



Elektrochemische Conversie & Materialen

Naar een CO₂-neutrale energievoorziening in 2050





DERGEBIED

Inhoudsopgave

Samenvatting & conclusies	7
1. Naar CO2-reductie door sterke inzet op energie-innovatie	11
2. Systeemintegratie van elektrolyse	15
3. Innovatieve elektrochemie en materiaalkunde	21
4. Opleiding en kennisuitwisseling	27
5. Governance	29
Annex A - ECCM naar energiefunctionaliteit	33
Annex B - Bedrijvigheid NL Elektrochemische Conversie en Materialen	39
Annex C - Geconsulteerde lopende initiatieven en platforms	40
Annex D - Commissiesamenstelling	41
Annex E - Verantwoording	42
Annex F - Verklarende woordenlijst	43



Missie Elektrochemische Conversie & Materialen (ECCM)

Het is evident dat in ons toekomstig energiesysteem hernieuwbare elektriciteit een hoofdrol zal spelen in de transitie naar een CO₂-arme energievoorziening. Deze transitie wordt gefaciliteerd door de CO₂-doelstellingen zoals die ook door de Nederlandse overheid zijn vastgelegd (CO₂-neutraal in 2050). Dit vereist vérgaande elektrificatie. In de toekomst zal echter behoefte blijven bestaan aan brandstoffen (voor luchtvaart, scheepvaart en zwaar wegtransport) en aan chemische producten en materialen. Deze activiteiten en bijbehorende productieprocessen zijn nu verantwoordelijk voor ruim 35% van de wereldwijde CO₂-uitstoot¹. Er ligt een grote uitdaging om deze brandstoffen en chemische producten te vervaardigen via de inzet van hernieuwbare elektriciteit, op basis van biomassa en/of CO₂. Dit kan met elektrochemische conversie.

Daarnaast zijn oplossingen nodig voor het probleem van de onbalans tussen productie en verbruik van elektriciteit, ook wel intermittency genoemd (zowel over- als onderaanbod). Deze oplossingen liggen in het verbinden van netwerken en productiecapaciteit (interconnectie), het organiseren van een optimale balans van vraag en aanbod door flexibele productie en afname, en in directe opslag van elektrische energie. Voor dat laatste is opslag van elektriciteit in accu's of vergelijkbare systemen een optie, net als de elektrochemische productie van chemicaliën als energiedrager. Deze elektrochemische conversie is de meest belovende optie voor langetermijnopslag omdat deze technologie zich gemakkelijk laat schalen naar de hoeveelheid energie.

¹ United States Environmental Protection Agency (EPA)

Samenvatting & conclusies

Elektrochemische Conversie & Materialen (ECCM) is een essentiële technologie voor de transitie naar een duurzaam energiesysteem omdat ECCM de sleutel bevat tot het opslaan van hernieuwbare elektriciteit in chemische bindingen. Dit legt de basis voor toekomstige duurzame, synthetische energiedragers die op verschillende manieren een bijdrage kunnen leveren aan een duurzame energievoorziening.

ECCM biedt een oplossing voor het toekomstige probleem van een (tijds- en plaatsafhankelijke) onbalans van elektriciteit en ondervangt een structureel tekort aan duurzame brandstoffen die langs andere routes worden geproduceerd (met name uit biomassa). Tevens zijn via elektrochemische conversie hernieuwbare grondstoffen voor de chemie-sector te genereren. Elektrochemische Conversie & Materialen (ECCM) is de sleuteltechnologie om de elektrificatie van processen mogelijk te maken.

Nederland zal vanuit strategisch belang niet van het buitenland afhankelijk willen zijn voor implementatie van deze nieuwe technologie in vitale infrastructuur. Daarnaast heeft Nederland de ambitie om via eigen onderzoek en ontwikkeling en internationale samenwerking een belangrijke rol te spelen in de mondiale energietransitie. Na een uitvoerige consultatie van deskundigen uit het bedrijfsleven en van het kennisveld komt de adviescommissie Elektrochemische Conversie & Materialen, ingesteld door de topsectoren HTSM, Energie en Chemie (zie annex D – Commissiesamenstelling en E - Verantwoording) daarom tot de volgende doelstellingen:

Om deze doelstellingen te bereiken is het volgens de commissie noodzakelijk in te zetten op de volgende drie aandachtsgebieden:

1. Integratie van elektrolyse en duurzaam waterstof in het energiesysteem en grootschalige chemische processen (hoofdstuk 2);
2. Grootschalige ontwikkeling van innovatieve elektrochemie en materiaalkunde (hoofdstuk 3);
3. Het aanbrengen van focus en massa in onderwijs en kennisuitwisseling (hoofdstuk 4).

De commissie komt daarom tot de volgende aanbevelingen ten aanzien van governance, regelgeving, onderwijs en onderzoek & ontwikkeling:

Governance

- Ontwikkel een nationale aanpak op het gebied van ECCM, gericht op internationaal samenwerken en gerichte innovatie. Dit vereist het benoemen van sterktes en aandacht voor blinde vlekken, regie en coördinatie, een goed overzicht over knelpunten en potentiële oplossingen in binnen- en buitenland, en een vergroting

van de inzet van mensen en middelen.

- Stel een deskundige stuurgroep in die met een nationaal mandaat de regie kan voeren. Vanwege de complexiteit van het energiesysteem zijn afzonderlijke marktpartijen zonder regie niet in staat een collectieve doelstelling te realiseren. De stuurgroep is verantwoordelijk voor het convergeren en prioriteren van opties, monitoring, feedback, leren en evaluatie, en organiseert een kennisplatform waar partners met kennis en kunde aan deelnemen. Hierin wordt de stuurgroep geadviseerd door een internationale adviesraad.
- Verbind use inspired onderzoek met de doorontwikkeling en investeringsbudgetten voor grootschalige pilots en demo's. Oormerk budgetten voor onderzoek naar ECCM door universiteiten, hogescholen en TO2-instituten, maar ook voor demo's en pilots zodat bovengenoemde verbinding tussen use inspired onderzoek en doorontwikkeling daadwerkelijk kan plaatsvinden.
- Stuur op overtuigende business cases en nationaal strategisch belang. Ter illustratie: in Duitsland wordt in het besluit voor stimulering het strategisch belang (bijvoorbeeld bij waterstoftechnologie) vaak zwaarder meegenomen dan de actuele business-case, zie bijvoorbeeld het Kopernikus-programma².

- In 2030 wordt waterstof CO₂-arm geproduceerd tegen een prijs van maximaal € 2/kg en in 2050 tegen een prijs van € 1/kg.
- In 2030 wordt minstens 20% van de waterstof en ammoniak geproduceerd zonder CO₂ uitstoot.
- In 2050 wordt minstens 40% van de in de industrie geproduceerde CO₂ gebruikt als grondstof in de transitie naar een circulaire koolstofkringloop.
- Mobiliteit: in 2050 is de hele transportsector CO₂-neutraal.

² In 2016 zijn in Duitsland vier Kopernikus-programma's gestart die voor doorbraken in de Energiewende moeten zorgen. De focus ligt op vier 'probleem- corridors' zonder vaste einddoelen om tijdens de programmaperiode van 10 jaar verschillende oplossingsrichtingen open te kunnen houden. Zie: www.kopernikus-projekte.de

- Stel een boegbeeld aan om ECCM te vertegenwoordigen richting de grote diversiteit aan stakeholders. Het boegbeeld kan als onafhankelijk voorzitter van de nationale commissie optreden, als bestuurlijk aanspreekpunt dienen en zijn of haar netwerk aanspreken om partijen rondom ECCM te verbinden.

Regelgeving

- Zet in op lange termijn zekerheid rondom wet- en regelgeving op het gebied van CO₂ en een gelijk speelveld in internationaal verband. Om de reductie van CO₂-emissies te stimuleren zijn meer instrumenten nodig dan alleen op het gebied van subsidie. Beprijzing van CO₂-uitstoot als ondersteunend mechanisme is wenselijk.
- Stel normen voor CO₂-reductie en voor CO₂-emissies van per voertuig getransporteerde goederen (per km of ton). Dit zou ook voor andere sectoren dan mobiliteit en transport kunnen gelden. Denk bijvoorbeeld aan een percentage van de getransporteerde stroom moet een duurzame footprint hebben en de CO₂-footprint van bulk industriële producten zoals chemicaliën moet met x% verlaagd zijn in 2050.

Onderwijs

- Investeer in elektrochemie-opleidingen aan universiteiten en hogescholen.
- Stimuleer het opleiden van professionals aan hogescholen en in het beroepsonderwijs, die straks moeten zorgen voor de opschaling en de implementatie.
- Ontwikkel multidisciplinaire BSc en MSc opleidingen op het gebied van materialen voor elektrochemie en elektrochemische conversiesystemen.

Onderzoek en ontwikkeling

- Introduceer een nationale aanpak in de vorm van een meerjarig missiegedreven programma (Technology Readiness Level, TRL, 1-6) om impact te kunnen maken en de huidige versnippering in kleinschaliger initiatieven tegen te gaan. De uitvoering kan bij bestaande initiatieven en structuren aansluiten, maar het financieel en bestuurlijk mandaat dient bij een onafhankelijke commissie te liggen. Het programma moet nadrukkelijk ook (toegepast) onderzoek met een lange tijdshorizon faciliteren,

alsmede fundamentele engineering; dit is doorgaans lastig te financieren maar zijn beiden essentieel. Biedt ook ruimte voor exploratie van nieuwe onderwerpen binnen de thematiek.

- Introduceer nieuwe leerstoelen en tenure track Universitair Docent (UD) aanstellingen aan universiteiten en lectorposities aan hogescholen, om zo kennisopbouw te stimuleren en de capaciteit van kennisinstellingen te vergroten voor het opleiden en begeleiden van nieuw talent.
- Ondersteun benodigde investeringen voor pilot plants om te kunnen testen en ontwikkelen onder realistische procescondities.
- Stimuleer de vorming van een samenghangende "community". Zoek samenwerking met koplopers in het buitenland; Nederland kan met gerichte investeringen op het gebied van elektrolyse en brandstofcellen aanhaken bij de internationale state-of-the-art in ECCM.
- Start met een onderzoeks- en ontwikkelingsbudget van minimaal M€ 20 per jaar³ voor de doorontwikkeling van reeds bestaande kennis en technologie (toegepast missiegedreven onderzoek voor implementatie in 5-10 jaar, TRL3-6, M€ 16) en voor het versterken van de kennisbasis en investeringen in onderzoek waarvan de implementatie-horizon langer dan 10 jaar zal zijn (fundamenteel missiegedreven onderzoek, TRL1-3, M€ 4).
- Reserveer M€ 200 per jaar voor matching met private middelen voor investeringen in kleinschalige ECCM proeftuinen en grootschalige open-access pilots en demo's. Dit zal ertoe leiden dat op korte termijn (<5 jaar, >TRL7-9) bestaande technologieën daadwerkelijk voor de eerste keer kostencompetitief kunnen worden aangetoond.

³ Oppakken en doorpakken. Durven kiezen voor energie-innovatie (AWTI)

Tabel 1 Voorbeelden van korte en lange termijn kansen en uitdagingen in Elektrochemische Conversie & Materialen.

	Korte termijn (0-10 jaar): tot 2030	Lange termijn (10-30 jaar): tot 2050
Systeemintegratie	• Integratie van warmte en power (stoom recompressie, elektrische boilers en warmtepompen). • Stoom vervangen door elektrische aandrijving. • Demo en first implementation elektrolyse (water naar waterstof).	• Waardeketen ontwikkeling nieuwe grondstoffen en energie. • Grootschalige elektrolyse. • Inpassing elektrolyser in multi-commodity netwerk. • Infrastructuur voor waterstof, CO₂ en elektriciteit. • Waterstofbenutting richting chemie en brandstoffen. • Benutten CO₂-bronnen (CCU) voor elektrochemische conversie (bijv. Rotterdamse haven).
Elektrolyse	• Intensified electrolyzers. • Goedkope en duurzame deelcomponenten. • Dynamisch gebruik. • Economische schaalbaarheid.	• Elektrolyse voor de productie van chemicaliën en brandstoffen uit hernieuwbare bronnen (CO₂, N₂, biomassa). • Decentrale vs. centrale productie.
Nieuwe elektrochemie en materiaalkunde	• Selectieve oxidaties voor efficiënte conversies in hoogwaardige applicaties als opstap naar grote schaal. • Materialen voor efficiënte en duurzame elektrolyse. • Gebruik van niet-schaarse metalen als elektrokatalysator. • Elektrochemische zuivering en recycling.	• Slimme integratie van elektrolyse processen met thermokatalytische processen. • Elektrochemische CO₂-winning (capture) en doorreactie. • Foto-elektrochemie en directe zonlicht conversie. • Glasfibers voor omzetting H₂O naar H₂ en O₂ met behulp van (zon)licht.
Brandstofcellen integreren	• Elektrochemische compressie. • Integratie met waterstof.	
Redox-flow energie opslag	Inpassing redox-flow systemen in het elektriciteitsnetwerk.	Redox-flow met aparte anolyte en catholyte voor conversie.



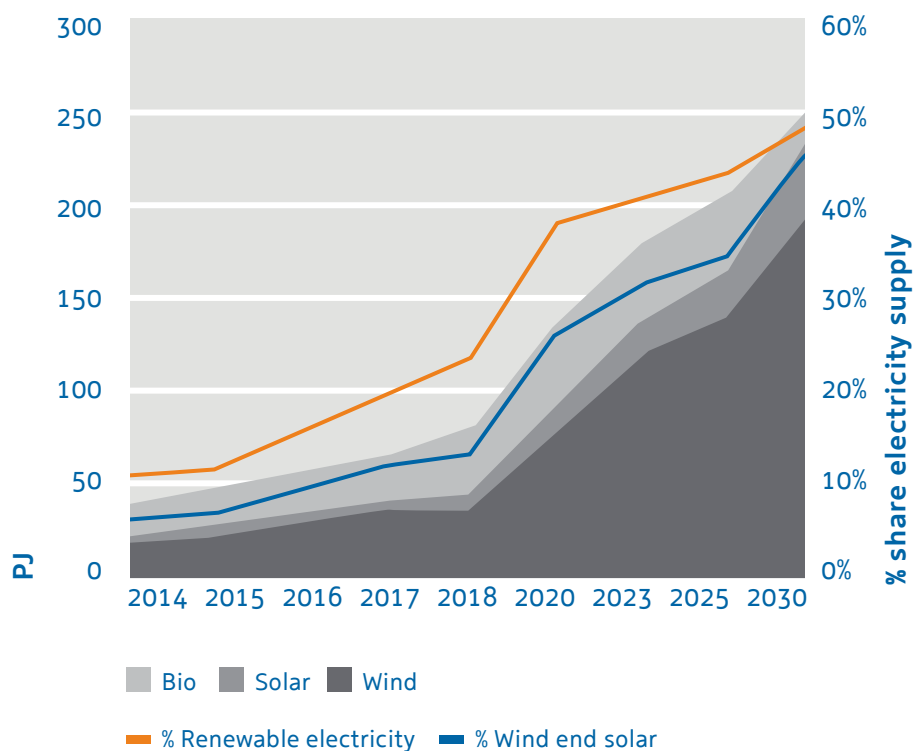
1



Naar CO₂-reductie door sterke inzet op energie-innovatie

Een versnelling van de transitie naar een CO₂-neutrale energie infrastructuur is, in het licht van de doelen die zijn gesteld op COP21 en 22 (UNFCCC)⁴, en welke zijn onderschreven door de EU (Renewable Energy Directive)⁵ en op nationaal niveau (Energieagenda)⁶, noodzakelijk geworden. Overheidsbeleid om deze versnelling te stimuleren heeft inmiddels geleid tot een forse investering in de opwekking van duurzame elektriciteit (zie figuur 1)⁷. Dit impliceert dat CO₂-reductie de belangrijkste reden is om energie innovatie in te zetten.

Het gevolg van deze ontwikkeling is dat in de komende 30 jaar de manier waarop energie zal worden gegenereerd, opgeslagen, geleverd, geprijsd en verkocht fundamenteel anders zal worden dan de huidige op fossiele brandstof gebaseerde energie infrastructuur. Naast het gebruik van warmte uit onder andere geothermie, zal de primaire energievorm elektrisch van aard zijn. In het toekomstige energiesysteem zal nog steeds behoefte bestaan aan brandstoffen (luchtvaart, scheepvaart, zwaar wegtransport), chemische producten en materialen, waarvan gebruik en productie verantwoordelijk zijn voor ruim 35% van de wereldwijde CO₂-uitstoot. Er ligt een grote uitdaging om deze producten via elektriciteit, biomassa en/of CO₂ te maken. Dit kan met elektrochemische conversie. Elektriciteit kan direct gebruikt worden maar is behalve in accu's moeilijk grootschalig en langdurig op te slaan (zie box 1). Een kritische stap is derhalve de conversie van elektriciteit naar andere vormen van energie, waarbij gedacht moet worden aan energie in de vorm van warmte voor direct gebruik, brandstoffen en chemische bouwstenen en producten. In de laatste twee gevallen wordt elektrische energie geconverteerd en opgeslagen in chemische bindingen; voor brandstoffen kan deze energie weer via schone verbranding worden ontsloten, terwijl chemische bouwstenen en producten dienen als grondstof voor een groene (chemische) industrie.



