

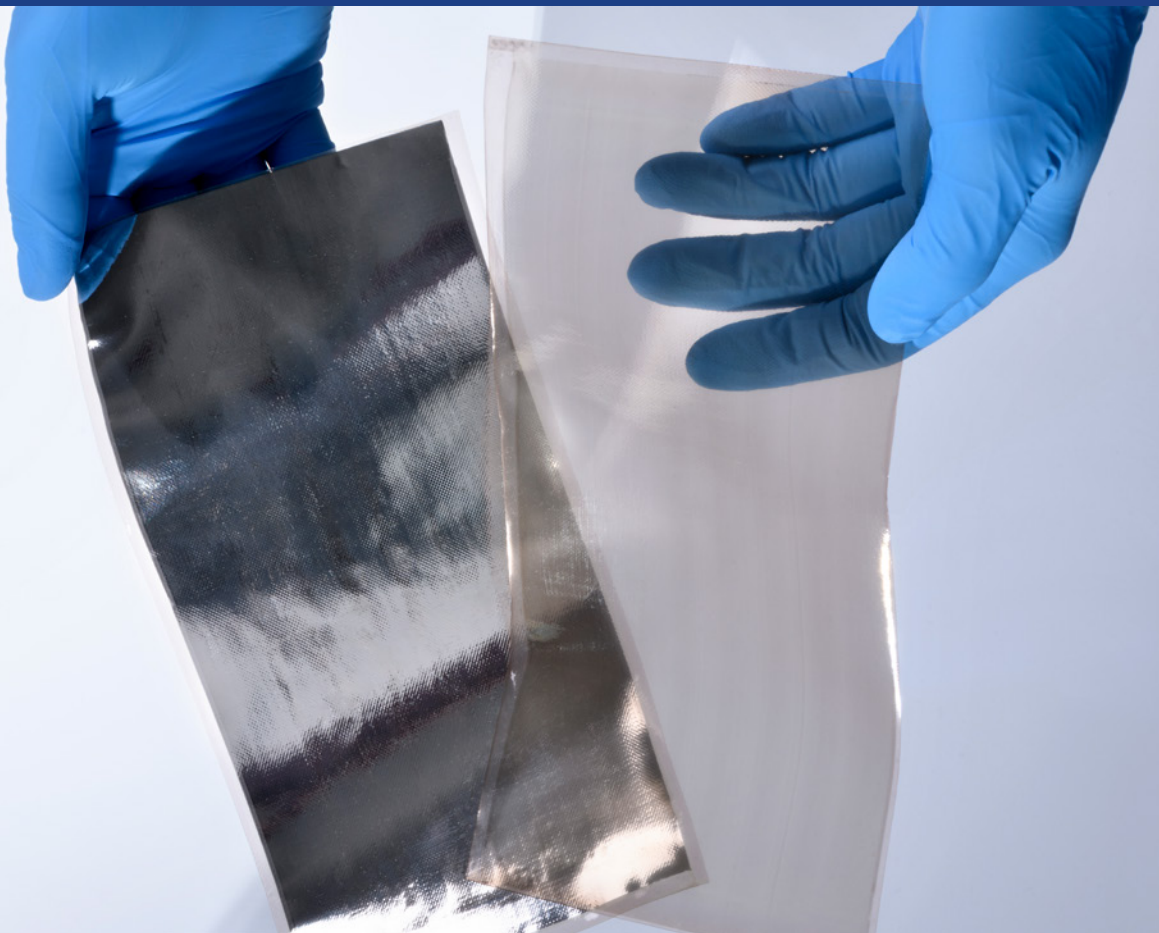


Actieagenda

Energy Materials

Inzetten op Innovaties
in Batterijcel- en ElektrolyseTechnologie

Versie 1.0 | 16 december 2025





Kennis- en Innovatie Agenda
Sleuteltechnologieën

Bezoekadres

Winthontlaan 2
3526 KV Utrecht
+31 (0)30 - 6001 328

Postadres

Postbus 3021
3502 GA Utrecht
The Netherlands

Actieagenda

Energy Materials

Inzetten op Innovaties in Batterijcel-
en ElektrolyseTechnologie

Versie 1.0 | 16 december 2025



Inhoudsopgave

Samenvatting	5
1. Inleiding	6
2. Analyse: de kansen van Energy Materials	8
2.1. De kansen van batterijceltechnologie	8
2.2. De kansen van elektrolysetechnologie	12
3. Ambitie	18
3.1. Ambitie uit de NTS	18
3.2. Economische en maatschappelijke opgave	18
3.3. Innovatieopgave	19
3.4. Ecosysteemopgave	21
3.5. Inhoudelijke focus en samenhang van het programma	23
4. Innovatieprogramma's	24
4.1. Innovatieprogramma batterijceltechnologie	24
4.2. Innovatieprogramma elektrolysetechnologie	39
4.3. KPI's Innovatieprogramma's	52
5. Ecosysteemactiviteiten	53
5.1. BCC-NL	53
5.2. 'Electrolysis Competence Centre-NL'	54
6. Organisatie en vervolg	55
6.1. Innovatiecoalitie	55
6.2. Vervolg programma ontwikkeling	56



Samenvatting

De actieagenda Energy Materials richt zich op het versterken van de Nederlandse positie in batterijcel- en elektrolysetechnologie om

- het toekomstig verdienvermogen van Nederland veilig te stellen in termen van economische groei en werkgelegenheid,
- de strategische relevantie en weerbaarheid te vergroten, onder andere door minder afhankelijkheid van kritieke grondstoffen te creëren, en
- de energietransitie te versnellen, wat onder meer leidt tot CO₂-reductie.

De focus ligt op het ontwikkelen van innovatieve materialen, productieprocessen en machinebouw, met als doel om in 2035 control points in Europese waardeketens te verwerven. Binnen batterijceltechnologie heeft Nederland een sterke kennispositie in batterijmaterialen zoals silicium- en lithiumanodes, natrium-ion technologie, en machinebouw. Er is een actief ecosysteem, aangevoerd door BCC-NL (Battery Competence Cluster) welke kansen heeft geïdentificeerd:

- binnen Nederland in nichemarkten, waaronder defensie, luchtvaart, zwaar transport en maritiem, en
- internationaal als toeleverancier voor Europese gigafabrieken.

Voor elektrolysetechnologie geldt dat Nederland beschikt over een breed ecosysteem voor elektrolyse, met een focus op PEM, Alkaline en SOE-technologieën. Kansen bestaan in het opbouwen van intellectueel eigendom (IP), opschalen van productiecapaciteit en het versterken van de positie in de Europese waardeketen, met innovaties gericht op kostenreductie, efficiëntie en duurzaamheid.

De huidige actieagenda presenteert zeven innovatieprogramma's (vier voor batterijceltechnologie, drie voor elektrolysetechnologie) om innovatie efficiënt te programmeren en bovenstaande kansen te verzilveren. Tegelijkertijd pleit de agenda voor een centrale aanpak om samenwerking tussen bedrijven, kennisinstellingen, overheid en investeerders effectief vorm te geven binnen twee sterke, brede samenwerkingsconsortia. Binnen batterijceltechnologie wordt een proactief BCC-NL voorgesteld om centrale regie te nemen. Voor elektrolysetechnologie wordt voorgesteld om een vergelijkbare constructie op te zetten. Deze samenwerkingsconsortia moeten centraal regie nemen op

- (i) langetermijnstrategie (roadmapping),
- (ii) focus op langetermijn (deeptech)-financiering,
- (iii) gedeelde 'stepping stone faciliteiten' rondom demonstratie en marktintroductie van nieuwe technologie, en
- (iv) beïnvloeding en vormgeving van overheidsrandvoorwaarden rondom innovatie- en industriebeleid.

Deze huidige actieagenda is de start van een vervolgtraject waarbij in 2026 de huidige en mogelijk nieuwe innovatieprogramma's verder zullen worden vormgegeven en een innovatiecoalitie uit het ecosysteem zal worden gevormd. Financiering en governance zijn onderdeel van het vervolgtraject.

1. Inleiding

De toekomstige brede welvaart, het welzijn en de nationale veiligheid van Nederland hangen af van hoe effectief kansen en risico's van nieuwe technologieën worden benut, waarbij internationale samenwerking en strategische positionering essentieel zijn om zowel nationaal als Europees concurrentievermogen, veiligheid en maatschappelijke vooruitgang te waarborgen.

Het bovenstaande speelt een uitdrukkelijke rol rondom energie- en klimaattechnologie. De energietransitie leidt tot een grotere internationale afhankelijkheid van een aantal kritieke grondstoffen voor technologieën zoals batterijtechnologie (lithium, kobalt, nikkel, koper) en waterstof elektrolyse (iridium, platina). Winning veroorzaakt problemen voor lokale gemeenschappen, maatschappelijk issues, zoals kinderarbeid, biodiversiteit en ecologische systemen. Bovendien zijn er strategische risico's, aangezien sommige van deze materialen in een beperkt aantal landen worden gewonnen en verwerkt, waarmee Nederland wisselende diplomatieke betrekkingen heeft. Dit alles onderstreept de noodzaak om alternatieven te ontwikkelen die duurzamer zijn en minder afhankelijk van kritieke grondstoffen. Ook is voor verdere verwerking strategische kennis en kunde vereist die binnen Nederland specifiek voorhanden is.

Binnen de strategische agenda van de Nationale Technologie Strategie (NTS) worden onder Energy Materials materialen verstaan die het mogelijk maken om (duurzame) energie efficiënt te produceren, op te vangen, op te slaan, te transporteren en/of om te zetten naar een andere energiedrager. Energy Materials leveren in hun toepassing in opslag- en conversiesystemen een essentiële bijdrage aan de energie- en klimaattransitie. Daarbij is in de strategische agenda onderscheid gemaakt tussen materialen voor elektriciteit, waterstof en warmte - elk met uitdagingen en kansen voor Nederland.

Deze huidige actieagenda NTS Energy Materials is een uitwerking van de strategisch NTS agenda, waardoor bovenstaande scope verder is aangescherpt en afgebakend. Ingegeven door het Nederlandse concurrentievermogen op dit onderwerp, is de scope van de agenda verbreed vanuit

- specifieke materiaaleigenschappen zoals hoge mate van geleiding, katalytische activiteit, chemische inertie, opslagcapaciteit en langdurig gebruik onder wisselende omstandigheden, naar met name
- het verwerken van de materialen in toepassingen door middel van
- afgestemde productiemachines.

Materiaalontwikkeling en machine-ontwikkeling gaan hand in hand, waardoor meerdere Nederlandse partijen door de gecombineerde ontwikkeling een unieke positie innemen, zoals bijvoorbeeld in de productie van silicium als anode materiaal/component in batterijcellen door Nederlandse start-ups. Op het gebied van warmte en warmteopslag worden voornamelijk innovaties vermarkt vanuit de chemische technologie en op systeemniveau. Hierdoor ligt de (technologische) aansluiting beter bij de NTS Process Technologies.



Als geheel leidt dit tot de conclusie dat onder de strategische sleuteltechnologie Energy Materials de huidige actieagenda focust op het uitwerken van twee cruciale deelonderwerpen:

- Batterijceltechnologie
Specifiek afgebakend tot celtechnologie ('Li-ion and beyond'), voornamelijk gebaseerd op coating en dunnefilm technologieën. Ter verduidelijking, geen bulk energieopslagsystemen: innovaties op deze systemen passen beter binnen NTS Process Technologies met een kennisbasis in de chemische technologie.
- Elektrolysetechnologie
Afgebakend voornamelijk op innovaties rondom stack(productie), zoals bij katalysatoren, membranen, coatings en stackarchitectuur. De downstream waardeketen wordt bediend door NTS Process Technologies

Met name China is wereldwijd een sterk groeiende speler binnen deze twee technologieën. In brede zin is grootschalige productiecapaciteit voor deze technologieën beperkt of niet aanwezig in Nederland en bevinden

- (i) afnemers van de materialen,
- (ii) componenten gebaseerd op de materialen en
- (iii) afnemers van productie-equipment (de systeemfabrikanten) zich vaak niet in Nederland en maar beperkt in Europa. Circa 70% van alle batterijen komt uit China.

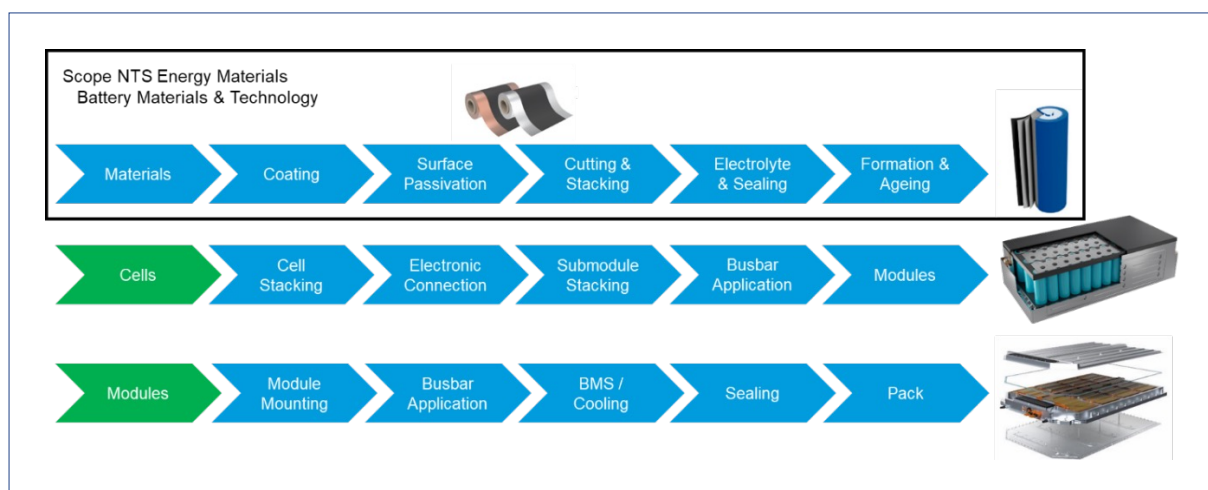
Nederland beschikt echter over een sterke kennispositie en een opgroeiend commercieel ecosysteem rondom bovenstaande technologieën. **Snelheid en focus/kritieke massa** zijn daarom geboden om de kansen die het onderscheidend vermogen van Nederland bieden daadwerkelijk te verzilveren en tijdig tot control points te komen. In deze actieagenda wordt met een control point bedoeld: 'een unieke of leidende bedrijfsactiviteit waar anderen (sterk) van afhankelijk zijn'.

2. Analyse: de kansen van Energy Materials

2.1. De kansen van batterijceltechnologie

2.1.1. Kracht van het Nederlandse ecosysteem

Elektrochemische opslag in breedste zin is essentieel voor de elektriciteitsketen, vanwege de hoge efficiëntie, duur en snelheid waarmee elektriciteit kan worden opgeslagen. Battery Competence Cluster-NL (BCC-NL) is opgericht om het gehele speelveld rondom batterijen vorm en richting te geven. De waardeketen spant zich van materialen tot toepassing van systemen in mobiliteit en grid-parity oplossingen. Binnen de batterijtechnologie richt Nederland zich op het gebied van Energy Materials (next-generation) batterijceltechnologie (schematisch hieronder aangegeven) met lithium-ion als meest ontwikkelde (TRL 9) en gecommmercialiseerde oplossing. (TRL: Technology Readiness Level).



Schematische weergave waardeketen batterijceltechnologie en afbakening Energy Materials

Binnen de batterijceltechnologie bestaat de noodzaak om meer elektriciteit op te kunnen slaan, met snellere laadsnelheden en hogere veiligheidseisen, terwijl minder kritieke grondstoffen zoals lithium benodigd zijn. In Nederland worden hiervoor veelbelovende technologieën ontwikkeld zoals bijvoorbeeld silicium-anode technologie, 3D lithium-anode technologie en natrium-ion technologieën. Nederlandse start-ups en scale-ups werken aan nieuwe materialen en elektrodes als toeleverancier voor grote gigafabrieken en ook aan innovatieve productietechnieken en productiemachines.

Tegelijkertijd worden in Nederland ook lithium-ion batterijcellen verwerkt voor niche toepassingen zoals in schepen en specifieke voertuigen. Defensietoepassingen met in het verlengde luchtvaarttoepassingen zijn door geopolitieke ontwikkelingen een opkomend marktsegment. Daarnaast zijn er inspanningen op het gebied van duurzaamheid en circulaire economie, zoals hergebruik, recycling en het terugwinnen van kritieke grondstoffen uit batterijen. Onder meer door de opzet van BCC-NL als representatieve organisatie voor het Nederlandse batterijecosysteem en financiering vanuit het Nationaal Groeifonds (NXTGEN Hightech, Materials Independence & Circular Batteries) en NWO (BatteryNL), zijn er al grote initiatieven gaande die

inzetten op het verkrijgen van 'control points' binnen de batterijwaardeketen. Het Open Battery Industrialization Centre (OBIC) – dat nog in wordt opgezet – is een drijvende infrastructuur. Hiermee worden er tot 2032 enkele honderden miljoenen euro's geïnvesteerd.

2.1.2. Kansen en uitdagingen

Kansen & Sterktes

Met de recente Kamerbrief 'Industriebeleid met focus' zijn batterijceltechnologie, energietechnologie, innovatieve chemie en machinebouw geïdentificeerd als belangrijke groeimarkten voor Nederland. Nieuwe generatie batterijen en dual-use toepassingen in defensie zijn twee significante marktsegmenten. De groeimarkten-analyse als bijlage bij de kamerbrief verwacht dat het gebruik van batterijen toe gaat nemen met een factor 100 tot 1.000 in 2040. De verwachte jaarlijkse Europese productie van batterijen groeit van 462 GWh in 2025 naar 1144 GWh in 2030, een jaarlijks groeipercentage van 19,8%. Er ligt een potentieel verdienvermogen voor Nederland van €2,5 miljard in 2030. Dit potentieel verdienvermogen etaleert zich binnen Energy Materials voornamelijk binnen een sterke maakindustrie rondom machinebouw en componentproductie. Circa 250 partijen (ruim 13.000 FTE) zijn actief, verenigd binnen BCC-NL. Nederland kent een aantal veelbelovende hoogtechnologische scale-ups (LeydenJar, PowAll, E-magy, LionVolt, SALD, Kalpana, SparkNano) naast gerenommeerde machinebouwers en ingenieursbureaus (VDL, Demcon, Sioux). Nederlandse bedrijven richten zich in dit segment vooral op productiemachines, componentproductie en mogelijke celproductie in lage volumes met hoge flexibiliteit.

Daarmee is de sector kansrijk tegenover Chinese bedrijven die zich uitsluitend richten op inflexibele productie op grote schaal. Nederland kan daardoor een toeleverancier worden voor Europese giga-factories, bijvoorbeeld in Duitsland en Noord-Frankrijk. Tegelijkertijd bestaat door de verhoogde prioriteit voor Defensie en verwachte groei in Europese defensie-uitgaven de kans om voor defensie-gerelateerde toepassingen niche-celproductie voor Europa op te zetten.

De positie van bovengenoemde marktpartijen is het resultaat van een sterke kennisbasis – bijvoorbeeld op het gebied van systems engineering, fysica, scheikunde, materiaalkunde, circulaire technologieën en processen, interface en oppervlaktechemie en nano-elektronica, en specifiek voor batterijen op testen, certificeren en veiligheid.

