



CIRCULAIRE MAAKINDUSTRIE

Routekaart Circulaire Elektrolyzers 1.0

**Contouren van een routekaart over circulaire elektrolyzers
voor PEM- en AWE-technologie**

Versie: Juli 2025

Samenvatting

Achtergrond en doelstellingen

Deze Routekaart Circulaire Elektrolyzers is ontwikkeld door een publiek-privaat georganiseerd productteam, afkomstig uit de waterstofsector, met de volgende doelstellingen:

- het verdienvermogen van de Nederlandse maakindustrie te versterken;
- de afhankelijkheid van schaarse grondstoffen te verminderen;
- de milieudruk van elektrolyser-fabricage en -gebruik te verlagen.

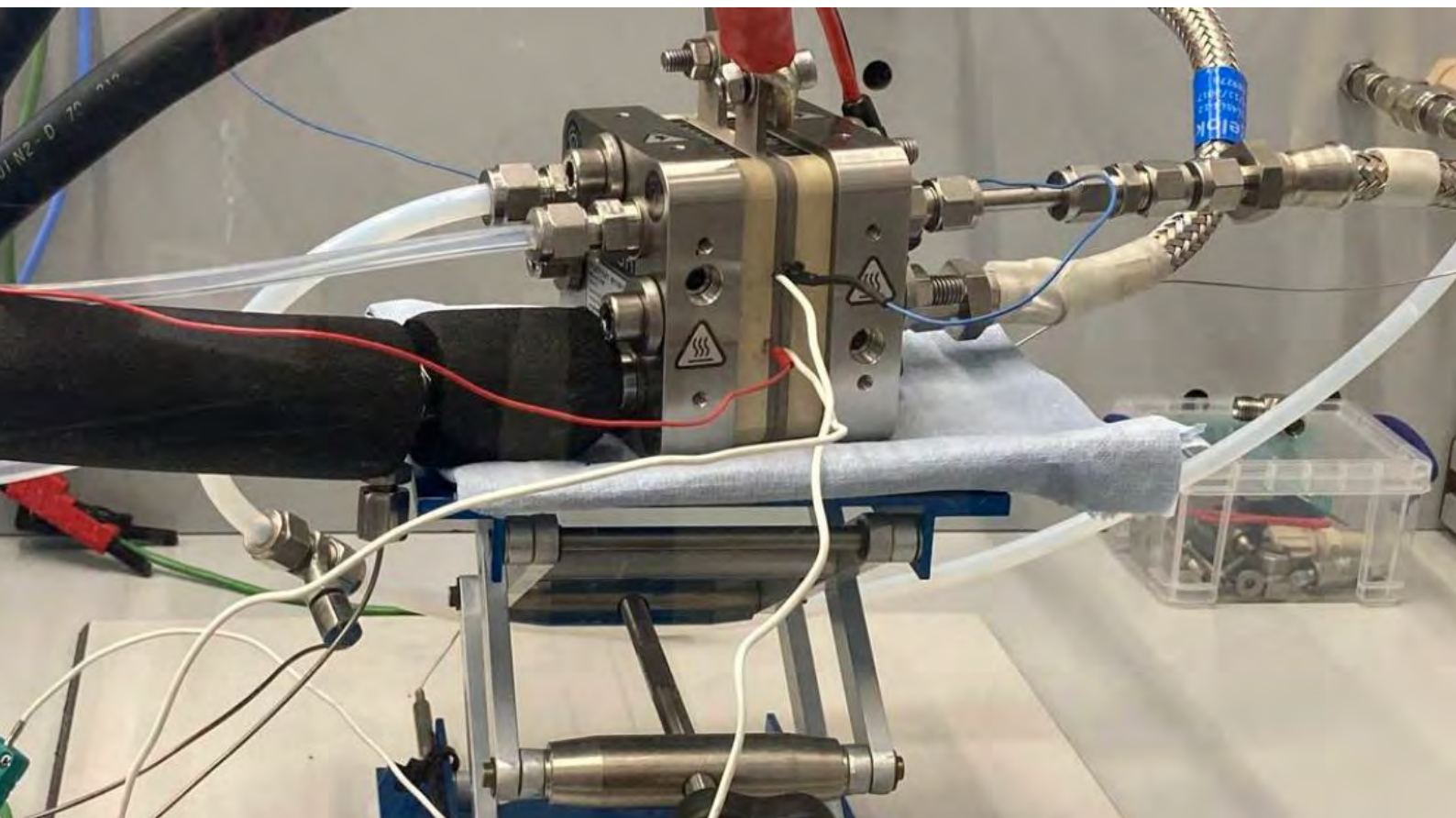
Deze initiatieven sluiten aan bij nationale strategieën zoals het Nationaal Programma Circulaire Economie (NPCE) en de Nationale Grondstoffenstrategie (NGS). Het doel is om een voorsprong te creëren voor de Nederlandse maakindustrie in een duurzame en innovatieve economie.

Aanpak

Voor de volgende twee technologieën bevat de routekaart een uitwerking:

- Alkaline Water Elektrolyse (AWE): een bewezen en robuuste technologie (TRL-niveau 8/9);
- Proton Exchange Membrane-elektrolyse (PEM): flexibele technologie met een relatief kleine footprint qua omvang en geschikt voor fluctuaties in duurzame energieopwekking (TRL-niveau 7/8).

Deze keuze is gemaakt vanwege de marktrijpheid van de technologie. In de komende maanden komen ook nieuwe elektrolysetechnologieën aan de orde, zoals Anion Exchange Membrane (AEM) en Solid Oxide Elektrolyse (SOE). De routekaart is daarmee een eerste aanzet om circulaire oplossingen in kaart te brengen.



Resultaten

Het productteam heeft 18 circulaire oplossingen in kaart gebracht en daarvan drie prioritaire, circulaire oplossingen gedetailleerd uitgewerkt op basis van de criteria urgentie, verwacht draagvlak in de sector en mogelijke impact:

1. Strategie Refuse PFAS: het vermijden van PFAS-gebruik om de milieubelasting te reduceren en nieuwe, kansrijke businessmodellen te ontwikkelen;
2. Strategieën Reduce, Refuse, Retain iridium: het verminderen van het iridiumgebruik in de PEM-technologie, het zoeken naar alternatieven en het verlengen van de levensduur van deze elektrolyzers;
3. Strategieën Refuse en Retain PGM-vrije AWE: ontwikkeling van Platinum Group Metals (PGM)-vrije oplossingen om de afhankelijkheid van schaarse grondstoffen te verminderen en tegelijkertijd de levensduur te verlengen.

De overige circulaire oplossingen en andere elektrolysetechnologieën worden in de komende maanden uitgewerkt zodat een compleet beeld ontstaat over de mogelijkheden om elektrolyzers integraal circulair te maken. Dit traject wordt samen met de waterstofsector opgepakt.

Actiepunten voor de toekomst

Samengevat adviseert het productteam om de volgende actiepunten op te pakken:

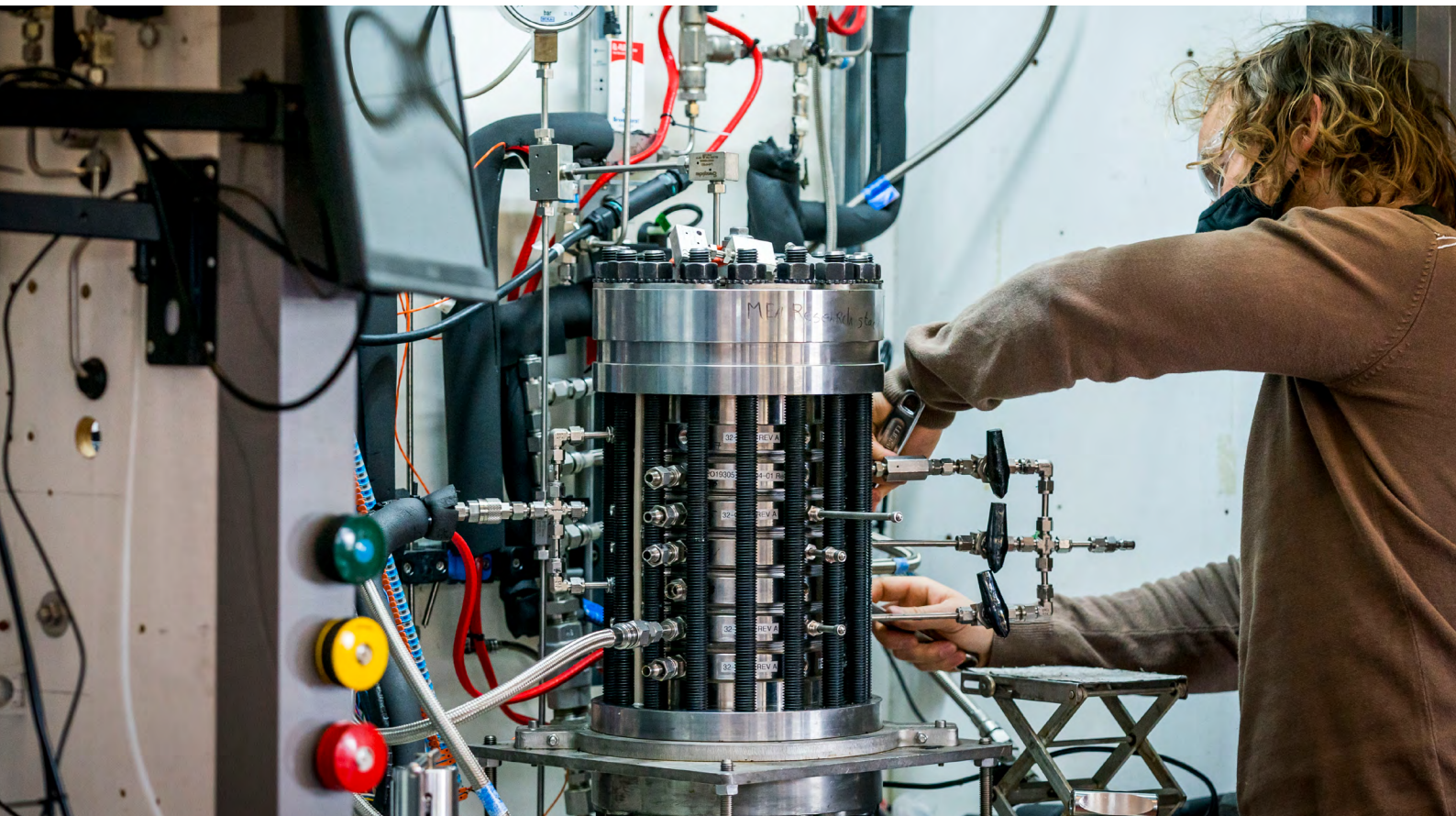
1. Analyse van bestaande waterstofprogramma's: identificeren van lopende circulaire initiatieven en het invullen van 'gaps' over het hele spectrum van elektrolyse heen;
2. Bedrijvenkaart opstellen: overzicht van bedrijven die werken aan circulaire oplossingen, inclusief hun doelen;
3. Stakeholder-engagement: het opzetten van een breed gedragen plan voor communicatie en kennisdeling, inclusief uitvoering;
4. Beleid en subsidies: aanpassing van subsidie-instrumenten en actieve betrokkenheid organiseren bij nationaal en Europees beleid.

Visie en Impact

De routekaart benadrukt de urgentie van gezamenlijke acties om technologieontwikkeling, opschaling en implementatie van circulaire oplossingen te versnellen. Door deze oplossingen in te voeren, kan de kostprijs van elektrolyzers en groene waterstof dalen en daarmee kan het bijdragen aan een succesvolle energietransitie. Tevens bouwt Nederland zo aan een robuuste industrie met een goede internationale concurrentiepositie. Het productteam roept de sector en de overheid op om gezamenlijk aan de realisatie van deze circulaire doelen te werken.

Leeswijzer

Dit document bevat een compilatie van alle informatie die in de vorm van een routekaart circulaire elektrolyzers wordt gepresenteerd. De routekaart is nog niet af; momenteel ligt er een basis met een geprioriteerde set van drie circulaire oplossingen voor de twee meest toegepaste elektrolysetechnologieën, te weten Alkalische Water Elektrolyse (AWE) en Proton Exchange Membrane-technologie (PEM). In de komende maanden wordt deze set van oplossingen in overleg met de waterstofsector verder uitgebreid naar meerdere technologieën en circulaire oplossingen. Deze routekaart is dus het startpunt van een traject dat in de komende tijd tot uitvoering en verdieping gaat komen.