Figuur 1 Ontwikkeling van de beschikbaarheid van duurzaam opgewekte elektriciteit in Nederland.
Bron: Electrification in the Dutch process industry, Berenschot, 2017.

Door het toekomstige duurzame elektriciteitsproductiepotentieel te koppelen aan de productie van chemische producten en brandstoffen ontstaat er enerzijds een nieuwe outlet (markt) die meer toegevoegde waarde kan genereren voor duurzaam opgewekte elektrische energie⁸ en ontstaat

anderzijds een energiesysteem dat de seizoensvariaties van duurzame elektriciteit kan opvangen door opslag in energiedragers. Deze vergroening van de productieprocessen zou kunnen leiden tot een 35% reductie van de wereldwijde CO₂-uitstoot. Een andere belangrijke reden voor de conversie van duurzame elektriciteit naar vloeibare brandstoffen zijn de nu nog op fossiel gebaseerde brandstoffen voor het zware transport, onder andere lucht en scheepvaart. Naar schatting ~20% van de wereldwijde olieproductie wordt gebruikt voor vloeibare brandstoffen die

⁴ Marrakech Action Proclamation for Climate and Sustainable Development (UNFCCC, 2016)

⁵ Directive 2009/28/EC of the European Parliament and the Council (European Union, 2009)

⁶ Energieagenda (Dutch Ministry of Economic Affairs, 2017)

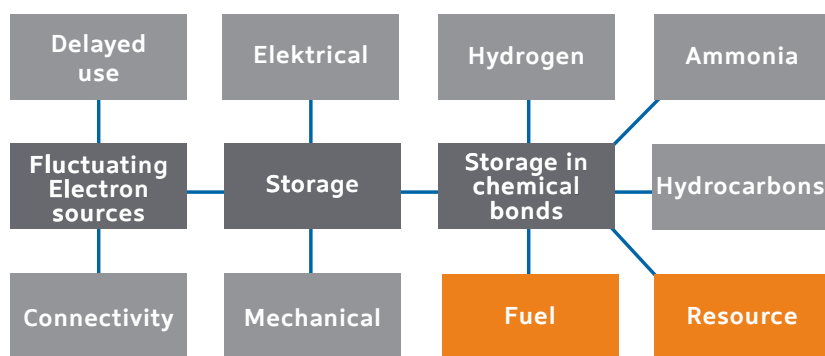
⁷ Electrification in the Dutch process industry

⁸ Fossiele grondstoffen zijn voor de huidige bulkchemie onmisbaar en de vervanging hiervan in de vereiste kwantiteit en kwaliteit is technisch een enorme uitdaging. Implementatie van oplossingen vereist bovendien een lange adem vanwege de enorme investeringskosten die met chemische clusters zoals de Botlek, Chemelot, Delfzijl en Bergen op Zoom gepaard gaan.

Box 1: Seizoensfluctuatie^{8,9}

Het opvangen van seizoensfluctuaties is bij een grote fractie hernieuwbare energie een grote uitdaging. Deze fluctuaties moeten in de eerste plaats worden opgevangen door de connectiviteit van het elektrische netwerk te verbeteren en de mogelijkheden om de vraag op het aanbod af te stemmen ('delayed use'). Mechanische opslag kan maar in beperkte mate (maximaal 12 uur) voorzien in opslagcapaciteit. Accu's zijn efficiënt, maar vergen een hoge investering en hebben een lage energiedichtheid (per volume en gewicht)¹⁰. Grootchalige, goedkope elektrische opslag is daarom dringend gewenst. Langdurige opslag van energie is beter mogelijk in chemische bindingen. In tegenstelling tot accu's, is bij elektrochemische conversie de energieopslag gescheiden van het conversieproces. Met één elektrolysesysteem kan dus een oneindige hoeveelheid waterstof worden gemaakt. De energieopslag door accu's wordt gelimiteerd door de omvang van de accu.

Grote energiemaatschappijen (o.a. Nuon) voorzien dat de elektrische basislast (het niet-fluctuerende gedeelte van de elektriciteitsvraag) uiteindelijk volledig duurzaam zal worden geproduceerd, met de noodzakelijke overdimensionering om volledig duurzaam te zijn. Dit houdt in dat het overschot aan duurzame elektriciteit zal moeten worden aangewend voor de productie van (CO₂-neutrale) brandstoffen (met name waterstof) en chemicaliën (power to chemicals) uit water, stikstof (voor o.a. ammonia) en CO₂ (uit lucht) om de seizoensvariaties op te kunnen vangen. De ontwikkeling van elektrochemische conversiemethoden en technologie om CO₂ uit lucht te halen ('direct air capture' technologie) is essentieel voor deze toepassing van duurzame elektriciteit.



Figuur 2 Het elektriciteits-opslagsysteem: Fluctuaties in het elektriciteitsaanbod moeten in de eerste plaats worden opgevangen door de connectiviteit van het netwerk te verbeteren en de mogelijkheden om de vraag op het aanbod af te stemmen beter te benutten (afbeelding TU Delft).

⁹ Seizoensvariaties van enkele tientallen TWh volgens een recent DNV rapport: DNV GL Report Topsector Energie Routekaart Energieopslag 2030

¹⁰ Nederland circulair in 2050, NWA Route Energietransitie.

¹¹ Goedkopere en betere (redox-flow) accu's gaan beschikbaar komen en kunnen ook een deel van de oplossing zijn (demonstratie in Flevopolder, EU-project EnergyKeeper). Hoe goedkoper en beter accu's worden, hoe minder de noodzaak voor waterstof in mobiliteit zal worden (zie hoofdstuk 2). Ook zullen accu's korte termijn fluctuaties in duurzame stroom kunnen opvangen. Daarmee kan ook bijvoorbeeld de elektrolyser (zie hoofdstuk 2) in de toekomst 100% van de tijd operationeel zijn in plaats van een veel lager percentage. Welke technologie het best geschikt is om het toekomstig energiesysteem te implementeren is niet op voorhand te zeggen en kan zelfs verschillen per regio.

moeilijk vervangbaar zijn vanwege de ongelijke energiedichtheid en het gemak van transport en opslag.

De technologie om elektrische energie efficiënt op te slaan in chemische bindingen is een sleuteltechnologie voor de energietransitie naar een CO₂-neutrale energie-infrastructuur in 2050. Een systeembenadering waarbij duurzame energieopwekking, -conversie, -opslag en -transport met een belangrijke koppeling naar chemische bouwstenen en producten een geïntegreerd deel uitmaken van het toekomstige energiesysteem is daarbij een belangrijke voorwaarde voor een succesvolle energietransitie. De combinatie van technologieën om dit toekomstige energiesysteem te verwezenlijken zijn de elektrochemie, materiaaltechnologie, reactor engineering, katalyse, warmte- en transportleer, power electronics, smart grids en benodigde high- en lowtech engineering voor toepassing in de infrastructuur. Deze combinatie van technologieën vereist een integrale aanpak in een nieuwe verbindende sleuteltechnologie voor Nederland, Elektrochemische Conversie & Materialen (ECCM).

Nederland heeft een zeer sterke positie op het gebied van de chemie (de petrochemische industrie in het bijzonder), energie (de gaswinning en exploitatie) en de high- en lowtech maakindustrie (voor systeemintegratie, nanomaterialen, (micro)reactoren en elektrolyse apparaten). Het is ook juist daar waar de kansen liggen voor Nederland; de sleuteltechnologie Elektrochemische Conversie & Materialen maakt de verbinding tussen deze sterkten van Nederland. Samenwerking met de hightech sector is vereist op het gebied van systeemintegratie¹², om o.a. de verbinding tussen elektrochemische conversie en smart grids te maken, zodat bedrijven slim kunnen in- en afschakelen van het energienet. Daarnaast is de gas-, olie- en elektriciteitsinfrastructuur in Nederland een belangrijk voordeel om juist met grote kracht in te zetten op elektrochemische conversie naar brandstoffen en chemische producten voor de

¹² Niet te verwarren met de betekenis van "systeemintegratie" waarmee in het kader van de energietransitie ook wordt bedoeld op systeemveranderingen die nodig zijn om verschillende innovaties in één energiesysteem van de toekomst te laten passen.

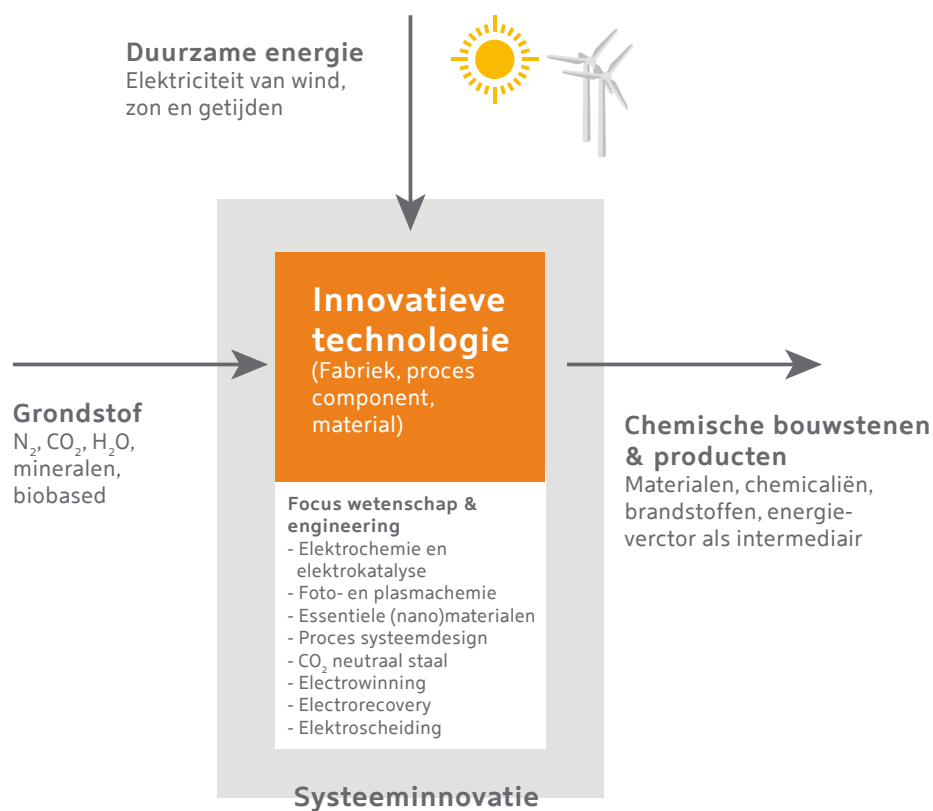
(chemische) industrie. Met een relatief grote kustlijn is Nederland goed gepositioneerd voor windparken aan en in zee, die eventueel kunnen worden gecombineerd met offshore waterstofproductie of zelfs de productie van synthetisch gas. De Nederlandse uitgangspositie is op vele kennisgebieden goed of leidend, maar de kennisinfrastructuur mist de samenhang en massa om de geschetste uitdagingen aan te kunnen pakken.

De energietransitie vergt een nationale aanpak die sterk is gericht op internationale samenwerking en met een overheid die een belangrijke faciliterende rol neemt. Afzonderlijke marktpartijen zijn niet in staat zonder coördinatie een collectieve doelstelling te realiseren vanwege de complexiteit van het energiesysteem. In het bijzonder voor ECCM is er op korte termijn geen sluitende businesscase te maken ten opzichte van traditionele technologie door de huidige marktprijzen van fossiele energie en grondstoffen. Innovatie voor de energietransitie vergt daarnaast niet alleen technologische innovatie rondom ECCM, maar ook economische en sociale innovatie en innovatie rondom regelgeving en vergunningen, zoals uitvoerig beschreven in de tien uitdagingen van de Nederlandse Wetenschapsagenda in de route Energietransitie¹³. Met name ontbreekt het in Nederland aan een lange termijn zekerheid rondom wet- en regelgeving op het gebied van CO₂ en in een internationale context een level playing field.

Afbakening advies

In opdracht van de topsectoren Energie, HTSM en Chemie (zie ook annex E, Verantwoording) heeft de commissie Elektrochemische Conversie en Materialen (annex D, Commissiesamenstelling) dit advies opgesteld. De topsectoren en de commissie hebben gezamenlijk de inhoudelijke thematiek van het advies bepaald zoals is aangegeven in figuur 3.

De hierboven door de commissie geschetste toekomstvisie, waarin ECCM wordt voorgesteld als een essentiële sleuteltechnologie in de energietransitie, wordt breed gedragen, zoals ook blijkt uit de door de



Figuur 3 Afbakening Elektrochemische Conversie en Materialen (ECCM). ECCM gaat uit van twee inkomende stromen: duurzame opgewekte energie en grondstoffen. ECCM is gericht op de technologie en systeemintegratie om de inkomende stromen om te zetten in producten of energiedragers voor energieopslag.

adviescommissie uitgevoerde consultaties van de klankbord- en expertgroep (Annex D) en tijdens de twee georganiseerde workshops met geïnteresseerden en belanghebbenden uit het bedrijfsleven, het kennisveld en de overheid. Ook heeft de overheid met de Energieagenda⁶ een integrale langetermijnvisie gegeven op de energietransitie. De adviescommissie ECCM heeft een deelaspect van deze visie uitgewerkt langs de energiefunctionaliteiten in de Energieagenda (annex A) om tot een invulling te komen van een nationale aanpak van de sleuteltechnologie ECCM, in een meerjarig missiegedreven programma zoals voorgesteld in het recente AWTI rapport¹⁴.

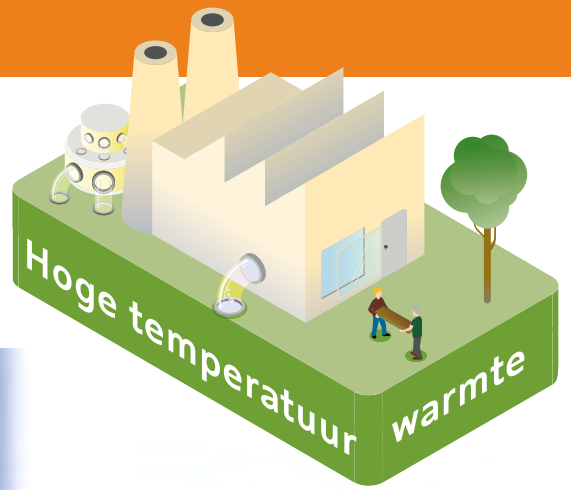
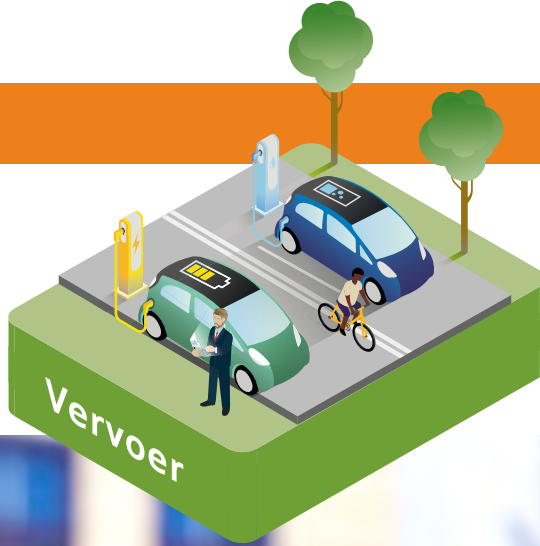
De elektrolyse van water om waterstof te produceren is al ver ontwikkeld, maar er is nog veel onderzoek en ontwikkeling nodig om de kostenefficiëntie en de schaalbaarheid te verhogen. Daarom adviseert de commissie om sterk in te zetten op de systeemintegratie van waterelektrolyse voor de productie van waterstof (hoofdstuk 2). Daarnaast moet er

hernieuwde aandacht komen voor onderzoek en ontwikkeling van nieuwe elektrochemie en materiaal kunde waarbij de nadruk ligt op de innovatieve elektrolyse van chemische producten en synthetische brandstoffen (hoofdstuk 3) in combinatie met reactor engineering en process control. De lacune in het onderwijs in elektrochemische conversie en materialen moet worden gedicht. De aandacht voor opleiding in de elektrochemie op universitair en HBO niveau en de ontwikkeling van een elektrochemische community voor de kennisuitwisseling zijn essentieel om te komen tot een succesvol meerjarig missiegedreven programma rondom de sleuteltechnologie ECCM (hoofdstuk 4). Nieuwe tenure track posities aan universiteiten en instituten en lectoren aan hogescholen zijn nodig ter versterking van de brede kennisbasis. Hoofdstuk 5 behandelt de governance die hoort bij een in te stellen meerjarig missiegedreven programma en gaat in op de rol van het programma in de energietransitie.