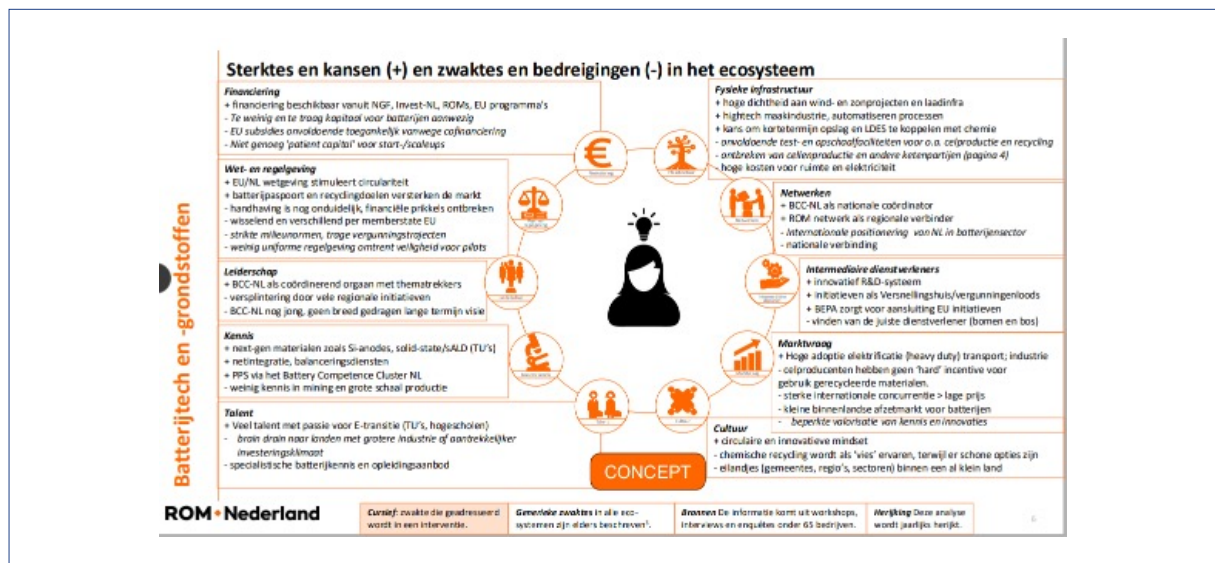
Naast specifieke activiteiten op het gebied van batterijceltechnologie, is deze sector van groot belang voor bredere ondersteuning van de Nederlandse economie, zoals bijvoorbeeld de automotive sector (40.000 banen, €20 miljard omzet) en de maritieme sector.

Zwaktes & Uitdagingen

Introductie van nieuwe technologie in een bestaande markt vraagt een overtuigende bewijslast. Een uitdaging voor Nederland is dat benodigde ketenpartners niet dichtbij in Nederland of zelfs niet in Europa zitten. De complexiteit van de productieprocessen en versplinterde (Europese) samenwerking zorgt voor een wederzijdse afhankelijkheid die de innovatiesnelheid vermindert. Door sterke concurrentie bestaat er tegelijkertijd een grote prijsdruk (voornamelijk vanuit Azië), waarbij lage kostprijs alleen behaald kan worden door enorme schaalgrootte, waarbij Nederlandse

partijen nog zeer kleine spelers zijn en een binnenlandse afzetmarkt op dit moment klein is. Door de benodigde schaalgrootte – en de sprong vooruit die hierin gemaakt moet worden – zijn de investeringen in onder meer innovatie zeer hoog en erg risicovol met betrekking tot de opbrengsten op lange termijn. Om deze verandering snel en effectief te maken heeft de sector te maken met een gebrek aan productiekennis en talent, en aan gedeelde test- en opschaaftaciliteiten.

Hoewel het ecosysteem goed heeft ingezet op R&D moet verdere opschaling nu worden vormgegeven, waar langdurige en risicovolle financiering voor nodig is. Dit vraagt een eenduidig gericht beleid, met concrete afstemming en overeenstemming van beleidsagenda's en een eenduidige uitvoering om samenwerking te concretiseren en te versnellen. Aandachtspunt is om – naar voorbeeld van de VS en China – niet alleen CAPEX-ondersteuning vorm te geven, maar ook OPEX-georiënteerde instrumenten te realiseren om vanuit overheidswege de scale-up van bedrijven te helpen vormgeven. Dit kan bijvoorbeeld via subsidies op basis van absoluut aantal geproduceerd producten. Een fysiek probleem voor opschaling in Nederland vormt toegang tot het elektriciteitsnet en de hoge energiekosten in NL en de EU.



Vanuit de ROM's (Regionale Ontwikkelingsmaatschappijen) zijn NTS-versterkingsplannen vormgegeven, welke ook een analyse van het ecosysteem geven. Bovenstaande figuur is overgenomen uit de waardeketen Batterijen.

2.1.3. Internationale positionering

China is op dit moment de belangrijkste geopolitieke speler in batterijtechnologie in de wereld. China verwerkt een significant deel van alle kritieke grondstoffen die belangrijk zijn voor de energietransitie zoals koper, nikkel, kobalt, lithium en grafiet. Met name voor die laatste biedt Nederland sterke alternatieven met (silicium en lithium) Si en Li Metal anodes. Europa heeft traditioneel zwakke plekken aan de voorkant van de keten, zoals weinig mijnbouw en een beperkte raffinage, terwijl de EU probeert met regelgeving haar afhankelijkheid af te bouwen



door middel van de Critical Raw Materials Act en het inzetten op circulariteit en de Net Zero Industries Act. EU-beleid is ambitieus terwijl handhaving van nieuwe EU-regels, zoals minimale recyclagepercentages, CO₂-footprint en UPV, nog in ontwikkeling zijn en per lidstaat verschillen.

China is momenteel ook wereldleider met 75 tot 85% van de mondiale batterijcelproductie. Europa en de VS hadden tot voor kort elk minder dan 10% aandeel in kritieke delen van de keten. Recent heeft China voor highend-batterijtechnologie exportrestricties aangekondigd. Hoewel sinds de lancering van de European Battery Alliance (EBA) in 2017 het aantal Europese projecten in alle segmenten van de productie sterk is gegroeid, wordt pas na 2030 verwacht dat de toeleveringsketen meer divers wordt, onder meer door additionele investeringen in de VS (via de IRA) en de EU. In de EU breiden voornamelijk landen als Duitsland, Zweden, Polen, Hongarije en Frankrijk hun productiecapaciteit voor batterijcellen uit, ondersteund door een EU IPCEI (Important Projects of Common European Interest). In de Europese celfabrieken wordt vooral nog gebruik gemaakt van productiemachines die ook uit Azië komen.

Nederland heeft geen actieve mijnen voor batterijmineralen, geen raffinage van bijvoorbeeld lithium en evenmin een gigafabriek voor batterijcellen. Dit betekent een vrijwel volledige importafhankelijkheid voor batterij-hardware. Als strategisch tegengewicht positioneert Nederland zich technologisch als toeleverancier van kritieke componenten en productiemachines aan de uitbreidende productiecapaciteit in Europa. Tegelijkertijd bestaat de kans om een niche celproducent te ontwikkelen voor levering van high-performance cellen voor bijvoorbeeld de bredere defensie-industrie in Nederland en Europa. Strategische uitbreiding van het ecosysteem met partijen in de toeleveringsketen is op dit moment opportuun, zeker gezien de recente blokkade vanuit China voor het exporteren van cellen met meer dan 300 Wh/kg GED.

2.1.4. Conclusie: kansen voor de toekomst

Nederland heeft veel kennis en expertise in het ontwerpen en bouwen van machines voor batterijproductie en in het ontwikkelen van nieuwe batterijmaterialen. Een zwak punt is echter de beperkte productiecapaciteit voor batterijen, wat snelle opschaling bij grote vraag belemmert en innovatie vertraagt. Er liggen kansen in het ontwikkelen van intellectueel eigendom (IP) en machines voor batterijproductie, die geëxporteerd kunnen worden. Ook is er groeipotentieel in nichemarkten zoals batterijpakketten voor trucks, luchtvaart en defensie. Een bedreiging is de toekomstige beschikbaarheid van kritieke grondstoffen, terwijl andere landen ook sterk inzetten op batterijtechnologie.

Sterkte • Sterke positie in anodetechnologie. • Diepgaande kennis en expertise bij hier gevestigde bedrijven met betrekking tot de fabricage van machines die cruciaal zijn voor de productie van batterijen. • Hoogwaardige research bij Nederlandse universiteiten en kennisinstellingen op het gebied van nieuwe materialen – zowel anorganisch als organisch. • Sterke kennis en faciliteiten voor de ontwikkeling van productietechnologie en optimalisatie van productieprocessen. • Actief ecosysteem onder leiding van BCC-NL met meerdere actieve nationale consortia.	Zwakte • Geen centrale regie op agendasetting (NTS, Nationale Agenda Batterijsystemen, NPCE, e.a.). • Beperkte valorisatie van kennis en innovaties: Nederland is sterk in R&D op batterijmaterialen en componenten, maar de vertaling naar grootschalige productie, en markttoepassing blijft achter. • Afhankelijkheid van incidentele projectfinanciering. Er is geen structurele financiering. Gebrek aan investeringen ter ondersteuning van de lab-to-fab-stap. • Beperkte kennis en vaardigheden op het gebied van celontwerp - geen strategische relatie met grootschalige celproductie. • Relatief hoge energiekosten en zeer beperkte beschikbare stroomaansluitingen.
Kansen • IP- en machine-ontwikkeling voor batterijfabricage, die vervolgens geëxporteerd kunnen worden naar andere landen. • Batterijcellen tot packages verwerking voor niche-toepassingen (high mix, low volume), waaronder ook Defensie (drones). • Momentum om invloed uit te oefenen en richtingbepalend in Europa te zijn op technologie en duurzame oplossingen. • Mogelijkheid tot meer strategische relevantie in een door Aziatische partijen gedomineerde toeleveringsketens.	Bedreigingen • Snelheid van andere landen zoals V.S. en China, die ook veel op IP-ontwikkeling inzetten. • In Nederland ontwikkelde technologie en innovaties verhuizen naar het buitenland. • Concurrerende economieën organiseren langetermijn-continuïteit van nationale programma's om de volledige ontwikkelingscyclus van (nieuwe) batterijen te ondersteunen. • Strenge Europese regelgeving en handhaving zijn mogelijk remmend voor eerste markttoetreding.

2.2. De kansen van elektrolysetechnologie

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. Er zijn vier elektrolysetechnologieën zoals aangegeven in tabel 2.1.

Tabel 2.1

Technologie	Sterktes	Zwaktes	TRL
AWE (Alkaline Water Elektrolyse)	Bewezen technologie, lage kosten, lange levensduur	Lage flexibiliteit, minder geschikt voor variabele hernieuwbare stroom	8-9
PEM (Proton Exchange Membrane)	Compact, hoge stroomdichtheid, goed voor dynamische inzet	Hoge kosten door kritieke metalen (iridium, platina)	8-9
SOE (Solid Oxide Elektrolyse)	Zeer hoge efficiëntie, benut industriële warmte	Hoge temperatuur → complexe materialen, nog in demonstratiefase	6-7
AEM (Anion Exchange Membrane)	Potentieel lage kosten, minder kritieke metalen	Nog experimenteel, beperkte commerciële ervaring	4-6

PEM- en alkaline-technologieën domineren momenteel de markt (beide in TRL 8-9) en SOE is interessant vanwege zijn hoge efficiëntie. AEM zit op een lager TRL-niveau vanwege de nog beperkte levensduur van de membranen. Om deze reden wordt deze technologie op dit moment nog niet gezien als een kansrijke technologie voor het potentieel verdienvermogen van Nederland.

Gezien de beperkte aanwezigheid van commerciële brandstofcel-ontwikkelaars in Nederland, richt deze actieagenda zich primair op elektrolyse-technologieën.

2.2.1. Kracht van het Nederlandse ecosysteem

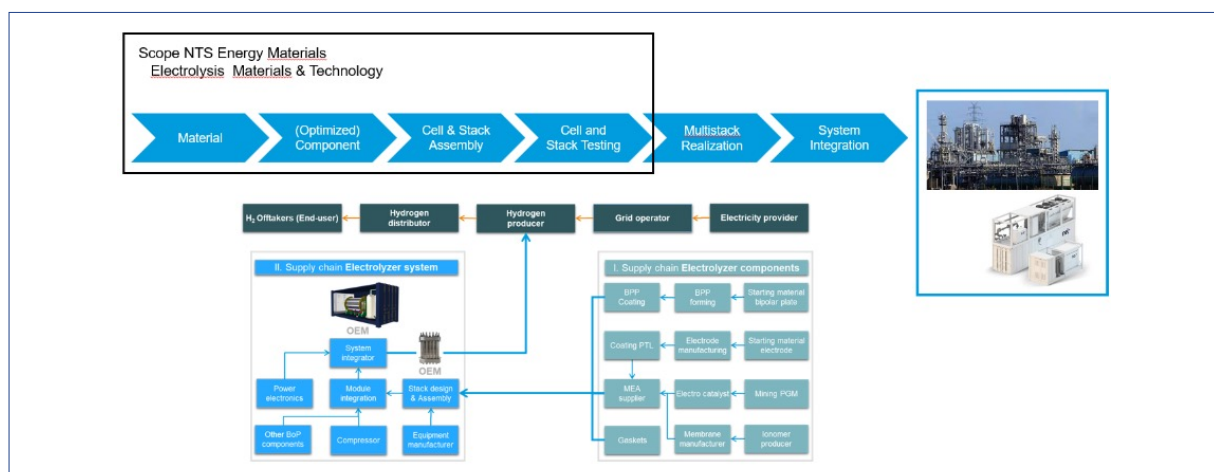
Nederland heeft een breed nationaal ecosysteem voor elektrolyse, met partijen verspreid over de gehele waardeketen en regio's. In Nederland zijn nog geen grote spelers, maar er zijn wel meerdere ontwikkelingen binnen start-ups en scale-ups. Voor stack-componenten en Balance of Plant (BoP)-componenten heeft Nederland al een ontwikkelde sector. Nederland kent elektrolyser OEM's zoals Battolyser, Circonica, HyEt, VDL en Zero Emission Fuels, maar zij bevinden zich nog in de ontwikkelfase en hebben geen volledig ontwikkeld commercieel product. Daardoor is hun positie in Europa beperkt vergeleken met spelers als Nel, Nucera en Schaeffler. In Nederland zijn daarnaast ook meerdere toeleveranciers aanwezig, onder andere Teijin, Bosal, Borit, SALD, SparkNano, Hauzer, Ionbond, MXPolymers en Magneto. Het grootste deel van de ontwikkelingen binnen deze bedrijven focust op PEM- en Alkaline-technologieën en het verminderen van gebruik van kritieke grondstoffen, terwijl TNO, Bosal en Circonica een grote kennispositie op SOE-technologie hebben. Uitgebreide toegepaste kennis op het gebied van componenten, assemblage en membraan-technologie geeft Nederland verdere potentie.

Door het belang van waterstof voor de sterke Nederlandse chemische industrie heeft Nederland een bestaand cluster van gebruikers van grijze waterstof, die naar verwachting in de toekomst de waterstofvraag opstuwen. Hoewel in 2025 minder dan circa 100 MW elektrolysecapaciteit operationeel is, streeft Nederland ernaar om in 2030 4 GW te realiseren, ondersteund door €9 miljard uit het klimaatfonds. Deze fondsen zijn primair bestemd voor het realiseren van elektrolysecapaciteit (installaties), niet voor R&D of industrialisatie. Apparatuur wordt veelal geïmporteerd, waardoor Nederlandse technologieontwikkeling en machinebouw slechts indirect

profiteren. Uitgebreide toegepaste kennis op het gebied van componenten, assemblage en membraantechnologie geeft Nederland verdere potentie.

Nederland heeft een sterke kennisbasis op het gebied van waterstof met onder andere sterke onderzoeks- en kennisinstellingen, zoals TNO, TU Eindhoven en TU Delft. Bovendien kent Nederland binnen de brede waardeketen van waterstoftechnologie een netwerk aan gerelateerde start-ups, scale-ups, mkb-bedrijven en grootbedrijven zoals Prodrive, Bosch en VDL, HyET Hydrogen en Hygear met bredere aansluiting richting partijen als HyCC, Airliquide, OCI Nitrogen, Tata Steel. Deze bedrijven zijn actief in vooraanstaande regionale ecosystemen, zoals Brainport Eindhoven, Smart Delta Resources, Chemelot en de Havenbedrijven van Rotterdam en Amsterdam. Een bijkomend voordeel voor deze bedrijven is dat Nederland een gunstige ligging heeft om een belangrijke internationale rol te spelen in import en export van waterstof en waterstofderivaten, voornamelijk vanwege de haven van Rotterdam.

Deze sterke kennisbasis, gecombineerd met een groeiend netwerk van OEM's, toeleveranciers en kennisinstellingen, vormt een solide fundament om een leidende rol te spelen in de Europese waterstofwaardeketen. Door deze competenties te bundelen en te koppelen aan nationale programma's zoals NXTGEN Hightech, GroenvermogenNL en de Routekaart Elektrolyse, kan Nederland innovaties versneld opschalen van lab naar industriële toepassing. Het benutten van regionale clusters als test- en validatieomgeving is hierbij cruciaal om technologieën sneller marktrijp te maken en tegelijkertijd het verdienvermogen en de strategische relevantie en weerbaarheid van de Nederlandse maakindustrie te versterken.



Schematische weergave waardeketen groene waterstof en afbakening Energy Materials

2.2.2. Kansen en uitdagingen

Kansen & Sterktes

Vanuit dezelfde eerdergenoemde Kamerbrief 'Industriebeleid met focus' zijn rondom Elektrolysetechnologie dezelfde groeimarkten geïdentificeerd, namelijk Energietechnologie in combinatie met Innovatieve Chemie en Machinebouw.



In breedste zin wordt verwacht dat de mondiale waterstofmarkt zal groeien. De verwachte marktomvang van waterstof is \$642 miljard in 2030, \$980 miljard in 2040 en \$1.408 miljard per jaar in 2050. Dit impliceert een jaarlijks groeipercentage van 4%. Naar verwachting zal Azië verantwoordelijk zijn voor circa de helft van deze marktomvang. De andere helft komt naar verwachting voornamelijk uit Europa, Noord-Amerika en het Midden-Oosten. Naast de groei van de mondiale waterstofmarkt neemt ook de markt voor elektrolyzers sterk toe. Verwacht wordt dat Azië, met name China, een leidende positie behoudt in grootschalige productie van elektrolyserapparatuur, goed voor circa 40-50% van de wereldwijde capaciteit in 2030. Europa volgt met ongeveer 25-30%, gedreven door IPCEI-projecten en nationale waterstofstrategieën, terwijl Noord-Amerika en het Midden-Oosten samen circa 20-25% voor hun rekening nemen.

Specifiek voor activiteiten op het gebied van Energy Materials (materials, productiemachines en componenten) wordt voor de onderliggende waterstoftechnologie de wereldwijde marktomvang geschat op \$21 miljard in 2022, met een verwachte groei naar \$38,5 miljard in 2027. Dit impliceert een jaarlijks groeipercentage van 12,8%. De International Energy Agency (IEA) verwacht met een duurzaam ontwikkelingsscenario een wereldwijde vraag van circa 38 Megaton low-carbonwaterstof in 2030, ten opzichte van 2 Megaton in 2023. Ter verduidelijking, voor 1 Megaton jaarlijkse waterstofproductie is circa 10 GW elektrolyser-vermogen nodig op basis van 8000 productie uren per jaar. Om de ambities te helpen verwezenlijken worden door de Europese Commissie tientallen miljarden beloofd voor het stimuleren van de ontwikkeling van elektrolyzers ten behoeve van groene waterstof.

Nederlandse bedrijven ontwikkelen afzonderlijke technologieën, die verschillende posities in de waardeketen innemen, zoals componenten en productie-apparatuur, stacks en power electronics. Deze positie biedt Nederland een kans om een sleutelrol te claimen als leverancier van zowel componenten als volledige geïntegreerde oplossingen, waarmee het verdienvermogen en de strategische relevantie worden versterkt.

De eerste toepassingsgebieden voor Nederlandse elektrolysetechnologie liggen in relatief kleinschalige (circa 10 MW) productie, bijvoorbeeld bij industriële gebruikers. Deze kleinere installaties bieden een kans om technologie te demonstreren, ervaring op te doen en kosten te verlagen door leereffecten. Vanuit deze nichemarkten kan vervolgens worden opgeschaald naar grootschalige centrale waterstofproductie, gekoppeld aan industriële clusters en havens. Centrale productie-installaties bieden niet alleen schaalvoordelen, maar ook een strategische positie op de elektriciteitsmarkt en binnen toekomstige waterstofhubs. Deze gefaseerde aanpak versterkt de internationale zichtbaarheid van Nederlandse technologie en creëert een route naar een sterke positie in de Europese waardeketen.