Inhoud

Samenvatting	2
Leeswijzer	4
1 Inleiding	6
2 Scope	8
3 Invloedfactoren en ontwikkelingen (PESTEL-analyse)	10
4 Visie: een terugblik vanuit de toekomst	12
5 Doelen	13
6 Inventarisatie van mogelijke circulaire oplossingen	15
7 Prioritaire circulaire oplossingen	19
A. Circulaire oplossing PFAS: strategie refuse	20
B. Circulaire oplossing iridium voor PEM: gebruik reduceren, alternatieven ontwikkelen, levensduur verlengen	23
C. Circulaire oplossing verlenging levensduur: PGM-vrije hoog-efficiënte AWE	26
8 Gekozen interventies	29
Marktinterventies	29
Keteninterventies	30
9 Stakeholder-engagementplan	34
10 Projectenportfolio	35
Bijlage 1 Samenstelling van het productteam	37
Bijlage 2 Prioritering van doelen	38

1 Inleiding

In het Nationaal Programma Circulaire Economie ([NPCE](#)) en de Nationale Grondstoffenstrategie ([NGS](#)) zijn maatregelen opgenomen om de transitie naar een circulaire economie te versnellen. De maakindustrie is hierin één van de prioritaire productketens, met specifieke aandacht voor verschillende productgroepen. Het doel van de NGS is om de leveringszekerheid van kritieke grondstoffen op middellange termijn te vergroten. Deze publicatie is tot stand gekomen in opdracht van het Ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG) in samenwerking met het Ministerie van Economische Zaken (EZ), onder begeleiding van Circonnect, Rijksdienst Voor Ondernemend Nederland (RVO) en TKI Nieuw Gas. In opdracht van KGG is het traject Circulaire Maakindustrie opgezet, waar elektrolyzers één van de productgroepen is. In de afgelopen zes maanden is daarom door een klein team (het zogenaamde productteam) een routekaart “circulaire elektrolyzers” uitgewerkt.

Waterelektrolyse is een technologie waarmee met behulp van elektriciteit water wordt gesplitst in waterstof en zuurstof. Waterstof wordt onder meer gebruikt als grondstof in de chemische industrie, als brandstof voor de opwekking van hogetemperatuurwarmte, voor zwaar vervoer en ten behoeve van energieopslag. Voor elektrolyse zijn verschillende technologieën beschikbaar of in ontwikkeling. De meest voorkomende technologieën zijn alkalische waterelektrolyse (AWE) en PEM-technologie (Proton Exchange Membrane). AWE is de meest toegepaste technologie (TRL8/9) vanwege het robuuste en bewezen karakter, PEM-technologie (TRL7/8) krijgt veel aandacht vanwege de flexibele inzetbaarheid waarmee goed op een fluctuerend aanbod van elektriciteit uit wind en zon kan worden ingespeeld en de relatief kleine footprint qua benodigd grondoppervlak van een installatie.

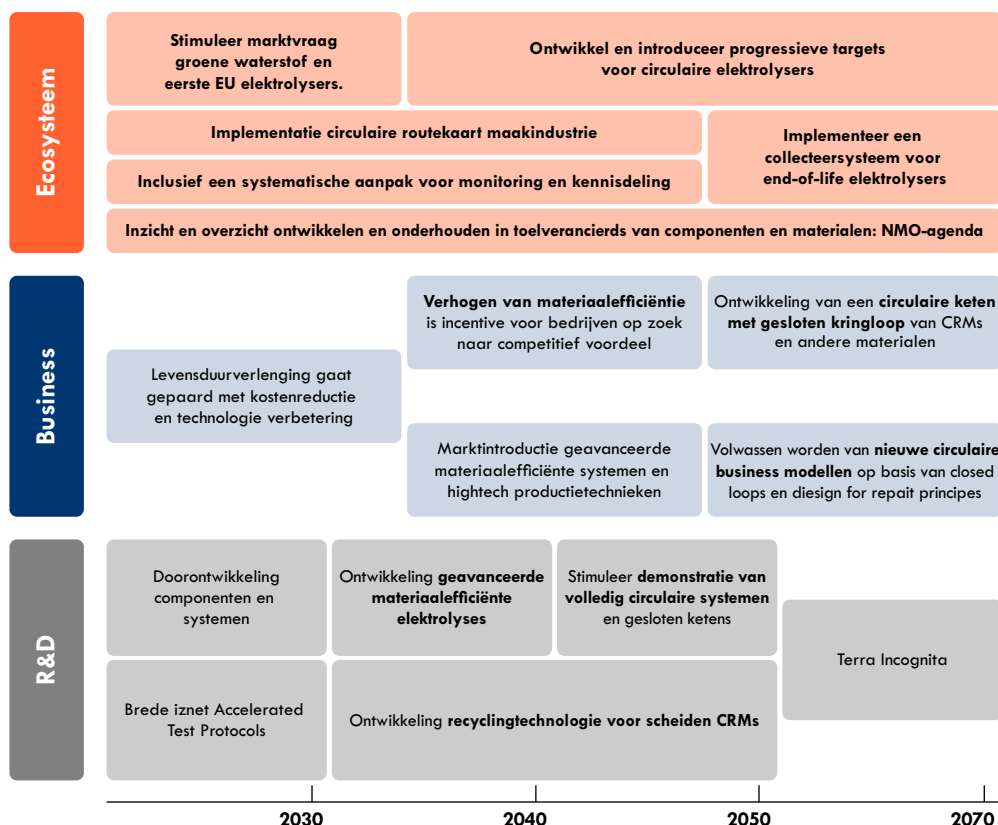
Het doel van de routekaart circulaire elektrolyzers is een transitieroute te schetsen om elektrolyzers meer circulair en duurzaam te maken teneinde het volgende te bereiken:

- versterking van de positie van Nederlandse/Europese spelers, met name de maakindustrie, zodat dit een stimulans geeft voor ons nationaal en Europees verdienvermogen;
- vermindering van de afhankelijkheid van met name schaarse, kritieke grondstoffen om enige mate van strategische autonomie te creëren, evenals een verminderde afhankelijkheid van fabrikanten en leveranciers van grondstoffen van buiten Europa;
- minimale impact op het milieu (d.w.z. op het hele ecosysteem).

De routekaart biedt houvast voor overheid, kennisinstellingen, bedrijfsleven en maatschappelijke organisaties, zodat er stabiel beleid gevoerd kan worden op het thema circulariteit. Kennisinstellingen kunnen hiermee hun focus bepalen en gericht aan de benodigde innovaties werken, terwijl het bedrijfsleven kan bijdragen door de gewenste producten en diensten te ontwikkelen en op de markt aan te bieden. Onderdeel van de routekaart is het zoeken naar een vervanging van de huidige, schaarse grondstoffen door ruimer beschikbare varianten die, indien mogelijk, voor Europese spelers goed te verkrijgen zijn of zelfs uit Europa afkomstig zijn.

In aanloop naar de oprichting van de productgroep circulaire elektrolyzers is door TNO, in het kader van het Nederlands Materialen Observatorium, een routekaart op hoofdlijnen voor circulaire elektrolyzers opgesteld in 2024 op basis van kwantitatief systeem-dynamisch modelleerwerk en kwalitatieve analyse van interviews met diverse bedrijven actief in de maakindustrie (TNO, 2024, R10600, [Op weg naar circulaire elektrolyzers | Rapport | Rijksoverheid.nl](#)). Voor een drietal domeinen, R&D – Business – Ecosysteem, zijn als functie van de tijd noodzakelijke ontwikkelingen geschetst. De routekaart van de expertgroep kan gezien worden als een specifiekere uitwerking van dit overzicht voor de eerste periode (2030/35) waarbij de focus op PEM- en alkalische elektrolyse ligt. De TNO-figuur 1 geeft goed weer welke aandachtspunten in de komende decennia van belang zijn. Dat is relevant gegeven de grotendeels lange(re) ontwikkel- en implementatietijden van circulaire oplossingen, zeker in een ontluikende markt als die voor elektrolyse. Deze figuur is opgenomen om als structuur en als inspiratie te dienen voor richting en tempo van de ontwikkeling van circulaire oplossingen met het oog op de langetermijnambities.

Figuur 1: Op weg naar circulaire elektrolyzers, TNO, 2024, R10600 Op weg naar circulaire elektrolyzers



De resultaten en ervaringen van de routekaart kunnen in de toekomst worden vertaald naar andere technologieën, zoals SOE (solid oxide elektrolyzers) en AEM (anion exchange membrane elektrolyzers). Verder behoeft deze routekaart Europese afstemming. De routekaart is bedoeld om fabrikanten te helpen om aan Nederlands en Europees beleid op het gebied van circulariteit en andere voor elektrolyse geldende eisen te voldoen, zonder dat het daarbij op voorhand de bedoeling is om zware beperkingen op te leggen; de routekaart beoogt een stimulerende werking te hebben. De onderhavige routekaart is nog niet compleet; het is een begin gericht op de eerdergenoemde twee elektrolysetechnologieën (AVE en PEM) en drie circulaire oplossingen. In de komende maanden wordt deze routekaart verder uitgebreid.

De routekaart houdt rekening met alle aspecten die met circulariteit samenhangen. De R-ladder is een effectief instrument om de milieu-impact van producten over de gehele levensduur te minimaliseren. Dit model ordent strategieën voor circulair ontwerp en gebruik. Hoe hoger een strategie op de ladder, hoe efficiënter het grondstoffengebruik. De R-ladder kent de volgende indeling:

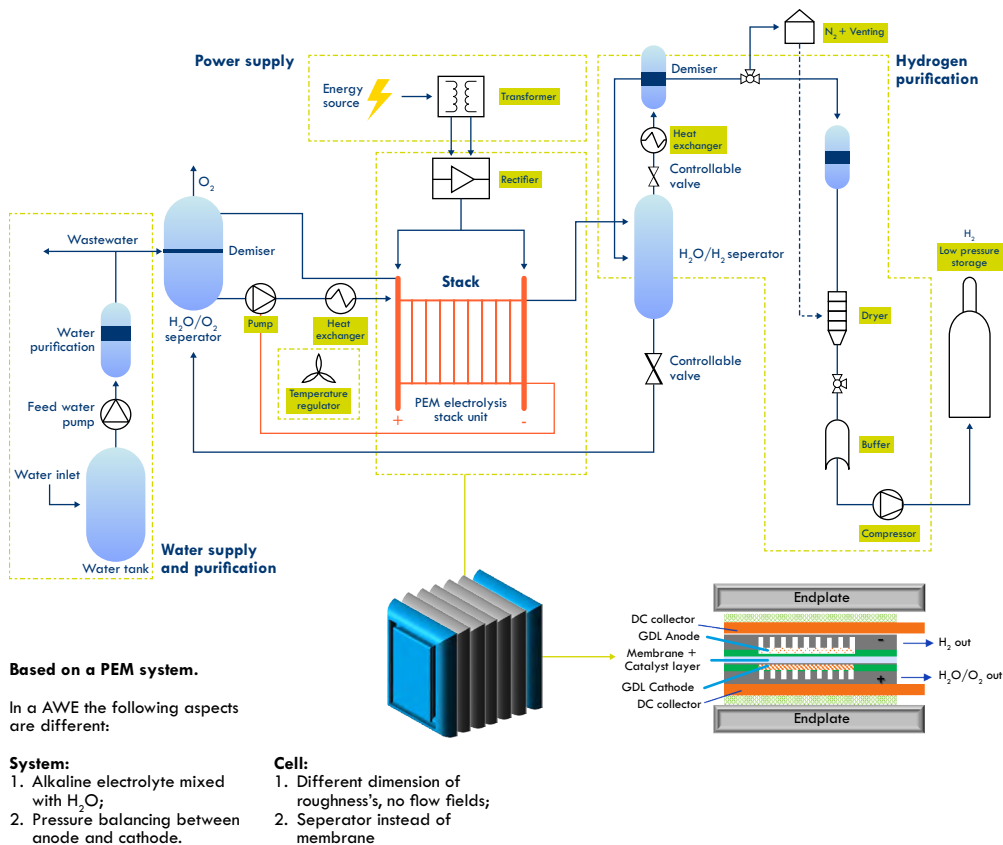
- **Slimmere inzet:** De eerste strategieën richten zich op beperking: R0 (Refuse) voorkomt overbodige of onwenselijke componenten, R1 (Reduce) minimaliseert het materiaalgebruik. Een integrale aanpak kan onderdelen vervangen of reduceren door aanpassingen in het ontwerp (R2 (Redesign));
- **Hergebruik en levensduurverlenging:** Hergebruik van installaties verlengt de levensduur van de toegepaste grondstoffen. R3 (Re-use) zet deze producten opnieuw in, R4 (Repair) herstelt defecten en R5 (Refurbish) moderniseert installaties. R6 (Remanufacture) en R7 (Repurpose) benutten componenten opnieuw;
- **Recycling als tussenoplossing:** Wanneer hergebruik niet mogelijk is, biedt R8 (Recycle) materiaal terugwinning, bijvoorbeeld van schaarse grondstoffen. R9 (Recover) zet restmaterialen om in energie. Hergebruik en recycling verkleinen de milieu-impact van installaties en zorgen dat grondstoffen efficiënter worden benut. Hoewel nuttig, zijn deze methoden veel minder efficiënt qua grondstoffen- en energie gebruik dan strategieën die de levensduur maximaliseren.