¹³ NWA Route Energietransitie

¹⁴ Oppakken en doorpakken. Durven kiezen voor energie-innovatie (AWTI)

2



Systeemintegratie van elektrolyse

Het elektrolytisch “splitsen” van water in zuurstof en waterstof met behulp van elektriciteit, is op dit moment de verst ontwikkelde en meest efficiënte (~70% voor commerciële elektrolyzers) manier om elektriciteit te gebruiken om waterstof als brandstof te maken. Waterstofgas moet wel gecomprimeerd worden opgeslagen of getransporteerd om de energie-inhoud per volume-eenheid te vergroten. Grote voordelen zijn dat elektrolyse schaalbaar is en flexibel inzetbaar (PEM-elektrolyse cellen¹⁵ kunnen op een tijdschaal van seconden reageren op stroomwisselingen). De techniek voor brandstofcellen, gebaseerd op PEM als vaste stofmembranen, is ook ver ontwikkeld en kan worden ingezet om geproduceerd waterstof weer om te zetten in elektriciteit.

Waterstof kan gebruikt worden als brandstof of als grondstof:

1. Als brandstof voor de transportsector (verbrandingswaarde 121 MJ per kg, vergelijk bijvoorbeeld met 44 MJ per kg voor benzine). Biedt eventueel de mogelijkheid om bij te mengen in het aardgasnetwerk of vervanging van aardgas.
2. Als brandstof voor de gebouwde omgeving: voor elektriciteitsproductie op een gewenst moment en plaats met behulp van een brandstofcel (efficiëntie voor de cyclus waterstof – elektriciteit is circa 50-60%).
3. Indien niet voor direct gebruik kan waterstof worden omgezet in een vloeibare brandstof (zoals methanol, koolwaterstoffen, mierenzuur), die vervolgens weer omgezet wordt in waterstof.
4. Als grondstof voor een chemische reactie waarin H₂ wordt gecombineerd met een koolstofbron (bijvoorbeeld CO₂ uit rookgasstromen van verbrandingsprocessen) en bijvoorbeeld stikstof uit de lucht om thermokatalytisch bouwstenen voor de chemische industrie te maken (bijvoorbeeld voor materialen, synthetisch aardgas, ultraschone benzine, methanol en ammoniak), of als reductor, bijvoorbeeld

voor de metaalproductie. Deze processen zijn commercieel al op grote schaal operationeel.

5. Als grondstof voor hoge-temperatuur-warmte in de industrie indien waterstof ook nodig is als reactant in het proces.

Om waterstof als grondstof te kunnen benutten moet er een goedkopere manier komen om CO₂ uit de lucht te halen (voor de transitiefase kan dat ook uit rookgas). Deels kan CO₂ goedkoop worden door een belasting van de overheid, maar dat is een onzeker ‘voordeel’. Het is beter om te zorgen dat CO₂ technisch goedkoop te ‘winnen’ is¹⁶.

NL startpositie

Nederland kent een hoge concentratie van industriële clusters en een hoge bevolkingsdichtheid. Daarmee leent Nederland zich bij uitstek voor de systeemintegratie van elektrolyse. Rotterdam-Pernis is de grootste industriële site voor waterstofproductie in Europa, en er is veel ervaring met het groot-schalige gebruik van waterstof (bijvoorbeeld in de raffinage). Uniek is dat Nederland een zeer geavanceerd nationaal distributienetwerk heeft voor aardgas. De mogelijkheid om dit netwerk geschikt te maken voor

toevoeging van kleine percentages waterstof wordt positief ingeschat door onder andere Alliander. Het aardgasnetwerk kan uiteindelijk worden benut als toekomstig waterstofnetwerk in de vorm van een ringleiding door Nederland voor de verbinding van waterstofproductie.

Nederland heeft een auto-industrie (NedCar, DAF trucks), vooral als belangrijke toeleverancier (bijvoorbeeld VDL). De productie van bussen door VDL is een bedrijfstak waar nu innovatie plaatsvindt rondom elektrochemie met Li-ion accu's. Een voorbeeld van een verbinding tussen de hightech maakindustrie en de energie en chemiesector is het recent gedemonstreerde idee om waterstof snel te transformeren in mierenzuur en, omgekeerd, mierenzuur weer terug om te zetten in waterstof¹⁷. In samenwerking met VDL wordt dit waterstof gebruikt om met behulp van een brandstofcel elektriciteit te genereren die de elektromotoren van de bus voedt. De gedachte daarbij is dat voor nu mierenzuur als vloeibare energiedrager makkelijker opgeslagen en vervoerd kan worden dan waterstof zelf. Ook denkt VDL in de toekomst aan bussen en trucks op waterstof¹⁸.

¹⁵ Polymeer-Elektrolyt-Membraan (PEM) elektrolyse is de elektrolyse van water in een cel voorzien van een vaste polymeerelektrolyt die verantwoordelijk is voor de geleiding van protonen, scheiding van productgassen en elektrische isolatie van de elektroden.

¹⁶ De ECCM-commissie sluit CCS niet uit: met CCS wordt koolstof opgeslagen op de korte termijn die beschikbaar kan komen op de lange termijn voor CCU wanneer fossiele grondstoffen worden uitgefaseerd.

¹⁷ VDL Bus & Coach en Team FAST bouwen 's werelds eerste stadsbus op mierenzuur en Ant power: Take a ride on a bus that runs on formic acid (BBC News, 27 June 2017)

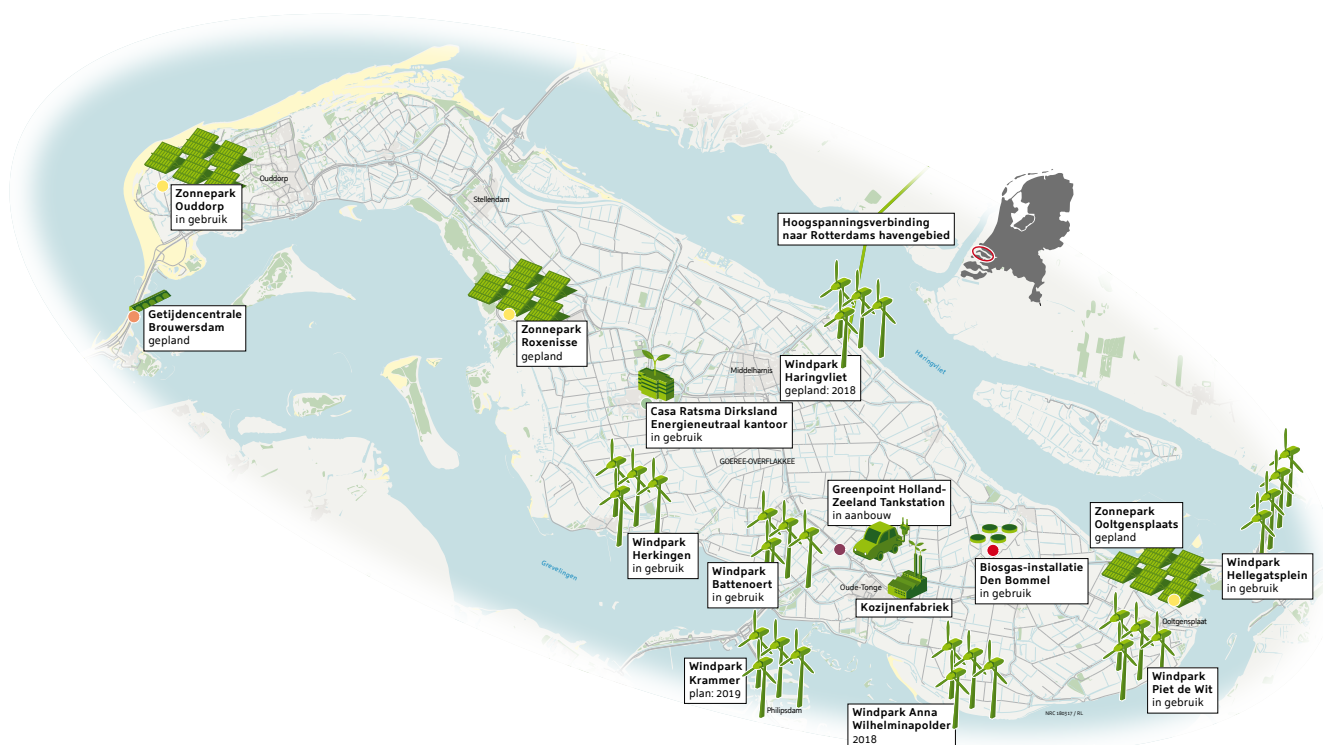
¹⁸ VDL Helmond stapt ook in waterstoftruck

Showcase 1: Greenpoint Goeree-Overflakkee



Op Goeree-Overflakkee is een zakelijke energievoorziening in oprichting door agrarisch ondernemers met andere ondernemers en het duurzame tankstation Greenpoint. De energievoorziening gaat ervoor zorgen dat de ondernemers beter met de (opgewekte) stroom om kunnen gaan en een betere prijs voor energie gaan

betalen. Door Greenpoint kunnen tractoren in de toekomst op lokale waterstof gaan rijden. Daarnaast wordt ook gemikt op de productie van ammonia voor kunstmest (afbeelding boven Greenpoint Fuels, afbeelding onder NRC Handelsblad).



Momenteel zijn er ook verschillende lokale initiatieven om lokaal (eilanden, wijken) zelfvoorzienend in de energiebehoefte te maken, bijvoorbeeld op Vlieland, Ameland, Terschelling en Goeree-Overflakkee (zie showcase 1). Bij deze lokale initiatieven zijn schaalbaarheid en vraagsturing met behulp van een smart grid nog belangrijke aandachtspunten.

In Nederland is een aantal multinationals gevestigd met aanzienlijke infrastructuur en R&D-activiteiten in Nederland, bijvoorbeeld Shell en AkzoNobel. Shell speelt een belangrijke rol in het stimuleren van waterstof als energievector in de energietransitie, onder andere als lid van de in 2016 opgerichte "Hydrogen Council"¹⁹, een verbond van multinationals om de rol te ontwikkelen van waterstof in de energietransitie. Daarnaast is Shell een producent van (offshore) wind-energie en onderzoekt Shell mogelijkheden om duurzame elektronen via waterstof en CO₂ om te zetten in bulkchemicaliën en brandstoffen, die wel de voordelen van de huidige

fossiele brandstoffen hebben maar niet de nadelen zoals CO₂-emissies. AkzoNobel is betrokken bij een project (Waste2Chemistry) om via het verbranden van afval synthesegas te produceren en met bijmenging van waterstof de samenstelling te optimaliseren voor de productie van methanol. Elektriciteitsbedrijven kunnen een belangrijke rol spelen doordat hun vestigingsplaatsen krachtige elektrische aansluitingen hebben en omdat zij met hun rol op de elektriciteitsmarkt optimaal kunnen inspelen op de (prijs-)fluctuaties, door onder andere Power2Gas, waarbij waterstof geproduceerd wordt uit duurzame elektriciteit. Daarnaast heeft Nederland kleine, gespecialiseerde bedrijfjes die actief zijn op het grensvlak van waterstof, elektrochemie en energie, waaronder Nedstack (grootste producent in Europa van brandstofcellenstacks), HyET (waterstof zuivering en compressietechnologie), HYGear (waterstofproductie en kleinschalige distributie, ook voor transport), Hydron energy (showcase 2), Elestor (waterstof/bromide flow cellen) en Magneto Special Anodes (elektrodenfabrikant, recent overgenomen door Evoqua Water Technologies).

Samenwerking met de hightechsector is vereist op het gebied van systeemintegratie, voor de verbinding van ECCM aan smart grids zodat bedrijven slim kunnen in- en afschakelen van het energienet, en apparatenbouw (CO₂-afvanginstallaties inclusief benodigde nanomaterialen, (micro)reactoren en elektrolyse apparaten). Een grote diversiteit aan bedrijven in deze sector, onder andere automotive, is actief in Nederland, zoals VDL (waterstof en accu's voor elektrische bussen en trucks), E-Trucks (Westerhoven Brabant: waterstof en accu's voor elektrische vuilniswagens), Liqal (engineering en de bouw van waterstof tankstations), Stedin (actief op gebied van elektrolyse voor netbalancing, ook interesse in tankstations), Pitpoint (bouw en exploitatie waterstof tankstations en andere schone brandstoffen), Holthausen (tankstations en voertuigen voor waterstof), Teesing (componenten voor waterstof tankstations), etc. Annex B geeft een overzicht van bedrijvigheid in Nederland op het gebied van Elektrochemische Conversie en Materialen.

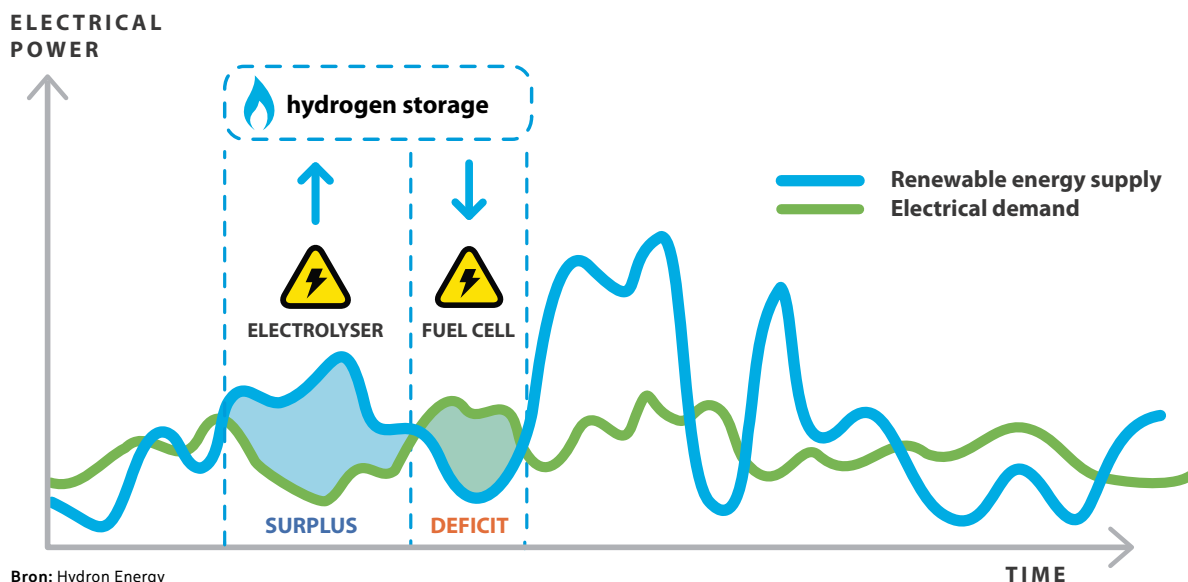
Nederland is wereldwijd erkend een wetenschappelijk koploper op het gebied van

¹⁹ How hydrogen empowers the energy transition, Hydrogen Council January 2017

Showcase 2: Hydron energy

Hydron Energy is een start-up die innovatieve waterelektrolyse (en brandstofcel) technologie ontwikkelt en implementeert op basis van Polymeer Elektrolyt Membranen. Samen met gespecialiseerde strategische partners produceert Hydron

Energy hernieuwbare energie-installaties op basis van waterstof technologie. Door de toepassing van flexibele en modulaire elektrochemische technologie kan Hydron Energy oplossingen leveren met een bereik van enkele Watts tot MW-schaal.



Showcase 3: Energiecentrale als superbatterij

Nuon onderzoekt met kennisinstellingen de mogelijkheden om seizoenoverschotten bij de Magnum-centrale in Eemshaven vanaf 2030 op te slaan in de vorm van ammoniak. Die ammoniak kan vervolgens weer als brandstof zonder CO₂-uitstoot worden verbrand in de gascentrale voor de aandrijving van stoomturbines. Het onderzoek van Nuon is onderdeel van het project 'Power to Ammonia', een samenwerkingsverband van ISPT, Stedin

Infradiensten, Nuon, ECN, TU Delft, Universiteit Twente, Proton Ventures, OCI Nitrogen, CE Delft en AkzoNobel. Vanaf 2023 wil Nuon één van de drie units van de centrale al overschakelen op waterstof. Het Noorse Statoil gaat de waterstof hiervoor leveren²⁰.

²⁰ Eemshaven krijgt waterstofcentrale, Financieel Dagblad 7 juli 2017

De energiecentrale als superbatterij

Nuon en TU Delft willen gascentrales gaan inzetten als opslag voor duurzame energie. Dat willen ze doen door van groene stroom ammoniak te maken wanneer er een overschot aan groene stroom is. Ammoniak kan eenvoudig en langdurig worden opgeslagen. Op momenten dat er een tekort aan groene stroom is kan de ammoniak worden ingezet als brandstof in gascentrales.

