technologieën moeten dan ook ontworpen worden voor een reële, complexe context, passend bij het gedrag van mensen en/of in industriële ecosystemen. Methodologieën voor mensgericht ontwerpen en ontwerpen voor maatschappelijke transformaties zijn daarvoor belangrijk. Daarom dient de maatschappelijk uitrol van technologieën gepaard te gaan in dialoog met maatschappelijke organisaties en met onderzoek naar de maatschappelijke acceptatie ervan. Sociale- en geesteswetenschappen kunnen hier bij uitstek een belangrijke rol spelen. Hierbij is het belangrijk dat onderzoek niet alleen plaatsvindt in en door kennisinstellingen en bedrijven, maar dat onderzoek ook samen met een breed scala aan partijen uit de samenleving wordt uitgevoerd (denk aan patiëntenverenigingen, scholen, consumentenverenigingen, waterschappen, enz.). Gezamenlijk met de koppeling tussen technische- en andere wetenschappen spreekt men van *interdisciplinair onderzoek*, dat van belang is bij complexe maatschappelijke uitdagingen.[51] Ook toegepaste onderzoeksorganisaties (TO2s) en praktijkgericht onderzoek spelen hier een essentiële rol in.

Conclusie analyse

De internationale race tussen verschillende machtsblokken om voorop te lopen in strategische technologieontwikkeling, voortgekomen uit zowel economische als geopolitieke belangen, zorgt ervoor dat de sterke internationale positie van Nederland op het gebied van technologie en innovatie onder druk staat. Ondanks de hoge kwaliteit van wetenschappelijk onderzoek, scoort Nederland lager wat betreft het aandeel publicaties op sleuteltechnologie, R&D investeringen, valorisatie, technisch geschoold personeel en achterblijvende randvoorwaarden voor economische activiteit. Om te voorkomen dat onze nationale veiligheid en toekomstig verdienvermogen in het geding komt en het maatschappelijk belang van technologieën niet langer gewaarborgd kan worden, is het voor Nederland zeer wenselijk hierop in te spelen en strategisch te investeren in technologie ontwikkeling. Voor het behoud van de *nationale veiligheid* binnen Europa verminderen we risicovolle strategische afhankelijkheden door binnen Europa onze rol te behouden en versterken en control points in waardeketens te verkrijgen. Voor ons toekomstig *verdienvermogen en concurrentiekracht* zullen technologische innovaties en ondernemerschap gestimuleerd moeten worden om kansen te creëren en productiviteit en de internationale concurrentiepositie te bevorderen. Om te zorgen dat technologieën en innovaties het *maatschappelijk belang* blijven dienen, is het realiseren van transities in (inter)nationale en interdisciplinaire samenwerking met wetenschappers, onderzoekers en innovatieve bedrijven onmisbaar, maar ook het controleren en sturen van de ethische en maatschappelijke vraagstukken die de opkomst van nieuwe technologische ontwikkelingen met zich mee brengt. Zo behouden en versterken we onze brede welvaart en zorgen we voor de meeste impact van technologieën in onze samenleving.

Beleidscontext

Nederland kan niet in alle technologieën een leidende positie innemen. Desondanks is de positie van Nederland en Europa in de steeds intensievere technologische strategische competitie essentieel in het veiligstellen van het toekomstig verdienvermogen, het oplossen van grote maatschappelijke vraagstukken en het borgen van de nationale veiligheid. Hieruit volgt dat de overheid vanuit een strategisch technologie-beleid gericht zou moeten investeren op een aantal geprioriteerde sleuteltechnologieën.

Een strategisch technologiebeleid bestaat uit een beleidsmix met generieke inzet om technologie-gedreven bedrijvigheid te stimuleren, een proactieve inzet op specifieke technologieën en strategische inzet waarbij gericht ingezet wordt op prioritaire technologieën met het oog op technologisch leiderschap. Op dit moment zijn directe investeringen in sleuteltechnologieën, zowel publiek als privaat, internationaal vergeleken beperkt.[52]

De Nationale Technologiestrategie helpt invulling te geven aan het strategisch technologiebeleid door verder te bouwen op de sterke generieke basis met inzet op de ontwikkeling, toepassing en opschaling van technologie met innovatiebeleid, ondernemerschapsbeleid, industriebeleid en digitaliserings-beleid.[53] In deze strategie wordt een aantal prioritaire sleuteltechnologieën geselecteerd met een sterke basis in Nederland die zowel economisch en maatschappelijk de meeste waarde creëren, als bijdragen aan de nationale veiligheid.
Een strategische inzet op investeringen in technologie heeft tot doel om onze economische en maatschappelijke weerbaarheid te vergroten, afhankelijkheden op het gebied van strategische producten, research & development (R&D), energie en grondstoffen te beperken, en onze nationale veiligheid te borgen. Essentieel is om naast de strategische inzet blijvend ook op de brede basis te investeren, om te voorkomen dat we blinde vlekken missen, en omdat vaak juist de combinatie van nieuwe of bestaande technologieën en wetenschappelijke inzichten zorgt voor nieuwe innovaties, producten en diensten. Deze combinatie van technologieën is veelal cruciaal voor de bijdrage aan het oplossen van maatschappelijke vraagstukken. De aanpak op het terrein van kennisveiligheid is in dit kader onmisbaar om ongewenste kennis- en technologieoverdracht te voorkomen.

Een brede basis voor innovatie: generiek beleid

Het kabinet stimuleert met het wetenschapsbeleid[54] en innovatiebeleid[55] wetenschappelijk en technologisch onderzoek en ontwikkeling. Daarbij is er specifiek oog voor impact[56] en valorisatie[57]. Met het ondernemerschaps-[58] en industriebeleid[59] wordt ingezet op het creëren van de juiste voorwaarden voor succesvolle opschaling van technologie- gedreven bedrijven, zodat we technologisch leiderschap kunnen verkrijgen. Daarbij is specifiek oog voor startups, scale-ups en het innovatief MKB, die zowel gevestigde bedrijven kunnen uitdagen als geheel nieuwe markten kunnen creëren voor een gezonde economische dynamiek.[60]

Daarnaast heeft het Kabinet de Tweede Kamer geïnformeerd over de hoofdlijnen van het digitaliseringsbeleid.[61] Dit digitaliseringsbeleid is erop gericht de kansen van de digitale transitie te stimuleren en te omarmen, op een manier waarmee onze publieke waarden veilig worden gesteld. In de hoofdlijnenbrief zijn de ambitie en doelen van het kabinet voor de digitale transitie van onze samenleving en economie geschetst rondom vier thema's: digitaal fundament, digitale overheid, digitale samenleving en digitale economie.[62] In de uitwerking van de NTS-agenda's zal moeten worden aangesloten bij staand digitaliseringsbeleid, voor zover relevant.

Strategisch Technologiebeleid

3 **De Nationale Technologiestrategie**
Strategische prioriteiten
Strategische inzet op prioritaire sleuteltechnologieën en daarbinnen specifiek de niches binnen markten & control points in waardeketens waar voor Nederland de grootste kansen liggen.

2 **Specifieke inzet**
Inzet op de 44 sleuteltechnologieën met het missiegedreven innovatiebeleid.

1 **Brede basis**
Inzet op ontwikkeling, toepassing en opschaling van technologie met innovatiebeleid, ondernemerschaps-beleid, industriebeleid en digitaliseringsbeleid.

Figuur 1. Strategisch technologiebeleid. Een grafische weergave van de diverse componenten binnen een mogelijk strategisch technologiebeleid.

Richting geven aan innovatie: specifieke inzet

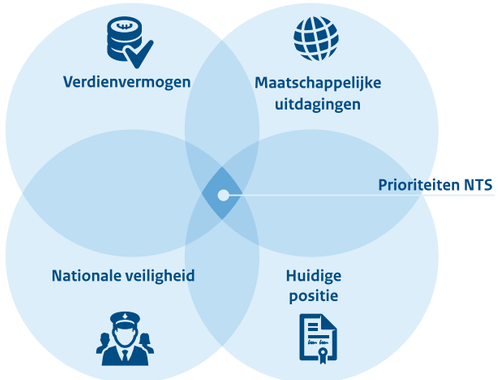
Naast het creëren van de juiste randvoorwaarden wordt er op technologieën ingezet waarin Nederland kan en wil excelleren, in de vorm van het stimuleren van onderzoek en ontwikkeling van de 44 sleuteltechnologieën[63] met de Kennis- en Innovatieagenda's binnen het missiegedreven innovatiebeleid.[64] Nederland staat voor een aantal grote maatschappelijke uitdagingen die een transitie vragen zoals het tegengaan van klimaatverandering, de energietransitie, de overgang naar een circulaire economie, het verbeteren van onze gezondheid en zorg, de transitie van ons voedselsysteem, en het vergroten van onze nationale veiligheid. Sleuteltechnologieën en met name combinaties daarvan zijn essentieel voor het oplossen van maatschappelijke uitdagingen en leveren een potentieel grote bijdrage aan de economie.
De verwachting is dat door te specialiseren en gericht in te zetten op sleuteltechnologieën nieuwe bedrijvigheid en markten sneller ontstaan en de concurrentiekracht van Nederland verbetert.
Met Europese partnerschappen, bijvoorbeeld via Horizon Europe, wordt eveneens beoogd het bereik, en daarmee de economische en maatschappelijke impact van (inter)nationale R&D-investeringen te vergroten. Bovendien kunnen we door mondiaal veilig en met wederzijds voordeel samen te werken de nieuwste innovaties absorberen en beschikbaar stellen voor onze bedrijven en maatschappij. Het Innovatie Attaché netwerk, actief in zestien belangrijke kenniseconomieën binnen en buiten Europa, speelt hierbij de belangrijke rol van makelaar en schakelaar.

Gericht inzetten op innovatie: strategische prioriteiten

Met deze Nationale Technologiestrategie is binnen de 44 sleuteltechnologieën een prioritering geselecteerd op een tiental technologieën. De prioritaire sleuteltechnologieën hebben een sterke basis in Nederland, dragen veel bij aan ons huidig en toekomstig verdienvermogen, het oplossen van maatschappelijke uitdagingen en het versterken van onze nationale veiligheid.
Voor deze prioritaire technologieën zijn met kennisinstellingen en het bedrijfsleven agenda's ontwikkeld om onze positie als technologisch leider te versterken of verkrijgen.[65] Hiervoor kiezen we een brede benadering, waarbij we allereerst een ambitie formuleren voor de ontwikkeling van deze technologie, en vervolgens uitleggen hoe we deze willen bereiken met behulp van deelambities (zie volgend hoofdstuk voor een uitgebreidere toelichting). Deze deelambities zijn opgesteld langs de lijnen van de 10 uitdagingen van de kabinetsstrategie "Versterken van onderzoeks- en innovatie-ecosystemen" die in 2020 met de Tweede Kamer is gedeeld.[66] Zo kiezen we een holistische aanpak, die rekening houdt met onder andere talent, wet- en regelgeving, financiering en organiserend vermogen.

De uitdaging is om juist die technologieën te selecteren die voor Nederland de grootste potentie hebben. Hiervoor zijn de prioritaire technologieën gekozen op basis van een combinatie van kwalitatieve en kwantitatieve data over enerzijds de huidige positie van Nederland op elke sleuteltechnologie en anderzijds de verwachtte impact van elke technologie op onze nationale veiligheid, ons huidig of toekomstig verdienvermogen en de maatschappelijke uitdagingen. Concreet is het volgende afwegingskader "Technologisch leiderschap" bij de selectie gehanteerd[67]:

- Welke sleuteltechnologieën leveren een belangrijke bijdrage aan het huidige en/of toekomstig economisch verdienvermogen van Nederland?
- Welke sleuteltechnologieën zijn van essentieel belang voor het aangaan van de maatschappelijke uitdagingen?
- Welke sleuteltechnologieën dragen bij aan de nationale veiligheid?
- Welke sleuteltechnologieën bouwen voort op aanwezige sterktes in wetenschap en technologie, R&D inzet en ecosystemen in Nederland?



In samenwerking met verschillende partners (TNO, NWO, Elsevier en RVO) zijn voor alle 44 sleuteltechnologieën gegevens verzameld en geanalyseerd. Vervolgens zijn de inzichten uit deze analyse getoetst bij een divers en groot aantal experts en stakeholders uit de wetenschap, het bedrijfsleven en investeerders. De bijlage beschrijft het proces hoe deze prioritering heeft plaatsgevonden.

Wat zijn sleuteltechnologieën?

Sleuteltechnologieën[68] zijn technologiegebieden waar Nederland een sterke wetenschappelijke positie op inneemt en waarin de komende jaren grote maatschappelijke en economische impact wordt verwacht. Deze technologieën kenmerken zich door een brede toepasbaarheid of bereik in innovaties en sectoren en maken de ontwikkeling van innovaties op de middellange termijn mogelijk. Ze zijn essentieel om maatschappelijke uitdagingen aan te gaan, de nationale veiligheid te versterken en een grote bijdrage te leveren aan de economie, mede door het ontstaan van nieuwe bedrijvigheid en markten.
De lijst van 44 sleuteltechnologieën is onderdeel van het missiegedreven innovatiebeleid en spelen een belangrijke rol in de kennis- en innovatieagenda (KIA) Sleuteltechnologieën, de sleuteltechnologieontwikkeling binnen de verschillende Topsectoren, het Nationaal Groeifonds en NWO-calls, en vormt de basis voor de inzet van regionale middelen en EU-cofinanciering. De lijst van 44 technologieën waar Nederland op inzet is opgedeeld in 8 technologiedomeinen, namelijk *Advanced materials, Photonics and optical technologies, Quantum technologies, Digital and information technologies, Chemical technologies, Nanotechnology, Life science and biotechnologies* en *Engineering and fabrication technologies*.

EU ontwikkelingen – Hoe verhoudt de Nationale Technologiestrategie zich tot Europees beleid?

Parallel aan de ontwikkeling van de Nationale Technologiestrategie in Nederland heeft de Europese Commissie in najaar 2023 een tiental kritieke technologieën geïdentificeerd[69] die van belang zijn voor de veiligheid van de EU. De Nationale Technologiestrategie heeft een breder afwegingskader ten opzichte van de Commissie, aangezien impact op verdienvermogen, maatschappelijke uitdagingen en huidige kennissterke eveneens criteria zijn voor het bepalen van een prioritaire technologie naast nationale veiligheid. In overeenstemming met de prioriteiten die in de Nationale Technologiestrategie zijn vastgesteld en de Agenda Digitale Open Strategische Autonomie[70], hecht Nederland echter veel waarde aan de aanpak van de Commissie[71].
De Commissie stelt dat gezien de huidige context van groeiende geopolitieke spanningen, economische integratie en snelle technologische vooruitgang, bepaalde economische afhankelijkheden en technologische ontwikkelingen tot risico's kunnen leiden. Daarom beoogt de Commissie begin 2024 van de eerste vier technologiegebieden risicoanalyses[72] uit te voeren om duiding te geven aan mogelijke kwetsbaarheden in samenwerking met lidstaten en input van het bedrijfsleven namelijk op 1) geavanceerde halfgeleidertechnologie, 2) artificiële intelligentietechnologie, 3) quantum technologie en 4) biotechnologie. Deze technologiegebieden hebben allen een hoog risicoprofiel in het kader van technologieveiligheid- en overdracht en hebben daarmee prioriteit. De risicoanalyses voor de overige zes technologieën[73] wordt in 2024 uitgevoerd. Eveneens is juni jl., Strategic Technologies for Europe Platform (STEP) aangekondigd door de Europese Commissie[74], om gerichte investeringen door bestaande[75] en nieuwe EU fondsen, in kritieke technologieën te stimuleren, namelijk op (1) deep and digital technologies, (2) clean technologies en (3) biotechnologies. Dit programma dient om de onafhankelijkheid, weerbaarheid en veiligheid van de Europese economie te versterken.

Prioritaire sleutel-technologieën

In het navolgende stuk volgen de agenda's die zijn uitgewerkt op de prioritaire sleuteltechnologieën. Deze agenda's bestaan uit drie delen, en bieden een eerste inzicht in de mogelijkheden voor doelgerichte investeringen in deze technologieën. Ze schetsen een overzicht van de technologieën, de betrokken partijen op nationaal en internationaal niveau, en potentiële ambities voor Nederland op deze technologieën. Hieronder volgt een beknopte toelichting op de opbouw van de agendas, de partnerschappen voor de opbouw en invulling van de agenda's, gevolgd door de agenda's.

Deel 1 – Definitie

In deel 1 'definitie' lichten we allereerst het belang van de sleuteltechnologie toe. Hierbij maken we gebruik van het afwegingskader van de NTS, en benoemen we langs deze vier lijnen waarom de technologie van belang is. Op basis van de definitie die in een eerdere fase is vastgesteld door TNO en NWO, is de volgende formulering aangepast waar nodig, met als referentie het betreffende rapport[76]. We benoemen hoe de sleuteltechnologie aan andere sleuteltechnologieën gerelateerd is, en geven grafisch aan hoe deze zich hiërarchisch gezien tot elkaar verhouden.

Deel 2 – Huidige positie

Voor de huidige positie lichten we het actuele beeld van de sleuteltechnologie toe. We beginnen met informatie over de ontwikkelfase van de technologie: wordt deze al grootschalig toegepast, of juist gekenmerkt door veel fundamenteel onderzoek? Daarnaast benoemen we de bestaande barrières voor verdere opschaling. We identificeren nationale en internationale actoren op het gebied van de technologie, waaronder kennis-instellingen, maatschappelijke organisaties en bedrijven. Indien relevant, benoemen we ook beleidsinitiatieven en (regionale) agenda's. We specificeren toepassingsgebieden van de technologie, en geven de impact aan op nationale veiligheid door te kijken naar dual-use toepassingen en ongewenste strategische afhankelijkheden. Als laatste eindigen we met een SWOT, waarin we op basis van het voorgaande een overzicht geven van de sterktes, zwaktes, kansen en bedreigingen die we zien voor de desbetreffende technologie.

Deel 3 – Ambitie

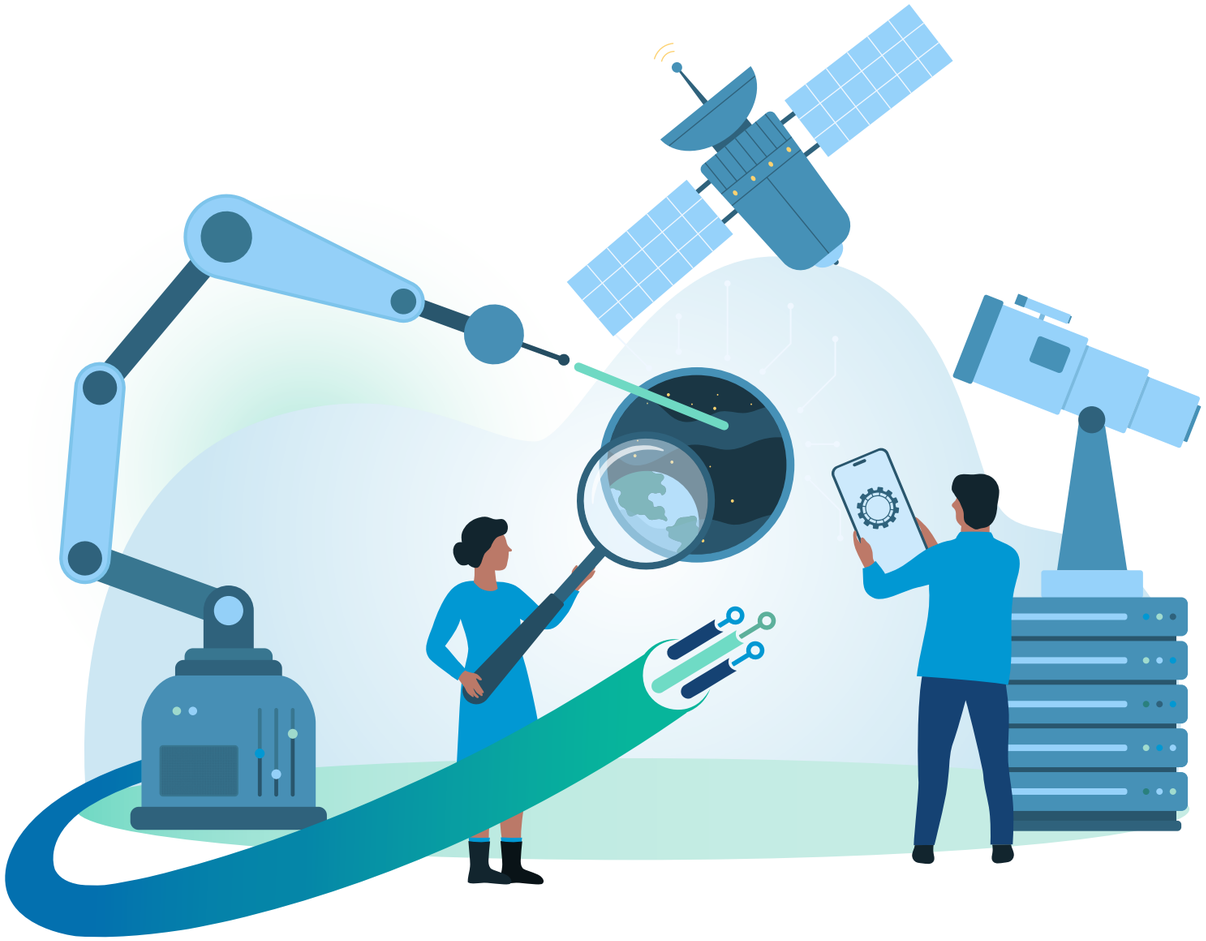
In deel 3 kijken we vooruit. We formuleren allereerst een zo concreet mogelijke ambitie: waar streven we naar met deze technologie in 2035? Hoe willen we het bedrijfsleven en kennisinstellingen actief op deze technologie positioneren? Hoe draagt dit bij aan het realiseren van maatschappelijke doelen en nationale veiligheid? Deze stip op de horizon pellen we vervolgens af aan de hand van de 10 langetermijnuitdagingen uit de kabinetsstrategie "Versterken van onderzoeks- & innovatie-ecosystemen"[77]. Voor deze in generieke zin geformuleerde uitdagingen, bekijken we: is deze relevant voor de desbetreffende sleuteltechnologie, wat is hierbij de uitdaging en wat willen doen of waar willen we naar toe om dit op te lossen?

Bijdragen aan de agenda

De agenda's zijn opgesteld door EZK en uitgebracht door het demissionaire kabinet. Hierbij is niet alleen gebruik gemaakt van de kennis en expertise van TNO en NWO, die als penvoerders van de agenda's een belangrijke rol hebben gespeeld, maar ook – en wellicht nog wel belangrijker – van onze partners in onderzoek & innovatie. Over verschillende agenda's heen hebben meer dan 100 experts uit kennisinstellingen, bedrijfsleven en andere relevante organisaties actief bijgedragen aan de uiteindelijke agenda's, waarbij TNO en NWO een actieve rol hebben gehad bij het aandragen en selecteren van experts. We zijn al deze experts zeer dankbaar en erkentelijk voor hun waardevolle input.

1 Optical systems and integrated photonics

In 2035 is Nederland wereldleider in het ontwikkelen en produceren van next-gen heterogeen geïntegreerde complexe systemen gebaseerd op optica en geïntegreerde fotonica. Door continu te innoveren groeien we sneller dan de concurrentie en dragen bij aan de nationale veiligheid en economische onafhankelijkheid.



1.1 Definitie

1.1.1 Belang van de sleuteltechnologie

Optical systems and integrated photonics is de technologie van het maken van optische systemen. De sleuteltechnologie bestaat uit twee delen met elk hun eigen kenmerken en ecosyste(e)m(en). De combinatie van beiden maakt geavanceerde en veelzijdige optische systemen mogelijk (zie hoofdstuk 1.2 voor meer uitleg over de verschillen). Er zijn talrijke kansen voor toepassing van deze sleuteltechnologie, zoals in lithografiesystemen, free form spiegels en lenzen, draadloze optische communicatie (denk hierbij aan bijvoorbeeld li-fi en laser satcom) en lighting.

Optical systems and integrated photonics is van cruciaal belang voor het toekomstige verdienvermogen en de nationale veiligheid. Nederland excelleert in optische en lithografische systemen voor de semiconductorindustrie – een stabiele groeimarkt met een CAGR van ca. 8%. Ook op het gebied van integrated photonics vervult Nederland een hubfunctie binnen Europa. Vanwege de toepassingen van geavanceerde chips in militaire en andere veiligheidstoepassingen en de nauwe relatie met de halfgeleiderindustrie zijn deze ook van belang voor onze nationale veiligheid: risicovolle strategische afhankelijkheden dienen zoveel mogelijk te worden vermeden.

Optical systems and integrated photonics kunnen een rol spelen bij het aanpakken van maatschappelijke uitdagingen, vooral in het streven naar energiezuinige toepassingen. Hoewel Nederlands onderzoek op dit gebied binnen Europa toonaangevend is, moet worden erkend dat we nog niet op het niveau van de VS en Japan opereren. Nederland heeft echter geïnvesteerd en een leidende positie opgebouwd in de industrialisatie van deze technologie, met een end-to-end waardeketen binnen Europa. Het is essentieel om voortdurend te investeren in het verbeteren van de bestaande infrastructuur naar wereldklasse niveau. Onder andere de EU Chips Act biedt hiertoe kansen. Momenteel wordt er bijvoorbeeld gewerkt aan een aanvraag voor een geïntegreerde Europese fotonica pilot line, waarbinnen Nederland kan fungeren als Europese hub voor fotonica.

De ontwikkelingen in draadloze optische technologie voor lasercommunicatie tonen veelbelovende resultaten in testomgevingen en worden nu gedemonstreerd in verschillende omgevingen, met name waar veiligheid een prioriteit is, zoals militaire bases. De stap naar industrialisatie van deze technologie zou de komende jaren mogelijk moeten zijn.

1.1.2 Definitie

Optical systems zijn geconstrueerde systemen om licht te breken, te weerkaatsen of te manipuleren om bepaalde optische functies te vervullen. Zo is bijvoorbeeld communicatie mogelijk met fotonen als informatiedrager. Geïntegreerde fotonica is de technologie die verschillende fotonische functies (genereren, moduleren, detecteren, etc.) integreert in één functionele fotonische chip, op een zogeheten Fotonisch Geïntegreerd Circuit. Systeemintegratie is een belangrijk element in de toepassing van geïntegreerde fotonica.[78]

Hoewel zowel *geïntegreerde fotonica* als *optical systems* vergelijkbaar zijn doordat ze zich beide richten op lichtverwerking, is er een duidelijk onderscheid tussen de volwassenheid van de sleuteltechnologieën, de toepassingen en de schaalbaarheid. Ook binnen *optical systems* heeft elk ecosysteem een andere volwassenheid van de technologie. In de volgende hoofdstukken behandelen we deze sleuteltechnologie daarom als twee deel sleuteltechnologieën met elk hun eigen ecosystemen. Hieronder volgt een korte beschrijving van de eigenschappen per deel sleuteltechnologie.

Optical systems

- kent verschillende subtechnologieën en toepassingen met elk hun eigen (potentiële) ecosysteem;
- volwassenheid van de technologie: grootschalige productie en gebruik voor optische systemen vindt plaats, maar ook zijn er nieuwe ontwikkelingen met een laag TRL level;
- de toepassingen: breed scala aan toepassingen;
- de schaalbaarheid: Ook de schaalbaarheid varieert erg voor deze sleuteltechnologie. Optische systemen kennen een grote omvang en complexiteit, waardoor het aanpassen of afstellen voor opschaling een uitdaging is. Daarnaast kent het ook eenvoudig op te schalen toepassingen, zoals optical fibers.

Geïntegreerde fotonica

- volwassenheid van de technologie: kleinschalige niche toepassingen, met uitzondering van telecom en en datacom waarbij een gestage groei is te zien.
- de toepassingen: generieke en specifieke toepassingen in communicatie en sensing, bijvoorbeeld, transceivers in de telecommunicatie en datacommunicatie (generiek) en biosensoren voor de agrovoedingssector (specifiek).
- de schaalbaarheid: het integreert optische functies op één chip, vergelijkbaar met elektronische schakelingen, hierdoor is de schaalbaarheid van optische functies op een chip vanwege 'wafer-scale' productie zeer hoog en de kosten naar verhouding laag. Technologie uit *optical systems* is nodig voor verdere opschaling van geïntegreerde fotonica.

1.1.3 Gerelateerde sleuteltechnologieën

Binnen het domein van fysische optica delen *Photonic/Optical detection and processing* en *Photon generation technologies* een gemeenschappelijke kennisbasis. Beide sleuteltechnologieën bevinden zich in dezelfde discipline en hebben een overlappend netwerk van wetenschappers en expertise, met ook een gedeeld focuspunt op *Meta materials*, met name *optical metamaterials*.
Het bouwen van complexe systemen voor *optical systems* vereist bovendien expertise op het gebied van *Mechatronics and Optomechatronics*, waarbij op systeemniveau dezelfde kennis wordt gedeeld, zij het met specifieke componenten die kunnen variëren. Naast deze discipline gerelateerde technologieën zijn er ook complementaire sleuteltechnologieën, zoals *Semicon technologies*, *Functional Devices and Structures (on nanoscale)*, *Quantum Communication*, *Quantum Sensing* en *Quantum Computing*. Ondanks verschillende disciplines kunnen deze technologieën in hetzelfde systeem worden toegepast, bijvoorbeeld door gebruik te maken van losse weerstanden, coatings (op nanoschaal) en quantum-toepassingen zoals internet, sensing en computing. Het is van belang op te merken dat deze lijst niet uitputtend is, gezien de voortdurende ontwikkelingen binnen deze technologische domeinen.

1.2 Positie, sterktes/zwaktes

1.2.1 Ontwikkelingsfase technologie

Deze technologie bevindt zich in een dynamische ontwikkelingsfase, waar Nederland fungeert als een hub voor demonstraties en innovatie, vooral via start-ups uit kennisinstellingen.
Op nationaal en wereldwijd niveau wordt de technologie reeds toegepast in eerste quantumtoepassingen, de gezondheidszorg (medische apparatuur), AR/VR en in de digitale infrastructuur middels optische vezelsensoren.

Ondanks veelbelovende ontwikkelingen zijn er uitdagingen zoals technologische complexiteit, kosten, regelgeving, privacy, acceptatie in de industrie en interdisciplinaire samenwerking. Een gebalanceerde aanpak van innovatie, standaardisatie en samenwerking is cruciaal om obstakels te overwinnen en de volledige potentie van optische technologieën te benutten.

1.2.2 Internationale positie en omvang

Internationaal: De internationale clusters buiten Europa (75%) voor zowel *optical systems and integrated photonics* zijn verspreid over Azie (54%, waaronder China, Japan, Taiwan, Zuid-Korea) en Noord-Amerika (21%, waaronder VS).[79,80] In Noord-Amerika en Azië vinden ook samenwerkingen plaats tussen organisaties, zoals de optica-industrie in de VS[81] en kennisinstellingen als Massachusetts Institute of Technology. De wereldmarkt voor deze sleuteltechnologie bedroeg in 2020 meer dan 300 miljard, met toepassingen die werden verkocht in diverse markten.[82] Deze markt wordt gedeeld met andere relevante sleuteltechnologieën.

Europa: Het cluster binnen Europa (24%, waaronder Duitsland, UK, Frankrijk, Italië) heeft Duitsland als grootste speler.[83,84] Europa heeft een sterke organisatiegraad met veel internationale clusters, vooral gunstig voor academische instituten en onderzoeks-organisaties. Ook wordt er samenwerking opgezocht door Nederlandse bedrijven met Fraunhofer (Duitsland), Tyndall National Institute (Ireland), VTT (Finland), CEA-Leti (Frankrijk) en IMEC (Belgium).

Hoewel Nederland zich onderscheidt van de meeste landen als het gaat om de prestaties van producten, productiesystemen en complementaire producten en diensten voor *optical systems and integrated photonics*, blijven wereldwijde spelers zoals Duitsland, Frankrijk, het VK, de VS en Japan over het algemeen sterker op dit gebied.

- **Belangrijke EU-clusters:** Photonics21[85], EPIC Association [86], PhotonHub Europe[87].
- **EU beleidsinitiatieven:** EU Chips-Act[88,89], *Horizon Europe R&D*[90]
- Internationale onderzoeks- en innovatienetwerken:
  - SPIE Photonics West cluster bijeenkomst[91]
  - Photonics21[92]
  - Laser world of Photonics(*beurs*)[93]
  - IPSRI[94]
  - AIM photonics[95]
  - LiFi[96]

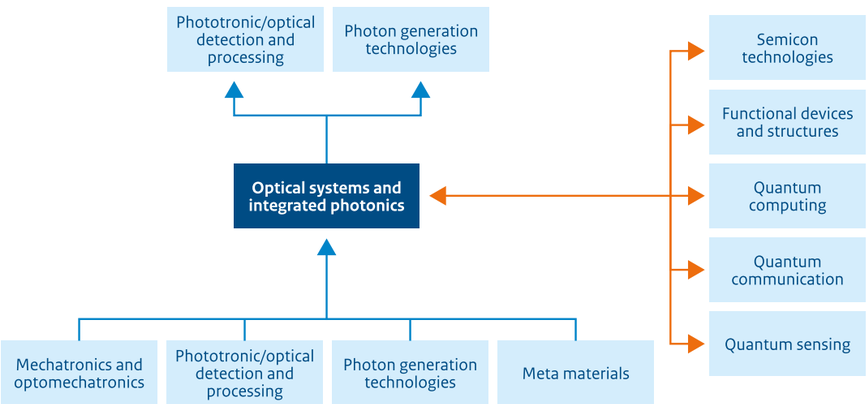
1.2.3 Nationale positie en omvang

Leidende samenwerkingsverbanden in Nederland zijn PhotonicsNL, Optics Netherlands en PhotonDelta, waarbij PhotonicsNL zich richt op de gehele sleuteltechnologie, Optics Netherlands specifiek op *optical systems* en PhotonDelta specifiek op geïntegreerde fotonica.

Een ander invloedrijke partij is de topsector High Tech Systemen en Materialen (HTSM). De waardeketens voor beide deeltechnologieën zijn cruciaal, omdat partijen in deze ketens onderling afhankelijk zijn om innovatieve optische technologieën en/of geïntegreerde fotonica chips van onderzoek naar praktische toepassingen te brengen.

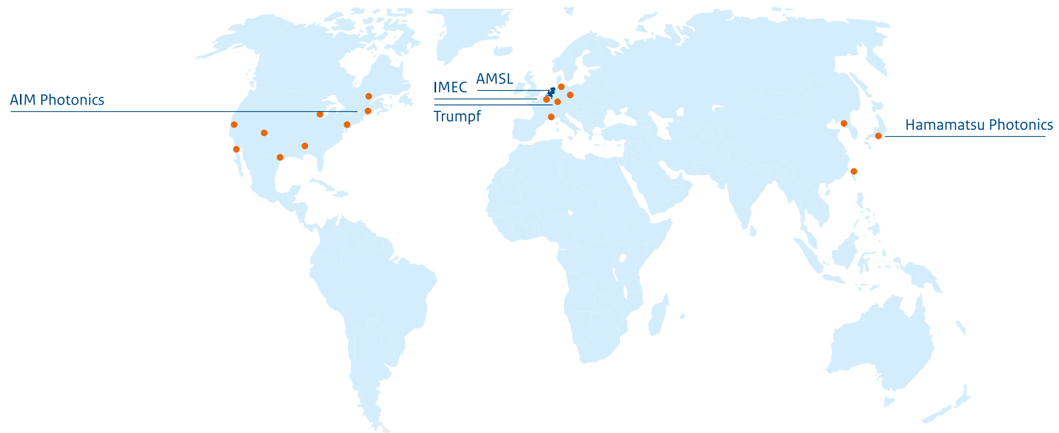
- **(Nationale) agenda:** Nationale Agenda Fotonica (2020-2023) voor *optical systems and integrated photonics*, Topsector High Tech Systemen en Materialen (een roadmap Fotonica[97] en een roadmap lighting[98]). Er vinden bijeenkomsten plaats voor het maken van een vervolg agenda.
- **R&D-investeringen:** PhotonDelta Nationaal Plan Geïntegreerde fotonica (€240Mio), PhotonDelta Nationaal groeifonds[99] (€1.1 Miljard), LaserSatCom binnen NextGen HighTech Nationaal Groeifonds (€42 Mio publiek), Twente Foundry[100] 3-6 miljoen, Synoptics[101], Optical wireless superhighways[102], freeform scattering optics[103], lensless imaging of 3D nanostructures[104] en jaarlijks 5 miljoen vanuit NWO voor onderzoek bij universiteiten, deels ook de Semiconductor Equipment Roadmap[105].
- **Internationale samenwerking:** Voor geïntegreerde fotonica zijn Duitsland, Taiwan, Japan en de VS relevante handels- en samenwerkingspartners. Verder zijn voor *optical systems* toeleverketens van ASML-subsystemen van belang (m.n. in Duitsland, bijv. TRUMPF en Karl Zeiss) en van draadloze optische communicatie (bijvoorbeeld Airbus). Frankrijk is op het gebied van educatie en onderzoek een belangrijke speler. Ook is er samenwerking met de VS, waarbij de oriëntatie van de VS ligt op militaire toepassingen en ruimtevaart, terwijl in Nederland de focus ligt op lithografische machines, satellietcommunicatie, ruimtevaartinstrumenten, en spectrometers. Hier zijn de toepassingsgebieden anders, maar de kennis complementair. Belangrijke nationale instituten en bedrijven spelers worden weergegeven in de ondertstaande figuur.

Gerelateerde sleuteltechnologieën



Bron: TNO/NWO (2023) Herijking sleuteltechnologieën

Illustratie van enkele toonaangevende voorbeelden clusters en organisaties



1.2.4 Specifieke toepassingsgebieden

- **EUV- en DUV-lithografie voor Geavanceerde Elektronica:** EUV- en DUV-lithografie, gebruikt in moderne elektronica, maakt productie van zeer kleine en complexe halfgeleidercomponenten mogelijk.[106] ASML leidt hierin met hun unieke gebruik van zowel EUV- als DUV-lithografie, waarmee ze een ongeëvenaarde technologische voorsprong hebben.[107]
- **Sensing met Fotonische Technieken:** Geavanceerde fotonische sensing mogelijkheden optimaliseren processen, bijvoorbeeld in de agri & food sector. Agri-fotonica, zoals sensoren en belichting, wordt gebruikt voor efficiënte plantengroei. Avantes spectroscopie-oplossingen worden ingezet bij oogsten en mestverdeling[108], wat verfijnde monitoring en procesverbeteringen mogelijk maakt.
- **Fotonica in de Gezondheidszorg:** Fotonica draagt bij aan de gehele zorgketen, van preventie tot thuiszorg. Voorbeelden zijn digitale pathologieoplossingen van Philips, non-invasieve screenings met Photonic Integrated Circuits[109,110] en FLIM-camera's van Lambert Instruments[111] die de effectiviteit van chemotherapie snel meten.
- **Cruciale Rol van Fotonica in Communicatie:** Fotonica speelt een cruciale rol in fibercommunicatie en optische draadloze (satelliet)communicatie, waarbij informatie via lichtpulsen over grote afstanden wordt verzonden. Dit is essentieel voor telecommunicatie en militaire communicatie. Li-Fi, met fotonica als basis, biedt draadloze communicatie via zichtbaar licht en heeft potentieel voor defensie vanwege veilige en storingsbestendige lichtsignalen, ook in elektromagnetisch gevoelige omgevingen.[112,113] Het vermindert ook het energieverbruik in datacenters.

1.2.5 Risico's voor de nationale veiligheid

Toepassingen van *optical systems and integrated photonics* kunnen leiden tot risico's voor de nationale veiligheid, bijvoorbeeld wanneer deze technologieën worden ingezet voor militaire toepassingen. Een voorbeeld hiervan zijn autonome wapensystemen met geïntegreerde fotonica en optische sensoren. Er zijn veel militaire toepassingen mogelijk omdat licht snel is, veel waarneemt en niet-invasief is.

Er is ook sprake van een strategisch belang. Optical systems zijn nu al volop in gebruik en integrated photonics zullen in de toekomst naar verwachting een belangrijk onderdeel van onze economie vormen. Beide technologieën kennen internationale waardeketens en een wereldwijde afzetmarkt, ten dele verweven met de halfgeleiderwaardeketen, waardoor er ook kans is op een vergelijkbare specialisatie en consolidatie. Ook zijn er voor de productie van *optical systems and integrated photonics* soms bepaalde kritieke materialen nodig (bijvoorbeeld: Indium Phosphide (InP)) die niet breed voorradig zijn.

Aandacht voor disproportionele afhankelijkheden in de waardeketen van *optical systems and Integrated photonics* is dus belangrijk. Niet alle afhankelijkheden zijn problematisch. Alleen daar waar de risico's voor het publiek belang hoog zijn, kan aanvullend handelen vereist zijn. Dit behoeft een genuanceerde kwantitatieve én kwalitatieve analyse van op het niveau van specifieke waardeketens. Het kabinet zal bezien in hoeverre hierbij kan worden aangesloten op de risicoanalyses van kritische technologiegebieden die de Europese Commissie uitvoert in het kader van de Europese Economische Veiligheidsstrategie, of dat nadere eigen analyse nog nodig is. Zoals ook gecommuniceerd in de Kamerbrief Voortgang Strategische Afhankelijkheden van 15 december 2023 kan vanwege de vertrouwelijke en kwetsbare aard van deze analyses op de voortgang hieromtrent niet verder op worden ingegaan.

1.2.6 SWOT

Optical systems

- **Sterktes:** De synergie tussen mechatronica en optica maakt ASML mondiaal toonaangevend in lithografie. Een vruchtbare samenwerking tussen Nederlandse universiteiten en een uitgebreid internationaal netwerk versterken het ecosysteem.
- **Zwaktes:** Nederlandse bedrijven beheersen niet alle deel-technologieën, waardoor het lastig is de groei van grote spelers bij te benen. Er is een tekort aan educatie op alle niveaus, en het naderende pensioen van experts zonder vervanging vormt een zorg.
- **Kansen:** De wereldwijde markt voor deze technologie groeit. De internationale bekendheid van Nederland en samenwerking met internationale partners bieden uitgebreide afzetmogelijkheden.
- **Bedreigingen:** Geopolitieke keuzes, supply chain issues, en regelgeving zoals toekomstige verboden kunnen zowel bedreigingen als kansen voor innovatie met zich meebrengen.

Sterkte	Zwakte
• goede samenwerking, ook internationaal • innovator	• groei is lastig bij te houden • te weinig educatie
Kans	**Bedreiging**
• grote afzetmarken	• geopolitieke keuzes en beslissingen

Integrated photonics

- **Sterktes:** De focus op specifieke materiaalplatforms, zoals siliciumnitride en indiumfosfide, en een goed georganiseerd ecosysteem met samenwerking tussen bedrijven en universiteiten, vormen sterke punten.
- **Zwaktes:** Integratie met hoogvolumeplatforms, met name Silicon Photonics, is een uitdaging. De waardeketen heeft weinig grote internationaal georiënteerde bedrijven, wat de kwetsbaarheid vergroot.
- **Kansen:** Nederland loopt voorop met specifieke toepassings-gerichte innovaties voor geïntegreerde fotonica en geniet internationale erkenning.
- **Bedreigingen:** Kleine bedrijven worden gemakkelijk opgekocht door buitenlandse partijen. Er is elders meer durfkapitaal beschikbaar en de Wet Vifo biedt slechts gedeeltelijke bescherming tegen ongewenste zeggenschap door middel van overnames. Daarnaast zijn er tekorten aan mensen met de juiste competenties en cruciale materialen.

Sterkte	Zwakte
• goede organisatie en goede technologiebasis	• integratie met hoog volume platformen • smalle waardeketens van kleine spelers
Kans	**Bedreiging**
• internationale bekendheid	• buitenland meer durfkapitaal

1.3 Ambitie

1.3.1 Hoofdambitie

"In 2035 is Nederland wereldleider in het ontwikkelen en produceren van next-gen systemen gebaseerd op optica en geïntegreerde fotonica. Door continu te innoveren groeien we sneller dan de concurrentie en dragen we bij aan de nationale veiligheid en economische onafhankelijkheid."

1.3.2 Deelambities

De hoofdambitie is verder uitgewerkt in deelambities. Voor het versterken van onderzoeks- en innovatie ecosystemen heeft het Kabinet in 2021 tien uitdagingen geïdentificeerd. De deelambities zijn langs deze lijnen uitgewerkt, voor zover relevant.

Lange termijn blik en samenhang bij investeringen in onderzoek en innovatie

De verschillende roadmaps, inhoudelijke agenda's en programma's kunnen beter op elkaar afgestemd worden. Activiteiten sluiten nog niet op elkaar aan en versterken elkaar nog niet volledig. Daarnaast is er geen lange termijnvisie voor structurele ondersteuning van de bestaande initiatieven.

Deelambitie: Er wordt op korte termijn een overkoepelende agenda voor de lange termijn ontwikkeld met heldere missie, visie, aanpak, structurele financiering en ondersteuning vanuit de overheid. Hiermee kunnen Optics Nederland, PhotonDelta en PhotonicsNL ook in de toekomst de ecosystemen verder ontwikkelen. Onderdeel van deze agenda is ook het beschikbaar stellen van personen middels overheidsfinanciering om te ondersteunen en contact te onderhouden met alle belanghebbenden, naar voorbeeld van PhotonDelta.

Investeringen in onderzoeks- en testfaciliteiten

Nederland kent een prima infrastructuur van onderzoeks-faciliteiten, onder andere bij de UT en de TUE. De infrastructuur voor pilot-, test- en productiefaciliteiten (PTPF) moet echter verder ontwikkeld worden. Hoewel er al enkele faciliteiten bestaan, ligt in Nederland de focus teveel op de korte termijn businesscases, wat de financiering van dergelijke faciliteiten bemoeilijkt. Ook wordt hierdoor geen rekening gehouden met financiering voor onderhoud. De bestaande infrastructuur en faciliteiten sluiten ook onvoldoende aan op de aanwezige roadmaps en agenda's.

Deelambitie: In 2035 heeft Nederland state-of-the-art PTPF. De continuïteit hiervan is gewaarborgd via structurele financiering en houd ook rekening met onderhoud van PTPF voor de lange termijn. Deze PTPF sluiten aan op de huidige roadmaps en worden gebundeld in één samenwerkingsstructuur (een voorbeeld hiervan is Imec[114]).

Financiering voor startups en scale-ups: vroege fase financiering en doorgroei

Het is lastig om privaat kapitaal aan te trekken voor grotere projecten. Het uitzetten van grote opdrachten via aanbesteding door de overheid bij innovatieve bedrijven wordt onvoldoende gedaan. Ook staat durfkapitaal voor deeptech in Nederland nog in de kinderschoenen. Er is daardoor te weinig durfkapitaal beschikbaar. Investeerders hebben vaak niet de achter-grond en beperkte kennis om goed te kunnen beoordelen of een investering zal renderen.

Deelambitie: In 2035 heeft de overheid succesvol grootschalige aanbestedingsopdrachten gerealiseerd, waarmee de innovatie-kracht aanzienlijk is toegenomen. Dit heeft geleid tot een bloeiende samenwerking tussen een divers scala aan industriële partners, waaronder startups en scale-ups. Tevens is het investeringsklimaat ingrijpend verbeterd, mede dankzij de verhoogde aandacht voor de sector en gerichte ondersteuning van startups en scale-ups (een voorbeeld hiervan zijn fiscale regelingen voor personeel van start ups).

Betrekken van gebruikers bij onderzoek en innovatie en marktcreatie
De samenwerking met eindgebruikers kan worden verbeterd, met name bij geïntegreerde fotonica. Het PITC/Holst Centre en deelnemende bedrijven zetten belangrijke stappen. Samenwerken met onderzoeksinstituten, zoals bijvoorbeeld ASML dat doet, kan hier ook in belangrijke mate aan bijdragen. Door deze samenwerkingen kan de leercurve van onderzoek naar produceren worden verkort en de productie versneld worden opgeschaald. Ook kan dit bijdragen aan het overbruggen van ontwikkeling naar toepassing. Echter, de mogelijkheid om dit te kunnen co-financieren is in de praktijk beperkt.