De tijdshorizon van de routekaart bedraagt 5-7 jaar (tot 2030/32) om voldoende ambitieus/realistisch te zijn, echter het besef is er ook dat een deel van de circulariteitsactiviteiten pas na einde levensduur van de elektrolyser relevant is. Qua timing ligt dit op zijn vroegst na 2035, mogelijk pas rond 2040. Uiteindelijk zal regelmatig getoetst moeten worden of de geformuleerde doelen nog steeds binnen bereik liggen en realistisch zijn.

2 Scope

In dit hoofdstuk wordt de scope van de routekaart circulaire elektrolyzers toegelicht. Figuur 1 bevat een schematische weergave van de elektrolyser-stack en de balance of plant (BOP). Hiermee liggen de systeemgrenzen van een elektrolyser vast.

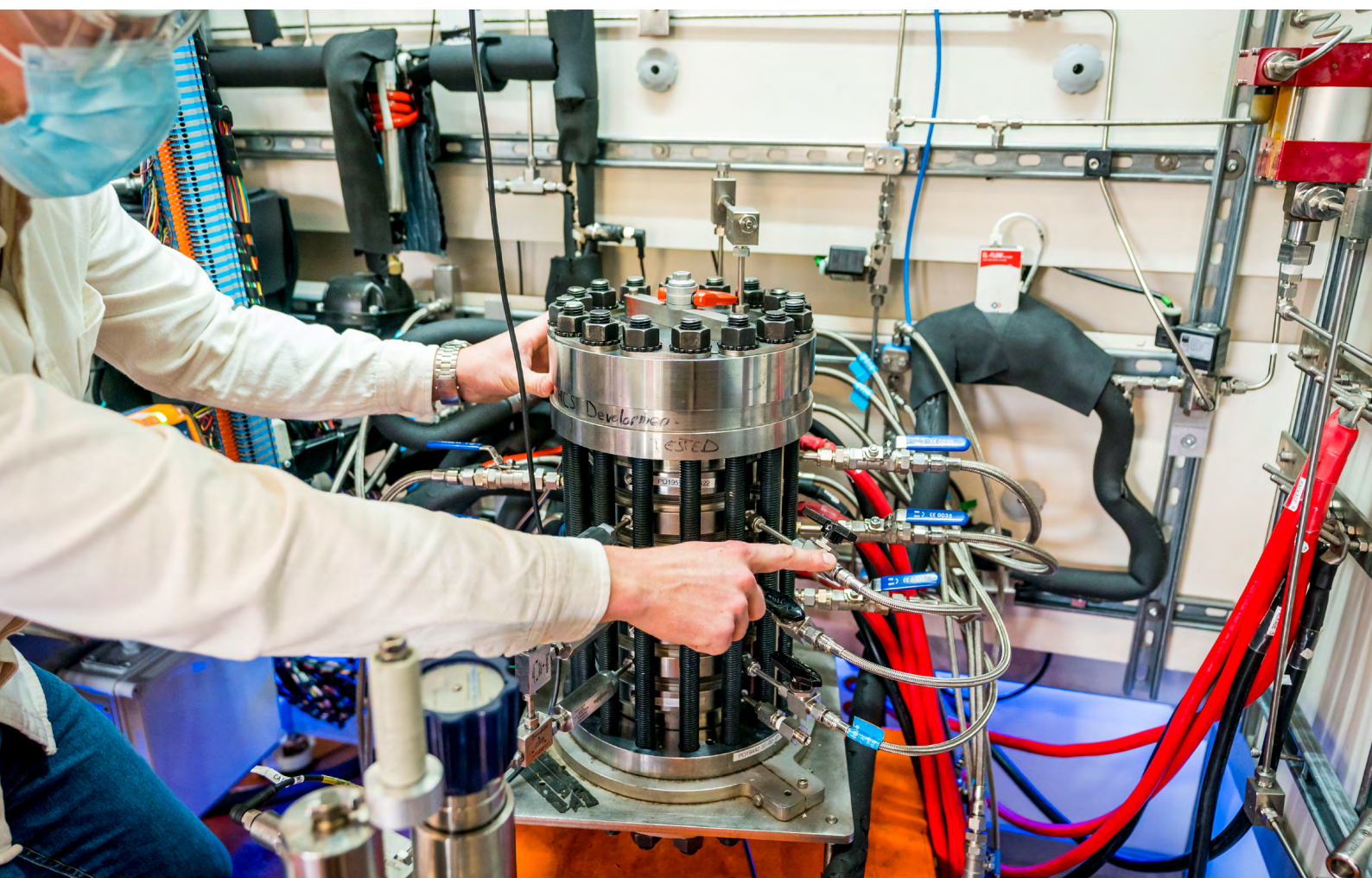
Figuur 2: Schematische weergave van de elektrolyser-stack en de balance of plant.



In tabel 1 wordt voor verschillende aspecten aangegeven wat er binnen de scope van de routekaart valt en wat niet. Deze keuze is voor nu gemaakt om tot een overzichtelijk aantal opties en variabelen te komen. In een toekomstige uitbreiding kunnen de 'out of scope'-aspecten worden meegenomen.

Tabel 1: Overzicht van de scope van de routekaart circulaire elektrolyzers

Onderwerp	In scope	Out of scope	Motivatie
Technologie	AWE, PEM, 1 ^e , 2 ^e en 3 ^e generatie	SOEC en AEM	AWE en PEM zijn verder ontwikkeld en worden nu meer toegepast
Systeem-afbakening	Elektrolyser-stack incl. BOP	Alles buiten de BOP, zoals compressie t.b.v. waterstoftankstations en leidingnetwerken	Het is van belang om het hele systeem te beschouwen, alleen de stack lijkt te beperkend
Duurzaamheids-aspecten	- Planetary boundaries uit NPCE - PFAS (geen effectdoel, wel kansen spotten)	Gebruiksefficiency van de elektrolyser, afvalwater-behandeling	Voor deze exercitie duidelijke systeemgrenzen gebruiken om het werk overzichtelijk te houden
CRM's (critical raw materials = kritieke grondstoffen)	Voor alle componenten alle CRM's uit de CRMA lijst met speciale aandacht voor Platina, Iridium en Nikkel		Aansluiten bij Europees/ internationaal beleid en meest urgente materialen
Gebruik en Toepassingen	Grens van routekaart is maken van H ₂ , nu nog geen keuze over gebruik (voor welke markt)	Toepassings-kant/gebruikers-toepassing niet meenemen (ook niet gebruik restwarmte en zuurstof)	Afbakening om aanpak voor nu beheersbaar te houden
Vermogen Elektrolyzers	Op voorhand geen beperking		Voor alle capaciteiten spelen soortgelijke aspecten
Toeleverancier-ketens	Afgestemd op systeemafbakening en keuzes binnen stack en BOP		



3 Invloedfactoren en ontwikkelingen (PESTEL-analyse)

Er zijn diverse factoren en ontwikkelingen van invloed op de realisatie van circulaire elektrolyzers. Dit hoofdstuk gaat hierop in aan de hand van een PESTEL-analyse die tijdens een van de workshops is gemaakt. De PESTEL-analyse brengt de politieke, economische, sociale, technologische, ecologische en juridische aspecten in kaart. Het is niet de bedoeling om een 100% volledige analyse te presenteren, maar om de belangrijkste factoren en ontwikkelingen in het vizier te hebben.

Uit de PESTEL-analyse blijkt dat veel factoren van invloed zijn op de ontwikkeling van circulaire elektrolyzers. Een belangrijke, sturende invloed gaat uit van de juridische en politieke factoren; dit betreft met name de wet- en regelgeving op nationaal en Europees niveau die stuurt op circulariteit, milieu en veiligheid, en de mate van Europese autonomie door zelf te produceren via een eigen maakindustrie en de beschikking te hebben over (een deel van) de benodigde schaarse grondstoffen. De doorvertaling daarvan naar nationaal niveau wordt deels door politieke voorkeuren en prioriteiten bepaald, zeker daar waar het specifieke accenten betreft (nationale industriepolitiek, aanwezigheid van grondstoffen, huidige marktpositie etc.). Vanwege de mogelijke impact op de omgeving, maar ook uit oogpunt van eventuele kansen die dit biedt, spelen ook de sociale factoren hierbij een rol. De technologische factoren zijn van belang omdat dat bepaalt in welke mate het mogelijk/haalbaar is om specifieke eisen door te vertalen naar producten en productietechnologie; in welke mate is het technisch mogelijk om elektrolyzers circulair te maken, het gebruik van CRM's te beperken of zelfs te elimineren (door de inzet van alternatieven). De economische factoren bepalen vervolgens weer de mate van succes; als de kosten te hoog zijn ligt het voor de hand te veronderstellen dat introductie en implementatie langer zal duren. De uitdaging is om de transitie naar circulaire elektrolyzers te maken die aan alle (toekomstige) eisen voldoen, economisch rendabel kunnen worden toegepast en een kans bieden aan onze eigen maakindustrie. Overigens verschuift het belang van de verschillende factoren in de tijd; het is een momentopname. De beleidsagenda zal met deze dynamiek rekening moeten houden.

Politieke factoren:

- Politieke constellatie (samenstelling kabinet en ministers);
- Mate van druk op Kabinetsbeleid en/of klimaatdoelen;
- Geopolitieke verhoudingen, zoals VS-EU-China;
- Afspraken binnen WTO (wereldhandel);
- EU-beleidsprioriteiten;
- Toenemende druk om CO₂-doelen te halen;
- Gebrek aan overeenstemming op EU-niveau;
- Beleidskader en afgesproken doelen.

Economische factoren (meest belangrijkste):

- Omvang investeringen in elektrolyzers;
- Stand van de economische (groei, stilstand, recessie);
- Rentestanden (in relatie tot rentelasten van investeringen);
- Subsidies en financieringsmogelijkheden;
- Kosten van duurzame elektriciteit;
- Investeringsbesluiten in installatie en opschaling (is de markt klaar voor snelle opschaling);
- Vraag naar groene waterstof;
- CO₂-prijs.

Sociaal-maatschappelijke factoren:

- Progressie m.b.t. de klimaatdoelen;
- Veiligheid van waterstofproductie;
- Beschikbaarheid van voldoende gekwalificeerd personeel;
- Draagvlak voor en acceptatie van circulariteit;
- Vergroting van sociale ongelijkheid in relatie tot energietransitie en circulaire economie;
- NIMBY-effect.

Technologische factoren:

- Beschikbaarheid van recyclingtechnologie;
- Reductiemogelijkheden van CRM's qua technologie (wat zijn technisch haalbare, minimale hoeveelheden die kunnen worden toegepast);
- Nieuwe generatie (elektrolyse)technologie;
- Opschaling van CRM-technologieën;
- Wereldwijd concurrentievermogen;
- Marktrijpheid (TRL-niveau) van circulaire producten;
- Mogelijkheden van design for recycling;
- Ontwikkeling en validatie van alternatieve materialen voor CRM's.

Environmental (ecologische factoren):

- PFAS-restricties;
- Milieueisen aan grondstoffen- en materialengebruik (wet- en regelgeving);
- Hergebruiksdoelstellingen.

Legal (juridische factoren):

- Restricties voor PFAS-gebruik;
- Veiligheid van IP en bedrijfsgeheimen;
- Europees en nationaal beleid (CRMA, CBAM en andere directives);
- Eisen aan materialengebruik;
- Hergebruiksdoelstellingen, wet- en regelgeving op het terrein van hergebruik.

4 Visie: een terugblik vanuit de toekomst

Deze visie beschrijft waar we op het terrein van circulaire elektrolyzers, terugkijkend vanuit de toekomst, in 2035 willen staan. Deze horizon is bewust op dat jaartal gesteld om de zichttermijn zodanig te leggen dat enige urgentie ervan uitgaat, en tegelijkertijd voldoende tijd beschikbaar is om daadwerkelijk en concreet aan circulariteit te werken.

In de periode 2025-2035 is de productie van groene waterstof via elektrolyse sterk toegenomen, met een geschatte geïnstalleerde elektrolysecapaciteit in de orde grootte van 5 GW¹ opgesteld vermogen; die capaciteit groeit na 2035 gestaag door. Dit vermogen is bereikt door productie van elektrolyzers in Nederland en in Europa, ondersteund door nationale en Europese overheden en door strategische allianties aan te gaan met spelers buiten Europa, zoals China en de VS.