Wind en zonne-energie zijn niet op afroep beschikbaar...

Soms wordt er te veel geproduceerd...

Er wordt meer groene stroom geproduceerd dan er vraag naar is.

Nu:

Het overschot wordt tegen zeer lage prijzen elders verbruikt.

...en op een ander moment te weinig

De vraag is groter dan wind en zon op dat moment kunnen leveren.

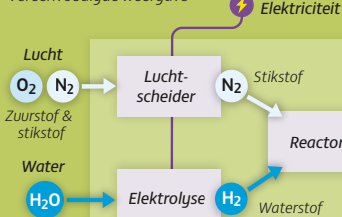
Nu:

Gascentrales vullen tekort aan door elektriciteit te produceren met aardgas.

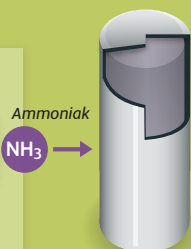
In de toekomst:

- 1 Het overschot aan stroom wordt omgezet naar ammoniak.

Vereenvoudigde weergave

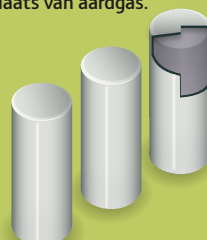


- 2 De ammoniak wordt in vloeibare vorm opgeslagen.

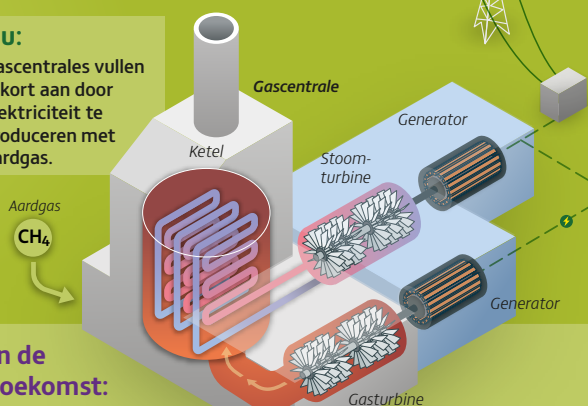


In de toekomst:

- 1 De opgeslagen ammoniak wordt ingezet als brandstof in plaats van aardgas.



- 2 Bij verbranding van ammoniak komt geen CO₂ vrij.



Ontwerp: Boudenstein Infographics

Bron: Nuon

processtechnologie, warmte- en transport-fysica, katalyse, membraantechnologie en de fysica en chemie van materialen, mede door de aanwezigheid en goede samenwerking met de industrie op dat terrein, maar ook vanwege een zeer sterke academische traditie en expertise op het gebied van materialen. Nederland heeft geïnvesteerd in de kennisbasis op het gebied van waterstofopslag en -sensoren binnen het ACTS "Sustainable Hydrogen" programma²¹. Expertise op het gebied van accu's is op enkele plekken aanwezig.

Een aantal minder sterke punten voor de uitgangspositie van Nederland:

- Voor de ontwikkeling van elektrolyzers of brandstofcellen ligt Nederland achter bij omringende landen. Internationale samenwerking en inkopen liggen hier meer voor de hand. Anderzijds zijn er nog een aantal gebieden waar een sterke positie nog wel haalbaar is. Dit moet met name gezocht worden in het combineren van Nederlandse sterktes op het gebied van onder andere materialen, membranen, processtechnologie en katalyse voor bijvoorbeeld goedkopere elektrodematerialen, procesoptimalisatie (bijvoorbeeld ten aanzien van temperatuur en druk) en systeemintegratie.
- In Nederland ontbreekt ervaring met grootschalige commerciële waterelektrolyse (>10 MW), die nodig is om voldoende economy of scale effecten te realiseren. Logischer is om bijvoorbeeld aan te sluiten en samen te werken met Duitsland en Noorwegen²², voorlopers op dit gebied, en daarbij ook kansen te creëren voor de Nederlandse maak/toeleveringsindustrie.
- Nederland is in Europa geen voorloper op het gebied van duurzame elektriciteits-opwekking.

Uitdagingen en kansen

De belangrijkste uitdaging is dat waterstofproductie door elektrolyse met behulp van duurzame elektriciteit qua kosten (circa € 6/kg)²³ op dit moment zelfs bij volcontinue productie nog niet concurrerend is met

conventionele waterstofproductie uit aardgas (€ 0,9-1,8/kg). Het Noorse NEL suggereert € 1,25/kg H₂ bij een prijs van € 0.02 /kWh. Dit is inclusief elektrolyse, compressie en koelen. Om tot een concurrerende H₂-prijs te komen moet worden gewerkt aan een aantal kostenfactoren:

1. Slimme integratie van het elektrolyseproces met thermokatalytische processen. Hierbij gaat het onder andere om het verdere transport van de geproduceerde waterstof en de opslag, alsook goedkope methoden om waterstof op druk te brengen en tijdelijk op te slaan. Belangrijk hierbij is de schaal en het volume, en het omgaan met het intermitterende karakter van de beschikbare elektrische energie. Deze uitdagingen bieden kansen voor de Nederlandse hightech industrie die zeer sterk gepositioneerd is op het gebied van de systeemintegratie.
2. Voor elektrolyse op grote schaal (centraal) liggen er grote kansen door de integratie van de elektrolyse met andere (thermogekatalyseerde) processen, waardoor uiteindelijk vloeibare brandstoffen of chemische bouwstenen gemaakt worden die grotere economische waarde vertegenwoordigen en gemakkelijker zijn op te slaan en te transporteren. Deze processen vinden vaak bij hogere druk en temperatuur plaats, en vertonen een sterke economy of scale, zowel in kosten- als in energie-efficiëntie.
3. De omzetting van synthesesgas naar bijvoorbeeld methanol of koolwaterstoffen, en de productie van ammonia (showcase 3, waarbij de integratie met een speciaal type batterij een belangrijke innovatie is) met behulp van waterstof, vinden wereldwijd al op grote industriële schaal (> 106 ton/jaar) plaats. De voornaamste uitdaging ligt in het sterk fluctuerende en intermitterende aanbod van duurzame elektriciteit. Het slim koppelen van de elektrolyse aan de vervolgstappen, waarbij essentiële parameters zoals gasdruk, gaszuiverheid, warmte-uitwisseling en synthesesegassamenstelling een belangrijke rol spelen, wordt daardoor extra uitdagend.
4. Opschaling, zowel in grootte van de cellen als in het productievolume, zouden het mogelijk maken de kapitaalkosten van waterelektrolyse significant omlaag te brengen. Dit kan plaatsvinden door het

gebruik van betere elektrodematerialen en innovatieve, efficiëntere, robuustere of goedkopere membranen.

De commissie onderscheidt de volgende prioriteiten en uitdagingen voor onderzoek en ontwikkeling:

a) Betere elektrolysetechnologie voor het maken van waterstof uit water die goedkoper is dan de huidige alkalische en zure PEM-technologie door:

1. goedkopere en stabielere membranen en elektrodematerialen en elektrokatalysatoren met een lange levensduur (vervanging van de veelal gebruikte edelmetalen),
2. cellen die bij hoge stroomdichtheid en/of fluctuerende operatie hun efficiëntie blijven behouden,
3. goedkopere, robuustere constructiematerialen waardoor cellen langdurig bij hoge druk kunnen opereren en massaal geproduceerd kunnen worden,
4. slimmere celontwerpen waardoor veel grotere elektrolyzers gemaakt kunnen worden (GW-schaal),
5. goedkopere vermogenselektronica waardoor duurzame elektriciteit efficiënter kan worden ingezet.

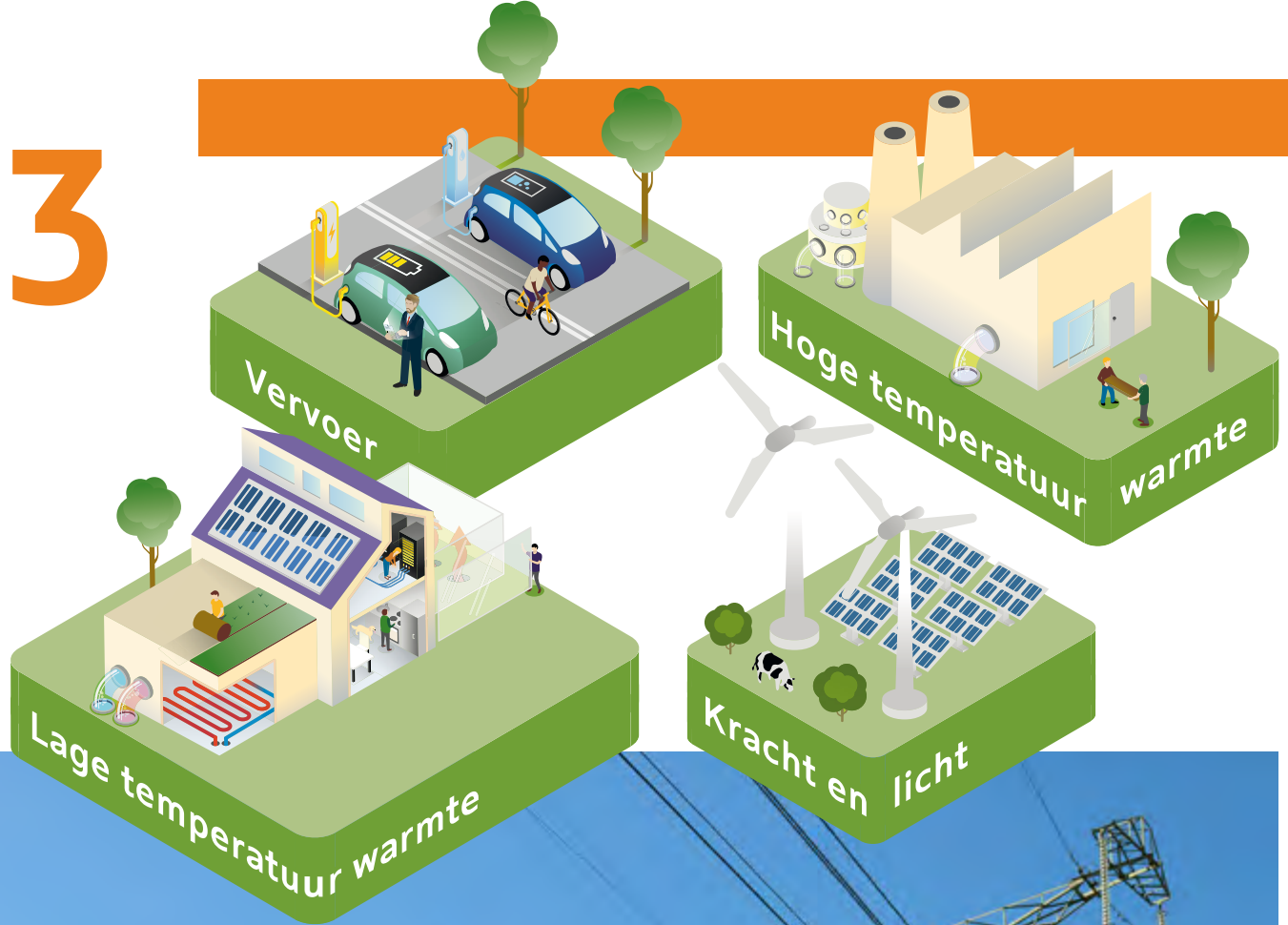
b) Proces- en systeemintegratie. Door afvlakking van de fluctuaties van de hernieuwbare elektriciteit (bijv. door integratie met beperkte accu-capaciteit of supercondensatoren) kunnen de kosten van de elektrolyzers (door grotere beschikbaarheid) omlaag gebracht worden. Het optimaliseren van operatiecondities (temperatuur en druk) kan daarnaast zorgen voor het reduceren van de variabele kosten door de vrijkomende warmte efficiënt in te zetten. Dit vereist verbeteringen in cel-ontwerp, elektrokatalysatoren en membranen. Er is veel winst te behalen bij het integreren van CO₂-capture (uit lucht of afgas) en de daaropvolgende conversie tot chemicaliën of brandstoffen (via elektrochemisch gemaakt waterstof). Processen moeten worden geïntegreerd met het smart grid zodat bedrijven slim kunnen in- en afschakelen van het energienet. Samenwerking tussen de energie-, chemie- en hightechsector is hiervoor essentieel.

²¹ ACTS Sustainable Hydrogen Programme Final Report

²² NEL (Noorwegen) produceert 30 bar elektrolyzers voor 1000 kg H₂/dag

²³ Hinkley et al. (2016) Cost assessment of hydrogen production from PV and electrolysis. CSIRO, Australia

3



Innovatieve elektrochemie en materiaalkunde

Elektrochemie is die tak van de chemie die zich bezighoudt met het omzetten van elektriciteit met behulp van bouwstenen zoals stikstof, water, kooldioxide, mineralen of biomassa, in chemicaliën, brandstoffen of materialen. Onderdeel van de elektrochemie is de elektrolyse zoals beschreven in het voorgaande hoofdstuk. Elektrochemie is ook onmisbaar in de energietransitie, met name voor de duurzame omzetting van CO_2 in brandstoffen en plastics, voor de omzetting van stikstof in ammoniak, alsook energieopslag in accu's en het elektrochemisch vervaardigen (elektrosynthese) van hoogwaardige chemicaliën en materialen. Elektrochemie is een breed vak waarin onder andere thermodynamica, katalyse, analytische wetenschappen, organische chemie, materiaalkunde en proces- en nanotechnologie samenkomen.

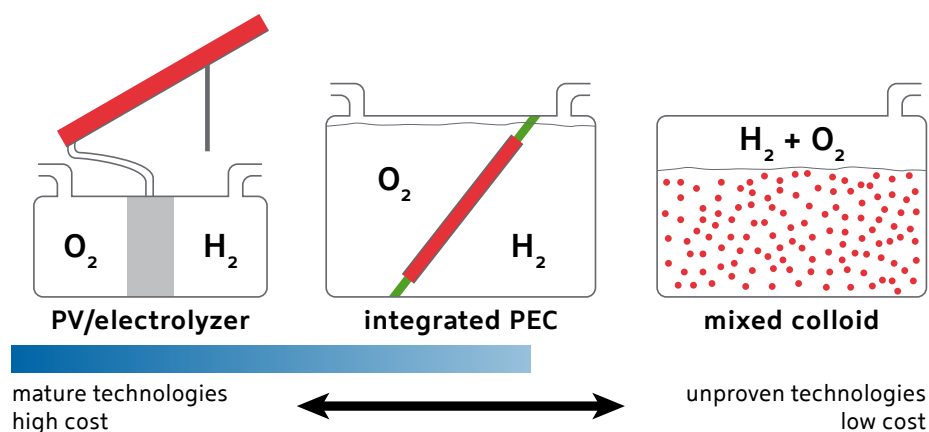
De adviescommissie verwacht veel van nieuwe innovatieve manieren van elektrochemie waarbij elektriciteit direct wordt ingezet voor de vervaardiging van producten en moleculaire bouwstenen in een elektrochemische reactor. Denk hierbij aan de directe elektrochemische omzetting van CO_2 en stikstof, en meer algemeen het gebruik van CO_2 als koolstof-houdende bouwsteen in de elektrochemische synthese, het gebruik van lage-temperatuur elektrochemische methoden in het selectief omzetten van hernieuwbare bouwstenen zoals biomassa-gerelateerde platformmoleculen, maar ook selectieve elektrochemische zuivering van afvalstromen. Op dit moment zijn dit chemische processen die bijdragen aan de CO_2 -uitstoot, maar door elektrochemische innova-

ties verduurzaamd kunnen worden.

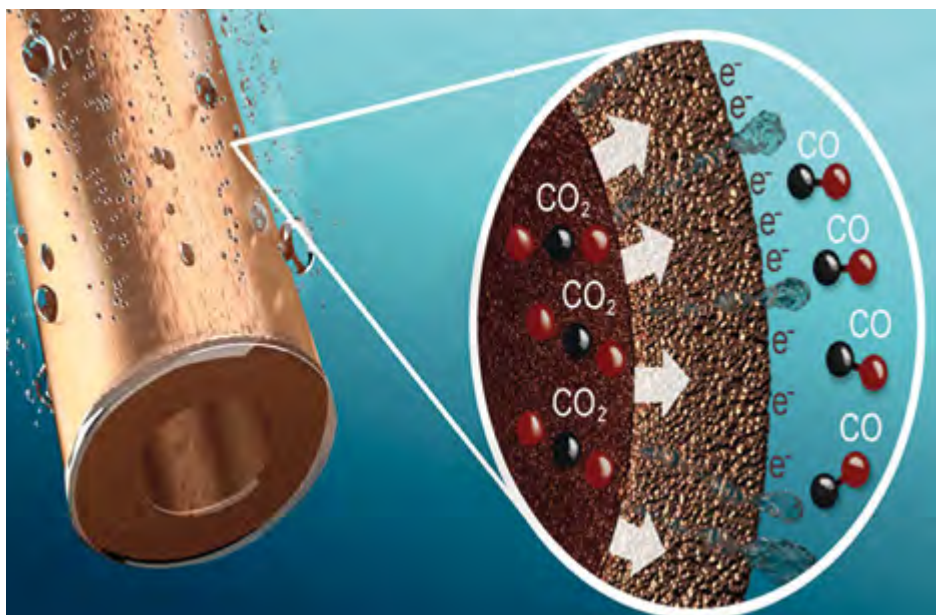
Dit onderzoeksveld is in enorme ontwikkeling, met uitdagingen vooral rondom de selectiviteit en de kinetiek. Combinatie met licht, of andere vormen van straling (waarbij elektriciteit wordt gebruikt om deze straling te genereren, bijvoorbeeld microgolven, plasmon-excitatie, etc.), om procesintensificatie en/of selectiviteit te verbeteren zijn onderwerp van onderzoek.