Zwaktes & Uitdagingen

Fundamentele uitdaging is dat de Nederlandse/Europese groene waterstofmarkt op dit moment moeizaam van de grond komt omdat het niet kan concurreren met de huidige grijze waterstofprijs. De uitdaging die hieruit voortvloeit, is om focus aan te brengen waarbinnen de internationale voorziene waardeketen Nederland het verschil wil gaan maken. Bijkomende uitdaging is om

invloed uit te oefenen op een wildgroei aan overkoepelende agenda's op systeemniveau om genoeg richtinggevend te zijn. Anderzijds missen deze agenda's de diepgang om concreet aan te geven welke detailinnovaties kansrijk zijn om voor Nederland een strategische positie ('control point') binnen de waardeketen te realiseren. Daarnaast is het een uitdaging om op te schalen naar hogere volumes, waarvoor significante risicovolle investering (deeptech) benodigd is omdat de kosten voor demoprojecten significant oplopen met de schaal waarop prestaties en betrouwbaarheid kunnen worden aangetoond. De verwachting is dat al meer dan €150 miljoen nodig is om tot een demo te komen. Daarna is nog een vervolginvestering nodig voor de volledige productie en validatie van elektrolyzers (componenten) voordat Nederlandse bedrijven toeleverancier kunnen zijn voor waterstof-projecten wereldwijd. Om deze uitdaging het hoofd te kunnen bieden wordt generiek nagedacht hoe via binnenlandse nichemarkten de technologie opgeschaald kan worden om daarna op de bredere internationale markt een positie te verwerven.

Gebrek aan focus op welke technologieën in te zetten binnen welk toepassingskader, leidt tot onvoldoende kritieke massa om daadkrachtig te innoveren met voldoende snelheid. Verder wordt de waterstofmarkt op dit moment aangejaagd via demonstratieprojecten die het aanbod van waterstof moeten verhogen en zo de afname van waterstof door marktpartijen gaat ontsluiten. Deze projecten, die voornamelijk zijn gebaseerd op buitenlandse elektrolysetechnologie, gaan echter voorbij aan de wens om een Nederlandse technologiepositie op te bouwen. Daarvoor moet de technologie eerst worden gedemonstreerd en daarna geïmplementeerd. Hierdoor ontbreken de hogere TRL-technologiedemonstratie faciliteiten.

Beleidsmatig bestaan er de uitdagingen om overeenstemming te krijgen tussen verschillende beleidsagenda's, versnippering van beleid tegen te gaan en vorm te geven aan een goed functionerende manier van agenderen, programmeren en bijsturen (ref. (TKI) HTSM, (TKI) Chemie en (TKI) Energie).

Daarnaast is het een uitdaging om op te schalen naar hogere volumes, waarvoor significante risicovolle investering (deeptech) nodig is omdat de kosten voor demoprojecten significant oplopen met de schaal waarop prestaties en betrouwbaarheid worden aangetoond.

2.2.3. Internationale positionering

Ook binnen elektrolysetechnologie vervult China 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 elektrolyzers. Beide regio's bezitten elk ongeveer 30% van de wereldwijde productiecapaciteit. Belangrijke producenten zijn bijvoorbeeld Siemens, Bosch, NEL en Nucera. De EU ondersteunt de ontwikkeling van elektrolyzers met een IPCEI. Met nieuwe investeringen kunnen de VS of China de EU mogelijk inhalen in de ontwikkeling van elektrolyzers. Internationale positionering van de kennis en kunde van Nederland focust zich op dit domein ook op de toeleverketen voor productie van elektrolyzers. Door de ligging van Nederland kunnen goede randvoorwaarden gecreëerd worden om technologieontwikkeling synergetisch vorm te geven met bredere transitie in internationale (chemische) productieketens.

2.2.4. Conclusie: kansen voor de toekomst

Over de gehele waardeketen van elektrolyse is er kennis en expertise aanwezig in Nederland. Momenteel is er echter nog geen grote focus op welke technologieën in te zetten en bestaat geen nationale productiecapaciteit voor elektrolyzers. Er zijn kansen voor Nederland om een positie in te nemen in de toeleveringsketen voor Europese elektrolyserproducenten, met minder gebruik van kritieke materialen, en een grotere productiecapaciteit voor elektrolyzers op te bouwen. Een bedreiging blijft de beschikbaarheid van kritieke grondstoffen die nodig zijn voor de productie van elektrolyzers.

Sterkte - Over de gehele waardeketen van elektrolyse is er kennis en expertise aanwezig (binnen bedrijven en kennisinstellingen). - Aanwezigheid van technologieën voor verminderde afhankelijkheid van kritieke materialen. - Sterke bedrijven in apparatuurontwerp in Nederland. - Grote afzetmarkt voor waterstof (Chemische industrie).	Zwakte - Geen centrale regie - Onvoldoende concrete gezamenlijke visie op waar Nederland verschil maakt in de volledige waterstof-waardeketen. - Een grote nationale productiecapaciteit voor elektrolyzers ontbreekt nog, net zoals een interne afzetmarkt. - Afhankelijkheid van incidentele projectfinanciering. - Vergunningverlening voor nieuwe infrastructuur / specifieke pilot niet fit-for-purpose / duurt vaak lang. - Gebrek aan investeringen ter ondersteuning van de lab-to-fab-stap. - Relatief hoge energiekosten en zeer beperkte beschikbare stroomaansluitingen
Kansen - IP opbouwen en dit exporteren naar landen die een grotere elektrolyser-productiecapaciteit hebben. - Productiecapaciteit voor (onderdelen van) elektrolyzers opschalen. - Meer onafhankelijkheid van Aziatische toeleveringsketens is een drijfveer in veel markten die kan worden benut. - Combineren van innovaties in materialen en productieprocessen.	Bedreigingen - Toekomstige beschikbaarheid van kritieke materialen. - Snelheid / investeringen van andere landen (specifiek China). - Groei waterstofmarkt vlakkt af.

3. Ambitie

3.1. Ambitie uit de NTS

De ambitie van onderstaand beschreven programma's op het gebied van batterijceltechnologie en elektrolysetechnologie is om in 2035 control points in de afzonderlijke (Europese) waardeketens in te nemen als technologie-toeleveranciers, specifiek op het gebied van materialen, machinebouw en componenten, waarbij gestart wordt met posities binnen (binnenlandse) niche markten om daarna door te groeien naar toepassingen op grotere schaal. Het streven is om eerst een initiële marktintroductie van Nederlandse technologieën (componenten en productiemachines) te realiseren om daarna verdere ontwikkelingen vorm te geven die structureel rekening te houden met circulariteit, duurzaamheid en het verminderen van de afhankelijkheid van kritieke grondstoffen.

Om dit te realiseren zijn voor de afzonderlijke marktsegment twee sterke, brede samenwerkings-consortia vormgegeven (het proactieve BCC-NL en de nog-op-te-zetten elektrolyse-tegenhanger hiervan). Deze voeren regie over de langetermijnstrategie (roadmapping) en hebben zelf voldoende middelen tot hun beschikking om proactief te zorgen voor:

- **Structurele verbinding** van commerciële partijen, kennisinstituten (universiteiten, onderzoeksinstituten en hogescholen) en investeerders met de marktkennisdeling tussen multinationals en Nederlandse (MKB) bedrijven, waardoor kennis en lessons learned in het Nederlandse kennisecosysteem landen.
- **Voldoende focus op lange-termijn (deeptech) financiering** voor volledige doorgroei van technologieontwikkeling (innovatie-agenda) tot opschaling/marktintroductie (industrie-agenda).
- Gedeelde '**stepping stone faciliteiten**' rondom demonstratie / marktintroductie van nieuwe technologie met verschillende schaalgroottes passend bij volwassenheid van de technologieën. Door productie en validatie op meerdere schaalniveaus, zowel component / equipment, als productie technologie te combineren, kan in NL een snellere ontwikkelsnelheid en innovatiecurve worden bereikt.
- **Beïnvloeding en vormgeving van overheidsrandvoorwaarden** rondom innovatiebeleid, industriebeleid, circulariteit, overheid als 'launching customer'.

3.2. Economische en maatschappelijke opgave

Met de huidige actieagenda en de onderliggende innovatieprogramma's beogen we fundamenteel het toekomstig verdienvermogen van de Nederlandse maakindustrie veilig te stellen door industriële (her)groei. Het rapport Draghi spreekt van 'sovereign capabilities', ofwel concrete, realistische, schaalbare industriële proposities. De strategie om dit te bewerkstelligen richt zich op diversificatie van bestaande Nederlandse kennis naar toepassingen van energietechnologie, naast bestaande business-segmenten zoals semicon, en healthcare. Door Nederlandse bedrijven en start-ups/scale-ups control points in de waardeketen te laten realiseren zullen Nederland, en in bredere zin Europa, meer autonoom kunnen handelen op het domein van energietechnologie, door een potentieel mindere afhankelijkheid van import en de fluctuaties daarin, maar voornamelijk door een betere technologische onderhandelingspositie. Met fundamentele

investeringen in nieuwe materialen en technologie kan de autonome energiesector in Nederland en in Europa op termijn verduurzaamd worden, waardoor op de lange termijn duurzaamheid en economische haalbaarheid gezamenlijk in beeld komen. Rondom deze kritieke materialen richt de huidige agenda zich initiëel op een te verwerven marktpositie, daarna op vermindering van gebruik van kritieke materialen en niet-duurzame technologie, om vervolgens tot uiteindelijke vervanging van huidige technologie met bij voorkeur volledig duurzame oplossingen te komen. Beide gekozen technologiesectoren richten zich op het vergroten van Nederlandse en Europese autonomie in het Cleantech-segment (batterijproductie voor e-mobility en energieopslag, transitie van de chemische industrie), terwijl batterijtechnologie ook in meerdere mate de defensieve autonomie van Nederland en Europa begint te raken.

3.3. Innovatieopgave

3.3.1. Batterijtechnologie

Innovatie-opgave

In generieke zin moet de energiedichtheid, levensduur, laadsnelheid en veiligheid van batterijcellen verbeterd worden, terwijl tegelijkertijd meer naar de duurzaamheid en circulariteit van de benodigde materialen en productieprocessen moet worden gekeken. Een strategie om te komen tot een autonome positie zal in eerste instantie gericht moeten zijn op het veroveren van een positie op de wereldmarkt om van daaruit het verminderde gebruik van kritieke materialen vorm te geven en vervolgens het gebruik hiervan te elimineren. De detail-innovatieopgaven focussen zich op introductie van materiaal- en component-innovaties in initiële nichemarkten, waarbij het Nederlandse verdienvermogen en exportvermogen voornamelijk bouwt op levering van celcomponenten en machineontwikkeling voor batterijproductie. Er moet daarnaast aandacht worden besteed aan verminderd energieverbruik voor productie, want de energieprijzen zijn in Nederland hoog. Vanuit de huidige activiteiten bijvoorbeeld op het gebied van batterijanode-innovatie, moet worden ingezet op vermindering van de afhankelijkheid in waardeketen, startend bij de toeleveranciers van de huidige start-ups/scale-ups. Hierbij moet gedacht worden aan current collectors en bijvoorbeeld silaan gas. Tegelijkertijd zullen complementaire innovaties op gebied van kathodes en elektrolyten – en productiemethodes hiervan om uiteindelijk via Design 4 Circularity energie-efficiënte recycling mogelijk te maken.

Kennis- en technologieopgave

De basisuitdaging is hoe met kennis van de fundamentele processen in batterijmaterialen en de tussenliggende raakvlakken synergie kan worden gevonden tussen fabricagemethodes van de batterijmaterialen, de resulterende materiaalstructuren en de prestaties van volledige batterijcellen. Voor nieuwe electrodetechologieën is de centrale kennisvraag hoe hoge opslagcapaciteit (bijvoorbeeld van Li- of Na-ionen) kan worden gecombineerd met hoge reversibiliteit. Aanpalende kennisvragen zijn hoe theoretische modellering kan worden ingezet voor de versnelling van de ontwikkeling van nieuwe materialen met veelbelovende eigenschappen, zoals bijvoorbeeld hoge ion-geleiding van elektrolyten, en hoe 'aging en cycle life' in de batterijcel kan worden voorspeld. Productietechnisch is de opgave hoe het ecosysteem

gezaamenlijk de verschillende productieprocessen (digitaal) beter op elkaar kan afstemmen, zodat op de lange termijn de bovenstaande innovaties samen uiteindelijk leiden tot (meer) duurzame generaties batterijen die op een economische haalbare manier kunnen worden geproduceerd.

3.3.2. Elektrolysetechnologie

Innovatie-opgave

De innovatieopgave voor elektrolysetechnologie richt zich op het opschalen van technologieën door focus aan te brengen op bewezen concepten waarbij nieuwe Nederlandse materialen, componenten en productiemethoden worden geïmplementeerd. Deze technologieën verschillen in maturiteit en uitdagingen:

- Alkaline Water Electrolysis (AWE) is het meest volwassen en robuust, maar mist flexibiliteit voor een dynamische en start-stop-bedrijfsvoering.
- Proton Exchange Membrane (PEM) is bewezen en geschikt voor een dynamisch bedrijfsvoering, maar is kostbaar door gebruik van kritieke materialen (iridium, platina) en PFAS-membranen.
- Solid Oxide Electrolysis (SOE) biedt het hoogste efficiëntiepotentieel en compatibiliteit met industriële processen, maar bevindt zich nog op een lager TRL-niveau (TRL 3-6) en vraagt om fundamentele opschaling, levensduurverlenging en produceerbaarheid.

Deze technologieën moeten robuust en flexibel worden gemaakt voor het variabele aanbod van groene elektriciteit uit zon en wind. Om marktintroductie te versnellen, is het noodzakelijk om investeringskosten te verlagen (bijvoorbeeld door Platinum Group Metals (PGM)-vrije oplossingen) en energie-efficiëntie te verhogen, zodat elektrolyzers economisch aantrekkelijker worden – vooral in de Nederlandse context met hoge elektriciteitsprijzen. Daarnaast is schaalvoordeel in productie cruciaal: van materialen tot componenten en stacks. Dit vereist substantiële, gecoördineerde investeringen in productielijnen, zoals ovens, spraycoaters bij elektrodefabrikanten, spuitgietsmachines voor frames en geautomatiseerde assemblage bij stackontwikkelaars.

Vooruitlopen op Europese regelgeving rond duurzaamheid biedt kansen, mits dit gepaard gaat met een gefaseerde marktstrategie: eerst adoptie van Nederlandse technologie, vervolgens reductie van PGM-gebruik en uiteindelijk toepassing van niet-kritieke, duurzame materialen in combinatie met geavanceerde productieprocessen. Deze aanpak sluit aan bij initiatieven zoals NXTGEN Hightech (automatisering, coatingtechnologie) en de Routekaart Elektrolyse van het Nationaal Programma Circulaire Economie (NPCE), die beide gericht zijn op opschaling en industrialisatie.

Kennis- en technologieopgave

De basisuitdaging voor elektrolysetechnologie is het verlagen van investeringskosten, het verhogen van conversie-efficiëntie en het verlengen van de levensduur onder dynamische belasting, terwijl tegelijkertijd de afhankelijkheid van kritieke materialen wordt verminderd. Dit vraagt om fundamentele innovaties in katalysatoren en beschermende coatings, gecombineerd met een optimalisatie van componenten zoals substraatgeometrie en oppervlaktebehandeling. Een belangrijk aandachtspunt is het aanbrengen van deze materialen in complexe, poreuze structuren,

zoals de Porous Transport Layer (PTL) en nieuwe membranen of diafragma's, waaronder zirkonia- en polymeercomposieten voor AWE en PFAS-vrije membranen voor PEM. Het gebruik van nieuwe materialen moet gepaard gaan met kostenefficiënte productieprocessen, wat zowel inzet van goedkopere, ruim beschikbare materialen als opschaling van verwerkingsmethoden vereist. Daarnaast is diepgaand inzicht nodig in degradatiemechanismen en hun relatie tot operationele strategieën, zoals dynamisch bedrijf en turndown-ratio, om betrouwbare stacks en voorspellende onderhoudsmodellen te ontwikkelen. Vanuit duurzaamheidsperspectief ligt de uitdaging in het realiseren van circulaire oplossingen, waaronder PFAS-vrije membranen, iridium-arme PEM en PGM-vrije AWE, zodat toekomstige regelgeving en milieu-eisen worden ingevuld.

Voor SOE zijn deze uitdagingen nog complexer. SOE werkt bij hoge temperaturen, waardoor thermische cycli en mechanische spanningen leiden tot snelle degradatie van materialen. Het vergroten van het actieve celoppervlak en het verhogen van stroomdichtheden zonder verlies van betrouwbaarheid is technisch veeleisend, terwijl tegelijkertijd defectvrije keramische lagen op industriële schaal moeten worden geproduceerd. Ook vraagt SOE om nieuwe coatings, die vrij zijn van kritieke grondstoffen, en die bestand zijn tegen corrosie en chemische interacties bij hoge temperaturen. Daarnaast is het ontwikkelen van voorspellende monitoring en sensortechnologie cruciaal om degradatie vroegtijdig te detecteren en de levensduur te verlengen. Tot slot vormt produceerbaarheid een grote uitdaging: schaalbare productieprocessen en automatisering zijn noodzakelijk om kosten te reduceren en consistentie te waarborgen.

Deze kennisopgaven vragen om een integrale benadering waarin materiaalinnovatie, maakbaarheid en duurzaamheid hand in hand gaan, ondersteund door geavanceerde testprotocollen en opschalingsfaciliteiten.

3.4. Ecosysteemopgave

In 2035 willen de gezamenlijk uitvoerende partijen significante posities invullen in de internationale waardeketens. Hierbij is het uitdrukkelijk niet de bedoeling de volledige waardeketens in Nederland te hebben, maar specifieke 'high value'-posities in de waardeketens. De ecosysteemopgave is om elkaar op de hoogte houden van de specifieke posities die Nederlandse partners willen innemen, en hoe posities elkaar kunnen versterken. Voor de twee verschillende waardeketens zijn daarom twee sterke 'agerenderende, programmerende en coördinerende' instanties nodig om het veld te overzien en afweging van verschillende (deel)belangen vorm te geven.

Er zijn echter zeer veel verschillende 'programmerende instanties' betrokken rondom agendering van innovatie-activiteiten op het gebied van Energy Materials (als duidelijkste voorbeeld dat drie werelden samen gebracht moeten worden: (TKI) HighTech, (TKI) Chemie en (TKI) Energie). Vanuit de NTS kan worden voorzien dat afstemming tussen verschillende NTS-agenda's goed moet worden vormgegeven. Door gezamenlijk een ontwikkelroadmap af te stemmen en te versnellen, kunnen partijen specifieke kritische stappen zetten richting proof-points om daarna een bredere klantenbasis binnen en buiten Nederland te bedienen.

Omdat de opschaling van technologische oplossingen een belangrijk aandachtspunt is voor de huidige technologieën, is aansluiting van investeerders binnen de ecosystemen een essentieel en een gecoördineerd industriebeleid aansluitend op het innovatiebeleid een noodzaak. Samenvattend is in de afgelopen periode het rapport Wennink vormgegeven met brede aanbevelingen, ook rondom Energietechnologie, zoals bijvoorbeeld:

1. Randvoorwaardelijke infrastructuur
 - De energietransitie vraagt om een geïntegreerde infrastructuurstrategie met nationale regie, investeringen op schaal en grensoverschrijdende samenwerking. Hiervoor moet een departement-overstijgende entiteit komen om deze opdracht integraal aan te pakken. Zo wordt de basis gelegd voor duurzame industrie en innovatie.
2. Regelgeving en institutionele wendbaarheid
 - Regelgeving moet voorspelbaar, flexibel en innovatievriendelijk worden. Een wendbare overheid, met centrale regie en een 'kan wél'-cultuur, is essentieel voor een investeringsklimaat waarin nieuwe technologieën tot stand komen.
3. Kennis, talent en competentieontwikkeling
 - Talentontwikkeling moet worden gezien als systeemvoorwaarde voor de energietransitie. Zonder structureel beleid op onderwijs, scholing en kennisvalorisatie is Nederland afhankelijk van buitenlandse kennis en menskracht.
4. Financiering, kapitaal en investeringsstructuren
 - De overheid moet een actieve rol spelen in het verlagen van investeringsrisico's en het opbouwen van een robuuste financieringsketen. Private en publieke investeringen moeten elkaar versterken via duidelijke spelregels, garanties en langetermijnvisie. Een Nationale Investeringsinstelling kan hierbij helpen.