De kosten van groene waterstof zijn in die periode sterk gedaald van 12-14 euro per kilo in 2025 naar 5-8 euro per kilogram in 2035. Dit is bereikt door opschaling, efficiëntieverbetering in de hele keten (van duurzame energieproductie tot elektrolyse en distributie), verminderen en vermijden van dure grondstoffen, toepassing van verschillende innovaties en door diverse beleidsmaatregelen (subsidies en verplichtingen, nationaal en Europees). De overheid heeft een belangrijke rol gespeeld door stimulerende maatregelen te bieden voor innovatie in en de opschaling van groene waterstof, door te investeren in de ontwikkeling van een landelijk dekkende waterstofinfrastructuur (incl. opslag) en door helder Nederlands en EU-beleid dat veilige toepassing van waterstof garandeert. Waterstof wordt erkend als een essentieel onderdeel van de energietransitie. Mede daardoor is in 2035 de maatschappelijke acceptatie van waterstof hoog.

De Nederlandse maakindustrie heeft een stevige positie in de Nederlandse en wereldwijde markt van elektrolyzers weten op te bouwen, onder andere door hoogwaardige producten op de markt te brengen en door ketensamenwerking te realiseren waarbij vraag en aanbod elkaar goed vinden, zoals via het initiatief "Dutch Electrolyzers". Grote uitdagingen, zoals netcongestie, zijn voor een belangrijk deel opgelost, onder andere door de systeemfunctie van elektrolyzers optimaal te benutten op lokaal, regionaal en nationaal niveau en door o.a. offshore elektrolyse te ontwikkelen, incl. de eerste demonstratieprojecten. De afhankelijkheid van kritieke, schaarse materialen neemt af door de ontwikkeling van alternatieven en maximale recycling, binnen Europa, van het huidige kritieke materialengebruik. Elektrolyzers en groene waterstof zijn onderdeel van verschillende energiehubbs waarbij door lokale opwek van duurzame elektriciteit, elektrolyse en toepassing van de groene elektronen en moleculen en met hulp van slimme energiemangement-systemen optimaal wordt ingespeeld op de variabiliteit van energie uit wind en zon enerzijds en de vraag anderzijds.

Het is voor de gehele sector duidelijk geworden dat gezamenlijke investering in onderzoek en ontwikkeling van nieuwe waterstoftechnologieën, met name op het gebied van materialen en efficiëntie, cruciaal is. Spelers in de markt (overheid, kennisinstituten en bedrijfsleven) werken continu aan het innoveren en opschalen van waterstof. Via continue monitoring en evaluatie is er een goed zicht op de staat van de waterstofsector en de perceptie bij andere stakeholders waardoor snel kan worden ingespeeld op wijzigingen in de markt.

¹ Beleidsmatig wordt uitgegaan van een ambitie van 3-4 GW in 2030 en 6-8 GW in 2032. Voortschrijdend inzicht, gegeven de vertraging die is ontstaan bij de opschaling van elektrolyse, gaan we uit van een meer voorzichtige maar nog steeds ambitieuze schatting van 5 GW in 2035.

5 Doelen

Na het formuleren van de gewenste effectdoelen van deze routekaart, is een eerste afweging gemaakt tussen het draagvlak in de sector hiervoor en het belang van de doelen voor het bereiken van de visie. De set van gekozen doelen vormt de eerste basis voor het kiezen van interventies en projecten. Daarbij streven we naar effectdoelen met een hoog belang voor het bereiken van de visie en die tevens kunnen rekenen op voldoende draagvlak in de sector.

De beoordeling van elk doel is gebaseerd op twee criteria:

1. **Draagvlak in de sector:** de mate waarin betrokken partijen in de sector achter een doel zouden kunnen staan. Dit wordt gemeten op een schaal van 1 (hoge weerstand) tot 10 (volledige commitment).
2. **Belang voor realisatie van de visie:** de mate waarin een doel naar verwachting bijdraagt aan het realiseren van de in de visie geschetste toekomst (ook wel de relevantie). Dit wordt ook gemeten op een schaal van 1 tot 10.

Uit de inventarisatie van de respons bij stakeholders op de voorgestelde oplossingen komt het volgende beeld naar voren:

- **Doelen met een hoog belang en sterk draagvlak:** Deze doelen vormen de kern van het portfolio aan circulaire oplossingen en zullen de meeste aandacht en middelen moeten krijgen:
 - Verdienvermogen maakindustrie (omvang, autonomie en rol in EU)
 - Reduce: stapsgewijze vermindering van gebruik van kritieke grondstoffen (CRM's) van elektrolyzers door innovatie en/of optimalisatie
 - Retain: verlengen dan de operationele levensduur van elektrolyzers
 - Reduce/refuse: minder gebruik van PFAS en inzet op duurzame alternatieven
- **Doelen met een hoog belang maar matig draagvlak:** De volgende doelen die essentieel zijn voor realisatie van de visie maar een matig draagvlak hebben, zullen extra inspanningen vereisen om de sector te mobiliseren en draagvlak te vergroten:
 - Refuse: aandeel van elektrolyzers met problematische CRM's beperken
 - Recycle: stapsgewijs meer secundair materiaal gebruiken in productieprocessen en verhoogde terugwinning van materialen uit afgeschreven elektrolyzers
- **Doelen met een middelmatig belang en breed draagvlak:** Onderstaande ondersteunende doelen hebben een solide basis in de sector en dragen in zekere mate bij aan de visie:
 - Minstens 40% van de jaarlijkse EU-consumptie van CRM's afkomstig uit eigen processing
 - Bijdragen aan NZIA-doel: opschaling productiecapaciteit van groene waterstof
 - Bijdragen aan NZIA-doel: integratie met hernieuwbare energiebronnen
- **Doelen met een lager belang of beperkt draagvlak:** Er zijn ook doelen die óf een relatief lagere relevantie óf minder draagvlak in de sector hebben. Hoewel deze doelen in de toekomst belangrijk kunnen worden, krijgen ze op dit moment een lagere prioriteit in de routekaart:
 - Minstens 25% van de jaarlijkse EU-consumptie van CRM's afkomstig uit recycling
 - Niet meer dan 65% van de jaarlijkse consumptie van CRM's in elke stap van de waardeketen is afkomstig uit één enkel 'derde' land
 - Maatschappelijk draagvlak voor circulaire elektrolyzers in de energietransitie
 - Bijdrage aan NZIA-doel: verbetering van energie-efficiëntie in industriële toepassingen

Door deze strategische keuzes te maken, zorgen we ervoor dat het portfolio van initiatieven/projecten gericht op circulaire elektrolyzers realistisch en effectief is, met een focus op impact én haalbaarheid.

De realisatie van bovenstaande doelen is mede afhankelijk van het mondiale en EU-speelveld (zie PESTEL-analyse). Het productteam heeft naar noodzakelijke randvoorwaarden op EU-niveau gekeken en komt tot de volgende suggesties en aanbevelingen.

Stel een EU-vertegenwoordiger/-gezag aan die zich in grote lijnen bezighoudt met:

- Blokkades in kaart brengen en oplossen: Wat zijn de belangrijkste blokkades die circulaire elektrolyzers hinderen? Hoe krijgen we die weg? Wat moet daarvoor gebeuren?
- Stimulering van circulariteit: Wat is er nodig om de circulaire oplossingen van de routekaart te ondersteunen op Europees niveau? Welke instrumenten kunnen daarvoor worden ingezet?

Enkele belangrijke blokkades:

- Onduidelijkheid over Europese PFAS-wetgeving zorgt ervoor dat er nog te weinig sturende werking van uitgaat, waardoor het reduceren of uitbannen van PFAS onvoldoende krachtig wordt ingezet.
- Er zijn momenteel nog geen harde restricties voor elektrolyzers van buiten Europa. Duidelijkheid over de vereiste mate van productie en certificering binnen Europa helpt om hierop acties te ondernemen. Hiervoor is duidelijk beleid nodig dat nochtans ontbreekt.

Mogelijke stimuleringsmaatregelen:

- Meer samenwerking binnen Europa, bijvoorbeeld via een gezamenlijke onderzoeksagenda, inclusief financiële ondersteuning, waarbij kennis gedeeld wordt, helpt om circulaire oplossingen marktrijp te krijgen.
- Het is van belang om inzichtelijk te krijgen wie wat doet binnen Europa op het terrein van circulaire oplossingen. Welke partij werkt waaraan? Welke onderzoek wordt waar gedaan?
- Beschikbaar stellen van middelen om de keten van laag tot hoog TRL op het terrein van circulaire oplossingen te ondersteunen, inclusief de implementatie daarvan. Gedacht kan worden aan een "Draghi-fonds" à la IRA in de VS via IPCEI en Innovation Fund. Ook herfinanciering van bestaande fondsen is een optie.
- Versterking van de verbinding tussen de Nederlandse hightech-maakindustrie en fabrikanten van elektrolyzers in onze buurlanden België en Duitsland (interregionale krachtenbundeling).



6 Inventarisatie van mogelijke circulaire oplossingen

Tijdens een van de voorbereidende workshops is een inventarisatie gedaan van mogelijke circulaire oplossingen. Hiervoor is de elektrolyser-stack en de balance of plant (BOP) geanalyseerd. Hieronder is het resultaat van de analyse weergegeven. De **vetgedrukte** aspecten hebben volgens de deelnemers aan de workshop momenteel de hoogste relevantie (tussen haakjes het aantal keren dat de optie genoemd is). Deze aspecten zijn vervolgens in de uitwerking gebruikt.

Voor de stack zijn alle componenten systematisch langsgelopen. Bij de BOP is naar de onderdelen gekeken, inclusief eventuele producten die waarde kunnen hebben (zoals restwarmte en zuurstof).

Tabel 2: Inventarisatie van mogelijke circulaire oplossingen elektrolyzers

Stack	Balance of Plant (zonder de stack)
Onderdelen: 1. Eindplaten: 100% hergebruik op de kortere termijn en materiaalrecycling op de lange termijn; 2. Trekstangen: 100% recycling of downcycling; 3. Bipolaire platen: 1. vernikkeld carbonstaal 100% recycling; 2. Ni 100% hergebruik (terug naar stackleverancier); 3. RVS 100% recycling via metaalverwerkers; 4. Ti met Pt coating: nog onduidelijk wat mogelijk is. 4. Kunststofframes: recycling van hoogwaardige kunststoffen (PPS, PSU of PPSU); 5. Afdichtingen: vaak PFAS-houdend. Refuse, ontwikkeling van alternatieven (2x); 6. Stackframe (staal): 100% recycling; 7. Flowfield (Ni of RVS): 100% recycling; 8. Membranen/diafragma: AWE (Zirkonia & polymeer) (1x); 9. Membranen PEM (PFAS en Ir): Refuse pfas en Reduce Iridium (4x); 10. Elektrodes (IP 'coatingpoeder op zinken plaat'): terug naar leverancier (1x);	13. Vermogenselektronica voor efficiëntie waterstofproductie: design for reduce & retain (1x); 14. Redesign vermogenselektronica voor flexibele elektrolyzers (1x); 15. Membraanontwikkeling voor waterzuivering (ontzilting); 16. Warmtewisselaar (hergebruik warmte) (en evt. koppeling voor watervraagstuk) (1x); 17. Al, hele BoP in digital twin omzetten tbv simulatie van operatie en maintenance; 18. Te ontwikkelen strategie operationeel gebruik (design for retain) (2x).
Stack als geheel - Voorkomen van versnelde degradatie: 11. Nog te ontwikkelen operationele strategie: constante basisload om degradatie te voorkomen = Retain; 12. Robuuster maken van de stack: een flexibele stack met minimale degradatie.	

Een van de aannames is dat Europese stackbouwers in de basis hun stack volledig terug zullen willen nemen na gebruik door klanten om de materialen te kunnen verwerken/recyclen. Voor buitenlandse partijen (dus buiten Europa) zullen strikte eisen moeten komen vanuit de EC om de Europese positie te beschermen. Hier ligt ook een mogelijkheid om nieuwe bedrijven op te richten die recycling van waardevolle onderdelen en grondstoffen op zich nemen.

Nadere uitwerking van de tabel:

(1). Eindplaten: 100% hergebruik op de kortere termijn en volledige recycling van het metaal op de langere termijn

100% hergebruik van de eindplaten (daarvoor is een productpaspoort met "certificate of compliance" nodig), zowel eindplaat als materiaal zelf is te hergebruiken. Standdaardisering is noodzakelijk (gaten, dikte, diameter etc). Hergebruik van het materiaal (via omsmelten) is op dit moment het meest aannemelijk. Bij omsmelten moet het product terug de keten in. De eindplaten gaan dan terug naar de leverancier van de stack en door naar de staalproducent/omsmelter.

(2). Trekstangen: 100% recycling of down cycling

100% hergebruik = idem eindplaten, vooral omsmelten i.v.m. veiligheid/materiaal. Of "downcyclen" (andere toepassing) buiten het elektrolysedomein.

(3). Bipolaire platen

- vernikkeld carbonstaal: 100% recycling;
- Ni: 100% hergebruik door stackleverancier;
- RVS: 100% recycling;
- Ti met Pt-coating: verwerkingsmogelijkheden onduidelijk.