Een aparte plaats neemt de foto-elektrochemie in, omdat hierbij direct zonlicht gebruikt zou kunnen worden. In de foto-elektrochemie wordt een elektrochemisch proces uitgevoerd met elektrodes waarop een lichtgevoelige laag is aangebracht, vaak in combinatie met een katalysator. De functie

van de lichtgevoelige laag is om met licht-energie een spanning te genereren die voldoende is om bijvoorbeeld water te kunnen splitsen in waterstof en zuurstof. Over het algemeen wordt foto-elektrochemie toegepast voor de splitsing van water in zuurstof en waterstof. Het proces biedt een alternatief voor de koppeling van zonnepanelen aan conventionele elektrochemische cellen (zie hoofdstuk 2). Om te kunnen concurreren dient de foto-elektrochemie een energie efficiëntie van zonlicht naar waterstof van typisch boven de 10% te hebben, en dienen de lichtgevoelige materialen en katalysatoren stabiel te zijn. Een mogelijk voordeel ten opzichte van elektrochemische processen is de hogere selectiviteit van foto-elektrochemie. Foto-elektrochemie onderscheidt zich van fotokatalyse waarbij een lichtgevoelig materiaal meerdere functies vervult: absorberen van licht met een korte golflengte om de omzetting van water in waterstof en zuurstof te bewerkstelligen, en efficiënte overdracht van ladingen aan geadsorbeerde watermoleculen. Nadeel van de fotokatalyse ten opzichte van foto-elektrochemie is dat scheiding van waterstof en zuurstof nodig is. Voordeel is dat de technologie relatief goedkoop kan zijn. Zelfreinigende ramen zijn hier bijvoorbeeld op gebaseerd: de technologie is geïntegreerd in de glasproductie.



Figuur 4 Schematische weergave van drie ontwerpen voor apparaten geschikt voor door zonne-energie aangedreven watersplitsing, geordend volgens relatieve technologische readiness en productiekosten. Chem. Mater., 2014, 26 (1), pp 407–414.



Figuur 5 Onderzoek aan de Universiteit Twente heeft laten zien dat poreuze koper "hollow fiber" elektroden zeer actief en selectief zijn voor de omzetting van CO_2 naar CO . Nature Comm. 2016, 7, 10748.

NL startpositie

Kennisinstellingen

De maatschappelijke interesse in hernieuwbare energie heeft elektrochemie de laatste jaren bij veel Nederlandse universiteiten en onderzoeksinstituten opnieuw op de kaart gezet²⁴, mede ondersteund door verschillende NWO-programma's zoals CO_2 neutral fuels en Solar2Products alsook door TO2 investeringen in toegepast elektrochemisch onderzoek. Leiden is sterk op het gebied van de fundamentele elektrochemie, Delft profileert zich op het gebied van elektrochemische systemen, Eindhoven en Twente hebben expertise in elektrochemische reactoren en processen (figuur 5), en ook in Wageningen, Amsterdam, Utrecht en Groningen wordt gewerkt aan foto- en elektrochemie. Daarnaast is het fundamentele onderzoeksinstituut DIFFER zich gaan richten op elektron-, plasma en fotongedreven chemie, en hebben de toegepaste kennisinstituten TNO en ECN samen het toegepaste innovatieprogramma VoltaChem opgezet (Figuur 6).

²⁴ De afgelopen tientallen jaren is wereldwijd weinig geïnvesteerd in elektrochemie en technische elektrochemie ("electrochemical engineering"), zo ook aan de Nederlandse universiteiten en hogescholen. De Innovatieagenda Energie uit 2008 zette voornamelijk in op korte termijn onderzoek (zoals biomassa voor energietoepassingen). Een aantal relevante onderzoeksgroepen bij onder andere Energie Centrum Nederland (ECN) zijn in 2011 opgeheven door gebrek aan uitzicht op financiering.

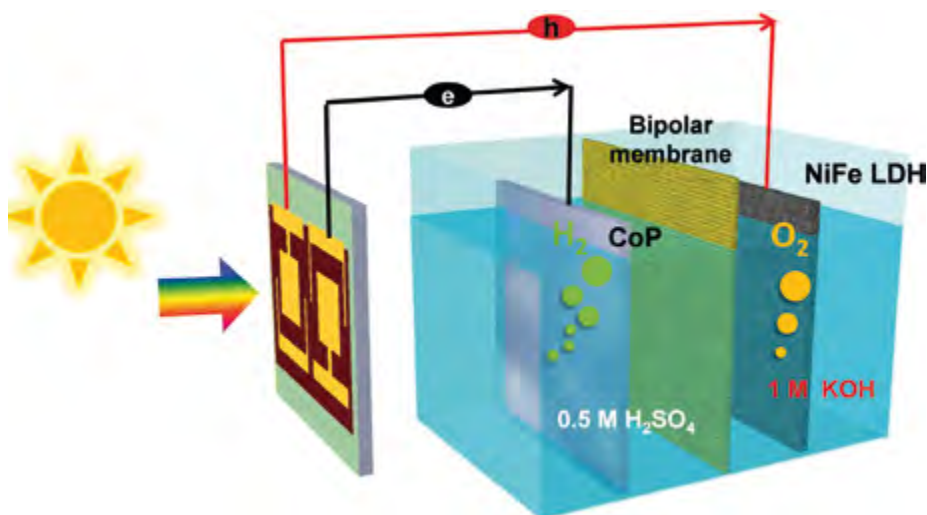
Op het gebied van foto-elektrochemie is recentelijk veel internationaal onderzoek verricht. Er is veel aandacht besteed aan de ontwikkeling van de technologie voor productie van waterstof uit water, zoals in JCAP (Joint Center of Artificial Photosynthesis, VS) en op EPFL (Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Zwitserland). JCAP is inmiddels volledig overgestapt op elektrochemische CO_2 -conversie. Ook bij Nederlandse universiteiten en kennisinstellingen wordt foto-elektrochemie onderzocht; op het gebied van anorganische materialen met name aan de TU Delft (Figuur 7), Universiteit Twente,

DIFFER, TNO en de Universiteit Utrecht. Het BioSolar Cells programma heeft op het gebied van organische verbindingen en biomimetische systemen met name onderzoek gestimuleerd in Leiden, Amsterdam (UvA en VU), Twente, Eindhoven en Groningen. Momenteel wordt op basis van de kennis gegenereerd in dit programma gewerkt aan een demonstratieopstelling in Leiden met als doel een chemisch rendement van 70%.

Er zijn op dit moment verschillende programma's waarin onderzoek op R&D niveau plaatsvindt. Een doorsnede daarvan zijn de programma's CO_2 neutral fuels, Solardam, Solar2Products, ISPT-projecten en Materials4Sustainability. Tevens zijn activiteiten te voorzien in MCEC (zwaartekracht-programma) en het Chemical Building Blocks Consortium (ARC CBBC) (zie ook Annex 3).

Bedrijfsleven

De Nederlandse procesindustrie heeft van oudsher veel activiteiten op het gebied van elektrochemie, zoals Tata Steel (staalproductie), Nyrstar (zinkraffinage) en AkzoNobel (chloorproductie) maar er zijn ook tal van kleinere hightech bedrijven actief op het gebied van waterstof of elektrode-ontwikkeling. Shell en Avantium investeren momenteel in de opbouw van elektrochemische expertise. Zo nam Avantium eind vorig jaar de Princeton spin-out Liquid Light (> 100 elektrochemische patenten) over waarvan de mensen en technologie inmiddels zijn



Figuur 7 Schematische weergave van een systeem waarmee TU Delft zonne-energie gebruikt om waterstof te produceren.



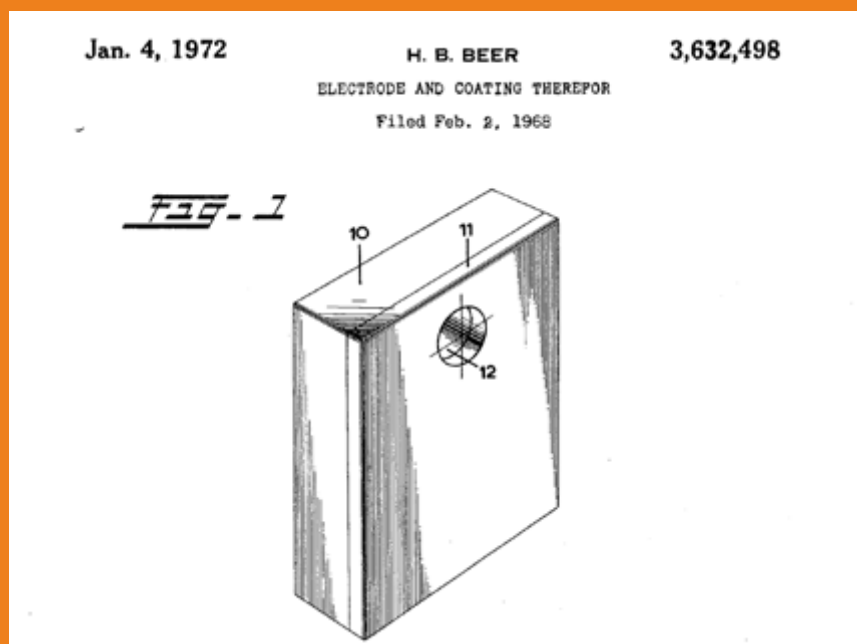
Figuur 6 Voorbeeld van een elektrochemie test setup bij TNO. Bron: TNO

geïntegreerd in een nieuw industrieel lab op het Science Park in Amsterdam (15-20 fte eind 2017) waar gewerkt wordt aan elektrochemische CO₂-reductie naar bijvoorbeeld mierenzuur, oxaalzuur en glycolzuur. Verder is Nederland vermaard op het gebied van de ontwikkeling van elektrochemische meetapparatuur (Metrohm Autolab, Ivium, PalmSens).

Nederland heeft geen industrie op het gebied van de foto-elektrochemie en de fotokatalyse, deze is er overigens nog nergens ter wereld. Commerciële elektroden worden bereid door Evoqua Water Technologies; zij zouden in staat moeten zijn lichtgevoelige elektroden te ontwikkelen. Verder heeft publiek-privaat onderzoek geleid tot kleinschalige demonstratie-opstellingen. Een aantal bedrijven doet momenteel studies naar de schaalbaarheid van fotoreactoren. Tata Steel zal relatief lang afhankelijk blijven van fossiele brandstoffen. De uitstoot van CO/CO₂ vanuit deze processen is aanzienlijk en zal kunnen dienen als grondstof voor Carbon to Chem technologie, een technologie waar bijvoorbeeld AkzoNobel ook aan werkt. Gaszuivering en koppeling aan de chemische industrie is hiervoor essentieel. Er lopen diverse initiatieven om processen dusdanig te modificeren zodat er zuivere gassen (CO, CO₂) worden geproduceerd; meest bekend is Hisarna (CCS op korte termijn, CCU op langere termijn).

Henri Bernard Beer: pionier in de elektrochemie

Henri Bernard Beer (1909 - 1994) was een Nederlandse uitvinder zonder academische opleiding of academische graad en een Nederlands elektrochemicus van faam. In 1925 diende Beer zijn eerste patent in, uiteindelijk zijn het er meer dan 700 geworden, waarin hij uitvinder of co-uitvinder is. Hiervan gaan ongeveer 400 patenten over de productie van magnetische materialen (ferriet) met elektrochemie. De geschiktheid van titaan als elektrodemateriaal en de ontwikkeling van met platina beklede titanium-elektroden is de verdienste van Henri Beer. Zijn ontdekkingen staan aan de basis van vrijwel ieder elektrochemisch proces vandaag de dag. Beer is grondlegger van het Nederlandse bedrijf Magneto dat recentelijk werd overgenomen door Evoqua.



Figuur 8 Patent US 3632498 (elektrode en coating) uit 1972, op naam van Henri Beer.



Figuur 9 Voorbeeld van een Elektrochemische productiefaciliteit.

Uitdagingen en kansen

Een belangrijke uitdaging voor de elektrochemie is de ontwikkeling van selectieve katalysatoren om CO_2 en biomassa om te zetten naar nuttige producten. Ook cel-, elektrode-, en katalysatorontwerp, downstream productzuivering en toepassingen, business case ontwikkeling en Life Cycle Analysis (LCA) zullen significante onderzoeksinspanningen vragen van een groot aantal betrokken partners voordat commerciële toepassing kan worden gerealiseerd. Voor de conversie van CO_2 naar synthesesgas, de belangrijkste bouwsteen voor brandstoffen, en grondstoffen voor plastics, zullen verscheidene parameters nog sterk moeten worden verbeterd, in samenhang met regelgeving zoals CO_2 -beprijzing en CO_2 -reductie:

- lage CO_2 grondstofkosten (< € 25-50/ton),
- lage elektriciteitskosten (circa € 0.01/kWh),
- hoge Faraday efficiency (>90-95%) en
- schaalgrootte (>50-100 kiloton per jaar (kta); ter referentie: typische schaalgrootte is 1 Mton productie).

Uitdagingen binnen foto-elektrochemie zijn onder andere de ontwikkeling van voldoende stabiele foto-elektroden. De komende jaren dient een grondige systeemanalyse plaats te vinden op basis van demonstratieobjecten van 1 m² waarin modulair elementen kunnen worden uitgewisseld.

Wetenschappelijk is er nog weinig begrip van de interactie tussen de nanodeeltjes en de halfgeleider, de optimale oxidatietoestand, en het effect van deeltjesgrootte. Het is opmerkelijk dat er weinig interactie is tussen de gemeenschap die foto-elektrochemie bedrijft en die fotokatalyse onderzoekt, terwijl beide technologieën gebaat zijn bij de ontwikkeling van actieve en stabiele katalysatoren.

Materiaalkunde

De ontwikkeling van innovatieve elektrochemische processen is afhankelijk van de ontwikkeling van nieuwe materialen die zijn opgebouwd uit niet-schaarse elementen (zoals ijzer of silicium) en die geïmplementeerd kunnen worden op grote schaal. Hiervoor is bereiding en karakterisering van geavanceerde materialen en elektroden nodig, zowel op laboratorium als op commerciële schaal.