Deelambitie: Via gerichte samenwerking tussen overheid, bedrijven en onderzoeksinstellingen kunnen gebruikers ook beter worden betrokken. De overheid kan hierbij ook meer als launching customer optreden om de stap van ontwikkeling naar toepassing te overbruggen. Zo kan de overheid gezien worden als partner voor missiegedreven innovatie. De overheid financiert dit aan de voorkant en verbetert ook het financieringsklimaat voor launching customers.

Vaardigheden en absorptiecapaciteit in het MKB
Voor het MKB is het lastig om innovaties op te kunnen nemen in hun productstrategieën, want het overbruggen van de mid TRL en mid MRL [115] is kapitaalintensief. Er bestonden regelingen, zoals het IOP, om het MKB te helpen het mid TRL en mid MRL te overbruggen. Deze ontbreken op dit moment.

Deelambitie: Het innovatie instrumentarium wordt op korte termijn aangepast waardoor er een sterkere focus ligt op innovatie in productie. Het bedrijfsrisico wordt hiermee voor veel MKB partijen afgedekt doordat ze productielijnen kunnen ontwikkelen met onder andere kapitaal vanuit de overheid. Het instrumentarium wordt geïnspireerd door de aanpak van andere landen, waaronder Duitsland.

Ontwikkelen, aantrekken en behoud van (top)talent
Universiteiten en bedrijven hebben grote moeite met het aantrekken van geschoold personeel dat aansluit op specifieke technische kennisvragen. Ondersteuning vanuit de overheid voor coördinatie ontbreekt ook om dit te laten slagen. Ook zijn er in Nederland geen specifieke opleidingen (op MBO/HBO en WO niveau) voor deze technologie. Naast educatie is het lastig personeel aan te trekken vanuit het buitenland en is ook het behouden van personeel moeilijk.

Deelambitie: In 2035 zijn er specifiek opleidingen (op MBO/HBO en WO niveau) gecreëerd voor *Optical systems and integrated photonics* gezamenlijk met kennisinstellingen en bedrijven. Dit wordt door de overheid gestimuleerd en deze opleidingen zijn ook voor buitenlandse studenten aantrekkelijk doordat ze volledig in het Engels te volgen zijn. Nederland blijft daarnaast aantrekkelijk voor talent door voordelen voor kenniswerkers uit het buitenland, bijvoorbeeld via de 30% expat regeling.

Versterken van kennisoverdracht en het valorisatieproces voor meer impact
Kennis blijft nu veel op de plank liggen bij kennisinstituten. Het ontbreekt aan standaarden en richtlijnen (vanuit de overheid) voor o.a. de overdracht van IP vanuit universiteiten naar spin-offs, licenties en de vergoedingen die worden gevraagd (o.a. aandelen). Ook kennisoverdracht van universiteiten naar de grotere bedrijven loopt soms moeilijk. Er zijn vaak intensieve discussies over het eigenaarschap van IP en welke waarde toebedeeld wordt aan IP bij overdracht naar een bedrijf.

Deelambitie: In 2035 zijn er duidelijke standaarden en richtlijnen opgesteld door de overheid voor het meegeven van IP aan spin-offs en over de waarde van IP bij overdracht aan bedrijven.

Verbindingen tussen ecosystemen
Het is essentieel om breder te kijken dan het huidige ecosysteem om de marktpositie van innovatieve producten in het buitenland te versterken en de eigen positie te bewaken. Ook kan de aansluiting op aangrenzende waardeketens binnen Nederland worden verbeterd. Voor bijvoorbeeld chip- en systeemdesign voor *integrated photonics* is dit nog volop in ontwikkeling. De kennis is hierdoor enkel gefragmenteerd aanwezig.

Deelambitie: In 2035 zijn de ecosystemen van *integrated photonics* en *optical systems* goed met elkaar verbonden door een grensoverschrijdende aanpak. Onderdeel hiervan is het verbinden van verschillende NGF projecten (zoals quantum en NGHT), het in kaart brengen van strategische samenwerkingen met buitenlandse partners, zoals die van ASML (NL) en Zeiss (DE) en het voorkomen van handelsrestricties met het buitenland om waardeketens veerkrachtig te houden.

Geraadpleegde deskundigen

Experts
- Bart Snijders (TNO)
- Paul Schuddeboom (NWO)
- Ton van Mol (TNO/Holst Centre)
- Stefan Bäumer (TNO)

Deelnemers Ronde tafel 1
- Ewit Roos (PhotonDelta)
- Joanne Wilson (TNO)
- Kees Buijsrogge (TNO)
- Benno Oderkerk (PhotonicsNL)
- Wilbert Ijzerman (Signify)
- Albert Hasper (PHIX)
- Joachim de Sterke (PhotonVentures)
- Niel Truyens (Airbus)
- Sjoerd Stallinga (TU Delft)
- Maarten Voncken (ASML)
- Guus Rijnders (UT Twente)
- Maarten Wellens (Smart Photonics)
- Ton van Mol (TNO/Holst Centre)

Deelnemers Ronde tafel 2
- Ewit Roos (PhotonDelta)
- Joanne Wilson (TNO)
- Anke Peters (TUD/OpticsNL)
- Benno Oderkerk (PhotonicsNL)
- Joachim de Sterke (PhotonVentures)
- Niel Truyens (Airbus)
- Maarten Voncken (ASML)
- Guus Rijnders (UT Twente)
- Maarten Wellens (Smart Photonics)
- Ton van Mol (TNO/Holst Centre)

2 Quantum technologies

In 2035 is het Nederlandse Quantum ecosysteem van wereldklasse, op zowel academisch als industrieel gebied, en een internationale magneet voor bedrijvigheid en talent. Nederland is een gidsland met control points in internationale waardeketens voor alle drie de beschreven technologiegebieden, met spelers die concurreren op internationaal niveau.

2.1 Definitie

2.1.1 Belang van de sleuteltechnologie

Quantum technologieën (Computing, Communication en Sensing) worden op de lange termijn cruciaal voor ons verdienvermogen, veiligheid, en zullen oplossingen mogelijk maken in bijv. sectoren zoals energie, gezondheid en (cyber) veiligheid. *Quantum computing* maakt berekeningen mogelijk die met klassieke computers ondenkbaar zijn, bijvoorbeeld voor het begrijpen van moleculair gedrag en het ontwikkelen van nieuwe materialen. *Quantum communication* maakt veilige langeafstands-communicatie mogelijk. *Quantum sensing* stelt ons in staat tot ongekend nauwkeurige metingen.

Om een belangrijke rol te spelen in de markt voor Quantum moet Nederland haar vooraanstaande positie behouden en uitbreiden.[116] De marktpotentie is meer dan een biljoen in 2035 en er is een grote samenhang tussen andere (opkomende) technologieën en quantum. Daardoor zal de ontwikkeling van quantum technologie spillovers hebben naar andere industrieën. Voor de ontwikkeling van quantum technologieën zijn ook stappen nodig in bijvoorbeeld elektronica, fotonica, metrologie en high performance computing.

De wetenschappelijke positie van Nederland voor quantum is van wereldklasse. Investeringen komen vooral uit Nationaal Groeifondsmiddelen (Quantum Delta NL) en kennisinstellingen. Techgiganten met een focus op quantum (zoals in de VS) ontbreken, net als voldoende durfkapitaal. Het consolideren van een positie in de mondiale waardeketen is cruciaal en draagt bij aan het voorkomen van ongewenste risicovolle strategische afhankelijkheden. Als Nederland samen met partnerlanden als Frankrijk en Duitsland doorbouwt aan een Europese hub voor quantum, is de kans groot dat Europa de standaard zet voor onderdelen van quantumtechnologie en een quantumindustrie kan opbouwen met een serieuze bijdrage en impact in de mondiale en Europese quantum waardeketen.

2.1.2 Definitie

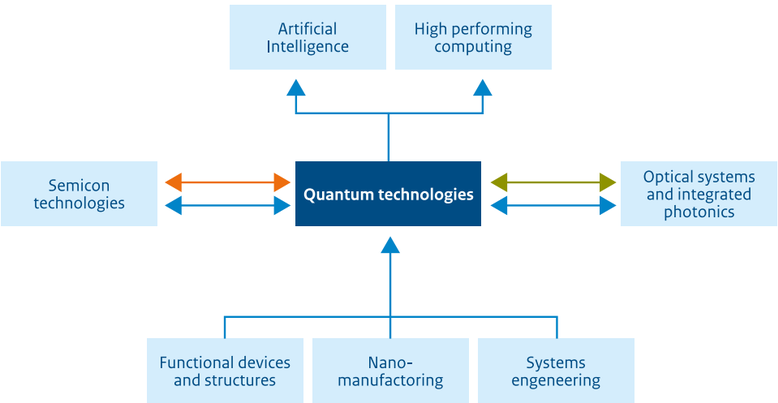
Quantum technologieën maken gebruik van het duale karakter van de kleinste deeltjes die we kennen, zoals fotonen, atomen en elektronen, maar ook van vergelijkbare systemen die quantum eigenschappen vertonen. Deze systemen kunnen zuivere quantum toestanden aannemen. De kleinste deeltjes vertonen het niet-lokale gedrag, en quantum toestanden kunnen verstrengeld zijn. Hierdoor ligt de weg open naar de quantum computer (met bijbehorende quantum software), quantum communication en quantum sensing. Een quantum bit (eenheid van digitale informatie) kan tegelijk 0 en 1 zijn. Hierdoor kunnen berekeningen op andere wijzen worden uitgevoerd, waarmee oplossingen voor complexe vraagstukken gevonden kunnen worden. Voor de meeste toepassingen zullen quantum computers hybride samenwerken met klassieke (high performance) computers.

2.1.3 Gerelateerde sleuteltechnologieën

Quantum technologie bouwt voort op een aantal complementaire technologieën (de blauwe pijlen). Voor het ontwikkelen van quantum chips (computing) en quantum sensoren zijn de kennis en infrastructuur uit de nanotechnologie onmisbaar (*Functional devices and structures en nanomanufacturing*). Quantum systemen kennen een bijzonder hoge complexiteit, voor omgang met deze complexiteit is *Systems engineering* essentieel.

Quantumtoepassingen zullen in toenemende mate kennis uit *semicon technologies* gebruiken voor het ontwerp van chips en systemen. Ondersteunende en samenwerkende klassieke chips zijn nodig voor quantumtoepassingen. (On chip) hybride integratie van de verschillende platforms en cryo-CMOS zal (vroege) quantumtoepassingen ondersteunen. Mogelijk zal quantumtechnologie concurrerend (oranje pijl) zijn met specifieke *semicon technologies* toepassingen.

Gerelateerde sleuteltechnologieën



Bron: TNO/NWO (2023) Herijking sleuteltechnologieën

Voor quantum communicatie en veel computing en sensing toepassingen is *optical systems and integrated photonics* een complementaire en soms discipline gerelateerde (groene pijl) technologie.

2.2 Positie, sterktes/zwaktes

2.2.1 Ontwikkelingsfase technologie

Quantum computing bevindt zich in de eerste fase (ontwikkeling). Voor quantum sensing en quantum key distribution (QKD) zijn kleinschalige, maar strategische, niche toepassingen. Voor quantumtechnologieën is in 2020 een uitgebreide technologiemonitor uitgewerkt.[117]

Per quantum technologie verschilt hoe uitdagend de stap tot een acceptabele productprestatie is. Er worden al quantum sensoren gebruikt die klassieke sensoren overtreffen voor o.a. atoomklokken en versnellingsmeters. Quantum communicatie wordt academisch en kleinschalig uitgerold en een aantal bedrijven verkoopt al werkbare QKD technologie. Quantum computing kent nog grote (wetenschappelijke en technologische) uitdagingen voor een presterend product, alhoewel er al een aantal kleinschalige maar foutgevoelige quantum computers (NISQ) verkrijgbaar zijn.

Het productiesysteem, de productprijs en de complementaire producten en diensten zijn in ontwikkeling en behoeven aandacht. De commercialisering van quantum technologieën is cruciaal zodat marktvraag de ontwikkeling voortstuwt. Het Europese productiesysteem kent vooralsnog geen grote, verticaal geïntegreerde (commerciële) ecosysteem spelers. Nederlandse spelers kunnen echter wel gezamenlijk complete quantum computing systemen maken. Voor quantum communicatie is het hele systeem van functionerende infrastructuur (complementaire producten en diensten) een groot punt van aandacht.

Actoren en netwerkvorming zijn aan de aanbodszijde goed geregeld in Nederland en Europa, maar er ontbreekt durfkapitaal, commerciële systeem integratie en voldoende opgeleid personeel met relevante kennis en expertise. Verdere standaardisatie is op termijn nodig. Er is op dit moment geen grote vraag vanuit commerciële klanten; overheden en het militaire domein treden her en der op als eerste kopers. Beleid en regelgeving ontbreken grotendeels en dienen ontwikkeld te worden voordat deze technologieën volwassen worden.

2.2.2 Internationale positie en omvang

Binnen de EU zijn Duitsland en Frankrijk naast Nederland de grootste spelers qua investeringen vanuit nationale initiatieven.[118] Deze drie landen hebben een samenwerking aangekondigd[119] met een nadruk op industriële samenwerking en versterking van het quantum ecosysteem. Hiervoor is recent vanuit het Nationaal Groeifonds (NGF) een financiering van €60 miljoen toegekend[120]. Nederland heeft hiernaast ook direct en via de EU samenwerkingsverbanden met onder andere de VS[121].

Het Quantum Technologies Flagship is met een budget van €1 miljard het grootste Europese onderzoek en innovatie initiatief en loopt van 2018 tot en met 2028[122]. Hiernaast streeft het QuantERA programma naar het versterken van het Europese wetenschappelijke leiderschap[123]. Bovendien is het European Quantum Industry Consortium (QuIC) opgericht om Europese commerciële partijen die betrokken zijn bij de technologie-ontwikkeling met elkaar te verbinden[124].

Buiten de EU zijn de VS en China de belangrijkste spelers op het gebied van quantumtechnologie, maar ook Australië, Canada, Israël, India, Japan, Rusland, Taiwan, het Verenigd Koninkrijk en Zuid-Korea zijn actief met ieder hun eigen niches en focusgebieden. De VS heeft hierbij veruit de grootste private investeringen, terwijl China in absolute bedragen de grootste overheidsinvestering heeft, alhoewel dit laatste lastig te verifiëren is[125]. In figuren hieronder zijn de verhoudingen in publieke programma's voor overheids-investeringen voor onderzoek en innovatie en totale investeringen in start-ups weergegeven.[126]

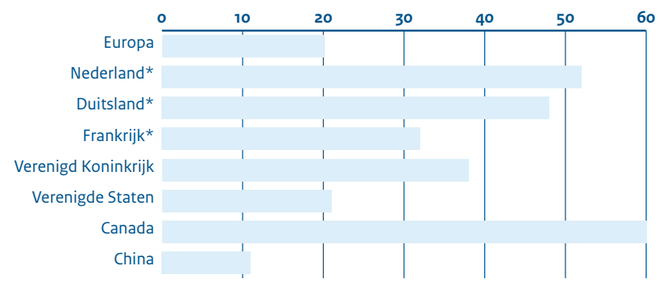
De waardeketens van quantumtechnologie zijn opkomend en vrij geglobaliseerd[127, 128, 129]. Deze bestaan hoofdzakelijk uit grote en kleine bedrijven die hightech niche producten leveren, zoals cryostaten, high-end elektronische chips, fotonische componenten (bijv. lasers, detectoren, modulatoren), specifieke materialen en quantum processoren.

Op het gebied van quantum computing is er wereldwijd een aantal bedrijven die werken aan volledig geïntegreerde systemen, waarvan de koplopers zich in de VS bevinden[130]: IBM, IonQ, PsiQuantum, Google, Amazon en Microsoft. Enkele andere grote commerciële spelers buiten de VS zijn Pasqal (Frankrijk), IQM (Finland), QuiX Quantum (Nederland), D-Wave (Canada), Xanadu (Canada), Quantinuum (VK) en Origin Quantum (China), die allen focussen op een bepaald type qubit platform. In Nederland heeft onderzoeksinstituut QuTech voor meerdere types qubits volledig geïntegreerde systemen gerealiseerd, bijv. in Quantum Inspire. Op halfgeleider-spin qubits is QuTech wereldwijd leidend. Hiernaast doen o.a. de TU/e, UvA, UT, SURF en TNO in Nederland onderzoek naar verschillende componenten voor quantum computers.

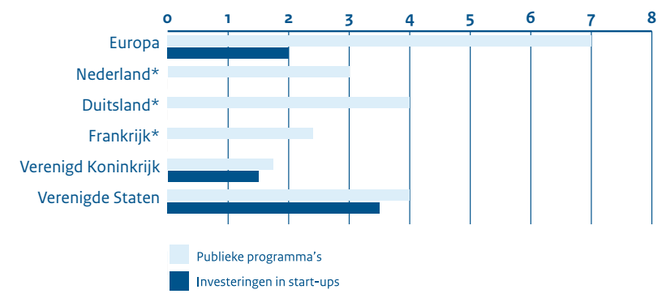
Op het gebied van quantum communicatie is China de koploper op gebied van grootschalige infrastructuur, met een rudimentair quantum communicatienetwerk gebaseerd op "trusted nodes" van duizenden kilometers lang, inclusief een quantum verbinding per satelliet[131]. De EU is echter koploper op het gebied van onderzoek, hoofdzakelijk via de door QuTech gecoördineerde Quantum Internet Alliance voor end-to-end quantum verbindingen, en EuroQCI dat lidstaten stimuleert om de eerste nationale en grensoverschrijdende netwerken te realiseren in Europa[132]. Binnen quantum internet is de VS minder actief op QKD voor veilige encryptie[133, 134], maar zet vol in op gevorderdere quantum internet toepassingen met o.a. het Center for Quantum Networking van Amazon. In Nederland zijn o.a. TUD, TU/e, QuTech, UT, SURF en de startup Q*Bird actief op het gebied van quantum netwerken.

In het quantum sensing veld loopt de VS voorop qua startups, gevolgd door Zwitserland en Duitsland[135]. SandboxAQ, AOSense en Infleqtion zijn grote spelers in de VS, in Zwitserland zijn Terra Quantum, Qnami, en QZabre de grootste spelers. Nederland is toonaangevend in de ontwikkeling van bronnen van ultrakoude atomen (voor bijvoorbeeld atoomklokken). Het Europese

Totaal investeringen in Quantumtech t/m 2022 in € per inwoner



Totaal historische investeringen in Quantumtech € miljard



Per land de publieke programma's voor onderzoek en investeringen (zowel publiek als privaat) in Q-startups.
**Excl. private investeringen voor NL, DE, en FR.*

AQuRA[136] consortium werkt aan de ontwikkeling van nieuwe en betere quantum klokken; dit consortium wordt gecoördineerd door de UvA. Nederland is een sterke speler in de volgende niches: cold atoms (UvA, VU, TU/e), NV centres (QuTech, TNO, TUDelft, RUG) en optomechanical systems (TUD, AMOLF).

2.2.3 Nationale positie en omvang

Wereldwijd staat Nederland in de top 10 landen voor onderzoek in quantumtechnologie[137]. Voor quantum startups staat Nederland 10e met quantum computing en 7e voor quantum communicatie en -sensoren. Qua overheidsinvesteringen is Nederland derde binnen de EU.[138] Nederland heeft ook een trekkers- en coördinerende rol in verschillende internationale initiatieven, zoals in de Quantum Internet Alliance, het AQuRA consortium en de trilaterale samenwerking met Duitsland en Frankrijk.

In 2014 is QuTech aangewezen als nationaal icoon met financiële steun van EZK, OCW, NWO en topsector HTSM (146 miljoen euro over een periode van 10 jaar). In 2020 is de Nationale Agenda Quantum Technologie gepubliceerd die de ambities en plannen voor korte en lange termijn beschrijft[139]. Met investeringen van €615 miljoen over zeven jaar (2021-2027) via het NGF project QDNL is Nederland een grote speler en heeft het een koepelorganisatie die andere landen niet kennen. Via NWO wordt additioneel c.a. €10-30 miljoen per jaar ingezet voor projecten met een vaak fundamenteel karakter.

In Nederland zijn meerdere startups en scale-ups actief die hardware, software en andere diensten bieden aan verschillende klanten wereldwijd[140]. Het aantal FTE bij startups groeit snel – in Delft werken eind 2023 al meer dan 300 FTE bij verschillende bedrijven, met sterke groeiverwachtingen voor 2024.

Samenwerkingen

- Quantum Application Lab, Quantum Software Consortium (NWO Zwaartekracht project), Materials for the Quantum Age (NWO Zwaartekracht project), verder nog ENW GROOT projecten en NWA projecten.
- Voor essentiële elementen wordt samengewerkt met de fotonica community, ook binnen NGF Photon Delta.
- Quantum Delta NL (NGF programma)

2.2.4 Specifieke toepassingsgebieden

Naar verwachting worden quantum technologieën belangrijk voor het concurrentievermogen van verschillende gebruikende industrieën.

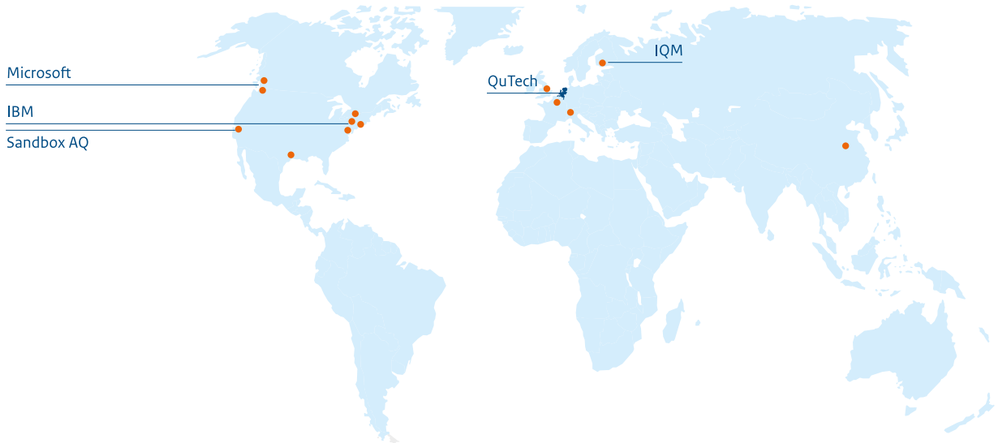
Chemische industrie, farma en logistiek: modellering en optimalisatievraagstukken, versneld ontwerp van katalysatoren, medicijnen, meststoffen, etc.

Gezondheidszorg: quantumsensoren voor zeer gevoelige metingen (zoals magnetisch).

Defensie: quantumsensoren (o.a. onderwatersensoren), quantum-computing (o.a. voor model-based signal processing) en quantum-commmunicatie (o.a. quantumsleuteldistributie).

Financiële dienstverlening: levert de helft van de verwachte marktwaarde in 2035[141]. De Nederlandse financiële dienstverlening is op hoog technologisch niveau. In de toekomst zal het gebruik van quantum computing mogelijk essentieel zijn voor veiligheid en concurrentiekracht. Quantum cryptography voor beveiliging en computing van fraude detectie.

Illustratie van enkele toonaangevende voorbeelden clusters en organisaties



Kritieke Infrastructuur: quantum cryptography voor beveiliging van communicatie.

Telecommunicatie: quantum communicatie zal op termijn een toevoeging zijn op telecommunicatie-infra door integratie van de bestaande infrastructuur (en satellieten) met quantum elementen.

Leverende industrie

Machinebouw: voor de fabricatie van qubits zijn hoge precisie metrologie- en materiaal equipment oplossingen nodig en systems engineering voor het volledige systeem. Nederland heeft hierin een leidende positie in de halfgeleiderindustrie.

Chipproductie: Quantumchips zullen, naar verwachting, hoog complex blijven en lang in een relatief laag volume geproduceerd worden. Lage volumes en hoge kwaliteit zijn zeer gunstig voor de Nederlandse (deel)productie. Het is van belang dat de opschalingscapaciteit tijdig klaarstaat. Op het gebied van fotonica zijn de in Nederland geprioriteerde (niche) platformen gunstig voor toepassingen in quantum computing en -communicatie.

2.2.5 Risico's voor de nationale veiligheid

Toepassingen van *quantum technologies* kunnen leiden tot risico's voor de nationale veiligheid, bijvoorbeeld wanneer deze technologieën worden ingezet voor militaire toepassingen of wanneer deze een dreiging vormen voor de veiligheid van digitale systemen van instanties actief in ons veiligheidsdomein en in onze vitale infrastructuur. Naar verwachting zal quantum computing dusdanig geavanceerd worden dat veel van de huidige encryptie- en communicatieprotocollen eenvoudig gedecodeerd kunnen worden[142]. Daarmee komt de vertrouwelijkheid, beschikbaarheid en integriteit van (gevoelige) communicatie in het geding.

Quantum technologies zijn nog in ontwikkeling. Momenteel zijn quantum computing systemen toegankelijk voor gebruikers wereldwijd, maar dit beeld zal naar verwachting veranderen zodra de systemen dusdanig geavanceerd zijn dat veelgebruikte hedendaagse encryptie hiermee gedecodeerd kan worden. In dit stadium zal het voor Nederland ook van belang zijn om direct, of minstens in EU of NAVO verband, toegang te behouden. Tegelijkertijd moet Nederland ook beschermd zijn tegen dreiging van buitenaf, bijvoorbeeld door het gebruik van post-quantum encryptie of quantum communicatie infrastructuur. Dit belang wordt onderstreept in de Veiligheidsstrategie voor het Koninkrijk der Nederlanden.

Aandacht voor disproportionele afhankelijkheden in de waardeketen van *quantum technologies* is dus belangrijk. Niet alle afhankelijkheden zijn problematisch. Alleen daar waar de risico's voor het publiek belang hoog zijn, kan aanvullend handelen vereist zijn. Dit behoeft een genuanceerde kwantitatieve én kwalitatieve analyse van op het niveau van specifieke waardeketens. Het kabinet zal bezien in hoeverre hierbij kan worden aangesloten op de risicoanalyses van kritische technologiegebieden die de Europese Commissie uitvoert in het kader van de Europese Economische Veiligheidsstrategie, of dat nadere eigen analyse nog nodig is. Zoals ook gecommuniceerd in de Kamerbrief Voortgang Strategische Afhankelijkheden van 15 december 2023 kan vanwege de vertrouwelijke en kwetsbare aard van deze analyses op de voortgang hieromtrent niet verder op worden ingegaan.

2.2.6 SWOT

De kennisbasis en wetenschappelijke kwaliteit van het Nederlandse onderzoek staat buiten kijf. Daartegenover staan de Europese uitdagingen van tot grootschalige investering en industrialisatie.

Hierin lijken de grote Amerikaanse bedrijven (en investeerders) een voorsprong te pakken op het industrieel uitrollen van quantumtechnologieën.

De Nederlandse high tech industrie bewijst dat het mogelijk is om in grote en complexe waardeketens een rol van betekenis te spelen. Er zijn kansen voor Nederland en Europa om in deze toekomstige waardeketen essentiële niches en control points te veroveren. Daarbij moet rekening gehouden worden met de lokale economische omstandigheden, niet enkel de wetenschappelijke kwaliteit.

Sterkte	Zwakte
• sterke kennisbasis en wetenschappelijke kwaliteit • sterk organiserend vermogen (QDNL)	• beperkte mogelijkheden tot grootschalige industrialisatie • onvoldoende geschoolde werkkracht
Kans	**Bedreiging**
• essentiële niches veroveren Europese supply chain • Nederlandse system integrator	• "diepere zakken" van concurrerende mogendheden (China, grootbedrijf VS) • fragmentatie Europese inzet • regelgeving loopt achter op technologie

2.3 Ambitie

2.3.1 Hoofdambitie

In 2035 is het Nederlandse Quantum ecosysteem van wereldklasse, op zowel academisch als industrieel gebied, en een internationale magneet voor bedrijvigheid en talent. Nederland is een gidsland met control-points in internationale waardeketens voor alle drie de beschreven technologiegebieden, met spelers die concurreren op internationaal niveau. Binnen de EU is Nederland onderdeel van de kopgroep en heeft een sterke positie voor fabricage en commercialisatie.

2.3.2 Deelambities

Lange termijn blik en samenhang bij investeringen in onderzoek en innovatie
In het huidige ecosysteem zorgt Quantum Delta NL voor samenhang op de lange termijn. Als deze organisatie in 2028 stopt, valt ook de samenhang op de lange termijn van de nationale quantum agenda en budgetten weg, inclusief de sterke internationale positie en coördinatierol.

Deelambitie: Bedrijven, wetenschap en overheden prioriteren onderzoek en innovatie door middel van aansluitende onderzoeks- en investeringsagenda's en gezamenlijke prototype- en pilot-line ontwikkeling. Overheden bieden stabiliteit aan kennisinstellingen en een veilige omgeving voor bedrijfsinvesteringen door continuïteit in de vorm van lange termijn -planning, -ondersteuning en -investeringen in programma's zoals Quantum Delta NL.

Investeringen in onderzoeks- en testfaciliteiten
Om cutting-edge onderzoek mogelijk te maken en innovatie te bevorderen is er behoefte aan toegankelijke onderzoeks- en testfaciliteiten, zoals vastgesteld in de EU Chips Act. Door de hoge prijzen van testfaciliteiten en cleanrooms kunnen startups hun apparatuur niet testen of moeilijk ontwikkelen.

Deelambitie: Nederland heeft in 2035 de onderzoeksinstituten, testfaciliteiten en productielijnen voor quantum-technologie, -workforce, en -bedrijven van wereldniveau. Daarvoor is de continuïteit en doorgroei van sterke bestaande instituten (bijv. QuTech, NanoLabNL, QuSoft) cruciaal. Toegankelijke testfaciliteiten zijn essentieel, waarbij samenspraak met startups en scaleups ervoor zorgt dat aan concrete behoefte wordt voorzien en zij de eerste kleinschalige producties realiseren.

Financiering voor startups en scale-ups: vroege fase financiering en doorgroei
Financiering om quantum-startups door te laten groeien tot scaleups is te beperkt, vooral vergeleken met andere werelddelen. Vooral private investeerders zien grote risico's, winstgevendheid die ver in de toekomst ligt, een onzekere marktpotentie, en mogelijke juridische blokkades bij verkoop.

Deelambitie: Nederland heeft in 2035 meerdere scale-ups en minstens één unicorn. Startups en scale-ups groeien door d.m.v. aanmoediging van private investeringen, o.a. durfkapitaal en aantrekkelijke fiscale regelingen voor private investeringen in sleuteltechnologieën, en koppeling van strategie en budget van overheden.

Betrekken van gebruikers bij onderzoek en innovatie en marktcreatie
Potentiële eindgebruikers zijn nog weinig betrokken bij de ontwikkeling van quantum technologie, voornamelijk doordat de huidige toepassingen nog niet economisch rendabel zijn.

Deelambitie: In 2035 stuwt de toepassing door eindgebruikers in andere sectoren de R&D in de verschillende quantum technologieën. Eindgebruikers worden vroeg betrokken bij de ontwikkeling van quantum technologieën, bijv. door co-creatie in de pre-competitieve fase en de overheid als *launching customer.*

Ontwikkelen, aantrekken en behoud van (top)talent
Er is internationale concurrentie voor internationaal talent. Nederlands talent is moeilijk te behouden, en het grootste tekort is aan praktisch geschoolde technische arbeiders.

Deelambitie: In 2035 heeft Nederland faciliteiten, opleidingen (MBO, HBO, WO), en onderzoek (positie in top 10 van de wereld) van wereldklasse. Dit trekt buitenlands talent aan, samen met een prettig leefklimaat en competitieve werk/privé balans. Nadruk is nodig op brede technische scholing 'vanaf de kleuterklas' en voldoende praktische technici.

Versterken van kennisoverdracht en het valorisatieproces voor meer impact
Het risico is dat kennis van onderzoeksinstellingen, kunde van bedrijven en ervaring met regelgeving langs elkaar beweegt in plaats van samen optrekt.

Deelambitie: Overdracht van kennis en kunde wordt gestimuleerd, bijv. doordat mensen vaker van baan wisselen tussen wetenschap, bedrijfsleven en overheid. Ook hebben bedrijven en overheden vroegtijdig toegang tot quantum computers, -netwerken en -sensoren. Daarnaast wordt valorisatie vanuit kennisinstellingen (TO2, wetenschap) geïntensiveerd, met een nadruk op maatschappelijke impact.

Verbindingen tussen ecosystemen
Terwijl toegang tot kennis en de markt in andere landen cruciaal is voor de ontwikkeling van Quantum technologie, willen landen vanwege risico's voor de nationale veiligheid hun eigen ecosysteem juist afschermen. Daarnaast is voor de commercialisatie van kennis van onder andere halfgeleiders en integrated photonics cruciaal maar weten de velden elkaar nog te weinig te vinden.

Deelambitie: Nederland zet haar organiserend vermogen en leiderschap in om een coördinerende en strategische rol in te nemen in internationale samenwerkingsverbanden met centrale hubs in Europa en gelijkgestemde landen daarbuiten. Nationaal wordt samenwerking in O&I en productie met aangrenzende sleuteltechnologieën (fotonica via onder andere het PhotonDelta programma, halfgeleiders) gezocht en eerste eindgebruikers zijn betrokken bij de technologieontwikkeling.

Eerder in het proces aandacht besteden aan wet- en regelgeving
Technologische ontwikkelingen gaan snel terwijl beleid en investeringen van bedrijven achterblijven. Zo leidt quantum computing tot nieuwe standaardiserings- en beveiligingsvraagstukken, die vaak pas geadresseerd worden op het moment dat de problemen urgent zijn. De uitdaging is tijdig beleid ontwerpen dat de balans heeft tussen nationale en economische veiligheid, waarbij het zowel stimuleert op korte termijn als aandacht heeft voor effectieve uitvoering. Daarnaast is beleid nodig voor toekomstige risico's.

Deelambitie: Nederland heeft een instrumentarium met aandacht voor onderhoud én impuls. Op Europees niveau zorgt Nederland voor quantum 'preparedness' (inclusief voor Nederland zelf), regelgeving in het bedrijfsleven met oog voor innovatiestimulering (bijv. voor encryptie-standaarden), én bescherming van de nationale veiligheid via exportcontrole van quantumtechnologie, de Wet Screening Kennisveiligheid en de wet VIFO. Het is cruciaal dat dit beleid tijdig wordt geschreven, voordat de nieuwe technologieën doorontwikkeld worden door de industrie.

Geraadpleegde deskundigen

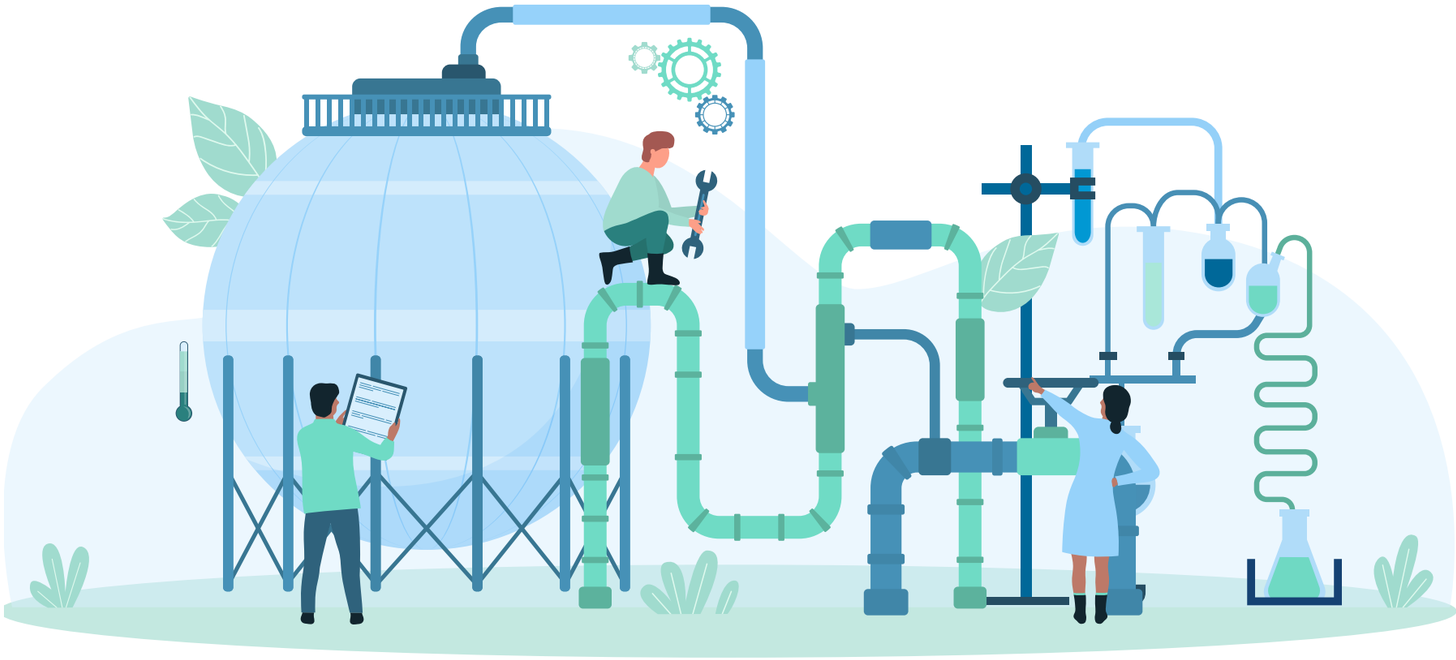
Experts
- Emma Winkels – NWO
- Julian Rabbie – TNO
- Vera Janssen – TNO

Deelnemers Ronde tafel 1
- Mayra van Houts – QDNL
- Ingrid Romijn – Q*Bird
- Ton van 't Noordende – QDNL Participations
- Florian Schreck – UvA
- Thomas van Els – QuiX
- Ariana Torres – SURF
- Matthijs Rijlaarsdam – QuantWare
- Lieven Vandersypen – TU Delft
- Guus Rijnders – UT
- Rogier Verberk – TNO
- Jesse Robbers – QDNL
- Philippe Bouyer – UvA

Deelnemers Ronde tafel 2
- Rogier Verberk – TNO,
- Ingrid Romijn – Q*Bird
- Ariana Torres – SURF
- Thomas van Els – Quix Quantum
- Florian Schreck – UvA,
- Kees Eijkel – QuTech
- Jesse Robbers – QDNL
- Ronald Hanson – TU Delft
- Guus Rijnders – UT
- Adriaan Rol – Orange Quantum Systems

3 Process technology including process intensification

In 2035 verlaagt Nederland haar emissies door het realiseren van een select aantal commerciële platform technologieën voor biomassa, afvalconversie en CO_2. We exporteren technologie inclusief essentiële hardware en leveren zo ook internationaal een bijdrage aan emissiereductie. Hiervoor realiseren we pre-commerciële flagship plants (bijv. pyrolyseolie bioraffinaderij, syngas en ethanol fermentatie), importeren we groene intermediates en transformeren we de bestaande Nederlandse chemische industrie zodat deze toekomstbestendig en duurzaam is.



3.1 Definitie

3.1.1 Belang van de sleuteltechnologie

Process technology, including process intensification maakt de overstap mogelijk van fossiele naar duurzame feedstocks, zijnde (mixed) plastic afvalstromen, eerste en tweede generatie duurzame biogrondstoffen en CO_2 in de chemische industrie. Met *process technology* kunnen deze duurzame feedstocks worden omgezet naar brandstoffen, intermediairen en voedsel. Deze grondstoffen kunnen vervolgens in een breed scala aan sectoren worden ingezet, zoals de maakindustrie, kunststofindustrie en farmacie. Daarom is deze sleuteltechnologie cruciaal voor de grondstoffen- en klimaattransitie. De impact op de nationale veiligheid is beperkt, gezien het ontbreken van directe toepassingen in defensie gerelateerde context.

Nederland heeft momenteel een sterke industrie die verband houdt met *process technology*. De huidige wetenschappelijke positie lijkt echter minder vooraanstaand dan op sommige andere sleuteltechnologieën [143]. Het voortzetten van de ontwikkeling van deze technologieën is van belang voor een groot aantal bedrijven die hun producten exporteren naar de rest van de EU. Bijvoorbeeld, Nederland herbergt krakers die voorzien in maar liefst 25% van de Europese vraag naar plastics. De markt voor duurzame feedstocks is op wereldschaal nu nog relatief klein, maar hier wordt wel explosieve groei verwacht: zo is de wereldmarkt van bioplastics nu nog enkele miljarden maar verwacht wordt dat deze zal groeien met een CAGR van 20% [144, 145].

Deze technologie is dan ook van aanzienlijk belang voor het toekomstige verdienvermogen van Nederland. Er zijn kansen voor Nederland om voor een aantal platformtechnologieën een vooraanstaande positie in te nemen, mits het lukt om op pre-commerciële schaal enkele voortrekkersprojecten neer te zetten om de commerciële haalbaarheid van processen aan te tonen.

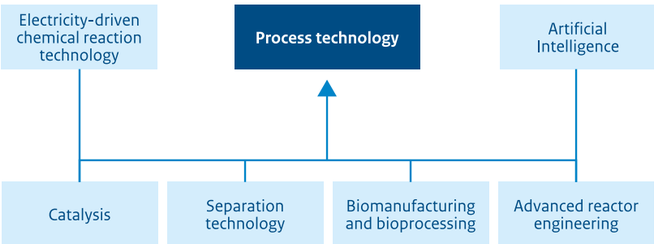
3.1.2 Definitie

Process technology, including process intensification richt zich op het optimaal, stabiel en veilig ontwerpen van (groene) chemische productieprocessen. Hieronder vallen onder andere: schaalbaarheid, warmte-integratie, veiligheid, optimale downstream processing, ruimtebeslag en kostenefficiëntie. Conversie technologie is naast scheidingstechnologie een essentieel onderdeel van chemische productieprocessen. Een belangrijke trend is om in productieprocessen meer gebruik te maken van duurzame grondstoffen, bijproducten en reststromen te beperken en deze zoveel mogelijk te hergebruiken en recyclen. In deze agenda wordt uitgegaan van koolstof gebaseerde grondstoffen. Metalen en mineralen grondstoffen worden (vooralsnog) buiten beschouwing gelaten. Procestechnologie kan dan ook voor de omzetting en zuivering van mineralen en metalen worden ingezet.

3.1.3 Gerelateerde sleuteltechnologieën

Er zijn verschillende nauw verwante sleuteltechnologieën die de essentiële bouwstenen vormen van het proces dat centraal staat in *process technology.* De synergie tussen deze gerelateerde sleuteltechnologieën is cruciaal voor het efficiënt realiseren van de omzetting van duurzame grondstoffen naar waardevolle producten binnen het domein van procestechnologie.

Gerelateerde sleuteltechnologieën



Bron: TNO/NWO (2023) Herijking sleuteltechnologieën

Complementaire sleuteltechnologieën
Catalysis speelt een cruciale rol in het faciliteren van chemische reacties en de conversie van grondstoffen naar gewenste moleculen. Het optimaliseren van katalytische processen is van groot belang voor efficiënte procestechnologieën.

Separation technology is essentieel om gewenste producten te scheiden van ongewenste bijproducten en onzuiverheden maar ook wanneer heterogene grondstofstromen worden gebruikt zoals (mixed)plastic afval.

Biomanufacturing and bioprocessing richt zich op de productie en verwerking van biologische grondstoffen naar biomoleculen, en omvat fermentatieprocessen, stamontwikkeling, biotechnologie, bioraffinage, synthetische biologie en bioreactorontwikkeling.

Advanced reactor engineering maakt het mogelijk om nieuwe reactor technologie te ontwikkelen die specifiek een verbetering op het gebied van energie en grondstof efficiëntie oplevert voor de omzetting van duurzame grondstoffen naar waardevolle eindproducten.

Electricity-driven chemical reaction technologies omvat technieken zoals elektrochemie, bio(elektro)chemische processen, elektrochemische fermentatie en plasma-technologieën. Ze hebben de capaciteit om d.m.v. elektriciteit duurzame grondstoffen of direct CO_2 om te zetten in bruikbare moleculen, waardoor ze een aanvulling vormen op procestechnologieën.

Artificial Intelligence kan in veel verschillende processtappen worden toegepast. Bijvoorbeeld in het ontwerp van nieuwe processen met microbiologie stammen, in de operatie en bij het analyseren van afvalstromen die binnenkomen waarbij de precieze samenstelling onbekend is.

3.2 Positie, sterktes/zwaktes

3.2.1 Ontwikkelingsfase technologie

Het bepalen van de huidige ontwikkelingsfase van *process technology* is gecompliceerd, gezien de focus ligt op het toepassen van bestaande processen op duurzame grondstoffen zoals plastic afval, 1e en 2e generatie biogrondstoffen, en CO_2. De uitdaging ligt vooral in systeemintegratie en het vinden van geschikte technieken voor verschillende grondstoffen, wat resulteert in verschillende Technology Readiness Levels (TRL) voor verschillende conversietechnologie – grondstof combinaties. In tabel 1 wordt een overzicht gegeven van het TRL niveau waarin diverse technologieën zich bevinden voor de vier genoemde grondstoffen.

Tabel 1: TRL niveau per platformtechnologie en grondstof

Platformtechnologie en TRL [146]	Grondstoffen			
	(mixed) plastic afval	Biomassa 1e gen	Biomassa 2e gen	CO_2
Bioraffinage		9	7	
Vergassing	8-9		7	
Fermentatie		9	6-7	6-7
Solvolyse	5-6	5-6	7-8	
Pyrolyse	7-8		6-7	
De-polymerisatie [147]	7-8			
Elektrochemie				5-6

De ontwikkeling van *process technology* op bovenstaande grondstofstromen wordt geremd doordat er sprake is van enkele barrières. Enkele van deze barrières gelden voor alle grondstoffen, terwijl andere barrières specifiek gerelateerd zijn aan een bepaalde grondstof. In tabel 2 wordt een overzicht gegeven.

Tabel 2: Barrières per grondstof voor de ontwikkeling van process technology

Barrière	Grondstoffen		
	(mixed) plastic afval	Biomassa	CO_2
Geen solide businesscase voor het gebruik van hernieuwbare grondstoffen. Dit prikkelt de chemische industrie momenteel onvoldoende om over te stappen. Daarom is ook de financiering vaak lastig, omdat het gaat om een toekomstige positieve businesscase (door o.a. regulering, bijv. ETS).	X	X	X
Publieke opinie kan negatief zijn tegenover de import van biomassa en (plastic) afval.	X	X	
Opzetten van complexe en nieuwe waardeketens voor de beschikbaarheid en aanvoer van afvalstromen en biomassa, kan coördinatieuitdagingen met zich meebrengen.	X	X	X
Ontbreken van beprijzing van scope 3 emissies, betekent dat de voordelen van recycling elders terechtkomen, bijvoorbeeld bij andere (mogelijk buitenlandse) afvalverbranders.	X		
Certificering en ingebruikname van nieuwe technologieën/nieuwe basischemicaliën zijn kostbaar en tijdrovend. Gevolg hiervan is dat vaak wordt gekozen voor “drop-in” producten i.p.v. het ontwikkelen van geheel nieuwe basischemicaliën.	X	X	X
Regulering. Bijvoorbeeld: Renewable Energy Directive stimuleert gebruik van hernieuwbare koolstoffen als energiedrager i.p.v. als grondstof (wat duurzamer is). End of waste directive: belemmert het transport [148] en gebruik van afval als grondstof. Daarnaast is er gebrek aan regulering rondom gebruik samengestelde en daardoor moeilijk recyclebare materialen.	X	X	

3.2.2 Internationale positie en omvang

Afhankelijk van de energiedichtheid zullen (mixed) plastic afval en bepaalde biogrondstoffen in de toekomst lokaal worden verwerkt tot basischemicaliën, vanwege de inefficiëntie van het verschepen van energiedragers met lage energiedichtheid. Fabrieken kunnen slechts beperkte hoeveelheden duurzame koolstof verwerken als deze een lage energiedichtheid hebben (50 kton tot 1 mton). Wanneer minder energiedichte hernieuwbare grondstoffen zijn omgezet tot basischemicaliën of intermediaire producten met hogere energiedichtheid, zijn ze beter geschikt voor vervoer.