(4). Kunststofframes

Recycling van hoogwaardige kunststoffen (PPS, PSU of PPSU). Kunststofframes (hoge temperatuur kunststoffen) zijn na langdurig gebruik niet rechtstreeks te hergebruiken. Ook hiervoor is een productpaspoort nodig. Kan 100% worden omgesmolten en daarna worden hergebruikt. Eventueel is bijmenging mogelijk bij virgin materiaal of een andere markten bedienen.

(5). Afdichtingen: PFAS

Afdichtingen bestaan vaak uit fluorhoudende verbindingen (PFAS). Dit is een ontwerpuitdaging, kan de afdichting tegen waterstof of loog? Dit is onderdeel van refuse. Bij alkalisch en PEM is 100% refuse wenselijk.

(6). Stackframe (staal)

Het metalen frame waar de stack in hangt kan 100% gerecycled worden door een staalverwerker.

(7). Flowfield 100% Ni/RVS hergebruik of recycle

Het flowfield is een soort matras van gevlochten materiaal van Ni of RVS en zorgt voor stroomdoorvoer en druk op het membraan. 100% hergebruik is mogelijk als het een nieuw onderdeel betreft, anders volledig recycleren.

(8). Membranen AWE (Zirkonia & polymeer) (1x)

Voor alkaline (circonica = zirkoniumoxide, zirkonium is niet schaars) geldt dat dit door één fabrikant wordt gemaakt. Na gebruik moet het materiaal terug naar de leverancier; het is onduidelijk wat er dan mee gebeurt.

(9). Membranen PEM (PFAS en Ir) Refuse PFAS en Reduce Iridium (4x)

PEM bevat nu veel PFAS-membranen, waar ook iridium op zit. Uitdaging is om het van elkaar te scheiden. Huidige oplossing is verbranden om iridium terug te winnen. Volgende stap is recycleren door het te scheiden. Doel zou kunnen zijn fluor-vrije membranen en/of het aanbrengen van de (Ir) katalysator op de elektrodes i.p.v. op het membraan. Ook een aandachtspunt is hoe efficiënt met de iridium-load kan worden omgegaan? Een oplossing is een langere levensduur van de stack en zo laag mogelijk iridium-gebruik. Alternatief voor iridium is vooralsnog heel lastig.

(10). Elektrodes (IP 'coatingpoeder op zinken plaat') terug naar leverancier (1x)

Elektrodes gaan na gebruik terug naar de leverancier, eventueel is het materiaal te scheiden, anders omsmelten. Bestaan uit nikkel met een coating, soms PGM-vrij (vaak geheim van de smid). Verwerking: Nikkel wordt gerecycled. Er zit in sommige gevallen o.a. ruthenium (PGM) op: dat wordt teruggewonnen vanwege de waarde van dat materiaal.

De leverancier moet de elektrodes terug leveren aan de stackbouwer en zij moeten bepalen of het terug gaat naar de oorspronkelijke fabrikant. Een strategie kan zijn om te bepalen wat er wel en niet in de elektrodes kan. Hoe kun je een CRM-vrije elektrolyser maken? Strategie is refuse en retain.

Een belangrijk punt is dat er altijd een productpaspoort nodig is of de samenstelling moet op het materiaal gestanst worden zodat herkomst en samenstelling herleidbaar is en daarmee de circulariteitsstrategie wordt ondersteund.

(11) en (12). Voorkomen degradatie

Een sleutelvraag is: hoe voorkom je degradatie? Voor PEM en Alkaline draagt de degradatie van verschillende componenten bij, bv de katalysatoren, coatings en membranen.

Voorkomen van versnelde degradatie kan bijvoorbeeld via:

- Operationele strategie: nog te ontwikkelen. Constante baseload is dan de basis, fluctuaties zorgen voor verhoogde degradatie. Hoe richt je dat systeem in? Een combinatie van geoptimaliseerde materialen en componenten met bijbehorende operationele strategie lijkt het meest waarschijnlijk in deze context;
- Robuuster maken van de elektrolyser – zorgen dat deze flexibeler is met een langere levensduur van de elektrolyser.

Deze vraag komt aan de orde bij de circulaire oplossingen buiten stack.

(13) en (14). Vermogenselektronica voor efficiënte waterstofproductie, design for reduce & retain

- Doel: ideaal/efficiënt inzet van de elektrolyzers, zodat deze zo lang mogelijk mee kan;
- Partijen: toeleveranciers, fabrikanten, ontwerpers, transformer/rectifier;
- Diensten: Toelevering voor operationeel maken van de elektrolyser;
- Circulariteitsdoelen:
 - Retain: Als ontwerp vermogenselektronica de elektrolyser zodanig aanstuurt, dan zal de elektrolyser zo efficiënt mogelijk kunnen draaien en daardoor langer meekunnen;
 - Reduce: Als vermogenselektronica bijdraagt aan zo efficiënt mogelijk gebruik, dan wordt er zo veel mogelijk waterstof geproduceerd. Daardoor zullen er minder elektrolyzers nodig zijn.
- Waardeketen:
 - Softwareontwikkelaar;
 - Hardware ontwikkelaar;
 - Componentlevering;
 - Assemblage;
 - BoP/OEM;
 - → Oplossing voor efficiency.
- Probleembeschrijving: levensduur elektrolyser:
 - Lagere energieverliezen;
 - Geen harmonische stoorsignalen;
 - Geluidloos;
 - Kleinere footprint.
- Voordeel:
 - Producent van waterstof;
 - Producent van OEM/elektrolyser (betere eigenschappen);
 - Rectifier leverancier.

NB: Vermogenselektronica: oplossing kan zijn een effectievere omzetting - Reduce en Retain.

Daarnaast is ReDesign en hergebruik een mogelijkheid. Bij opschalen kunnen verstoringen van het elektriciteitsnet optreden. Oplossingen zijn bijv. Sicarb tech. Dat geeft minder energieverlies.

(15). Membraanontwikkeling voor waterzuivering (ontzilting)

- Doel: Membraandestillatie;
- Partijen: Waternetbeheer, partij die membranen ontwikkelt/produceert om water te zuiveren dat geschikt is voor elektrolyse;
- Diensten: Waterlevering, waterzuivering, levering membranen;
- Circulariteitsdoelen:
 - Refuse: Als er door membraandestillatie meerdere soorten water (bijvoorbeeld zeewater) gebruikt kunnen worden, is er een lagere behoefte aan kostbaar drinkwater;

- Reduce: Er zullen waarschijnlijk altijd elektrolyzers zijn die drinkwaterkwaliteit nodig hebben, maar met membranen wordt het aantal mogelijk minder. Daarnaast: als er met een warmtewisselaar water opnieuw gebruikt kan worden, is er minder water nodig van buitenaf.
- Waardeketen:
 - Zout water;
 - Membraandestillatie (toeleverancier, membraanontwikkeling);
 - Opwaardering/zuivering;
 - BoP.
- Probleembeschrijving: Momenteel zal er veel drinkwater nodig zijn en zijn de schattingen dat er een tekort zal zijn;
- Wie heeft voordeel:
 - BoP;
 - Membraanontwikkelaar, want betere eigenschappen.

(16). Warmtewisselaar (hergebruik warmte, en evt. koppeling met watervraagstuk)

- Partijen: Warmtepartij die de vrijgekomen warmte kan opslaan, warmtegebruikers, proces/systeemverbeteringen;
- Diensten: Ontwerp, warmtelevering;
- Circulariteitsdoelen:
 - Reduce; als een warmtewisselaar water opnieuw gebruikt, dan is er minder water nodig;
 - Recycle; als met een warmtewisselaar water terugvloeit, wordt water hergebruikt i.p.v. geloosd.
- Waardeketen:
 - BoP;
 - Warmtewisselaar;
 - Warmtegebruiker + infra partij;
 - Opwaardering/zuivering water/membranen.
- Probleembeschrijving: Warmteverlies – deze warmte kan gebruikt worden bij het scheiden zout en zoet water. Warmteverlies verminderen via restwarmte van de elektrolyser. Ook is warmtelevering richting derden mogelijk, zoals de gebouwde omgeving. Warmtewisselaar voor systeemintegratie. Combi warmtewisselaarproducent en stackproducent. Voordeel: BoP voor scheiden zout en zoet water (derden, EPC, raffinaderij).

(17). AI: BoP in digital twin zetten t.b.v. simulatie van operatie en maintenance

- Partijen: Digital twin partij die BoP kan simuleren - gebruik van AI om modulair te simuleren (AI, data-partij);
- Diensten: Ontwerp, uitvoering;
- Circulariteitsdoelen - Retain: Met simulatie in AI kunnen onderdelen van de elektrolyser gemonitord worden en op den duur bijvoorbeeld vervangen, zodat de levensduur van de gehele elektrolyser toeneemt;
- Om het systeem te ontwerpen/ te verbeteren, incl. operating system;
- Hoog energieverbruik AI is aandachtspunt;
- Proces modelleren en verbeteringen doorvoeren.

(18). Strategie operationeel gebruik

Zie hiervoor (11).

7 Prioritaire circulaire oplossingen

De inventarisatie van mogelijke circulaire oplossingen heeft geleid tot een keuze waarvan de productgroep denkt dat deze het meest urgent zijn en de grootste bijdrage leveren aan de visie en de gekozen effectdoelen. Er zijn drie **product-marktcombinaties voor circulaire oplossingen** geselecteerd die in de routekaart worden uitgewerkt met als doel deze te ontwikkelen/stimuleren zodat een bijdrage wordt geleverd aan de eerder geformuleerde doelen. Dit is een eerste exercitie om gevoel te krijgen voor de relatie tussen circulariteit en elektrolysetechnologie. In een later stadium kan een gedetailleerde uitwerking plaatsvinden waarin bijvoorbeeld meerdere technologieën kunnen worden meegenomen.

Tabel 3: Prioritaire circulaire oplossingen

Circulaire oplossing
Oplossing A. PFAS: Refuse
Oplossing B. Circulaire oplossing iridium voor PEM: gebruik reduceren, alternatieven ontwikkelen, levensduur verlengen: Reduce & Retain
Oplossing C. Verlenging levensduur PGM-vrije hoog-efficiënte AWE

NB: PGM = *Platinum Group Metals*: een groep van 6 metalen waaronder platina, ruthenium en iridium.

Deze oplossingen zijn uitgewerkt aan de hand van de volgende lijst van vragen en acties:

1. Waaruit bestaat de circulaire oplossing in termen van technologie (producten), betrokken partijen en diensten?
2. Aan welke doelen levert deze circulaire oplossing vooral een bijdrage?
3. Concretiseer de product-markt combinatie: hoe ziet de waardeketen (toeleveranciers, producten, afnemers etc.) van deze oplossing eruit?
4. Voor welk probleem is dit een oplossing en wie heeft er voordeel bij?
5. Benoem specifieke sleutelspelers en actoren in de waardeketen die bij deze circulaire oplossing een rol spelen;
6. Welke andere partijen (kennisinstellingen, financiële instellingen, NGO's, overheid (internationaal, nationaal, provinciaal, regionaal), consumenten) spelen een rol bij het probleem of bij deze circulaire oplossing?
7. Welke keten of ketens (partijen die elkaar samenwerken aan deze oplossing) zie je ontstaan?
8. Vertel in een paar zinnen hoe de markt voor deze circulaire oplossing er uit ziet of kan zien (doelgroep zijn alle bovengenoemde sleutelspelers, marktspelers en actoren).

A. Circulaire oplossing PFAS: strategie refuse

1. Waaruit bestaat de circulaire oplossing in termen van technologie (producten), betrokken partijen en diensten?

De doelstelling op het gebied van circulariteit is het PFAS-vrij maken van elektrolyserstacks of PFAS dusdanig inzetten in elektrolyzers dat dit circulair is. De scope is als volgt:

- a. PEM: PFAS zit of komt voor in afdichtingen en in membranen;
- b. AWE: PFAS komt voor of kan voorkomen in afdichtingen (en niet in de membranen).

Hoe kan de toekomstige markt er uitzien?

- Een verbod op AWE-stacks waar PFAS in zit of een extra belasting of PFAS-houdende AWE-stacks;
- Verbod op PEM-stacks waar PFAS in de afdichtingen zit. Of een extra belasting of PFAS-houdende afdichtingen in PEM-stacks. Daarnaast een voordeel geven aan PEM-stacks die gebruik maken van PFAS-vrije membranen;
- Certificering (bijvoorbeeld een soort CE-certificering) op PFAS-vrije stacks.

Technische uitdagingen:

- Voor afdichtingen is het een technische uitdaging om materialen te ontwikkelen die de juiste eigenschappen bezitten op het gebied van permeabiliteit, elasticiteit, temperatuurbestendigheid, zuur- en/of alkalische bestendigheid en die een vergelijkbare levensduur hebben;
- Vloeigedrag, kruip over tijd;
- Alternatieven in de toeleveringsketen;
- PFAS-vrije afdichtingen maken voor AWE en PEM;
- PFAS-vrije membranen voor PEM maken;
- PFAS veilig maken voor hergebruik (recycling);
- Testprotocollen voor functie en levensduur, bijvoorbeeld door kennisinstituten.