De volgende geavanceerde materialen voor elektrochemische cellen kunnen worden onderscheiden:

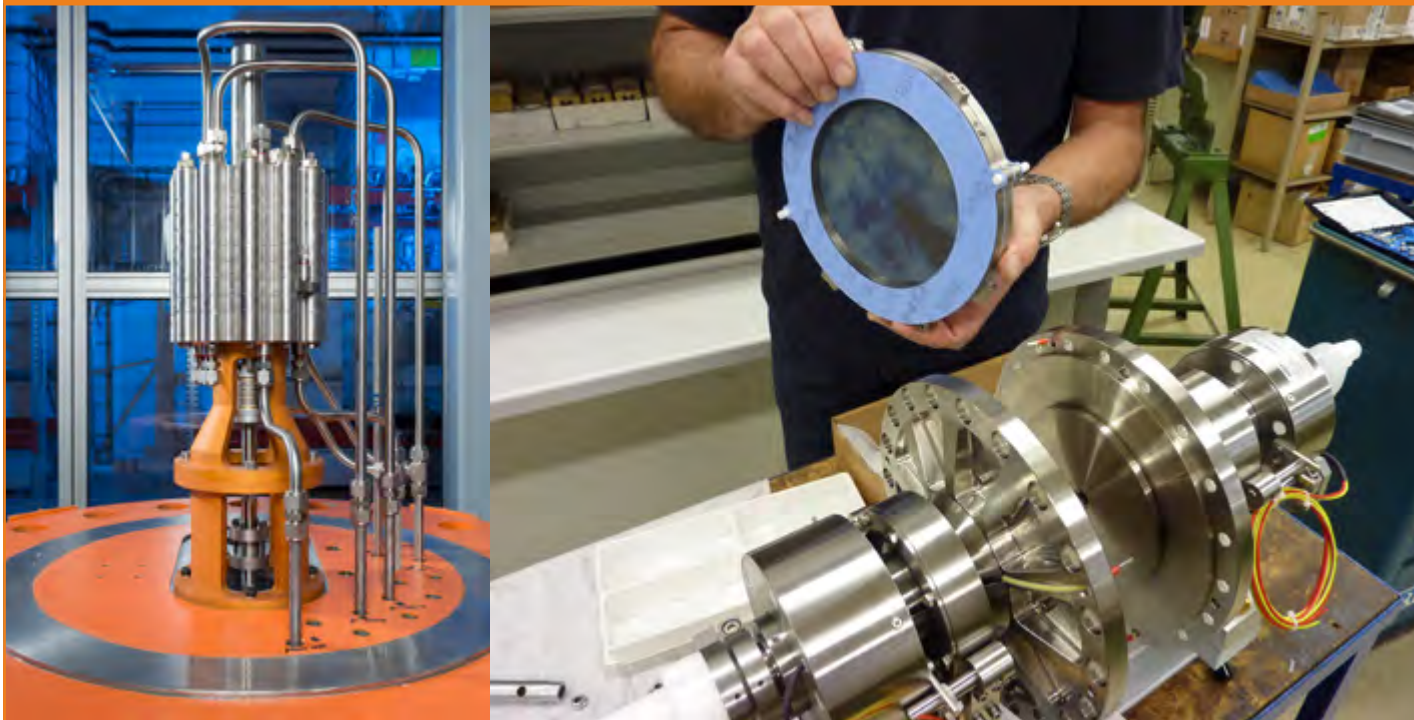
- Goedkope stabiele elektrodematerialen;
- Ruim beschikbare elektrokatalysatoren met een hoge selectiviteit en lage overpotentiaal;

- Verschillende type elektrolyten: waterig, vaste stof en ionische vloeistoffen;
- Membranen met een hoge selectiviteit voor specifieke ionen met hoge doorvoersnelheid;
- Constructiematerialen voor elektrochemische cellen.

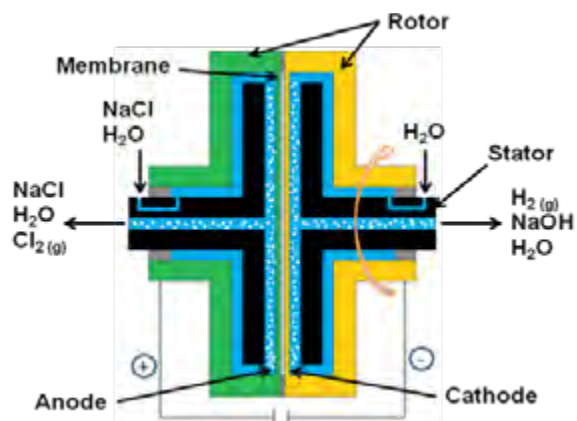
De commissie onderscheidt de volgende prioriteiten voor de preparatie en karakterisatie van materialen:

- De ontwikkeling en exploitatie van dunne film technieken om katalysatoren met atomaire precisie op elektrodeoppervlakken aan te brengen;
- De analyse van ladingoverdrachtsprocessen in de elektrolyt over vast-vloeibaar grensvlakken op atomaire schaal onder operando omstandigheden (d.w.z. zoals in de praktijk).
- Structuurkarakterisatie op nanoschaal.
- Correleren van de structuur van geavanceerde elektroden aan gasbelvorming (groeidynamica) met behulp van microscopische technieken.
- 3D-printen van elektrochemische elektroden en cellen (labschaal).
- Ontwikkeling van technieken om nano-gestructureerde materialen op een gecontroleerde manier te maken over grote oppervlakken op commerciële schaal.

Showcase 4: Proeffabriek met spinning disc-reactor



Op het terrein van de Brightlands Chemelot Campus in Geleen is een innovatieve proeffabriek geopend gebaseerd op spinning disc reactor technologie. De technologie is ontwikkeld aan de TU Eindhoven en is door het bedrijf Flowid verder ontwikkeld. In samenwerking met AkzoNobel is een gepatenteerde spinning disc electrolyzer ontwikkeld (Electrochemical cell, WO 2017080943 A1) waarin met hoge stroomdichtheden chloor en alkali geproduceerd kan worden maar bijvoorbeeld ook waterstof en zuurstof. Nederland kan een belangrijke rol gaan spelen als toeleverancier van elektrochemische conversiereactoren, mede door de sterktes op het gebied van systeemintegratie, hightech materialen en de cultuur van samenwerking en open innovatie. De spinning disc-reactor is een voorbeeld van Nederlandse hightech.



4



Opleiding en kennisuitwisseling

Met de maatschappelijke uitdaging rondom Hoge Temperatuur warmte en Vervoer in combinatie met de hoge concentratie aan activiteiten en interesse op academisch, technisch en industrieel niveau in Nederland, is er momenteel een onmiskenbaar momentum om de Nederlandse positie op het gebied van elektrochemie en materialen te verstevigen. Zowel geografische als informele lijnen tussen de verschillende publieke en private partners zijn in Nederland traditioneel kort, zie het succes van communities zoals OSPT-ISPT (proces technologie) en NIOK-VIRAN (katalyse). Echter, op het gebied van elektrochemie en electrochemical engineering ontbreekt nog een samenhangende nationale community en worden er slechts beperkt nieuwe mensen opgeleid. Voor een succesvolle energietransitie in Nederland zijn investeringen in onderzoek en opleidingen op het gebied van elektrochemische conversie en synthese, materiaalkunde en elektrochemische engineering/proces technologie van essentieel belang.

De commissie adviseert daarom:

- Investerings in nieuwe opleidingen (opleidingsmodules) op het gebied van elektrochemische conversie aan universiteiten en hogescholen.
- Introductie van nieuwe leerstoelen en tenure track UD-aanstellingen aan universiteiten en lectorposities aan hogescholen om de brede kennisbasis en kennisopbouw te stimuleren en de capaciteit van kennisinstellingen om nieuw talent op te leiden en te begeleiden te vergroten.
- Het opleiden van professionals aan hogescholen en in het beroepsonderwijs die straks moeten zorgen voor de opschaling en de implementatie.
- De ontwikkeling van een multidisciplinaire BSc en MSc Elektrochemische conversie en materialen.

Kennisuitwisseling dient te worden bevorderd door inrichting van een kennisplatform rond de sleuteltechnologie Elektrochemische Conversie & Materialen die expertises bij elkaar brengt om de ambities voor het toekomstige energiesysteem te verwezenlijken; denk daarbij aan een kenniscommunity die expertises op het gebied van materiaaltechnologie en -kunde, reactor engineering, katalyse, warmte- en transportleer, power

electronics, smart grids en benodigde high- en lowtech engineering voor toepassing in de infrastructuur bij elkaar brengt.



5



Governance

De ontwikkeling van nieuwe baanbrekende technologieën vergt een goed functionerend innovatie-ecosysteem, dat alle onderdelen van het innovatiesysteem omvat: fundamenteel onderzoek voor het ontdekken van doorbraaktechnologieën en het oplossen van fundamentele kennisvragen, toegepast onderzoek voor het doorontwikkelen van bestaande kennis richting concrete processen, voldoende goede opleidingsprogramma's van mbo tot wo, ontwikkeling van innovatieve producten en diensten, al dan niet in start-ups, pilots en demonstraties om te laten zien dat het echt werkt in de praktijk om de technologie en businesscase te valideren en markt-introductie om ook de economische vruchten van de innovaties te plukken.

Samenwerken over grenzen heen

ECCM is een verbindende sleuteltechnologie waarvoor het noodzakelijk is om over de grenzen van sectoren en instituties samen te werken en nieuwe bondgenootschappen aan te gaan. Om rond elektrochemische conversie in de komende jaren een goed functionerend ecosysteem op te bouwen is een meerjarig missiegedreven programma nodig. In dit programma stappen de juiste partijen met kennis en kunde in, wordt nieuwe kennis ontwikkeld en kennis uitgewisseld, leiderschap en ondernemerschap van individuen en/of organisaties worden getoond, vraag en aanbod samengebracht, worden mensen opgeleid en talent gestimuleerd en wordt richting gegeven om de gestelde doelen te bereiken (roadmap). Belangrijke randvoorwaarden zijn heldere 'rules of the game' (formele instituties) die een zekere mate van stabiliteit en zekerheid bieden (financieel, beleid, wet- en regelgeving) op lange termijn, en tegelijkertijd ook een cultuur van samenwerken voorbij de eigen belangen en voorkeuren stimuleren (informele instituties, voortvloeiend uit eerdere interacties, gebaseerd op vertrouwen).

Er is een groot aantal lopende onderzoeksprogramma's en initiatieven waarbinnen de thematiek van elektrochemische conversie & materialen een rol speelt, vaak in samenwerking tussen bedrijfsleven, kennisinstellingen en (regionale) overheid (zie annex C). Iedereen is doordrongen van de noodzaak, de urgentie en de internationale dimensie van

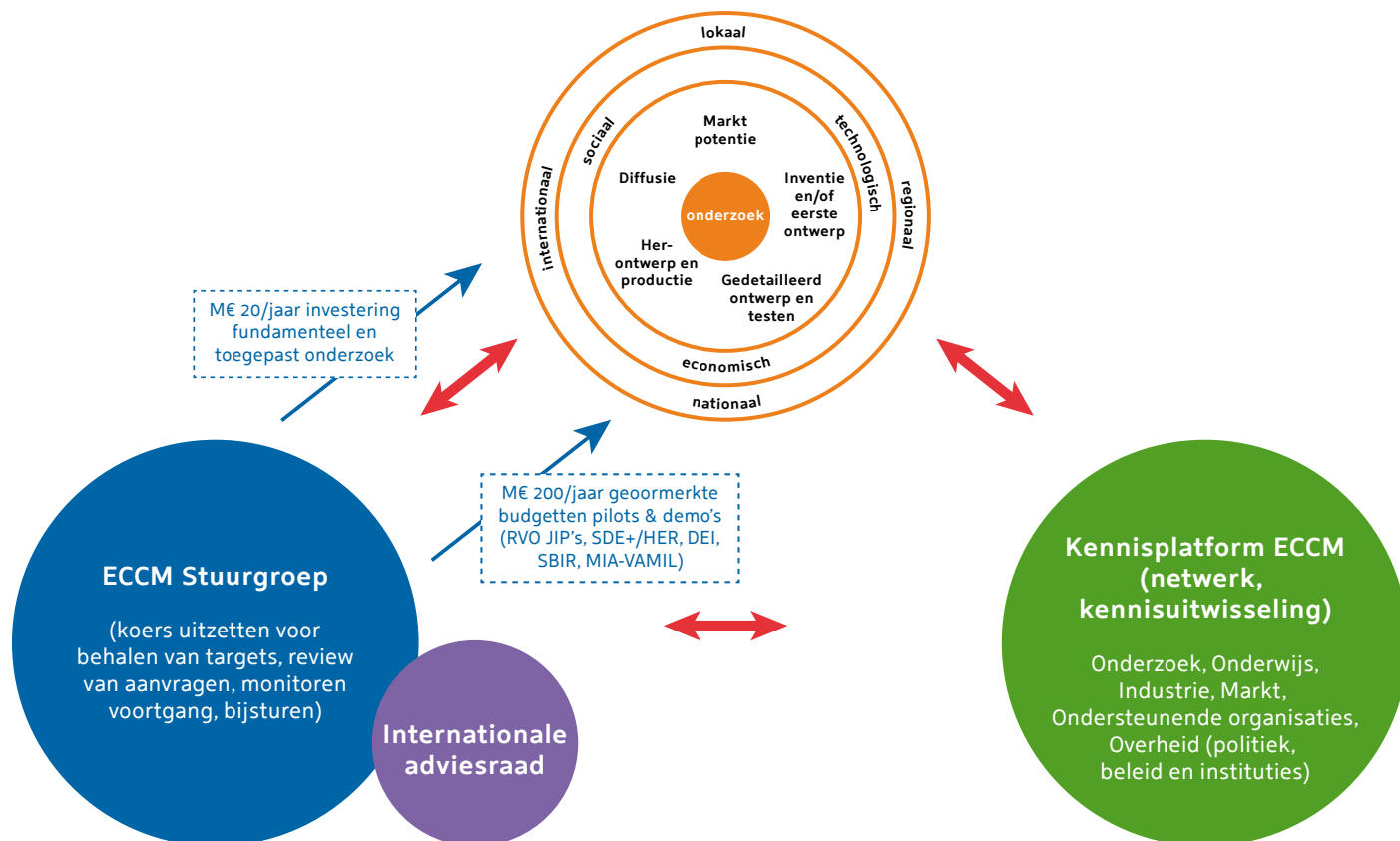
deze ontwikkeling; er gebeurt al veel wereldwijd. Het is duidelijk dat afzonderlijke marktpartijen niet in staat zijn zonder coördinatie een collectieve doelstelling te realiseren, doordat het energiesysteem zeer complex is. Het is de stellige overtuiging van de commissie dat er focus nodig is en volop interactie tussen de verschillende partijen. De ECCM-commissie pleit voor convergentie van alle activiteiten op het gebied van elektrochemische conversie en elektrochemisch materiaalonderzoek in Nederland in een meerjarig missiegedreven programma, waarin de overheid als probleemeigenaar het voortouw neemt door te faciliteren, centrale regie in te stellen en meerjarig commitment te tonen. Om de doelen in 2030 en 2050 te bereiken is standvastigheid over politieke cycli heen noodzakelijk. Bedrijven zullen door focus en langjarige zekerheid op dit terrein, maar ook door de aanwezigheid van onze excellente kennisinfrastructuur en toeleverende sector, kansen zien om hun producten en processen te verbeteren en daar nieuwe markten voor aan te boren (in binnen- en buitenland) waarmee de energie- en grondstoffen-transitie aanzienlijk versneld wordt.

Dit alles kan niet zonder de economische en sociale innovatie, zoals ontwikkeling van nieuwe businessmodellen en het begrip van de omgang met deze nieuwe technologie. Demand Side Management is nodig om de seizoensafhankelijkheid verder terug te brengen. Eenvoudige rekenmodellen moeten beschikbaar komen die door economen en

planologen kunnen worden gebruikt om het belang van elektrochemische conversie te kunnen adopteren. Het systematisch en parallel aan de kennisontwikkeling analyseren van belemmerende en bevorderende financiële prikkels en regelgeving zijn van essentieel belang en onderdeel van het voorgestelde meerjarige missiegedreven programma. Criteria voor keuzes in het programma zijn de gestelde targets, strategische overwegingen en potentie van de business cases. Gedurende de uitvoer van het programma is het van belang om te investeren in life cycle analyses om het proces voor het convergeren en prioriteren van opties te faciliteren.

Regisseren en coördineren

Het opbouwen van het ecosysteem in dit programma komt tot uiting in een kennisplatform voor elektrochemische conversie en materialen. In dit platform nemen bestaande en nieuwe initiatieven deel en ontmoeten de verschillende stakeholders uit onderzoek, onderwijs, industrie, markt, ondersteunende organisaties en overheid elkaar op regelmatige basis om hun (inter)nationale activiteiten af te stemmen. Hierdoor wordt kennis overgedragen voor niet alleen de technische innovatie, maar ook sociaal-economische innovatie, zoals het tegengaan van weerstand en marktformatie. Een ECCM-stuurgroep, ingesteld door de overheid, heeft de centrale regie door erop toe te zien dat het samenspel tussen alle betrokken partijen in dit platform zich in de goede richting ontwikkelt, de gezamenlijke doelstellingen worden gerealiseerd en dat dit



Figuur 10 Schematische weergave governance van voorgesteld innovatieprogramma.

voor alle partijen, bedrijven, kennisinstellingen en nationale en regionale overheden voordelig uitpakt. De stuurgroep heeft het mandaat keuzes te maken en kan snel reageren op veranderende technologieën, markten en sociale veranderingen om de doelstellingen te behalen. Hierin heeft de overheid een faciliterende rol.

Om ECCM te vertegenwoordigen richting de grote diversiteit aan stakeholders adviseert de commissie om een boegbeeld ECCM te benoemen. Het boegbeeld kan als onafhankelijk voorzitter van de nationale commissie optreden, dienen als bestuurlijk aanspreekpunt en zijn of haar netwerk aanspreken om partijen rondom ECCM te verbinden. Een ECCM-adviesraad, bestaande uit internationale experts, adviseert de stuurgroep over de inhoudelijke keuzes en strategie. Zij adviseren over de samenwerking en welke ontwikkelingen beter over te laten aan andere landen. Ten slotte kan de Nederlandse strategie niet los worden gezien van die van de gezamenlijke EU-lidstaten, en Europees beleid en wet- en regelgeving.