Voor CO_2 is daarnaast de aanwezigheid van voldoende duurzame energie een belangrijke randvoorwaarde. Voor afvalverwerking en CO_2 zullen installaties er wereldwijd ongeveer hetzelfde uitzien. Voor biogrondstoffen zal er gespecialiseerd worden in de specifieke om te zetten gewassen.

(Mixed) plastic afval
Ontwikkelingen hierin zijn bijvoorbeeld het recente verbod op export van ongesorteerde afvalstromen naar buiten de EU en de discussie over import van afvalstromen voor afvalverbrandings-installaties. Er zijn wereldwijd al enkele commerciële fabrieken die afvalstromen kunnen verwerken, zo staan er drie van Lanzatech [149] in China en één van Enerkem in Canada.

Biogrondstoffen
Landen die internationaal een logische producent en exporteur zijn van bio-ethanol uit biogrondstoffen zijn de V.S. en Brazilië (via de Shell-Cosan joint venture Raizen t.b.v. de verwerking van 2e generatie biogrondstoffen) vanwege het grote landbouw areaal van respectievelijk mais en suikerriet in die landen. Binnen Europa is er een grote bio industrie gebaseerd op houtachtige grondstoffen in Scandinavië en een suikerbietenindustrie in Noordwest Europa. Momenteel wordt voornamelijk gebruik gemaakt van 1e generatie biogrondstoffen (suikers, zetmeel, plantaardige olie). Hierbinnen is nog ruimte voor opschaling. Op de lange termijn zullen echter vooral 2e generatie biogrondstoffen (zoals afval- en reststromen uit de voedselindustrie en lignocellulose) gebruikt worden omdat deze niet concurreren met de voedselproductie. Technieken om de meeste 2e generatie biogrondstoffen te verwerken zijn echter nog minder ver.

CO_2
In China staan twee grote full scale e-methanol fabrieken o.b.v. technologie van Carbon Recycling International, welke jaarlijks per stuk ongeveer 50 kton hernieuwbare koolstof verwerken. In Zweden wordt de eerste fabriek voor e-methanol op basis van biogeen CO_2 en groene waterstof gebouwd door liquid wind en Ørsted. Het is de verwachting dat de conversie van CO_2 pas verder in de toekomst rendabel wordt.

3.2.3 Nationale positie en omvang

Nederland importeert ongeveer 190 miljoen ton koolstof op jaarbasis.[150] Het nationale productiepotentieel van hernieuwbare koolstof via afvalstromen en biogrondstoffen bedraagt slechts een fractie hiervan. Dit betekent dat Nederland in de toekomst, net zoals nu, afhankelijk zal zijn van de import van koolstofdragers. In Nederland zijn relatief veel multinationals, start-ups en scale-ups actief binnen procestechnologie.

(Mixed) plastic afval

Momenteel zijn er al verschillende start-ups actief in Nederland om technologie te ontwikkelen en op te schalen om afval te verwerken tot brandstoffen en grondstoffen voor de chemische industrie.

Biogrondstoffen

Het is economisch en ecologisch voordelig om gebruik te maken van lokale bio reststromen en van specifiek voor de industrie geteelde gewassen als grondstof. De beperking is de hoeveelheid die lokaal beschikbaar is. Ondanks dat de Nederlandse agrarische sector zeer productief is, is de ruimte beperkt. Er zijn verschillende bedrijven in Nederland actief die deze techniek ontwikkelen en opschalen. Enkele voorbeelden: OCI Methanol Europe maakt methanol op basis van biogas en heeft de ambitie om dit te gaan doen op basis van bio reststromen. Uniper werkt aan biogrondstoffen vergassing en TORRgas werkt aan vergassing van getorifficeerde biogrondstoffen. Daarnaast wordt veel gedaan op het gebied van biobrandstoffen. Zo breidt Neste de productiecapaciteit van haar bioraffinaderij in Rotterdam uit, waarmee dit de grootste bioraffinaderij ter wereld wordt.

CO_2

Naarmate de industrie steeds meer circulair wordt, zal een deel van deze CO_2 uitstoot afnemen. Een deel van de CO_2 uitstoot is echter niet te voorkomen. Deze CO_2 kan in de toekomst worden ingezet als grondstof voor circulaire producten, mits er voldoende duurzame elektriciteit beschikbaar is om deze omzetting (duurzaam) mogelijk te maken. In Nederland zijn hier nog geen partijen op commerciële schaal mee bezig.

3.2.4 Specifieke toepassingsgebieden

(Mixed) plastic afval

Nederland heeft de potentie om een innovatieve chemische recyclingindustrie te ontwikkelen voor lokale industriële recycling en als technologie exportproduct. Zonder commerciële operatie in Nederland kunnen innovatieve technologieën ook niet worden ontwikkeld, geoptimaliseerd en vervolgens geëxporteerd (gelicenseerd).

Biogrondstoffen

Nederland beschikt over hoogwaardige infrastructuur en een competitieve agrarische en chemische sector met aanzienlijke kennis van biogrondstoffen en biotechnologie. Daarom is Nederland nu al goed gepositioneerd voor fermentatie en chemisch katalytische processen o.b.v. suikers. Op het gebied van bio residuen is er nog een groot innovatie potentieel zoals bijvoorbeeld vergassings- en pyrolysetechnologie. Deze technieken kunnen worden ingezet voor lokale industriële verwerking van biogrondstoffen en als technologie exportproduct.

CO_2

Nederland beschikt over een robuuste gasinfrastructuur die in de toekomst gebruikt kan worden gebruikt voor onder meer waterstof en CO_2. Hoewel grootschalige commerciële toepassingen van CO_2 nog in de toekomst liggen vanwege het (nog) ontbreken van een businesscase, is Nederland gunstig gepositioneerd wat betreft infrastructuur voor bedrijven die technologie ontwikkelen en opschalen die CO_2 als grondstof gebruiken. Naarmate de industrie meer duurzame grondstoffen gaat gebruiken, zal ook de CO_2 uitstoot meer circulair worden, waarmee het ook een steeds meer circulaire grondstof wordt.

3.2.5 Risico's voor de nationale veiligheid

Process technology is een brede, overkoepelende technologie die vele toepassingen kent. Deze technologie zelf vormt niet zozeer een risico voor de nationale veiligheid, maar specifieke toepassingen in vitale processen kunnen een risico vormen. Wanneer specifieke procestechnologie wordt ingezet in een vitaal proces – bijvoorbeeld in de energiesector -, bestaat het risico dat een kwaadwillende partij het vitale proces kan verstoren.

Er is ook sprake van een strategisch belang. *Process technology* is essentieel in de transitie naar een toekomstbestendige, duurzame economie. Kennis en kunde van *process technology* is wijdverspreid; hier zullen niet snel strategische afhankelijkheden op ontstaan. Wel geldt dat wereldwijd de vraag naar hernieuwbare koolstof steeds verder zal toenemen, terwijl er een beperking is in de hoeveelheid beschikbare koolstofhoudende grondstoffen. Voor Nederland geldt dat de binnenlandse beschikbaarheid hiervan onvoldoende is om de gehele industrie te voorzien van hernieuwbare koolstof.

Aandacht voor disproportionele afhankelijkheden in de waardeketen van *process technology* is dus belangrijk. Niet alle afhankelijkheden zijn problematisch. Alleen daar waar de risico's voor het publiek belang hoog zijn, kan aanvullend handelen vereist zijn. Dit behoeft een genuanceerde kwantitatieve én kwalitatieve analyse van op het niveau van specifieke waardeketens. Het kabinet zal bezien in hoeverre hierbij kan worden aangesloten op de risicoanalyses van kritische technologiegebieden die de Europese Commissie uitvoert in het kader van de Europese Economische Veiligheidsstrategie, of dat nadere eigen analyse nog nodig is. Zoals ook gecommuniceerd in de Kamerbrief Voortgang Strategische Afhankelijkheden van 15 december 2023 kan vanwege de vertrouwelijke en kwetsbare aard van deze analyses op de voortgang hieromtrent niet verder op worden ingegaan.

3.2.6 SWOT

(Mixed) plastic afval en biogrondstoffen

Sterkte	Zwakte
• Sterke kennisbasis • Goede infrastructuur en goede geografische positie, voor de import, export en vervoer van afval, biogrondstoffen en de halffabricaten die daaruit voortkomen	• Onvoldoende afval en binnenlandse productie van biogrondstoffen aanwezig om aan de koolstofbehoefte van de Nederlandse industrie te voldoen
Kans	**Bedreiging**
• Opschaling en ontwikkeling van de techniek, waardoor Nederland internationaal koploper kan worden in deze techniek. Deze kan vervolgens gelicenseerd en geëxporteerd worden.	• Regulering niet op tijd op orde, zoals de end-of-waste status en Waste Framework directive en een ongelijk speelveld met energetische toepassingen van hernieuwbaar koolstof

Een sterkte is de in Nederland aanwezige infrastructuur en Nederland heeft een goede geografische positie, waardoor het vervoeren van biogrondstoffen, afval en de halffabricaten die daaruit komen snel, goedkoop en efficiënt kan. Daarnaast heeft Nederland een sterke kennisbasis, in bijvoorbeeld fermentatie en chemisch katalytische processen op basis van suikers, wat cruciaal is voor de verwerking en transformatie van biogrondstoffen.

Een belangrijke zwakte is het tekort aan zowel (mixed) plastic afval voor de recyclingindustrie als aan biogrondstoffen vanwege het beperkte landbouwareaal. Dit resulteert in een uitdaging om de nationale industrie te voorzien van voldoende grondstoffen, waarbij de import economisch niet altijd haalbaar is door lage energiedichtheid.

De opschaling van technieken voor de verwerking van zowel (mixed) plastic afval als biogrondstoffen biedt significante kansen. Door deze technieken te ontwikkelen en te verbeteren, kan Nederland een leidende positie op de internationale markt innemen. Deze technologieën kunnen vervolgens worden gelicenseerd en geëxporteerd, wat Nederland economische voordelen kan opleveren, vooral gezien de noodzaak om grondstoffen voor de chemische industrie te blijven importeren.

Het niet tijdig op orde zijn van de juiste regulering zoals belemmering van gebruik en transport van (mixed) plastic afval via de Waste Framework directive, en een ongelijk speelveld met energetische toepassingen voor biogrondstoffen, vormen significante bedreigingen. Deze kunnen de ontwikkeling en innovatie binnen deze sectoren belemmeren.

CO_2

Sterkte	Zwakte
• Goede gas-infrastructuur, die in de toekomst gebruikt kan worden voor duurzame CO_2 en waterstof	• Er is (nog) geen overschot aan duurzame energie beschikbaar, ook is het niet aannemelijk dat duurzame energie in Nederland goedkoper zal worden dan elders ter wereld
Kans	**Bedreiging**
• Er is een groot chemische cluster aanwezig, waarvan de CO_2 uitstoot steeds biogener wordt naarmate de industrie verduurzaamt. Dit kan in de toekomst als bron van hernieuwbare CO_2 gebruikt worden.	• Grote opslagcapaciteit en investeringen in infrastructuur voor CCS vormen maakt het minder aantrekkelijk om in deze techniek te investeren.

Nederland heeft een goede gas-infrastructuur, die in de toekomst gebruikt kan worden voor duurzame CO_2 en waterstof.

Een zwakte is dat er (nog) geen overschot aan duurzame energie beschikbaar is, ook is het niet aannemelijk dat duurzame energie in Nederland goedkoper zal worden dan elders ter wereld. Dit zal naar alle waarschijnlijkheid de beperkende factor worden in hoeveel CO_2 als feedstock verwerkt kan worden in Nederland.

Een kans voor Nederland is de aanwezigheid van een groot chemisch cluster, waarvan de CO_2 uitstoot steeds biogener wordt naarmate de industrie verduurzaamt. Dit kan in de toekomst als bron van hernieuwbare CO_2 gebruikt worden. Tevens kan de technologie die hier ontwikkeld wordt, naar het buitenland geëxporteerd worden.

Grote opslagcapaciteit en investeringen in infrastructuur voor CCS vormen een bedreiging voor deze techniek omdat dit het minder aantrekkelijk maakt om in CCU te investeren. Echter, op de lange termijn is deze techniek wel nodig.

3.3 Ambitie

3.3.1 Hoofdambitie

In 2035 verlaagt Nederland haar emissies door het realiseren van een select aantal commerciële platform technologieën voor biogrondstoffen, afvalconversie en CO_2. We exporteren en implementeren technologie inclusief essentiële hardware en leveren zo ook internationaal een bijdrage aan emissiereductie. Hiervoor realiseren we pre-commerciële flagship plants (bijv. pyrolyseolie raffinage, bioraffinage, syngas en (m)ethanol fermentatie), importeren we groene intermediates en transporteerbare biogrondstoffen en transformeren we de bestaande Nederlandse chemische industrie zodat deze toekomstbestendig en duurzaam is.

3.3.2 Deelambities

De hoofdambitie wordt verder uitgewerkt in deelambities. Voor het versterken van onderzoeks- & innovatie ecosystemen heeft het Kabinet in 2021 tien uitdagingen geïdentificeerd[151]. De deelambities zijn langs vijf van deze lijnen uitgewerkt.

Financiering voor start- en scale-ups (vroege fase en doorgroei)
De omzetting van duurzame grondstoffen naar chemische basisproducten bevindt zich aan het begin van de keten. Dit biedt het potentieel voor grote impact, maar vereist grote, schaalbare fabrieken voor rendabiliteit. De haalbaarheid van de businesscase is daarnaast sterk afhankelijk van (toekomstige) wet- en regelgeving, omdat CO_2-uitstoot nog niet volledig is ingeprijsd, waardoor fossiele alternatieven goedkoper blijven. Deze afhankelijkheid en de benodigde schaalgrootte bemoeilijken het aantrekken van financiering voor start-ups en scale-ups. Bovendien vereist het valideren van een techniek investeringen in niet-rendabele kleinschalige testfabrieken. Als de techniek faalt, resulteert dit in aanzienlijke kosten. Het risico hiervan vormt een extra financieringsbarrière voor beginnende bedrijven.

Deelambitie: Nederland onderzoekt de mogelijkheden om meer risicofinanciering te initiëren, mogelijk middels een risicofonds waarbij publieke en private financiering samenkomen. Dit helpt een deel van de kosten te dekken met publiek geld wanneer nieuwe technieken in kleinschalige testfabrieken nog niet optimaal functioneren. Invest NL zou hierin een belangrijkere rol kunnen spelen.

Verbindingen tussen Ecosystemen
Bij de overstap naar een nieuwe grondstof moeten bedrijven nieuwe samenwerkingsverbanden aangaan. Gezien de vereiste schaalgrootte voor rendabele chemische fabrieken en het decentrale karakter van duurzame grondstoffen, kan dit uitdagend zijn.

Deelambitie: Nederland werkt aan het opzetten van concrete samenwerkingsverbanden in ecosystemen voor *process technology*. Daarbij wordt onderzocht in hoeverre verschillende samenwerkingskaders vanuit de overheid voor energietransitie, bruikbaar zijn voor de materialentransitie. Hierbij wordt nadrukkelijk gekeken naar samenwerking op cluster niveau, gezien het grote belang van infrastructuur voor het opereren van commerciële chemische fabrieken.

Eerder in het proces aandacht besteden aan wet-regelgeving
Regulering kan een barrière vormen voor de ontwikkeling van *process technology*. Enerzijds wordt het gebruik van fossiele koolstof als grondstof onvoldoende beprijsd, terwijl anderzijds energetisch gebruik van hernieuwbare bronnen door regels zoals de Renewable Energy Directive wordt gestimuleerd, ondanks dat dit minder duurzaam is. Dit leidt tot hogere kosten voor duurzame grondstoffen, zonder een toename in betalingsbereidheid voor duurzame producten. Ook vormt (onduidelijkheid rond) de afvalstatus van biogrondstoffen, pyrolyse-olie en mixed afvalstromen een belemmering voor het transport en gebruik van afval en bepaalde biogrondstoffen als grondstof. Daarnaast is certificering van nieuwe technieken kostbaar en tijdrovend, wat de implementatie vertraagt. Dit vraagt daarom om langdurig en consistent beleid.

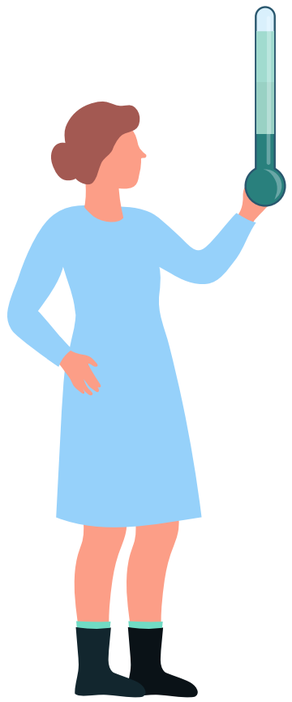
Deelambitie: Er wordt gewerkt aan het verkrijgen van een einde afvalsstatus van (mixed) plastic afvalstromen. Daarnaast wordt er gewerkt aan het creëren van een gelijk speelveld door ofwel een normering (via bijvoorbeeld een bijmengverplichting) ofwel een beprijzing (via bijvoorbeeld het ETS) [152]. Uiteindelijk is een mondiaal level playing field tussen fossiel en hernieuwbaar van belang, gezien het grote aantal multinationals actief in de chemie; een mechanisme vergelijkbaar met de Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) voor de chemische sector kan daarbij behulpzaam zijn.

Investeringen in onderzoeks- & testfaciliteiten
Pilot- en demofaciliteiten op het gebied van *process technology* zijn dungezaaid, en vanwege de grote schaal van commerciële partijen per definitie niet winstgevend.

Deelambitie: In 2035 is er een combinatie van publieke en private dilutive en non-dilutive funding beschikbaar om voor een start-up zonder veel vermogen faciliteiten te realiseren. Ook zijn er in 2035 pilotfaciliteiten voor platformmoleculen beschikbaar, zowel in een multi-purpose vorm, als ook specifieke flagship pilots voor specifieke procesinnovaties.

Betrekken van gebruikers in onderzoek, innovatie en marktcreatie
Het realiseren van een zekere schaal (demofase) is alleen realiseerbaar met steun van chemisch grootbedrijf. Het huidige instrumentarium faciliteert dit al. Wel is er een verschil tussen "drop-in" oplossingen en geheel nieuwe platform chemicaliën: bij deze laatste groep zijn eindgebruikers minder snel geneigd om betrokken te zijn, maar ze zijn minstens zo belangrijk om in een vroeg stadium te betrekken.

Deelambitie: Er wordt onderzoek gedaan naar de inzet op kennis over productontwikkeling bij technische innovatoren en of dit zou kunnen helpen om de stap tussen business en kennis beter te zetten.



Geraadpleegde deskundigen

Experts
- Reinier Grimbergen – TNO
- Remco Fijneman – NWO

Deelnemers Ronde tafel 1
- Harry Bitter – Wageningen University & Research
- Xandra Weinbeck – InvestNL
- Erwin Eymans – TorrGas
- Berend Vreugdenhil – TNO
- Michael Boot – TU Eindhoven
- Peter Baets – Corbion
- Wouter van Winden – dsm-firmenich

Deelnemers Ronde tafel 2
- Erwin Eymans – Torrgas
- Bert van de Beld – BTG Biomass
- Erik Heeres – Rijksuniversiteit Gronignen
- Tijmen Vries – BioBTX
- Michael Boot – TU Eindhoven
- Xandra Weinbeck – InvestNL
- Djoeke Altena – Neste
- Wouter van Winden – dsm-firmenich

4 Biomolecular and cell technologies

In 2035 is Nederland een wereldwijd vooraanstaand leider van onderzoek en toepassing van Biomolecular and cell technologies voor een gezonde en duurzame samenleving. Onze huidige sterke positie in onderzoek hebben we uitgebouwd tot een compleet ecosysteem waar valorisatie en markttoepassingen volledig ingebed zijn. Het Nederlandse leiderschap binnen deze sleuteltechnologie richt zich op twee gebieden:

- *Precision Health, vroege detectie, en gepersonaliseerde preventie en behandeling van ziekten;*
- *Duurzame productie in land- en tuinbouw, voedsel-productie en non-food bioproductie.*

4.1 Definitie

4.1.1 Belang van de sleuteltechnologie

Biomolecular and cell technologies vallen binnen het bredere veld van biotechnologie. De focus van deze sleuteltechnologie ligt daarbij op moleculen en cellen. Op het gebied van *Biomolecular and cell technologies* heeft Nederland een sterke kennisbasis en een sterke positie in het internationale krachtenveld die behouden en uitgebreid kan worden.

Biomolecular and cell technologies spelen een belangrijke rol in het realiseren van toekomstig verdienvermogen voor Nederland en kunnen een belangrijke rol spelen bij het oplossen van maatschappelijke uitdagingen. De technologieën zijn breed inzetbaar voor tal van toepassingen,[153] waaronder gezondheid (life science & health), veredeling en zaadtechnologie, voedselindustrie en (bio)chemische industrie. In deze toepassingsgebieden heeft Nederland in veel gevallen al een sterke kennispositie die verder uitgebouwd kan worden.

Hoewel Nederland goed scoort op wetenschappelijke en technologische ontwikkeling, zijn er ook barrières en drempels voor de verdere ontwikkeling van bedrijvigheid in dit domein. Valorisatie loopt achter op de ontwikkeling van academische kennis. Hoewel financiering beschikbaar is, zowel van publieke middelen (o.a. onder het National Groeifonds en programma's van ZonMW) als van *venture capitalists*, zijn instrumenten niet voldoende op elkaar aangesloten. Er is een gebrek aan lange termijn (5 – 10 jaar) financiering. Ook zijn er kansen om het wet- en regelgevend kader in Nederland en de EU beter te integreren over toepassingsrichtingen en ontwikkelingsfases – zie bijvoorbeeld het verschil in regels voor gene editing tussen fundamenteel en toegepast onderzoek.[154]

4.1.2 Definitie

Biomolecular and cell technologies omvatten het in kaart brengen, meten en gebruiken van moleculen zoals DNA, RNA, en eiwitten/metabolieten. Deeltechnologieën hiervan zijn *omics*, *gene editing*, *stamceltechnologie* en *synthetische celtechnologie*.[155]

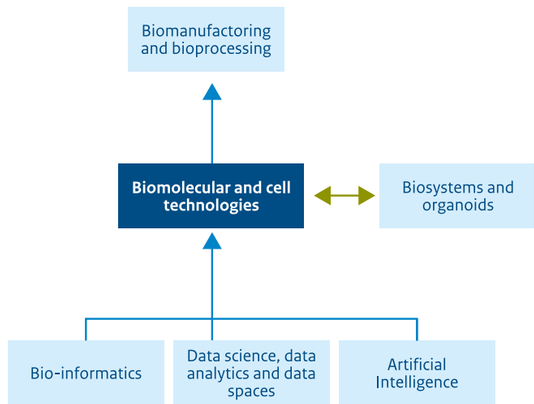
4.1.3 Gerelateerde sleuteltechnologieën

De belangrijkste gerelateerde sleuteltechnologieën zijn:

- Gerelateerd: Biosystems and organoids
- Concurrerend: geen
- Complementair: Bio-informatics; Data science, data analytics and data spaces; Artificial Intelligence (AI); Biomanufacturing and bioprocessing

Biosystems and organoids zijn gerelateerd aan *Biomolecular and cell technologies* (en kan zelfs als een deeltechnologie gezien worden). *Bio-informatics*, *Data science* en *AI* zijn alle drie ondersteunend om verbanden en patronen te herkennen binnen grote datasets die voortkomen uit *Biomolecular and cell technologies*. Daarmee worden toepassingen van biomoleculen geïdentificeerd en ontwikkeld. *Biomanufacturing and bioprocessing* maakt gebruik van technologie uit *Biomolecular and cell technologies* voor andere toepassingen.

Gerelateerde sleuteltechnologieën



Bron: TNO/NWO (2023) Herijking sleuteltechnologieën

4.2 Positie, sterktes/zwaktes

4.2.1 Ontwikkelingsfase technologie

De ontwikkelingsfase van diverse deeltechnologieën en hun toepassing binnen het veld varieert. In *omics*, waarin diepgaand inzicht wordt verkregen in de genetische, proteïne-, en metabolische aspecten van biologische processen, worden al op grote schaal gezondheidstoepassingen en toepassingen in veredeling gerealiseerd (al is meer onderzoek nodig).[156] *Gene editing*[157] en *stamcel technologieën*[158, 159] hebben eveneens (vooralsnog kleinschalig) hun weg gevonden naar de praktijk,[160] vooral binnen de gezondheidssector, en in beperkte mate binnen agri & food en biochemische industriële (verduurzaming industrie). Daarentegen bevindt *synthetische cel technologie* zich nog in een vroeg stadium van ontwikkeling, gedomineerd door wetenschappelijk onderzoek, waarbij Nederland wel een voortrekkersrol vervult in de verdere ontwikkeling van dit veld. Min of meer hetzelfde geldt voor 'single cell omics', dat internationaal nog in de kinderschoenen staat, maar waar Nederland een goede uitgangspositie heeft.

Deze verschillen in ontwikkelingsniveaus weerspiegelen zich ook in de barrières die de verdere ontwikkeling voor het hele vakgebied en het bereiken van de markt met hun toepassingen beïnvloeden. Barrières omvatten onder andere:

- Technische haalbaarheid (door de complexiteit en interactiviteit van biologische systemen);
- Vraagstukken in beleid, wet- en regelgeving;
- Intellectueel eigendom;
- Economische haalbaarheid;
- Kosten voor scale-up en/of klinische fases;
- Praktische complexiteit (door bijvoorbeeld logistiek) ;
- Tekorten aan gekwalificeerd personeel, van praktisch tot theoretisch opgeleid.

Het is belangrijk op te merken dat de aard van deze barrières deels afhangt van de toepassing. Over de hele breedte – van gezondheidstoepassingen tot agrifood- en industriële duurzaamheidstoepassingen – geldt dat biotechnologie en toepassingen daaruit zwaar en complex gereguleerd zijn. Dat geldt zowel voor onderzoek, ontwikkeling, registratie en vermarkting. Dit is een belemmering voor met name startups, scale-ups en MKB om nieuwe toepassingen te ontwikkelen en op de markt te brengen in de EU en staat snelle en brede toepassing van innovaties in de weg. Bij het ontwikkelen van nieuwe technieken en toepassingen zal rekening moeten worden gehouden met de maatschappelijke en ethische opvattingen over deze nieuwe technieken en de toepassingen daarvan. Zie hiervoor ook de lessen die we kunnen leren van de discussies die zijn gevoerd/gevoerd worden in het voedseldomein.[161]

4.2.2 Internationale positie en omvang

Internationaal is de VS leidend, met ontwikkelende clusters in meerdere staten. Van oudsher is het cluster in Massachusetts de sterkste, met leidende universiteiten rondom **Boston**, grote bedrijven door de gehele keten en een uitstekende infrastructuur aan diensten en financiering.[162]

Europa heeft een sterke kennisbasis op het gebied van Life Science en Agri & food, met leidende clusters (buiten Nederland) in het Verenigd Koninkrijk, Zwitserland, Scandinavië en Vlaanderen. Het aantal bedrijven dat hierin actief is in Europa is echter een stuk lager dan in de VS. De clusters in het VK, Zwitserland en Zweden zijn allemaal gebaseerd op brede samenwerking tussen academische centra, ziekenhuizen en internationale bedrijven met langdurige ondersteuning vanuit de overheid. Het Vlaamse cluster, daarentegen, is sterk gefocust op startups en spin-outs.[163] Het Vlaams Instituut voor de Biotechnologie (VIB) dient als een incubator waar startups lang kunnen blijven en dus een grotere kans hebben om te overleven zodra ze op eigen benen staan.

Illustratie van enkele toonaangevende voorbeelden clusters en organisaties

Een belangrijke ontwikkeling in de EU is het voorstel[164] van de EC voor het toestaan van New Genomic Techniques (NGTs) als versnelling en verbetering van traditionele veredeling. Daarnaast zijn de herziening van de EU-Farmawetgeving en het initiatief van de Europese Commissie op Biotechnologie en Biomanufacturing ook belangrijke ontwikkelingen. Hiermee komt (mogelijk) de Europese regelgeving dichter bij de minder strenge aanpak van landen zoals de VS en enkele Zuid-Amerikaanse landen.

Buiten de VS en Europa is de activiteit momenteel meer gefragmenteerd. Singapore is bijvoorbeeld zeer innovatief met (financiële) prikkels vanuit de overheid, maar is economisch kleinschalig. Daarnaast is China een opkomende speler; hier zijn nog relatief weinig partijen actief die concurreren met de mondiale top, maar er wordt de laatste jaren wel sterk en langdurig geïnvesteerd in *Biomolecular and cell technologies*.

4.2.3 Nationale positie en omvang

Het Nederlandse ecosysteem voor biotechnologie is zeer compleet en omvat fundamenteel onderzoek, klinisch en toegepast onderzoek, pilot faciliteiten, startups, grote bedrijven, ondersteunende diensten en een robuuste digitale en fysieke infrastructuur.[165] Wetenschappelijk onderzoek wordt op vrijwel alle universiteiten, UMC's en op de TO2 instellingen in Nederland uitgevoerd. Nederland herbergt 680 R&D bedrijven binnen de biotechnologie sector[166, 167, 168] waaronder enkele wereldleiders evenals sterk groeiende startups. Bovendien is het Europese Medicijn Agentschap in Nederland gevestigd, wat een magneetwerking lijkt te hebben op buitenlandse biofarmaceutische bedrijven.[169, 170] Daarnaast zijn de meest grote Europese biotechnologie-investeerders in Nederland gevestigd. Nederland excelleert met name in niches zoals cel technologie, synthetische cel ontwikkelingen[171], organ-on-a-chip[172], kweekvlees en alternatieve eiwitten,[173] veredeling, immunotherapie en klinische toepassingen van stamceltechnologie. Vanuit het Nationaal Groeifonds wordt, direct of indirect, geïnvesteerd in *Biomolecular and cell technologies* via tenminste 9 projecten[174].

Desondanks zijn er enkele aspecten waar Nederland zich verder in kan versterken, zoals in diverse onderzoeken geconstateerd.[175, 176, 177, 178, 179] In deze rapporten wordt de overheid opgeroepen om te komen tot een langdurige integrale visie met daarin meegenomen stroomlijning en continuïteit van (lange-termijn) financieringsinstrumenten, aandacht voor wet- en regelgeving, inzet op valorisatie en infrastructuur (bijv. pilot faciliteiten).

Dit draagt bij aan duidelijkheid voor investeerders en startende bedrijven. Ook geeft het richting aan de activiteiten die we idealiter in Nederland willen zien. Momenteel is er nog geen rijksbrede biotechnologie visie en liggen beleidsmatige verantwoordelijkheden nu belegd bij verschillende departementen (o.a. IenW, OCW, VWS, LNV, EZK). Als onderdeel van dit traject worden ook diverse maatschappelijke stakeholders geïdentificeerd en betrokken. In reactie op de Trendanalyse wordt in gezamenlijkheid gewerkt aan een Kabinetsreactie waarin het advies om te komen tot een rijksbrede visie op biotechnologie wordt meegenomen.[180] Diverse Topsectoren hebben geprobeerd meer publiek-private samenwerkingen te stimuleren op basis van de diverse Kennis- en Innovatieagenda's o.a. op het terrein van gezondheid, voeding en sleuteltechnologieën. Ook zal in de komende periode nadrukkelijk aandacht worden besteed aan valorisatie met een grote rol voor start-ups, scale-ups en MKB.[181, 182,]

4.2.4 Specifieke toepassingsgebieden

Biomolecular en cell technologies kan toegepast worden in meerdere sectoren en toepassingsgebieden. Er bestaan diverse manieren van indelen van biotechnologie (waaronder indeling in 'kleuren'[183] en de indeling die in de Trendanalyse[184] wordt gebruikt). In deze agenda is gekozen voor onderstaande indeling op basis van toepassingsgebieden waar Nederland een kansrijke uitgangspositie heeft:

- **Life Science & Health:** gezondheidszorg, medisch en farmacie, bijvoorbeeld in:
  - **Diagnostiek**, waarbij bijvoorbeeld door snelle CRISPR gebaseerde testmethoden en point of care sequensen gepersonaliseerde behandelingen toegepast kunnen worden;
  - **Moleculaire vaccins en therapie**, gebruik van mRNA en DNA als vaccin, zoals bij covid of therapie;
  - **Cel- en gentherapie**, zoals ex-vivo gentherapie waar humane cellen worden afgenomen, gemodificeerd gebruikt in therapie bij behandeling van tumoren (bijvoorbeeld d.m.v. CAR-T) of in-vivo CRISPR-Cas gebaseerde genetische correcties van genetische defecten;
  - **Organoiden/organ on a chip**, waar in het lab gekweekte organen (o.b.v. pluripotente stamcellen) kunnen worden gebruikt om organen en medicijnen te ontwikkelen en produceren.
- **Agri & Food:** food en non-food toepassingen van plant en dier, bijvoorbeeld:
  - **Veredeling en zaadtechnologie,** waarbij door middel van moderne veredelingstechnologieën (zoals CRISPR-Cas) bijvoorbeeld ziekteresistentie, of klimaatbestendige planten of zaden kunnen worden gemaakt;
  - **Voedingsindustrie,** bijvoorbeeld in cellulaire agricultuur (o.a. precisie fermentatie en kweekvlees) bij het selecteren van cellen en cellijnen voor de productie van alternatieve eiwitten en enzymen.
- **Biochemische industrie:** biotechnologie toepassen voor duurzame (industriële) productie, bijvoorbeeld:
  - **Biopolymeren, biochemicaliën en bioplastics** uit bijvoorbeeld micro-organismen die bestaande (fossiele) producten vervangen voor duurzame versies;
  - **Duurzame fermentatie** waarbij reststromen benut kunnen worden voor productie van waardevolle biomoleculen.

4.2.5 Risico's voor de nationale veiligheid

Toepassingen van *biomolecular and cell technologies* kunnen leiden tot risico's voor de nationale veiligheid, bijvoorbeeld wanneer deze technologieën worden ingezet voor militaire toepassingen. Voorbeelden hiervan zijn biologische wapens, nieuwe overbrengingsmethoden, en human enhancement-toepassingen die het menselijk functioneren tijdelijk of permanent beïnvloeden. Zo kan de technologie misbruikt worden voor militaire of terroristische doeleinden.

Biomolecular en cell technologies staan aan de basis van de verdere ontwikkeling van de toepassingsgebieden die benoemd zijn in de vorige paragraaf. Nederland heeft momenteel een goede en in diverse gevallen ook leidende positie in deze toepassingsgebieden. Het wegvallen van kennis en kunde betekent dat Nederland haar leidende positie verliest en meer afhankelijk zal worden van het buitenland.

Aandacht voor disproportionele afhankelijkheden in de waardeketen van *biomolecular and cell technologies* is dus belangrijk. Niet alle afhankelijkheden zijn problematisch. Alleen daar waar de risico's voor het publiek belang hoog zijn, kan aanvullend handelen vereist zijn. Dit behoeft een genuanceerde kwantitatieve én kwalitatieve analyse van op het niveau van specifieke waardeketens. Het kabinet zal bezien in hoeverre hierbij kan worden aangesloten op de risicoanalyses van kritische technologiegebieden die de Europese Commissie uitvoert in het kader van de Europese Economische Veiligheidsstrategie, of dat nadere eigen analyse nog nodig is. Zoals ook gecommuniceerd in de Kamerbrief Voortgang Strategische Afhankelijkheden van 15 december 2023 kan vanwege de vertrouwelijke en kwetsbare aard van deze analyses op de voortgang hieromtrent niet verder op worden ingegaan.

4.2.6 SWOT

Het Nederlandse ecosysteem is te kenmerken als 'individuele uitblinkers, maar geen gezamenlijk team'. Dit vat zowel sterke punten als de zwaktes samen: afzonderlijk zijn zowel bedrijven, universiteiten en kennisinstellingen in Nederland van topkwaliteit, maar er bestaat onvoldoende samenwerking, incentive en een gedeelde (triple helix) visie om die kwaliteit volledig te benutten, bijvoorbeeld in het omzetten van de onderzoekssterktes in bedrijven, commerciële producten en maatschappelijke waarde. Het gebrek aan een duidelijke nationale visie en samenwerking is gerelateerd aan enkele bedreigingen. In vergelijking met bijvoorbeeld de EU en China, geldt binnen de EU geldt een relatief strenge regelgeving op het gebied van biotechnologie, mede ingegeven door de maatschappelijk-ethische discussie die in de EU sterker is dan in andere regio's. Hierdoor loopt Europa het risico achter te gaan lopen op andere regio's, omdat innovaties hier niet getest kunnen worden in de praktijk of in de markt kunnen worden gezet. Vooropgesteld dat innovatie op veilige en verantwoordelijke wijze moet plaatsvinden en monopolies op natuurlijke eigenschappen van organismen voorkomen moeten worden, is het verdere verloop van deze discussie in de EU en de doorvertaling in wet- en regelgeving sterk bepalend voor de innovatieruimte van deze technologie. Ook op het gebied van Life Science & Health moeten er slagen gemaakt worden door het groeiende belang van gezond leven en druk op de gezondheidszorg. Beschikbaarheid van goed opgeleid personeel (human capital, van MBO tot PhD) kan een mogelijke belemmering zijn, maar de voorgestelde investeringen in de sectorplannen Bèta en Techniek en het terrein Kennisontwikkeling in het Nationaal Groeifonds dragen bij om dit te verlichten. Dit blijft echter een punt van aandacht omdat dit deel van de arbeidsmarkt internationaal concurrerend is.

Sterkte	Zwakte
• individuele top kwaliteit in onderzoek • sterke bedrijven, zowel start-up, MKB als grote bedrijven	• onvoldoende samenwerking • onvoldoende integrale visie • omzetten onderzoeks-sterktes in bedrijven en producten
Kans	**Bedreiging**
• groeiend besef van duurzaamheid • groeiend belang van gezond leven • druk op gezondheidszorg / vergrijzing	• strenge regelgeving

4.3 Ambitie

Nederland heeft een goede uitgangspositie om een *Biomolecular and cell technologies* ecosysteem te huisvesten dat mee kan draaien in de mondiale top (samen met Europese partner regio's).

4.3.1 Hoofdambitie

In 2035 is Nederland een wereldwijd vooraanstaand leider van onderzoek en toepassing van Biomolecular and cell technologies voor een gezonde en duurzame samenleving. Onze huidige sterke positie in onderzoek hebben we uitgebouwd tot een compleet ecosysteem waar valorisatie en markttoepassingen volledig ingebed zijn. Het Nederlandse leiderschap binnen deze sleuteltechnologie richt zich op twee gebieden:

- Precision Health, vroege detectie, en gepersonaliseerde preventie en behandeling van ziekten;
- Duurzame productie in land- en tuinbouw, voedselproductie en non-food bioproductie.

4.3.2 Deelambities

De hoofdambitie wordt verder uitgewerkt in deelambities op basis van uitdagingen uit de kabinetsbrief voor het versterken van onderzoeks- & innovatie ecosystemen[185]. De deelambities zullen verder uitgewerkt worden als onderdeel van de Visie Biotechnologie, zoals verzonden op 22 december 2023 naar de Tweede Kamer.[186]

Lange termijn blik en samenhang bij investeringen in onderzoek en innovatie

Er ontbreekt een integrale, langjarige visie met een duidelijk kader waar Nederland op in wil zetten, en hoe dit samenhangt met diverse opgaven[187]. Het gebrek aan deze visie heeft geleid tot beperkte samenwerking tussen regio's en universiteiten, beleidsdoelen die niet goed op elkaar aansluiten en versplinterde kennis.

Deelambitie: In 2024 wordt een nationale visie gemaakt op biotechnologie, waar *Biomolecular and cell technologies* een onderdeel van zijn. Deze visie geeft richting aan de bijdrage die biotechnologie kan leveren aan de grote maatschappelijke uitdagingen en aan duurzaam verdienvermogen. Als onderdeel van het visietraject wordt ook een maatschappelijke dialoog geïnitieerd waar de verschillende opvattingen ten aanzien van *Biomolecular and cell technologies* worden meegenomen.[188]

Investeringen in onderzoeks- en testfaciliteiten

Beschikbaarheid van een publiek-private state of the art onderzoeksinfrastructuur is essentieel voor zowel fundamenteel als toegepast onderzoek. De beschikbaarheid van de bestaande faciliteiten is voor toegepast translationeel onderzoek veelal beperkt voor start-ups en MKB omdat de kosten hoog zijn.

Deelambitie: De mogelijkheden onderzoeken voor het openen van onderzoeks- en testfaciliteiten, bijvoorbeeld op de drie toepassingsgebieden: gezondheid, agri & food en biochemische industrie. Op deze laagdrempelige, gemeenschappelijke onderzoeks- en testfaciliteiten worden meerdere onderzoeksdisciplines en stakeholders samengebracht.[189]

Financiering voor startups en scale-ups: vroege fase financiering en doorgroei

Financiering van toegepast translationeel onderzoek en de opschaling is lastig. Apparatuur en locaties zijn complex in gebruik en duur in deze sleuteltechnologie, met name voor start-ups en MKB. Daarnaast is de ontwikkeltijd van biotechnologie toepassingen lang (doorgaans meer dan 10 jaar). Dit vraagt een lange adem van investeerders, continuïteit van financiering en effectievere instrumenten en optimalisatie van de hele financieringsketen[190]. Er is behoefte aan structurele ondersteuning van start-ups, scale-ups en MKB om de kansen te verzilveren.

Deelambitie: De beschikbare financiering vanuit de overheid en private partijen voor start-ups en scale-ups sluit aan bij de behoefte in vorm, omvang en voorwaarden.

Ontwikkelen, aantrekken en behoud van (top)talent

Op het vlak van ontwikkelen, aantrekken en behoud van talent zijn er enkele grote uitdagingen. Ten eerste is er een tekort aan personeel voor technische beroepen op MBO- en HBO niveau voor het uitvoeren van technische processen. Een andere grote uitdaging is het aantrekken en behouden van internationaal toptalent. Daarnaast speelt dat in het Nederlandse onderwijs weinig aandacht wordt gegeven aan valorisatie en ondernemerschap. Dit draagt er toe bij dat het sterke Nederlandse onderzoek zich beperkt vertaalt in commerciële toepassingen.

Deelambitie: Werken in het Nederlandse ecosysteem van *Biomolecular and cell technologies* is aantrekkelijk door een diversiteit aan persoonlijke ontwikkelkansen. Welke specifieke behoefte er ligt vanuit de markt wordt verder onderzocht en uitgewerkt in een human capital agenda.

Versterken van kennisoverdracht en het valorisatieproces voor meer impact

Het vertalen van onderzoek naar toepassingen in de praktijk is een aandachtspunt in Nederland. Een oorzaak hiervoor is dat 'Technology transfer' in Nederland gefragmenteerd en niet eenduidig is georganiseerd. Een nationaal georganiseerde TTO organisatie, voor alle aangesloten universiteiten en andere kennispartners, biedt kansen voor een gestroomlijnde en uniforme werkwijze.[191]

Deelambitie:Het onderzoeken van de mogelijkheden voor een landelijk georganiseerd TTO programma, mogelijk door bestendiging en uitbreiding van Biotech Booster. Dit programma ondersteunt onderzoekers van alle aangesloten Nederlandse kennisinstellingen bij de zakelijke en organisatorische kant van het opzetten van een bedrijf[192]

Organiserend vermogen van onderzoeks- en innovatie-ecosystemen

Er is sprake van verkokering van activiteiten, zowel tussen de verschillende toepassingsgebieden als tussen verschillende ecosystemen binnen deze sleuteltechnologie. Met een goed georganiseerde ecosysteem-organisatie, kunnen de verschillende 'eilanden' van elkaar leren, bijvoorbeeld op het gebied van omgaan met valorisatie, IP, financiering en regelgeving.[193]

Deelambitie: Er moet een betere organisatie komen van het ecosysteem waar *Biomolecular and cell technologies* onderdeel van is. Deze organisatie betreft een samenwerking van universiteiten, HBO's, opleidingscentra, TO2 organisaties, bedrijven, maatschappelijke organisaties en andere relevante onderdelen van de onderzoeks- en innovatie ecosystemen.[194]

Eerder in het proces aandacht besteden aan wet- en regelgeving
De wet- en regelgeving op het gebied van *Biomolecular and cell technologies* in Nederland en Europa is streng in vergelijking met andere regio's. [195] Dit zorgt voor toenemende kloof tussen kennis- en technologieontwikkeling en de toepassing ervan, als ook een economische achterstand voor Europese en Nederlandse bedrijven. Dit geldt voor de drie toepassingsgebieden benoemd in deze agenda. [196]

Deelambitie: Veel wetten en regels op het gebied van *Biomolecular and cell technologies* zijn op EU niveau vastgesteld en deze kan Nederland niet eigenhandig veranderen. We onderzoeken welke mogelijkheden hier liggen. Als onderdeel van de rijksbrede visie (deelambitie 1) is het daarom van belang de Nederlandse positionering consistent en consequent onder de aandacht te brengen in Europese gremia.

Geraadpleegde deskundigen

Geraadpleegde experts
- Prof Bart Keijser – TNO
- Dr Bjørn Koch – NWO
- Hans Schikan – Top Team topsector Life Sciences & Health

Deelnemers Ronde tafel 1
- Monique van Vegchel – Plantum
- Christine Mummery – LUMC
- Marileen Dogterom – TU Delft
- Dora Menting – Holland Bio
- Cees Sagt – dsm-firmenich
- Raymond Staals – WUR
- Bart Keijser – TNO
- Hans Schikan – Topsector LSH
- Richard Harrison – WUR

Deelnemers Ronde tafel 2
- Dora Menting – HollandBio
- Bart Keijser – TNO
- Cees Sagt – dsm-firmenich
- Christine Mummery – LUMC
- Han Swinkels – Breed4Food
- Hans Schikan – Topsector LSH
- Marileen Dogterom – TU Delft
- Markwin Velders – KitePharma EU
- Raymond Staals – WUR
- Annemiek Verkamman – HollandBio
- Richard Harrison – WUR

5 Imaging technologies

In 2035 is Nederland wereldwijd een vooraanstaand leider, zowel qua kennispositie als bedrijvigheid, op het gebied van toegepast natuurwetenschappelijk onderzoek en ketenintegratie van nieuwe beeldvormende technologieën (versterkt door AI), door een open innovatief ecosysteem om nieuwe toepassingen mogelijk te maken die een bijdrage leveren aan het verdienvermogen en maatschappelijke problemen oplossen (zorgbehoefte, personeelstekorten). Er is invloed op de hele keten, waar noodzakelijk maken we het zelf.

5.1 Definitie

5.1.1 Belang van de sleuteltechnologie

Imaging technologies gaan over technologieën die het mogelijk maken om beelden te analyseren, genereren en dupliceren. Imaging technologies worden breed toegepast in de medische sector, halfgeleider industrie, veiligheidsdomein, de landbouw, industrie, verkeer en ruimtevaart.

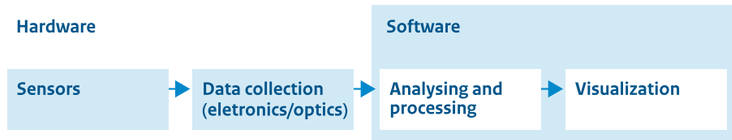
Afhankelijk van naar welke toepassing van imaging technologies precies wordt gekeken, is er al een grote markt of is de verwachting dat deze de aankomende jaren gaat groeien. De markt voor medical imaging heeft een wereldwijde omvang van 36.5 miljard, met een CAGR van 4.2%[197]. Imaging technologies zorgen in de medische sector voor betere beeldapparatuur en scanners, en innovatie kan bijdragen aan vroege detectie, diagnostiek, fundamenteel onderzoek, medische behandelingen of preventie.[198] De markt voor bijv. halfgeleider metrologie en inspectie is weliswaar aanzienlijk kleiner geschat op $5 miljard, maar ook deze groeit met een stabiele CAGR van ongeveer 5% en sluit goed aan bij de sterktes en competenties van de Nederlandse industrie[199,200].

Toepassingen voor het gericht in kaart brengen van bodem- en dijkkwaliteit en emissielocaties van schadelijke stoffen kennen wellicht ook een beperkte(re) direct economische impact, maar zijn randvoorwaardelijk aan het laten slagen van allerlei economische activiteiten én zorgen voor maatschappelijke impact. Die is, gegeven de breedte van de technologie, overigens sowieso groot. Het toenemende belang voor de veiligheidssector maakt dat deze technologie ook vanuit het oogpunt van nationale veiligheid van belang is.