3.4.1. Ecosysteem batterijtechnologie

Binnen batterijtechnologie staat samenwerking van het Nederlandse ecosysteem met Europa centraal. Op lopende initiatieven, waaronder BCC-NL, de deelname Nederlandse partijen in BEPA en RVO markt-thema Zuid-Korea, zullen verder moeten worden ontwikkeld om gezamenlijk te focussen op eerste marktintroductie. Bedrijven met complementaire technologie (eerst in de toeleveringsketen van de huidige Nederlandse bedrijven) kunnen eventueel worden overgehaald om zich ook in Nederland te vestigen om zo het technologie-ecosysteem te versterken en te versnellen. Denk bijvoorbeeld aan bedrijven die actief zijn in kathode- en elektrolytenttechnologie.

Verder zal BCC-NL zich moeten richten op het versterken van de verbinding tussen celtechnologie-ontwikkelaars en Nederlandse eindgebruikers verderop in de waardeketen. Hier wordt gedacht aan heavy-duty stationary- of aviation-sectoren, waarbij defensie echter door de recente geopolitieke ontwikkelingen ook nadrukkelijk aangesloten moet worden (ref. drones). Het is belangrijk dat deze eindgebruikers een gezamenlijke timeline opstellen die inzicht geeft wanneer welke end-users aan kunnen sluiten op de technologische ontwikkelingen. Het is duidelijk dat op dit moment een gat in de waardeketen bestaat op celdesign en celproductie om de link tussen pakket-specificaties richting celtechnologieën vorm te geven.



Binnen het ecosysteem zal BCC-NL een (nog sterkere) samenwerking tussen bedrijven, overheden, regionale ontwikkelingsmaatschappijen en NFIA / Invest-NL moeten realiseren.

3.4.2. Ecosysteem elektrolysetechnologie

Binnen elektrolysetechnologie – en de bredere waterstofketen in Nederland – is de uitdaging om een verbeterde samenwerking door de gehele waterstof keten vorm te geven. Veel organisaties en agenda's lijken een 'monopolie' op het innovatiedomein waterstof te claimen, maar in werkelijkheid vertegenwoordigen veel organisaties een specifiek deel van de lange waardeketen. Elk segment van de waardeketen heeft zijn eigen inhoudelijke expertise, innovatienoodzaak en benodigde financiering. Kennisdeling en het orkestreren van de innovatie (innovation orchestration) door deze hele keten is cruciaal voor een efficiënte innovatie. Alleen door gezamenlijke inspanning kan Nederland vooroplopen in de ontwikkeling van (circulaire) waterstofproductie.

Zo is bijvoorbeeld afstemming nodig tussen de verschillende NTS-agenda's (Energy Materials en Process Technologies). Daarbij is behoefte aan een verbeterde en gedetailleerdere visie op 'Waterstof in Nederland', met specifieke aandacht voor:

- het verdienvermogen van bedrijven in het begin van de waardeketen in Nederland, zoals geïdentificeerd in de huidige NTS-agenda, en
- noodzakelijke samenwerking binnen Europa.

3.5. Inhoudelijke focus en samenhang van het programma

De twee afgebakende marktsegmenten binnen Energy Materials richten zich op twee brede waardeketens met een vergelijkbare opbouw, technologieontwikkeling op materials, productiemachines en componenten. Ze hebben potentieel verdienvermogen door middel van introductie van nieuwe hightech-oplossingen aan de voorkant van waardeketens. De technologie-ontwikkelingen hebben synergie en gezamenlijke uitdagingen op het gebied van:

- materialen, zoals maakbaarheid, duurzaamheid, stabiliteit, multi-scale ontwerp en eigenschappen,
- coatings in poreuze materialen, en
- hightech machinebouw.

Beide domeinen zijn relatief jong en moeten zich naast benodigde innovatie ook richten op de opschaling van de technologische oplossingen. De innovatieprogramma's die op beide domeinen worden voorgesteld binnen de huidige actieagenda hebben een overlap aan lagere en hogere TRL-activiteiten. De logische combinatie hiervan beoogt de hoeveelheid fundamentele, experimentele en industriële ontwikkeling op een juiste manier aan elkaar koppelen.

4. Innovatieprogramma's

4.1. Innovatieprogramma batterijceltechnologie

4.1.1. Achtergrond

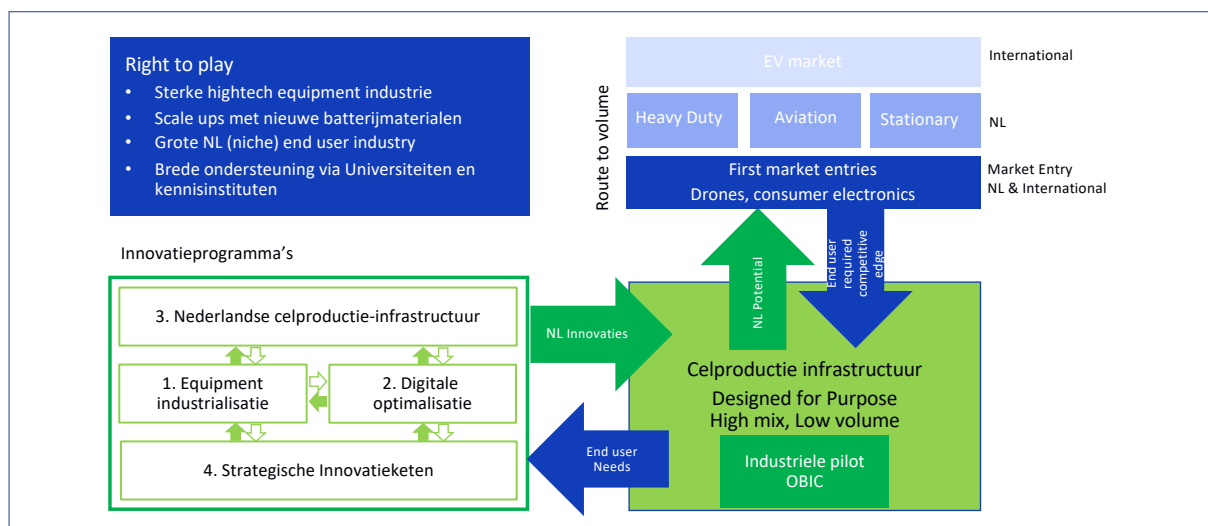
Nederland kent een groot aantal bedrijven in de batterijsector die op verschillende plekken in de waardeketen actief zijn. Geavanceerde batterijmateriaal bedrijven, bijvoorbeeld Carbon-X, Leyden Jar, E-magy en LionVolt, en coating bedrijven zoals SALD, Powall, Kalpana, SparkNano, richten zich op het verbeteren van de prestaties van Li-ion-batterijen door het verbeteren van materialen. Machinebouwers optimaliseren productietools en processen om steeds efficiënter cellen te produceren. Daarnaast wordt aan de volgende generatie van batterijen gewerkt, zoals vastestof-batterijen in combinatie met silicium-anodes en Li-metalen.

Ook kent Nederland een groot aantal bedrijven die zich bezighouden met batterij-toepassingen. Deze bedrijven zijn in bijna alle segmenten van Li-ionen-batterijen actief, van consumer electronics (zoals Rebel Cactus), tot drones (zoals Tulip Tech) en vliegtuigen (bijvoorbeeld Elysian Aircraft), maar ook zware voertuigen (zoals VDL, ELEO, Intercel) en schepen (Damen Shipyards). Deze toepassingen zijn op dit moment nog kleinschaliger dan in de automotive sector waar grote volumes en lage productiekosten het produceren van cellen in gigafactories vereisen. Deze fabrieken zijn geoptimaliseerd op kosten en verliezen daardoor hun flexibiliteit om batterijmaterialen en -ontwerpen snel te veranderen. Dat betekent dat ze niet geschikt zijn om zich te richten op specifieke toepassingen. Hierdoor ontstaat in Nederland een unieke mogelijkheid om met de opzet van een flexibele, kennisgedreven celproductie-infrastructuur de verbinding te leggen tussen specifieke performancebehoeften in de verschillende applicaties en de ontwikkelde geavanceerde materialen en productieprocessen. Zo hebben de eisen die geavanceerde toepassingen aan Li-ion-batterijen stellen, impact op materiaalkeuze, het cel-, batterij- en systeemontwerp en de procestechnologie om deze producten te vervaardigen. Naast de technische specificaties spelen ook factoren zoals productiekosten, beschikbaarheid van materialen en schaal een rol.

Het opzetten van een relatief kleinschalige, flexibele en innovatieve celproductielijn biedt een onderscheidende kwaliteit waarmee niet alleen batterijinnovaties worden versneld, maar ook de marktpositie van de Nederlandse eindgebruiker industrie wordt versterkt. Essentieel voor een dergelijke productielijn is een hoge mate van flexibiliteit, lage opstartkosten voor nieuwe procestechnologieën of celontwerpen en de mogelijkheid om dergelijke cellen met voldoende kwaliteit in kleine series (x100MWh) te produceren. Lage productiekosten zijn hierbij van achtergesteld belang. Om dit te realiseren worden vier innovatieprogramma's voorgesteld.

4.1.2. Programmastructuur

Figuur 4.1 geeft een schematische weergave van de relatie tussen de voorgestelde Innovatieprogramma's (IP) en de eindgebruikersmarkten. Het doel van deze IPs is de opbouw van een waardeketen voor de productie van batterijcellen die de industrialisatie van innovaties versnelt en highperformance-niches van de Nederlandse en Europese eindgebruikers passend kan bedienen.



Figuur 4.1

Eerdere initiatieven zoals onder meer via het Battery Competence Cluster-NL, hebben bijgedragen aan een solide organisatie en de opbouw van het batterij-ecosysteem, dat inmiddels uit enkele honderden bedrijven bestaat. Het ecosysteem omvat een sterke kennisbasis, ingezet en aangedreven door

- laag TRL-onderzoek binnen bijvoorbeeld NWA-ORC BatteryNL,
- de ontwikkeling van productieapparatuur voor nieuwe materialen via het groeifonds NXTGEN Hightech, en
- het bevorderen van strategische relevantie door de focus op circulaire materialen in het groeifonds Materials Independence & Circular Batteries (NGF3 MI&CB).

Een volwaardig batterij-ecosysteem en een complete waardeketen zijn essentieel om de economische kansen optimaal te benutten en de strategische relevantie verder te versterken. De volgende stap om aan die voorwaarden te voldoen vereist het slaan van bruggen tussen verschillende domeinen. Cruciaal hierbij is een sterke koppeling tussen

- de behoeften en commitment van eindgebruikers in high-capacity nicheapplicaties zoals Defensie (o.a. drones), aviation, medical, consumer electronics en zwaar transport, die hun product onderscheidend willen maken en
- het potentieel van nieuwe cel technologieën.

Dit vereist een infrastructuur voor toepassingsgericht ontwerpen, produceren en assembleren van batterijcellen op basis van nieuwe en reeds bestaande materialen en componenten. Ofwel er is flexibiliteit nodig in de productieprocessen van cellen, seriegroottes en celontwerpen, waarmee de Nederlandse industrie zich duidelijk onderscheidt van de Aziatische leveranciers. Het onderscheidend vermogen en de autonomie worden verder versterkt door een stapsgewijze adaptatie in de toeleveringsketen van nieuwe circulaire materialen, batterijcomponenten en productieapparatuur van onze Nederlandse en/of Europese industrie.

De beoogde koppeling fungeert als aanjager voor de industrialisatie van applicatiegerichte innovaties waarmee de Nederlandse industrie zich kan onderscheiden en de strategische weerbaarheid wordt versterkt. De aanpak biedt ontwikkelaars van batterijmaterialen de mogelijkheid om via kleinere markten stapsgewijs op te schalen naar grootschalige toepassingen, waar kostenefficiëntie steeds belangrijker wordt. Dit bepaalt hun 'Route to volume', waarbij de productiekosten dalen naarmate de productieschaal toeneemt dankzij leereffecten en efficiëntieverbetering.

Ook wordt de internationale samenwerking hiermee aangejaagd omdat de materialen en applicatiebehoeften niet alleen vanuit Nederland hoeven te komen. Zo heeft Nederland een sterke positie op anode-materialen, maar veel minder op het gebied van kathoden. Juist een samenwerking met Europese partners die zich in specifieke schakels van de keten hebben gespecialiseerd, kan leiden tot een toegankelijk en stuurbaar ecosysteem voor Nederland.

Veel van het benodigde ecosysteem is al opgezet in lopende of voorziene programma's. In aanvulling daarop zijn vier Innovatieprogramma's (IP's) gedefinieerd.

1. **Innovatieprogramma 1: Versnelling van Equipment-industrialisatie (front-end)**
In het verlengde van NGF3 MI&CB wordt meer energie-efficiënte productieapparatuur voor de nieuwe circulaire materialen (front-end) opgeschaald naar een geloofwaardig niveau voor toepassing in GWh-celproductiefabrieken. Het gaat om unieke materialen met afzetmogelijkheden in een wereldwijde markt.
2. **Innovatieprogramma 2: Digitale optimalisatie van batterijproductieprocessen**
Flexibele productie leidt vaak tot extra downtime, aanpassingen en herstart van processen. Met onze sterke industriële hightech-basis en universitaire kennis ontwikkelen de partners methoden om dit vergaand te automatiseren en te versnellen.
3. **Innovatieprogramma 3: Nederlandse Celproductie-Infrastructuur (back-end)**
Ontwikkeling van flexibele productie-infrastructuur voor batterijcellen, geschikt voor diverse inputmaterialen, adoptie van innovatieve batterijmaterialen (uit NGF3 MI&CB) en productie van cellen op basis van eindgebruikersbehoeften.
4. **Innovatieprogramma 4: Strategische Innovatieketen**
Versterkt de positie van Nederlandse start-ups & scale-ups door innovaties die de levensduur van hun batterijmaterialen verlengen en creëert een kraamkamer voor duurzame Nederlandse batterijtechnologie, gericht op strategische onafhankelijkheid.

Complementair aan de hierboven vormgegeven IP's zijn de opschaling van deze technologieën voor marktintroductie en de bijbehorende investeringen hiervoor geagendeerd in de voorbeeld investeringsprogramma's GigaNode en BatCelFab, vanuit het Rapport Wennink.

In Bijlage 1 zijn de innovatieprogramma's uitgebreid beschreven; in deze actieagenda staan de samenvattingen.



4.1.3. Innovatieprogramma 1: Versnelling van Equipment-industrialisatie voor productie duurzame batterijmaterialen

Doel:

Opschaling van innovatieve productietechnologieën voor duurzame batterijmaterialen zoals siliciumanodes, nieuwe kathodes, natrium-ion en vaste elektrolyten in NL/EU.

Het programma ondersteunt en versnelt de industriële opschaling van duurzame batterijproductietechnologieën in Nederland en Europa, en versterkt daarmee onze autonomie en weerbaarheid. Zo zijn veel Europese (mega) factories voor hun productieapparatuur nog sterk afhankelijk van Azië. Het programma faciliteert de overgang van laboratoriumprocessen naar GWh-schaalproductie, met inzet van energie-efficiënte apparatuur, geautomatiseerde procesoptimalisatie voor nextgen-materialen waaronder siliciumanodes, nieuwe kathodes, natrium-ion en vaste elektrolyten.

Programmalijnen/kennisvragen:

- Energie-efficiëntie in productie door opschaling van technologieën die het verbruik sterk verlagen, zoals dry processing, artificial SEI en mini dry rooms.
- Integratie in celproductie van innovatieve materialen zoals silicium- en lithium-metaalanodes, vaste elektrolyten en natrium-ion chemicaliën, inclusief procesaanpassingen voor veiligheid, levensduur en consistentie.
- Technische en economische haalbaarheid door evaluatie van kosten, duurzaamheid en ketenrobuustheid, inclusief milieu-impact/EU-batterijverordening EU2023/1542.

Plan van aanpak/Werkpakketten:

WP1.1 Proces- en productieconcept ontwikkeling voor NEXTGEN-batterijmaterialen

Partners ontwikkelen en valideren productieroutes voor NEXTGEN-elektroden en -elektrolyten (zoals in NGF3 Circular Batteries). Dit omvat duurzame coatingtechnieken, beschermende interfacelagen en compatibiliteitsstudies voor lithium-metaal-, siliciumrijke, vastestof- en natrium-ion-chemicaliën. Procesmodellering en energie-efficiëntieanalyses toetsen haalbaarheid en definiëren schaalbare apparatuurvereisten. Het resultaat is een gevalideerde set productieconcepten en specificaties die geschikt zijn voor pilotschaal en industriële adaptatie.

WP1.2 Apparatuurontwerp, prototyping en procesintegratie

Resultaten van WP1.1 worden vertaald naar modulaire, energie-efficiënte productieapparatuur. Partners ontwerpen en prototypen machines met automatisering en inline monitoring voor stabiele, continue productie. Demonstrators worden getest op pilotschaal om doorvoer, betrouwbaarheid en processtabiliteit te bevestigen. Dit vormt de basis voor opschaling en industriële toepassing.

WP1.3 Industriële opschaling, ketenborging en lijnintegratie

Implementeert gevalideerde processen en apparatuur voor de batterijmaterialen in opgeschaalde industriële productieomgevingen met een robuuste toeleveringsketen voor grondstoffen,

apparatuurmodules en serviceondersteuning, om productiecontinuïteit en kostenefficiëntie te waarborgen. Digitale procescontrole en datagedreven kwaliteitsborging maken betrouwbare productie op grote schaal mogelijk. Validatie vindt plaats in nationale pilot- of pre-productiefaciliteiten voor batterijcellen, zoals het Open Battery Industrialization Center (OBIC), gevolgd met integratie in GWh-schaal productielijnen.

WP1.4 Ondersteuning sector brede adaptatie

Ondersteuning sectorimplementatie van nieuwe processen en materialen via opleidingsmateriaal, operationele richtlijnen en bijdragen aan opkomende industriestandaarden. Kennisverspreiding gebeurt binnen een gestructureerd IP- en publicatiekader, waarmee zowel ecosysteemgroei als bescherming van concurrentievoordeel worden geborgd.

Gantt chart

Werkpakket	Publiek (€ mln)	Privaat (€ mln)	Globale looptijd									
			2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
1. Proces & Concept Ontwikkeling	3	3										
2. Prototyping & Integration	7	7										
3. Industrial scaleup & Integration	10	10										
4. WP4 Sector brede adaptatie	1	1										
	21	21										

4.1.4. Innovatieprogramma 2: Digitale optimalisatie van batterijproductieprocessen

Doel:

Digitale optimalisatie van productieprocessen om nieuwe materialen snel te integreren en flexibiliteit te realiseren in een high-mix, low-volume-omgeving. Deze aanpak verhoogt reproduceerbaarheid, verlaagt scrap rates en verbetert efficiëntie. Door data-gedreven en AI-ondersteunde processen koppelen we materiaalinnovaties en celdesigns aan een adaptieve, hoog-efficiënte productieomgeving, direct gevoed door onze universitaire kennisbasis en gekoppeld aan toepassingsgericht ontwerp in WP3.1.

Programmalijnen/kennisvragen:

- **Digitale optimalisatie van productieprocessen:** ondersteuning integratie en optimalisatie nieuwe productieprocessen met van geavanceerde numerieke modellen, data-analyse methodieken en data generatie op basis van meetgegevens en testresultaten.
- **High-throughput inline QA-data-acquisitiesystemen:** Ontwikkeling van geavanceerde QA-acquisitiesystemen benodigd voor de digitale optimalisatie van de productieprocessen.

Plan van aanpak/Werkpakketten:

WP2.1 Geavanceerde digitale modellen

Binnen de digitale transformatie van batterijproductie ligt de focus op het ontwikkelen van numerieke- of correlatiemodellen (relatie QA-data – celprestaties), data-analysemethodieken (verkrijgen statisch betrouwbare data) en AI-gebaseerde optimalisatietools, gericht op kritische prestatie-indicatoren (KPI's) zoals scrap rate, kwaliteitsvariaties, productietijd, energieverbruik en celprestaties. In dit werkpakket gaat het om het opstellen van de correlatiemodellen die deze KPI's direct koppelen aan (inline) meetbare kwaliteitsparameters. De modellen worden gevalideerd met een systematisch opgezette set experimenten van elke processtap tot de totale celproductie, waarin steeds de KPI's op celniveau worden geëvalueerd. Uiteindelijk maakt dit real-time procesaanpassingen mogelijk op basis van QA-data en applicatie gerichte prestatievoorspellingen.