2. Aan welke doelen levert deze circulaire oplossing vooral een bijdrage?

De bijdrage van deze oplossing aan de doelen, zoals genoemd in de inleiding, ligt in het terugdringen van de schadelijke effecten op het ecosysteem van productie en gebruik van PFAS-houdende materialen. Door inzet van alternatieven en hergebruik van wat reeds in omloop is, kan de belasting op de omgeving worden gereduceerd. Daarnaast levert deze oplossing een bijdrage aan het verdienvermogen.

3. Concretiseer de product-marktcombinatie: hoe ziet de waardeketen (toeleveranciers, producten, afnemers etc.) van deze oplossing eruit?

De PFAS-vrije oplossing heeft betrekking op de membranen en de afsluitingen. Het gaat om de producenten van deze afdichtingen en membranen die toeleveren aan elektrolyserfabrikanten. Mogelijk komen er nieuwe fabrikanten van PFAS-vrije producten bij.

4. Voor welk probleem is dit een oplossing en wie heeft er voordeel bij?

Deze oplossing komt tegemoet aan de wensen om de productie en het gebruik van PFAS terug te dringen vanwege de schadelijke effecten ervan op het ecosysteem. De maatschappij als geheel heeft voordeel van deze oplossing. Ook fabrikanten van elektrolyzers zullen uiteindelijk voordeel hebben van deze oplossing omdat regelgeving in voorbereiding is die mogelijk de toepassing van PFAS kan verbieden. Dit is weliswaar momenteel nog onzeker, maar niet ondenkbaar.

5. Benoem enkele specifieke sleutelspelers en actoren in de waardeketen voor deze circulaire oplossing.

Tabel 4: Sleutelspelers en actoren PFAS-vrij

Sleutelspelers in de waardeketen "PFAS-vrij"	Afdichtingen (PEM en AWE)	Membranen (PEM)
Leveranciers van afdichtingen	x	x
Leveranciers van membraancomponenten		x
Dupont		x
Stackbouwer	x	x
Stackrecycler	x	x
Ontwerper	x	x
Kennisinstellingen (universiteiten, instituten)	x	x
Eriks	x	
Angst + Pfister	x	
Parker	x	
VDL	x	
Battolyser	x	
Bosch	x	x
John Cockerill	x	x
Hydron, Schaeffler	x	x
TK Nucera	x	x
NEL	x	x
Politiek en beleid (Tweede Kamer), EU	x	x
Teijin	x	x

Bovenstaande tabel heeft niet de intentie 100% volledig te zijn maar schetst een beeld van mogelijke betrokkenen bij dit onderwerp.

6. Welke andere partijen van kennisinstellingen, financiële instellingen/sector, NGO's, overheid (internationaal, nationaal, provinciaal, regionaal), consumenten spelen een rol bij het probleem of bij deze circulaire oplossing?

Voor deze oplossing is wet- en regelgeving vanuit de EC en NL van belang. Maar ook andere organisaties, zoals RIVM, materiaaldeskundigen, toxicologen, kennisinstellingen en universiteiten (TU/e, TUD, UT etc), certificerende instellingen, NEN, TNO, Fraunhofer spelen een belangrijke rol.

7. Welke keten of ketens (partijen die elkaar samenwerken aan deze oplossing) zie je ontstaan?

We zien twee mogelijke samenwerkingsverbanden:

- Een samenwerkingsverband van een technische universiteit/kennisinstelling, een producent van afdichtingen en een stackfabrikant (AWE en/of PEM);
- Een samenwerkingsverband is een technische universiteit/kennisinstelling, PEM-membraanproducent en een toeleverancier van PEM-kunststofmateriaal.

8. Vertel in een paar zinnen hoe de markt voor deze circulaire oplossing er uit ziet of kan zien (doelgroep zijn alle bovengenoemde sleutelspelers, marktspelers en actoren)

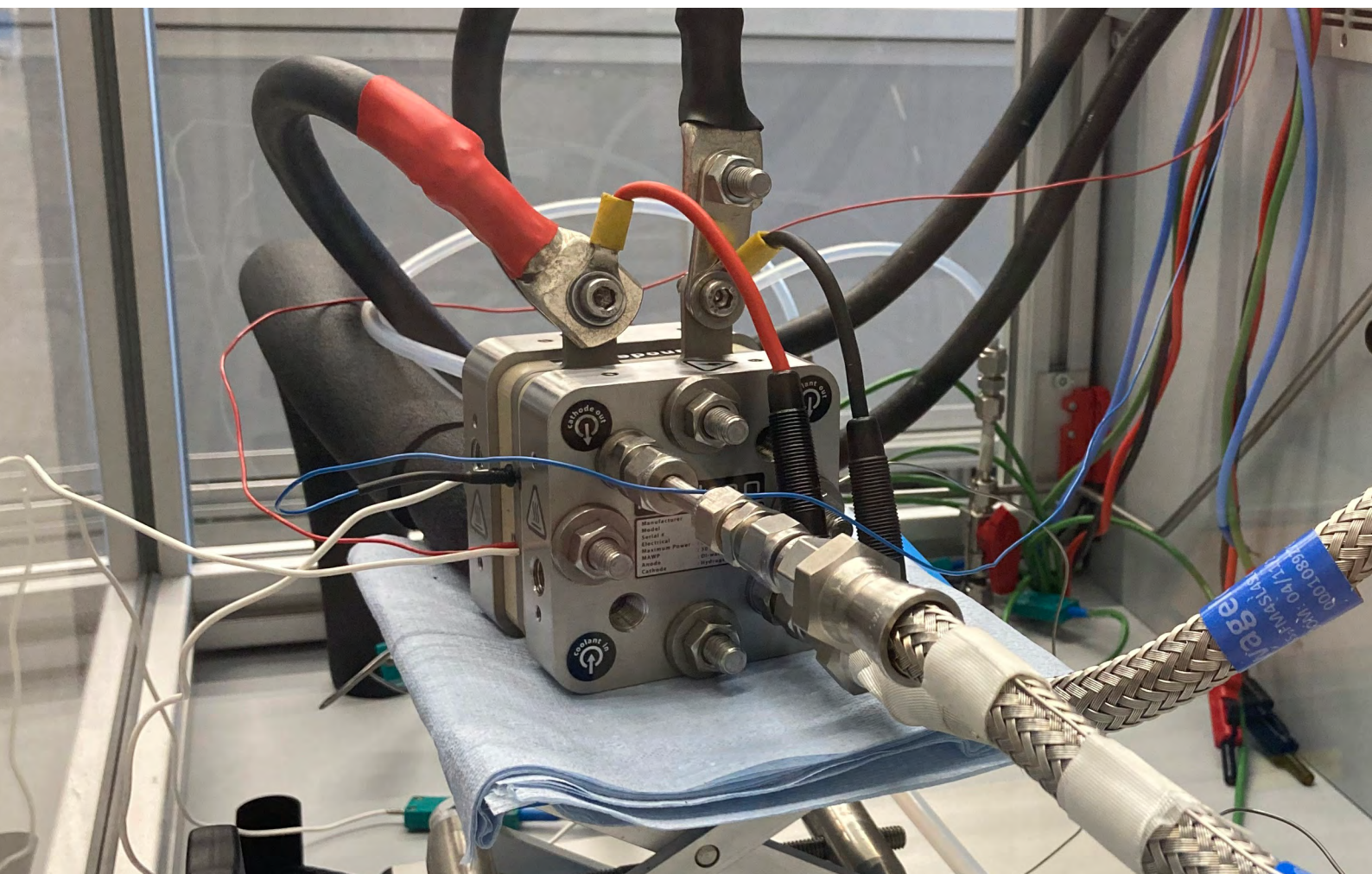
Het is aannemelijk dat er in de toekomst restricties komen voor de productie en toepassing van PFAS vanwege de milieuschade die het kan veroorzaken. PFAS is momenteel een belangrijk onderdeel van diverse elektrolyser-technologieën, zowel voor de toepassing in afdichtingen alsmede toegepast op membranen (o.a. bij de PEM-technologie). In de toekomst zal het nodig zijn om PFAS te vervangen door PFAS-vrije varianten. De huidige fabrikanten zullen op zoek moeten gaan naar alternatieven die dezelfde prestaties kunnen leveren qua functionaliteit, veiligheid en kosten maar zonder de negatieve impact op de omgeving. Door intensieve samenwerking tussen fabrikanten en kennisinstituten op dit terrein zullen op termijn alternatieven beschikbaar moeten komen die aan de eisen van PFAS-vrije afdichtingen en membranen voldoen. Vanwege mogelijk Europees en nationaal beleid op dit terrein is actie op de korte tot middellange termijn noodzakelijk, zeker tegen het licht dat ontwikkeling van alternatieven enige tijd vergt.

Waar staat de sector nu (marktfase)?

De verwachting is dat het draagvlak voor de doelen aanwezig is en met name groot daar waar het raakt aan het verdienvermogen van de maakindustrie. Het gaat dan om de omvang van de sector,

Op dit moment zijn er nog weinig aanbieders en is er nog weinig vraag, de opschaling van de markt moet nog plaatsvinden. Specifiek voor PFAS-vrij maken van elektrolyzers is er bij enkele bedrijven wel interesse, maar een groot deel van de afnemers is hier nog niet mee bezig (en waarschijnlijk ook nog niet met circulariteit in het algemeen).

- Afbouwen toepassing van PFAS;
- Identificeren/ontwikkelen en valideren van alternatieven voor PFAS;
- Concrete visie PFAS met verschillende stakeholders, zoek verbinding met verwante producten met een soortgelijke visie, technische functie kan wel variëren per product, verdieping op dit aspect van visie routekaart;
- Communicatie over wetgeving (benoemen noodzaak voor verandering).



B. Circulaire oplossing iridium voor PEM: gebruik reduceren, alternatieven ontwikkelen, levensduur verlengen

1. Waaruit bestaat de circulaire oplossing in termen van technologie (producten), betrokken partijen en diensten?

Huidige PEM-elektrolyzers, die naar verwachting een lange levensduur en hoge efficiëntie hebben, behoeven een hoge iridium-load. Elektrolyzers met een lage ir-load hebben een lagere efficiëntie en/of degraderen sneller. De uitdaging is om een PEM-elektrolyser te ontwikkelen met een fors verlaagde ir-load en een lange levensduur bij een stabiel, hoog rendement. Ook het vinden van alternatieven voor iridium is van belang. Hiervoor is het volgende nodig:

- Optimalisatie van de componenten (elektrodeconstructuur en dunnefilm-coatings);
- Optimalisatie van de operationele strategie voor verschillende use-cases (turndown ratio, on/off-effecten, dynamische operatie);
- Fundamentele kennis over bovenstaande processen en invloeden;
- Ontwikkelen van alternatieven voor iridium.

Relevante betrokkenen bij deze oplossing zijn stackfabrikanten, technologieleveranciers (hightech-industrie) en kennisinstellingen.

NB: Er zijn ook andere ontwikkelingen die het gebruik van iridium verder kunnen beperken. Zo kan de elektrolyser nadat deze geheel end-of-life is, gerecycled worden, waardoor het iridium teruggewonnen kan worden. Hierin schuilt nog wel een technologische uitdaging om de materialen goed te kunnen scheiden en, omdat er nog weinig elektrolyzers op de markt zijn, voldoende materiaal te hebben om te recyclen.

2. Aan welke doelen levert deze circulaire oplossing vooral een bijdrage?

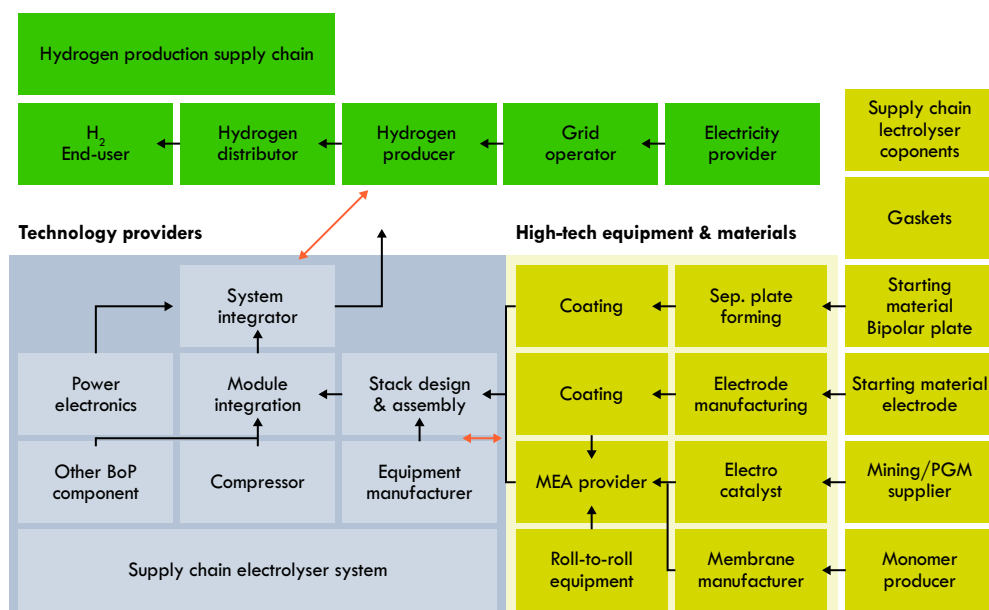
Met deze oplossing worden alle drie doelen uit de inleiding nagestreefd:

- Verbeteren van het verdienvermogen van de Nederlandse maakindustrie;
- Verminderen van de afhankelijkheid van schaarse grondstoffen;
- Verminderen van de milieubelasting.