Nederland heeft een goede uitgangspositie op Imaging technologies: naast de bestaande bedrijvigheid kent onderzoek een bovengemiddelde impact en de specialisatiegraad is weliswaar onder het wereldgemiddelde, maar relatief hoog vergeleken bij enkele andere sleuteltechnologieën. Kansen liggen er niet alleen in de verbetering van de beeldvormende technologie zelf, maar ook in de analyse, opslag, uitwisseling, en beveiliging van data, bijvoorbeeld door middel van AI. Door gericht te investeren in de uitgebreide kennis die in Nederland beschikbaar is en innovaties te valoriseren, kan de economische kracht van Nederland verder worden versterkt.

5.1.2 Definitie[201]

Imaging technologies (onderdeel van *Engineering and Fabrication Technologies*) houdt zich bezig met het genereren, verzamelen, dupliceren, analyseren, wijzigen en visualiseren van beelden (optisch en niet-optisch). Het betreft de integrale keten van beeldvorming, waarvoor zowel hardware als software nodig is.



Figuur 1. De integrale keten van imaging technologies in beeld gebracht.

5.1.3 Gerelateerde sleuteltechnologieën

Imaging technologies is nauw verwant met een aantal andere sleuteltechnologieën. Het verwerken, analyseren en visualiseren van data vergt ook expertise in *Data sciences, data analytics and data spaces* (o.a. Digital Twin-concept). *Artificial intelligence* (AI) zal een steeds grotere rol gaan spelen bij het verder uitbreiden van de toepassingsmogelijkheden van imaging technologies. Het mede daardoor toenemende multidisciplinaire karakter van imaging technologies en de aanverwante complexiteit maakt systems engineering steeds noodzakelijker. In onderstaande figuur is deze relatie zichtbaar gemaakt met groene lijnen.

Voor *sensor en actuator studies* geldt dat betere/accuratere sensoren het in bepaalde gevallen overbodig maken om imaging technologies toe te passen (oranje lijn). Anderzijds kunnen verbeterde sensoren juist de aanleiding zijn om zaken verder te onderzoeken door middel van imaging technologies (blauwe lijn naar de sleuteltechnologie toe). *Mechatronics and optomechatronics*, *photonic/optical detection and processing* en *optical systems and integrated photonics* hebben ook een complementair karakter (blauwe lijnen naar de sleuteltechnologie toe): vooruitgang op deze technologiegebieden draagt bij aan de verdere ontwikkeling/toepassing van imaging technologies. Doorbraken in imaging technologies zullen bovendien een belangrijke bijdrage leveren aan sleuteltechnologieën zoals *energy materials*, *quantum* en *semicon technologies* (blauwe lijnen vanaf imaging technologies).

5.2 Positie, sterktes/zwaktes

5.2.1 Ontwikkelingsfase technologie

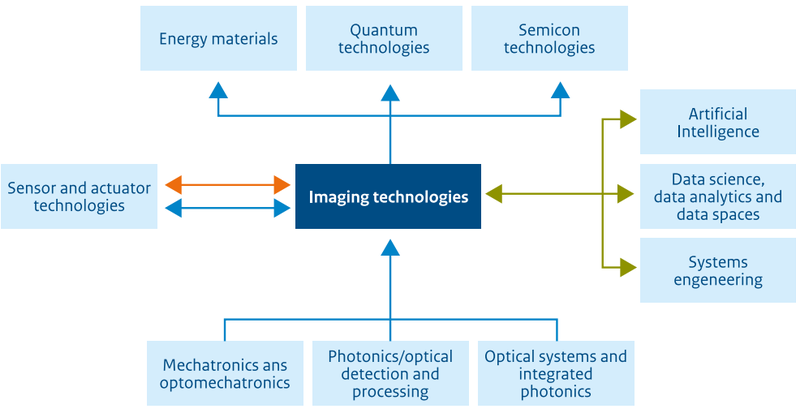
Imaging technologies ontwikkelen zich voortdurend. Deze ontwikkelingen kunnen liggen op het vlak van betere prestaties, nieuwe technologieën en nieuwe toepassingen. Zo is de kwaliteit van echoscopie toegenomen en deze ontwikkelingen gaan nog steeds door. Er wordt ook gewerkt aan verbeterde resolutie voor het lokaliseren van emissies, bijvoorbeeld bij het opsporen van methaan. Verhogen van doorvoer door middel van parallellisatie en data-efficiëntie speelt een grote rol in industriële inspectie en monitoring en in medische diagnostiek.

Nieuwe technologie wordt ontwikkeld op het gebied van opto-akoestiek, op dit vlak is er vooralsnog alleen sprake van demo's. Op het gebied van ultrasound is er sprake van pilots en use-cases voor large area ultrasound.[202] Een voorbeeld hiervan is transformatie van imaging technologies naar sensorische waarden, zoals gebeurt bij het monitoren van de gezondheidstoestand van een pasgeborene door middel van een pleister.

Er ontstaan ook kleinschalige niche toepassingen op het gebied van imaging op moleculaire schaal en near field instruments. De ontwikkeling van nieuwe type sensoren met andere golflengtes, hogere resoluties en hogere snelheden, maken veel nieuwe applicaties mogelijk, onder andere in het defensie-domein en quantum imaging.

De diverse imaging toepassingen maken gebruik van een scala aan apparatuur zoals camera's, radar, CT- en MRI scanners, elektronen, microscopen en ultrasound. Voor dit soort apparatuur is er echter een continue beweging naar sensorminiaturisatie, energie efficiëntie, hogere resolutie, betere signaal/ruisverhouding, grotere doorvoer, groter dynamisch bereik, hoger spectraal scheidend vermogen, kleiner volume en lagere kosten. Integratie met apparatuur voor behandeling zoals katheters of neuromodulatie opstellingen (TMS, FUS) en theranostica vraagt om samenwerking en ketenintegratie.

Gerelateerde sleuteltechnologieën



Bron: TNO/NWO (2023) Herijking sleuteltechnologieën

Een van de grote ontwikkelingen op gebied van imaging technologies ligt naar verwachting op het vlak van dataverwerking en AI. Zo kan het zelflerend vermogen van imaging apparatuur ervoor zorgen dat tumoren sneller worden geïdentificeerd. Het verder automatiseren van beeldanalyse is nodig voor kwaliteitsverbetering, en kan helpen om personeelstekorten op te lossen en daardoor ook om gezondheidskosten te reduceren.[203] Een andere belangrijke ontwikkeling is het combineren van beeldvorming met (minimaal invasieve) behandeling. Het betreft hier technologieën zoals lasers, gefocusseerde ultrageluid en RF golven. Deze beeldgestuurde behandelingen (b.v. MRI-gestuurde bestraling) zorgen voor een verlaging van de bijwerkingen en een sterke vermindering van verpleegdagen.

Een belangrijk aandachtspunt en mogelijke risicofactor bij dataverwerking en AI is de veiligheid van gegevens. Bij het gebruik van patiëntgegevens moet in methodologieën voor gegevensverwerking niet alleen aandacht worden besteed aan de privacy van de patiënt, maar ook aan de wijze waarop de data wordt verwerkt, opgeslagen en toegankelijk blijft – in lijn met de EHDS[204]. De toenemende adoptie van AI zal tevens leiden tot andere ontwerpen en concepten van de beeldvormende apparatuur.[205] Er zal in toenemende mate ontworpen worden op maximale informatiedichtheid in plaats van op basis van traditionele ontwerp- en modeloverwegingen.

5.2.2 Internationale positie en omvang

Internationaal

Harvard University en het Massachusetts Institute of Technology (MIT) zijn beide vooraanstaande instellingen die zich bezighouden met imagingtechnologieën op verschillende gebieden. Bijvoorbeeld op medische beeldvorming en gezondheidswetenschappen, innovatie in optische imaging, neuro imaging en hersenonderzoek.

In China heeft Tsinghua University een vooraanstaande positie op imaging technologies, onder meer op het gebied van medische beeldvorming, computer vision en AI, optische en opto-elektronische imagingtechnologieën en beeldvorming in materiaalwetenschappen en engineering. Het Biomedical Imaging Research Center van de universiteit is opgericht in 2010.

Drie topuniversiteiten in Londen, University College London (UCL), Imperial College London (ICL), King's College London (KCL), vormen een derde toonaangevend cluster op het gebied van imaging technologies.

Europa

Nederland blinkt internationaal gezien uit met het ontwikkelen van (medische) beeldvormingsapparatuur. Zo opende in 2019 het UMC Imaging Center in Amsterdam. Daarnaast beschikken veel andere UMC's over vergelijkbare voorzieningen, hierdoor heeft Nederland het grootste Europese cluster van vooruitstrevende technologieën op dit gebied. In Europa is bovendien een aantal onderzoeks- en innovatienetwerken en belangrijke clusters actief.

- Internationale onderzoeks- en innovatienetwerken:
  - EIBIR | European Institute for Biomedical Imaging Research
  - EDF: European Defense Funds
- EU-clusters:
  - TU Delft, Erasmus MC, UMCU en LUMC zijn betrokken bij meerdere Europese onderzoeksprojecten rondom imaging en vroegdiagnostiek.
  - Th!nk East Netherlands: een samenwerking van 24 regionale organisaties die zich in samenhang profileren richting de EU.
  - Euro-Bioimaging biedt toegang tot technologieën, training en data management via 16 Europese nodes.
  - Next generation imaging technologies to probe structure and function of biological specimen across scales in their natural context | IMAGINE | Project | Fact sheet | HORIZON | CORDIS | European Commission (europa.eu);
  - IMAGIO (IHI)

5.2.3 Nationale positie en omvang

Binnen Nederland is er sprake van een krachtig en breed onderzoeksveld op het gebied van Imaging Technologies. Het zwaartepunt ligt nu bij imaging voor biomedische toepassingen, remote sensing, en radar, waarbij er sprake is van een breed scala aan technologieën. Andere focus gebieden zijn halfgeleiders imaging, ruimtevaart toepassingen en diverse microscopie toepassingen waaronder elektronenmicroscopie en verschillende scanning-probe technieken.

Het onderzoeksveld van biomedische beeldvorming is sterk georganiseerd. Nationaal zijn er een aantal belangrijke wetenschappelijke infrastructuren (o.a. HealthRI) die als spil fungeren in het nationale R&D ecosysteem en internationaal toonaangevend zijn. In Nederland zijn zowel startups als multinationals actief op het gebied van medische imaging. Ook is er een aantal innovatiecentra actief.

Innovatiecentra	Toelichting
SAM XL	Imaging voor productietechnologie
OIC	Erasmus Optical Imaging Centre
Medical Delta	Diagnose van kanker, dementie en stroke. Daarnaast loopt een groot onderzoekstraject met ultrasound voor hart en hersenen.

(Regionale) agenda's[206]

- Groei Agenda Zuid-Holland, hierin is één van de speerpunten AI voor beeldvormende technologie
- InnovatieCoalitie Medtech, waarin de clustering van de medtech sector – waaronder medical imaging – in Brabant centraal staat.
- Innovatieagenda Oost-Nederland, ter bevordering van de ontwikkeling en toepassing van imaging technologieën in Oost-Nederland.

5.2.4 Specifieke kansrijke toepassingsgebieden

Kansrijke toepassingsgebieden voor Imaging Technologies in Nederland worden vooral gevonden op het gebied van:

Medisch: beeldanalyse (link met AI/deep learning), prognose-vorming via imaging biomarkers en temporele data, remote screening, non-invasieve en minimaal-invasieve behandeling en diagnostiek door middel van o.a. laser, RF en ultrasound[207]. Beeld-geleide interventies en population imaging en brede koppeling van medische data en beelden. Non-optische beeldvormende technologie voor het analyseren op atomair/moleculair niveau ten behoeve van medisch en life science onderzoek.

Defensie: helderheidversterkers, imaging voor maritieme militaire radars en sonar, multi-sensor toepassingen voor verschillende dreiging-detecties. Met het oog op de veranderde veiligheidssituatie en de noodzaak tot early warning, wordt deze toepassing urgenter.

Semiconductors: metrologie, karakterisatie door elektronen-microscopie, computational (non) optische beeldvorming voor o.a. wafer en reticle inspectie is een belangrijke focus. De combinatie van semicon en quantum (optica, optomechatronica en akoestiek) levert unieke technologieën op voor kwaliteitsbepaling. Dit kan een control point worden in de semicon industrie.

Land- en tuinbouw: Smart Farming: gericht irrigeren, bemesten, snoeien of oogsten, gerichte gewasbescherming, bewaking van de bodemkwaliteit in het kader van klimaatadaptatie. Biosensoren of optische sensoren kunnen de randvoorwaarden (licht-, lucht-, waterkwaliteit) voor de voedselproductie meten om de voedselketen te optimaliseren. Post Harvest: automatisering van kwaliteitsgebaseerd fruit sorteren.

Industrie: Imaging technologies kunnen ook worden gebruikt bij het analyseren van de uitstoot van o.a. methaan en CO_2.

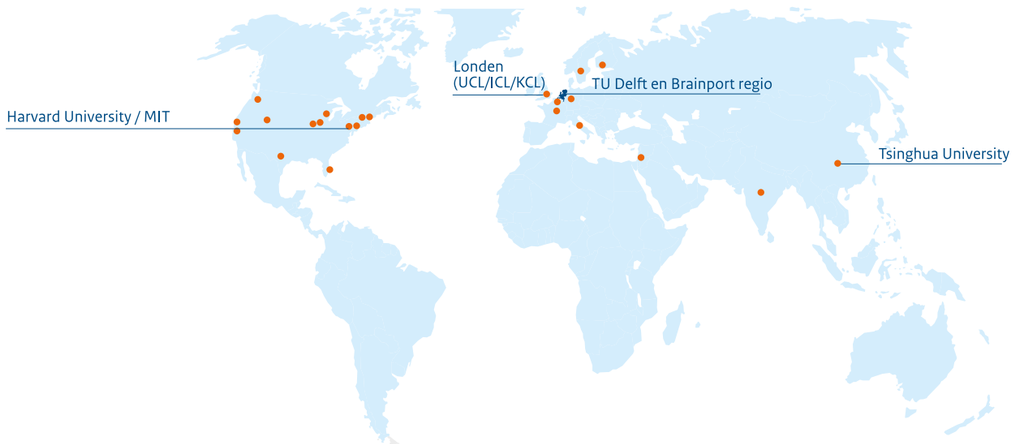
Verkeer: Smart driving: kaartanalyse en real time beeld- en kaartupdates en omgevingsanalyse, *autonomous and coöperative driving*, coöperatieve verkeersregeling en voetgangersdetectie.

De ondergrondse Einstein Telescope wordt Europa's meest geavanceerde **observatorium voor zwaartekrachtsgolven**. Daarmee kunnen onderzoekers botsingen tussen zwarte gaten detecteren en kennis opdoen over het vroege heelal. Nederland, België en Duitsland onderzoeken samen of ze dit observatorium van wereldklasse kunnen huisvesten. Hierbij zal veel imaging technologie nodig zijn, ook technologie die nog ontwikkeld moet worden.

5.2.5 Risico's van strategische afhankelijkheden

Toepassingen van *imaging technologies* kunnen leiden tot risico's voor de nationale veiligheid, bijvoorbeeld wanneer deze technologieën worden ingezet voor militaire toepassingen. Deze technologieën kunnen worden gebruikt in surveillance en encryptie, door toepassing van bijvoorbeeld infrarood en LiDAR.

Illustratie van enkele toonaangevende voorbeelden clusters en organisaties



De breedte van toepassingen van *imaging technologies* maakt dat het wegvallen van kennis of kunde over deze technologieën aanzienlijke gevolgen zou hebben voor de economie en maatschappij. Bepaalde toepassingen van *imaging technologies* zijn essentieel voor het functioneren van ons zorg- en voedselsysteem. In relatie tot zorgtechnologie spelen ook vraagstukken met betrekking tot de door *imaging technologies* gegenereerde data, en hoe privacy en veiligheid hiermee gewaarborgd wordt. Ook kan er sprake zijn van een "omgekeerd" strategisch belang, wanneer in Nederland ontwikkelde technologie in andere – minder democratische – landen op een manier wordt ingezet die mensenrechten en fundamentele vrijheden kan schenden.

Aandacht voor disproportionele afhankelijkheden in de waardeketen van *imaging technologies* is dus belangrijk. Niet alle afhankelijkheden zijn problematisch. Alleen daar waar de risico's voor het publiek belang hoog zijn, kan aanvullend handelen vereist zijn. Dit behoeft een genuanceerde kwantitatieve én kwalitatieve analyse van op het niveau van specifieke waardeketens. Het kabinet zal bezien in hoeverre hierbij kan worden aangesloten op de risicoanalyses van kritische technologiegebieden die de Europese Commissie uitvoert in het kader van de Europese Economische Veiligheidsstrategie, of dat nadere eigen analyse nog nodig is. Zoals ook gecommuniceerd in de Kamerbrief Voortgang Strategische Afhankelijkheden van 15 december 2023 kan vanwege de vertrouwelijke en kwetsbare aard van deze analyses op de voortgang hieromtrent niet verder op worden ingegaan.

5.2.6 SWOT

De **kansen** voor Imaging technologies liggen voor een belangrijk deel in een betere integratie in de waardeketen, waarbij het verder combineren van de technologie met AI een essentiële stap is. Andere kansen liggen op het vlak van maatschappelijke uitdagingen: meer gebruik maken van Imaging Technologies kan een oplossing bieden voor arbeidsmarkttekorten, kan leiden tot een hogere productiviteit en kan de toegankelijkheid van de zorg verbeteren.

Een **bedreiging** voor het innovatiepotentieel van de technologie is dat de zogenoemde 'Wet van Moore' in mindere mate lijkt te gelden, waardoor de voortgang op gebieden als resolutie, signaal/ruisverhouding, dynamisch bereik en hoger spectraal scheidend vermogen minder snel ontwikkelt dan we in de afgelopen jaren zagen. Deze bedreiging geldt overigens niet alleen voor Nederland. Toch is door disruptieve technologiestappen significante verbetering mogelijk, voor een deel in combinatie met AI. Verder vormt datatoegankelijkheid een risico voor verdere ontwikkeling; vooral medische data mag niet zonder meer gedeeld worden[208], terwijl AI voor medical imaging het beste resultaat levert als er veel data aanwezig is.[209] Ditzelfde probleem doet zich in de landbouw en voedselproductie voor.

De **sterkte** van Nederland bestaat uit een innovatieve samen-werkingscultuur. Er is een goede kennisbasis en volwassen industrie op het gebied van de technologie, internationaal erkend, met veel succesvolle spin-offs. Nederland heeft een sterke positie in ultrasound, MRI en radar, optische en niet-optische metrologie (semicon) en multimodal: de combinatie van technieken.

Technische universiteiten, onderzoekscentra, bedrijven en de overheid werken echter niet altijd optimaal samen, hetgeen een **zwakte** kan opleveren in de kennisbasis en het optimaliseren van de keten van ontwikkeling tot toepassing van de technologie. De kennis blijft bovendien liggen bij een klein aantal grote bedrijven. Andere zwaktes zijn het lage tempo van opstarten van nieuwe activiteiten, de remmen op valorisatie, de krapte aan talent en het vastlopen in regelgeving (denk bijvoorbeeld aan de koppositie van Europa op het gebied van gegevensbescherming (GDPR) en medische hulpmiddelen (MDR)).

Sterkte	Zwakte
• innovatieve samenwerkings-cultuur tussen bedrijven • toepassingen in optische en niet-optische metrologie en multimodal	• spelers werken niet optimaal samen • te weinig dessiminatie van kennis • weinig nieuwe activiteiten • remmen op valorisatie • krapte aan talent • vastlegging in regelgeving
Kans	**Bedreiging**
• combineren van imaging met AI, data sience and computational imaging • oplossing voor arbeids-markttekorten en toegan-kelijkheid van de zorg	• vermindering innovatie-potentieel • datatoegankelijkheid

5.3 Ambitie

Nederland heeft een goede uitgangspositie om op het gebied van imaging technologies een vooraanstaand speler op wereldniveau te worden. Hiervoor zijn een hoofdambitie en deelambities geformuleerd.

5.3.1 Hoofdambitie

In 2035 is Nederland wereldwijd een vooraanstaand leider, zowel qua kennispositie als bedrijvigheid, op het gebied van toegepast natuurwetenschappelijk onderzoek en ketenintegratie van (nieuwe) beeldvormende technologieën (versterkt door AI), door een open innovatief ecosysteem om nieuwe toepassingen mogelijk te maken die een bijdrage leveren aan het verdienvermogen en maatschappelijke problemen oplossen (zoals zorgbehoefte, personeelstekorten). Er is invloed op de hele keten, waar noodzakelijk maken we het zelf.

5.3.2 Deelambities

De hoofdambitie is verder uitgewerkt in deelambities. Voor het versterken van onderzoeks- en innovatie ecosystemen heeft het Kabinet in 2021 tien uitdagingen geïdentificeerd.[210] De deelambities zijn langs deze lijnen uitgewerkt, voor zover relevant.

Lange termijn blik en samenhang bij investeringen in onderzoek en innovatie
Het ontwikkelen van imaging technologies en het aanpakken van maatschappelijke problemen vereisen innovatie en onconventionele technologieën. Het voorspellen van toekomstige technologische doorbraken is uitdagend. Flexibiliteit in de strategie is essentieel om te reageren op veranderende omstandigheden en nieuwe kansen.

Deelambitie: Flexibiliteit inbouwen in financieringsstrategieën en openstaan voor het ondersteunen van nieuwe en soms onconventionele methoden van innovatieontwikkeling.

Investeringen in onderzoeks- en testfaciliteiten
Om cutting-edge onderzoek mogelijk te maken en innovatie te bevorderen is er behoefte aan meer breed toegankelijke onderzoeks- en testfaciliteiten, met name voor het midden- en kleinbedrijf.

Deelambitie: Door investeringen in onderzoeks- en testfaciliteiten voorziet Nederland in hoogwaardige, geavanceerde laboratoria, testomgevingen en apparatuur die wetenschappers, onderzoekers, startups en (MKB) bedrijven kunnen gebruiken. Dit bevordert samenwerking en kennisdeling tussen verschillende spelers in het ecosysteem van Imaging technologies.

Financiering voor startups en scale-ups: vroege fase financiering en doorgroei
De aanzienlijke, tot op heden onbenutte kansen voor kennis-valorisatie en groei van startups in de imaging-technologie-sector zijn voor een deel toe te schrijven aan beperkte financiële middelen.

Deelambitie: In 2035 bestaan er bijkomende, gespecialiseerde financieringsmogelijkheden voor zowel startups als scale-ups in het domein van imaging-technologieën, met specifieke focus op opkomende toepassingsgebieden. Daarnaast zijn er faciliteiten ter ondersteuning van startups en scale-ups, zoals het stimuleren van kennisstarters, en het aangaan van strategische partnerschappen met grote ondernemingen.

Betrekken van gebruikers bij onderzoek en innovatie en marktcreatie
Het is belangrijk om rekening te houden met de gehele waardeketen van een innovatie, dus ook de eindgebruikers zoals medische professionals in het geval van medische beeldvormings-toepassingen, of productiemedewerkers. Het in kaart brengen van de behoeften en wensen van eindgebruikers (veelal “de klant van de klant”) kan eraan bijdragen dat de ontwikkeling van nieuwe technologieën daadwerkelijk aansluit bij de marktvraag en maatschappelijke uitdagingen.

Deelambitie: We zetten ons in voor gebruikersgericht onderzoek, waarbij we eindgebruikers actief betrekken bij het vormgeven van innovaties en het valideren van nieuwe technologieën.

Vaardigheden en absorptiecapaciteit in het MKB
Het betrekken van het MKB vraagt om veelal specifieke hoogwaardige kennis en vaardigheden, bijvoorbeeld over de implementatie van AI. Met name in het MKB is er weinig tijd en ruimte voor opleidings- en trainingsprogramma’s.

Deelambitie: MKB in de waardeketen van Imaging technologies wordt actief gestimuleerd te innoveren met doelgerichte subsidies en om de ketensamenhang versterken. Door nieuwe bedrijven te betrekken wordt kennisdeling en netwerkvorming gestimuleerd. Het bredere MKB wordt geïnspireerd met AI-toepassingen die geïmplementeerd zijn op een wijze die aansluit op lopende werkprocessen.

Ontwikkelen, aantrekken en behoud van (top)talent
Er is een tekort aan voldoende gekwalificeerd imaging talent. In Nederland is technologie ondergewaardeerd, en vraagt over de hele breedte van de technologische basis om versterking. Door juist ook op HBO en MBO specifieke aandacht te schenken aan Imaging technologies en AI kan worden bereikt dat (op termijn) deze kennis binnen het MKB wordt geborgd.

Deelambitie: Om ervoor te zorgen dat we in de toekomst genoeg getalenteerde mensen hebben die geïnteresseerd zijn in Imaging technologies, moeten we ons onderwijsaanbod (zowel op universitair, HBO als MBO niveau) aantrekkelijker maken en laten zien dat er in Nederland goede carrièremogelijkheden zijn. Dit betekent het aanbieden van een breed technologisch fundament dat makkelijk te combineren is met specifieke toepassingen van imaging. Buitenlands talent is onontbeerlijk, dit vraagt om een gunstig vestigingsklimaat voor talent.

Versterken van kennisoverdracht en het valorisatieproces voor meer impact
Nederlandse bedrijven hebben een innovatieve samenwerkings-cultuur, met veel succesvolle spin-offs. Toch werken technische universiteiten, onderzoekscentra, bedrijven en de overheid nog niet altijd optimaal samen. Er liggen kansen om de kennisbasis te versterken en de keten van ontwikkeling tot toepassing van de technologie te optimaliseren.

Deelambitie: Het versterken van samenwerking tussen onderzoeksinstituten, universiteiten, hogescholen en de industrie is cruciaal. Dit kan worden bereikt door het creëren van programma’s die de uitwisseling van kennis en expertise tussen onderzoek, onderwijs en sectoren bevorderen.

Organiserend vermogen van onderzoeks- en innovatie-ecosystemen
Imaging technologies kent een groot aantal toepassingsterreinen, vaak elk met een eigen ecosysteem. Op dit moment is er geen sprake van een leidende organisatie die het overkoepelende imaging ecosysteem goed bij elkaar houdt en faciliterend optreedt. Er liggen kansen voor verbetering, gericht op ketenintegratie, thematische netwerken en interregionale samenwerking.

Deelambitie: Het bevorderen van netwerken en partnerschappen tussen overheid, bedrijfsleven, onderzoeksinstituten, universiteiten en non-profitorganisaties. Deze netwerken dragen bij aan het creëren van synergiën en mobiliseren van middelen ter bevordering van innovatie. Het streven is een zelfonderhoudend en levensvatbaar ecosysteem voor de toekomst.

Eerder in het proces aandacht besteden aan wet- en regelgeving
De regelgeving met betrekking tot Imaging technologies in Nederland en Europa is strenger dan in andere regio’s, en er zijn recentelijk nieuwe voorschriften toegevoegd, zoals de GDPR, EHDS, EU Data Act, EU AI Act, MDR, RoHS/REACH. Bedrijven en onderzoekers ervaren de groeiende regelgeving als belemmerend. In de Verenigde Staten en Azië is de regelgeving minder strikt, waardoor bedrijven daar meer operationele vrijheid hebben.

Deelambitie: Betrek belanghebbenden al in een vroeg stadium van ontwikkeling van wet- en regelgeving, zodat hun belangen effectiever worden geïntegreerd. Bevorder regelgeving die innovatie in Nederland en Europa ondersteunt en aanmoedigt.

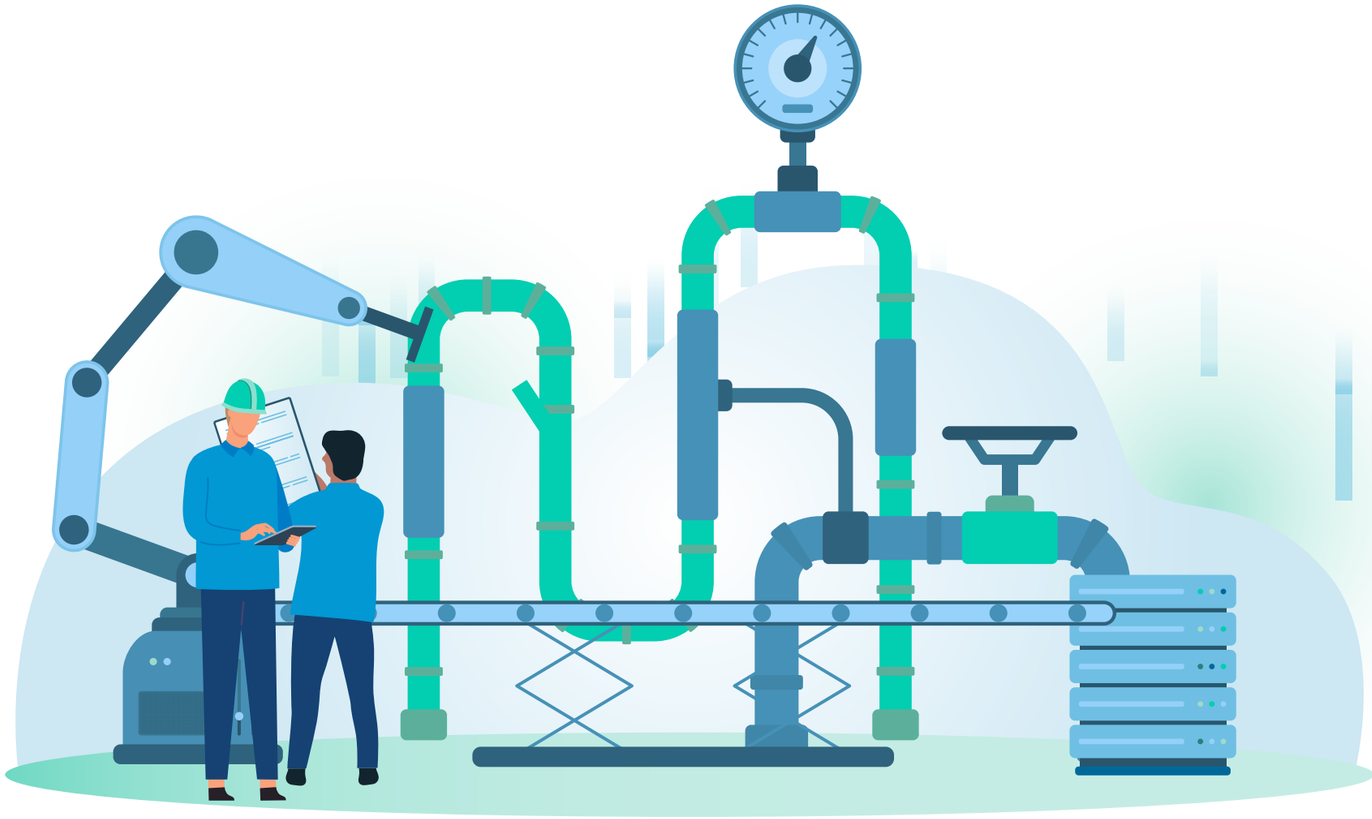
Geraadpleegde deskundigen

Experts
- Merijn Blaakmeer – NWO
- Christa Hooijer – TNO
- Wouter Koek – TNO
- Piet Lommerse – NWO
- Paul van Neer – TNO
- Klamer Schutte – TNO

Deelnemers Ronde tafel 1
- Arno Bouwmeester – Nedinsco
- Pleuni Hooijman – Innovation Industries
- Roy de Kinkelder – Saxion
- Wouter Koek – TNO
- Paul van Neer – TNO
- Klamer Schutte – TNO
- Sjoerd Stallinga – TUD
- Wouter Veldhuis – UMCU
- Ingo Verhaak – Demcon

Deelnemers Ronde tafel 2
- Arno Bouwmeester – Nedinsco
- Johan van den Brink – Philips
- Arie den Doef – Advanced Research Center for Nanolithography
- Pleuni Hooijman – Innovation Industries
- Roy de Kinkelder – Saxion
- Wouter Koek – TNO
- Paul van Neer – TNO
- Natalie Tiggelman – Thermofisher Scientific
- Wouter Veldhuis – UMCU
- Ingo Verhaak – Demcon

6 Mechatronics en Optomechatronics



In 2035 heeft Nederland zijn internationale (opto-) mechatronische industriële en wetenschappelijke leiderschapspositie in het ontwerpen, integreren en produceren van complexe systemen verder versterkt. Zo levert deze sleuteltechnologie een bijdrage aan het verdienvermogen van maatschappelijke kansen en open strategische autonomie. Wij behouden een verdedigbare concurrentiepositie in onze huidige sterke internationale waardeketens. Ook verbreden we naar nieuwe applicaties in een select aantal nieuwe waardeketens, zoals bijvoorbeeld agro-food, medisch, ruimtevaart.

6.1 Definitie

6.1.1 Belang van de sleuteltechnologie

Kennis van complexe elektromechanische systemen en besturings- en regeltechniek, vaak in samenhang met optische techniek, vormt de kern van essentiële toepassingen in verschillende sectoren. Deze omvatten de semicon machinebouw, medische apparatuur, componenten voor de auto- en luchtvaartindustrie, ruimtevaarttoepassingen zoals laser satellietcommunicatie, apparatuur voor de halfgeleiderproductie, voedselverwerking, landbouw en logistieke processen. Bovendien speelt de vervaardiging van deze complexe machines en systemen een belangrijke rol in het voortzetten automatisering van processen, gericht op het verhogen van de arbeidsproductiviteit en het aanpakken van structurele tekorten aan arbeidskrachten. Hiervoor is een hoog niveau van systems engineering opgebouwd, wat weer uitstraling heeft naar andere technologieën. Daarmee is deze technologie van grote waarde voor ons toekomstig verdienvermogen. De Nederlandse marktpositie is zeer goed, wij zijn de 'high complexity low volume machinebouwers van de wereld'; ook het Nederlandse onderzoek op dit vlak behoort tot de wereldtop. Dit blijkt onder andere uit het feit dat Nederlandse consortia in Horizon-aanvragen op *mechatronics en (opto)mechatronics* zijn oververtegenwoordigd.

Mechatronics en (opto)mechatronics spelen een belangrijke rol bij het oplossen van maatschappelijke uitdagingen. Deze sleuteltechnologie worden gebruikt voor het ontwerpen en bouwen van systemen en machines, die op hun beurt producten produceren die bijdragen aan het oplossen van deze maatschappelijke uitdagingen. Voor de nationale veiligheid is deze technologie van belang omdat technologisch leiderschap kan leiden tot unieke posities in essentiële toeleveringstekens, zoals halfgeleiders. Dit is een essentiële pijler voor de geopolitieke positie van Nederland en Europa.

6.1.2 Definitie

Mechatronica betreft het integraal ontwerpen van mechanische systemen en bijbehorende besturings- en regelsystemen en combineert werktuigbouw, natuurkunde, elektrotechniek en ICT. Optomechatronica behelst de integratie van optische technologie in mechatronische systemen. Optomechatronische systemen spelen een belangrijke rol in de productie van halfgeleiders, wetenschappelijke instrumenten, 3D printen, medische apparatuur, ruimtevaart waaronder laser satellite communication en robotica.

Mechatronics and Optomechatronics is onderdeel van *cluster Engineering and fabrication technologies*, zoals beschreven in de Herijking Sleuteltechnologieën[211].

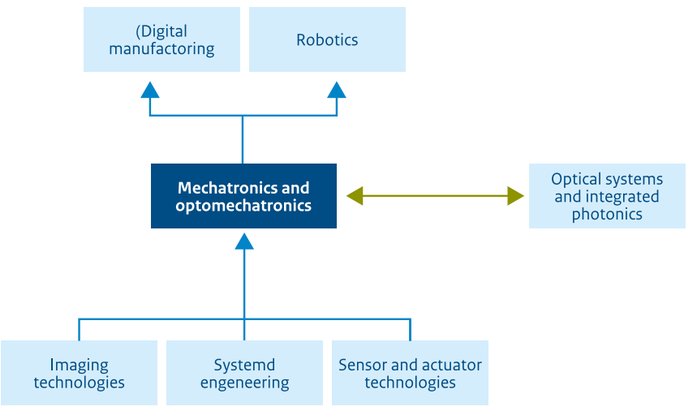
6.1.3 Gerelateerde sleuteltechnologieën

Optical systems and integrated photonics is complementair (groene pijl) aan *Mechatronics and Opto-mechatronics*. In de optomechatronica worden optische systemen geïntegreerd en voor de nieuwste generatie van optomechanische systemen wordt in toenemende mate gebruik gemaakt van geïntegreerde fotonica.

Ook *Imaging technologies* en *Sensor and actuator technologies* zijn complementaire sleuteltechnologieën. Voor de werking van mechatronische systemen en voor innovatie binnen (opto) mechatronica zijn de genoemde technologieën belangrijk. De combinatie van de genoemde technologieën maken automatisering in tal van sectoren mogelijk. Dit raakt sterk aan *Digital manufacturing technologies* (plus AI en ***dataspaces***). Ook voor *Robotics* levert *Mechatronics and optomechatronics* de benodigde innovatie.

Systems engineering is een complementaire methodologie die de realisatie van deze mechatronische systemen en samenvoegingen mogelijk maakt: dit maakt *systems engineering* een integraal onderdeel van de mechatronica. Het ontwerpen en assembleren van mechatronische systemen is een specialiteit.

Gerelateerde sleuteltechnologieën



Bron: TNO/NWO (2023) Herijking sleuteltechnologieën

6.2 Positie, sterktes/zwaktes

6.2.1 Ontwikkelingsfase technologie[212]

De technologie is in de laatste fase van ontwikkeling: Grootschalige productie en gebruik. In deze fase blijft de technologie continu in ontwikkeling en is het Nederlands bedrijfsleven en de wetenschap productief door voorop te blijven lopen met innovatieve oplossingen. Voor de nieuwste generatie van toepassingen wordt continu het verspreidingspatroon opnieuw doorlopen. Zo gaat de volgende generatie van ASML's scanners binnenkort een pilotfase in en wordt in de laser-satellietcommunicatie gewerkt aan nieuwe en nog nauwkeurigere demonstraties. Juist in markten met een hoog innovatie tempo is Nederland competitief. De Nederlandse industrie is in staat om op basis van deze technologie producten te leveren over de hele wereld met uitmuntende productprestaties.

De kracht van deze industrie ligt in zowel sterke OEM's als een sterke supply chain. Een hecht ecosysteem en een hechte samenwerking levert optimale productie en geeft OEM's maximaal de mogelijkheid zich te richten op (nieuwe) producten en markten. De industrie genereert jaarlijks een omzet van ongeveer 100 miljard euro, waarvan de helft afkomstig is van maakbedrijven. De continue verbetering van de prestaties en specificaties is essentieel voor het competitieve voordeel van Nederlandse producten in de mechatronische markten. Het managen van een supply chain in een snel innoverende markt is een specialisme. We zien dat Nederlandse bedrijven zich vaak toeleggen op een hoge kwaliteit, tegen een hoge productprijs, vaak in relatief laag volume ('high complexity, low volume markt'). Een aandachtspunt voor Nederland en de EU is dat productprijs belangrijker wordt, met name in de semicon, ruimte- en medische technologie. Naast de productprijs zal voor alle toepassingsgebieden ook de energie footprint steeds belangrijker worden. Voor de halfgeleiderindustrie zal reshoring van productie deze vraag versterken. Ook voor medische devices zal het licence to operate een belangrijk aspect worden. Hier liggen kansen door verandering van de markt en al opgebouwde kennis.

Productiesystemen waarvoor (opto-)mechatronica de basis vormt kennen per toepassingsgebied eigen uitdagingen. Binnen de halfgeleiderindustrie zijn de productiesystemen hyper efficiënt, maar ze blijken ook fragiel en erg gevoelig voor economische fragmentatie[213], zoals te zien was aan de chiptekorten in de COVID pandemie. De technologische rivaliteit tussen de VS en China verandert de bestaande verweven supply chains. Als reactie hierop zijn ook de normen, regels en beleid in transitie.[214] Ruimtevaarttoepassingen worden in de Europese context afgestemd. Voor de Europese productiesystemen is de transitie naar hogere productievolumes een uitdaging, tegelijkertijd is de opkomst van de commerciële ruimtevaart een kans voor Nederlandse toeleveranciers. Binnen de Medische Technologie geldt vooral de lange aanlooplijn van uitvinding naar de markt als een belangrijke belemmering. De lange aanlooplijnen vereisen veel venture capital.

Voor deze technologie geldt dat er in Nederland op alle niveaus ernstige tekorten zijn aan voldoende geschoold personeel.

6.2.2 Internationale positie en omvang

Nederland heeft een goede internationale positie. Dat uit zich zowel wetenschappelijk, in relatief hoge deelname aan Horizon projecten. Ook doet Nederland goed mee in Europese innovatieprogramma's, zoals KDT-JU en IPCEI. Verschillende Nederlandse bedrijven hebben in hun niche een technologisch leidende positie en weten op basis van technologische leiderschap ook belangrijke posities in te nemen in internationale waardeketens. Bekende voorbeelden zijn de halfgeleiderindustrie, inspectie, microscopen, en de medische technologie.

Internationale clusters zijn veelal georganiseerd over toepassingsgebieden. En worden hieronder genoemd:

- Space: ESA, NASA.
- Semicon: AENEAS, EPoSS en Inside zijn de grote branche organisaties voor Europese halfgeleider technologie. Samen publiceren ze een technologische roadmap waarin ook de uitdagingen op gebied van (opto-) mechatronica in staan.
- Medische technologie: Innovative Health Initiative publiceert de Europese roadmap, voor o.a. medische technologie. MedTech Europe is een belangrijke speler in het organiseren van het veld.

6.2.3 Nationale positie en omvang

De nationale organisatie van het veld is industrieel sterk over verschillende toepassingsgebieden verdeeld (halfgeleidertechnologie, ruimtevaarttechnologie, en als onderdeel van robotica). Binnen de technische universiteiten wordt onderzoek gedaan, hoofdzakelijk binnen de faculteiten voor Werktuigbouwkunde en Elektrotechniek (TUD, TU/e, UTwente). Het Nederlandse onderzoek doet het erg goed in de Europese programma's[215].

6.2.4 Specifieke toepassingsgebieden

Nederlandse industrie richt zich op complexe high-end machinebouw, een hoog innovatietempo en relatief lage volumes. Kansrijke toepassingsgebieden in de Nederlandse economie zijn:

Halfgeleiderindustrie: Het ASML ecosysteem, inclusief de supply chain, is een belangrijke drijver voor ontwikkeling in de Nederlandse (opto-) mechatronica. Ook voor andere stappen in het productieproces wordt in Nederland toonaangevende apparatuur

Illustratie van enkele toonaangevende voorbeelden clusters en organisaties

gebouwd met (opto-) mechatronica als basis. Voorbeelden in de verpakkingsstap hiervan zijn ASM-PT, ASMI en Besi. Belangrijk om op te merken is dat die laatstgenoemde stap de komende tijd veeleisender gaat worden (bijvoorbeeld door chiplet technologie), dit biedt kansen voor Nederlandse apparatuur, zowel in verpakking, testen en metrologie.

Medische apparatuur: Nederland heeft een goede basis in medische apparatuur en robotica. We hebben goed onderzoek, zowel aan de TU's als de UMC's. De medische markt is geen eenvoudige markt, met lange aanlooplijnen en veel upfront kosten en risico.

Agrarische apparatuur: Nederland heeft een innovatieve en intensieve landbouw. De sector toont technologisch leiderschap in machinebouw en robotica binnen de segmenten: vlees en vis verwerking, verse voedselverwerking (m.n. groente en fruit, incl. sorteersystemen), melkveehouderij (melken, stal reiniging, oogst voedergewassen en voeren), gewasbescherming en bemesten, glastuinbouw, champignonteelt, verse groente en fruit oogst, onkruid wieden, bloembollen en bolbloemen en zeevaartvisserij. Binnen alle segmenten staat robotica hoog op de agenda om arbeidsbesparing en duurzaamheidstransities te kunnen realiseren.

Ruimtevaart: De ruimtevaartmarkt is in volume beperkt, maar heeft traditioneel een belangrijke rol in het aanjagen van innovatie. Uitdagingen hier zijn de toenemende volumes in de markt en toenemend belang van prijs. Dit komt tot uiting in de belangrijke positie die Nederland inneemt waar het gaat om baanbrekende ontwikkelingen voor aardobservatie en laser SatCom.

Smart Industry: Voor het creëren van autonome productie-processen is deze sleuteltechnologie van groot belang. De wens om meer productiecapaciteit naar Europa terug te halen, betekent dat we juist in manufacturing de productiviteit moeten verhogen.

Analytical Equipment en wetenschappelijke instrumentatie: Er is een groeiende industrie, die apparatuur ontwikkelt voor in laboratoria. Met name complexe analyse en diagnose instrumentatie die optisch of electron optisch van aard zijn en goed passen bij het hoogwaardige Nederlandse High Tech Ecosysteem. Globaal zijn er Research en Productie laboratoria. In de eerste plaats wordt vaak onderzoek gedaan naar materiaalkundige, biologische of medische samples. In de tweede plaats wordt er grootschalig onderzoek gedaan naar een veelheid van samples. Te denken valt aan de laboratoria in ziekenhuizen. Ook de Einsteintelescoop vertrouwt in hoge mate op deze discipline.

6.2.5 Risico's voor de nationale veiligheid

Toepassingen van *mechatronics and optomechatronics* kunnen leiden tot risico's voor de nationale veiligheid, bijvoorbeeld wanneer deze technologieën worden ingezet voor militaire toepassingen. Zo is kennis van *mechatronics and optomechatronics* essentieel voor het goed kunnen richten van lasers en voor het bouwen van (spionage) satellieten.

Mechatronics and optomechatronics staat ook aan de basis van veel industrieën in Nederland. De technologie is ondersteunend aan de bredere maakindustrie en dat zal in de toekomst, door automatisering, verder toenemen. Wegvallen van kennis en kunde over de technologie zal de bredere Nederlandse maakindustrie meer afhankelijk maken van het buitenland.

Aandacht voor disproportionele afhankelijkheden in de waardeketen van *mechatronics and optomechatronics* is dus belangrijk. Niet alle afhankelijkheden zijn problematisch. Alleen daar waar de risico's voor het publiek belang hoog zijn, kan aanvullend handelen vereist zijn. Dit behoeft een genuanceerde kwantitatieve én kwalitatieve analyse van op het niveau van specifieke waardeketens. Het kabinet zal bezien in hoeverre hierbij kan worden aangesloten op de risicoanalyses van kritische technologiegebieden die de Europese Commissie uitvoert in het kader van de Europese Economische Veiligheidsstrategie, of dat nadere eigen analyse nog nodig is. Zoals ook gecommuniceerd in de Kamerbrief Voortgang Strategische Afhankelijkheden van 15 december 2023 kan vanwege de vertrouwelijke en kwetsbare aard van deze analyses op de voortgang hieromtrent niet verder op worden ingegaan.

6.2.6 SWOT

(Opto-)mechatronica is een hoogtechnologische specialisatie in de Nederlandse economie. Deze specialisatie leidt tot technologisch én economisch leidende exportposities in diverse sectoren, zoals lithografie machines voor halfgeleiderproductie, instrumentatie voor laboratoria, industrie of melkmachines in de veeteelt. Een belangrijke succesfactor is de combinatie van een sterke wetenschappelijke en industriële basis, en de samenwerking tussen universiteiten, kennisinstellingen en bedrijven.

Met een toenemende specialisatiegraad in de verschillende toepassingsgebieden is kruisbestuiving steeds moeilijker. De uitstekende samenwerking tussen universiteiten, kennisinstellingen en bedrijven legt druk op de kennisbasis en mogelijkheden voor ongebonden, fundamenteel technologisch onderzoek.