Financiering

Om de doelstellingen te behalen is lange termijn commitment nodig. Door korte financieringscycli vertoont het onderzoeksveld noodgedwongen opportunistisch gedrag en treedt er versnippering op, wat haaks staat op het in essentie strategische en lange-termijnkarakter van de transitieopgave. Vanwege de urgentie is het advies om te

starten met een onderzoeks- en ontwikkelingsbudget van minimaal M€ 20/jaar (AWTI) voor de doorontwikkeling van reeds bestaande kennis en technologie (toegepast missiegedreven onderzoek voor implementatie in 5-10 jaar, TRL3-6, M€ 16) en voor het versterken van de kennisbasis en investeringen in onderzoek waarvan de implementatiehorizon langer dan 10 jaar zal zijn (fundamenteel missiegedreven onderzoek, TRL1-3, M€ 4). Deze M€ 4 is opgebouwd uit M€ 3 programatisch en M€ 1 voor nieuwe senior onderzoekposities U(H)D/lectoren.

Daarnaast stelt de commissie voor om M€ 200 per jaar te reserveren voor grootschalige investeringen in kleine schaal proeftuinen gekoppeld aan een bepaalde locatie (eiland, woonwijk, haven) en grote schaal open-access pilots en demo's voor dit onderwerp, zodat op korte termijn (<5 jaar, >TRL7-9) bestaande technologieën daadwerkelijk voor de eerste keer kostencompetitief kunnen worden aangetoond. Dit bedrag kan deels worden vrijgemaakt door budgetten te oormerken binnen de bestaande investeringsregelingen (RVO JIP's, SDE+/HER, DEI, SBIR, MIA-VAMIL, Next Level Investment Fund), aan te vullen met private bijdragen (M€ 150-200). De stuurgroep beslist mee welke pilots en demo's financiering ontvangen. De stuurgroep is verantwoordelijk voor monitoring, feedback, leren en evaluatie over de gehele kennisketen heen, bewaakt de gestelde targets richting een CO₂-arme samenleving in 2050 en heeft het mandaat om waar nodig bij

te sturen en keuzes te maken op basis van progressie.

De demoschaal (- M€ 25 - 200 CAPEX) vormt vaak een onoverbrugbare horde richting implementatie. De schaal is suboptimaal en daarom is het product relatief duur. Toch is deze tussenstap vaak nodig omdat direct op commerciële schaal bouwen hoge financiële risico's met zich meebrengt. Subsidies op grondstof (SDE+) of op CAPEX (investeringen) helpen om de kosten omlaag te krijgen en daardoor de markt sneller te laten groeien. Leningen of lage-rendement-investeringen helpen niet omdat die de productiekosten niet verlagen. Recentelijk is het nodige in de pers verschenen over de nieuwste windmolenparken die zonder subsidie worden aanbesteed. Dat zou niet mogelijk zijn geweest in 2017 wanneer overheden de afgelopen jaren de aanleg van windmolenparken niet grootschalig hadden gestimuleerd. Overheden hebben op deze manier de technologie door de "valley-of-death" heen geholpen. Een analogie voor ECCM kan worden gemaakt.



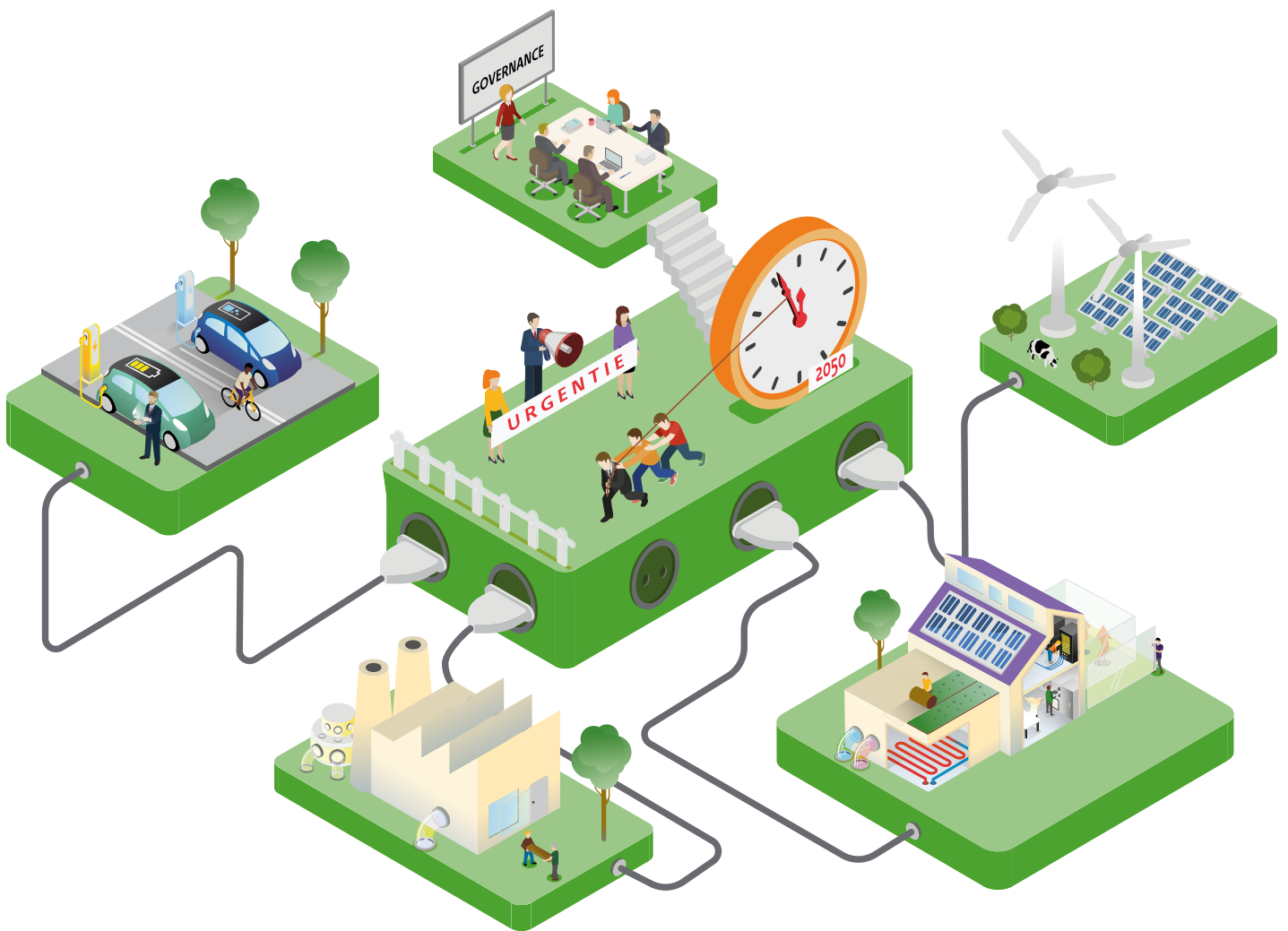
Bijlagen

Annex A

ECCM naar energiefunctionaliteit

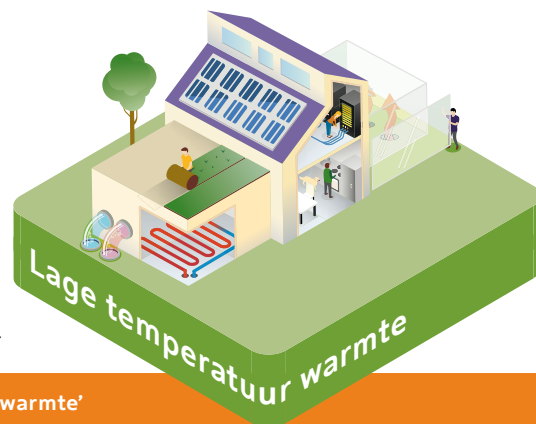
De tabellen in deze annex geven weer hoe ECCM bijdraagt aan een volledige duurzame energievoorziening langs een indeling naar de vier energiefunctionaliteiten uit de Energieagenda van de Nederlandse overheid:

- lage temperatuurwarmte in gebouwen voor verwarming en warm water
- hoge temperatuurwarmte voor industriële productie
- transport en mobiliteit (vervoer)
- de werking van verlichting en elektrische apparaten (kracht en licht)



Energiefunctionaliteit 'Lage temperatuur warmte'

Tabel 2 Bijdrage van ECCM in de voorziening van energie voor Lage Temperatuur warmte in 2050.



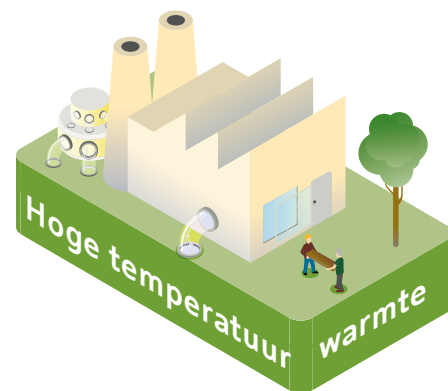
Niveau	Naam	Energiefunctionaliteit 'Lage temperatuur warmte'	
		Onderwerp	Richting (doel)
Energieagenda	Ambitie	Energievoorziening/ Voorziening in grondstoffen	Een CO ₂ -arme energievoorziening in 2050 die veilig, betrouwbaar en betaalbaar is. Alle grondstoffen hernieuwbaar in 2050.
Functionaliteit	Missie	Lage temperatuur warmte	Een toename van gedoseerde LT- warmte ten koste van hoeveelheid HT-warmte, doordat ECCM extreme procescondities onnodig maakt en minder energie verspilt.
Key enabling technology	Strategie	Elektrochemische Conversie & Materialen	- Lage temperaturen zijn mogelijk bij ECCM processen, ideaal zelfs kamertemperatuur (minimaal LTW). - Integratie en benutting van LT warmte kan ECCM-proces richting 100% energie-efficiëntie doen stijgen (zoals bijv. HR-ketel). - Afstemmen en buffering van warmte vraag/aanbod is belangrijker bij gebruik duurzame energiebronnen (i.e. dag/ nacht, seizoenen). - Geen risico: bij-verwarmen kan altijd nog, waar/wanneer nodig.
Innovatie Programma	Doel	programma	- Demonstratie pilotinstallaties elektrochemische (brandstof) productie. - Integrale warmtebalans geoptimaliseerd in designfase, onderdeel van de energiebalans. - Oplossingen dienen relevant schaalbaar te zijn.
Project	Resultaat	Projecten	- Pilot(s) met aantoonbare CO₂ besparing door inzet ECCM: - lcm. warmtegebruik. - Op temperaturen dicht bij omgevingstemperatuur. - Overdraagbare concepten zijn uitgewerkt en beproeft in het veld. - Verhoging TRL-niveau nieuwe technologie als exportproduct. - Verhoging kennisniveau, IP, patenten.
Activiteit	Oplevering	Onderzoek, ontwikkeling en demonstratie activiteiten	- Procesintegratie met warmte-benutting in beperkte ruimte/ tijd/afstand. - Ontwikkeling selectieve katalyse voor omgevings-temperatuur. - Ontwikkelde materialen (beter dan RVS) die efficiënte en geïntegreerde warmtewisselaars mogelijk maken (voor lage temperatuurverschillen).

Energiefunctionaliteit 'Transport en mobiliteit' (vervoer)

Tabel 3 Bijdrage van ECCM in de voorziening van energie voor Vervoer in 2050.



Niveau	Naam	Energiefunctionaliteit 'Transport en mobiliteit'	
		Onderwerp	Richting (doel)
Energieagenda	Ambitie	Energievoorziening/ Voorziening in grondstoffen	Een CO ₂ -arme energievoorziening in 2050 die veilig, betrouwbaar en betaalbaar is. Alle grondstoffen hernieuwbaar in 2050.
Functionaliteit	Missie	vervoer	Voor vervoer en transport is de missie het op kosteneffectieve wijze verminderen van de CO ₂ -emissies. Brandstoffen (waterstof en synthetische brandstoffen) gemaakt via ECCM brengen de gewenste complementariteit om de gehele vervoer en transportsector verregaand CO ₂ neutraal te maken. Dit omvat ook zwaar transport en luchtvaart.
Key enabling technology	Strategie	Elektrolyse, Elektrochemische Conversie & Materialen	Directe opslag van elektriciteit is duur en niet altijd praktisch. Elektrochemische conversie biedt een oplossing voor deze problemen door: • de productie van waterstof; • de productie van synthetische benzine en diesel, zgn. 'solar fuels', elektrochemisch gemaakt uit CO₂ en (duurzame) elektriciteit, eventueel ook gemaakt via waterstof.
Innovatie Programma	Doel	Programma	• Omlaag brengen kosten van duurzame waterstofproductie middels elektrolyse rekening houdend met intermittency. • Ontwikkelen van goedkope routes om synthetische benzine en diesel te maken uit water en CO₂ (verkregen uit lucht).
Project	Resultaat	Projecten	Onderzoek en pilots die de technologie ontwikkelen, de integratiestappen vormgeven en op beperkte schaal demonstreren. Voor waterstof omvat dit ook de keten na productie, voor synthetische brandstoffen bestaat deze keten al.
Activiteit	Oplevering	Onderzoek, ontwikkeling en demonstratie activiteiten	• Ontwikkeling efficiënte en goedkope(re) elektrolyzers. • Ontwikkeling eenvoudige (non precious metal) katalysatoren. • Ontwikkeling elektrolyzers die intermittency aankunnen. • Ontwikkeling katalyse voor efficiënte productie synthetische brandstoffen. • Integratie van processen in efficiënte productiefaciliteiten.



Energiefunctionaliteit 'Hoge temperatuur warmte'

Tabel 4 Bijdrage van ECCM in de voorziening van energie voor Hoge Temperatuur warmte in 2050.

Niveau	Naam	Energiefunctionaliteit 'Hoge temperatuur warmte'	
		Onderwerp	Richting (doel)
Energieagenda	Ambitie	Energievoorziening Voorziening in grondstoffen	Een CO ₂ -arme energievoorziening in 2050 die veilig, betrouwbaar en betaalbaar is. Alle grondstoffen hernieuwbaar in 2050.
Functionaliteit	Missie	Hoge temperatuur warmte	Synthetische brandstoffen die CO ₂ neutraal zijn. Deze synthetische brandstoffen worden gemaakt uit CO ₂ en water. Waterstofproductie om energie intensieve productie van bijv. ammonia CO ₂ neutraal te maken.
Key enabling technology	Strategie	Electrolyse, Elektrochemische Conversie (incl. foto- en plasma geassisteerde chemische processen) die energie en kostenefficiënt zijn	Electrolyse van water, nieuwe directe elektrochemische (incl. foto en plasma ondersteunde chemische) conversie-processen die een hoge selectiviteit en doorzet hebben als alternatief voor gebruik van HTW.
Innovatie Programma	Doel	Programma	• H₂ voor minder dan € 1/kg. • CO₂ neutraal door middel van afvang en hergebruik van CO₂. • Vervanging van huidige energie intensieve processen zoals ammoniaproductie en staal door CO₂ neutrale elektrochemische processen, met een grote selectiviteit.
Project	Resultaat	Projecten	• Economisch elektrochemisch proces voor ammonia-productie in een membraan gebaseerde elektrochemische reactor . • Plasmachemische activatie van CO₂ voor energie-efficiënte generatie van synthesesgas. • Co-electrolyse van H₂O en CO₂ tot syngas of producten als methanol in Solid Oxide Elektrolyser op schaal en met een lange levensduur.
Activiteit	Oplevering	Onderzoek, ontwikkeling en demonstratie activiteiten	• Materiaalonderzoek voor robuuste materialen die stabiel zijn. • Plasma/fotochemisch reactorontwerp met gasscheiding van producten.



Energiefunctionaliteit 'Kracht en licht'

Tabel 5 Bijdrage van ECCM in de voorziening van energie voor Kracht en Licht in 2050.

Niveau	Naam	Energiefunctionaliteit 'Kracht en licht'	
		Onderwerp	Richting (doel)
Energieagenda	Ambitie	Energievoorziening/ Voorziening in grondstoffen	Een CO ₂ -arme energievoorziening in 2050 die veilig, betrouwbaar en betaalbaar is.
Functionaliteit	Missie	Kracht en Licht	Het ontwikkelen en implementeren van kosteneffectieve technologie voor elektriciteitsopslag, gericht op het laten aansluiten van het onregelmatige aanbod van hernieuwbare elektriciteit aan de eveneens onregelmatige elektriciteitsvraag.
Key enabling technology	Strategie	Elektrochemische conversie	Ontwikkeling en implementatie van diverse elektriciteitsopslag-oplossingen voor verschillende tijdschalen (seconden tot seizoenen).
Innovatie Programma	Doel	Programma	• Ontwikkeling van nieuwe goedkopere elektrolyser en brandstofceltechnologie: CAPEX reductie van factor vier. • Ontwikkeling van efficiëntere elektrolyse en brandstofceltechnologie: +/-10% bij hogere productiviteit. • Ontwikkeling en demonstratie van nieuwe elektrochemische routes naar geschikte "opslag"-chemicaliën, bijvoorbeeld ammoniak, mierenzuur en methanol. • Demonstraties van grootschalige korte termijn elektriciteits-"opslag" (secondes tot dagen). • Ontwikkeling en demonstratie van flexibilisering van elektrochemische processen inclusief downstream processen, zoals ammoniak.
Project	Resultaat	Projecten	• Ontwikkeling van materialen (membraan, katalysator) en systemen die het mogelijk maken om elektrolyzers en brandstofcellen goedkoper en efficiënter te maken. • Procesontwikkeling voor het efficiënt maken van vloeibare energieopslag in bijvoorbeeld methanol en ammoniak.
Activiteit	Oplevering	Onderzoek, ontwikkeling en demonstratie activiteiten	• Verbeterde elektrolyser concepten (> 20 kW pilot, >10MW plant). • Verbeterde brandstofcelconcepten (> 20 kW pilot, >10MW plant). • Nieuwe elektrodematerialen (kosten, levensduur, efficiency). • Demo flexibele methanol en ammoniak productie.