3. Concretiseer de product-markt combinatie: hoe ziet de waardeketen (toeleveranciers, producten, afnemers etc.) van deze oplossing eruit?

De focus qua innovatie ligt op de ontwikkelaars die onder het blok "High-tech equipment & materials" in het volgende plaatje voor de waardeketen vallen. Zij zullen de benodigde technologie en apparatuur moeten ontwikkelen om een lagere iridium-load te realiseren die efficiënt is en een lange levensduur heeft. Zij kopen de benodigde materialen in en leveren die aan stackbouwers.

Figuur 3: Industrial value chains of (Green) hydrogen



4. **Voor welk probleem is dit een oplossing en wie heeft er voordeel bij?**

Het voordeel van deze ontwikkelingen is dat een belangrijke en potentieel grote hindernis voor de opschaling van PEM-technologie wordt weggenomen, namelijk de beschikbaarheid en kosten van iridium. In wezen komt de oplossing de hele energietransitie ten goede en daarmee dient dit een collectief belang. PEM-technologie is van belang omdat het voordelen heeft t.o.v. gangbare alternatieven wat betreft flexibiliteit, footprint (qua benodigd grondoppervlak) etc. Belanghebbenden zijn:

- Waterstofproducenten: Omdat de nieuwe elektrolyzers een langere levensduur hebben, kunnen zij langer met hun elektrolyzers werken waardoor vervanging later aan de orde is. Mogelijk daalt ook de kostprijs van elektrolyzers omdat zo min mogelijk van het dure en schaarse materiaal iridium is toegepast;
- Producenten van componenten en stacks: Zij hebben een economisch voordeel omdat de waarde van hun propositie toeneemt. De levelised-cost-of-hydrogen wordt lager omdat CAPEX (iridium) en OPEX (onderhoud) afneemt en de levensduur toeneemt. Toeleverende hightech-equipment-bedrijven kunnen een positie opbouwen als technologieleverancier voor productielijnen.

5. **Benoem specifieke sleutelspelers en actoren in de waardeketen die bij deze circulaire oplossing een rol spelen.**

In onderstaande tabel is een selectie van relevante spelers weergegeven.

Materialen	Equipment en Componenten	Sleutelspelers stack/OEMs	EPC Balance of Plant	Eind-gebruikers	Financiële instellingen	Kennis-instelling
Leveranciers precursors	Componenten	Schaeffler	Worley	Shell	InvestNL	TNO
	Materialen	Bosch	Technip	PosHydon	Banken	DIFFER
	Toeleveranciers		PlugPower	Industrie-spelers		universiteiten
Air Liquide	Tier 2/3		NProxx			
Johnson Matthey			Bronkhorst			
	Magneto		Prodrive			
	SparkNano		Vonk			
	SALD		Yokogawa			
	Powall					
	VSParticle					
	Ionbond					
	Hauser					
	Magneto					

Tabel 5: Sleutelspelers en actoren iridium voor PEM

6. **Welke andere partijen van kennisinstellingen, financiële instellingen/sector, NGO's, overheid (internationaal, nationaal, provinciaal, regionaal), consumenten spelen een rol bij het probleem of bij deze circulaire oplossing?**

- Testen en validatie is belangrijk om versneld de 'leercurve' te kunnen doorlopen. De levensduur kan bepaald worden op basis van "accelerated aging protocollen" via de inzet en betrokkenheid van onafhankelijke kennisinstellingen/instituten;
- Sector en overheid moeten op tijd eisen en/of standaarden introduceren/aankondigen om druk op de markt uit te oefenen om deze nieuwe materialen toe te passen;
- De Nederlandse overheid (ministeries van KGG, EZ, BZ, I&W) kan schone toepassing en circulariteit stimuleren. Ook leveringszekerheid in een internationaal speelveld (EZ en BZ) en bij diplomatieke overeenkomsten is een relevant thema;
- Ministerie van EZ, KGG, OCW en NWO kunnen onderzoek alternatieven stimuleren en kennisinstellingen staan aan de lat voor de uitvoering daarvan;
- Financiële instellingen kunnen bijvoorbeeld iets doen aan risico's bij iridium-schaarste of financiële voordelen (lagere risico-inschatting – lagere rente p kapitaal) toekennen als de afhankelijkheid door deze oplossing afneemt.

7. Welke keten of ketens (partijen die elkaar samenwerken aan deze oplossing) zie je ontstaan?

De wisselwerking tussen equipment-ontwikkelaars enerzijds en component- en stackontwikkelaars anderzijds is cruciaal. Prototyping en testen in de praktijk, met een gezamenlijke routekaart gericht op technologische prestaties (levensduur en efficiency), kostenreductie en materiaalreductie, moet het ontwikkelproces voor alle partijen versnellen. Eindgebruikers zijn cruciaal voor het eigenaarschap m.b.t. specifieke use-cases. Spelers in deze keten zijn:

- Fabrikanten van elektrolyser-onderdelen en -stacks;
- Europese en nationale overheden die circulariteit stimuleert/ondersteunt/verplicht;
- Technologieontwikkelaars en technologieleveranciers om iridiumgebruik te verminderen (samenwerking tussen fabrikant en technologieleverancier);
- Eindgebruikers die investeren in elektrolyse als er weinig iridium in zit (samenwerking tussen eindgebruiker en fabrikant);
- Financiers: hanteren van een lagere rente of risicoprofiel bij de financiering (samenwerking tussen financiers en fabrikanten);
- Recyclers: van belang om te weten onder welke voorwaarden de membranen of elektrodes met Ir-coating zijn geleverd. Moeten deze terug naar de fabrikant? Het is belangrijk om zeker te stellen dat iridium in Europa blijft (samenwerking tussen fabrikant, eindgebruiker en recycler).

8. Vertel in een paar zinnen hoe de markt voor deze circulaire oplossing er uit ziet of kan zien (doelgroep zijn alle bovengenoemde sleutelspelers, marktspelers en actoren).

Deze circulaire oplossing is essentieel voor de langetermijntoekomst van PEM-technologie. Het is met name zaak om ontwikkelingen te versnellen en tijdig een positie te hepen creëren voor de Europese en de Nederlandse maakindustrie. Met de ontwikkeling van technologieleveranciers (Nederlandse bedrijven die gespecialiseerd zijn in dunne film-technologie) wordt de verbinding gelegd met stack-en componentontwikkelaars. Deze partijen nemen de Nederlandse technologie af. Hierdoor kan er op termijn een meer concurrerende PEM-elektrolyser op de (internationale) markt komen. Tegelijkertijd hebben stackbouwers de elektrolyser zodanig ontworpen dat onderdelen gemakkelijk vervangbaar zijn. Bovendien hebben leveranciers van powerelektronica en besturingssystemen hardware en strategieën ontworpen om de levensduur van deze ultra-low-iridium-PEM-technologie te maximaliseren. Hierdoor bespaart de waterstofproducent op kosten. Bij het ontwerp van de elektrode en membraan wordt op termijn rekening gehouden met end-of-life-fase. De dunne film is makkelijk te recyclen. Het iridium is dan nog zo waardevol dat er een sluitende business case is voor recycling. Recycling wordt ook gestimuleerd met beleid vanuit de overheid. Tevens ontstaat daarmee een Nederlandse/Europese voorraad aan iridium die helpt om onze afhankelijkheid te reduceren.

C. Circulaire oplossing verlenging levensduur: PGM-vrije hoog-efficiënte AWE

1. Waaruit bestaat de circulaire oplossing in termen van technologie (producten), betrokken partijen en diensten?

Huidige AWE-elektrolyzers, die een lange levensduur en hoge efficiëntie hebben, gebruiken PGMs (Platinum Group Metals). PGM-vrije AWE-elektrolyzers hebben een lagere efficiëntie en/of degraderen sneller. Oplossingen moeten gevonden worden om zonder toepassing van PGM's een stabiel rendement te bereiken op basis van:

- Optimalisatie van componenten (substraatgeometrie, substraatmateriaal en coatings);
- Voorbehandeling van substraten met oppervlakte-activatie;
- Coatingapplicatie;
- Optimalisatie van de operationele strategie voor verschillende use-cases (turndown-ratio, on/off, dynamische operatie);
- Verdiepende, fundamentele kennis van degradatiemechanismen en strategieën om degradatie te reduceren of voorkomen.

2. Aan welke doelen levert deze circulaire oplossing vooral een bijdrage?

Deze oplossing levert een bijdrage aan allee doelen:

- PGM-vrij houdt in dat er geen gebruikt wordt gemaakt van ruthenium, rhodium, palladium, osmium, iridium en platina. Hierbij is iridium het kostbaarste en tevens minst beschikbare metaal. Wereldwijd wordt er ieder jaar minder dan 8000 kg iridium gedolven. De afhankelijkheid van schaarse grondstoffen wordt verminderd vanwege bredere leveringsmogelijkheden (diversificatie) en er zijn geen schaarsteproblemen (risico's) bij PGM-vrije grondstoffen, zoals ijzererts en nikkelerts;
- Vermindering van de milieubelasting via recycling en/of re-use van PGM-vrije elektrodes: dit is schrootijzer of afvalnikkel dat gerecycled kan worden. Zelfs volledig hergebruik (zonder omsmelten) is mogelijk bij PGM-vrije elektrodes;
- Bevordering van het verdienvermogen: de kosten voor PGM-vrij elektrodes zijn significant lager.

3. Concretiseer de product-marktcombinatie: hoe ziet de waardeketen (toeleveranciers, producten, afnemers etc.) van deze oplossing eruit?

In de toeleveringsketen van PGM-vrije elektrodes is het belangrijk te begrijpen wat de afzonderlijke onderdelen zijn, te weten: substraatmateriaal, substraatvoorbehandeling, vorm en geometrie van substraat, coating, coatingapplicatiemethoden en activatie van de elektrode. Ook is het begrijpen van de toeleverketen en componenten die (nog) deels PGM-componenten bevatten relevant. Hierbij is het belangrijk om inzicht te krijgen wat er gedaan moet worden om de PGM-houdende elektroden te hergebruiken.

4. Voor welk probleem is dit een oplossing en wie heeft er voordeel bij?

De aanschafkosten van een PGM-vrije elektrolyserstack is zeer waarschijnlijk lager dan de huidige PGM-houdende stacks. Door deze lagere aanschafkosten wordt het economisch aantrekkelijker om AWE-elektrolyzers te installeren.