Kansen liggen in het verder ontwikkelen van kruisbestuiving tussen de verschillende toepassingsgebieden. Onder leiding van ASML heeft de Nederlandse mechatronica zich ontwikkeld tot een internationaal erkende wereldspeler voor high tech systems. Vele andere sectoren kunnen via kruisbestuiving profiteren van de kennis die VDL, Demcon en vele andere mechatronica providers de afgelopen jaren hebben opgedaan. Fundamentelere, toepassing doorsnijdende samenwerkingsverbanden kunnen hierbij helpen. Ook is verdere versterking van samenwerking met toepassingsgericht onderzoek een kans. De Nederlandse positie wordt bedreigd door toepassingsgebieden die richting hogere volumes bewegen (bijvoorbeeld satellieten). Snelheid in opschaling is een bedreiging voor de Nederlandse ecosystemen. Concurrentie op kostenvoordelen ten opzichte van technisch leiderschap is mogelijk een bedreiging van de Nederlandse maakindustrie.

Daarnaast is de expertise in productie de afgelopen decennia onvoldoende toegenomen door outsourcing. Het is van belang hier met snelheid te handelen en in te zetten op productiviteitswinst (smart manufacturing), talent en duurzaamheid.

Sterkte	Zwakte
• uitmuntende wetenschappelijke en industrieële basis • export sector • systeem denken • ontwerp gerichte onderzoekscultuur • open netwerk en samenwerking	• organisatie tussen toepassingsgebieden • druk op kennisbasis • design for cost en productie • beperkte optomechatronische scholingsmogelijkheden • gat tussen onderzoek en industrie
Kans	**Bedreiging**
• horizontale kruisbestuiving • samenwerking praktijkgericht onderzoek, exposure naar het buitenland, m.n. Duitsland • andere nieuwe markten, • bij elkaar brengen fotonische en optische ontwerp vaardigheden en optmechatronica expertise en onderzoek	• gebrek aan talent • vraag naar hogere volumes en lagere prijzen • afnemende expertise in productie en maakbaarheid

6.3 Ambitie

6.3.1 Hoofdambitie

In 2035 heeft Nederland zijn internationale (opto-)mechatronische industriële en wetenschappelijke leiderschapspositie in het ontwerpen, integreren en produceren van complexe systemen verder versterkt. Zo levert deze sleuteltechnologie een bijdrage aan het verdienvermogen van maatschappelijke kansen en open strategische autonomie. Wij behouden een verdedigbare concurrentiepositie in onze huidige sterke internationale waardeketens. Ook verbreden we naar nieuwe applicaties in een select aantal nieuwe waardeketens, zoals bijvoorbeeld agri-food, medisch en ruimtevaart.

6.3.2 Deelambities

De hoofdambitie is verder uitgewerkt in deelambities. Voor het versterken van onderzoeks- en innovatie ecosystemen heeft het Kabinet in 2021 tien uitdagingen geïdentificeerd. De deelambities zijn langs deze lijnen uitgewerkt, voor zover relevant.

Lange termijn blik en samenhang bij investeringen in onderzoek en innovatie
Voor (opto-) mechatronica zijn in Nederland en Europa relatief weinig technologie roadmaps beschikbaar. Wel zijn er verschillende roadmaps beschikbaar die betrekking hebben op de (potentiële) toepassingsgebieden van (opto-) mechatronica. Het in beeld brengen van samenhang tussen technologieën en toepassingsgebieden is belangrijk voor het stimuleren van spillovers.

Deelambitie: Voor de technologie (opto-) mechatronica wordt op korte termijn een matrix opgesteld van relevante (deel) technologieën en toepassingsgebieden verwijzend naar bestaande organisaties en faciliteiten. Voor het opstellen en beheren van deze matrix wordt een centraal aanspreekpunt ingericht/aangewezen dat kan helpen om partijen ook over de grenzen van toepassingsgebieden heen met elkaar in contact te brengen.

Investeringen in onderzoeks- en testfaciliteiten
De vindbaarheid van faciliteiten kan verbeterd worden. Ook ontbreekt er een gezamenlijk lab met een samenwerkings-overeenkomst tussen de verschillende partijen. Nederland kan op deze manier een leidende positie pakken door middel van versterkte samenwerking tussen universiteiten/TNO/WR.

Deelambitie: In 2035 is er een Nederlands platform gecreëerd waarin alle relevante faciliteiten staan genoemd. Dit platform kan daarmee helpen bij afstemming en een hefboomwerking creëren. Daarnaast komt er een coördinerende instantie die het overzicht houdt en bijhoudt welke investeringen zijn gedaan. Ook wordt er een gezamenlijk lab, met samenwerkingsovereenkomst, gecreëerd naar voorbeeld van IMEC. Dit lab heeft een andere focus dan IMEC.

Financiering voor startups en scale-ups: vroege fase financiering en doorgroei
Voor de scale-up fase geldt dat in Nederland beperkt financierings-opties beschikbaar zijn. Vasthoudendheid van de overheid als investeerder is van groot belang. Privaat kapitaal is in Europa relatief risicomijdend.

Deelambitie: In 2035 heeft de Nederlandse overheid een rol als *launching customer*, vooral voor (opto)mechatronica waar soms lange lead times zijn in ontwikkelprocessen. Dit zullen vaak toepassingen van (opto)mechatronica zijn. Launching customership voor machinerie die met name in een B2B omgeving wordt gebruikt wordt op een andere manier voorzien. Daarbij wordt specifiek aandacht gegeven aan validatieonderzoek (test before invest) in 2e en 3e fase financieringen.

Betrekken van gebruikers bij onderzoek en innovatie en marktcreatie
Er is een bestaand netwerk en verschillende werkgroepen als basis beschikbaar. Om het goed te laten functioneren moet het "not invented here" principe en de schuchterheid van de industriële partijen ontzenuwd worden.

Deelambitie: Op korte termijn wordt een Publiek Privaat Platform opgericht dat regie neemt in het versterken en uitbouwen van dit netwerk. Dit platform kan vanuit het NTS traject worden uitgebouwd, waarbij ook de verschillende departementen worden meegenomen. Men moet loskomen van het gedachtegoed dat het alleen om semicon draait en zich meer richten op de andere domeinen zoals bijvoorbeeld het domein MedTech en daarnaast de diversificatie stimuleren. Daar liggen ook groeimogelijkheden voor Nederland.

Ontwikkelen, aantrekken en behoud van (top)talent
Op alle niveau's – MBO/HBO/WO – zitten uitdagingen. Bepaalde cruciale basiscompetenties worden gemist – ontwerpkunde, materiaalkunde en productietechniek. Dit zou kunnen komen doordat de financieringsstromen van universiteiten hier onvoldoende op aansluiten en te veel focussen op disruptieve of nieuwe innovaties of richtingen.

Deelambitie: In Nederland wordt een "MBA voor Techniek" opgezet. Dit MBA is gestoeld op basis van academische kennis met behulp van bestaande praktijkervaring. Deze MBA wordt ook voor HBO'ers beschikbaar, waarmee het kruisbestuiving tussen beide opleidingsniveaus faciliteert. Ook zijn er kansen om buitenlandse (opto)mechatronici beter te onboarden, met name een stuk praktijkervaring mist hier. Verder blijft het aantrekken van voldoende vrouwen om de keuze voor de techniek te maken een uitdaging.

Versterken van kennisoverdracht en het valorisatieproces voor meer impact
De grootste researchinzet vindt plaats in de semicon-industrie. Intern is de kennisoverdracht van universiteiten en kennis-instellingen naar de industrie goed. De terugkoppeling van kennis van de industrie naar kennisinstellingen is moeilijker. Veel onderzoek vindt plaats in de industrie, dit zorgt voor doelmatig onderzoek, maar de kennis wordt minder goed benut voor andere toepassingsgebieden.

Deelambitie: In 2035 is in meer mobiliteit van mensen voorzien tussen toepassingsgebieden, industrie en publiek onderzoek in de vorm van sabbaticals en wordt IP beschikbaar gesteld voor andere toepassingsgebieden via IP-safehouses.

Organiserend vermogen van onderzoeks- en innovatie-ecosystemen
Voor de technologie (opto-) mechatronica zijn een aantal coördinerende organisaties/platforms: de Werkgroep Mechatronica, *Dutch* Society for *Precision Engineering*. Het veld praat onderling goed, maar het ontbreekt aan financiering en slagkracht om specifieke agenda's op te bouwen. Voor de toepassingsgebieden Medtech en agri-food is er sprake van grote versnippering in het veld. De kennis over welke kennis waar is, of welk fieldlab waarvoor is, wordt nergens verzameld. Dit zorgt voor dubbellingen en te weinig focus.

Deelambitie: Er wordt op korte termijn gewerkt aan agendering, inventarisatie en samenwerking op het snijvlak tussen de in 6.2.4 genoemde specifieke toepassingsgebieden en de (opto-) mechatronica.

Verbindingen tussen ecosystemen
Samenwerking tussen Nederland en andere landen is beperkt. De zwakkere landelijke organisatie zorgt voor belemmeringen in grote Europese samenwerkingsverbanden in verschillende toepassingsgebieden. Samenwerking is op regionaal niveau beter geregeld dan op nationaal niveau, wel kan de samenwerking tussen de regio's Delft en Eindhoven versterkt worden. Ook de samenwerking tussen applicatiegebieden is beperkt. Door het volwassen karakter van de technologie zijn kennis spill-overs tussen verschillende gebieden soms lastiger.

Deelambitie: Europese samenwerking heeft de hoogste prioriteit. Voor agri-food en medtech is de eerste stap het in kaart brengen van potentieel waardevolle samenwerkingspartners voor deze technologie. Voor opto-mechatronica is Duitsland een belangrijke partner. Ook wordt getracht een verhoogd kennisniveau, of een kennisforum met experts, bij de nationale overheid te bewerkstelligen. Daarnaast wordt er op applicatiegebieden een gezamenlijke agenda geschreven wat moet leiden tot meer regie en coördinatie.

Geraadpleegde deskundigen

Experts
- Sandy Kalisingh – NWO
- Kees Buijsrogge – TNO

Deelnemers Ronde tafel 1
- Maarten Voncken – ASML
- Jan Leideman – Demcon
- Pieter Kappelhof – Hittech
- Erik Pekkeriet – Wageningen University & Research
- Rogier Verberk – TNO
- Gregor Baars – TNO
- Hans Evers – VDL ETG
- Patrick Strating – NTS

Deelnemers Ronde tafel 2
- Sjoerd Verduyn-Lunel – ASML
- Jan Leideman – Demcon
- Just Herder – TU Delft
- Maroeska Rovers – Universiteit Twente
- Pieter Kappelhof – Hittech
- Erik Pekkeriet – Wageningen University & Research
- Rogier Verberk – TNO
- Gregor Baars – TNO
- Hans Evers – VDL ETG
- Patrick Strating – NTS

7 Artificial Intelligence and data

In 2035 heeft Nederland de capaciteit om met een combinatie van AI- en datatechnologie te werken, die bijdraagt aan strategische autonomie, leidt tot innovaties voor alle sectoren en versnelling van maatschappelijke transities."

7.1 Definitie

7.1.1 Belang van de sleuteltechnologie

Artificial Intelligence (AI) is door de Wetenschappelijke Raad voor het Regeringsbeleid (WRR) benoemd als een systeemtechnologie.[216] Het verandert de manier van werken, leren en creëren, maakt andere innovaties mogelijk die gemakkelijk schaalbaar zijn, kan bijdragen aan een hogere arbeidsproductiviteit[217] en heeft daarmee een grote impact op de samenleving en op het verdienvermogen. Het tempo waarin de veranderingen zich voordoen ligt het afgelopen decennium erg hoog. De recente opkomst van generatieve AI illustreert dit.[218] De kracht van AI zit in het vermogen om enorme hoeveelheden data te verwerken, modellen te leren en op basis daarvan beslissingen te nemen, voorspellingen te maken en generatieve taken uit te voeren.

Het belang van data zit in het gebruik ervan, bijvoorbeeld in toepassingen op het gebied van AI maar ook daarbuiten. Voor Nederland zijn dataverwerkingstechnologieën en de adoptie daarvan met name van belang om maatschappelijke uitdagingen op te lossen. Ook Nederlandse ondernemers en consumenten profiteren van de economische en maatschappelijke kansen die het delen van data biedt. Belangrijk hierbij is de mogelijkheid tot datadeling tussen bedrijven. Deze datadeling is cruciaal om de kansen van data voor Nederland te verzilveren.

Nederland heeft een internationaal vooraanstaande wetenschappelijke positie op onderdelen van het AI en data kennisgebied. Op het gebied van ontwikkeling van grootschalige AI-modellen en dataverwerkingstechnologie speelt Nederland een minder grote rol, net als andere Europese landen vanwege het gebrek aan een gedeelde data-infrastructuur en de benodigde AI-rekenkracht om er krachtige modellen mee te leren. De grote techbedrijven benutten voor beide aspecten hun dominante marktpositie.

Er is daarom behoefte aan een paradigmawisseling, waarbij wordt ingezet op het decentraal delen van data en AI-modellen in de plaats van afhankelijk te blijven van grote internationale spelers die gebruik maken van een centraal model. Op deze manier kan Europa zich onderscheiden, met Nederland als mogelijke koploper. De wetenschappelijke wereld heeft met het vaststellen van de FAIR-principes[219] al grote stappen gezet, maar het bedrijfsleven en de overheid moeten hier ook mee aan de slag. Het decentrale paradigma begint bij datasoevereiniteit: bedrijven, instellingen, overheid en personen hebben controle over data waarover zij rechthebbend zijn. De belangrijkste kans ligt in het omgaan met (zakelijke) netwerken en daarmee decentraal kunnen acteren.

7.1.2 Definitie

Artificial Intelligence (AI) is een systeemtechnologie die erop gericht is om gedrag door machines te realiseren dat lijkt op natuurlijke intelligentie. AI omvat verschillende leerstrategieën, namelijk supervised machine learning, unsupervised learning, reinforcement learning en deep learning. In toenemende mate worden voor AI hybride vormen ontwikkeld waarin mens en AI samenwerken of kennis gedreven modellen met data-gedreven machine learning. Veel aandacht is er het afgelopen jaar voor generatieve AI, waarbij teksten, afbeeldingen, audio en andere content automatisch gegenereerd kunnen worden op basis van invoer van gebruikers.

Data science, data analytics and data spaces betreft alle aspecten van het verzamelen, beheren, ontsluiten, delen, verwerken en analyseren van data middels dataverwerkingstechnologieën om waarde te creëren. *Data science* heeft betrekking op wetenschappelijke methoden, processen en systemen om kennis en inzichten te onttrekken uit data. *Data analytics* richt zich op het interpreteren van gegevens om waardevolle inzichten te verkrijgen. Een *data space* is een gedecentraliseerde, op standaarden gebaseerde structuur om vrijwillig en met vertrouwen federatief data te kunnen delen/hergebruiken. Vele verschillende vormen van data zijn voor de hedendaagse AI de bron voor het leren (trainen) van AI-modellen.

7.1.3 Gerelateerde sleuteltechnologieën

AI en data zijn zeer nauw verbonden met een groot aantal sleuteltechnologieën. Ze zijn in de eerste plaats gerelateerd aan de andere sleuteltechnologieën die tot het cluster *digital and information technologies* behoren. Dit zijn: *cyber security technologies*, *software technologies and computing*, *digital connectivity technologies*, *digital twinning and immersive technologies* en *neuromorphic technologies*. In de figuur hieronder zijn ze te herkennen aan de groene lijnen.

Complementaire sleuteltechnologieën (de blauwe lijnen) zijn sleuteltechnologieën die elkaar aanvullen: ze kunnen elkaar ondersteunen en de ene sleuteltechnologie kan de andere sleuteltechnologie gebruiken. Juist omdat AI een systeemtechnologie is en data daarvoor randvoorwaardelijk is, zijn AI en data complementair aan een groot aantal andere sleuteltechnologieën. Vanwege de leesbaarheid zijn in de figuur maar een beperkt aantal complementaire sleuteltechnologieën opgenomen.

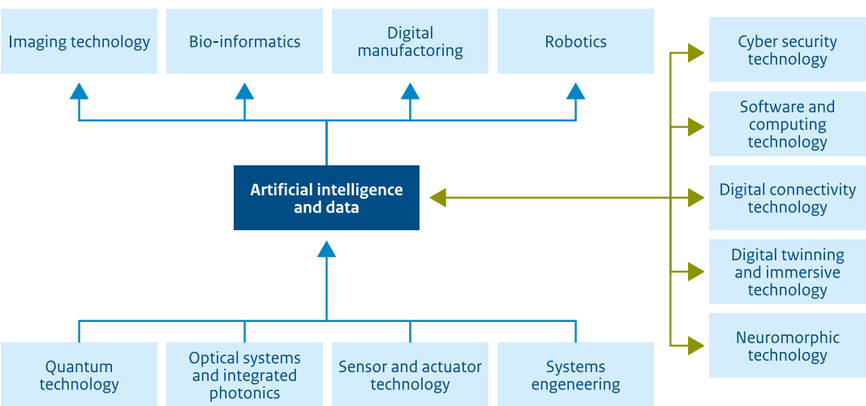
7.2 Positie, sterktes/zwaktes

7.2.1 Ontwikkelingsfase technologie

Voor AI beschrijft de WRR de ontwikkelingsfase als volgt: "AI verlaat het lab en gaat de samenleving in".[220] Daarmee wordt bedoeld dat AI-kennis, -modellen en -toepassingen zich nu over de samenleving verspreiden. In de fase hiervoor, vanaf de jaren 50 van de vorige eeuw, zijn overal ter wereld ecosystemen en neurale netwerken ontwikkeld die de basis vormen voor deze toepassingen. Dit wil niet zeggen dat AI nu uitontwikkeld is: zowel de fundamentele basis van de technologie, de machine learning algoritmiek, als de applicaties (cross sectoraal en intersectoraal) die hierop gestoeld zijn, blijven zich immers permanent doorontwikkelen. De ontwikkelingen in generatieve AI springen momenteel het meest in het oog[221] en hiermee wordt ook steeds sneller een groter publiek bereikt: vanaf 2023 heeft Open AI's ChatGPT al meer dan 100 miljoen wekelijks actieve gebruikers.[222] Op basis van de AI Act[223], die naar verwachting vanaf 2026 in werking treedt, kunnen mensen en bedrijven in de EU rekenen op veilige, transparante, traceerbare en niet-discriminerende AI-systemen die onder toezicht staan van mensen.

Data analytics (en datascience) vindt plaats op verschillende lagen in het data-ecosysteem, en kan zowel betrekking hebben op cloudgebaseerde data als on-premise data. In wetgeving zijn generieke randvoorwaarden gecreëerd voor data analytics (de Algemene Verordening Gegevensbescherming (AVG)[224], de Datagovernance Verordening (DGA)[225] en de Dataverordening (DA)[226], in verschillende domeinen zijn specifieke en algemene standaarden nog in ontwikkeling. Hierbij is specifieke aandacht voor dataverwerkingsdiensten. Data analytics en data science zijn instrumenteel en voorwaardelijk, ze fungeren als essentiële instrumenten om waardevolle inzichten uit gegevens te halen en besluitvorming te ondersteunen. Het is van groot belang dat (Nederlandse) organisaties toegang hebben tot kennis hierover en dat ze zich bewust zijn van het belang en de noodzaak. *Data spaces* zitten in de overgangsfase van kleinschalige initiatieven naar grootschalige toepassingen.

Gerelateerde sleuteltechnologieën



Bron: TNO/NWO (2023) Herijking sleuteltechnologieën

Barrières

Er zijn nog maar weinig toonaangevende Europese en Nederlandse spelers in de aanbodkant van de AI technologie die bijdragen aan foundation models (AI modellen die een brede waaier aan algemene output produceren). Er is een aantal barrières dat hieraan ten grondslag ligt:

- Er is onvoldoende toegang tot rekeninfrastructuur, Nederland is daardoor afhankelijk van het buitenland. De cloudinfrastructuur en de benodigde platformen om AI-modellen te laten draaien en data te verwerken zijn bovendien veelal in handen van enkele grote technologiebedrijven met een sterke marktpositie. Zonder eigen infrastructuur kan Nederland de inzet op mensgerichte AI onvoldoende borgen. Met name voor het trainen van de foundation models op grootschalige data sets, het fine-tunen op domein-specifieke data en de verdere applicatieontwikkeling zijn grote investeringen nodig. Het ligt voor de hand om te kijken hoe Nederlandse organisaties hierbij geholpen kunnen worden of te investeren in ontwikkelingen die zich richten op het trainen van modellen met minder of gedistribueerde data.
- Er is onvoldoende toegang tot data. Er zijn drie soorten redenen waarom deling van data tussen organisaties vaak niet (eenvoudig) van de grond komt, ook niet als datadeling goede kansen biedt voor innovatie of maatschappelijke uitdagingen: partijen willen, kunnen of mogen niet altijd data delen.[227]
- Er is onvoldoende toegang tot kapitaal, zowel vanuit de overheid als de markt. Met betrekking tot publieke middelen is er een groot aantal kleinere publiek-private budgetten beschikbaar, met telkens veranderende voorwaarden. Ook is er in Nederland een gebrek aan opschalingskapitaal vanuit de markt voor AI en data scale-ups. Het risico bestaat dat succesvolle scale-ups die in Nederland onvoldoende toegang hebben tot kapitaal, zich laten overnemen door buitenlandse bedrijven, waardoor ze meestal naar het buitenland verdwijnen.
- Grootschalig en bewust gebruik van AI-toepassingen beperkt zich in Nederland tot koploperbedrijven. De snelheid van innovatie in en innovatie met AI in het bredere bedrijfsleven is in Nederland daardoor laag. Het is urgent om alle bedrijven mee te nemen in de ontwikkeling en toepassing van AI om te voorkomen dat ze de boot missen.
- Voor data spaces liggen er ook barrières op het terrein van opschaling, verdere groei vraagt om een nauwere samenwerking tussen een groot aantal technologie- en marktpartijen.

7.2.2 Internationale positie en omvang

Internationaal

Naar verwachting zal de wereldwijde markt voor AI- en datatoepassingen nog decennialang explosief toenemen.[228] Digitale platformbedrijven uit de Verenigde Staten en China leiden wereldwijd in de implementatie en schaalvergroting van AI-productiesystemen en de ontwikkeling van zowel hardware als software om data te kunnen verwerken. Zij bepalen in belangrijke mate de ontwikkeling van de basis en de toepassingen van AI en de datastromen die hiermee gepaard gaan. Deze technologiebedrijven hebben nu nog grote invloed op de manier waarop deze data worden gebruikt, door wie en wie zeggenschap heeft over de apparaten en de bijbehorende data.

Enkele globale spelers en (platform)bedrijven

- O.a. Microsoft, Alphabet (Google), Amazon, Canon Inc., IBM, Intel, Meta, Apple, Alibaba Group, Tencent, Salesforce, Oracle, NVIDIA, Samsung, SAP SE

Een voorbeeld van een internationaal initiatief

- CODATA[229]

Europa[230]

Op het wereldtoneel profileert Europa zich als koploper op het gebied van verantwoord datagebruik, met een focus op data van hoge kwaliteit en mensgerichte en betrouwbare AI. Hierbij is aandacht voor wetgeving om de kansen te benutten op een manier die in overeenstemming is met de publieke waarden en grondrechten. Ook is er aandacht voor het vinden van systeemoplossingen voor belemmeringen in het datagebruik, waarbij digitale open strategische autonomie veel aandacht krijgt. Op deze manier bouwt Europa aan een decentraal model van AI en data delen, in nauwe afstemming tussen overheden, wetenschap, bedrijfsleven en maatschappelijke organisaties.

Het Europese antwoord op de macht van de internationale techbedrijven op de Europese markt is regelgeving[231]. De Europese wet- en regelgeving op het gebied van AI en data wordt de komende jaren geïmplementeerd. Het vroegtijdig inspelen op wettelijke vereisten schept marktkansen voor bedrijven. Doordat aanbieders van (hoog-risico) AI straks standaard aan een set eisen moeten voldoen die voor kwalitatief hoogwaardige AI zorgt, kan het vertrouwen in het gebruik van AI gestimuleerd worden. Dit verlaagt de drempel om AI toe te passen voor bedrijven en consumenten. Ook buiten Europa ontstaan er initiatieven gericht op zorgvuldiger gebruik van AI en data, in de vorm van datasystemen die secure by design zijn.[232] Alle Europese landen zien het belang van AI en data in en ontwikkelen hier strategieën voor.[233]

Op Europees niveau is financiering beschikbaar via *Horizon R&D*[234] *en Digital Europe*[235] zowel voor innovatie op AI als data. Op Europees niveau wordt ook het belang van clouddiensten voor zowel datadelen als AI-ontwikkeling ingezien, en via verschillende beleidsinstrumenten zoals de IPCEI CIS wordt ingezet op het ontwikkelen van innovatieve Europese cloudoplossingen.

Data spaces is een belangrijk onderwerp op EU-niveau. GAIA-X en IDS[236] zijn twee voorbeelden. Vanuit de EU wordt beleid ontwikkeld en initiatieven genomen om dit te stimuleren, zoals het Data Spaces Support Centre, dit bevordert betrouwbare EU-datadeling in data-gedreven producten en diensten, tegen lagere kosten[237]. Sectorale wetgeving is in ontwikkeling.

Belangrijke EU-clusters
- European Digital Innovation Hubs[238]
- EAIF[239]
- ADRA[240]
- Netwerken voor federatief data delen: GAIA-X[241], Centre of Excellence for Data Sharing and Cloud[242] Data Spaces Support Centre[243], Data sharing Coalition[244]
- Onderzoeksnetwerken AI: CLAIRE[245], ELLIS[246]

7.2.3 Nationale positie en omvang

Nederland neemt de derde plek in op de DESI-index, na Finland en Denemarken.[247] Ten opzichte van de andere EU-landen scoort Nederland hoog met een goede basisinfrastructuur voor digitalisering: een bovengemiddelde score op menselijk kapitaal, connectiviteit, integratie van digitale technologie en digitale overheidsdiensten. Ook heeft Nederland een goede Europese positie in (standaarden voor) data spaces.

Nederland beschikt over een excellent kennisniveau. Het heeft een uitgebreid nationaal onderzoekslandschap[248], iedere Nederlandse universiteit en hogeschool doet onderzoek naar AI, verantwoord datagebruik en data-analyse. Er wordt stevig samengewerkt tussen technologische AI en data onderzoeksgroepen en relevante sociale en geesteswetenschappelijke onderzoeksgroepen.

Bijna iedere organisatie gebruikt een digitale infrastructuur en data, waarbij de grotere bedrijven in Nederland een koplopersrol vervullen op het gebied van het gebruik van AI en data.[249] Er is een breed palet aan maatschappelijke stakeholders actief op het gebied van data en AI.[250] Het publiek-private-netwerk is goed op elkaar ingespeeld dankzij een aantal programma's als Commit, Commit2Data en de AI Coalitie.

Bovendien wordt er goed samengewerkt in een aantal ecosystemen en onderzoeksprogramma's. In 2021 is het NGF AiNed Investeringsprogramma gehonoreerd, dat tot doel heeft om een bijdrage te leveren aan de internationale concurrentiepositie van Nederland, een bijdrage aan de economische groei en de Nederlandse knelpunten integraal te benaderen.

Er zijn echter ook minpunten. Specifiek voor Nederland geldt dat het vestigingsklimaat voor toptalent in Nederland onder druk staat. Er is een grote behoefte is aan talent en toch is er nog een numerus fixus (voor buitenlands talent en voor sommige masteropleidingen) bij universiteiten. Er zijn initiatieven die hier op den duur enige verandering in kunnen brengen. Zo is dit jaar ROBUST gehonoreerd, een NWO-programma gericht op de versterking van fundamenteel AI-onderzoek met 170 promovendi in 10 jaar.[251]

Nationale ecosystemen
- NL AIC, ICAI-labs, AI-hub Amsterdam, AI-hub Brainport, AI-hub Brightlands, AI-hub Midden-Nederland, AI-hub Noord-Nederland, AI-hub Oost-Nederland, AI-hub Zuid-Holland, AI Hubs netwerk, ELSA-labs, Gaia-X Hub NL, Holland High Tech, Centre of Excellence for Data Sharing and Cloud (CoE-DSC), bedrijven, universiteiten en hogescholen, waaronder IPN en PRIO.

NWO/OCW onderzoeksprogramma's
- Hybrid Intelligence
- ROBUST – ICAI
- NWA verantwoorde AI en big data route

7.2.4 Specifieke toepassingsgebieden

Vanwege het zeer brede toepassingskarakter is het onmogelijk een totaalbeeld te geven van de mogelijke toepassingen van AI en data. Ter illustratie schetsen we hieronder een aantal voorbeelden.

1. **Technische industrie** – In de chipindustrie wordt AI, data science, data analytics ingezet om de efficiëntie van hardwarecomponenten te verbeteren. Dit omvat het optimaliseren van ontwerpen en productieprocessen en zo tot betere prestaties en energiezuinigheid te komen.
2. **Agrifood sector** – Het gecontroleerd delen van gegevens via data spaces biedt kansen voor verbeterde landbouw- en voedselproductie. Daarnaast is Nederland in de agrifood sector bijzonder geavanceerd in de toepassing van AI voor robotica.
3. **Energietransitie** – Optimalisatie van de opwekking en afname van energie, met name bij fluctuerende bronnen zoals zonne- en windenergie. Zowel bedrijven als individuen delen hun energieverbruiksgegevens met als resultaat nauwkeurige voorspellingen en piekbelastingbeheer.
4. **Medische en gezondheidssector** – In de medische sector zijn er legio mogelijkheden voor verbetering van de preventieve gezondheidszorg, nauwkeurigere diagnostiek, monitoring, in de effectiviteit van medische behandeling en ook ter ondersteuning van artsen en verplegend personeel.
5. **Supply Chain en Mobiliteit** – AI en de Basis Data Infrastructuur (BDI) worden gebruikt om vervoer veiliger, duurzamer, efficiënter en weerbaarder te maken.
6. **Financiële sector** – In deze sector wordt zeer veel gebruik gemaakt van AI, data science en data analytics. Bijvoorbeeld in klantencontacten (chatbots), bij fraudedetectie, risicobeoordeling en personalisatie van financiële diensten.
7. **Defensie** – De Nederlandse krijgsmacht maakt in toenemende mate gebruik van hoogtechnologische oorlogvoering, waarbij data science en AI een belangrijke rol spelen.[252]

7.2.5 Risico's voor de nationale veiligheid

Toepassingen van AI and Data kunnen leiden tot risico's voor de nationale veiligheid bij bijvoorbeeld het creëren van desinformatie en bij repressie. Tevens ontstaan risico's bij militaire toepassingen, of wanneer toepassingen van AI and Data een dreiging vormen voor de veiligheid van digitale systemen van onder meer instanties actief in ons veiligheidsdomein en in onze vitale infrastructuur.

De breedte van toepassingen van AI and Data – zie eerdere opmerkingen over AI als "systeemtechnologie" en de veelheid aan genoemde toepassingsgebieden onder 7.2.4 – maakt dat het wegvallen van kennis of kunde over deze technologieën aanzienlijke gevolgen zou hebben voor de economie en maatschappij. Zo maken toepassingen van AI and Data disruptieve veranderingen mogelijk bij veel andere technologieën in de NTS. Zoals eerder aangegeven is de VS momenteel op het gebied van generatieve AI de belangrijkste speler, met afstand gevolgd door China. De dominantie van deze landen is één van de drivers dat een Europese inzet voor een paradigmawisseling naar een decentraal systeem wenselijk is. Afhankelijkheid van cloudservices, dataopslag en systemen van buiten Europa kan potentiële beveiligingsproblemen veroorzaken en onze controle over gevoelige informatie bij veiligheidsinstanties verminderen.

Aandacht voor disproportionele afhankelijkheden in de waardeketen van AI and Data is dus belangrijk. Niet alle afhankelijkheden zijn problematisch. Alleen daar waar de risico's voor het publiek belang hoog zijn, kan aanvullend handelen vereist zijn. Dit behoeft een genuanceerde kwantitatieve én kwalitatieve analyse van op het niveau van specifieke waardeketens. Het kabinet zal bezien in hoeverre hierbij kan worden aangesloten op de risicoanalyses van kritische technologiegebieden die de Europese Commissie uitvoert in het kader van de Europese Economische Veiligheidsstrategie, of dat nadere eigen analyse nog nodig is. Zoals ook gecommuniceerd in de Kamerbrief Voortgang Strategische Afhankelijkheden van 15 december 2023 kan vanwege de vertrouwelijke en kwetsbare aard van deze analyses op de voortgang hieromtrent niet verder op worden ingegaan.

7.2.6 SWOT

Sterkte	Zwakte
• goede samenwerking en ecosystemen • excellent kennis(niveau) • basisinfrastructuur voor digitalisering	• toegang tot AI-specifieke grootschalige rekeninfrastructuurtoegang tot data en toegang tot opschalingskapitaal • fragmentatie van publiek-private inzet
Kans	**Bedreiging**
• paradigmawisseling (hoge kwaliteit data als genetwerkt Europees alternatief) • nieuwe bedrijfsmodellen realiseren • bredere replacement • transities en AI en data dichter bij elkaar brengen	• vestigingsklimaat voor toptalent • hogere prioritering in andere landen • marktleiders bepalen de platformen

In Nederland is het niveau van kennis en de wetenschappelijke kwaliteit van het onderzoek erg hoog en er is een goede samenwerking tussen disciplines en netwerken. De basisinfrastructuur voor digitalisering en datadelen is in Nederland erg goed, vergeleken met andere Europese landen.

Er zijn ook uitdagingen. Zo is er een gebrek aan beschikbare data, te weinig toegang tot financiële middelen (zowel overheidsinvesteringen als privaat investeringskapitaal) en onvoldoende toegang tot AI-specifieke grootschalige reken-capaciteit. Er is een gebrek aan een integrale aanpak, in plaats daarvan is er een fragmentatie van publiek-private initiatieven. Verder schort het in Nederland aan een gevoel van urgentie en aan radicale vernieuwing. Er gebeurt veel, maar dat is vaak niet zichtbaar.

Kansen liggen er door op Europees niveau te werken aan een antwoord op de dominantie van met name Amerikaanse en Chinese bedrijven, alsook de focus op efficiënte, verantwoorde, en mensgerichte AI.

De belangrijkste bedreigingen liggen op het vlak van de overmacht van techbedrijven, inzet van derde landen en ontwikkelingen ten aanzien van ons vestigingsklimaat.

7.3 Ambitie

7.3.1 Hoofdambitie

In 2035 heeft Nederland de capaciteit om met een combinatie van AI- en datatechnologie te werken, die bijdraagt aan open strategische autonomie, leidt tot innovaties voor alle sectoren en versnelling van maatschappelijke transities.

7.3.2 Deelambities

Lange termijn blik en samenhang bij investeringen in onderzoek en innovatie
Met het oog op haar concurrentiepositie zal Nederland zich moeten voorbereiden op de verdere ontwikkeling en benutting van foundation modellen. Dit vraagt om een verbeterde rekenkracht op een schaal die voorheen ondenkbaar was. Hierbij is het van belang om vooruit te kijken naar de toekomstige behoeften van de samenleving en de industrie, en de inrichting zo te ontwerpen dat deze zich kan aanpassen aan veranderende technologische landschappen.

Deelambitie: Projecten ontwikkelen gericht op het vergroten van rekenkracht. Dit is zowel een krachtige investering in de technologische vooruitgang door een multidisciplinaire aanpak van computing, als een versterking van bestaande initiatieven.

Investeringen in onderzoeks- en testfaciliteiten
Investeringen in onderzoeks- en testfaciliteiten vormen de ruggengraat van vooruitstrevende innovaties. Het bevordert publiek-private samenwerkingen, en de expertise en middelen van zowel de overheid als het bedrijfsleven worden zo gebundeld.

Deelambitie: Het opzetten van proeftuinen om nieuwe technologieën en innovatieve oplossingen op realistische wijze te testen en valideren. MKB-bedrijven worden betrokken en er wordt aansluiting gezocht bij lopende EU-projecten. Dit bevordert niet alleen de technologische vooruitgang maar is tevens een waarborg voor de praktische toepasbaarheid van nieuwe ideeën.

Financiering voor startups en scale-ups: vroege fase financiering en doorgroei
In Nederland worden investeringsbeslissingen minder snel genomen als bijvoorbeeld in de VS. Dit heeft o.a. te maken met de beschikbaarheid van durfkapitaal, een verschil in de beschikbare kennis bij investeerders, de bereidheid om toekomstgericht over investeringen te denken. De overheid kan financieringsinstrumentarium en InvestNL inzetten om het risico van investeringen te verlagen, en kan blended finance mogelijk maken. Steun voor de vraagkant en de adoptie van nieuwe technologie kan ook helpen om het investeringsbeleid te verbeteren.

Deelambitie: Toegang tot financiering en randvoorwaarden voor financiering in Nederland verbeteren door het risico op investeringen in innovatieve bedrijven te verlagen en de kennis bij investeerders te vergroten.

Betrekken van gebruikers bij onderzoek en innovatie en marktcreatie
Het betrekken van gebruikers bij onderzoek, innovatie en marktcreatie is belangrijk voor een succesvolle ontwikkeling van AI. Een strategische focus op het MKB is essentieel om ervoor te zorgen dat zij niet alleen profiteren van de gegenereerde data, maar ook actief deelnemen aan het proces van het delen van data, modellen en toepassingen.

Deelambitie: Het betrekken van gebruikers kan een nieuwe impuls krijgen door samen te werken in onderzoeks- en innovatie labs. Door het aantal labs te vergroten en hun zichtbaarheid te verhogen, kunnen we de synergie tussen academische kennis, industriële behoeften en het MKB versterken, waardoor de ontwikkeling van AI- en data-technologie op brede schaal wordt bevorderd.

Vaardigheden en absorptiecapaciteit in het MKB
Door een gebrek aan kennis, vaardigheden en contacten is het moeilijk voor het MKB om zich te oriënteren op de nieuwe mogelijkheden op het gebied van AI en data. De krappe arbeidsmarkt maakt dit nog lastiger.

Deelambitie: Meer inzetten op de verbinding tussen het MKB en kennisinstellingen en grote bedrijven actief op het gebied van AI, bijvoorbeeld door een tijdelijke kennisinjectie van arbeidskrachten met grote kennis op het gebied van AI en data. Dit kan leiden tot een versterking van regionale samenwerkingsverbanden, zoals nu al gebeurt in zeven AI hubs.

Ontwikkelen, aantrekken en behoud van (top)talent
Er is op alle niveaus een gebrek aan talent op het gebied van AI en data.

Deelambitie: De Nederlandse arbeidsmarkt wordt aantrekkelijker voor nationaal en internationaal talent op het gebied van AI en data, door meer mogelijkheden voor scholing en omscholing, het bieden van goede arbeidsvoorwaarden, carrièreperspectief en het bouwen van sterke clusters waarin bedrijven en kennisinstellingen samen een goede omgeving creëren voor talent.

Versterken van kennisoverdracht en het valorisatieproces voor meer impact
Het AI- en datadomein kent unieke uitdagingen aangaande kenniscreatie, kennisuitwisseling en valorisatie. Binnen dit domein vormen kennis gedreven data-modellen het intellectueel eigendom. Wanneer startups zich losmaken van een universiteit of moederorganisatie verliezen zij vaak de toegang tot deze datamodellen en data waardoor een deel van de waarde ook verloren gaat. Dit vraagt om valorisatiestrategieën die passen bij AI en data.

Deelambitie: In 2035 worden nieuwe bedrijven geholpen toegang te houden of krijgen tot kennis gedreven datamodellen en de data zelf, en ondersteund met opschalen wanneer een bedrijf succesvol is.

Organiserend vermogen van onderzoeks- en innovatie-ecosystemen
Binnen Nederland bestaan veel verschillende ecosystemen zowel op het gebied van AI als data. De meeste van deze ecosystemen hebben connecties met ecosystemen van technologieën waarop AI en data een aanvulling kunnen zijn, omdat zij mede afhankelijk zijn van de data uit sectoren.

Deelambitie: In 2035 is de samenwerking tussen de ecosystemen op het gebied van AI en data versterkt terwijl de afzonderlijke kracht en samenstelling ook is benut. Hierdoor worden synergiën gecreëerd en investeringen en innovatiemiddelen doelmatiger ingezet. Daarnaast zorgt een gezamenlijke aanpak voor een belangrijke bijdrage aan standaarden en impact op beleid binnen de Europese Unie.

Eerder in het proces aandacht besteden aan wet- en regelgeving
De nieuwe Europese digitale wetgeving biedt voldoende kansen voor innovatie, bij een groot deel van de organisaties die data delen of met AI werken heerst echter onwetendheid over de mogelijkheden. Het toezicht op bestaande of nieuwe wetgeving heeft als handicap dat de ontwikkelingen op het gebied AI en data snel gaan.

Deelambitie: Voor een verdere doorontwikkeling van AI en data is behoefte aan adequate wet- en regelgeving. Hierbij is het van groot belang dat bestaande en nieuwe wetgeving dynamisch wordt ingericht, innoveren in sandboxes kan daarbij behulpzaam zijn. Daarnaast dient de kennis over de wet- en regelgeving verspreid te worden en in begrijpelijke vorm ter beschikking worden gesteld aan stakeholders binnen het veld.

Geraadpleegde deskundigen

Experts
- Paul Blank – NWO
- Frans van Ette – TNO
- Omar Niamut – TNO

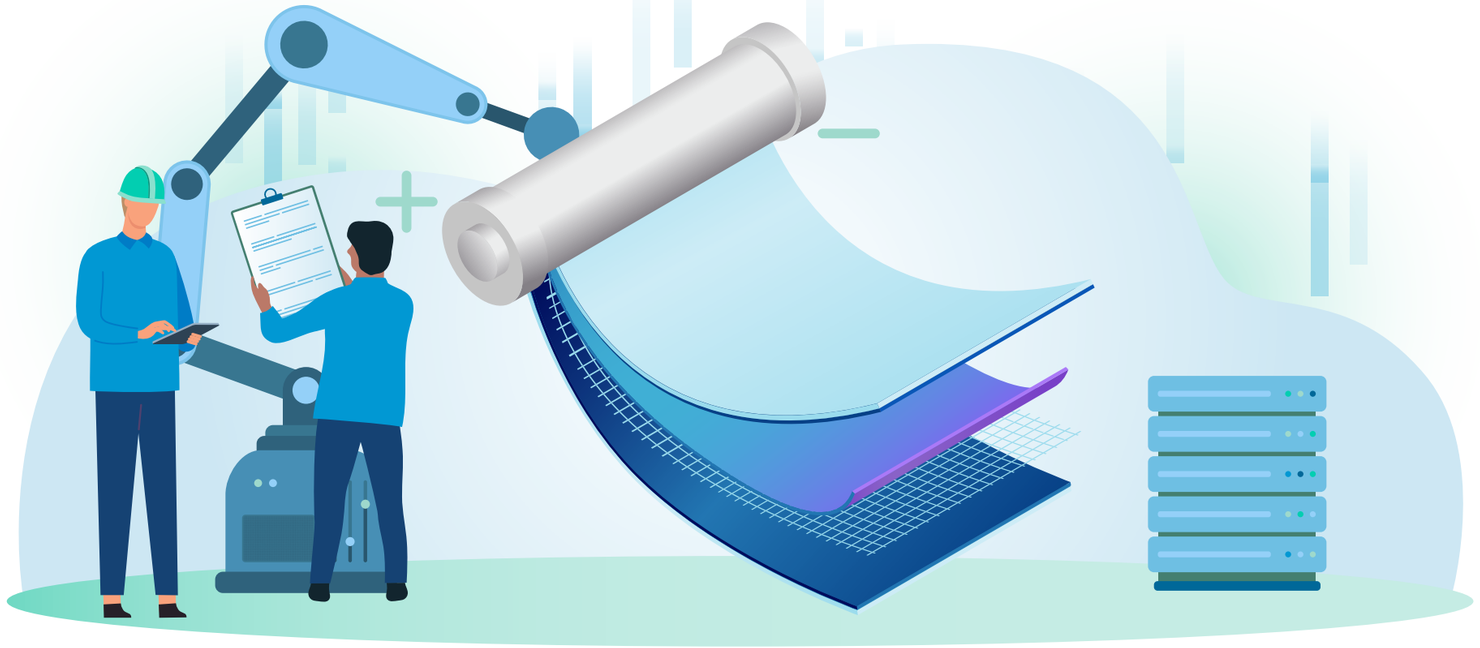
Deelnemers Ronde tafel 1
- Pallas Agterberg – Alliander
- Paul Blank – NWO
- Frans van Ette – TNO
- Inge Graef – Tilburg Institute for Law, Technology and Society
- Maurice Hoogeveen – Booking
- Geert-Jan Houben – TU Delft
- Kees van de Klaauw – AI-coalitie
- Inald Lagendijk – AiNed
- Douwe Lycklama – Innopay
- Barend Mons – Universiteit Maastricht
- Omar Niamut – TNO
- Maarten de Rijke – Universiteit van Amsterdam en Microsoft

Deelnemers Ronde tafel 2
- Pallas Agterberg – Alliander
- Frans van Ette – TNO
- Geert-Jan Houben – TU Delft
- Kees van de Klaauw – AI-coalitie
- Inald Lagendijk – AiNed
- Douwe Lycklama – Innopay
- Omar Niamut – TNO
- Marten de Rijke – Universiteit van Amsterdam en Microsoft
- Maarten van Steen – Digital Society Institute, Universiteit Twente
- Cees Snoek – Universiteit van Amsterdam

Deelnemers Ronde tafel 3
- Pallas Agterberg – Alliander
- Paul Blank – NWO
- Frans van Ette – TNO
- Jos van Hillegersberg – JADS en Universiteit Twente
- Maurice Hoogeveen – Booking
- Geert-Jan Houben – TU Delft
- Kees van de Klaauw – AI-coalitie
- Inald Lagendijk – AiNed
- Barend Mons, Universiteit Maastricht
- Maarten van Steen – Digital Society Institute, Universiteit Twente
- Cees Snoek – Universiteit van Amsterdam
- Pieter Verhagen – Innopay

8 Energy materials

In 2035 maakt Nederland deel uit van de kopgroep in de ontwikkeling van de volgende generatie energy materials, waarbij in het ontwerpproces rekening is gehouden met circulariteit, duurzaamheid en het verminderen van de afhankelijkheid van kritieke grondstoffen. Deze energy materials worden gebruikt om op grote schaal batterijsystemen, elektrolysers en warmte opslagsystemen te produceren. We zetten in op de grootschalige binnenlandse opschaling van deze productie én streven er naar om internationale partners te ondersteunen bij het integreren van deze energy materials in hun productiesystemen.



8.1 Definitie

8.1.1 Belang van de sleuteltechnologie

Energy materials betreft de materialen die het mogelijk maken om (duurzame) energie efficiënt op te vangen, op te slaan, te transporteren en om te zetten naar een andere vorm of energiedrager. *Energy materials* leveren in hun toepassing in opslag- en conversiesystemen een essentiële bijdrage aan de energie- en klimaattransitie, bijvoorbeeld in windmolens, batterijen of elektrolysers. Anders dan in andere NTS-agenda's gaat het bij deze sleuteltechnologie in de kern om materialen in plaats van technologieën. Voor elk van deze materialen worden diverse technologieën ontwikkeld en gebruikt om de materialen toe te passen in de energietransitie. In deze agenda maken we gebruik van de ketens van het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) om de verschillende toepassingsgebieden van de materialen weer te geven. Hier is voor gekozen vanwege de herkenbaarheid in het veld.

Energy materials zijn gekarakteriseerd door hun hoge mate van geleiding, katalytische activiteit, chemische inertie, opslagcapaciteit en langdurig gebruik onder wisselende omstandigheden.

De energietransitie leidt tot een grote afhankelijkheid van een aantal kritieke grondstoffen (zoals lithium, kobalt en iridium) voor enkele technologieën. Deze grondstoffen zijn essentieel voor de huidige gecommercialiseerde *energy materials*, maar hun winning veroorzaakt problemen voor lokale gemeenschappen, biodiversiteit en ecologieën. Bovendien zijn er strategische risico's, aangezien sommige van deze materialen in een beperkt aantal landen worden verwerkt, waar Nederland wisselende diplomatieke betrekkingen mee heeft. Dit alles onderstreept de noodzaak om alternatieven te ontwikkelen die duurzamer zijn en minder afhankelijk van kritieke grondstoffen.