WP2.2 High-throughput inline QA-data-acquisitiesystemen

Ontwikkeling van geavanceerde QA-acquisitiesystemen voor nieuwe batterijcelontwerpen en materialen. Deze systemen dienen voor het in-line optimaliseren van productieprocessen en het vullen van databases ten behoeve van modelontwikkeling. Via de correlatiemodellen van WP2.1 wordt het aantal te monitoren parameters voor de 15 tot 20 verschillende productiestappen zoveel mogelijk beperkt of geïntegreerd, wat de complexiteit van het uiteindelijke QA-systeem wel verhoogt. Ook de introductie van de nieuwe materialen met bijvoorbeeld 3D-structuren draagt hieraan bij. De uitdaging is om in-line QA-systemen te ontwikkelen die het proces op de essentiële parameters kunnen aansturen waarvan de kosten ruimschoots worden gecompenseerd door verhoogde KPI's of versneld opwerken van de productie na modificaties.

WP2.3 Geautomatiseerde optimalisatie strategieën

Door inzet van inline monitoring, modelgebaseerde optimalisatie, geautomatiseerde inspectie en AI-analyse worden strategieën ontwikkeld voor robuuste procesbeheersing. Het doel is een stabiele, grootschalige productie met realtime foutdetectie en adaptieve parametersturing. De opgebouwde data en ervaring vormen de basis voor een AI-gebaseerde optimalisatietool die niet alleen productieprocessen versnelt en verbetert, maar ook het innovatieproces ondersteunt. Hierdoor kunnen nieuwe materialen en celontwerpen sneller worden geïntegreerd in geavanceerde toepassingen.

Gantt chart

Werkpakket	Publiek (€ mln)	Privaat (€ mln)	Globale looptijd									
			2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
1. Digitale modellen	3	3										
2. High throughput inline QA data acquisition	3	3										
3. Optimalisatie strategieën	2	2										
	8	8										



4.1.5. Innovatieprogramma 3: (Nederlandse) Cel productie-Infrastructuur

Doel:

Opbouw van een flexibele productie infrastructuur voor batterijcellen geschikt voor snelle integratie van innovaties en gericht op KPI's van diverse Nederlandse eindgebruikers.

Dit programma creëert een route om opkomende batterijtechnologieën snel op te schalen naar productie, waardoor vroege inkomsten en versnelde groei mogelijk worden. Het behoud van cruciale intellectuele eigendom voorkomt dat kennis/IP over integratie in lithium-ioncellen naar buitenlandse partijen verdwijnt, wat markttoegang zou beperken. Tegelijkertijd wordt een flexibele toeleveringsketen opgezet voor maatwerk batterijcellen, ter ondersteuning van Nederlandse industrieën in hun elektrificatieproces en in lijn met klimaatdoelstellingen. Het initiatief heeft het potentieel om aanzienlijk bij te dragen aan het BBP, werkgelegenheid te creëren en Nederland wereldwijd te positioneren in een van de snelst groeiende markten, terwijl een kenniskloof in batterijcelontwikkeling wordt gedicht. De strategische autonomie wordt versterkt door componenten geleidelijk te vervangen door Nederlandse materiaalinnovaties, zoals lithium-metaal- en siliciumanodes in plaats van grafiet.

Programmalijnen/kennisvragen:

- **Design for purpose:** Ontwikkeling van geïntegreerde ontwerp kennis en digitale engineeringtools waarmee batterijcellen (en -packs) geoptimaliseerd kunnen worden voor specifieke toepassingen waaronder luchtvaart, drones en zwaar transport.
- **Flexibele productie:** Ontwikkeling van een flexibele of high-mix, low-volume productieketen gericht op celassemblage, waarbij snel kan worden geschakeld tussen het gebruik van verschillende innovatieve materialen, celontwerpen en chemicaliën, ten behoeve van verschillende toepassingen met een breed draagvlak bij Nederlandse eindgebruikers in high-performance niches.
- **Opzet batterijcel-productieketen:** Opzet van een volledige waardeketen met toeleveranciers van grondstoffen en/of componenten voor de celproductielijn, vereist de ontwikkeling van validatie- en integratieprocessen.

Plan van aanpak/Werkpakketten:

WP3.1 Design-for-purpose

Ontwikkeling van geïntegreerde ontwerp kennis en digitale engineeringtools voor het ontwerpen en optimaliseren van batterijcellen en -packs, inclusief recycling. Dit omvat materiaalkarakterisering, celontwerp en selectie van productieprocessen om te voldoen aan applicatie-eisen en kwaliteitsnormen. Door materiaalkennis (elektrochemie, mechanische en thermische eigenschappen) te combineren met celarchitectuur (laagopbouw, elektrodeconfiguratie, separatoren), kunnen prestaties zoals energiedichtheid, levensduur, veiligheid en thermisch beheer worden afgestemd op toepassingen zoals luchtvaart, drones en zwaar transport. Design for recycling is hierin essentieel voor de kostenbeheersing. Het programma ontwikkelt ook een baseline-celontwerp als referentie voor prestaties en toekomstige kwaliteitscontrolesystemen.



WP3.2 Flexibele productie (OBIC <5MWh/jaar)

Ontwikkeling van een flexibele high-mix, low-volume-productieketen voor celassemblage, die snel kan schakelen tussen innovatieve materialen, ontwerpen en chemicaliën. De focus ligt op het backend-proces, waar componenten worden geïntegreerd en het celdesign wordt geoptimaliseerd voor toepassingen zoals luchtvaart, drones en zwaar transport. Onze strategische relevantie wordt verder versterkt door wereldwijd ingekochte componenten geleidelijk te vervangen door Nederlandse en Europese innovaties, zoals lithium-metaal- en siliciumanodes ter vervanging van grafiet.

Een baseline industriële celproductie lijn wordt opgezet binnen NGF3 MI&CB in het Battery Industrialisation Center (OBIC). Dit werkpakket voegt daaraan toe de ontwikkeling, integratie en kwalificatie van nieuwe processen en equipment in een volledige productieproces.

WP3.3 Nederlandse Startpositie batterijcel-productieketen (Backend part, ≈1 GWh/jaar)

Op basis van lessen geleerd met de OBIC (WP3.2) worden die kritische productietools en processen in de flexibele batterijproductie-infrastructuur, gericht op high-mix, low-volumetoepassingen met hoge toegevoegde waarde (WP3.1) opgeschaald naar (≈1)GWh schaal. Daarnaast richt dit werkpakket zich op de ontwikkeling van kwalificatie- en verificatiemethoden ter ondersteuning van de selectie van leveranciers in de toeleveringsketen, met nadruk op het gebruik van Europese technologie en toeleveranciers.

Deze eerste batterijcel-productieketen kan later worden gerealiseerd via het 'Projectvoorstel BatCelFab' uit het 'rapport Wennink' (zie 4.1.9). Door de focus op het backend-deel blijven de kosten beperkt tot 20-30% van een volledige batterijfabriek.

WP3.4 Adoptie geavanceerde batterijmaterialen en productie equipment in de batterijcel-productieketen

Dit werkpakket richt zich op aanpassen van celproductieketen (Backend WP3.3) zodat ook nieuwe materialen en componenten zoals ultradunne metaalfolies, vaste elektrolyten en alternatieve actieve componenten zoals Si-, Li-Me anodes (all Frontend) kunnen worden verwerkt. Dit gaat in eerste instantie om materialen van onze Nederlandse start-ups/scaleups, maar kan via internationale samenwerking het ecosysteem verder versterken.

WP3.5 Strategische extensie en EU-samenwerking in batterijproductie

Continue roadmapping om strategische keuzes te maken binnen de complexe, snel evoluerende batterijwaardeketen. Door variatie in celontwerpen, materialen en processen is volledige flexibiliteit in één faciliteit niet haalbaar. Dit werkpakket ontwikkelt daarom een meerjarenplan met slimme materiaal- en equipmentsselecties, in nauwe samenwerking met Nederlandse en Europese partners.

Gantt chart

Werkpakket	Publiek (€ mln)	Privaat (€ mln)	Globale looptijd									
			2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
1. Design-for-purpose	4	4										
2. Flexibele productie	8	8										
3. NL startpositie*	10	10										
4. Adoptie in productieketen	2	2										
5. Strategische extensie	2	2										
	26	26										

*Exclusief Wennink initiatief

4.1.6. Innovatieprogramma 4: Strategische Innovatieketen

Doel

Dit programma richt zich op de ontwikkeling van geavanceerde, duurzame batterijmaterialen voor de volle breedte van applicaties (wearable electronics, drones, EV, zwaar transport, luchtvaart en stationair). De doelstellingen van dit programma zijn:

1. Het versterken van de positie van de Nederlandse start-ups en scale-ups voor batterijmaterialen door directe benutting van de sterke universitaire kennisbasis voor batterijmaterialen, interface engineering en onderzoek.
2. Het vormen van een kraamkamer voor duurzame batterijtechnologie die Nederland (en de EU) strategisch onafhankelijk maakt, specifiek bouwend op Nederlandse kennis en kunde.

Effectieve integratie en coördinatie met Innovatieprogramma's 1 tot en met 3 maximaliseert de potentie van de innovaties in dit programma.

Programmalijnen/kennisvragen:

Innovatieve batterijconcepten voor hoge energie- en/of vermogensdichtheid met als centrale kennisvragen:

- wat de beperkte reversibiliteit veroorzaakt,
- hoe efficiënte ladingstransport kan worden gerealiseerd,
- met welke (schaalbare) materiaal-strategieën deze kan worden verbeterd en
- hoe deze technologie materialen ontworpen kunnen worden voor effectieve re-manufacturing, reuse en recycling.
- Materiaal en batterijinnovaties voor circulaire veilige, goedkope stationaire batterijen: Ontwikkeling van batterij componenten en concepten gericht op water-elektrolyten en elektrodes op basis van organische materialen en voorradige overgangsmetalen, op basis van bestaande kennis in Nederland.

Plan van aanpak/Werkpakketten:

WP4.1 Voorbij aan de huidige Li-ion-technologie, batterijmaterialen voor hoge energie en of vermogensdichtheden op basis van Li en Na als ladingdragers.

Ontwikkeling van elektrolyten die de levensduur van huidige start-up/scale-up-technologie verbetert en toekomstige anode/kathode-technologie mogelijk maakt. Dit betreft:

1. 'Weakly solvating' vloeibare elektrolyten vrij van PFAS.
2. Polymeer/hybride-elektrolyten voor vastestof-batterijen met verhoogde veiligheid en energiedichtheid.
3. Zwavel/halide vastestof-elektrolyten compatibel met opschaling in celproductie-infrastructuur (IP2 en 3) voor vastestof-batterijen met verhoogde veiligheid en energiedichtheid.

Ontwikkeling van anodes en kathodes die de energiedichtheid en vermogensdichtheid van Li-ion en Na-ion technologie verhoogt. Dit betreft:

1. Anodes vrij van kritische elementen met hoge opslagcapaciteit en snel laden voor Li-ion en Na-ion technologie (specifiek: legeringen, oxides, biosourced hard carbons, Na-metaal),
2. Kathodes vrij van kritische elementen met hoge opslagcapaciteit en laadsnelheid voor Li-ion en Na-ion technologie (specifiek: Li-zwavel, Li-lucht, Na-zwavel).

Deze materiaalinnovaties doorlopen grofweg drie fases:

- Fase 1 (jaar 1- tot max 4), materiaalontwerp, ondersteund door modelleren op atomaire schaal, AI versterkt en de ontwikkeling van een syntheseprotocol (gram schaal), initiële knooppceltests en karakterisering ter optimalisatie van de materiaalcompositie en het syntheseprotocol.
- Fase 2 (jaar 2 - tot max 7), syntheseoptimalisatie (>gram schaal), volledige celtests, knoop/pouch celtests.
- Fase 3 (jaar 4- tot max 10), integratie in samenwerking met innovatieprogramma's 2 en 3.

WP4.2 Innovatieve concepten voor hoge energie en/of vermogensdichtheid:

Ontwikkeling van nieuwe batterijconcepten en -materialen die nieuwe generaties hoge energie- en/of vermogensdichtheid batterijen mogelijk maken, vrij van kritische grondstoffen en met ladingdragers anders dan Li and Na-ion. Dit betreft concepten met potentie en kennisbasis in Nederland zoals:

1. Duo-metaal vastestof-batterijen op basis van duaal iongeleidende vastestof-elektrolyten, met als voordeel extreme laadsnelheid en eenvoudige productie.
2. Mg-ion batterijen, met in potentie vergelijkbare tot hogere energiedichtheden vergeleken met Li- en Na-ion technologie, met als voordeel duurzaam te winnen, niet kritische grondstoffen.
3. Polymeergebaseerde batterij-supercondensatortechnologie voor extreem snel laden op basis van niet kritische ladingdragers zoals Zn^{2+} en ammonium ionen.

Deze materiaalinnovaties verlopen grofweg 3 fases:

- Fase 1 (jaar 1- tot max 6), ontwikkeling syntheseprotocol (gram schaal), initiële knoopceldtesten en karakterisering ter optimalisatie van de materiaalcompositie en syntheseprotocollen.
- Fase 2 (jaar 5 - tot max 8), optimalisatie van synthese (>gram schaal), volledige celdtesten, knoop- en pouchcelltesten.
- Fase 3 (jaar 7- tot 10) start integratie in samenwerking met Innovatieprogramma's 2 en 3.

WP4.3 Materiaal en batterijinnovaties voor circulaire veilige, goedkope stationaire batterijen:

Ontwikkeling van nieuwe batterijconcepten en -materialen voor circulaire, veilige, goedkope groteschaal-stationaire batterijen, op basis van waterige elektrolyten. Voorbeeldconcepten met potentie en kennisbasis in Nederland zijn:

1. Organische elektrodes voor Na-waterbatterijen, op basis van goedkope grondstoffen en lage CO₂ uitstoot.
2. Flow-cells op basis van organische vloeibare elektrodes, schaalbare opslagtechnologie op basis van goedkope grondstoffen en lage CO₂-uitstoot.
3. Metaal-lucht-batterijen op basis van goedkope en voorradige grondstoffen, zoals bijvoorbeeld ijzer-lucht-batterijen.

Deze materiaalinnovaties verlopen grofweg in drie fases:

- Fase 1 (jaar 1- tot max 6), ontwikkeling syntheseprotocol (gram schaal), initiële knoopceldtesten en karakterisering ter optimalisatie van de materiaalcompositie en het syntheseprotocol.
- Fase 2 (jaar 5 - tot max 8), optimalisatie synthese (>gram schaal), volledige celdtests, knoop/ pouch celltesten.
- Fase 3 (jaar 7- tot 10) start integratie i.s.m. Innovatieprogramma's 2 en 3.

WP4.4 Onderzoeksplatformen voor geavanceerde batterijproductie:

Specifieke onderzoeksplatformen die de brug slaan tussen materiaalinnovatie met lage TRL en industrialisatie met hoge TRL zijn nodig voor innovatieve richtingen in geavanceerde productie. WP4.4 richt zich op onderzoek naar de maakbaarheid van nieuwe materialen en celconcepten in een laag TRL. Waar innovatieprogramma 1 zich richt op apparatuurontwikkeling en industriële opschaling, en programma 2 zich richt op digital twins, kwaliteitsborging en AI-gebaseerde procesbesturing, bestudeert WP4.4 complete productieketens experimenteel op TRL 3-5 in kleinschalige flexibele onderzoekspilotlijnen. Bij de kennisinstellingen maken satellietonderzoeksplatformen onderzoek mogelijk naar materiaalproductie (bijv. slurrymenging, rol-naar-rolcoating en kalanderen, assemblage, vorming en toepassing van mini-omgevingen), procesvensters, degradatiemechanismen en duurzame routes (bijv. op waterbasis) voor de materialen uit WP4.1-4.3. Deze platformen genereren referentiecellen, datasets, kennis en gekwalificeerde procesroutes die worden overgedragen aan de centrale OBIC-infrastructuur in innovatieprogramma 3 en aan programma's 1-2. Zo wordt ervoor gezorgd dat nieuwe batterijmaterialen sneller en met een lager technisch- en investeringsrisico kunnen worden opgeschaald.

Gantt chart

Werkpakket 4.x	Publiek (€ mln)	Privaat (€ mln)	Globale looptijd									
			2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
1. Voorbij Li-ion	3	3										
a. Materiaal ontwerp												
b. Optimalisatie												
c. Integratie												
2. Innovatieve concepten	2	1										
a. Synthese protocol												
b. Optimalisatie												
c. Integratie												
3. Stationaire batterijen	2	1										
d. Synthese protocol												
e. Optimalisatie												
f. Integratie												
4. Onderzoeks platformen	2	2										
	9	7										

4.1.7. Toepassingsgebieden batterijcellen

In Nederland bestaat een breed spectrum met eindgebruikers voor batterijcellen, binnen sectoren als zwaar transport, luchtvaart en stationaire energieopslag. Voor elke applicatie binnen een sector kan een toegespitst batterijontwerp het verschil maken voor de concurrentiepositie van het eindproduct in de markt (bus, drone, boot, etc.). Aan de andere kant is voor innovaties de zogeheten 'Route to Volume', bepalend voor eerste marktintroductie en de marktstrategie. Hieraan ligt de wetmatigheid ten grondslag dat productiekosten afnemen bij toenemende schaal waarop wordt geproduceerd. Innovaties die de prestaties van de cellen verbeteren, zullen allereerst worden geïntroduceerd in markten waar het belang van deze prestatieverbeteringen veel zwaarder wegen dan de (iets) hogere prijs van de cellen. Denk daarbij aan Defensietoepassingen of consumentenelektronica. Marktsuccessen, ervaringen met de productietechnologie en nieuwe investeringen maken een volgende stap mogelijk in de productieschaal, waarbij een breder pallet van Nederlandse eindgebruikers kan worden bediend met grotere volumes en een passende kostenstructuur. Uiteindelijk kan de nieuwe technologie met concurrerende proposities toetreden tot de EV-markt.

KPI's Zwaar transport (2D-eMobility)

- Technologie: diversiteit aan toepassingen; cycle life cruciaal (van ± 500 naar >3000 cycli).
- Productie: grote verbeteringen via applicatiegericht celdesign en flexibele productie.
- Markt: grote volumes, kostengedreven; route tot prestatieverbetering steeds meer via Nextgen cel-technologie.
- Nederlandse positie: nieuwe anodematerialen (SiC, High-Si, pure Si, Li-Metal) leveren performance; eerste niche introducties mogelijk over 5 jaar.

KPI's Luchtvaart (3D-eMobility) / Defensie

- Technologie: sterk prestatiegedreven, vraagt continu verbeteringen.
- Productie: jaarlijkse vervanging biedt snelle adoptiekansen; aandacht voor circulariteit.
- Regulering: strenge regulering en veiligheidseisen; lange ontwikkelpijplijn met validatie en certificatie.
- Markt: zeer groot op lange termijn; direct inzetbaar voor Defensie-drones.
- Nederlandse positie: High-Si, pure Si, Li-Metal cruciaal; marktintroductie vanaf 2035, afhankelijk bereikte cycle life-criteria.

KPI's Stationaire opslag

- Technologie: kansrijk voor vroege introductie van alternatieve technologieën (Na-ion); beperkte diversificatie in specificaties.
- Productie: focus op schaalbaarheid en efficiëntie.
- Markt: breed inzetbaar (netbalancing, industrie, gebouwen).
- Nederlandse positie: High-Si en Li-Metal minder relevant; Na-ion en lage TRL-technologieën belangrijk.

4.1.8. Tijdslijn marktintroducties

De eerder beschreven programma's leiden tot innovaties met verschillende KPI's en time-to-market. Zo zal alle technologie gerelateerd aan de opzet van een flexibele cel productie/assembly-fabriek, al op korte termijn (binnen 5 jaar) omzet opleveren voor diverse sectoren van de industrie en Nederlandse economie.