Annex B

Bedrijvigheid NL Elektrochemische Conversie en Materialen

Energie

Distributie

Alliander
Greenpoint
Stedin
TenneT

Productie

Eneco
Engie /laborlec
Nuon
RWE
Uniper

Gas

GasTerra
Gasunie
Operators Noordzee
Shell

Chemie

Air Liquide
Air Products
AkzoNobel
Albemarle
Antecy
Arkema
Avantium
BASF
COVAL Energy
Criterion
Dow
DSM
Huntsman
ICL Terneuzen
Linde
Nyrstar
OCI Nitrogen
Praxair
RWB
Shell
Total
Vopak
Yara

Hightech en materialen

Airborne
Ampleon
Chemtrix
Elestor
E-Trucks
Evoqua
Holthausen
Hydron Energy
HyET
Hygear
Ivium
Flowid
3M
Ligal
Metrohm Autolab
MTSA Technopower
Nedstack
PalmSens
Pitpoint
Stork (systeemintegratie)
Tata Steel
Team Fast
Teesing
VDL

Er is een groot potentieel aan apparatenbouwers en toeleveranciers in de hightech met innovatief vermogen die kunnen inspelen op een marktvraag wanneer ECCM als transitieroute door de overheid wordt omarmd.

Water

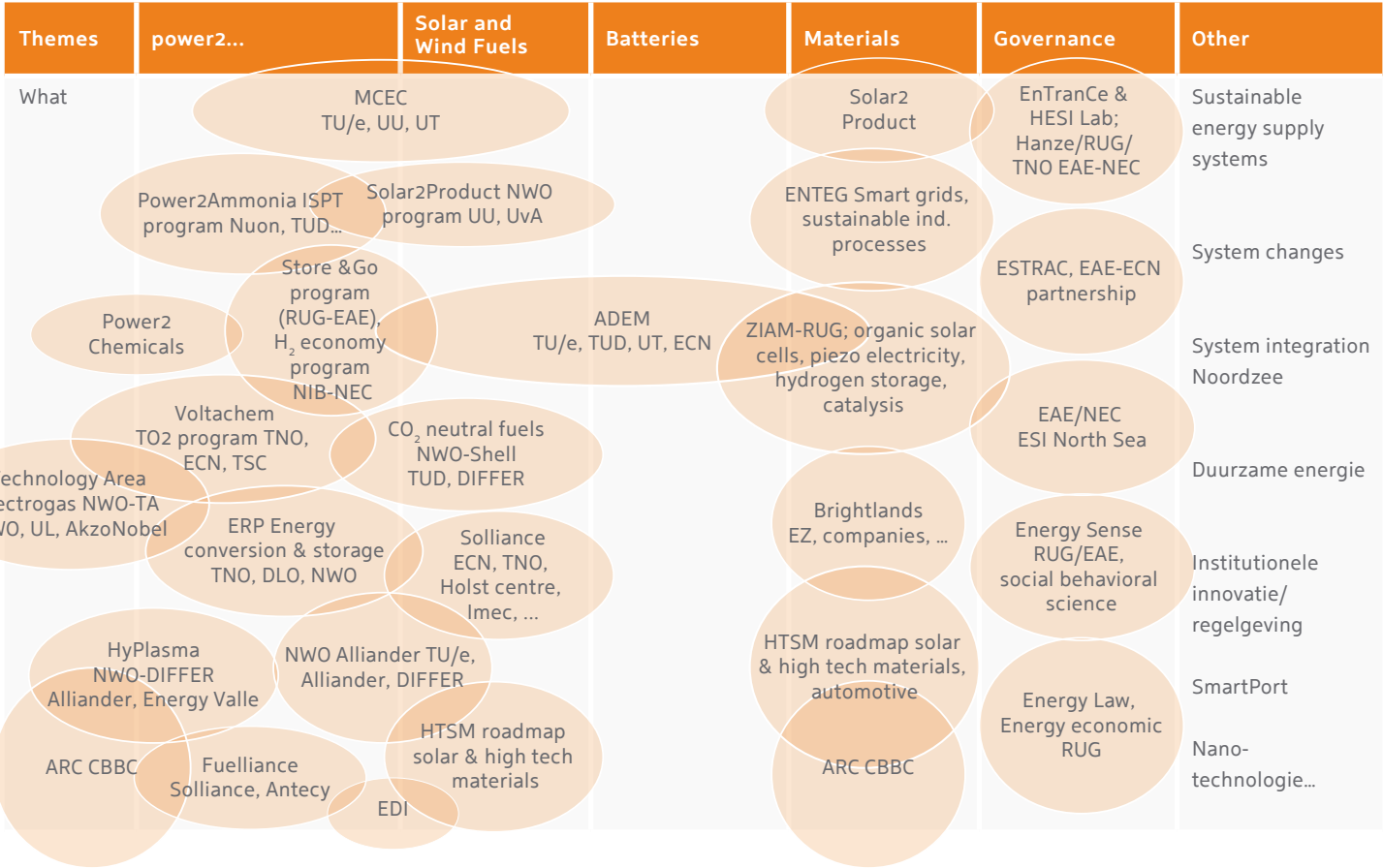
A. Hak Industrial Services
Aquabattery
Evides
Fujifilm
Lenntech
REDstack
Van der Knaap
Vitens
Voltea
Waternet
Waterschap de Dommel
W&F Technologies

Logistiek

Havenbedrijf Rotterdam

Annex C

Geconsulteerde lopende initiatieven en platforms



Figuur 9 Lopende initiatieven in Nederland

Initiatieven aanwezig tijdens Themadag Elektrochemische Conversie & Materialen, 27 januari 2017:

- Hyplasma

TA Electrogas

Power-2-Ammonia

ADEM

ISPT

VoltaChem

Plasma conversion of CO₂

TNO Energy Conversion & Storage

ECN, Opslag & integratie van duurzame energie
- Solliance

MCEC

(CH)IPP Synthesegaschem

CO₂ neutral fuels

Solar to products

Wetsus

ARC CBBC

DIFFER

Annex D

Commissiesamenstelling

Adviescommissie Elektrochemische Conversie en Materialen

Prof. dr. Richard van de Sanden (voorzitter, DIFFER), Directeur DIFFER, Plasmafysica en chemie
Dr. Peter Bouwman (Nedstack fuel cell technology), Chief Technology Officer
Prof. dr. Bernard Dam (TU Delft), Materials for Energy Conversion & Storage
Dr. Earl Goetheer (TNO), Principle scientist Sustainable Process & Energy Systems
Prof. dr. Gert-Jan Gruter (Avantium), Chief Technology Officer
Prof. dr. Petra de Jongh (Universiteit Utrecht), Inorganic Chemistry & Catalysis
Prof. dr. Marc Koper (Universiteit Leiden), Elektrochemie
Prof. dr. Guido Mul (Universiteit Twente), Photocatalytic synthesis
Dr. Alexander van der Made (Shell), Principal Scientist Future Energy Technologies
Dr. John van der Schaaf (TU/e), Chemical reactor engineering
Drs. Marco Waas (AkzoNobel), Director RD&I and Technology Industrial Chemicals
Dr. Hans van der Weijde (Tata Steel), Programmamanager Elektrochemie en CO₂-reductie
Dr. Wim Willeboer (RWE), Strategic Engineer Process Technology

Klankbordgroep topsectoren en HBO

Dr. Peter Alderliesten (TKI Energie en Industrie)
Prof. dr. Rolf van Benthem (TKI Chemie, roadmap Advanced materials, DSM/TU/e)
Dr. Oscar van den Brink (TKI Chemie)
Dr. Jörg Gigler (TKI Gas)
Dr. Aart-Jan de Graaf (lectorenplatform LEVE i.o., systeemintegratie)
Dr. Bert Hamelers (TKI Water/Wetsus)
Dr. Jacques Kimman (Hogeschool Zuyd)
Dr. Fred van Rosmalen (TKI HTSM)
Prof. dr. Eelco Vogt (TKI Chemie, roadmap Conversion, Process Tech. & Synthesis, Albemarle/UU)

Expertgroep Governance & Transitie

Prof. dr. Hans de Bruijn (TUD, Public Administration/Organisation and Management)
Prof. dr. Jan van den Ende (Rotterdam School of Management)
Prof. dr. Martijn Groenleer (Tilburg, Regional Law and Governance)
Prof. dr. Marko Hekkert (UU, Copernicus Instituut voor Duurzame Ontwikkeling)
Ruud Koornstra (duurzaam ondernemer, Nationale energiecommissaris,
Voorzitter Raad van Bestuur European Center for Climate Change Solutions)
Prof. dr. Gert Jan Kramer (Shell/UU, Sustainable Energy Supply Systems)
Dr. Roland Ortt (TUD, Management of Technology)
Prof. dr. Theo Toonen (UT, Institutionele bestuurskunde)

Namens de betrokken topsectoren

Prof. dr. Dave Blank (Topsector HTSM)
Prof. dr. Paulien Herder (Topsector Energie)
Prof. dr. Bert Weckhuysen (Topsector Chemie)

Secretarissen: Ir. Martijn de Graaff (TO2), dr. Frank Karelse (Topsector HTSM),
dr. Sandra de Keijzer (Topsector Energie), drs. Mark Schmets (Topsector Chemie).

Annex E

Verantwoording

De aanleiding

De maatschappij staat aan de vooravond van een grote energie- en grondstoffentransitie voor de overgang naar een CO₂-neutrale economie in 2050, de ambitie die het kabinet stelt in de Energieagenda. Dit is een grote uitdaging, met name voor de traditionele kapitaalintensieve sectoren, zoals de chemie, raffinage en staal-sector. Om die transitie mogelijk te maken zijn innovaties nodig die het verschil maken, stelt ook VNO-NCW in zijn visie voor het nieuwe kabinet, NL Next Level. De exponentiële toename van duurzame energie uit wind en zon biedt een aanzienlijke kans voor grootschalige verduurzaming.

Grote transitie, sterk fundament

De topsectoren Energie, HTSM en Chemie hebben geconstateerd dat op het grensvlak van deze sectoren al veel gebeurt, met name gerelateerd aan de conversie van elektriciteit en zonlicht naar producten. Daarom organiseerden de topsectoren in samenwerking met het Ministerie van Economische Zaken januari 2017 een themadag op het gebied van Elektrochemische Conversie en Materialen. De dag gaf een indruk van de uitdagingen waar bedrijven uit diverse sectoren zich voor gesteld zien. Ook gaf de dag een overzicht van de verschillende programma's en projecten die rond deze thematiek zijn opgezet, vaak in samenwerking tussen bedrijfsleven, kennisinstellingen en overheid.

Gezamenlijke aanpak

Tijdens voornoemde themadag hebben de betrokken topsectoren geconcludeerd dat er de noodzaak is om tot een gezamenlijke aanpak te komen om de inzet van elektrochemische conversie en materialen voor de samenleving dichterbij te brengen, en daarmee de transitie naar een op de toekomst gerichte CO₂-arme samenleving. De thematiek vereist samenwerking tussen verschillende disciplines, nieuwe allianties tussen bedrijven en instellingen uit verschillende sectoren en vraagt om samenwerking over de grenzen van topsectoren heen. Om deze nationale aanpak een stapje dichterbij te brengen hebben de topsectoren Energie, HTSM en Chemie een adviescommissie ingesteld die namens een diverse achterban van bedrijven en wetenschappers tot een gemeenschappelijke visie moest komen.

De commissie is aan de slag gegaan met een breed bestuurlijk mandaat van betrokken topsectoren/TKI's en een sterke thematische verankering in de routes Energietransitie, Materialen en Circulaire Economie van de Nationale Wetenschapsagenda (NWA). Ook NWO- en TO2-besturen zijn geconsulteerd bij de instelling van de commissie. De commissie heeft haar visie opgesteld in interactie met de TKI's van de betrokken topsectoren en een bredere groep met diverse innovatie en bestuurskundigen en governance-experts. De visie is mede tot stand gekomen door de organisatie van een tweede themadag (juni 2017) voor experts uit wetenschap, bedrijfsleven en van de overheid.

Dit advies is de uitkomst van de opdracht die de topsectoren hebben meegegeven aan de Adviescommissie Elektrochemische Conversie en Materialen.



Annex F

Verklarende woordenlijst

Carbon to chem

CO₂-emissies van de industrie gebruiken als grondstof voor chemicaliën.

CCS

CO₂-afvang en -opslag (internationaal afgekort met CCS van carbon capture and storage) is het afvangen en ondergronds opslaan van kooldioxidegas dat vrijkomt bij de verbranding van (fossiele) brandstoffen.

CCU

CO₂-afvang en -gebruik (internationaal afgekort met CCU van carbon capture and utilization) is het afvangen van kooldioxidegas en dit gebruiken als grondstof voor brandstoffen en producten.

Curtailment

Het tijdelijk stopzetten van energieproductie om productieoverschotten te voorkomen.

ECCM

Elektrochemische Conversie & Materialen, sleuteltechnologie om de elektrificatie van processen mogelijk te maken.

Elektrochemische compressie

Technologie waarbij de druk van het aangeboden gas, zoals waterstofgas, kan worden opgevoerd door het gasmolecuul dat in contact komt met een membraanoppervlak een lading te geven, zodat het naar de andere kant kan worden getrokken met een elektrische stroom, waardoor aan de achterkant er overschot ontstaat van het pure gas.

Elektrolyser

Apparaat dat een elektrische stroom gebruikt om een niet-spontane chemische reactie aan te drijven.

Elektrolyt

De elektrolyt is het medium dat de verbinding vormt tussen de twee polen (anode en kathode) van een elektrochemische energiedrager of cel (een accu, elektrolytische condensator, brandstofcel, een elektrochemische cel of in een elektrolytische cel). Als chemisch begrip is een elektrolyt een chemische verbinding die in een oplossing of in gesmolten toestand geheel of gedeeltelijk in ionen is gesplitst en in die vorm een elektrische stroom kan geleiden.

Faraday efficiency

Beschrijft de efficiëntie waarmee elektrische lading wordt overgedragen in een systeem dat een elektrochemische reactie faciliteert.

Redox-flow accu

Is een type elektrochemische cell die chemische energie levert door een systeem waarin twee chemische componenten zijn opgelost in een vloeistof, gescheiden door een membraan. Een flow accu kan gebruikt worden als brandstofcel of als oplaadbare batterij (accu).

Koppelingsreactie

Een koppelingsreactie is de overkoepelende naam voor een reactie in de organische chemie waarbij twee koolstoffragmenten aan elkaar worden gekoppeld met behulp van een metaal als katalysator.

PEM-cell

Proton Exchange Membrane Fuel cell is een brandstofcel die werkt met een polymeerelektrolyt, voorzien van katalysatoren. Het ionen-transport vindt plaats met behulp van waterstof(H)-ionen, de katalysator voor de ionisatie van het waterstof is platina of platina-ruthenium. PEM-brandstofcellen kunnen waterstof met een hoog rendement omzetten in elektriciteit.

SOFC-cell

Een solid oxide fuel cell (SOFC) is een brandstofcel werkend met een vast oxide (keramiek) als elektrolyt. Het ionentransport vindt plaats met behulp van oxide-ionen, de katalysator voor de ionisatie van het waterstof bestaat uit nikkel met yttrium-gedoteerde zirkoniumoxide.

Solar fuel

Een synthetische chemische brandstof direct of indirect geproduceerd uit zonne-energie via fotochemische/foto-biologische, thermochemische of elektrochemische reacties.

Synthesegas

Een geproduceerd gasmengsel van koolstofmonoxide en waterstofgas, niet te verwarren met synthetisch gas.



Colofon

Layout: Delta3, Margit de Kok

Fotografie: Elodie Burrillon | www.hucopix.com, Shutterstock

Tekstredactie: Harm Ikink, ECCM-commissie

Dit is een publicatie van de Adviescommissie Elektrochemische Conversie & Materialen, in gezamenlijke opdracht van de topsectoren Energie, HTSM en Chemie.



Holland High Tech
High-tech Solutions for Global Challenges