In het ontwikkelen van *energy materials* kan Nederland bouwen op een grote chemische industrie. Nederlands onderzoek naar *energy materials* kent een hoge mate van impact maar een lage specialisatie. Met name China is een sterk groeiende speler op onderzoeksgebied binnen deze technologie. Sowieso bevinden afnemers van de materialen (de systeemfabrikanten) zich vaak niet in Nederland en maar beperkt in Europa: zo komt van alle batterijen tot 70% uit China[253]. Dit roept de vraag op: hoe behouden we ontwikkelde kennis en kunde, hoe vertalen we dit naar impact en welke inzet is daarvoor nodig?

8.1.2 Definitie

Energy materials omvat alle materialen die het mogelijk maken om (duurzaam opgewekte) energie op te slaan, te transporteren, efficiënt te vangen en efficiënt om te zetten naar een andere vorm of energiedrager.

8.1.3 Gerelateerde sleuteltechnologieën

Energy materials heeft een aantal complementaire en concurrerende sleuteltechnologieën. Complementair zijn n*anomanufacturing, process technology including process intensification en thin films and coatings* omdat deze technologieën gebruikt worden in de productie van *energy materials*. Onder *electricity-driven chemical reaction technologies* vallen veel technologieën die in *energy materials* gebruikt worden, zoals elektrolyse. *Photovoltaics* draagt bij aan de opwekking van duurzame energie. Als laatste helpen *digital connectivity technologies* bij het efficiënt verbinden en aansturen van aan *energy materials* gerelateerde apparaten.

Er zijn ook enkele gerelateerde technologieën. *Biomanufacturing and bioprocessing* en *catalysis* zijn gerelateerd aan *energy materials* omdat ze dezelfde kennisbasis gebruiken maar niet direct gericht zijn op de productie of verbetering van materialen voor energieopslag of -omzetting.

Als laatste zijn *nanomaterials en semicon technologies* concurrerende technieken, doordat ze concurreren op dezelfde productiefactoren. Daarnaast is *nanomaterials* ook complementair, aangezien veel *nanomaterials* ook *energy materials* zijn.

8.2 Positie, sterktes/zwaktes

8.2.1 Ontwikkelingsfase technologie

Een klimaatneutraal en toekomstbestendig energiesysteem vereist verschillende vormen van flexibiliteit en opslag, vanwege de variabele beschikbaarheid van duurzaam opgewekte energie. In deze agenda worden de vier ketens van het NPE aangehouden, te weten elektriciteit, waterstof, warmte en koolstof. Hiermee ligt de focus van deze agenda op toepassing van *energy materials*, in het bijzonder voor de energietransitie. De koolstofketen komt grotendeels al aan bod in de NTS agenda *process technology including intensification*. Hierom wordt deze niet verder behandeld in deze agenda. Voor de ketens Elektriciteit en Warmte biedt de Routekaart Energieopslag een duidelijk overzicht welke technologieën belangrijk zullen zijn in het toekomstige energiesysteem, en geeft daarmee een indicatie welke *energy materials* hiervoor van belang zijn.[254]

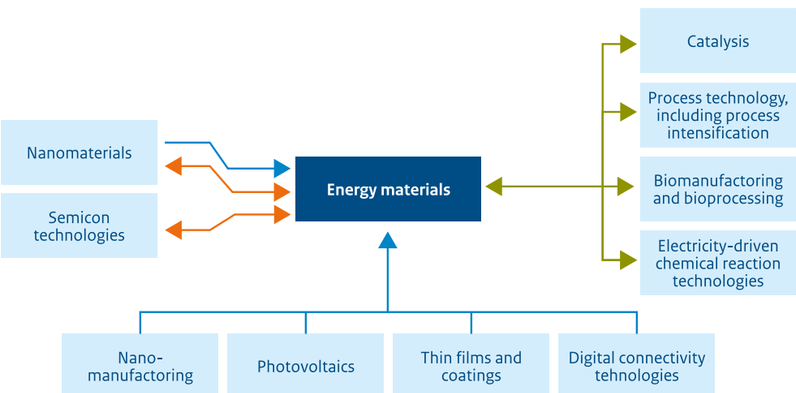
Elektriciteit

Batterijtechnologie, met lithium-ion als meest ontwikkelde (TRL 9)[255], is essentieel voor de elektriciteitsketen, vanwege de hoge efficiëntie, duur en snelheid waarmee het elektriciteit op kan slaan. Huidige gecommercialiseerde technieken zoals lithium-ion, vereisen kritieke grondstoffen, waaronder lithium. Er wordt een breed scala aan veelbelovende alternatieve technologieën ontwikkeld zoals bijvoorbeeld natrium-ion (TRL 5-6), die minder kritieke grondstoffen nodig hebben of andere voordelen hebben ten opzichte van lithium-ion.

Waterstof

Voor de waterstofketen zijn elektrolyse en brandstofcellen belangrijke technologieën. Met elektrolyse kan waterstof door middel van groene elektriciteit worden geproduceerd en met een brandstofcel kan deze weer worden omgezet in elektriciteit en warmte. De productie van elektrolysers vereist kritieke grondstoffen, maar er wordt gewerkt aan vermindering hiervan. PEM[256] en alkaline domineren momenteel de markt (beide in TRL 9). Er zijn diverse andere type elektrolysers in ontwikkeling, op verschillende TRL niveaus. Enkele voorbeelden hiervan zijn *solid oxide* (TRL 8) en AEM[257] (TRL 6). Brandstofcellen zetten waterstof om in elektriciteit en gebruiken hiervoor dezelfde technologie, zo zijn er ook PEM, alkaline, AEM en *solid oxide* brandstofcellen.

Gerelateerde sleuteltechnologieën



Bron: TNO/NWO (2023) Herijking sleuteltechnologieën

Warmte

Warmteopslag gebruikt overwegend goedkope materialen, waardoor er weinig afhankelijkheid is van kritieke grondstoffen. In de warmteketen is warmteopslag cruciaal. Dit bestaat in de vorm van *sensible*, latent en thermo-chemisch. *Sensible* warmteopslag behoudt de fase en druk van het materiaal, latent warmteopslag gebruikt faseveranderingen, en thermo-chemische opslag slaat warmte op via chemische reacties. In Nederland wordt voornamelijk *sensible* warmteopslag met water gebruikt, toegepast in technologieën zoals *aquifer*, boorput en tanks, allen op TRL 9. *Aquifer* warmteopslag maakt gebruik van een watervoerende laag in de ondergrond waar warmte in wordt opgeslagen. Zonder deze laag in de ondergrond is deze manier van warmteopslag niet mogelijk.

De ontwikkeling van *energy materials* wordt geremd doordat er sprake is van enkele barrières. Enkele van deze barrières gelden voor alle ketens, terwijl andere barrières specifiek zijn aan een bepaalde keten. In tabel 1 wordt een overzicht gegeven.

Barrières voor energy materials	NPE Keten		
	Elektri-citeit	Water-stof	Warmte
Toekomstige beschikbaarheid van kritieke mineralen doordat te weinig nieuwe mijnen worden geopend	X	X	
Het opslaan van hernieuwbare energie vergt aanzienlijk meer ruimte dan fossiele energie. Het integreren van deze infrastructuur in bestaande omgevingen leidt tot vertragingen.	X		X
Fossiele industrie is wegens schaalvoordeel goedkoper. Via wetgeving moet het speelveld met hernieuwbaar gelijkgetrokken worden. Deze wetgeving is niet altijd aanwezig.	X	X	X
Eerdere infrastructuur- en stedenbouwkundige keuzes beperken opties voor infrastructuur	X	X	X
Bij hernieuwbare energieopwekking en -opslag zijn initiële kosten vaak aanzienlijk, terwijl de opbrengsten onzeker zijn. Dit bemoeilijkt de financiering.	X	X	X
De ontwikkeling van wet- en regelgeving is cruciaal om obstakels in de energietransitie te overwinnen, maar dit proces verloopt soms traag en wetgeving is nog niet altijd aangepast aan de behoeften van de sector.	X	X	X
Aanleg van opslag vereist zowel de juiste ondergrond als aanwezigheid van vraag én duurzame opwek in de nabije omgeving. Dit zijn veel stakeholders, coördinatieproblemen kunnen het proces aanzienlijk vertragen.		X	X

8.2.2 Internationale positie en omvang

Elektriciteit

China is een belangrijke geopolitieke speler voor *energy materials*. China verwerkt momenteel een significant deel van alle kritieke grondstoffen die belangrijk zijn voor de energietransitie zoals koper, nikkel, kobalt en lithium. De EU probeert haar afhankelijkheid af te bouwen door middel van de *Critical Raw Materials Act* [258] en het inzetten op circulariteit en de *Net Zero Industries Act*[259]. China is momenteel de wereldleider in batterijproductie met 75%, gevolgd door de VS. Na 2030 wordt verwacht dat de toeleverketen diverser wordt, mede door investeringen in de VS (via de IRA[260]) en de EU[261]. In de EU breiden voornamelijk als Duitsland, Zweden, Polen, Hongarije en Frankrijk hun productiecapaciteit uit, ondersteund door een EU IPCEI[262].

Waterstof

China vervult binnen de waterstofketen een primaire mondiale rol door het leveren en verwerken van kritieke grondstoffen. Daarnaast is China een belangrijke concurrent van de EU in de productie van elektrolysers. Beide regio's bezitten elk ongeveer 30% van de wereldwijde productiecapaciteit. De EU ondersteunt de ontwikkeling van elektrolyers ook met een IPCEI. Met nieuwe investeringen zoals de Amerikaanse IRA, kunnen de VS of China de EU mogelijk inhalen in de ontwikkeling van elektrolysers.

Warmte

Warmteopslag is populair in landen als Nederland, Duitsland, Denemarken, Scandinavië, Polen en China, waar van oudsher relatief veel huizen via warmtenetten worden verwarmd. De dominante technieken verschillen aan de hand van lokale omstandigheden. China gebruikt voornamelijk boorput opslag door ruimtegebrek en het ontbreken van aquifer lagen. Duitsland, Denemarken en Scandinavië gebruiken pit opslag vanwege de ruimtebeschikbaarheid en lage kosten. Polen en Duitsland zetten ook ongebruikte mijnen in.

8.2.3 Nationale positie en omvang

Elektriciteit

Er zijn Nederlandse start-ups en scale-ups die werken aan nieuwe materialen en elektrodes als toeleverancier voor grote gigafabrieken en innovatieve productietechnieken voor efficiëntere batterijsystemen. In Nederland worden ook lithium-ion batterijcellen verwerkt voor niche toepassingen zoals in schepen en specifieke voertuigen. Daarnaast zijn er inspanningen op het gebied van duurzaamheid en circulaire economie, zoals hergebruik, recycling en het terugwinnen van kritieke grondstoffen uit batterijen. Nederland heeft geen plannen voor grootschalige productie van lithium-ion batterijen en doet niet mee aan de IPCEI voor batterijen. Wel loopt er een groot programma vanuit het Nationaal Groeifonds, met als doel het verkrijgen van controle op specifieke punten binnen de batterijwaardeketen. Hiermee worden er tot 2032 enkele honderden miljoenen euro's geïnvesteerd in onder andere een nieuwe generatie batterijcellen, in stationaire

batterijen ter ondersteuning van het net, en in batterijsystemen voor de zwaarvervoerssector. Het doel hiervan is om Nederland wereldwijd een leidende positie te geven op deze thema's.

Waterstof
Nederland heeft een nationaal ecosysteem voor elektrolyse dat de hele waardeketen omvat, met bijdragen uit verschillende regio's. Er zijn initiatieven voor de ontwikkeling en productie van elektrolysecomponenten, waaronder materialen, apparatuur en controlesystemen. Daarnaast zijn er start- en scale-ups actief in het design en de productie van elektrolysers. Nederland is van plan in 2030 een elektrolysecapaciteit van 4 GW te bereiken, ondersteund door 9 miljard euro uit het klimaatfonds. Deze fondsen dragen echter alleen indirect bij aan de ontwikkeling van elektrolysetechnologie in Nederland. Er is ook samenwerking met Duitsland voor de productie van PEM-brandstofcelstacks en er zijn inspanningen op het gebied van duurzaamheid en circulariteit binnen de waterstofketen.

Warmte
Nederland is wereldleider in *aquifer* warmteopslag, met 85%[263] van alle systemen wereldwijd. Dit is te danken aan de locaties met *aquifer* laag in de Nederlandse ondergrond. De technologie wordt vooral gebruikt voor het opslaan van restwarmte of duurzaam geproduceerde warmte, die vervolgens ingezet wordt voor het verwarmen van huizen en glastuinbouw. *Aquifer* opslag is goedkoper dan boorput en tank opslag, die als aanvullende technologieën dienen waar geen *aquifer* laag is. Warmteopslag is cruciaal in Nederland, waar meer dan de helft van de energievraag uit warmte bestaat.

8.2.4 Specifieke toepassingsgebieden

Elektriciteit
Nederland is goed gepositioneerd om Europese batterijproductie te ondersteunen door het ontwikkelen van innovatieve technieken, nieuwe materialen en het produceren en doorvoeren van halffabricaten. Hier zijn al verschillende start-ups en scale-ups in actief. Nederland kan ook bijdragen met gespecialiseerde machineontwikkeling voor batterijproductie, dankzij de aanwezigheid van gespecialiseerde machinebouw bedrijven. Verder speelt Nederland een rol in het assembleren van batterijpakketten voor niche toepassingen zoals zwaar transport en bouwvoertuigen, dankzij een concentratie van bedrijven die gespecialiseerd zijn in dergelijke *heavy duty* apparaten. Daarnaast worden alternatieve opslagmethoden zoals persluchtenergieopslag, vliegwielen en warmtebatterijen overwogen voor het versterken van energiesystemen.

Waterstof
Nederland is goed gepositioneerd voor grootschalige waterstofproductie en het opbouwen van expertise en intellectueel eigendom in elektrolyse, waterstofgebruik en productie van synthetische brandstoffen. Deze positie is te danken aan de bestaande gasinfrastructuur, toegang tot windenergie in de Noordzee en lokale kennis en expertise. Nederlandse bedrijven kunnen deze expertise ook exporteren naar landen met overvloedige hernieuwbare energiebronnen. Bovendien kan Nederland een belangrijke rol spelen in de aanvoer, opslag en verwerking van waterstofdragers, zoals ammoniak of LOHC[264], mede dankzij zijn infrastructuur en doorvoerpositie.

Illustratie van enkele toonaangevende voorbeelden clusters en organisaties

Warmte
Nederland onderscheidt zich door de wijdverspreide aanwezigheid van aquifer laag in de ondergrond voor warmteopslag, wat belangrijk is voor het balanceren van energiepieken en seizoensopslag. Deze warmte kan worden gebruikt voor huizen en glastuinbouw in de winter. De exportmogelijkheden van aquifer warmteopslag zijn echter beperkt, omdat vergelijkbare ondergrondse lagen elders vaak ontbreken. Tank warmteopslag, daarentegen, is breder toepasbaar en kan daarmee in de toekomst bijdragen aan het Nederlandse verdienvermogen.

8.2.5 Risico's voor de nationale veiligheid
Toepassingen van *energy materials* dienen met name een maatschappelijk belang. Toch kunnen ook *energy materials* leiden tot risico's voor de nationale veiligheid, bijvoorbeeld wanneer deze technologieën worden ingezet voor militaire toepassingen. Zo kunnen batterijen en fuel cells gebruikt worden voor voortstuwing in met name lucht- en scheepvaart. Verder heeft een aantal vitale processen direct met *energy materials* te maken, bijv. transport en distributie van elektriciteit.

Energy materials spelen een cruciale rol in de energietransitie, en kennen daarmee ook een strategisch belang. Het wegvallen van deze bronnen – of het nu gaat om de benodigde kritieke grondstoffen en halffabricaten, of toegang tot andere onderdelen van de keten – zou aanzienlijke gevolgen hebben voor de economie, de energietransitie en de verwezenlijking van klimaatdoelstellingen. Oplossingen liggen in het verminderen van afhankelijkheden en het diversifiëren van de bronnen van kritieke grondstoffen. Nederland en andere (Europese) landen moeten streven naar een duurzame en veerkrachtige toeleveringsketen voor kritieke grondstoffen om mogelijke risico's te minimaliseren en de energietransitie op een betrouwbare en stabiele manier te bevorderen.

Aandacht voor disproportionele afhankelijkheden in de waardeketen van *Energy materials* is dus belangrijk. Niet alle afhankelijkheden zijn problematisch. Alleen daar waar de risico's voor het publiek belang hoog zijn, kan aanvullend handelen vereist zijn. Dit behoeft een genuanceerde kwantitatieve én kwalitatieve analyse op het niveau van specifieke waardeketens. Het kabinet zal bezien in hoeverre hierbij kan worden aangesloten op de risicoanalyses kritische technologiegebieden die de Europese Commissie uitvoert in het kader van de Europese Economische Veiligheidsstrategie, of dat nadere eigen analyse nog nodig is. Zoals ook gecommuniceerd in de Kamerbrief Voortgang Strategische Afhankelijkheden van 15 december 2023 kan vanwege de vertrouwelijke en kwetsbare aard van deze analyses op de voortgang hieromtrent niet verder op worden ingegaan.

8.2.6 SWOT

Elektriciteit
In Nederland is diepgaande kennis en expertise aanwezig bij bedrijven over de fabricage van machines die cruciaal zijn voor de productie van batterijen en over het cel ontwerp. Zo worden bijvoorbeeld nieuwe samenstellingen voor anoden, kathoden en elektrolyt ontwikkeld. Een zwak punt is dat Nederland momenteel een beperkte productiecapaciteit voor batterijen heeft in vergelijking met andere landen. Dit kan een belemmering vormen voor het snel opschalen van productie in geval van een sterke vraag, zoals tijdens een snelle energietransitie. Daarnaast is dit een vertragende factor voor de ontwikkeling van nieuwe batterij technologieën. Een kans is IP en machine ontwikkeling voor batterij fabricage, dat vervolgens geëxporteerd kan worden naar andere landen (bijvoorbeeld binnen de EU). Tevens is een kans om batterijcellen tot *packages* te verwerken voor niche-toepassingen met zware belasting, zoals schepen, trucks en bussen. Deze markt is reeds aanwezig in Nederland en kan verder groeien. Een bedreiging vormt de toekomstige beschikbaarheid van kritieke grondstoffen die nodig zijn voor de productie van batterijen. Daarnaast zetten ook veel andere landen in op IP ontwikkeling voor batterijen.

Sterkte	Zwakte
• Diepgaande kennis en expertise is bij bedrijven die hier gevestigd zijn over de fabricage van machines die cruciaal zijn voor de productie van batterijen en over het cel ontwerp	• Een beperkte productie-capaciteit voor batterijen heeft in vergelijking met andere landen
Kans	**Bedreiging**
• IP en machine ontwikkeling voor batterij fabricage, dat vervolgens geëxporteerd kan worden naar andere landen • Batterijcellen tot packages te verwerken voor niche-toepassingen	• Toekomstige beschikbaar-heid van kritieke materialen • Andere landen zoals V.S. en China, die ook veel op IP ontwikkeling inzetten

Waterstof
Over de gehele waardeketen van elektrolyse is er kennis en expertise aanwezig in Nederland. Momenteel is er echter nog geen grote nationale productiecapaciteit voor elektrolysers. Kansen zijn om in Nederland IP op te bouwen en dit te exporteren naar landen die een grotere elektrolyser productiecapaciteit hebben en om de productiecapaciteit voor elektrolysers in Nederland op te schalen. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de high tech maakindustrie met partijen die gespecialiseerd zijn in dunne film technologie. Een bedreiging vormt de (toekomstige) beschikbaarheid van kritieke grondstoffen die nodig zijn voor de productie van elektrolysers (met name PEM technologie).

Sterkte	Zwakte
• Over de gehele waardeketen van elektrolyse is er kennis en expertise aanwezig	• Nog geen grote nationale productiecapaciteit voor elektrolysers
Kans	**Bedreiging**
• IP opbouwen en dit exporteren naar landen die een grotere elektrolyser productiecapaciteit hebben • Productiecapaciteit voor (onderdelen van) elektrolysers opschalen	• Toekomstige beschikbaarheid van kritieke materialen • Andere landen zoals V.S. en China, die ook veel op IP ontwikkeling inzetten

Warmte
Een sterkte is de aanwezigheid van de meeste *aquifer* warmteopslag installaties ter wereld. Daarmee heeft Nederland zeer veel kennis over het aanleggen van *aquifer* warmteopslag en is het in Nederland de goedkoopste vorm van warmteopslag. Een zwakte is dat *aquifer* warmteopslag afhankelijk is van de aanwezigheid van een *aquifer* laag in de ondergrond. Daardoor is het uitrol- en exportpotentieel beperkt. Een kans is het ontwikkelen van tank warmteopslag, aangezien deze op veel plekken kan worden ingezet, ook waar geen *aquifer* laag is, en daarmee ook kan bijdragen aan het Nederlandse verdienvermogen. Een bedreiging vormt regulering, met name van de ondergrond, die niet optimaal is ingericht voor warmteopslag en daardoor uitrol belemmert.

Sterkte	Zwakte
• Nederland heeft de meeste aquifer warmteopslag installaties ter wereld, daarmee is veel kennis opgebouwd • Sterke kennisbasis van tank warmteopslag aanwezig	• Voor aquifer warmteopslag is een aquifer laag in de ondergrond nodig, hierdoor is het niet overal toepasbaar en heeft het een beperkt exportpotentieel
Kans	**Bedreiging**
• Ontwikkelen van IP en productiecapaciteit van tank warmteopslag, wat overal kan worden ingezet	• Regulering, met name van de ondergrond, die niet optimaal is ingericht voor warmteopslag en daardoor uitrol belemmert

8.3 Ambitie

8.3.1 Hoofdambitie
In 2035 maakt Nederland deel uit van de kopgroep in de ontwikkeling van de volgende generatie *energy materials*, waarbij in het ontwerpproces rekening is gehouden met circulariteit, duurzaamheid en het verminderen van de afhankelijkheid van kritieke grondstoffen. Deze *energy materials* worden gebruikt om op grote schaal batterijsystemen, elektrolysers en warmte opslagsystemen te produceren. We zetten in op de grootschalige binnenlandse opschaling van deze productie én streven er naar om internationale partners te ondersteunen bij het integreren van deze *energy materials* in hun productiesystemen.

8.3.2 Deelambities
De hoofdambitie wordt verder uitgewerkt in deelambities. Voor het versterken van onderzoeks- & innovatie ecosystemen heeft het Kabinet in 2021 tien uitdagingen geïdentificeerd[265]. De deelambities zijn langs deze lijnen uitgewerkt.

Lange termijn blik en samenhang bij investeringen in onderzoek en innovatie
Binnen het domein van *energy materials* ontbreekt het aan een duidelijke langetermijnvisie, ondanks de vele samenwerkingsverbanden. Deze diversiteit in samenwerkingen leidt soms tot een gebrek aan regie.

Deelambitie: In 2035 heeft Nederland een samenwerkingsverband met de sectoren binnen het domein van *Energy materials*. Deze voert regie over de lange termijnstrategie en heeft voldoende middelen tot haar beschikking.

Investeringen in onderzoeks- en testfaciliteiten
Om cutting-edge onderzoek mogelijk te maken en innovatie te bevorderen is er behoefte aan meer breed toegankelijke onderzoeks- en testfaciliteiten, met name voor het midden- en kleinbedrijf. Binnen het veld is specifiek behoefte aan: Pilot lijnen voor verschillende energie dragers zoals waterstof, alsook multi-scale en multi-purpose test faciliteiten. Het is van belang dat de faciliteiten laagdrempelig toegankelijk zijn zodat er een gelijk speelveld ontstaat. Hierbij kan het zowel gaan om faciliteiten die in Nederland staan als om faciliteiten in een ander land binnen de EU.

Deelambitie: In 2035 hebben Nederlandse bedrijven toegang tot: Pilot lijnen voor verschillende energie dragers alsook multi-scale en multi-purpose test faciliteiten.

Ontwikkelen, aantrekken en behoud van (top)talent
Voor de ontwikkeling en productie van *energy materials*, is veel technisch geschoold personeel nodig op zowel WO, HBO als MBO niveau. Er zijn momenteel grote tekorten aan technisch personeel. Dit is niet een uniek probleem in Nederland. Andere landen hebben hier ook last van. Daarom moet ingezet worden op zowel het ontwikkelen van Nederlands technisch (top)talent op alle niveaus, als het aantrekken en behouden op internationaal niveau. Momenteel is het onderzoeksveld gefragmenteerd omdat onderzoek naar materiaalwetenschappen ondergebracht is bij verschillende studierichtingen (zoals natuurkunde, scheikunde en werktuigbouwkunde).
Dit is in contrast met landen zoals de VS en Zwitserland, waar materiaalwetenschappen als studierichting al decennia lang wordt aangeboden.

Deelambitie: In 2035 is Nederland een vooraanstaande bestemming voor internationaal technisch (top) talent. Dit wordt bereikt door een stimulerend vestigingsklimaat voor talent te creëren, dat verder gaat dan financiële incentives. Ook is het onderzoeksveld minder gefragmenteerd.

Financiering voor startups en scale-ups: vroege fase financiering en doorgroei
Beleidsmaatregelen en programma's gericht op de energietransitie, zoals innovatieregelingen en Nationaal Groeifondsprogramma's, kunnen bijdragen aan de ontwikkeling van energy materials door naast directe CO_2-reductie eveneens rekening te houden met indirecte CO_2-reductie. Bij de opschaling naar TRL 8 is er daarnaast een 'first-plant risico', waarvoor een eerste grootschalige productiefaciliteit gerealiseerd moet worden, wat relatief risicovol is. Dit schrikt investeerders af en kan het aantrekken van financiering voor de ontwikkeling van de technologie bemoeilijken en vertragen.

Deelambitie: Er wordt gezorgd voor voldoende financiering van technologie die indirecte CO_2-reductie mogelijk maakt, met name in de opschalingsfase. Daarnaast wordt onderzocht hoe de Nederlandse (maak)industrie zichzelf kan versterken door samenwerking en ecosysteembevordering te stimuleren. Een voorbeeld hiervan is het aanpassen van tendercondities, waarbij het toepassen van bepaalde innovatieve technologieën die ontwikkeld zijn door lokale industrie beloond wordt.

Versterken van kennisoverdracht en het valorisatieproces voor meer impact
De waterstofmarkt bevindt zich in een vroeg stadium van ontwikkeling. Dit maakt de valorisatie van kennis en technologie op dit gebied bijzonder belangrijk binnen energy materials. Enkele grote multinationals zijn momenteel leidend in binnenlandse opschalingsprojecten voor waterstofproductie. Hier liggen significante kansen om de samenwerking, kennisuitwisseling en ook de *lessons learned* tussen deze multinationals, kennisinstellingen en het Nederlandse MKB te verbeteren.

Deelambitie: In 2035 is er meer kennisdeling tussen multinationals en Nederlandse (MKB) bedrijven, waardoor kennis en *lessons learned* van bijvoorbeeld de opschaling van binnenlandse waterstofproductie in het Nederlandse kennisecosysteem landen.

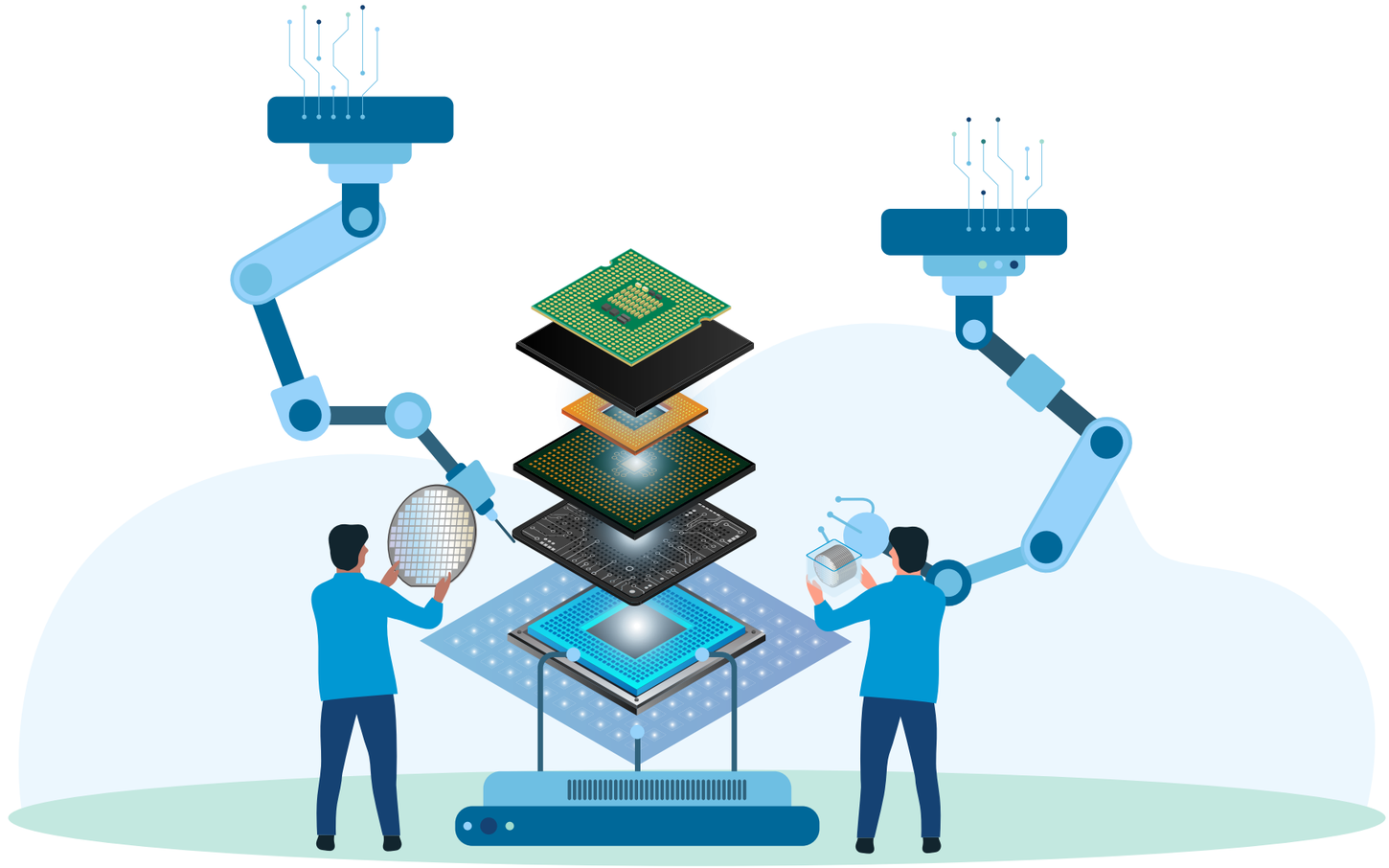
Geraadpleegde deskundigen

Experts
- Ton van Mol (TNO)
- Elmer Rietveld (TNO)
- Tom van Rens (NWO)

Deelnemers ronde tafel
- Ton Bastein (TNO)
- Diederik Apotheker (InvestNL)
- Lennart van der Burg (TNO)
- Sam de Haas (Battolyser Systems)
- Andrea Ramirez (TU Delft)
- Marnix Wagemakers (TU Delft)

9 Semiconductor technologies

Met trots bekleedt Nederland in 2035 internationaal toonaangevende en duurzame kennis- en industrieposities op het gebied van chipontwerp, productie-equipment en materials, en test- en verpakkingstechnologieën. Deze posities zijn versterkt en uitgebreid door een bloeiend MKB naast de huidige sterke kennis en industrieposities, een veerkrachtig ecosysteem, beschikbaarheid van hoogwaardig talent en sterke samenwerkingen met andere Europese partijen. De groei wordt aangedreven door intensievere verticale ketensamenwerking op het gebied van system design, heterogene integratie, bloeiende Europese applicatiedomeinen en gedeelde innovatie-uitdagingen uit de digitale- en energietransities.



9.1 Definitie

9.1.1 Belang van de sleuteltechnologie

Semiconductor technologies is van essentieel belang voor onze maatschappij. De technologie kan worden gezien als het kloppende hart van alle elektronisch aangestuurde apparaten en machines. Belangrijke toepassingsgebieden zijn bijvoorbeeld de auto-industrie, de computerindustrie en communicatiesector, maar denk ook aan belangrijke medische apparatuur, zoals pacemakers en geavanceerde scanners die niet zouden kunnen bestaan zonder *Semiconductor technologies*[266]. *Semiconductor technologies* speelt ook een belangrijke rol in de energietransitie en in digitalisering. Bovendien is *Semiconductor technologies* cruciaal voor toepassingen op gebied van defensie, waardoor deze technologie ook van belang is voor onze nationale veiligheid. Met de verdere ontwikkelingen van onder andere data gedreven technologieën zal de vraag naar *Semiconductor technologies* naar verwachting alleen maar toenemen.

Semiconductor technologies betreft de gehele halfgeleiderwaardeketen. Met de aanwezigheid van onder andere een aantal grote machinebouwers, een sterk bijbehorend ecosysteem en chip-ontwikkelaars binnen specialistische waardeketens, heeft Nederland een sterke positie binnen de halfgeleiderwaardeketen. Onze economie leunt sterk op deze sector en zorgt voor een groot aantal hoogwaardige banen.

Chiptekorten hebben de afgelopen jaren laten zien hoe afhankelijk we zijn geworden van deze technologie. Gezien het grote belang voor onze economie en veiligheid is er een geopolitiek en strategisch belang om een sterke positie te behouden en te versterken in deze industrie en niet volledig afhankelijk te zijn van andere grootmachten voor de toegang tot deze technologie. *Semiconductor technologies* speelt dan ook een grote rol in discussies over open strategische autonomie. Met als doel het versterken van de Europese positie en het verminderen van afhankelijkheden is de Europese Chips Act geïntroduceerd, waarmee 43 miljard euro aan investeringen in de halfgeleiderindustrie wordt gemobiliseerd.

9.1.2 Definitie

Semiconductor technologies betreft halfgeleidercomponenten en/of sterk geminiaturiseerde elektronische subsystemen en de integratie daarvan in grotere producten en systemen. Zij omvatten fabricage (inclusief metrologie en karakterisatie), het ontwerp, de verpakking en het testen van halfgeleidercomponenten tot systemen op microschaal die meerdere functies op een chip integreren (semiconductor devices) en de ontwikkeling en bouw van de machines om deze activiteiten uit te voeren. Onder deze technologie vallen ook High-Frequency and Mixed-Signal Technologies (combineren van digitale en analoge signalen uit verschillende bronnen in een geïntegreerd systeem).[267]

Semiconductor technologies is onderdeel van het technologie cluster Engineering and fabrication Technologies.

9.1.3 Gerelateerde sleuteltechnologieën

Binnen het technologie cluster *Engineering and Fabrication technologies* is *Semiconductor technologies* complementair aan sleuteltechnologieën zoals *Sensor and actuator technologies*, *Robotics*, *Digital manufacturing technologies* en *Imaging technologies*, omdat deze technologieën sterk afhankelijk zijn van halfgeleidercomponenten. *Semiconductor technologies* is ook complementair aan *Digital and informational* technologies, waaronder *AI*, en kan hier zelfs worden gezien als een *enabler*, aangezien halfgeleidertechnologie benodigd is om (snelle) dataverwerking te verwezenlijken.

Daarnaast is *Semiconductor technologies* complementair aan de technologieën *Optical systems and integrated photonics* en *Mechatronics and Optomechatronics*. Mechanische en optische systemen worden met behulp van mechatronica en optomechatronica geïntegreerd tot machines die benodigd zijn voor de ontwikkeling en productie van *Semiconductor technologies*. In deze gevallen kan *Semiconductor technologies* ook worden gezien als de aanjager van verdere ontwikkelingen van deze groep sleuteltechnologieën.

Semiconductor technologies is ook complementair aan *Quantum technologies*. Net als voor *integrated photonics*, geldt dat Quantum Technologies, opkomende platformconnecties met traditionelere chiptechnologieën nodig heeft om geïndustrialiseerd te kunnen worden. Daarnaast is het technologiecluster *Advanced materials* complementair aan *Semiconductor technologies*.
Het onderzoeken en toepassen van geavanceerde materialen vormt een essentieel onderdeel van de voortdurende ontwikkelingen binnen *Semiconductor technologies*.

9.2 Positie, sterktes/zwaktes

9.2.1 Ontwikkelingsfase technologie

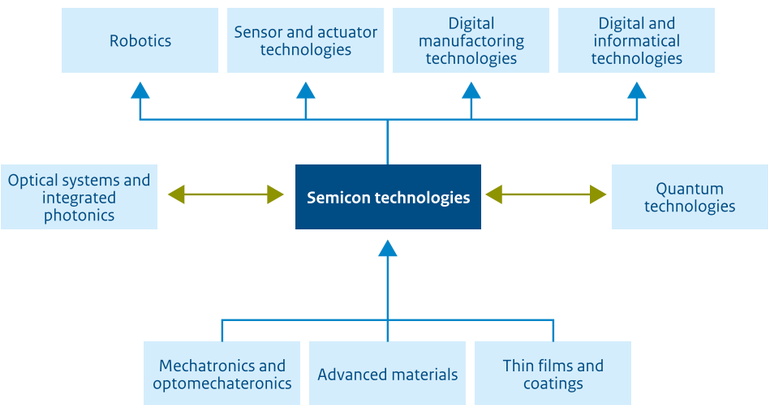
Er is op dit moment sprake van grootschalige productie en gebruik van deze technologie. De brede toepassingsmogelijkheden van *Semiconductor technologies* hebben gezorgd voor een divers aanbod van halfgeleiderproducten, die nu wereldwijd in enorme hoeveelheden worden geproduceerd om te voldoen aan de wereldwijde vraag. Ondertussen blijft de industrie sterk investeren in onderzoek en ontwikkeling voor de volgende generaties halfgeleiders.

De halfgeleiderindustrie kenmerkt zich door een geglobaliseerde waardeketen, specialisatie en de aanwezigheid van oligopolies en monopolies. De waardeketen is complex en kent verschillende barrières per stap in de waardeketen. Zo vereist de productie van *Semiconductor technologies* grote investeringen en is er veelal sprake van jarenlang opgebouwde technologische en organisatorische expertise en economische schaalvoordelen, waar een klein aantal grote bedrijven van profiteert. De hoge kapitaalkosten benodigd voor productie en het commercialiseren van productietechnologie maken het moeilijk voor nieuwe spelers om toetreding tot dit segment te realiseren en concurrerend te worden. Het ontwerpen van chips is daarentegen een segment waarin toetreding veel gemakkelijker te realiseren is. Hier zijn geen hoge instapkosten voor vereist, wat binnen dit segment juist leidt tot veel concurrentie en een groot aantal startups.

Technologisch gezien staat de industrie ook voor een uitdaging. Decennialang is de Wet van Moore de drijvende kracht geweest achter de technologische ontwikkelingen op gebied van *Semiconductor technologies*, waardoor de chips steeds krachtiger en efficiënter werden. De halfgeleidercomponenten van nu gaan echter richting de grootte van enkele nanometers, waardoor verdere verkleining steeds uitdagender wordt. De meest geavanceerde lithografiemachines van ASML (EUV en High-NA) en onderzoek naar nieuwe geavanceerde materialen kunnen nog bijdragen aan de verkleining van componenten (More Moore). Om meer computerkracht op een oppervlakte te passen wordt er naast miniaturisatie ook naar nieuwe architecturen en technieken gekeken, zoals bijvoorbeeld (3D) integratie van verschillende functionaliteiten en nieuwe verticale transistor architecturen (zoals GAA, VNAND, 3D-DRAM, CFET). Geavanceerde halfgeleiderverpakkingen en nieuwe materialen zijn benodigd om de integratie van de nieuwste halfgeleidertechnologieën mogelijk te maken en daarmee toe te werken naar hogere prestaties en nieuwe functionaliteiten.

In toenemende mate, gedreven door de verdere digitalisering van toepassingen die niet maximale computerkracht behoeven, zien we zogenoemde More-than-Moore ontwikkelingen in opmars komen. Hierbij worden voornamelijk bestaande (in plaats van nieuwe) productietechnieken op inventieve wijze toegepast.

Gerelateerde sleuteltechnologieën



Bron: TNO/NWO (2023) Herijking sleuteltechnologieën

Voor de ontwikkeling en productie van *Semiconductor technologies* is er veel hoogopgeleid en gespecialiseerd personeel nodig, wat één van de barrières is op dit moment voor verdere ontwikkelingen binnen deze sector. Het benodigde personeel varieert van MBO, HBO tot WO, en omvat diverse disciplines zoals elektrische techniek, werktuigbouwkunde, natuurkunde, scheikunde en materiaalkunde.

Verduurzaming is eveneens een uitdaging voor de halfgeleider-industrie. Het gaat hier om het verminderen van de energie- en waterconsumptie tijdens productieprocessen en het verhogen van de energie-efficiëntie van *Semiconductor technologies* bij gebruik. Daarnaast vormt het streven naar circulariteit ook een belangrijke uitdaging, waarin materialenonderzoek een belangrijke rol speelt.

9.2.2 Internationale positie en omvang

Door geopolitieke veranderende verhoudingen en recente chiptekorten zijn de afhankelijkheden in de waardeketen duidelijk naar voren gekomen. Om deze redenen zijn er wereldwijd investeringsprogramma's in het leven geroepen om de halfgeleiderindustrie een boost te geven, zo ook de Europese Chips Act. Deze wet mobiliseert 43 miljard euro aan publieke en private investeringen, met als doel de concurrentiekracht en veerkracht van Europa op het gebied van halfgeleidertechnologieën te versterken. Daarnaast is ook het IPCEI (Important Project of Common European Interest) Microelectronics and Communication Technologies geïnitieerd, een verruimd staatssteunkader gericht op belangrijke, maar risicovolle investeringen op voor de EU strategische gebieden, waaronder ook *Semiconductor technologies*. Soortgelijke initiatieven worden wereldwijd ontplooid, waaronder in Amerika, Japan, Taiwan, China en Zuid-Korea, waarbij het in veel gevallen gaat over meer dan 100 miljard euro aan investeringen.

Door de jaren heen, gedreven door de hoge investeringskosten, heeft er veel specialisatie en consolidatie plaatsgevonden binnen de waardeketen van *Semiconductor technologies*. De complexe waardeketen omvat meerdere productiestappen, waaronder: chipontwerp, ontwikkeling van machines benodigd voor de productie van halfgeleiders, productie van halfgeleiders (inclusief metrologie en karakterisatie), assemblage en testen van halfgeleiderproducten en de ontwikkeling en levering van kritische en geavanceerde materialen.

Er zijn verschillende typen chips te onderscheiden, waaronder digitale, analoge, RF en mixed-signal chips. Het ontwerpen van digitale chips, voornamelijk toegepast in computers, servers en consumentenelektronica, wordt gedomineerd door Amerikaanse bedrijven. Europese ontwerpbedrijven zitten voornamelijk in specialistische waardeketens en ontwerpen met name analoge, RF en mixed-signal chips, met toepassingen in onder andere sensoren, radarapparatuur en de auto-industrie. Een opvallende trend die binnen het chipontwerpen wordt gezien is dat grote technologische bedrijven steeds meer inzetten op AI en daarvoor hun eigen chips ontwikkelen. Het betreft voornamelijk digitale chips, de Verenigde Staten is op dit gebied dominant.

Wereldwijd is er veel aandacht voor het vergroten van de productiecapaciteit. Toegang tot chipproductie wordt gezien als een belangrijk puzzelstuk voor het behalen van open strategische autonomie. Wat betreft productie leiden momenteel met name Taiwan op gebied van geavanceerde logic chips en Zuid-Korea op gebied van de meest geavanceerde geheugenchips. Amerikaanse productiebedrijven zijn voornamelijk sterk qua productie van CPUs en (in mindere mate) geheugenchips en Europese productiebedrijven richten zich meer op de productie van analoge chips, RF en mixed-signal chips. Europa loopt qua productiecapaciteit achter op de Amerikaanse en Aziatische bedrijven, maar werkt actief aan het vergroten van deze capaciteit, met als streven het leveren van 20% van de wereldwijde productie per 2030[268]. Vooral Duitsland investeert op dit moment aanzienlijk in het opbouwen van verschillende fabrieken, onder andere in Dresden en Maagdenburg. Dit betreft met name fabrieken voor analoge chip productie en/of gespecialiseerde processen.

Productie-, assemblage- en testactiviteiten zijn op grond van kostenoverwegingen over de jaren heen voornamelijk verplaatst naar China en Zuidoost Azië. Deze activiteiten zijn complex en vergen verschillende geavanceerde machines om ze te kunnen uitvoeren. Nederland heeft een sterke positie binnen de machinebouw, met onder andere een monopolie op EUV-lithografiemachines, benodigd om de meest geavanceerde logic chips te produceren.

Een overzicht van internationale clusters

Internationale clusters en samenwerkingen	Toelichting
Pilot lines (Advanced Node, FDSOI en power electronics)	ASML, ASM, IMEC, Intel
Chips JU	EU joint undertaking met R&D calls en Capacity building Calls
Eureka Xecs	R&D Calls
IPCEI	Europese projecten waar o.a. ASML en NXP bij betrokken zijn

9.2.3 Nationale positie en omvang[269]

Nederland speelt een belangrijke rol in de halfgeleiderindustrie. We zijn sterk vertegenwoordigd binnen de machinebouw met onder andere een aantal grote machineontwikkelaars op gebied van lithografie, atomic layer deposition, etsen, advanced packaging, metrologie en karakterisatie. Deze bedrijven werken nauw samen met een groot aantal leveranciers en partners.

Daarnaast heeft Nederland een sterke kennisbasis op gebied van analoog, RF en mixed-signal chipontwerp (met toepassingen in o.a. sensoren, radarapparatuur en de auto-industrie) en hebben we ook productiecapaciteit op dit gebied. Hoewel onderzoeksactiviteiten met betrekking tot chipontwerp worden uitgevoerd door een relatief kleine groep, trekt de hoogwaardige specialistische kennis van de universiteiten meerdere ontwikkelkantoren van

internationale spelers naar Nederland. Er ontstaan ook op dit gebied van chipontwerp startups, maar deze worden vaak al snel overgenomen door grote internationale bedrijven.

Grootschalige productie van advanced logic ICs heeft Nederland niet en ook zijn er weinig grote bedrijven op gebied van assembly en testing op dit moment. Hierin zijn we sterk afhankelijk van Azië en de Verenigde Staten.

Vanuit de technische universiteiten en hogescholen wordt er vanuit verschillende disciplines onderzoek gedaan, met name binnen de faculteiten voor Elektrotechniek, Werktuigbouwkunde, Natuurkunde en Chemie. De Nederlandse universiteiten werken nauw samen met de industrie en publiceren regelmatig in toonaangevende internationale wetenschappelijke tijdschriften. Daarnaast werken kennisinstellingen zoals TNO samen met partijen in Nederland en internationale leiders zoals Intel, Samsung en Carl Zeiss, met name op het gebied van machineontwikkeling, vervuilingsbeheersing en metrologie.

De sterke positie van Nederland op het gebied van *Semiconductor technologies* wordt weerspiegeld in de sterke aanwezigheid binnen Horizon2020 en Horizon Europe projecten[270]. Nederland heeft onlangs besloten 230 miljoen euro te investeren om innovatie op gebied van *Semiconductor technologies* verder te versterken via het IPCEI Microelectronics and Communication Technologies staatssteunkader.[271]

De *Semiconductor technologies* waardeketen wordt gekarakteriseerd door grote investeringen en stevige posities. Nederland heeft traditioneel posities in hoogtechnologische laag-volume markten en machinebouw voor hoogtechnologische hoog-volume waardeketens. Met de positie van machinebouw in de hoog-volume waardeketens en ontwerp, productie en back-end posities in meer specialistische waardeketens, dragen we goed bij aan een versterking van de positie van Europa.

9.2.4 Specifieke toepassingsgebieden

Specifieke toepassingsgebieden hierin zijn:

State of the art machinebouw voor hoog-volume waardeketens

1. Consumentenelektronica: smartphones, tablets, gaming apparatuur, smartwatches
2. Computer en informatietechnologieën: desktops, laptops, AI-systemen
3. Communicatiesystemen: data centra, IoT
4. (Smart) mobility: auto's, ADAS
5. Power electronics (deels mobiliteit, maar ook windmolens, elektrificatie van industrie, etc.)