Voor de marktintroductie van Nextgen batterijmaterialen is behalve de eerdergenoemde 'route to volume' ook gekeken naar sleutelparameters als energiedichtheid en cycle life. In The Dutch Battery Compass (Dr. Elena Orlova, BCC-NL) is de gereedheid van verschillende batterijtechnologieën voor diverse eindgebruikersmarkten in kaart gebracht en vergeleken met grafiet en Si/C-composieten (Si <80 gew.%) als referentie. Daarbij zijn gravimetrische energiedichtheid en cyclische levensduur afgezet tegen de eisen van vier toepassingsgroepen:

- 1) Drones & Consumentenelektronica,
- 2) Zwaar transport,
- 3) Luchtvaart en
- 4) Maritiem & Stationaire opslag, voor de periode 2025-2035.

Hieruit blijkt Nederlandse anode-technologieën met hoge energiedichtheid nu al voldoen aan, en in veel gevallen de eisen overtreffen van de meeste toepassingen, waar Si/C-composieten met een lager siliciumgehalte ($\text{Si} < 80 \text{ gew.}\%$) niet dezelfde energieniveaus kunnen bereiken.

Dit betekent dat Nederlandse bedrijven in het komende decennium goed gepositioneerd zijn om hun rol in Groep 1-markten te versterken. De grootste markten in Groep 2 – zware elektrische voertuigen, off-road apparatuur en groep 4 stationaire opslag met hoge energie – leggen echter meer nadruk op lange levensduur en kostenefficiëntie dan op extreme energiedichtheid. Deze prioriteiten worden in de periode tot 2035 vooralsnog minder goed bediend, waardoor marktintroducties zich beperken tot kleine niches. Aan de bovenkant van het spectrum zal de introductie in Groep 3- Luchtvaart volledig worden bepaald door vooruitgang in levensduur van de cellen om volledig aan de eisen te voldoen voor 2035.

4.1.9. Deelnemende partijen

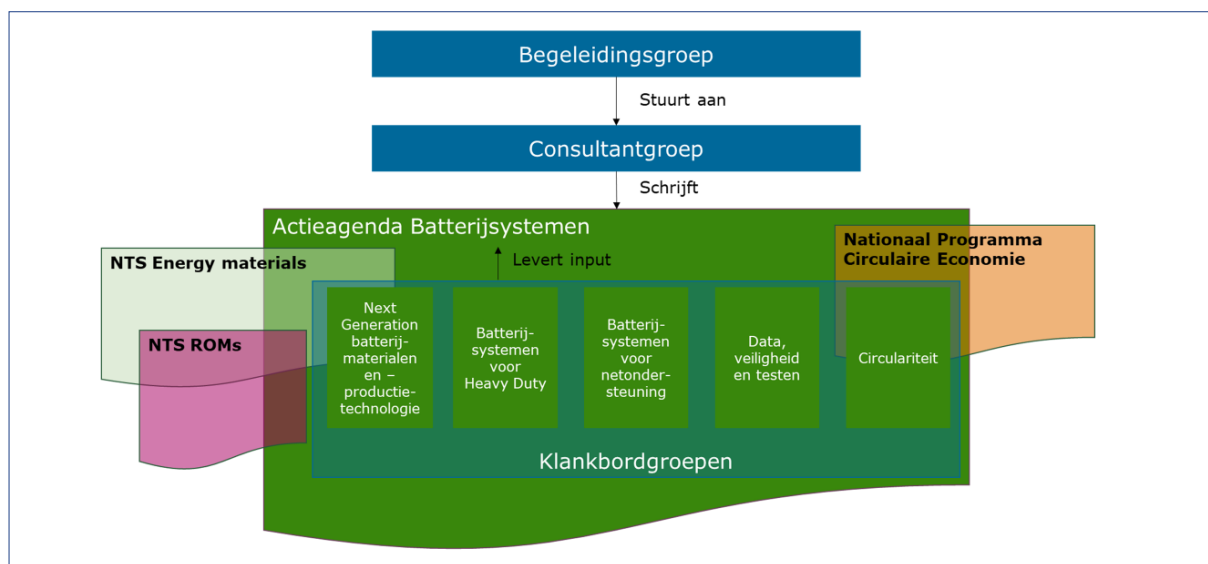
Onderstaande is een lijst van partijen, welke deels al betrokken zijn geweest in de totstandkoming van deze actieagenda en deels genoemd zijn als relevante en mogelijke partijen om deel te nemen aan de innovatieprogramma's. Deze lijst is niet definitief en dient slechts als voorbeeld van geïnteresseerde en mogelijk te betrekken partijen. In de opvolging van de actieagenda kunnen en zullen mogelijk nog andere partijen betrokken worden.

LionVolt, LeydenJar, E-magy, CarbonX, HyEt Lithium, Powall, Zeiss, Thermofisher, Sparknano, Kalpana, Festo, Elestor, Universiteiten (TUD, RUG, UT, UU, TU/e), TNO, TNO-Holst, VDL, Tulip tech, NLR, Elysian Aircraft, Maeve Aerospace, Electron Aerospace, Ore Energy, BCC-NL

4.1.10. Verbinding met andere initiatieven

Figuur 4.2 vanuit de begeleidingsgroep 'Herijking Nationale Actieagenda Batterijsystemen' geeft de organisatiestructuur van de verschillende initiatieven en/of actieagenda's weer rondom batterijtechnologie, met centraal hierin de Nationale Actieagenda Batterijsystemen, gecoördineerd door ministeries EZ, KGG, I&W en het Battery Competence Cluster (BCC-NL).

- De NTS Actieagenda Energy Materials richt zich op het ontwikkelen van batterijmaterialen en -componenten, de integratie in nieuwe geavanceerde productieprocessen en celontwerpen gericht op geavanceerde applicaties. Dit overlapt grotendeels met de pijler 'Next Generation batterijmaterialen en productietechnologie' van de Actieagenda Batterijsystemen, waarmee dan ook wordt gesynchroniseerd.
- Regionale versterkingsagenda's (RV-NTS) van de Regionale Ontwikkelings-maatschappijen (ROMs) richten zich op het versterken van internationale samenwerking en het aantrekken van bedrijven met grote toegevoegde waarde voor het Nederlandse batterijecosysteem.
- Het Nationaal Programma Circulaire Economie (NPCE) richt zich op de ontwikkeling van een routekaart naar een circulaire en autonome batterijwaardeketen.
- KIA-ST AI en data science: de hier breed inzetbare opgebouwde kennis en kunde vormt de basis voor batterijdomeinspecifieke tools en modellen.



Figuur 4.2

Aansluiting industriebeleid

Ter illustratie hoe innovaties uit het huidige programma nog concreter tot 'control points' in de waardeketens zouden kunnen uitgroeien, beschrijven we hier een aantal voorgestelde voorbeeld-investeringsvoorstellen die binnen het traject rondom Rapport Wennink zijn vormgegeven. Waar specifieke bedrijfsnamen zijn genoemd binnen de huidige voorstellen, kan binnen het bredere ecosysteem verwacht worden dat vergelijkbare investeringsvraagstukken ook voor andere bedrijven geldt.

GigaNode

Het voorbeeldvoorstel GigaNode is een project van LeydenJar Technologies om in 2030 in Nederland een fabriek te bouwen voor innovatieve silicium-anodefolie, waarmee batterijen 50% meer energiedichtheid, snellere laadtijden en 85% minder CO₂-uitstoot krijgen. De fabriek produceert jaarlijks genoeg voor circa 30 miljoen smartphonebatterijen en versterkt de Europese technologische positie door minder afhankelijk te zijn van China. Met een investering van €350 miljoen, 150 directe banen en sterke partnerschappen vraagt het project om overheidssteun voor financiering, infrastructuur en netcapaciteit. GigaNode sluit aan bij nationale en Europese strategieën en biedt Nederland een unieke kans in de mondiale batterijwaardeketen.

BatCelFab

BatCelFab is een voorgestelde fabriek in Nederland voor high-performance batterijcellen (1 GWh), gericht op nichetoepassingen zoals defensie, drones en high-end industrie, om strategische relevantie en weerbaarheid te waarborgen – vooral ook nu China exportrestricties invoert. Het project vraagt €200 miljoen investering, waarvan een groot deel al door industriële partners is toegezegd, en verwacht 200 tot 350 directe banen te creëren. Door samen te werken met Nederlandse technologiebedrijven en afnemers als Tulip Tech, wordt een sterke, lokale



waardeketen opgebouwd. De fabriek versnelt het vermarkten van duurzame batterij-innovaties, sluit aan bij nationale en Europese strategieën en draagt bij aan de energietransitie, circulariteit en economische groei. Realisatie is voorzien binnen vijf jaar, met locaties in Groningen of Limburg, en vraagt overheidssteun voor financiering, vergunningen en human capital.

4.2. Innovatieprogramma elektrolysetechnologie

4.2.1. Achtergrond

De ontwikkeling zoals beschreven in dit programma wordt gedreven door een combinatie van technologische, economische en maatschappelijke factoren, gekoppeld aan de snelle groei van de waterstofsector en de strategische ambities van Nederland.

Groeiende marktvraag

De wereldwijde elektrolysemarkt groeit explosief: van circa 1,4 GW geïnstalleerd in 2023 naar een verwachte 230 tot 520 GW in 2030. In Europa ligt de doelstelling op 40 GW in 2030, maar prognoses wijzen op een realisatie van ongeveer 22 GW. Nederland heeft een nationale ambitie van 3 tot 4 GW in 2030 (met een ambitie van 8 GW in 2032), terwijl de huidige inschatting slechts 1,2-1,5 GW haalbaar acht. Deze kloof tussen ambitie en realisatie creëert een sterke noodzaak voor de ontwikkeling van kostenefficiënte, flexibele en schaalbare elektrolyzers. Binnen deze groeiende vraag neemt ook de behoefte toe aan technologieën die geschikt zijn voor variabele hernieuwbare energie, offshore productie en industriële integratie.

Klimaat- en duurzaamheidsbeleid

Nederland en de Europese Unie hebben zich gecommitteerd aan klimaatneutraliteit en de productie van hernieuwbare waterstof volgens de RFNBO-regels (Renewable Fuels of Non-Biological Origin). Deze regelgeving stelt strikte eisen aan additionaliteit, tijd- en geografische correlatie tussen elektrolyser en hernieuwbare energiebron, evenals een minimale broeikasgasreductie van 70%.

Voor elektrolyseontwikkeling betekent dit dat stacks niet alleen efficiënt moeten zijn, maar ook flexibel kunnen inspelen op variabele hernieuwbare energie. Tijdcorrelatie vereist dat elektrolyzers kunnen op- en afregelen op uur- of kwartierbasis, wat vraagt om snelle load-following en robuuste start-stop-stabiliteit. Geografische correlatie beperkt de locatiekeuze en benadrukt de noodzaak van compacte, offshore-ready ontwerpen. Daarnaast moeten elektrolyzers voorzien zijn van sensoren en datalogging om productie te certificeren. Deze eisen beïnvloeden direct het ontwerp van cellen en stacks, van materiaalkeuze tot integratie van monitoring en besturing.

Kansen voor Nederlandse innovaties en strategische positionering

Elektrolysetechnologie kent uitdagingen op het gebied van efficiëntie, levensduur en kosten. PEM-elektrolyzers zijn duur door iridium, platina en titanium, alkaline-systemen missen flexibiliteit en SOE is gevoelig voor materiaaldegradatie en thermische cycli. Innovaties in katalysatoren, membranen, coatings en stackarchitectuur zijn cruciaal om deze beperkingen te overwinnen.

Nederland heeft sterke troeven om deze innovaties te realiseren. Bedrijven als Battolyser Systems / VDL Hydrogen Systems (flexibele alkaline stacks) en Bosch (PEM-technologie) lopen voorop. Daarnaast beschikt Nederland over hoogwaardige kennis in coatingtechnologie (Powall, SALD, VSParticle, Hauzer Techno Coating, TNO/Holst Centre), membranen en elektrochemische componenten (Magneto Special Anodes, Teijin) en automatisering en machinebouw (VDL, MTSA Technopower). Deze competenties maken snelle industrialisatie en hoogwaardige stackproductie mogelijk.

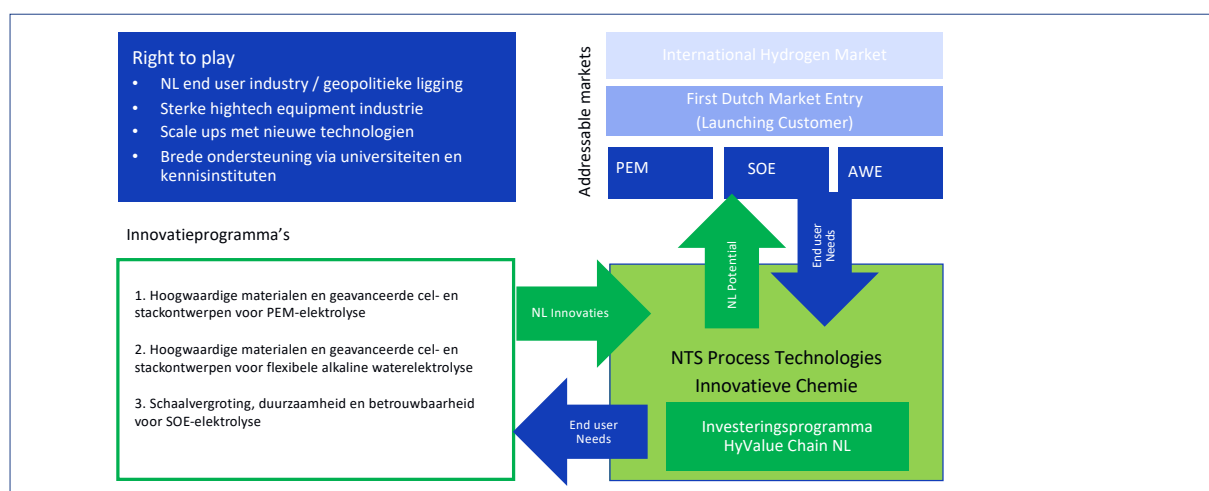
Met deze kennisbasis en een sterke maakindustrie in clusters zoals Arnhem, Eindhoven en Rotterdam kan Nederland zich positioneren als een innovatiehub voor elektrolyser-componenten, stacks en productie-equipment. Het opschalen van innovaties van labniveau naar industriële inzet op 100 MW-GW-schaal is essentieel om technologisch en economisch leiderschap en werkgelegenheid te waarborgen en om een sleutelrol in de Europese waterstofwaardeketen te claimen.

Opschaling

Om de nationale waterstofambities te realiseren, is snelle opschaling van elektrolysetechnologie essentieel. Innovatieprogramma's richten zich op het verhogen van TRL-niveaus (van 2 tot 5 naar 6 tot 7), het opzetten van pilotproductielijnen en het ontwikkelen van geautomatiseerde, kostenefficiënte productieprocessen. Door integratie van nieuwe materialen, modulaire stackontwerpen en kwaliteitsborging wordt de stap van lab naar industriële toepassing versneld. Regionale clusters en bestaande ecosystemen (Arnhem, Eindhoven, Rotterdam) bieden infrastructuur voor validatie en kennisdeling. Deze aanpak verlaagt kosten, vergroot exportkansen en versterkt het verdienvermogen van de Nederlandse maakindustrie.

4.2.2. Programmastructuur elektrolysetechnologie

Onderstaande figuur geeft een schematische weergave van de relatie tussen de voorgestelde innovatieprogramma's en de eindgebruiker markten. Er is gekozen voor drie technologieën: AWE, PEM en SOE (Zie paragraaf 2.2). Binnen het programma Energy Materials is ervoor gekozen om de scope te beperken tot stack-niveau. Innovaties op het gebied van Balance of Plant (BOP) moeten binnen het innovatiedomein Process Technologies worden opgepakt.





Huidige initiatieven rondom NXTGEN Hightech en GroenvermogenNL (HyPro) hebben gerelateerde ontwikkelingen geagendeerd, voornamelijk tot aan TRL5. De huidige actieagenda bouwt voort op deze bestaande activiteiten om de innovaties in samenwerking met commerciële partijen daadwerkelijk door te laten groeien naar nog hogere volwassenheid en marktadoptie.

Tegelijkertijd probeert het huidige programma met een aantal onderwerpen focuspunten verder aan te brengen waar – op basis van de huidige innovatie-activiteiten – de meeste meerwaarde voor het verdienvermogen van Nederland is te vinden.

In Bijlage 2 zijn de Innovatieprogramma's uitgebreid beschreven; in deze actieagenda staan de samenvattingen.

4.2.3. Innovatieprogramma 1: Hoogwaardige materialen en geavanceerde cel- en stackontwerpen voor PEM

Doel

Dit innovatieprogramma richt zich op het ontwikkelen van kosteneffectieve, schaalbare PEM-systemen door innovatieve materialen, geoptimaliseerde interfaces en modulaire ontwerpen. Het programma draagt bij aan CO₂-reductie, versterkt Europese strategische autonomie en opent de weg naar grootschalige inzet van groene waterstof in industrie en energieopslag.

Belangrijke doelen zijn:

- Vermindering van dure en schaarse materialen zoals titanium, iridium en platina om kosten en geopolitieke afhankelijkheid te verlagen.
- Ontwikkeling van dunne, sterke membranen zonder PFAS, conform toekomstige milieuregels, met behoud van geleidbaarheid en duurzaamheid.
- Betrouwbare levensduurvoorspelling via versnelde stresstests, zodat stacks duizenden uren presteren en investeringsrisico's dalen.
- Modulair stackontwerp voor eenvoudig onderhoud en snelle vervanging van defecte cellen, wat stilstand en kosten beperkt.
- Opschaling naar GW-markt door pilotproductie en validatie, om innovaties van lab naar industrie te brengen.

Drivers

De belangrijkste drivers zijn: energietransitie en CO₂-reductie waar PEM een cruciale rol speelt in grootschalige groene waterstofproductie vanwege zijn flexibiliteit; vermindering van afhankelijkheid van kritieke grondstoffen zoals iridium en platina; PFAS-ban en duurzaamheid door ontwikkeling van veilige, PFAS-vrije membranen;

Kennisvragen

De kennisvragen richten zich op vier thema's: materialen, celconcepten, levensduur en opschaling. Voor materialen gaat het om alternatieven voor titanium en PGM-coatings, PFAS-vrije membranen en dunne membranen zonder prestatieverlies. Bij celconcepten ligt de focus op ultra lage iridiumbelasting, innovatieve electrode-architecturen en structuren die contactweerstand



minimaliseren. Voor levensduur en onderhoud zijn inzichten in degradatiemechanismen, betrouwbare stresstests, AI-gestuurde voorspellende modellen en modulair stackdesign cruciaal. Opschaling vraagt om geschikte productietechnieken (zoals ALD, 3D-printing), defect-arme coatings, repareerbare ontwerpen, diagnostiek voor predictive maintenance en duurzame afdichtingsoplossingen.

Plan van aanpak/Werkpakketten

Geavanceerde Materialen

WP1: PGM-vrije coatings

Ontwikkelen van coatings die corrosiebestendig en elektrisch geleidend zijn, zonder gebruik van dure platinagroep-metalen. Focus ligt op alternatieve materialen en processen zoals ALD en PVD. Validatie omvat duurzaamheidstests en analyse van leaching-effecten op andere componenten.

WP2: Alternatieve materialen voor supports en platen

Ontwikkeling van goedkopere materialen zoals gecoat roestvrij staal als alternatief voor titanium. Ontwikkeling van self-healing coatings en uitvoeren van corrosie- en geleidbaarheidstests. Doel is kostenreductie en behoud van mechanische stabiliteit.

WP3: Dunne en sterke membranen

Ontwikkeling van membranen van 30–50 µm om ohmse verliezen te verlagen en efficiëntie te verhogen. Versterking van membranen met extra lagen voor mechanische robuustheid. Validatie richt zich op sterkte, stabiliteit en integratie in stackontwerp.

WP4: PFAS-vrije membranen

Ontwikkeling van membranen zonder PFAS die hoge protongeleiding en duurzaamheid bieden. Onderzoek alternatieve polymeren en testcompatibiliteit met celcomponenten. Ontwikkeling van architecturen die gas-crossover en degradatie minimaliseren.