Ontwerp, productie en back-end voor specialistische waardeketens

1. Auto-industrie: Nederlandse design en productiebedrijven leveren veel aan de auto-industrie. Veel sensoren en microcontrollers in auto's moeten aan strenge eisen voldoen en vragen daarom om specialistische kennis en volwassener productietechnologie, waar Nederlandse bedrijven al een positie op hebben.
2. Medische apparatuur: met een aantal grote Nederlandse bedrijven binnen de medische apparatuur, waaronder Philips en Siemens, is dit een kansrijk toepassingsgebied van halfgeleidertechnologie voor Nederland.
3. Industriële toepassing: met de voortdurende focus op automatisering en digitalisering van de maakindustrie, biedt dit toepassingsgebied kansen voor de Nederlandse chipindustrie om hier een rol in te spelen.

Illustratie van enkele toonaangevende voorbeelden clusters en organisaties

4. Defensie: op gebied van defensie is open strategische autonomie van groot belang. *Semiconductor technologies* kent veel belangrijke toepassingen binnen defensie. Het opbouwen van een sterke kennisbasis voor toepassingen op gebied van defensie is dan ook erg belangrijk. Nederland speelt hierin al een rol (bijvoorbeeld TNO – NXP – Thales Nederland voor radartechnologie).
5. Communicatie: Nederland heeft al een sterke kennisbasis op gebied van RF, dat een belangrijke rol speelt op het gebied van communicatie technologieën. Denk hierbij aan componenten voor draadloze communicatie, benodigd voor 5G en 6G netwerken.

9.2.5 Risico's voor de nationale veiligheid

De toepassingen van *Semiconductor technologies* kunnen leiden tot risico's voor de nationale veiligheid, bijvoorbeeld wanneer deze technologieën worden ingezet voor verschillende militaire toepassingen of wanneer deze een bedreiging vormen voor de veiligheid en continuïteit van apparatuur en systemen van onder meer instanties actief in ons veiligheidsdomein en in onze vitale infrastructuur. Halfgeleiders en derhalve de onderliggende halfgeleidertechnologie maakt een belangrijk deel uit van allerlei militaire wapen- en combat support systemen, inclusief reconnaissance (infrarood, multispectraal, ultraviolet), communicatie (encryptie), electronic warfare (ECCM) en avionics (cockpit displays). Daarnaast zijn veel vitale processen afhankelijk van apparatuur en systemen waarin halfgeleidertechnologie is verwerkt.

De breedte van toepassingen van *Semiconductor technologies* maakt dat het wegvallen van kennis of kunde over deze technologie aanzienlijke gevolgen zou hebben voor de economie en maatschappij. Zoals eerder gesteld heeft er over de jaren heen veel specialisatie en consolidatie plaatsgevonden binnen de waardeketen van *Semiconductor technologies*. Dit, in combinatie met de schaalgrootte van sommige marktsegmenten die de drempel voor nieuwe toetreders gigantisch hoog maken, betekent dat er grote afhankelijkheden zijn van specifieke bedrijven of werelddelen. Dat disruptie van de waardeketen economische gevolgen kan hebben werd zichtbaar in de auto-industrie tijdens de COVID-19 pandemie.

Aandacht voor disproportionele afhankelijkheden in de waardeketen van *semiconductor technologies* is dus belangrijk. Niet alle afhankelijkheden zijn problematisch. Alleen daar waar de risico's voor het publiek belang hoog zijn, kan aanvullend handelen vereist zijn. Dit behoeft een genuanceerde kwantitatieve én kwalitatieve analyse op het niveau van specifieke waardeketens. Het kabinet zal bezien in hoeverre hierbij kan worden aangesloten op de risicoanalyses van kritische technologiegebieden die de Europese Commissie uitvoert in het kader van de Europese Economische Veiligheidsstrategie, of dat een nadere eigen analyse nodig is. Zoals ook gecommuniceerd in de Kamerbrief Voortgang Strategische Afhankelijkheden van 15 december 2023 kan vanwege de vertrouwelijke en kwetsbare aard van deze analyses op de voortgang hieromtrent niet verder op worden ingegaan.

9.2.6 SWOT

Nederland heeft een sterke positie binnen segmenten die een hoge mate van complexiteit met zich meebrengen, met enkele vooraanstaande wereldspelers op het gebied van machinebouw en meer specialistische kennis wat betreft chipontwerp. Echter, op gebied van productie, assemblage en testen zijn we nog sterk afhankelijk van Amerikaanse en Aziatische partijen.

In het licht van de huidige geopolitieke spanningen en intense internationale concurrentie, is het van belang om te investeren in strategische internationale samenwerkingen en gebruik te maken van lopende initiatieven die voortkomen uit de Europese Chips Act, om een duurzame sterke positie te behouden en te versterken binnen deze complexe context.

Sterkte

- Complexe vraagstukken (laag volume, hoge complexiteit)
- Posities op gebied van machinebouw en specialistische waardeketens voor chipontwerp
- Sterke open high-tech ecosystemen
- Sterke wetenschappelijke kennisbasis

Zwakte

- Gebrek aan productie-capaciteit en de daarvoor benodigde expertise
- De kosten gaan voor de baat uit – beschikbaarheid investeringskapitaal
- Grote afstand tot afzetmarkt
- Aanwas technisch talent
- Beperkte mogelijkheden voor startups om op te schalen

Kans

- Europese Chips Act en de daarmee bijkomende financieringsmogelijkheden
- Nieuwe technologische trends en de aansluiting van Nederlandse competenties daarop
- Opkomst data gedreven technologieën
- Strategische (inter)nationale samenwerkingen

Bedreiging

- Gebrek aan personeel
- Sterke internationale competitie
- Geopolitieke spanningen en handelsbeperkingen
- Verspreiding van onontsloten IP

9.3 Ambitie

9.3.1 Hoofdambitie

Met trots bekleedt Nederland in 2035 internationaal toonaangevende en duurzame kennis- en industrieposities op het gebied van chipontwerp, productie-equipment en materials, en test- en verpakkingstechnologieën. Deze posities zijn versterkt en uitgebreid door een bloeiend MKB naast de huidige sterke kennis en industrieposities, een veerkrachtig ecosysteem, beschikbaarheid van hoogwaardig talent en sterke samenwerkingen met andere Europese partijen. De groei wordt aangedreven door intensievere verticale ketensamenwerking op het gebied van system design, heterogene integratie, bloeiende Europese applicatiedomeinen en gedeelde innovatie-uitdagingen uit de digitale-en energietransities.

9.3.2 Deelambities

De hoofdambitie is verder uitgewerkt in deelambities. Voor het versterken van onderzoeks- en innovatie ecosystemen heeft het Kabinet in 2021 tien uitdagingen geïdentificeerd. De deelambities zijn langs deze tien lijnen uitgewerkt.

Lange termijn blik en samenhang bij investeringen in onderzoek en innovatie
De NGF-voorstellen POLARIS en NXTGEN HIGHTECH zorgen voor middel-langetermijn impuls-programmering binnen de Semiconductor Technologies. Ook bieden de ECS community (Europees) en de HTSM Roadmap (Nederlands) richting.
Er liggen daarbij kansen om specifieker de Nederlandse inbreng te definiëren, bijvoorbeeld binnen Europese programma's.
Er is behoefte aan een verhaal waarin de visies van het veld en de Nederlandse overheid zijn geïntegreerd. Het aanhaken van het MKB is hierbij een uitdaging, omdat er maar beperkt mensen beschikbaar zijn om in publiek-private samenwerkingsprojecten in te zetten.

Deelambitie: Er moet een goede afstemming zijn tussen langetermijn strategieën op nationaal niveau en deze moeten samen worden gebracht in één nationale strategie en visie.
De nationale strategie moet goed aansluiten op Europees niveau en Nederland moet zich daarbij duidelijk positioneren.

Investeringen in onderzoeks- en testfaciliteiten
Op R&D-schaal is het één en ander beschikbaar aan onderzoeks- en testfaciliteiten, maar de précommerciële schaal is beperkt. Er is behoefte aan onderzoeks- en testfaciliteiten die kunnen helpen met de overgang van fundamenteel gevalideerd onderzoek naar commerciële implementatie. Het stimuleren hiervan kan de ontwikkeling van nieuwe *Semiconductor technologies* versnellen.

Deelambitie: De ambitie is om pilots en faciliteiten op te zetten die van strategisch belang zijn voor Nederland. Deze moeten zich richten op specialisaties waar Nederland een markt leidende positie op heeft of kan bereiken en moeten complementair zijn aan de al bestaande faciliteiten bij andere Europese partijen.

Betrekken van gebruikers bij onderzoek, innovatie en marktcreatie
Op het gebied van *Semiconductor technologies* zijn er meerdere belangrijke bedrijven in Nederland aanwezig (zie 9.2.3).
Dit resulteert in een aanzienlijke betrokkenheid van eindgebruikers bij onderzoek, innovatie en marktcreatie. Een aantal van deze bedrijven geeft aan veel samen te werken met universiteiten en ook in toenemender mate afhankelijk te worden van kennisinstellingen als leveranciers van nieuwe, fundamentele inzichten. Zo worden promovendi ook al steeds vaker gekoppeld aan het bedrijfsleven en worden er kansen gezien om meer met bijzonder hoogleraren te werken. Een belangrijke uitdaging is het betrekken van gebruikers buiten Nederland, met name uit Azië.

Deelambitie: Bestaande betrokkenheid van gebruikers verder uitbouwen met een focus op duurzame, lange-termijn samenwerkingen voor het delen van inzichten.

Ontwikkelen, aantrekken en behoud van (top)talent
Er is op dit moment een sterk tekort aan voldoende gekwalificeerd talent. Waar de titel 'ingenieur' doorgaans in veel andere landen wordt gezien als prestigieus, is dat in Nederland minder het geval. Opleidingen zijn op dit moment instroom gestuurd: waar behoefte aan is vanuit het oogpunt van studenten, dat is wat wordt aangeboden. Niet wat maatschappelijk nodig is. Verder lukt het Nederland niet goed om vrouwen richting de techniek te trekken, wat een extra onbenut potentieel zou kunnen zijn. Ook instroom van internationale studenten is hierin van belang, om aan de vraag van personeel te kunnen voldoen. Het wegvallen van de expatregeling wordt dan ook als een probleem gezien door meeste bedrijven.

Deelambitie: Toekomstige studenten moet een mooi perspectief worden geboden: een aantrekkelijke sector met een duidelijke impact op de maatschappij. Het zou kunnen helpen extra begeleiding te bieden om universiteiten binnen te komen, zoals in het Verenigde Koninkrijk wordt gedaan in de vorm van een 'foundational year'. Ook is het van belang om een diverse groep aan te spreken: vrouwelijk- en internationaal talent speelt hier ook een belangrijke rol. Een vereiste is dat er genoeg structurele financiering beschikbaar is voor het aannemen van staf en PhD-studenten om alle nieuwe studenten op te leiden.

Versterken van kennisoverdracht en het valorisatieproces voor meer impact
Veel academische en industriële partijen ervaren uitdagingen bij de start: er is nog geen klant, geen financiering en geen ervaring. Pilotlijnen zouden hierbij kunnen helpen, maar vormen op dit moment een struikelblok omdat deze kostendekkend moeten draaien. Het opzetten van ontwerpplatforms, gestimuleerd door de Chips Act, wordt gezien als een aanpak die mogelijk wel de toegangsdrempel zou kunnen verlagen. Daarnaast moet er worden ingezet op doorstroom van talent en is het van belang om samenwerkingen te stimuleren.

Deelambitie: Het moet makkelijker worden voor academische en industriële ontwikkelingspartijen om gebruik te maken van pilotlijnen, zoals ook al gebeurt in Duitsland, en dergelijke pilotlijnen op te zetten, te financieren en/of onder te brengen bij een kennisinstituut. Initiatieven die de instapdrempel verlagen, zoals een ontwerpplatform, moeten gestimuleerd worden.
Het organiseren van een doorstroom van talent binnen het ecosysteem en het bevorderen van samenwerking vanuit een gecentraliseerd centrum, kan verdere oplossingen bieden.

Organiserend vermogen van onderzoeks- en innovatie-ecosystemen
Er zijn kansen om het ecosysteem op semiconductor technologies beter te organiseren.

Deelambitie: De krachten bundelen en het organiserend vermogen versterken van de chipindustrie, zoals ook al wordt gedaan voor bijv. Quantumtechnologie en fotonica. Dit kan worden versterkt door middel van multidisciplinaire bijeenkomsten en applicatie- en overkoepelende onderzoeksvragen.

Verbindingen tussen ecosystemen
Op dit moment lopen er verschillende activiteiten op gebied van machinebouw, chipontwerp en packaging binnen Nederland. De verbinding tussen deze verschillende ecosystemen kan sterker. Dit kan bijvoorbeeld gestimuleerd worden vanuit een applicatie die de verschillende activiteiten aan elkaar verbindt of vanuit een overkoepelende onderzoeksvraag.

Deelambitie: Een sterkere verbinding tussen huidige activiteiten en ecosystemen, gedreven door specifieke applicaties en overkoepelende onderzoeksvragen. Daarnaast willen we de Nederlandse activiteiten ook beter laten aansluiten met internationale ecosystemen door bijvoorbeeld samenwerkingen op te zetten met internationale onderzoeksinstituten.

Geraadpleegde deskundigen

Experts
- Paul Schuddeboom – NWO
- Alexandre Gabriel – NWO
- Vera Janssen – TNO
- Onno Huiskamp – TNO

Deelnemers Ronde tafel
- Wim van der Zande – ARCNL
- Maurice Geraets – NXP
- Natalie Tiggelman – Thermo Fisher Scientific
- Frans List – ASML
- Jorijn van Duijn – ASM
- Aleksandar Andreski – Salland Engineering / Saxion
- Rogier Verberk – TNO
- Mark Luke Farrugia – CITC
- Peter Baltus – TU Eindhoven
- Ulf Johanssen – TU Eindhoven
- Robbert van der Waal – Phillips
- Freek Deelen – Neways Electronics
- Leo de Vreede – TU Delft
- Mark Oude Alink – TU Twente

10 Cybersecurity Technologies

In 2035 heeft Nederland een concurrerende cybersecuritymarkt met voldoende talent ontwikkeld, en middels een multidisciplinaire aanpak een internationaal leidende positie in innovatieve cybersecuritytechnologieën verworven. Deze technologieën leveren een essentiële bijdrage aan de beveiliging van infrastructuren en IT- en OT-netwerken, de transitie naar post-quantum cryptografie en meer automatische detectie en verdediging door inzet van AI. Middels onderzoek en meer publiek-private samenwerking, op nationaal en internationaal niveau, is de kennispositie versterkt en is kennisvalorisatie toegenomen. Hiermee is cybersecurity een geïntegreerd onderdeel van de Nederlandse sectoren door het toepassen van security-by-design, security-by-default, cybersecurity in de toeleveringsketen van organisaties en bedrijfsketens. Dit alles draagt bij aan een digitaal veilig, weerbaar, autonoom en welvarend Nederland.

10.1 Definitie

10.1.1 Belang van de sleuteltechnologie

Door de toenemende digitalisering van de samenleving is cybersecurity een essentiële randvoorwaarde om de nationale veiligheid, het verdienvermogen en andere maatschappelijke belangen van Nederland te kunnen beschermen.[272] Cybersecuritytechnologieën dragen bij aan digitale veiligheidsuitdagingen in alle sectoren van de maatschappij. Door technologische ontwikkelingen zoals kunstmatige intelligentie (AI) en quantum computing zal het belang en de afhankelijkheid van digitale processen blijven toenemen. Dit maakt de samenleving kwetsbaar voor cyberincidenten zoals uitval van (kritieke) systemen en activiteiten van kwaadwillende actoren. Daarnaast bieden technologische ontwikkelingen nieuwe manieren voor kwaadwillende actoren om cyberaanvallen uit te voeren op organisaties.

De digitale dreiging voor de Nederlandse samenleving neemt sterk toe. Zo blijkt uit het Cybersecuritybeeld 2023[273] (CSBN) dat Nederland geconfronteerd wordt met een toenemende dreiging van statelijke actoren die cyberactiviteiten inzetten, waaronder beïnvloeding, spionage, verstoring en sabotage. Deze dreiging wordt zichtbaar door een toenemend aantal digitale aanvallen op operationele technologieën (OT), waarbij sectoren zoals de gezondheidszorg, high-tech, energievoorziening, vervoer en defensie het risico lopen op ernstige verstoringen.[274]

Tevens dragen nieuwe sleuteltechnologieën bij aan de toenemende digitale dreiging. Een voorbeeld hiervan is de opkomst van quantumtechnologie. Quantumtechnologie biedt niet alleen kansen voor (cybersecurity)innovaties, maar vormt ook een bedreiging voor bestaande data encryptie methoden en kan daarmee de vertrouwelijkheid van digitale communicatie in gevaar brengen. Ook brengt de snelle ontwikkeling van kunstmatige intelligentie (AI) nieuwe uitdagingen met zich mee voor het detecteren van digitale indringing en de verdediging daartegen. Als gevolg van deze ontwikkelingen groeit de urgentie om effectieve cybersecuritymaatregelen te ontwikkelen die inspelen op de technologische en internationale ontwikkelingen van de komende jaren. Het ontwikkelen van organisatiemaatregelen, menselijke vaardigheden en effectieve wetgeving zijn essentiële bouwstenen voor het opbouwen van de nationale cyberweerbaarheid. Ondanks inspanningen om de digitale weerbaarheid te verhogen, is sprake van een scheefgroei tussen de toenemende dreiging en de ontwikkeling van de weerbaarheid.[275] Om die reden is de kabinetsbrede Nederlandse Cybersecuritystrategie 2022 – 2028 (NLCS)[276] opgesteld om Nederland digitaal veilig te maken door de digitale weerbaarheid te verhogen en dreigingen tegen te gaan.

Naast deze cybersecuritymaatregelen is kennis en innovatie rondom cybersecuritytechnologieën nodig voor de digitale weerbaarheid en het verdienvermogen van Nederland. Pijler 2 van de NLCS 2022 – 2028[277] benadrukt de noodzaak van gerichte investeringen in kennis- en innovatieontwikkeling van cybersecuritytechnologieën en toepassing ervan in onze economie en samenleving om nieuwe digitale dreigingen het hoofd te bieden. Dit verhoogt onze cyberweerbaarheid, vermindert de afhankelijkheid van buitenlandse bedrijven en oplossingen en bevordert de Nederlandse digitale open strategische autonomie.[278]

Het feit dat *'cybersecurity technologies'* als agenda is opgenomen in de Nationale Technologiestrategie (NTS) past goed bij deze inzet. Deze agenda is een nadere uitwerking van pijler 2 van de NLCS en daarmee gericht op het stimuleren van cybersecurity kennisontwikkeling en -innovatie. Tegelijkertijd is het essentieel dat deze agenda de verbinding zoekt en in samenhang wordt bezien met andere vraagstukken. Zo is het is noodzakelijk om de Nederlandse cybersecurityarbeidsmarkt aantrekkelijker te maken voor nieuw talent om deze doelstellingen te realiseren.[279] Daarnaast is een multidisciplinaire aanpak nodig voor cybersecurityuitdagingen, waarbij ook technische en niet-technische kennis worden gebundeld, om de juiste lange termijn keuzes te maken. Ook is het belangrijk om samenwerking te zoeken met vertegenwoordigers van Nederlandse sectoren waar grote transities plaatsvinden zoals de energiesector, logistiek, chips- en maakindustrie en de maritieme sector. In die transities is het essentieel dat cybersecurityprincipes zoals *cybersecurity-by-design*, *cybersecurity-by-default* en *cybersecurity in de toeleveringsketen* worden meegenomen zodat deze sectoren inherent cyberweerbaar worden.

10.1.2 Definitie[280]

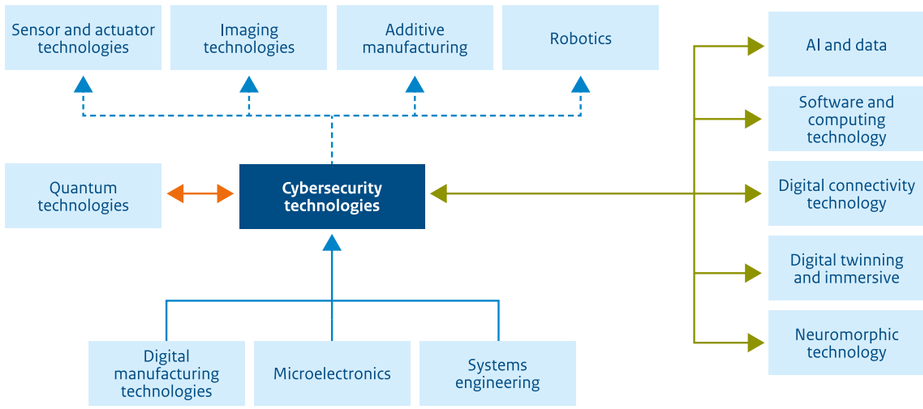
Cybersecuritytechnologieën zijn de digitale technische toepassingen die bedoeld zijn om relevante digitale risico's te verkleinen. Dit omvat ook het omgaan met risico's op schade of uitval van digitale systemen en de beschikbaarheid, integriteit en vertrouwelijkheid van gegevens. Daarnaast zijn cybersecuritytechnologieën gericht op het voorkomen van cyberincidenten en, wanneer cyberincidenten zich hebben voorgedaan, deze te ontdekken, schade te beperken en herstel eenvoudiger te maken. Wat een aanvaardbaar niveau is, is veelal de uitkomst van een risico-afweging.

10.1.3 Gerelateerde sleuteltechnologieën

Cybersecurity is een randvoorwaarde voor de ontwikkeling en succesvolle toepassing van alle digitale sleuteltechnologieën. Dit zijn met name de sleuteltechnologieën die tot het cluster *digital and information technologies* behoren en vallen onder de vlag van de Kennis- en Innovatieagenda Digitalisering (KIA)[281]: *AI and Data*, *software technologies and computing*, *digital connectivity technologies*, *digital twinning and immersive technologies* en *neuromorphic technologies*. Producten die ontwikkeld worden op basis van deze sleuteltechnologieën zullen vanwege hun digitale karakter inherent cybersecurity risico's kennen. Tegelijkertijd zijn deze digitale sleuteltechnologieën ook essentieel voor de ontwikkeling van cybersecuritytoepassingen. Denk aan het gebruik van AI en data voor geautomatiseerde detectiesystemen en softwaretechnologie voor toepassingen in softwarebeveiliging. In de figuur hieronder zijn deze digitale technologieën te herkennen aan de groene lijnen.

De sleuteltechnologieën *digital manufacturing technologies*, *microelectronics* en *systems engineering* zijn nodig voor cybersecuritytoepassingen. Sleuteltechnologieën zoals *sensor and actuator technologies*, *imaging technologies*, *additive manufacturing* en *robotics* hebben *cybersecurity technologies* ook nodig om deze mogelijk te maken. Echter, vanwege de digitale component in deze sleuteltechnologieën dient rekening gehouden te worden met cybersecurityrisico's en zijn *cybersecurity technologies* wel van belang. *Quantum technologies* bieden risico's voor de bestaande cryptografische protocollen, maar tegelijkertijd kansen voor nieuwe manieren van beveiliging (oranje lijn).

Gerelateerde sleuteltechnologieën



Bron: TNO Rapport Herijking Sleuteltechnologieën 2023 (kia-st.nl)

10.2 Positie, sterktes/zwaktes

10.2.1 Ontwikkelingsfase technologie

Cybersecuritytechnologieën bevinden zich in een fase van doorlopende ontwikkeling. Mede vanwege het snel veranderende cyberdreigingslandschap zijn innovatie en aanpassing voortdurend nodig. Door de toenemende digitalisering, nieuwe technologische ontwikkelingen en de geopolitieke situatie neemt de afhankelijkheid van digitale processen steeds meer toe[282], en daarmee ook de impact op de samenleving. De ontwikkeling en toepassing van cybersecuritytechnologieën hangt dan ook nauw samen met de ontwikkeling van andere (sleutel)technologieën, die zowel risico's als kansen bieden voor cybersecurity.

Een van deze technologieën is de ontwikkeling van AI, dat kwaadwillende actoren mogelijkheden biedt om snel en gemakkelijk cyberaanvallen uit te voeren. Zo kan generatieve AI gebruikt worden voor phishing-aanvallen die voor ontvangers niet meer te onderscheiden zijn van onschuldige communicatie.[283] Tegelijkertijd biedt het gebruik van AI mogelijkheden voor betere cybersecurity en draagt AI bij aan de verhoging van de arbeidsproductiviteit van een organisatie.[284]

Een andere ontwikkeling is de conversie van OT-netwerken naar IT/OT integratie in verschillende bedrijfssectoren. Het aantal cyberaanvallen op deze netwerken neemt steeds meer toe, en daarmee ook het risico op uitval van bijvoorbeeld ziekenhuisapparatuur of industriële systemen van fabrieken. Dit geldt eveneens voor consumentenapparaten zoals koelkasten en TV's die verbonden zijn aan het internet (Internet of Things). Vanwege deze ontwikkelingen is de Europese Unie (EU) actief in het opstellen van meer cybersecurityeisen via de Cyber Resilience Act (CRA)[285] en de herziening van de netwerk- en informatiebeveiligingsrichtlijn (NIS2-richtlijn).[286]

Daarnaast is post-quantum cryptografie (PQC) een andere belangrijke ontwikkeling die steeds meer aandacht krijgt. De Europese Commissie heeft een aanbeveling opgesteld waarin de urgentie van PQC staat beschreven.[287] De verwachting is dat de quantumcomputer veel mogelijkheden biedt, maar eveneens een dreiging vormt voor cybersecurity. De quantumcomputer zal in staat zijn om veel gebruikte vormen van cryptografie te ontsleutelen. Er is onderzoek en innovatie nodig om een betrouwbare transitie naar quantumveilige protocollen mogelijk te maken. Vervolgens hebben organisaties die IT-systemen en -producten beheren de tijd nodig om vanuit de bestaande cryptografie naar PQC te migreren. Tijdige voorbereidende stappen voor PQC-migratie en innovatie rondom PQC en de transitie naar *security-by-design* zijn daarom cruciaal.

10.2.2 Internationale positie en omvang

De mondiale cybersecuritymarkt heeft een totale omvang van 153 miljard dollar[288]. In 2019 kwam van de 500 meest verkopende cybersecuritybedrijven 75 procent uit de VS, 15 procent uit de EU en 7 procent uit Israël.[289] Op het gebied van innovatie en investeringen hebben vooral de VS en China een sterke positie.[290] Naar verwachting zal de cybersecuritysector in ieder geval in het komend decennium sterk blijven groeien.

Enkele globale spelers en bedrijven zijn o.a. Palo Alto, IBM, Broadcom, Check Point Software Technologies.[291]

Op het gebied van wetenschappelijk onderzoek heeft de EU een sterke positie, maar op innovatie en investeringen is dat minder het geval. Nederland heeft een sterke positie in Europa en is met name toonaangevend op het gebied van kennis, bijvoorbeeld rondom cryptografie. Voor cybersecuritydienstverlening zijn er verschillende Nederlandse en Europese leveranciers, ook voor het testen en certificeren van producten. Daarnaast zijn er Nederlandse en Europese bedrijven actief op de wereldwijde markt voor cryptografische producten.

Europa stelt financiering beschikbaar voor de ontwikkeling van de cybersecuritysector via de programma's Horizon Europe en Digital Europe. Ook heeft het Europees Cybersecurity Competence Center (ECCC) een belangrijke rol in het versterken van de industriële en technologische capaciteit van de sector, onder meer door financiering beschikbaar te stellen voor de ontwikkeling van ecosystemen en het stimuleren van kennis en innovatie in het cybersecuritydomein in Europa.

10.2.3 Europese wet- en regelgeving

Op Europees niveau is recentelijk een aanzienlijk pakket aan regelgeving voor cybersecurity vastgesteld. De herziende netwerk- en informatiebeveiligingsrichtlijn (NIS2-richtlijn)[292] is sinds 16 januari 2023 van kracht. De lidstaten hebben een termijn van 21 maanden (tot 17 oktober 2024) om deze EU-richtlijn om te zetten in nationale wetgeving. De NIS2-richtlijn schrijft voor dat cybersecurity een verplicht onderdeel wordt van de bedrijfsvoering van de middelgrote en grote ondernemingen in 18 specifieke sectoren. Alle Europese landen beschikken over een nationale cybersecuritystrategie. Ook is er inmiddels een politiek akkoord bereikt over de Cyber Resilience Act (CRA). Die verordening bouwt voort op de cybersecuritymaatregelen voor digitaal verbonden apparaten uit de Radioapparatenrichtlijn (RED). De CRA maakt dat digitaal verbonden producten die op de interne markt worden aangeboden aan cybersecurityvereisten moeten voldoen, en tijdens de redelijk te verwachten levensduur veilig moeten blijven. De reeds ingevoerde Cybersecurity Act (CSA) voorziet in de ontwikkeling van certificeringsschema's voor ICT-producten, diensten en processen. Naar verwachting zal een secundair effect van Europese wet- en regelgeving zijn dat de vraag van organisaties naar (geautomatiseerde) cybersecurityoplossingen toeneemt om te kunnen voldoen aan de gestelde eisen, wat cybersecurityinnovaties in de hand kan werken.

10.2.4 Nationale positie en omvang

In het onderzoek van Dialogic naar economische kansen van de Nederlandse cybersecuritysector (2023)[293] is een duidelijke groei van de (geschatte) omzet en het aantal werknemers te zien. In 2021 kent de Nederlandse cybersecuritysector een geschatte omzet van circa €16 miljard en een werknemersaantal van circa 94.600. De toegevoegde waarde ligt rond de € 7,5 miljard, wat overeenkomt met 0,94% van het bruto binnenlands product (BBP). De onderstaande tabel geeft een kwantitatieve inschatting van de omvang en groei van de cybersecuritysector weer.

Tabel 3: onderzoek dialogic

	2017	2018	2019	2020	2021	CO_2
Omzet (€ mld.)	12,1	13,5	14,7	16,4	16	
Toegevoegde waarde (€ mld.)	6,7	7	7,5	7,5		
Aandeel van het BBP (%)	0,91%	0,91%	0,92%	0,94%		6-7
Aantal werknemers (X1000)	93,1	86,5	93,8	86,3	94,6	

Bron: onderzoek Dialogic naar de economische kansen van de Nederlandse cybersecuritysector (2023)

Naast de groeiende cybersecuritysector is er in Nederland een sterke kennisbasis in cybersecuritytechnologieën. Nederlandse kennisinstellingen en innovatieve bedrijven richten zich op veel aspecten van cybersecurity, maar staan in het bijzonder bekend om de ontwikkeling van cryptografie. Nederland heeft binnen de EU en NAVO als een van de weinige landen de status van *cryptoproducing nation*.[294] Doordat Nederland zelf in staat is om cryptografische producten te produceren, is Nederland niet afhankelijk van andere landen als het gaat om het beschermen van staatsgeheimen. Deze autonome positie staat echter onder druk vanwege een beperkte marktomvang en de sterke internationale concurrentie. Dit wordt echter, zoals aangegeven in de Nederlandse Cybersecuritystrategie 2022-2028, door implementatie van de Nationale Cryptostrategie (NCS) geadresseerd. De NCS stimuleert de overheid bij de ontwikkeling van cryptografische producten voor staatsgeheimen en is het doel om bedrijven in deze nichemarkt te laten floreren. Dit moet op termijn ook zorgen voor *spin-off* producten die voor minder zware toepassingen geschikt zijn, zoals in de netwerken van vitale organisaties.

Ondanks de sterke kennisbasis loopt Nederland relatief achter als het gaat om investeringen in innovatieve cybersecurity-technologieën. De terughoudendheid van investeerders en bedrijven om te investeren in cybersecurity verzwakt de Nederlandse cybersecuritymarkt, en versterkt de afhankelijkheid van buitenlandse producenten van cybersecurityproducten. Ook wordt er weinig Research & Development (R&D) op het gebied van cybersecurity uitgevoerd door bedrijven: de uitgaven van Nederlandse bedrijven aan R&D in het algemeen liggen relatief laag: met circa 1,4% van het BBP ten opzichte van bijvoorbeeld Duitsland (2,2%), VS (2,0%) en Zuid-Korea (3,5%).[295]

Via het programma Cybersecurity voor Nederland (CS4NL), uitgevoerd onder regie van het samenwerkingsplatform dcypher in samenwerking met Topsector ICT, wordt gewerkt aan meer cybersecurityinnovatie door het versterken van de samenwerking tussen het bedrijfsleven (o.a. topsectoren) en kennisinstellingen. Dit gebeurt door het uitzetten van onderzoeksubsidies op cybersecurityinnovatie-thema's waarop consortia kunnen inschrijven. Deze subsidies worden ontwikkeld in samenwerking met de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO) en Topconsortium voor Kennis en Innovatie (TKI).

10.2.5 Specifieke toepassingsgebieden

Cybersecuritytechnologieën worden in een scala aan toepassingsgebieden gebruikt om digitale systemen, netwerken en gegevens te beschermen tegen bedreigingen en aanvallen. Enkele toepassingsgebieden zijn:

- **Netwerkbeveiliging:** Dit omvat het beschermen van computernetwerken tegen ongeautoriseerde toegang, aanvallen en misbruik. Technologieën zoals firewalls, intrusion detection/prevention systems (IDS/IPS), virtual private networks (VPN) en beveiligingsprotocollen zoals SSL/TLS worden hier veel gebruikt.
- **IT/OT security:** Dit omvat de bescherming van meet- en regelsystemen die voor de aansturing van industriële processen of gebouwbeheersystemen worden gebruikt. Internationaal wordt de term IACS (*Industrial Automation and Control Systems*) veel gehanteerd.
- **Endpoint-beveiliging:** Dit omvat het beschermen van individuele apparaten zoals computers, smartphones en tablets tegen malware, ransomware, en andere bedreigingen. Antivirussoftware, antimalwarescanners en endpoint detection and response (EDR) oplossingen worden hier vaak ingezet.
- **Cloudbeveiliging:** Met het toenemende gebruik van van cloud computing platformen, zijn technologieën nodig om gegevens en applicaties in de cloud te beschermen tegen aanvallen en datalekken. Encryptie, identity and access management (IAM), en cloud security posture management (CSPM) zijn enkele voorbeelden van cloudbeveiligingstechnologieën.
- **Gegevensbescherming:** Dit omvat het beschermen van gevoelige gegevens tegen ongeautoriseerde toegang, diefstal en manipulatie. Technologieën zoals encryptie, tokenisatie en databeveiligingsoplossingen worden gebruikt om gegevens te beschermen, zowel in rust als in transit.
- **Webbeveiliging:** Dit omvat het beschermen van websites en webapplicaties tegen aanvallen zoals SQL-injecties, cross-site scripting (XSS) en distributed denial-of-service (DDoS) -aanvallen. Web application firewalls (WAF's), content security policies (CSP's) en vulnerability scanners worden hier vaak gebruikt.

10.2.6 Risico's voor nationale veiligheid

Uit het Cybersecuritybeeld Nederland (CSBN) 2023[296] blijkt dat de cybersecuritydreiging voor Nederland onverminderd groot blijft en voortdurend groeit. De geopolitieke spanningen nemen toe onder andere vanwege de Russische oorlog tegen Oekraïne. Deze oorlog heeft geleid tot een opleving van op ontwrichting gerichte cyberaanvallen. Deze digitale dreiging kan abrupt veranderen, bijvoorbeeld bij verdere escalatie van de oorlog, en Nederlandse belangen kunnen worden geraakt.

Het CSBN 2023 benadrukt daarnaast de voortdurende uitdagingen op het gebied van risicobeheersing. Nieuwe Europese wetgeving legt extra eisen op voor digitale veiligheid, terwijl de verzekerbaarheid van digitale risico's onder druk staat, vanwege de toename van digitale risico's en de mogelijkheid van cyberincidenten om uit te groeien tot een systemische crisis. Daarnaast benadrukken de onderlinge verwevenheid binnen het bredere ecosysteem en de gelegenheidsstructuur voor cyberaanvallen de complexiteit van de digitale dreiging.

Het verkleinen van de scheefgroei tussen digitale dreiging en weerbaarheid blijft een grote uitdaging. Deze spanning is nadrukkelijk aanwezig op het gebied van OT. OT is een kwetsbare bouwsteen voor vitale processen, doordat deze een centrale rol speelt in het aansturen, monitoren en beheren van fysieke processen van organisaties. Daarmee fungeert OT als motor van vitale sectoren en vereist voortdurende aandacht voor cybersecurity. Tot slot vragen de bijzondere kenmerken van digitale risico's om een bredere benadering van risicobeheersing, waarbij digitale risico's worden beschouwd als integraal onderdeel van de nationale veiligheid, zoals ook aangegeven in de recent gepubliceerde 'Cybercheck: ook jij hebt supply chain risico's'.[297]

Voor de Nederlandse cybersecuritymarkt houdt dit in dat verdere investeringen, innovaties en absorptiecapaciteit van cruciaal belang zijn om de onverminderd hoge cyberdreiging het hoofd te kunnen bieden. Integratie van andere technologieën zoals AI kunnen daar een impuls aan geven en de Nederlandse cybersecuritymarkt onderscheiden van het buitenland. Te grote afhankelijkheid van cybersecuritybedrijven uit andere landen kan namelijk op termijn een zorg zijn, bijvoorbeeld in het kader van *vendor lock-in*. Daarnaast is het tekort aan cybersecuritypersoneel een punt van zorg: zonder de beschikbaarheid van voldoende talent zullen organisaties in Nederland (van grote bedrijven en overheidsorganisaties tot het mkb) onvoldoende hun digitale weerbaarheid op orde kunnen krijgen.

10.2.7 SWOT[298]

De Nederlandse cybersecuritysector vertoont een aantal sterke kanten met in 2020 een omzet van €16 miljard. De sector voldoet goed aan de binnenlandse vraag naar diensten en heeft vooralsnog een solide kennisbasis in cryptografisch onderzoek. Echter, er is een gebrek aan cybersecurity R&D-activiteiten en beperkte opschaal- en exportmogelijkheden van diensten wat leidt tot meer afhankelijkheid van buitenlandse leveranciers, wat de slagkracht van Nederlandse bedrijven beperkt. Kansen voor de Nederlandse cybersecuritysector omvatten een diepere integratie van wetenschappelijke en toegepaste kennis in bedrijfs-R&D, zoals over toepassing van AI voor cybersecurity en PQC. Uitdagingen waar bedrijven rekening mee moeten houden zijn bijvoorbeeld het tekort aan cybersecuritytalent, een beperkte bewustwording van het belang van cybersecurity bij afnemende partijen, belemmeringen op de Europese interne markt, overnames van innovatieve midden en kleinbedrijven (mkb) door buitenlandse partijen en gebrek aan durfkapitaal en overheidsinvesteringen.

Sterkte	Zwakte
• Sterke kennisbasis cybersecuritytoepassingen (AI, PQC) • Sterke groei cybersecuritysector	• Versnipperd onderzoeksveld en weinig cyber R&D • Te weinig aandacht innovatie • Afhankelijkheid buitenlandse partijen (big tech)
Kans	**Bedreiging**
• Groeiende mogelijkheden van AI • Stevig en duurzame concurrentiepositie groeisectoren • Groei van verdienvermogen	• Krapte cybersecurityarbeidsmarkt • Gebrek durfkapitaal en overheidsinvesteringen • Overnames start-ups door grote buitenlandse partijen

Bron: Ronde tafels en onderzoek Dialogic (De economische kansen van de cybersecuritysector, 2023)

10.3 Ambitie

10.3.1 Hoofdambitie

In 2035 heeft Nederland een concurrerende cybersecuritymarkt met voldoende talent ontwikkeld, en middels een multidisciplinaire aanpak een internationaal leidende positie in innovatieve cybersecuritytechnologieën verworven. Deze technologieën leveren een essentiële bijdrage aan de beveiliging van infrastructuren en IT- en OT-netwerken, de transitie naar post-quantum cryptografie en meer automatische detectie en verdediging door inzet van AI. Middels onderzoek en meer publiek-private samenwerking, op nationaal en internationaal niveau, is de kennispositie versterkt en is kennisvalorisatie toegenomen. Hiermee is cybersecurity een geïntegreerd onderdeel van de Nederlandse sectoren door het toepassen van *security-by-design*, *security-by-default*, *cybersecurity in de toeleveringsketen* van organisaties en bedrijfsketens. Dit alles draagt bij aan een digitaal veilig, weerbaar, autonoom en welvarend Nederland.

10.3.2 Deelambities

De hoofdambitie wordt uiteengezet aan de hand van de uitdagingen uit de kabinetsstrategie "Versterken van onderzoeks- & innovatie ecosystemen"[299] die relevant zijn voor cybersecuritytechnologieën. Per uitdaging wordt een deelambitie geformuleerd die bijdraagt aan de hoofdambitie.

Lange termijn blik en samenhang bij investeringen in onderzoek en innovatie

In Nederland wordt nog onvoldoende geïnvesteerd in onderzoek en innovatie rondom cybersecurity. Het volume van investeringsprojecten vanuit private en publieke partijen is nog te klein. Hiervoor is meer samenhang tussen onderzoeks- en innovatieactiviteiten, en goede samenwerking tussen alle daarbij betrokken partijen cruciaal. Een multidisciplinaire benadering van kennis- en innovatieontwikkeling rondom cybersecurity, waarbij specialisten van andere werkgebieden en sleuteltechnologieën worden betrokken, zorgt voor meer samenhang en innovatieve inzichten en oplossingen. Innovatieve partijen hebben kritieke marktmassa nodig om succesvol te zijn. Als grote afnemer speelt de overheid hier een grote rol in.

Deelambitie: In 2035 is middels een multidisciplinaire aanpak meer samenhang gecreëerd tussen investeringen in cybersecurity en andere disciplines, zoals quantumtechnologie en AI en andere relevante sleuteltechnologieën, maar ook niet-technische disciplines zoals gedragswetenschappen en economie. De overheid is een belangrijke afnemer van deze producten.

Investeringen in onderzoeks- en testfaciliteiten

De onderzoeks- en testfaciliteiten zijn een onmisbaar element van cybersecurityinnovaties: goede faciliteiten maken onderzoek mogelijk en helpen bedrijven bij het oplossen van uitdagingen in de pre-competitieve fase. Voldoende cybersecurity-talent is hierbij een randvoorwaarde. De huidige faciliteiten in het cybersecuritydomein zijn veel gericht op het voldoen aan wet- en regelgeving en het adresseren van cybersecuritydreigingen en -risico's van (sleutel)technologieën, en minder op het gebruikmaken van de kansen van (sleutel)technologieën. Hiervoor is het van belang dat principes zoals security-by-design worden meegenomen in onderzoeks- en testfaciliteiten van andere (sleutel) technologieën. Het delen van data draagt daarnaast ook bij aan goed wetenschappelijk onderzoek.

Deelambitie: In 2035 is cybersecurity (*security-by-design en security-by-default*) een vanzelfsprekend onderdeel van onderzoeks- en testfaciliteiten van verschillende (sleutel)technologieën. Verder heeft Nederland voldoende faciliteiten en de juiste infrastructuur voor cybersecurityonderzoeken, zodat bedrijven en academische onderzoekers gemakkelijker onderzoek kunnen doen en uitdagingen in de pre-competitieve fase kunnen oplossen.

Financiering voor startups en scale-ups: vroege fase financiering en doorgroei

Vergeleken met de VS, waar de meest toonaangevende cybersecuritybedrijven gevestigd zijn, wordt in de EU relatief weinig geïnvesteerd in innovatieve cybersecurity startups en scale-ups.[300] Wanneer het gaat om investeringen die benodigd zijn voor opschaling van cybersecurity bedrijven wordt vaak uitgeweken naar het buitenland.[301] Veelbelovende cybersecurity startups in Nederland worden snel overgenomen door buitenlandse partijen, waardoor de sector zich beperkt ontwikkelt.[302]

Deelambitie: In 2035 is de kennis bij Nederlandse investeerders ten aanzien van cybersecurity vergroot, is er voldoende toegang tot durfkapitaal voor cybersecurity bedrijven, worden bestaande financieringsinstrumentaria nog steeds effectief ingezet en zijn er geen belemmeringen op de interne markt voor duurzame groei van de cybersecuritysector. Cybersecuritybedrijven hebben een optimaal groeiperspectief en er vinden meer lange-termijn investeringen plaats.

Betrekken van afnemers bij onderzoek en innovatie en marktcreatie

Het betrekken van afnemers bij onderzoek, innovatie en marktcreatie is belangrijk voor succesvolle innovatieontwikkeling van cybersecuritytechnologieën. De huidige en potentieel afnemende markt is nog niet voldoende betrokken bij cybersecurity-onderzoeksprojecten. In de huidige situatie werkt wetenschap/onderzoek nog onvoldoende samen met het (cybersecurity-)bedrijfsleven. Er vindt hiermee onvoldoende valorisatie plaats: wetenschappelijke onderzoeken en kennis worden niet omgezet in producten die aansluiten bij de behoeften en mogelijkheden van de markt. Dit komt doordat het mkb onvoldoende tijd heeft om te werken aan lange termijnuitdagingen rondom cybersecurityinnovatie. Tevens hebben belemmeringen op het gebied van datadelen negatieve gevolgen voor de kwaliteit en mogelijkheden van onderzoek.

Deelambitie: In 2035 worden meer Nederlandse marktpartijen betrokken bij onderzoek en innovatie van cybersecuritytechnologieën en worden oplossingen meer vraaggestuurd ontwikkeld, bijvoorbeeld door promovendi tijdelijk te laten werken in het bedrijfsleven en bedrijfsexperts in te zetten in onderzoeksprojecten. Middels een multidisciplinaire aanpak zijn cybersecurityprincipes *security-by-design* en *security-by-default* een voorwaarde voor onderzoeksprojecten van andere sleuteltechnologieën en zal er ook gekeken worden naar andere mogelijkheden voor de invulling van onderzoeksprojecten en financiering.

Vaardigheden en absorptiecapaciteit in het mkb

Door gebrek aan vaardigheden en kennis, en de krapte op de arbeidsmarkt is het voor het mkb een uitdaging om de juiste cybersecurity-maatregelen te nemen. Hiermee blijft het lastig voor het mkb om nieuwe innovaties rondom cybersecurity toe te passen. Daarnaast zijn cybersecurityproducten en -diensten niet goedkoop en is de vraag vanuit het mkb naar deze producten en diensten klein en het investeringsbereidheid laag.

Deelambitie: In 2035 vindt meer samenwerking plaats tussen het mkb, de grote bedrijven, overheden en kennisinstellingen om kennis en vaardigheden in het mkb te vergroten. Daarnaast worden grote bedrijven gestimuleerd om kennis te delen met mkb'ers. Tevens wordt gewerkt aan de schaalbaarheid van cybersecuritytechnologieën zodat er meer betaalbare cybersecurityproducten en -diensten beschikbaar zijn voor het brede mkb (bijv. door het toepassen van AI voor automatisering).

Ontwikkelen, aantrekken en behoud van (top)talent

Het aantrekken van het brede cybersecuritytalent – van technische specialisten tot mensen uit alfa en gamma-disciplines – is een grote uitdaging, mede door de grote arbeidskrapte en concurrentie met internationale bedrijven. Het is ook ingewikkeld om het talent te behouden: voor veel overheden, bedrijven en onderwijsinstellingen is het niet makkelijk om te concurreren met grote bedrijven uit het buitenland die veel middelen hebben. Ook zouden de onderwijs- en arbeidsmarktbehoeften beter op elkaar moeten worden aangesloten.

Deelambitie: In 2035 zijn de vraag en aanbod in het cybersecurity onderwijs en arbeidsmarkt beter op elkaar aangesloten en is de keten van onderwijs naar arbeidsmarkt versterkt. Dit draagt bij aan adequate onderwijsvorming en onderzoek, het verbeteren van de startpositie van afgestudeerd talent, laagdrempelig bij- en omscholingstrajecten en het stimuleren van Leven Lang Ontwikkelen trajecten.

Betrekken innovatie bij de ontwikkeling van wet- en regelgeving

De wet- en regelgeving rondom cybersecurity biedt kansen doordat organisaties verplicht zijn meer cybersecuritymaatregelen te nemen die zullen leiden tot de afname van meer cybersecurityproducten en -diensten. Dit zorgt tegelijkertijd voor dat afnemende organisaties enkel bezig zijn om de verplichte middelen in huis te hebben, zonder de eigen risico's goed te begrijpen. Daarnaast gaan technologische ontwikkelingen snel en worden wet- en regelgeving ingehaald door de werkelijkheid.

Deelambitie: In 2035 worden innovatiepartners in een vroeg stadium betrokken bij de ontwikkeling en uitvoering van wet- en regelgeving, zodat het belang van cybersecurityinnovatie hierin wordt meegenomen.

Geraadpleegde deskundigen

Deelnemers Ronde tafel 1

- Bibi van den Berg – Universiteit Leiden, ACCSS
- Roland van Rijswijk-Deij – Universiteit Twente
- Jelle Niemantsverdriet – Microsoft
- Berry Vetjens – TNO
- Liesbeth Holterman – Cyberveilig Nederland
- Vincent Ossewaarde – Fortytwo
- Nort van Schayik – Compumatica
- Frits Grotenhuis – Topsector ICT
- Pieter Jansen – Darktrace
- Eddy Boot – dcypher

Deelnemers Ronde tafel 2

- Jelmer Schreuder – NLdigital
- Roland van Rijswijk-Deij – Universiteit Twente
- Jelle Niemantsverdriet – Microsoft
- Berry Vetjens – TNO
- Tim de Wolf – Technolution
- Christo Butcher – FOX-IT
- Vincent Ossewaarde – Fortytwo
- Nort van Schayik – Compumatica

Overige bijdrage

- Erik de Jong – Thales

Bijlage – Procesbeschrijving aanpak prioritaire sleuteltechnologieën

Wat bepaalt een prioritaire sleuteltechnologie?

De uitdaging is om juist die technologieën te selecteren die voor Nederland de grootste potentie hebben. De keuze voor prioritaire technologieën is gebaseerd op een combinatie van kwalitatieve en kwantitatieve data over de huidige positie van Nederland op elke sleuteltechnologie en de verwachte impact van elke technologie op nationale veiligheid, (huidig of toekomstig) verdienvermogen en de maatschappelijke uitdagingen. Concreet zijn de volgende aspecten meegenomen:

- Welke sleuteltechnologieën leveren een belangrijke bijdrage aan het huidige en/of toekomstig economisch verdienvermogen van Nederland?
- Welke sleuteltechnologieën zijn essentieel om maatschappelijke uitdagingen aan te gaan?
- Welke sleuteltechnologieën dragen bij aan de nationale veiligheid?
- Welke sleuteltechnologieën bouwen voort op bestaande sterktes in wetenschap en technologie, R&D inzet en ecosystemen in Nederland?

De afgelopen maanden hebben we in samenwerking met verschillende partners (TNO, NWO, Elsevier en RVO) voor alle 44 sleuteltechnologieën gegevens verzameld en geanalyseerd. Vervolgens zijn de inzichten uit deze analyse getoetst bij een divers en groot aantal experts en stakeholders uit de wetenschap, het bedrijfsleven en investeerders.

Definitiefase, september – december 2022

Als startpunt van het proces is een basislijst met sleuteltechnologieën opgesteld. Een vergelijkbare lijst werd in 2017 al opgesteld in het kader van het Missiegedreven Innovatiebeleid, maar om er voor te zorgen dat actuele ontwikkelingen in wetenschap en technologie zijn meegenomen, is deze lijst herzien. Dit proces is begeleid door TNO en NWO en heeft geleid tot het rapport "Herijking sleuteltechnologieën", met een herziene lijst van 44 sleuteltechnologieën onderverdeeld in 8 categorieën. Voor het opstellen van deze lijst zijn ongeveer 60 experts, met name uit wetenschap en bedrijfsleven gesproken, in meerdere consultaties. Het advies van TNO en NWO is aangenomen door het kern- en themateam sleuteltechnologieën, die EZK adviseert op sleuteltechnologiegebied, en door EZK zelf.

Keuzeproces NTS

Definitie	Data-analyse	Expert-input	Selectie shortlist
September-december 2022 • Definiëren van 44 sleuteltechnologieën: technologieën met grote impact op economie, maatschappij en wetenschap. • Stakeholderconsulatie met +/- 60 experts in meerdere sessies.	Januari-21 juni 2023 • Concept groeimarkten analyse • Analyse maatschappelijke uitdagingen/sleuteltech-nologieën • AMVB wet Vifo en lijst sensitieve technologieën • Elsevier studie naar patenten en publicaties, Horizon studie	21 juni 2023 • Expert input over voor-gestelde prioritieiten en langs de vier elementen van ons afwegingskader	16 augustus 2023 • Shortlist met 9 prioriteiten • We halen reflecties op bij stakeholders als kennis-coalitie, 4TU, technologie-commissie om eventuele grote omissies te adresseren

Data-analyses, januari – juni 2023

Voor de 44 sleuteltechnologieën heeft EZK analyses uitgevoerd om in kaart te brengen hoe de verschillende technologieën scoren op de verscheidene facetten van het afwegingskader. Per facet van het afwegingskader heeft EZK één of meerdere databronnen gehanteerd.

- **Nederlands verdienvermogen.** Hierbij is gebruik gemaakt van een conceptresultaat van de Groeimarktenstudie. In de Groeimarktenstudie wordt in kaart gebracht waar in de toekomst de meeste waardecreatie wordt verwacht, gebaseerd op internationale markttrends, en gekoppeld aan Nederlandse sterkte punten. EZK heeft hiervoor een voorlopige, niet-uitputtende lijst van twintig potentiële groeimarkten geïdentificeerd, gericht op veelal technologische sectoren die producten produceren met een hoge toegevoegde waarde en een focus op export. Dit zijn markt(segmenten) waar in de toekomst de meeste waardecreatie wordt verwacht, én waar kansen liggen om specifiek het Nederlands verdienvermogen te versterken.

- **Maatschappelijke uitdagingen.** Nederland kent een missiegedreven innovatiebeleid met 5 centrale missies en 21 onderliggende missies. EZK heeft geanalyseerd welke sleuteltechnologieën van het grootste belang zijn voor het behalen van deze missies. Een analyse is gemaakt naar de mate waarin sleuteltechnologieën de afgelopen jaren zijn toegepast in projecten voor een bepaalde missie, gebruikmakend van projecten uit de MIT-regeling, de regeling PPS-toeslag Onderzoek en Innovatie, en SBIR-calls. Hierna is voor elke missie bij de zogenaamde missietrekker (verantwoordelijke voor uitvoering van de missie) gevraagd welke sleuteltechnologieën van essentieel belang zijn voor de uitvoering van de missie.

- **Nationale veiligheid.** In de algemene maatregel van bestuur (AMVB) ten aanzien van het toepassingsbereik van de Wet veiligheidstoets investeringen, fusies en overnames (VIFO) is een aantal technologieën gelabeld als "zeer sensitief" met het oog op nationale veiligheid. Dit label is gegeven wanneer sprake is van grote ketenafhankelijkheid van deze technologie voor het gehele technologiegebied (of zelfs daarbuiten), grote mate van uniciteit en moeilijke reproduceerbaarheid, directe (geavanceerde) militaire of veiligheidstoepassingen, internationale eisen ten aanzien van de bescherming en beveiliging van deze technologie.

- **Huidige positie.** Om een beeld te geven welke sleuteltechnologieën voortbouwen op al aanwezige kennissterktes, R&D-inzet en ecosystemen in Nederland, is in de eerste plaats door Elsevier een analyse gedaan van de publicatie-positie en patent-positie van Nederland ten opzichte van andere landen. Hierbij zijn Field-Weighted Citation Impact (FWCI) scores en Relative Activity Index (RAI) -scores voor publicaties berekend en de Patent Asset Index (PAI) voor patenten. Vervolgens zijn deze uitkomsten vergeleken met analyses die specifiek inzicht geven in de bestaande innovatie-activiteiten van bedrijven en kennisinstellingen. Dit omvat onder andere een analyse van WBSO-toekenningen, de financiële prestaties van Nederlandse consortia in Horizon-2020, en de productiviteit van aanpalende SBI-sectoren.

Opgemerkt dient te worden dat hoewel deze analyses valide en bruikbaar zijn, deze op zichzelf geen sluitend antwoord kunnen geven op de vraag welke technologie het meest bijdraagt aan een gegeven element van het afwegingskader. Zo geeft FWCI en RAI een bruikbaar beeld van de wetenschappelijke positie op technologieën, maar ontstaat hier geen vergelijkend beeld van de kennis en kunde van bedrijfsleven op een gegeven technologie. Bij het aspect "Nationale veiligheid" geldt dat het denken nog volop in ontwikkeling is, en er geen sluitend antwoord gegeven kon worden welke technologieën hier het meest in bijdragen. In algemene zin geldt dat de beschikbaarheid van data op het niveau van 44 sleuteltechnologieën een uitdaging vormt.

Expert input, juni 2023

Om de hierboven genoemde tekortkomingen van de data-analyses aan te vullen, is op 21 juni een grote stakeholderbijeenkomst met ongeveer 60 experts georganiseerd. In deze bijeenkomst werden de experts gevraagd te reflecteren op de uitkomsten van de data-analyses, en hierbij hun op- of aanmerkingen hierover te delen. Experts kregen de mogelijkheid om aan te geven welke uitkomsten van de data-analyse fase zij herkenden, welke uitkomsten zij misten en welke vragen nog onbeantwoord bleven. Deze input is gebundeld door EZK en gebruikt ter aanscherping van de uitkomsten van de eerdere fase.

Selectie shortlist, augustus 2023

Op basis van de feedback van experts en de data-analyses heeft EZK een shortlist opgesteld met 9 te prioriteren sleuteltechnologieën. Het advies is opgesteld door het projectteam van de NTS, met inachtneming van de volgende uitgangspunten:

- Een prioritaire sleuteltechnologie heeft (potentieel):
  - een belangrijke bijdrage aan het toekomstig verdienvermogen van Nederland;
  - een essentiële rol bij het oplossen van de maatschappelijke uitdagingen;
  - belang voor de nationale veiligheid;
  - in Nederland reeds een sterke positie.
    Bovenstaande wordt zowel ondersteund door kwantitatieve informatie als herkend door experts en stakeholders uit de wetenschap, het bedrijfsleven en investeerders.
- Per sleuteltechnologie zijn verschillende dimensies in kaart gebracht. Bij de uiteindelijke afweging om een sleuteltechnologie wel of niet op te nemen in de NTS is geen formule gebruikt die de verschillende dimensies samenbrengt, maar een kwalitatieve afweging van diverse informatiebronnen.

Hierbij geldt het volgende:
  - Een sleuteltechnologie die hoger scoort op de verschillende dimensies heeft een grotere kans om opgenomen te worden in de NTS.
  - Ook als een sleuteltechnologie niet hoog scoort op alle vier dimensies kan alsnog overwogen worden om deze technologie op te nemen in de NTS indien deze voor één of meerdere dimensies een substantiële bijdrage levert.
  - Enige spreiding over verschillende technologieclusters wordt nagestreefd.
  - Enige brede herkenning van geprioriteerde sleuteltechnologieën tijdens de ronde tafel gesprekken is vereist.
- De geprioriteerde sleuteltechnologieën zijn vanuit een positieve benadering gekozen. Dit betekent dat gekeken is naar welke sleuteltechnologieën wel prioriteit zouden moeten krijgen en niet zozeer welke sleuteltechnologieën geen prioriteit zouden moeten krijgen. We zijn dan ook vrij zeker dat de geprioriteerde technologieën van groot belang zijn voor Nederland, zonder uit te sluiten dat andere technologieën ook relevant kunnen zijn.
- We erkennen dat sleuteltechnologieën onderling verbonden kunnen zijn. Daarom zal is bij de agendavorming gezocht naar onderliggende technologieën ter ondersteuning van de geprioriteerde technologieën.

Bronnen

1 McKinsey Global Institute (2022): On a cusp of a new era
2 Met name Lithografie. Zie Chris Miller (2022) – Chip War, The fight for the world's most critical technology
3 OECD (2023) – STI Outlook
4 Kamerstuk 33009, nr. 131 – Perspectief op de Nederlandse economie: Innovatief, duurzaam, sterk en welvarend
5 European Innovation Scoreboard (2023)
6 Nederland staat op de vijfde plaats in de Global Talent Competitiveness Index (2023)
7 Global Innovation Index (2023) – Nederland neemt de vijfde plek in op R&D-samenwerking tussen universiteiten en het bedrijfsleven
8 Met name Lithografie. Zie Chris Miller (2022) – Chip War, The fight for the world's most critical technology
9 Elsevier (2023) – Quantitative analysis of Dutch research and innovation on key technologies
10 Rathenau Instituut (2020) – Balans in de wetenschap.
11 Elsevier (2023) – Quantitative analysis of Dutch research and innovation on key technologies
12 Rathenau Instituut (2023) - R&D investeringen naar wetenschapsgebied
13 OECD (2023) - Research and Development Statistics (RDS)
14 Global Innovation Index (2023); Roland Berger (2021) – Valorisatie Ontketend
15 Dealroom (2023) - The European Deep Tech Report. Nederland neemt een zesde plek in termen van gecreëerde waarde uit universiteiten, ver achter de koplopers zoals VK, Zwitserland, Duitsland. Ook staat geen enkele NL universiteit in de EU top-20 in termen van gecreëerde waarde.
16 Kamerstuk 33009, nr. 567 – Strategie Durfkapitaal
17 Kamerstuk 29544, nr. 1173 – Inzet op arbeidsmarktkrapte in de klimaat- en digitale transitie: Het Actieplan Groene en Digitale Banen.
18 Global Innovation Index (2023); OECD (2023) – Education at a Glance; Rathenau Instituut (2023) - Bèta- en techniekwetenschap in beweging | Rathenau Instituut
19 Demografische ontwikkelingen: meer doen met minder mensen (werk.nl)
20 Rathenau Instituut (2023) – Wetenschap in Cijfers; Cijfers over universitair personeel WOPI.
21 In juli 2023 is een wetsvoorstel in internetconsultatie gebracht waarin onder andere wordt geregeld dat instemming van de minister benodigd is voor het verzorgen van een opleiding in een andere taal dan het Nederlands. Toestemming voor anderstaligheid kan onder andere worden verkregen voor onderwijsprogramma's die opleiden voor vakgebieden waarin uitzonderlijk grote tekorten zijn en waarvoor beheersing van het Nederlands voor een deugdelijke beroepsuitoefening niet noodzakelijk is.
22 Kamerstuk 32852, nr. 24 – Grondstoffenstrategie
23 Kamerstuk 34682, nr. 178 – Programma Ruimte voor Economie en kamerstuk 33009, nr. 12 – Innovatiebeleid.
24 SEO (2023) - Arbeidsmarktkrapte. Een integraal beeld van aard, omvang en oplossingen.
25 ESB (2023) - Van een gasintensieve naar een duurzame economie.
26 Kamerstuk 29023, nr. 451 – Nieuwe maatregelen netcongestie.
27 Kamerstuk 30821, nr. 178, bijlage.
28 Kamerstuk 35982, nr. 9 – Open Strategische Autonomie en Kamerstuk 36259, nr. 21 – Agenda Digitale Open Strategische Autonomie
29 McKinsey Global Institute (2022) - On a cusp of a new era
30 HCSS (2022) - Securing Critical minerals for critical sectors
31 European Commission (2023) - The global position of the EU in complex technologies.
32 McKinsey (2022) – Securing Europe's competitiveness: addressing its technology gap.
33 Elsevier (2023) – Quantitative analysis of Dutch research and innovation on key technologies.
34 OECD (2023) – STI Outlook
35 European Commision (2023) - The global position of the EU in complex technologies; Australian Strategic Policy Institute (2023) - Critical Technology Tracker.
36 Kamerstuk 35207-61 – Ontwikkelingen Chinabeleid: een verschuiving van de balans.
37 TNO (2023) – Paper high-tech- en maakindustrie.
38 https://www.gov.uk/government/publications/uk-international-technology-strategy/the-uks-international-technology-strategy; https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/02/02-2022-Critical-and-Emerging-Technologies-List-Update.pdf
39 Kamerstuk 33009, nr. 131 – Perspectief op de Nederlandse economie: Innovatief, duurzaam, sterk en welvarend
40 Kamerstuk 33009, nr. 131 – Perspectief op de Nederlandse economie: Innovatief, duurzaam, sterk en welvarend
41 Kamerstuk 32637, nr. 567 – Kamerbrief over startups en scale-ups als motor voor transities en groei
42 CPB (2023) – Kwantificering van R&D effecten
43 TNO (2018) – De potentiële bijdrage van technologie aan maatschappelijke uitdagingen.
44 Kamerstuk 32813, nr. 1280 – Kamerbrief concept-Nationaal plan energiesysteem 2050
45 OECD (2023) – STI Outlook .
46 WRR (2021) – Opgave AI – De nieuwe systeemtechnologie
47 Kamerstuk 33009, nr. 117 – Innovatie en impact
48 AWTI (2020) – Krachtiger kiezen voor sleuteltechnologieën
49 COM (2022) 8854 Final. Establishing a European assessment framework for 'safe and sustainable by design' chemicals and materials.
50 Informatiekaart 'Safe and Sustainable by Design' van chemische stoffen en materialen | Kaart | Rijksoverheid.nl
51 AWTI (2022) – Grenzeloos onderzoeken
52 Technopolis (2019) - Publieke investeringen in sleuteltechnologieën; KNAW (2018) - Wederzijdse versterking; CBS (2022) - R&D Uitgaven ruim 18 miljard euro in 2022
53 Kamerstuk 33009, nr. 131 – Perspectief op de Nederlandse economie: Innovatief, duurzaam, sterk en welvarend
54 Kamerstuk 31288, nr. 964 – Hoger Onderwijs-, Onderzoek- en Wetenschapsbeleid.
55 Kamerstuk 33009, nr. 117 – Innovatie en impact
56 Kamerstuk 33009, nr. 117 – Bijlage: Actieplan Innovatie en Valorisatie
57 De stap om kennis uit publiek gefinancierd onderzoek toe te passen.
58 Kamerstuk 32637, nr. 513 – Strategische agenda voor het ondernemingsklimaat in Nederland
59 Kamerstuk 29826, nr. 147 – Het verschil maken met strategisch en groen industriebeleid; Kamerstuk 31125, nr. 122 – Defensie Industrie Strategie.
60 Kamerstuk 32637, nr. 567 – Kamerbrief over startups en scale-ups als motor voor transities en groei
61 Kamerstuk 26643, nr. 842 – Hoofdlijnen beleid voor digitalisering
62 Zie bijvoorbeeld Kamerstuk 26643, nr. 940 – Werkagenda Waardengedreven Digitalisering; Kamerstuk 26642, nr. 925 – De Nederlandse Cybersecurity Strategie; Kamerstuk 26643, nr. 941 – Strategie Digitale Economie; en Kamerstuk 26643, nr. 1055 – Agenda 'Coalities voor de digitale samenleving'
63 TNO en NWO (2023) - Herijking sleuteltechnologieën 2023
64 Kamerstuk 33009, nr. 120 – Herijkte missies van het missiegedreven innovatiebeleid
65 De supplementaire agenda voor cybersecurity volgt op een later moment
66 Kamerstuk 33009, nr. 96 – Versterken van onderzoeks- en innovatie-ecosystemen.
67 Zie bijlage
68 Sleuteltechnologieën is een van de kaders waarmee verwezen wordt naar technologiegebieden met een potentieel grote impact op het oplossen van maatschappelijke uitdagingen, het versterken van het concurrentievermogen en de vernieuwing van de economie. Naast sleuteltechnologieën bestaan, onder andere, ook de begrippen Key Enabling Technolgies (KETs), Future Emerging Technologies (FET), Critical Technologies. Internationaal is er geen geaccepteerd kader dat algemeen gebruikt wordt.
69 Kamerstuk 22112, nr. 3826 – Appreciatie van de aanbeveling van de Europese Commissie op een aantal kritieke technologiegebieden.
70 Kamerstuk 36259, nr. 21 – Agenda Digitale Open Strategische Autonomie
71 Kamerstuk 22112, nr. 3826 - Appreciatie van de aanbeveling van de Europese Commissie op een aantal kritieke technologiegebieden
72 EC 2023 - Commission recommends carrying out risk assessments on four critical technology areas: advanced semiconductors, artificial intelligence, quantum, biotechnologies
73 Geavanceerde connectiviteit, navigatie en digitale technologieën; geavanceerde sensor technologieën; technologieën; ruimte- en voortstuwingstechnologieën; energietechnologieën; robotica en autonome systemen; en geavanceerde materialen, productie- en recyclingtechnologieën.
74 EC (2023) - EU budget: Commission proposes Strategic Technologies for Europe Platform (STEP) to support European leadership on critical technologies
75 Bijvoorbeeld InvestEU, InnovationFund, Horizon Europe, EU4Health, Digital Europe Programme, European Defence Fund, Recovery and Resilience Facility.
76 TNO en NWO (2023) - Herijking sleuteltechnologieën 2023
77 Kamerstuk 33009, nr. 103 – Kabinetsstrategie 'Versterken van onderzoeks- en innovatie-ecosystemen'
78 TNO en NWO (2023) - Herijking sleuteltechnologieën 2023
79 https://spie.org/documents/Industry-Resources/Information/Industry-Report/Industry-Report-2022.pdf
80 Photonics Market Size, Share, Growth | Forecast Analysis, 2028 (fortunebusinessinsights.com)
81 About | Optica
82 https://spie.org/documents/Industry-Resources/Information/Industry-Report/Industry-Report-2022.pdf
83 https://spie.org/documents/Industry-Resources/Information/Industry-Report/Industry-Report-2022.pdf
84 Photonics Market Size, Share, Growth | Forecast Analysis, 2028 (fortunebusinessinsights.com)
85 Photonics21 – A Key Enabling Technology for Europe
86 Home – EPIC Association (epic-assoc.com)
87 home – PhotonHUB : PhotonHUB
88 European Chips Act | Shaping Europe's digital future (europa.eu)
89 Chips Joint Undertaking (europa.eu)
90 EZK (2023) – Relatieve positie Nederland – EU sleuteltechnologieën (intern document)
91 SPIE Photonics West
92 Photonics21 – A Key Enabling Technology for Europe
93 LASER World of PHOTONICS 2023 | Messe München (messe-muenchen.de)
94 Integrated Photonics Systems Roadmap – International (photonicsmanufacturing.org)
95 AIM Photonics
96 LiFi.co | Revolutionary Wireless Communication Technology.
97 Fotonica (hollandhightech.nl)
98 Lighting (hollandhightech.nl)
99 Photondelta | Projecten ronde 2 | Nationaal Groeifonds
100 Bits&Chips (2023) - Twente foundry backed by €140M public funding
101 SYNOPTIC OPTICS | NWO
102 NWO Perspective program Optical Wireless Superhighways (tue.nl)
103 Freeform Scattering Optics – Initiative by 3 Dutch Universities
104 Lensless Imaging of 3D Nanostructures with Soft X-Rays (LINX) | NWO
105 Semiconductor Equipment (hollandhightech.nl)
106 EUV Generation & Imaging – ARCNL
107 EUV lithography systems – Products | ASML
108 Kamerstuk 33009, nr. 64 - Nationale Agenda Fotonica en investeringsplan PhotonDelta
109 Delta Diagnostics | Enabling more. For Less.
110 TNO presents advanced retinal camera for early detection of eye diseas
111 Kamerstuk 33009, nr. 64 - Nationale Agenda Fotonica en investeringsplan PhotonDelta
112 TNO en NWO (2023) - Herijking sleuteltechnologieën 2023
113 Kamerstuk 33009, nr. 64 - Nationale Agenda Fotonica en investeringsplan PhotonDelta
114 Wereldwijde R&D hub en Vlaamse innovatiemotor | imec Vlaanderen
115 Staat voor "Manufacturing Readiness Levels" - zie bijv. dodmrl.com/MRL_Deskbook_2022__20221001_Final.pdf
116 McKinsey & Company (2023) - Quantum technology monitor april 2023
117 Stichting Toekomstbeeld der Techniek (2021) - Technologiemonitor 2020 Quantumtechnologie
118 McKinsey & Company (2023) - Quantum technology monitor april 2023
119 Quantum Delta NL (2022) - The Netherlands, France and Germany intend to join forces to put Europe ahead in the quantum tech race
120 Quantum Delta NL (2023) - Quantum Delta NL Awarded €60 million by National Growth Fund for additional international programme
121 Joint Statement of the United States of America and the Netherlands on Cooperation in Quantum Information Science and Technology – United States Department of State
122 Homepage of Quantum Flagship | Quantum Flagship (qt.eu)
123 https://quantera.eu/
124 QuIC members – QuIC (euroquic.org)
125 Chinese Quantum Companies and National Strategy 2023 (thequantuminsider.com)
126 Op basis van de getallen van: McKinsey & Company (2023) - Quantum technology monitor april 2023
127 An Assessment of the U.S. and Chinese Industrial Bases in Quantum Technology | RAND
128 3 questions to Ulrich Mans about QDNL's white paper | Quantum Delta NL
129 White Paper: Mapping the Supply Chains for Quantum Communication | Quantum Delta NL
130 An EU approach to enhance economic security (europa.eu)
131 Chinese Quantum Companies and National Strategy 2023 (thequantuminsider.com)
132 All Member States now committed to building an EU quantum communication infrastructure
133 National Security Agency/Central Security Service > Cybersecurity > Quantum Key Distribution (QKD) and Quantum Cryptography QC (nsa.gov)
134 National Security Agency/Central Security Service > Cybersecurity > Quantum Key Distribution (QKD) and Quantum Cryptography QC (nsa.gov)
135 quantum-technology-monitor-april-2023.pdf (mckinsey.com)
136 AQuRA – Home
137 Australian Strategic Policy Institute (2023) - Critical Technology Tracker
138 McKinsey & Company (2023) - Quantum technology monitor april 2023
139 Kamerstuk 29 338, nr. 216 -Kabinetsreactie Nationale Agenda Quantum Technologie
140 Startup/Private Companies – Quantum Computing Report (niet compleet)
141 McKinsey & Company (2023) - Quantum technology monitor april 2023

142 Hiervoor zijn naar schatting minimaal 4097 perfecte qubits voor nodig, wat naar verwachting nog velen (tientallen) jaren zal kosten, zie Estimating the Energy Requirements to Operate a Cryptanalytically Relevant Quantum Computer | RAND
143 Elsevier (2023) – Quantitative analysis of Dutch research and innovation on key technologies
144 Bioplastics Market Share, Growth & In -depth Analysis [2030] (fortunebusinessinsights.com)
145 Bioplastics Market Size, Share & Growth Analysis Report, 2030 (grandviewresearch.com)
146 TRL staat voor Technology Readiness Level. De genoemde TRL niveaus zijn een indicatie en een range.
147 Hierbij bedoelen we de-polymerisatie van plastics
148 Via Europese Verordening Overbrenging Afvalstoffen
149 Deze fabrieken kunnen afval gasstromen afkomstig uit de staalindustrie verwerken, nog niet van afvalverbrandingsinstallaties
150 EBN-Infographic-2023-energie-in-cijfers-A4.pdf (cicwp.nl)
151 Kamerstuk 33009, nr. 96 – Versterken van onderzoeks- en innovatie-ecosystemen.
152 De Nederlandse overheid werkt momenteel aan een nationale circulaire plastic norm, waarbij er een verplichting wordt uitgewerkt om 25-30% gerecycled of biogebaseerd plastic toe te passen Kamerbrief met toelichting op circulaire klimaatmaatregelen | Kamerstuk | Rijksoverheid.nl
153 McKinsey & Company (2020) - The Bio Revolution
154 European Commission proposes loosening rules gene edited plants, Science, 7 juli 2023
155 TNO en NWO (2023) - Herijking sleuteltechnologieën 2023
156 In 2003 is het Human Genome Project al voltooid, waardoor grootschalige genoomsequencing mogelijk is
157 Cell & Gene Therapy Companies in Europe (necstgen.com)
158 Dutch stem cell biotech Neuroplast secures € 10 million (US$ 11.5 million) in Series B funding to further advance its transformative stem cell therapy for Traumatic Spinal Cord Injury (prnewswire.com)
159 Bristol Myers Squibb Invests in Europe with New Cell Therapy Manufacturing Site Planned in the Netherlands
160 PitchBook toont 67 Europese bedrijven in stamcel technologie waarin geïnvesteerd is door angels of VCs sinds 2021. Hiervan zijn 4 bedrijven Nederlands. Dit is een ondergrens: PitchBook toont alleen publiek aangekondigde investeringen en kan bedrijven missen door incorrect gebruik van keywords.
161 The more favorable attitude of the citizens toward GMOs supports a new regulatory framework in the European Union – PMC (nih.gov)
162 MassBio – 2022 Industry Snapshot – http://massbio.org/Industry-Snapshot
163 HollandBio (2020) - Kiezen voor biotech: 7 lessen uit het Vlaamse biotech succesverhaal
164 Q&A: Proposal on New Genomic Techniques (europa.eu)
165 scaling-innovation-how-benelux-could-become-europes-leading-biotech-hub-march 2020.pdf (mckinsey.com)
166 13 universiteiten en 8 academische ziekenhuizen die biotechnologische studies aanbieden, wetenschappelijk onderzoek doen en nieuwe producten en diensten ontwikkelen
167 Hoewel niet alle bedrijven Biomolecular and cell technologies direct toepassen, gebruikt het grootste deel van deze bedrijven deze technologieën in hun R&D processen
168 Sectorinfo – HollandBIO; hoewel niet alle bedrijven biomolecular and cell technologies direct toepassen, gebruikt de overgrote meerderheid deze technologieën in hun R&D processen.
169 Technopolis group (2023) - Desk studie sector Life Sciences and Health
170 Trouw (2018) - Farmaceuten zien Amsterdam dankzij brexit als nieuwe thuisstad
171 European Synthetic Cell Initiative
172 Shoji, Davis, Mummery, Krauss (2023) Global Meta-Analysis of Organoid and Organ-on-Chip Research. Global Meta-Analysis of Organoid and Organ-on-Chip Research – PubMed (nih.gov)
173 Cellulaire agricultuur | Projecten ronde 2 | Nationaal Groeifonds
174 RegMed XB, Oncode-PACT, Holomicrobioom (reservering) (medisch), Biotech Booster (valorisatie), PharmaNL (infrastructuur en Human Capital), CropXR, Cellulaire agricultuur (agrifood) en Biobased Circular, NXTGEN Hightech (industrieel) – Home | Nationaal Groeifonds
175 scaling-innovation-how-benelux-could-become-europes-leading-biotech-hub-march 2020.pdf (mckinsey.com)
176 VNO-NCW (2021) - Toekomstpact Biotechnologie Nederland 2025
177 Cogem, Gezondheidsraad (2023) Trendanalyse Biotechnologie 2023
178 Dialogic (2021) - Het Nederlandse investeringsklimaat
179 Rode biotech in Vlaanderen (hollandbio.nl)
180 Cogem, Gezondheidsraad (2023) - Trendanalyse Biotechnologie 2023
181 Kamerstuk 33009, nr. 117 – Innovatie en impact
182 Kamerstuk 32637, nr. 567 – Kamerbrief over startups en scale-ups als motor voor transities en groei
183 Zie bijvoorbeeld: The Colors of Biotechnology; What do they mean? (azolifesciences.com) en colors of biotechnology: general overview and developments of white, green and blue areas | FEMS Microbiology Letters | Oxford Academic (oup.com)
184 Cogem, Gezondheidsraad (2023) - Trendanalyse Biotechnologie 2023
185 Kamerstuk 33009, nr. 96 – Versterken van onderzoeks- en innovatie-ecosystemen.
186 https://www.tweedekamer.nl/kamerstukken/brieven_regering/detail?id=2023Z20988&did=2023D51534
187 In de Trendanalyse Biotechnologie wordt geadviseerd een rijksbrede visie op te stellen op biotechnologie en worden diverse aanknopingspunten meegegeven voor een dergelijke visie. Het belang van zo'n rijksbrede visie wordt ook voor Biomolecular and cell technologies herkend door de experts die zijn geconsulteerd voor deze agenda. Volgens hen kan een dergelijke visie leiden tot een betere afstemming en focus van de inzet en het omzetten van de kennis in commerciële producten, bedrijven en maatschappelijke impact.
188 In deze visie wordt ook aandacht besteed aan het identificeren en ondersteunen van opkomende technologieën waar Nederland een niche of control point in kan opbouwen. Deze opkomende technologieën kunnen aan de basis staan van innovaties en ecosystemen van (over) morgen. Daarbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan synthetic cell biologie, synthetische biochemie single cell technologieën, epigenomics en/of nieuwe gene editing technologieën.
189 Het gaat daarbij om onderzoeksdisciplines als biomoleculaire technologie en bijvoorbeeld ook bio-informatica, datamining, micro-fluidica en optica, maar ook kennis over wet- en regelgeving, valorisatie en IP. Hierbij is ook aandacht voor het ontsluiten van biobanken en cellijnen voor toegepast en translationeel onderzoek. Deze faciliteiten moeten laagdrempelig en betaalbaar gebruikt kunnen worden door wetenschappers, MKB en start-ups, die niet de beschikking hebben over complexe en dure apparatuur. Door het ontwikkelen van zo'n campus, waar onderzoekers, onderzoeksfaciliteiten, bedrijven en financiers letterlijk bij elkaar aan tafel zitten, wordt zowel het tekort aan onderzoeks- en testfaciliteiten aangepakt en worden gebruikers en financiers betrokken bij innovatie en marktcreatie. Prioriteit voor de te realiseren faciliteiten ligt daar waar de afstand naar de markt relatief klein is.
190 Het Groeifonds initiatief Biotech Booster kan helpen met het dichten van het gat tussen wetenschappelijk onderzoek en economische impact, maar is niet voldoende.
191 Een dergelijke nationale TTO kan worden opgezet naar voorbeeld van de technologietransfer afdeling het Vlaamse VIB: vib.be – Technologietransfers bij VIB. . Er kan in een dergelijke nationale TTO een professionele en efficiënte organisatie worden neergezet, welke zich kan richten op alle aspecten van 'technology transfer', zoals wet- en regelgeving, intellectueel eigendom, business development, ondersteuning bij business cases
192 Hieronder vallen onder andere opstellen van business cases en business modellen, ondersteuning bij IP aanvragen, connecties met financiers en navigeren van wet- en regelgeving. Randvoorwaarden: om een dergelijk nationaal TTO te starten is het is een gedeelde lange termijn visie cruciaal (zie deelambitie 1). Dit TTO kantoor moet worden ingebed in een bredere ecosysteemorganisatie voor Biomolecular and cell technologies (zie ook deelambitie 6).
193 In Vlaanderen vormt het VIB een dergelijke organisatie, dat als voorbeeld kan dienen voor de Nederlandse ecosystemen. Dit onafhankelijke onderzoeksinstituut is een samenwerkingsverband van vijf Vlaamse universiteiten, waar in al het onderzoek naar biotechnologie gebundeld is. Naast fundamenteel onderzoek, draagt het instituut ook zorg voor kennisvalorisatie (zie deelambitie 5), een gezamenlijke missie en een human capital agenda . Een dergelijke organisatie zou ook in Nederland meerwaarde bieden voor het samenbrengen van de verschillende eilanden.
194 Deze organisatie draagt zorg voor een gezamenlijke missie van deze organisaties en zorgt zo voor afstemming tussen de verschillende spelers. Daarnaast heeft deze organisatie een krachtige en eenduidige stem 'naar buiten' zodat het Nederlandse vestigingsklimaat versterkt wordt, maar speelt ook een rol bij behoud en aantrekken van toptalent, financiering, voorlichting en ondersteuning in zakelijke activiteiten van onderzoekers (zie deelambities 3 en 4).
195 Omdat het hier gaat om ingrijpen in levende organismen/DNA is in de jaren 70 besloten dat aan de voorkant van technologieontwikkeling/marktintroductie gekeken moet worden naar het veilig kunnen toepassen van deze technologie. Dit is anders dan bij andere technologieën. In de VS en Azië worden producten sneller op de markt toegelaten dan in Europa.
196 Een voorbeeld uit de biochemische industrie: In het thans geldende ggo-beleid is nauwelijks ruimte voor een politieke afweging van kosten en baten, omdat ggo's alleen toegestaan worden als de risico's verwaarloosbaar klein zijn. Een voorbeeld uit de agrifood sector: Nederland was 10 jaar geleden de wereldleider op het gebied van kweekvleesproductie – de eerste kweekvleeshamburger is een Nederlandse uitvinding. Sindsdien is kweekvlees in meerdere landen toegestaan op de markt (o.a. VS en Singapore), maar staat Europese regelgeving dit vooralsnog niet toe. Amerikaanse en Aziatische bedrijven hebben Nederland sindsdien ingehaald. Voorbeeld uit de medische sector: Pre-implantatie genetische testen bij embryo's op bepaalde erfelijke aandoeningen vinden al geruime tijd in Nederland plaats, maar worden elders voor veel bredere doeleinden ingezet, bijvoorbeeld in de VS.
197 Diagnostic Imaging Market Size, Share & Forecast [2033 Latest] (globaldata.com)
198 Dialogic/SEO - Onderzoek Groeimarkten voor Nederland, versie 31 juli 2023
199 Semiconductor Metrology and Inspection Equipment Market Manufacturer, Report to 2030 (straitsresearch.com)
200 Semiconductor Metrology and Inspection System Market – Size & Share (mordorintelligence.com)
201 TNO en NWO (2023) - Herijking sleuteltechnologieën 2023
202 NWO (2023) - Landschapsanalyse Ultrasound
203 Commissie Nationaal Groeifonds; Rapport derde beoordelingsronde; Juni 2023
204 De European Health Data Space (EHDS) is een voorstel van de Europese Commissie om snel en gemakkelijk medische gegevens te kunnen uitwisselen en burgers toegang te geven tot hun gezondheidsdata.
205 Zie ook Agenda AI en data
206 Input van Regionale Ontwikkelingsmaatschappijen
207 Dialogic/SEO - Onderzoek Groeimarkten voor Nederland, versie 31 juli 2023
208 European Health Data Space (EDHS) is in voorbereiding
209 Publieksversie Groeifondsvoorstel MedtechNL; 18 juli 2021.
210 Kamerstuk 33009, nr. 96 – Versterken van onderzoeks- en innovatie-ecosystemen.
211 https://publications.tno.nl/publication/34640816/hnWnIc/bree-2023-herijking.pdf
212 In deze paragraaf wordt de terminologie uit de technologiemonitor van Stichting Toekomstbeeld der Techniek gebuikt: https://stt.nl/media/pages/toekomstverkenningen/97-de-technologiemonitor-2020-quantumtechnologie/nationale-technologiemonitor-2020-quantumtechnologie/3b4d16f629-1611235479/technologiemonitor-2020-stichting-toekomstbeeld-der-techniek-stt.pdf
213 IMF 2023: https://www.imf.org/-/media/Files/Publications/WEO/2023/April/English/ch4.ashx
214 ChipsAct: Europese chipverordening (europa.eu)
215 EZK (2023) - Relatieve positie Nederland – EU sleuteltechnologieën (intern document)
216 De WRR benoemt AI in haar rapport uit 2021 "Opgave AI, de nieuwe systeemtechnologie" als systeemtechnologie, waarmee zij niet zoveel anders bedoelt dan dat AI wordt gekenmerkt door een zeer brede mate van toepasbaarheid in economie en maatschappij, vergelijkbaar met de rol die elektriciteit had in de 19e eeuw of de verbrandingsmotor in de 20e eeuw.
217 Lawyering in the Age of Artificial Intelligence by Jonathan H. Choi, Amy Monahan, Daniel Schwarcz: SSRNLawyering in the Age of Artificial Intelligence by Jonathan H. Choi, Amy Monahan, Daniel Schwarcz :: SSRN
218 McKinsey & Company (2023) - The state of AI in 2023: Generative AI's breakout year
219 FAIR Data Principles | CCDC (cam.ac.uk): Findable, Accesible, Interoperable, Reusable
220 WRR (2021) - Opgave AI, de nieuwe systeemtechnologie
221 McKinsey & Company (2023) - The state of AI in 2023: Generative AI's breakout year
222 https://www.demandsage.com/chatgpt-statistics/#:~:text=ChatGPT%20has%20over%20100%20million,%2C%20and%2040.33%25%20are%20females.
223 The Act | EU Artificial Intelligence Act
224 L_2016119NL.01000101.xml (europa.eu)
225 EUR-Lex – 32022R0868 – EN – EUR-Lex (europa.eu)
226 Data Act: Council adopts new law on fair access to and use of data – Consilium (europa.eu)
227 Zie ook de Nederlandse visie op datadeling tussen bedrijven.
228 https://ained.nl/wp-content/uploads/2022/02/Publicatie_AiNed_Investeringsprogramma.pdf
229 https://codata.org/
230 Zie voor het ecosysteem op Europees niveau de volgende interactieve kaart.
231 Het gaat hierbij onder andere om de AVG, Digitale Markten Verordening (DMA), Digitale Diensten Verordening (DSA), DA, DGA, AI Verordening, NIS2-richtlijn, Cyber Weerbaarheidsverordening (CRA) en de Cyber Veiligheidsverordening (CSA)
232 US, UK and a dozen more countries unveil pact to make AI 'secure by design' | Artificial intelligence (AI) | The Guardian 27-11-2023
233 TNO (2023) - De AI-strategieën van Nederland, Finland en Zweden
234 EZK (2023) - Relatieve positie Nederland – EU sleuteltechnologieën (intern document)
235 Digital Europe Programme (europa.eu)
236 Home – International Data Spaces
237 dssc.eu/space/Partners/45842521/DSSC+Partners
238 European Digital Innovation Hubs | Shaping Europe's digital future (europa.eu)
239 European AI Forum – network of associations (european-ai-forum.com)
240 AI, Data and Robotics Association (Adra) (adr-association.eu)
241 Home – Gaia-X: A Federated Secure Data Infrastructure
242 Centre of Excellence for Data Sharing & Cloud (coe-dsc.nl)
243 Data Spaces Support Centre (dssc.eu)
244 Home – Data Sharing Coalition
245 Home | CLAIRE – Confederation of Laboratories for Artificial Intelligence Research in Europe Confederation of Laboratories forArtificial Intelligence Research in Europe (claire-ai.org)
246 European Lab for Learning & Intelligent Systems (ellis.eu)

247 Index van de digitale economie en samenleving (DESI) | Shaping Europe's digital future (europa.eu)
248 NWO (2022) - Landschapsanalyse Data & Digitaal (intern document)
249 NWO (2022) - Landschapsanalyse Data & Digitaal (intern document)
250 https://www.wrr.nl/publicaties/rapporten/2021/11/11/opgave-ai-de-nieuwe-systeemtechnologie en NWO Landschapsanalyse Data & Digitaal.
251 https://www.universiteitleiden.nl/nieuws/2023/01/ai-programma-robust-ontvangt-25-miljoen-euro-van-nwo
252 https://www.defensie.nl/actueel/nieuws/2023/06/09/defensie-zet-4-jarenplan-in-om-tegenstanders-met-data-voor-te-zijn)
253 Senators urge US to take steps to boost battery production, citing China | Reuters
254 Kamerstuk 29023, nr. 430 - Routekaart Energieopslag voorjaar 2023
255 TRL niveaus van verschillende technieken zijn afkomstig van de IEA, "Energy Technology Perspectives: Clean Energy Technology Guide," 14 09 2023. [Online]. Available: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide. [Geopend 27 11 2023].
256 Proton Exchange Membrane. Voor meer achtergrondinformatie over elektrolyse en de verschillende technieken in Nederland, zie de volgende publicatie: TNO (2020) - Elektrolysers: Kansen voor de Nederlandse Maakindustrie van TNO.
257 Anion Exchange Membrane
258 Kamerstuk 2023Z05289 - EU-voorstel: Verordening kritieke grondstoffen COM (2023) 160
259 Kamerstuk 2023Z05862 - EU-Voorstel: Verordening voor een nettonulindustrie (Net-Zero Industry Act) COM (2023) 161
260 Inflation Reduction Act
261 FME en TNO (2020) - Elektrolysers: Kansen voor de Nederlandse Maakindustrie
262 Important Project of Common European Interest
263 International Renewable Energy Agency (2020) - Innovation Outlook: Thermal Energy Storage
264 Liquid organic hydrogen carrier
265 Kamerstuk 33009, nr. 96 – Versterken van onderzoeks- en innovatie-ecosystemen.
266 Hague Centre for Security Studies (2023) – Competitie tussen grootmachten en maatschappelijke stabiliteit in Nederland
267 TNO en NWO (2023) - Herijking sleuteltechnologieën 2023
268 European Chips Act – European Commission (europa.eu)
269 Kamerstuk 33009, nr. 122 - Dutch Semiconductor Industry Value Chain Overview
270 EZK (2023) - Relatieve positie Nederland – EU sleuteltechnologieën (intern document)
271 Nederland versterkt verschillende micro- en nano-elektronica innovaties | Nieuwsbericht | Rijksoverheid.nl
272 Hoofdlijnen beleid voor digitalisering (Kamerstukken II, 2021-22, 26 643, nr. 842 herdruk).
273 Cybersecuritybeeld Nederland 2023 NCTV
274 Dit zijn operationele systemen met een digitaal component die worden gebruikt voor de fysieke wereld, denk aan systemen die sluizen aansturen.
275 Strategie Digitale Economie - Voortgangsrapportage 2023 (overheid.nl)
276 Nederlandse Cybersecuritystrategie 2022 - 2028
277 Pijler 2 van de Nederlandse Cybersecuritystrategie 2022 – 2028, is gericht op veilige en innovatieve producten en diensten
278 Agenda Digitale Open Strategische Autonomie (2023)
279 Dialogic, de economische kansen van de cybersecuritysector (2023)
280 Gebaseerd op TNO Rapport Herijking Sleuteltechnologieën 2023 (kia-st.nl) (zie p. 20) en Nederlandse Cybersecuritystrategie 2022 - 2028
281 Zie: www.kia-digitalisering.nl
282 Cybersecuritybeeld Nederland 2023 NCTV
283 Why cybersecurity is on the frontline of our AI future | World Economic Forum (weforum.org)
284 Dialogic, De economische kansen van de cybersecuritysector (2023)
285 Zie: EUR-Lex - 52022PC0454 - EN - EUR-Lex (europa.eu)
286 Zie: EUR-Lex - 02022L2555-20221227 - EN - EUR-Lex (europa.eu)
287 Zie: Commission publishes Recommendation on Post-Quantum Cryptography | Shaping Europe's digital future (europa.eu)
288 Cyber Security Market Share, Forecast | Growth Analysis [2030] (fortunebusinessinsights.com); Cyber Security Market Share, Forecast | Growth Analysis [2030] (fortunebusinessinsights.com)
289 Europese Commissie: EU strategic dependencies and capacities: second stage of in-depth review
290 Ibid.
291 Gebaseerd op Canalys' 2021 Cybersecurity Leadership Matrix (2021)
292 Zie: EUR-Lex - 02022L2555-20221227 - EN - EUR-Lex (europa.eu)
293 Dialogic, De economische kansen van de cybersecuritysector (2023)
294 Agenda Digitale Open Strategische Autonomie (DOSA)
295 Het Dialogic-onderzoek verwijst naar deze data uit 2019
296 Cybersecuritybeeld Nederland 2023 NCTV
297 https://www.aivd.nl/binaries/aivd_nl/documenten/publicaties/2024/04/18/cybercheck-ook-jij-hebt-supply-chain-risicos/Cybercheck+ook+jij+hebt+supply+chain+risicos.pdf
298 Dialogic, De economische kansen van de cybersecuritysector (2023)
299 Kabinetsstrategie Versterken van onderzoeks- en innovatieecosystemen (2020)
300 Europese Commissie, EU strategic dependencies and capacities: second stage of in-depth reviews, februari 2022
301 Dialogic, Het Nederlandse investeringsklimaat, juni 2021, p44. Zie ook: Timmers en Dezeure, Nederlandse strategische autonomie en cybersecurity, januari 2021. Dit beeld kwam ook naar voren bij rondetafels met experts.
302 Dialogic, De economische kansen van de Cybersecuritysector, april 2023, p 59

Dit is een uitgave van het

Ministerie van Economische Zaken & Klimaat

Postbus 20901 | 2500 EX Den Haag
www.rijksoverheid.nl/ienm

Januari 2024