Schaalbare celontwerpen

WP5: Optimalisatie interfaces

Optimalisatie van de interface tussen membraan, katalysator en elektrode om contactweerstand te verlagen. Ontwikkeling van micro- en nanostructuren die iridiumbenutting verbeteren. Validatie richt zich op levensduur en mechanische stabiliteit.

WP6: Ultra lage iridiumbelasting

Reductie van iridium tot <0,1 mg/cm² door nanogestructureerde katalysatorlagen. Gebruikmakend van technieken zoals ALD en Spark Ablation voor uniforme coatings. Validatie op single-cell- en short-stack-niveau.



WP7: Modulair stackontwerp

Ontwerp van repareerbare stacks met modulaire architectuur en duurzame afdichtingen. Ontwikkel diagnostische tools voor snelle foutdetectie en vervanging van cellen. Validatie van onderhoudsprocedures en betrouwbaarheid.

WP8: Betrouwbare levensduurvoorspelling

Ontwikkeling van Accelerated Stress Test-protocollen en AI-modellen om degradatie te voorspellen. Correlatie tussen materiaal-parameters en stackprestaties is essentieel. Doel is voorspelbare levensduur onder dynamisch bedrijf.

WP9: Integratie en validatie

Integratie van nieuwe componenten in single-cell- en stackconfiguraties. Uitvoeren van prestatiebenchmarking uit en ontwikkeling van opschalingseisen. Gebruikmakend van in-situ diagnostiek om condities en degradatie te monitoren.

Productiemethodes en opschaling

WP10: Opschaling productiemethoden

Opschalen van labschaalprocessen naar industriële schaal met automatisering en in-line kwaliteitscontrole. Optimalisatie van productieprocessen voor hoge reproduceerbaarheid en lage kosten. Validatie op pilotniveau.

WP11: Pilot productielijn

Realisatie van een flexibele FOAK-pilotlijn voor integratie van nieuwe productieprocessen. Combinatie van coating, assemblage en kwaliteitsborging in één omgeving. Inzet van de lijn voor demonstratie en training van industriepartners.

WP12: Validatie van product en productie

Uitvoeren van duurzaamheidstests en kwaliteitsborging uit op component-, stack- en systeemniveau. Benchmarking van producten tegen internationale KPI's en analyseren van economische haalbaarheid. Resultaten vormen basis voor commerciële opschaling.

Gantt chart & Financiële breakdown

		Budget	Publiek	Privaat	Globale looptijd (20..)									
	WP titel	[M EUR]			26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
1	PGM-vrije coatings voor BPP en PTL	1.93	1.73	0.19										
2	Alternatieve PTL- en BPP-materialen	3.16	2.84	0.32										
3	Dunne en sterke membranen	1.83	0.92	0.92										
4	PFAS-vrije membranen	2.13	1.92	0.21										
5	Optimalisatie van PTL-CCM-interface	2.34	1.17	1.17										
6	Ultra lage iridiumbelasting (<0,1 mg/cm ²)	2.35	2.11	0.23										
7	Modulair stackontwerp voor reparatie en vervanging	2.80	0.70	2.10										
8	Ontwikkeling van levensduurvoorspelling	1.22	0.61	0.61										
9	Integratie en validatie	4.66	1.16	3.49										
10	Doorontwikkeling en opschaling productiemethoden	2.23	0.56	1.67										
11	Realisatie van demo productielijn	7.57	1.89	5.68										
12	Validatie van product en productie	1.31	0.33	0.98										
	TOTAL	33.52	15.94	17.57										

Deelnemende partijen (bedrijven, kennisinstellingen, overheden)

Deze lijst is slechts een voorbeeld van geïnteresseerde en mogelijk te betrekken partijen: Teijin, VSParticle, SALD, Powall, Hauzer, Ionbond, Magneto, Bosch, Hyet, Hygear, Fluidwell, TNO, DIFFER, TUDelft.

4.2.4. Innovatieprogramma 2: Hoogwaardige materialen en geavanceerde cel- en stackontwerpen voor flexibele alkaline waterelektrolyse

Doel

Het programma wil AWE veiliger, efficiënter en duurzamer maken met drie hoofddoelen:

- ontwikkeling van geavanceerde elektrode- en separatiematerialen,
- verbeterde cel- en stackontwerpen, en
- robuuste testprotocollen en meettechnieken om degradatie te begrijpen.

KPI's omvatten verdubbeling van stroomdichtheid, veilige minimale last, snellere ramp-up, en sterk verminderde degradatie. Specifieke focusgebieden zijn verbeterde separatoren, stress- en simulatietests, in-situ diagnostiek, duurzame katalysatoren, geoptimaliseerde elektrodestructuren en elektrolytsamenstellingen. Het programma bouwt voort op HyPro en NXTGen-projecten, maar richt zich op hogere TRL's en opschaalbare productiemethoden. Hiermee wordt de basis gelegd voor flexibele, kosteneffectieve en industriële AWE-systemen.

Drivers

De belangrijkste drivers zijn:

- **Energietransitie & CO₂-reductie:** Alkaline elektrolyse is een bewezen technologie voor grootschalige waterstofproductie. Door flexibiliteit en start-stop-bedrijf mogelijk te maken, kan AWE optimaal worden gekoppeld aan variabele hernieuwbare energiebronnen, wat essentieel is voor een stabiel en duurzaam energiesysteem.
- **Kostenverlaging en efficiëntie:** Huidige AWE-systemen werken bij lage stroomdichtheden, wat leidt tot hoge CAPEX (meer stacks benodigd) per geproduceerde kilogram waterstof.

Innovaties die hogere stroomdichtheden mogelijk maken zonder dure PGM-materialen zijn cruciaal om de kosten te verlagen en de technologie concurrerend te maken.

- **Vermindering afhankelijkheid van kritieke materialen:** Hoewel hogere prestaties nu vaak PGM's vereisen, is het verminderen of vermijden van deze schaarse en geopolitiek gevoelige materialen noodzakelijk voor strategische relevantie en kosteneffectiviteit.

Programmalijnen/kennisvragen

De kennisvragen richten zich op vijf thema's: elektrodes, elektrolyt, separatoren, validatie en cel-/stackontwerp. Voor elektrodes gaat het om nieuwe materialen en non-PGM-katalysatoren die hoge stroomdichtheden en lage overpotentialen (verliezen) mogelijk maken, ontwerpen die gasverwijdering verbeteren en productieprocessen die opschaalbaar zijn. Bij elektrolyt ligt de focus op het effect van contaminanten en additieven op de prestaties en levensduur, en op optimalisatie van de samenstelling voor de elektrodestabiliteit. Voor separatoren is de trade-off tussen ionengeleiding en gas-crossover cruciaal, inclusief schaalbare productiemethoden en inzicht in degradatiemechanismen. Validatie vraagt om versnelde verouderingstests en in-situ meettechnieken om degradatie te monitoren en levensduur betrouwbaar te voorspellen. Cel- en stackontwerp richt zich op configuraties (zero-gap vs finite-gap) die veilig, flexibel en efficiënt bedrijf mogelijk maken, duurzame afdichtingen en modulaire architecturen voor lage CAPEX en eenvoudig onderhoud.

Plan van aanpak/Werkpakketten

WP1: Specificaties, validatietests, protocolontwerp en degradatiemitigatie

Opstellen van prestatie- en duurzaamheidsspecificaties voor materialen en componenten, afgestemd op flexibel bedrijf van alkaline-elektrolyse. Ontwikkelen van versnelde verouderingstests en reverse current-simulaties om degradatiemechanismen te identificeren. Validatietesten uitvoeren op short stacks onder industriële condities en ontwikkelen van strategieën om degradatie te beperken. Aanbevelingen voor elektrode- en celontwerp ter verlenging van levensduur.

WP2: Geavanceerde in situ, operando meettechnieken voor inzicht in degradatie

Integratie van sensoriek in elektrolysecellen om degradatiemechanismen real-time te volgen tijdens flexibel bedrijf. Analyse van data om bekende en onbekende degradatie te identificeren. Ondersteuning van materiaalontwikkeling en validatie door inzicht in componentgedrag en levensduur. Faciliteren van mitigatiestrategieën en optimalisatie van nieuwe ontwerpen.

WP3: Katalysator-activiteit en duurzaamheid

Ontwikkeling van elektrokatalysatoren voor waterstof- en zuurstofevolutie met hoge activiteit en langdurige stabiliteit. Vermijden van kritische materialen en optimaliseren van 2D- en 3D-structuren voor efficiënte gasafvoer en elektrolyttoevoer. Testen van nieuwe materialen op elektrochemische prestaties en duurzaamheid. Opschaling van succesvolle katalysatoren voor industriële toepassing.

WP4: Elektrode-ontwerp en -vervaardiging

Ontwerp van elektrodes die optimaal functioneren bij start-stop en variabele belasting. Ontwikkeling van schaalbare fabricage-methoden zoals elektroformeren, atoomlaagdepositie (ALD) en vonkablatie. Productie van prototypes en uitvoeren van prestatietests om ontwerpkeuzes te valideren. Voorbereiden van opschaling naar industriële productie.

WP5: Elektrolytadditieven voor elektro-katalyse en duurzaamheid

Onderzoek van de invloed van contaminanten en additieven op elektrode- en separatorprestaties. Onderzoek van additieven die katalytische activiteit en duurzaamheid verbeteren. Opstellen van materiaalspecificaties voor stackcomponenten en balance-of-plant materialen. Integreren van inzichten in ontwerpaanbevelingen voor cel en stack.

WP6: Separatoroptimalisatie voor efficiëntie en veiligheid

Ontwikkeling van nieuwe membranen en diafragma's die gas-crossover minimaliseren en ionengeleiding maximaliseren. Testen van recombinatiekatalysatoren en onderzoeken van compatibiliteit met elektrodes. Uitvoeren van iteratieve prestatietests en voorbereiden van opschaling. Leveren van aanbevelingen voor integratie in celontwerpen.

WP7: Cel- en stackontwerp voor flexibele elektrolyse

Ontwerp van modulaire cel- en stackconfiguraties die efficiënt functioneren bij variabele belasting en frequent starten en stoppen. Toepassing van AI, CFD en digital twins om ontwerp en validatie te versnellen. Bouwen van prototypes en uitvoeren van uitgebreide prestatietests. Optimalisatie van mechanisch design voor industriële toepassing.

Gantt chart & Financiële breakdown

		Budget	Publiek	Privaat	Globale looptijd												
	WP titel	[M EUR]			26	27	28	29	30	31	32	33	34	35			
1	Specificaties, validatietests, protocolontwerp en degradatiemitigatie	2.34	0.58	1.75													
2	Geavanceerde in situ, operando meettechnieken voor inzicht in degradatie	2.38	1.19	1.19													
3	Katalysator-activiteit en duurzaamheid	2.80	2.24	0.56													
4	Elektrode-ontwerp en -vervaardiging	2.35	1.88	0.47													
5	Elektrolytadditieven voor elektro-katalyse en duurzaamheid	1.58	1.26	0.32													
6	Separatoroptimalisatie voor efficiëntie en veiligheid	3.22	2.57	0.64													
7	Cel- en stackontwerp voor flexibele elektrolyse	9.14	2.29	6.86													
	TOTAL	23.80	12.01	11.79													

Deelnemende partijen (bedrijven, kennisinstellingen, overheden)

Deze lijst is slechts een voorbeeld van geïnteresseerde en mogelijk te betrekken partijen. Magneto, Veco, SPG Prints, SALD, VSParticle, Technische Universiteit Eindhoven / Twente / Delft, Rijksuniversiteit Groningen, TNO, Differ, VDL/Battolyser, AVOXT, ZEF, XINTC, Hyet E-Trol.



4.2.5. Innovatieprogramma 3: Schaalvergroting, duurzaamheid en betrouwbaarheid voor SOE

Doel

Dit programma richt zich op het ontwikkelen van een robuuste en schaalbare Solid Oxide Elektrolyse (SOE)-technologie die een sleutelrol speelt in de energietransitie. Het doel is om de vermogensdichtheid van SOE-cellen en stacks aanzienlijk te verhogen door het actieve oppervlak te vergroten en stackconfiguraties te optimaliseren, zodat grootschalige implementatie economisch haalbaar wordt. Tegelijkertijd wordt gewerkt aan het verlengen van de levensduur van systemen door degradatiemechanismen te begrijpen en te mitigeren. Dit omvat de ontwikkeling van nieuwe, duurzame materialen en coatings, inclusief CRM-vrije alternatieven, en het toepassen van versnelde stresstests om betrouwbaarheid onder zware condities te waarborgen. Daarnaast richt het programma zich op het verbeteren van produceerbaarheid via schaalbare productieprocessen en geavanceerde coatingtechnieken, zodat defectvrije lagen en consistente kwaliteit gerealiseerd kunnen worden. Een belangrijk onderdeel is de integratie van voorspellende monitoring en sensortechnologie, gecombineerd met AI-gestuurde data-analyse, om degradatie vroegtijdig te detecteren en operationele strategieën te optimaliseren. Door deze combinatie van opschaling, levensduurverlenging en slimme monitoring draagt het programma bij aan lagere kosten, hogere efficiëntie en een sterke positie van Nederland in de internationale waterstofwaardeketen.

Drivers

De urgentie komt voort uit klimaatdoelen en de energietransitie: SOE biedt een 15 tot 30% hogere efficiëntie dan andere elektrolysetechnologieën en is geschikt voor integratie in industrieën en reversibele toepassingen. De huidige CapEx is te hoog door kleine celoppervlakken en lage stroomdichtheden, waardoor opschaling en kostenreductie noodzakelijk zijn. Levensduur vormt een knelpunt: stacks moeten meer dan 40.000 uur meegaan, maar hogere belastingen en koolstofhoudende feedstocks veroorzaken snelle degradatie. Daarnaast zijn er risico's rond leveringszekerheid van kritieke materialen zoals Ni, YSZ en lanthaanverbindingen, wat vraagt om CRM-vrije alternatieven en recyclingstrategieën. Onvoldoende diagnostiek en monitoring leiden tot onverwachte uitval en hoge onderhoudskosten, terwijl feedstock-onzuiverheden (zwavel, silica, chlorides) de betrouwbaarheid beperken. Het programma adresseert deze uitdagingen door opschaling, materiaalinnovatie, levensduurverlenging en voorspellende monitoring.



Programmalijnen/kennisvragen

Voor succesvolle ontwikkeling van SOE-technologie moeten diverse vragen worden beantwoord.

- Hoe kan het actieve celoppervlak worden vergroot zonder verlies van prestaties en produceerbaarheid?
- welke geometrieën zijn optimaal voor stacks?
- Welke geavanceerde productie- en coatingtechnieken maken defectvrije lagen op grote schaal mogelijk? Op materiaalniveau is inzicht nodig in CRM-vrije alternatieven en de invloed van microstructuur op degradatie.
- Welke additieven of elektrodecombinaties verbeteren levensduur en prestaties onder variabele condities? Voor levensduurvoorspelling moeten dominante degradatiemechanismen bij hoge stroomdichtheden en co-SOE worden geïdentificeerd en vertaald naar gestandaardiseerde accelerated stress tests.

Daarnaast is het cruciaal om toleranties voor feedstock-onzuiverheden vast te stellen en kosteneffectieve zuiveringsmethoden te ontwikkelen. Op het gebied van monitoring is de vraag welke sensortechnologieën geschikt zijn voor real-time integratie. Ook is het belangrijk om te onderzoeken hoe AI kan worden ingezet om levensduur en prestaties te voorspellen. Tot slot moeten strategieën voor recycling en circulair ontwerp worden bepaald om kosten en ecologische impact te minimaliseren.

Plan van aanpak/Werkpakketten

WP1: Onderzoek naar applicaties en specificaties

Opstellen van gewenste specificaties voor solid oxide elektrolyser-architecturen op basis van applicaties en businesscases. Afstemmen van eisen op toepassingen zoals waterstofproductie, koolstofhoudende producten en netstabilisatie. Creëren van een leidraad voor alle technische werkpakketten en zorgen voor synergie met de NTS Procestechnologie actieagenda.

WP2: Opschaling van SOE-cellen en -stacks

Vergroten van het actieve oppervlak en verbeteren van stackconfiguraties om vermogensdichtheid te verhogen. Ontwikkeling van industrieel schaalbare keramische productietechnieken met behoud van prestaties en betrouwbaarheid. Bepaling van optimale celgrootte en geometrie en uitvoeren van elektrochemische en mechanische validatie van opgeschaalde cellen en stacks.

WP3: SOE bij intermediaire temperatuur (PCEC-ontwikkeling)

Ontwikkeling van protongeleidende elektrolyten en elektroden voor elektrolyse bij 400 tot 600 °C. Opschalen van planaire PCEC-cellen naar meer dan 100 cm² met hoge stroomdichtheid en faradaïsche efficiency. Optimalisatie van laaginteracties en sinterprocessen en valideren van opgeschaalde PCEC-cellen op prestaties en mechanische stabiliteit.



WP4: Ontwikkeling van stackmaterialen en coatings

Selectie en ontwikkeling van duurzame, kosteneffectieve materialen en beschermende coatings om corrosie en elementmigratie te voorkomen. Testen van materialen op corrosieweerstand en elektrische geleidbaarheid. Ontwerp en valideren van schaalbare stackconfiguraties, inclusief alternatieve materialen gecombineerd met coatings.

WP5: Karakterisering van materiaaldegradatie

Identificatie van degradatiemechanismen van SOE- en PCEC-materialen onder operationele condities. Toepassing van geavanceerde in-situ en ex-situ technieken zoals microscopie, spectroscopie en thermische analyse. Koppeling van degradatieprocessen aan microstructuur en bedrijfscondities voor verdere materiaaloptimalisatie.

WP6: Levensduur en materiaalontwikkeling

Mitigatie van degradatieprocessen door optimalisatie van bestaande materialen en ontwikkeling van nieuwe materialen. Toepassing van innovatieve synthese- en depositiemethoden zoals PVD. Ontwerp van versnelde degradatietesten om levensduur en prestatie stabiliteit over langere perioden te evalueren.

WP7: SOE-verontreiniging en zuiverheidscontrole

Uitvoeren van tolerantietests om acceptabele niveaus van onzuiverheden in water en koolstofhoudende feedstocks vast te stellen. Onderzoeken van contaminanten zoals zwavelverbindingen op ppb-niveau. Ontwikkeling van kostenefficiënte zuiveringstechnieken om gaszuiverheid en systeemprestaties te waarborgen.

WP8: Levensduurmonitoring en voorspelling

Integratie van sensoren en geavanceerde meettechnieken om SOE-prestaties real-time te monitoren. Ontwikkeling van data-analysemodellen voor interpretatie van sensorgegevens en voorspelling van storingen. Implementatie van operationele strategieën zoals mode switching en pulsing om levensduur te verlengen.

WP9: Duurzaamheid en recycling van SOE

Ontwerp van componenten voor eenvoudige demontage en recycling van waardevolle materialen. Onderzoek van CRM-vrije materialen zoals kobaltvrije elektroden. Uitvoeren van risicoanalyses op toeleveringsketens en ontwikkelen van strategieën om milieu-impact te minimaliseren.

WP10: Produceerbaarheid en kostenreductie – pilot

Ontwikkeling van schaalbare productieprocessen met hoge reproduceerbaarheid en automatisering. Optimalisatie van efficiëntie en reductie van handmatige arbeid. Opstellen van kostenmodellen en realisatie van een pilotproductielijn om economische haalbaarheid te garanderen.

Gantt chart & Financiële breakdown

		Budget	Publiek	Privaat	Globale looptijd (20..)										
	WP titel	[M EUR]			26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	
1	Onderzoek naar applicaties en specificaties	1.04	0.52	0.52											
2	Opschaling van SOE-cellen en -stacks	3.28	1.97	1.31											
6	SOE bij intermediaire temperatuur (PCEC-ontwikkeling)	2.88	2.16	0.72											
3	Ontwikkeling van stackmaterialen en coatings	3.10	1.55	1.55											
4	Karakterisering van materiaaldegradatie	3.30	2.97	0.33											
5	Levensduur en materiaalontwikkeling	4.40	2.20	2.20											
7	SOE-verontreiniging en zuiverheidscontrole	2.21	1.11	1.11											
8	Levensduurmonitoring en voorspelling	2.26	1.13	1.13											
9	Duurzaamheid en recycling van SOE	1.94	0.97	0.97											
10	Produceerbaarheid en kostenreductie	7.20	1.80	5.40											
	TOTAL	31.61	16.37	15.23											

Deelnemende partijen (bedrijven, kennisinstellingen, overheden)

Deze lijst is slechts een voorbeeld van geïnteresseerde en mogelijk te betrekken partijen.

Bosal, VDL, Hygear, HyET E-trol, Circonica, TNO, Universiteit Twente, Rijksuniversiteit Groningen, DIFFER, TU/e, Universiteit Utrecht, ART, Douna Machinery, Hauzer, Powall, Manders Automation, Pure Water Systems, Shell, Endress + Hauser, Zeta Energy, ICT Group.

4.2.6. Toepassingsgebieden/ Tijdslijn marktintroducties

De marktintroductie van elektrolysetechnologie zal gefaseerd plaatsvinden, afhankelijk van TRL-niveau, kostenreductie en betrouwbaarheid. De eerste toepassingen liggen in decentrale productie voor nichemarkten zoals kleinere industriële gebruikers en demonstratieprojecten. Deze kleinere installaties bieden een kans om technologie te valideren, leereffecten te realiseren en kosten te verlagen. Vanuit deze niches kan worden opgeschaald naar grootschalige centrale productie in industriële clusters en havens, waar schaalvoordelen en integratie met infrastructuur cruciaal zijn.

Verwachte fasering:

- **2026-2029** Pilotprojecten en demonstratie-installaties (TRL 6 tot 7) voor AWE en PEM, gekoppeld aan variabele hernieuwbare energie.
- **2029-2031** Eerste commerciële systemen voor decentrale productie (5 tot 15 MW), gericht op industriële toepassingen en mobiliteit.
- **2031-2032** Opschaling naar centrale productie-installaties (50 MW en groter), integratie in waterstofhubs en chemische clusters.
- **2032-2035** Volledige industrialisatie en export van Nederlandse componenten, stacks en productieapparatuur, inclusief nichetoepassingen voor offshore en hoogtemperatuurprocessen (SOE).

Deze gefaseerde aanpak creëert een duidelijke route naar volume, waarbij Nederlandse technologie eerst tractie krijgt in kleinere markten en vervolgens doorstroomt naar grootschalige toepassingen. Dit versterkt niet alleen de positie van Nederland in de Europese waterstofwaardeketen, maar draagt ook bij aan strategische autonomie en een robuust verdienvermogen.



4.2.7. Verbinding andere initiatieven

De Nederlandse waterstofagenda biedt een breed spectrum aan programma's en ecosystemen die gericht zijn op cel- en stackontwikkeling, materiaalinnovatie en productieautomatisering. NTS Energy Materials kan dit versnellen door lopende initiatieven, zoals NXTGEN Hightech (TRL 2 tot 5, ontwikkeling van coatingtechnologie, 3D-substraten en automatisering), GroenvermogenNL (HyPro, TRL 2 tot 5, flexibiliteit, duurzaam, circulair), verder te brengen zodat Nederlandse technologie sneller ontwikkeld (TRL 3 tot 6) en gedemonstreerd (TRL 6 tot 7) kan worden.

Daarnaast biedt het Nationaal Waterstof Programma een platform om samen te werken met kennisinstellingen en bedrijven in regionale clusters (Arnhem, Eindhoven, Rotterdam) en om toegang te krijgen tot testfaciliteiten en open innovatiecentra. Ook regionale initiatieven zoals Hydrogen Valley Campus Europe versterken de koppeling tussen technologieontwikkeling en industriële toepassing. Door verder te investeren in huidige programma's draagt de NTS bij aan:

- Verhogen van het TRL-niveau van de bestaande programma's van TRL 2 tot 5 naar TRL 6 tot 7
- Opschaling van innovatieve stackconcepten naar grote schaal
- Integratie van coating- en membraantechnologie in industriële processen
- Ontwikkeling van geautomatiseerde productielijnen voor elektrolyscellen en stacks

Deze aansluiting vergroot niet alleen de impact van NTS binnen de waterstofwaardeketen, maar versterkt ook de Nederlandse positie als hightech-maakindustrie voor duurzame energie.

Aansluiting industriebeleid

Ter illustratie hoe innovaties uit het huidige programma tot nog concreter tot 'control points' in de waardeketens zouden kunnen uitgroeien, beschrijven we hier een voorgesteld voorbeeld-investeringsvoorstel dat binnen het traject rondom Rapport Wennink is vormgegeven. Waar specifieke bedrijfsnamen zijn genoemd binnen de huidige voorstellen, kan binnen het bredere ecosysteem verwacht worden dat vergelijkbare investeringsvraagstukken ook voor andere bedrijven geldt.

HyValueChainNL

Het HyValueChainNL-consortium wil een commerciële waardeketen opzetten voor industriële elektrolyse-installaties met focus op flexibele, kostenefficiënte waterstofproductie om de energietransitie te versnellen en netcongestie te verminderen. De partners VDL-Battolyser, VDL Groep, HyCC en GroenvermogenNL dekken samen de hele keten van technologieontwikkeling tot toepassing. Met een totale investering van €300 miljoen, verdeeld over R&D, demonstratie en commerciële opschaling wil het project bijdragen aan CO₂-reductie, werkgelegenheid, innovatie en versterking van de strategische relevantie van Nederland. Het doel is om Nederland te positioneren als leverancier van geavanceerde waterstof productietechnologie.

De ontwikkeling verloopt gefaseerd:

- eerst een R&D-fase (TRL6) in 2026-2027,
- gevolgd door een demonstratiefase met een 15MW-systeem (TRL7 tot 8) in 2028-2029, en
- uiteindelijk een First-of-a-Kind commerciële fase met een 50MW-systeem (TRL8) in 2029 tot 2031.

4.3. KPI's Innovatieprogramma's

Het doel van de actieagenda Energy Materials is om door middel van gerichte investeringen een structurele, positieve impact op de Nederlandse economie te realiseren. Om de impact van de voorgestelde investeringen bij te houden is een aantal 'kern-KPI's' gedefinieerd. Hierbij is (ook) gekeken naar de praktische haalbaarheid en objectieve meetbaarheid van de opvolging. Hierbij zijn de lessen uit de NGF-programma's NXTGEN Hightech, PhotonDeltaNL en Materials Independence and Circular Batteries als basis gebruikt.

KPI	Toelichting	2030	2035
Extra verdien-vermogen	De actieagenda's hebben als doel om verhoogd verdienvermogen (BBP) te realiseren d.m.v. nieuwe economische activiteit.	€1.000 mln	€5.000 mln
Maatschappelijke impact	Maatschappelijke impact vertaalt zich in CO ₂ -reductie, efficiënter energiegebruik en onafhankelijkheid van kritieke materialen.		
Aantal betrokken bedrijven bij Innovatieprogramma's	Bedrijfstractie voor de actieagenda's is cruciaal voor het effectief opbouwen van verdienvermogen	100	200
Dealflow: Additionele investeringen	Doel is het realiseren van additionele private investeringen als multiplier op de publieke investeringen	€25 mln	€110 mln
Aantal nieuwe geregistreerde bedrijven in Nederland	Doel is om nieuwe bedrijven in NL te creëren (start-ups/spin-offs of bestaande bedrijven uit het buitenland / JVs direct herleidbaar aan NTS)	10	25
Aantal nieuwe innovatieprogramma's	De Actieagenda is een start van Nationale Technologie Strategie. Nieuwe innovatieprogramma's op nieuwe thema's worden verwacht / zijn noodzakelijk	4	5
Publicaties	Publicaties zijn een belangrijke KPI om output te meten	200	600
Patenten	Aangevraagde (toegekende) patenten zijn een belangrijke KPI om inventieve bedrijvigheid aan te tonen.	100 (75)	350 (260)
Talent	Aantal FTE werkend in de sectoren organisaties aangesloten bij de actieagenda.	30.000	60.000
Control points / Positie in de waardeketen	Opmaat naar strategische positie / relevantie van technologie op wereldniveau. Levels: 1. We begrijpen onze positie in de waardeketen en weten wat en/of welke positie ons doel is. 2. We hebben een helder beeld van onze potentiële en 'must have' klanten. 3. We zijn in contact met deze potentiële ('must have') klanten 4. De potentiële klanten tonen bereidheid om mee te ontwikkelen en/of mee te investeren in ons consortium en/of bedrijf. 5. We hebben eerste orders en verkopen van klanten.	6 bedrijven Level 4	4 bedrijven Level 5

5. Ecosysteemactiviteiten

In 2035 willen de gezamenlijk uitvoerende partijen significante posities invullen in de internationale waardeketens. Hierbij is het nadrukkelijk niet de bedoeling de volledige waardeketens in Nederland te hebben, maar te streven naar specifieke 'high value'-posities. De opgave voor het ecosysteem is elkaar op de hoogte houden van de specifieke posities die Nederlandse partners willen innemen en hoe diverse posities elkaar kunnen versterken. Hiervoor zijn voor de twee verschillende waardeketen, **twee sterke 'agenderende, programmerende en coördinerende' instanties nodig** om het veld te overzien en afweging van verschillende (deel) belangen vorm te geven. De organisaties moeten de verbindingen leggen tussen kennisinstituten en de markt, de samenhang bewaken tussen de chemie, materialen en hightech-sectoren binnen Nederland. Ook moet de internationale (Europese) samenwerking specifiek en concreter worden uitgewerkt, met name de aansluiting van de technologische ontwikkelingen met daadwerkelijke eindgebruikers die veelal buiten Nederland zitten. Binnen batterijtechnologie is Battery Competence Cluster-NL (BCC-NL) bij uitstek de aangewezen partij hiervoor met een brede basis aan gecommiteerde partijen. Voor het elektrolyse/waterstof-ecosysteem in Nederland is het van belang om een vergelijkbare organisatie te creëren.

5.1. BCC-NL

Belangrijkste aandachtspunten voor BCC-NL om aan te werken, zijn:

- Meer structurele aansluiting vanuit verschillende kanten uit de waardeketen, met name het verbeteren van connecties met stakeholders vanuit de overheid, zoals NFIA, Invest-NL, ROMs, RVO en de ministeries van EZ en I&W.
- Verdieping in de waardeketen binnen Nederland (bijvoorbeeld door de aansluiting van toeleveranciers van component voor de bouwers van productiemachines)
- Europese samenwerking en ketenintegratie; gericht acquireren van ontbrekende schakels in de keten, en export versterken via:
 - Internationalisatie: Duitsland, Frankrijk, Zweden, Zuid-Korea, China, US
 - Markt-thema aanvraag Zuid-Korea: stimuleren Publiek-Private samenwerking
 - Markt-thema aanvraag China: stimuleren Publiek-Private samenwerking, en uitwerken specifieke samenwerkingsvormen voor innovatie.
- Uitwerking investering in een Nederlandse niche-batterijfabriek.
- Versterken financieringsmogelijkheden, voornamelijk ook rondom OPEX-ondersteuning.
- Versterken kennis, talent en human capital met een Battery Academy.
- (Co-)Investering in infrastructuur en faciliteiten en die internationaal profileren.
- Aanjagen van stimulerende regelgeving en structurele financiering agenderen.



5.2. 'Electrolysis Competence Centre-NL'

Belangrijkste aandachtspunten voor het elektrolyse-ecosysteem om aan te werken, zijn:

- Het effectief opzetten van een proactieve platform organisatie voor elektrolyzers, naar model van BCC-NL, waar het brede ecosysteem zich aan verbindt.
- Ontwikkeling van ketensamenwerking: leercurves van grote elektrolyse-projecten door laten vloeien naar technologie-ontwikkelaars upstream in de waardeketen.
- Afstemming met de NTS Process Technologies.
- Europese beleidsafstemming en regelgeving.
- Standaardisatie, meetprotocollen en productpaspoorten.
- Investeren in technologiedemonstratie.
- Agenderen van een financieringsinstrumentarium hoe start-ups te financieren met circulaire / design 4 circularity-meerwaarde met een business-case op lange termijn, maar niet op korte termijn.

Door deze aanpak wordt het voorgestelde ECC-NL een katalysator voor industrialisatie, standaardisatie en internationale positionering van Nederlandse elektrolysetechnologie.



6. Organisatie en vervolg

6.1. Innovatiecoalitie

De implementatie van de actieagenda, in combinatie met de concrete governance en organisatie van de innovatieactiviteiten wordt na publicatie en lancering van alle NTS-Actieagenda's, opgepakt door KIA-ST. Naar verwachting wordt het gecommitteerde veld vertegenwoordigd door een Innovatiecoalitie, die wordt belast met de coördinerende en beherende functie, waarmee de specifieke inhoudelijke aandacht voor de NTS wordt geborgd. Mandaat van de Innovatiecoalitie wordt nader bepaald. Voor de ecosystemen binnen de huidige actieagenda wordt gepleit voor **een prominente rol van BCC-NL en (het nog te vormen) ECC-NL in de governance.**

De beoogde governancestructuur voor de NTS-Actieagenda's wordt ook beschreven in het overkoepelende NTS-document over alle actieagenda's heen. De specifieke invulling voor de actieagenda Energy Materials, inclusief de personele invulling, wordt in 2026 afgerond in nauwe samenwerking met de KIA-ST.

Vanuit de huidige actieagenda Energy Materials zijn aandachtspunten voor een effectieve governance:

- Centrale regie (doel en middelen) met overkoepelende afstemming tussen ministeries / belegde verantwoordelijkheid vanuit de verschillende ministeries in gezamenlijk gremium.
- Consistente en coherente programmatische aansturing.
- Slanke governance met minimalisering verschillende gremia.
- Lerend-vermogen rondom organisatie van eerdere (Groeifonds-) initiatieven.
- Belangrijke (leidende) rollen voor inhoudelijke experts; met name vanuit en door de bedrijven, inclusief start-ups en scale-ups.
- Handelen vanuit greater good.
- Agile way of working richting start-ups en scale-ups.
- Beslissingssnelheid als specifieke KPI voor governancestructuur.

Financieringsbehoefte Innovatie Programma's Energy Materials	Totaal Meuro	Publiek Meuro	Privaat Meuro
Elektrolyzers			
PEM - Hoogwaardige materialen en geavanceerde cel- en stackontwerpen voor PEM	34	16	18
AWE - Hoogwaardige materialen en geavanceerde cel- en stackontwerpen voor flexibele alkaline waterelektrolyse	24	12	12
SOE - Schaalvergroting, duurzaamheid en betrouwbaarheid voor SOE	32	16	16
Totaal Elektrolyzers	89	44	45
Batterijen			
Versnelling van equipment-industrialisatie voor productie duurzame batterijmaterialen	42	21	21
Digitale optimalisatie van batterijproductieprocessen	16	8	8
Nederlandse batterijcelproductie infrastructuur	52	26	26
Strategische innovatieketen voor batterijtechnologie	16	9	7
Totaal Batterijen	126	64	62
Totaal Energy Materials	215	108	107



Ook op het gebied van financiering zal na lancering en publicatie van de actieagenda in 2026 een vervolg worden gegeven. Een indicatie van de benodigde financiering voor de in deze actieagenda opgestelde innovatieprogramma's is hieronder samengevat. Dit zijn slechts indicaties en staat los van mogelijk nieuwe innovatieprogramma's.

6.2. Vervolg programma ontwikkeling

Het startpunt voor de actieagenda was de beschrijving van Energy Materials zoals opgenomen in de NTS. Vervolgens zijn op diverse momenten keuzes gemaakt om te komen tot die gerichte innovatieprogramma's en activiteiten waarvan de grootste impact verwacht wordt. Dit leverde focus op om de inhoud van de innovatieprogramma's aan te scherpen en concreet te maken in lijn met wat bedrijfsleven en kennisinstellingen zien als de grootste technologische R&D&I-uitdagingen om bedrijvigheid te stimuleren.

De bewuste focus brengt vanzelfsprekend een versmalling van de scope van het NTS-onderwerp Energy Materials met zich mee. Het is echter ook van belang om het onderwerp in de breedte voldoende aandacht te geven. Er vindt tenslotte veel meer (door)ontwikkeling van de sleuteltechnologie plaats dan is ondergebracht in de innovatieprogramma's van de actieagenda's. De KIA ST wil daar, via de innovatiecoalitie van deze actieagenda, voldoende zicht op houden. Ze wil deze (door)ontwikkeling ook in enige mate stimuleren en contact houden met alle partijen die innoveren op het gebied van Energy Materials. Hoewel de uitwerking van de actieagenda gericht is op een beperkt aantal onderwerpen, omvat de scope van de actieagenda dus de volledige breedte van het NTS-onderwerp. De vertegenwoordiging van de innovatiecoalitie van deze actieagenda zal zich daarom, naast de innovatieprogramma's, ook richten op de brede (door)ontwikkeling van Energy Materials.

Na de aanbidding van de huidige actieagenda zal concreet de governance van de NTS moeten worden vormgegeven en afgestemd worden met andere beleidsagenda's in Nederland. Rondom batterijtechnologie moet bijvoorbeeld via BCC-NL de update van de Nationale Agenda Batterijsystemen concreet worden vormgegeven. Met een helderder beeld zal de opgehaalde overkoepelende steun voor de actieagenda van de huidige achterban moeten worden geconcretiseerd tot daadwerkelijk commitment. Daarnaast zal de afstemming met langdurig financiering rondom industriepolitiek van Nederland moet worden vormgegeven (zie ook het Rapport Wennink).

Op de middellange termijn moet inhoudelijke afstemming tussen NTS-agenda's concreet plaatsvinden om:

- Overkoepelende thema's tussen actieagenda te agenderen naarmate de actieagenda's voortschrijden. Gedurende de verdere vormgeving en uitvoering van de NTS is het strategisch raadzaam om gedeelde ambities en gemeenschappelijke maatschappelijke en industriële uitdagingen over deze agenda's heen te identificeren en expliciet te maken. Verschillende overkoepelende thema's, met name AI & Data Science en Kritieke



Grondstoffen (CRMs), waaronder materiaalvervanging en circulaire-economiebenaderingen, worden steeds belangrijker binnen meerdere NTS-domeinen, zoals Energy Materials, Semiconductor Technologies en Process Technology. Door te inventariseren of deze thema's als transversale pijlers binnen de actieagenda's kunnen worden gepositioneerd, wordt de strategische samenhang versterkt, programmatische afstemming mogelijk gemaakt en de systeemimpact gemaximaliseerd.

- Agendering van nieuwe innovatieprogramma's met nieuwe commitment. Andere technologieën die op dit moment (nog) niet binnen specifieke actieagenda's zijn opgenomen kunnen in de toekomst van groot belang worden, welke effectief ondersteund moeten worden. Dit betreft bijvoorbeeld kernenergie, thermische energiesystemen en metaalbrandstoffen, die momenteel buiten het bereik van NTS Energy Materials vallen, maar naar verwachting op middellange tot lange termijn strategisch relevant zullen worden.



Colofon

Auteurs:

Auke Jisk Kronemeijer	TNO / Holst Centre
Joost van de Griendt	TNO Vector
André Schilt	BCC-NL
Michiel Dorrepaal	VDL Hydrogen Systems

Innovatieprogramma's Batterijen

Kevin Brundish	LionVolt
Valerio Gulino	LeydenJar
Axel Schönecker	E-magy
Marnix Wagemaker	TUD

Innovatieprogramma's Elektrolyse

Ruud Bouwman	VDL-ETS
Arend de Groot	TNO
Thijs de Groot	TU/e
Michiel Langerman	TNO
Jan Willem Lenderink	Bosch
Martijn Mulder	Battolyser Systems
Paolo Pescarmona	RUG

Onderstaande is een lijst van partijen, welke deels al betrokken zijn geweest in de totstandkoming van deze Actieagenda en deels genoemd zijn als relevante en mogelijke partijen om deel te nemen aan de Innovatieprogramma's. Deze lijst is niet definitief en dient slechts als voorbeeld van geïnteresseerde en mogelijk te betrekken partijen. In de verdere opvolging van de Actieagenda kunnen en zullen mogelijk nog andere partijen betrokken worden.