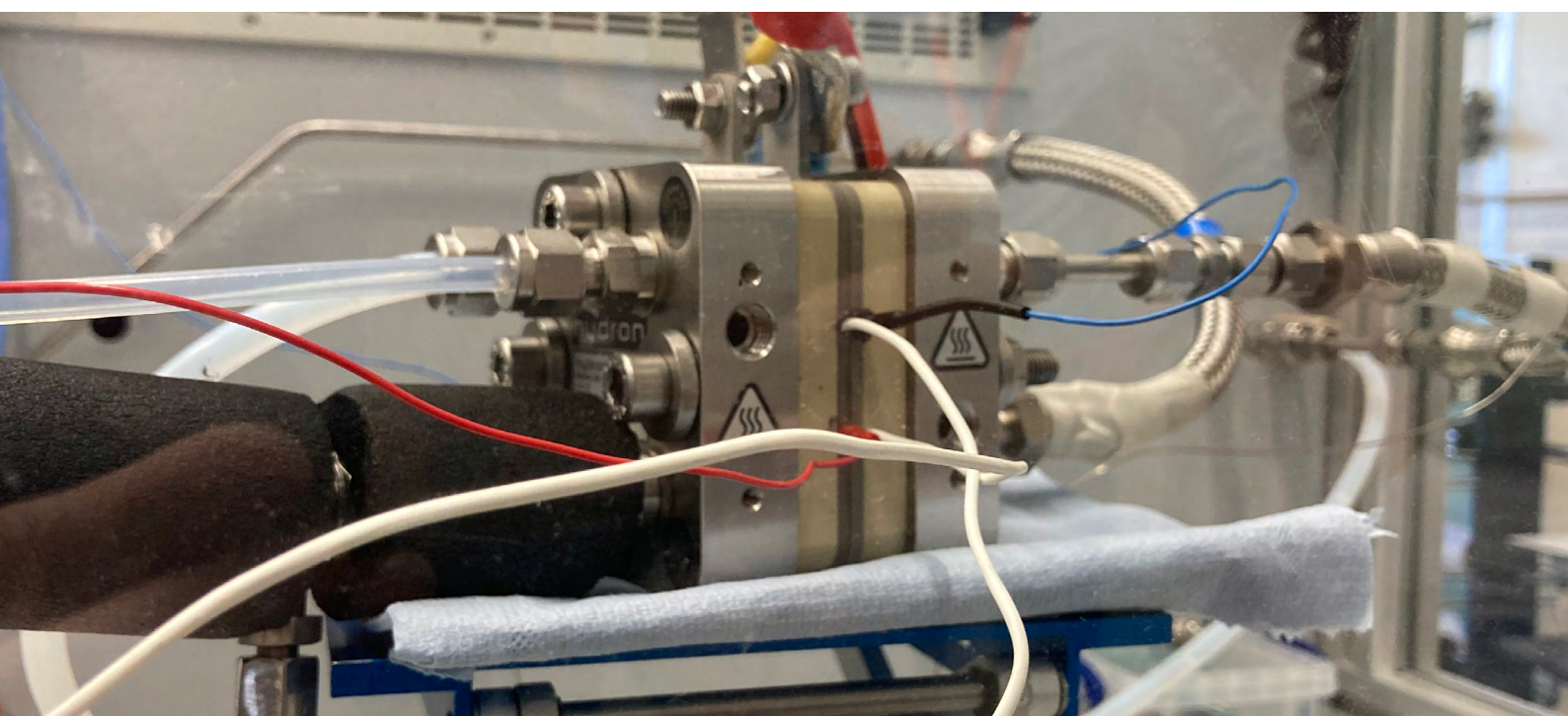
5. Benoem specifieke sleutelspelers en actoren in de waardeketen die bij deze circulaire oplossing een rol spelen.

Tabel 6: Sleutelspelers en actoren PGM-vrije hoog efficiënte AWE

Producenten	Toeleveranciers	SLD	Membraan- producenten	Water (behandeling)	Elektrode- producenten
AWE-elektrolyzers VOL HS (Siemens) Nellayer ZEE/Avent/Air Liquide Ook Partijen als VDL HS, Fluidwell	Bronkhorst Kronos Teesing	Spark Nano VS Particle Kalpana Systems SALD	AGFA België Fujifilm	Hatenboer Nijhuis Water Technology Pure Watergroup H2O Systems Holland RN Solutions	Veco Magneto DeNora (PGM- houdend) Jolt
Katalysatoren	Industrieclusters & 6e cluster afnemers H2	Circulair & benutten waterstof producten en reststromen	Financiers	Net-beheerders	Verenigings- netwerken
Umicore? C2CAT? Powall?	Shell HyCC	EPC's Technip	Banken Invest NL ROM's Investerders VC's	TenneT Liander Stedin Enexis	RSD - Community zoals TNO, GVNl, Next Gen - High Tech
Overheid	EU	OEM-ers	Sleutelspelers	Doelgroepen	Systemintegrators
RVO KGG/EZ	(beleid)	Battolyser, VDL, Nucera John Cockerill Etc.	werkgroep "elektrolyzers" EMP-NL NWP-productie- werkgroep NWBA	Productieclusters land Productieclusters maritiem	Adsensys HyCC

6. Welke andere partijen van kennisinstellingen, financiële instellingen/sector, NGO's, overheid (internationaal, nationaal, provinciaal, regionaal) en consumenten spelen een rol bij het probleem of bij deze circulaire oplossing?

Zie de tabel onder punt 5.



7. **Welke keten of ketens (partijen die elkaar samenwerken aan deze oplossing) zie je ontstaan?**
Een keten van fabrikanten van AWE-elektrolyzers, materiaalleveranciers, afnemers en kennisinstellingen (voor onderzoek naar alternatieven) lijkt het meest gepast. Hierbij is de wens dat de industrie (fabrikanten en leveranciers) nauw betrokken blijven om zo ook inherent de industriële relevantie te waarborgen.

8. **Vertel in een paar zinnen hoe de markt voor deze circulaire oplossing er uit ziet of kan zien (doelgroep zijn alle bovengenoemde sleutelspelers, marktspelers en actoren).**
Wanneer het lukt om efficiënte PGM-vrije AWE-elektrolyzers te ontwikkelen, wordt de afhankelijkheid van landen waar deze PGM's vandaan komen sterk gereduceerd. Ook kan daarmee potentiële schaarste in de toekomst worden voorkomen/vermeden. Indien geschikte hoog-efficiënte alternatieven worden gevonden die ruim voorradig zijn en die een lagere kostprijs hebben, kan daarmee ook de kostprijs van AWE-elektrolyzers worden verlaagd met als gevolg een lagere kostprijs van de geproduceerde groene waterstof. Ook leidt dit mogelijk tot lagere capex-kosten van elektrolyzers. Deze combinatie van effecten heeft een positieve uitwerking op de energietransitie.



8 Gekozen interventies

Interventies zijn gerichte initiatieven die vanuit het perspectief van deze concept-routekaart nodig zijn om de markt, relevante ketens en individuele organisaties te informeren, te stimuleren en te activeren richting de beoogde doelen en missie/visie. Na het formuleren van interventies en bijbehorende prestatiedoelen volgt dan een vertaalslag naar concrete projecten.

Marktinterventies

De drie prioritaire circulaire oplossingen zijn getoetst met spelers in de sector. Op basis van het zogenaamde “transmission-raamwerk²” dat beschrijft welke fasering te onderkennen is in de transitie van de huidige naar de toekomstige situatie, is gekeken naar de marktfase waarin deze zich bevinden en welke gewenste marktontwikkeling realistisch is in de periode tot 2030. Vervolgens zijn circa 40 interventies geformuleerd om de marktontwikkeling te stimuleren langs verschillende sleutelprocessen voor innovatie.

Samengevat heeft de werkgroep het beeld dat alle drie prioritaire oplossingen zich in de beginfasen van duurzame marktontwikkeling bevinden. Beelden van respondenten variëren tussen marktfase 0, waarbij de urgentie nog niet echt gevoeld wordt en het eind van fase 1 waarin er in beperkte mate geëxperimenteerd wordt door sommige koplopers met toeleveranciers. Als totaalbeeld is de schaal van de markt nog klein, is er beperkte vraag, is de circulaire technologie onvoldoende ontwikkeld en zijn er typische uitdagingen rond de ontwikkeling van innovatieve producten.

De werkgroep geeft daarom de hoogste prioriteit aan sleutelprocessen die zorgen voor het verhogen van de urgentie, het duiden van het probleem en het ontwikkelen/verspreiden van kennis. Daar zijn middelen voor nodig en een zekere mate van sectorcoördinatie om synergie in de sector en op de grotere EU-schaal te stimuleren. De gekozen marktinterventies zijn op hoofdlijnen gegroepeerd weergegeven volgens 5 sleutelprocessen.

Prioritering en probleemoplossing

- Onderzoek naar mogelijkheden om de toepassing van PFAS, iridium en andere PGM's stapsgewijs af te bouwen of op termijn zelfs geheel te vervangen en duurzame, circulaire alternatieven hiervoor te ontwikkelen;
- Het gezamenlijk met stakeholders breed communiceren van de noodzaak en urgentie om alternatieven te ontwikkelen en de afhankelijkheid van schaarse grondstoffen af te bouwen, eventueel vast te leggen in nationale en, bij voorkeur, Europese wet- en regelgeving;
- Continu communiceren (actieve kennisdeling en -verspreiding) over oplossingsrichtingen en voortgang die in het onderzoek wordt geboekt op het terrein van elektrolyzers en soortgelijke producten zodat duidelijk wordt dat er alternatieven zijn. AI (kunstmatige intelligentie) kan hierbij een handig hulpmiddel zijn, bijvoorbeeld om wereldwijde patenten in kaart te brengen en de zoektocht naar alternatieven te faciliteren;
- Communiceren dat de alternatieven niet persé kostenverhogend zijn, maar ook kunnen bijdragen aan kostenverlaging doordat ze goedkoper zijn, er minder afhankelijkheid van een beperkt aantal grondstoffenleveranciers is, het de ontwikkeling van een 'eigen' maakindustrie faciliteert en wellicht kan leiden tot betere prestaties in termen van efficiëntie, levensduur en flexibele inzet.

Kennisontwikkeling en -verspreiding

- Opstellen van een brede onderzoeksagenda, gericht op alternatieven voor PFAS en PGM's, zoals iridium;
- Brede kennisontwikkeling en actieve verspreiding van resultaten, gericht op PFAS-vrije elektrolyzers en gebruik van minder schaarse grondstoffen (PGM's, iridium), inclusief analyse van oplossingen bij producten die met soortgelijke uitdagingen kampen, zoals PEM-brandstofcellen. Ook het ontwikkelen van geschikte test- en meetprotocollen en (Europese) normontwikkeling is hier onderdeel van;

² zie: Lucas Simons, André Nijhof, Matthijs Janssen, Transmission: a mission-driven transition approach for managing complex change processes, 2023

- Opbouwen van test- en demonstratiefaciliteiten (inclusief living labs, pilots, demo's) voor alternatieven, waarmee prestaties kunnen worden onderzocht en bepaald, gericht op component- en systeemniveau.

Ondernemerschap en marktontwikkeling

- Opbouwen van stimulerende maatregelen gericht op de ontwikkeling van alternatieven die in de praktijk toegepast kunnen worden (zoals subsidies, financiële waardering van alternatieven, voordelen bij tenders van projecten, premium bij aanbesteding etc) en, op termijn, opbouwen van verplichtingen/verboden (of normering) voor schadelijke materialen (PFAS) of het gebruik van een maximaal aandeel schaarse grondstoffen (of zelfs een verbod op schaarse grondstoffen);
- Opbouwen van duidelijke en transparante communicatie over de gebruikte materialen zodat duidelijk is wat er toegepast is in specifieke producten;
- Ondersteuning voor afbouw (huidige) generatie elektrolyzers die nog geen alternatieven bevatten via bijvoorbeeld een risicofonds;
- Op termijn weren van alle elektrolyzers van buiten de EU die niet aan Europese eisen voldoen.

Mobilisatie van middelen

NB: een deel van de maatregelen is al in de secties hiervoor genoemd.

- Subsidies die de ontwikkeling van alternatieven ondersteunt, inclusief test-, pilot- en demofaciliteiten, en financiële voordelen (premium, hogere vergoeding) voor technologie en projecten waarbij alternatieven zijn toegepast;
- Via challenges een bredere groep aan partijen/deskundigen laten meedenken/meedoen om oplossingen versneld beschikbaar te krijgen.

Sectororganisatie & coördinatie

- Het is van belang om een breed gedragen ketenverantwoordelijkheid te organiseren, zodat alle spelers in de keten zich verantwoordelijk voelen voor het realiseren van de circulaire doelen. Hierbij kan het helpen om een ketenbrede koplopersgroep te vormen die met circulaire elektrolyzers aan de slag gaat. De ketenbrede aanpak met de nadruk op "keten" (in tegenstelling tot een koplopersgroep van producenten) is van belang om te voorkomen dat er een concurrentievoordeel voor individuele partijen ontstaat;
- Vanuit de sector is ook brede communicatie wenselijk om de urgentie van de circulaire oplossingen te laten beklijven, bijvoorbeeld via een duidelijk visiedocument met de bijbehorende roadmap. Naast communicatie is ook een lobby interessant voor de toepassing van de circulaire oplossingen zodat voor alle stakeholders duidelijk is wat de doelen en aanpak zijn.

Welke spelers bij deze marktinterventies vooral het voortouw moeten of willen innemen is uitwerking in een aparte stakeholder-engagementaanpak.

Keteninterventies

Er is gekeken welke interventies de vorming van nieuwe ketensamenwerking zouden kunnen activeren. Het productteam heeft tevens gekeken naar interventies die bedoeld zijn om vernieuwde of nieuwe ketensamenwerking voor (delen van) een circulaire oplossing te stimuleren. Denk hierbij aan samenwerking tussen koplopers en toeleveranciers c.q. afnemers. Een ander voorbeeld is samenwerking in een regionale setting of samenwerking om bepaalde technologieën te ontwikkelen of op te schalen. Vanuit de drie prioritaire circulaire oplossingen zijn de volgende keteninitiatieven gedefinieerd. Hiervoor is het van belang om te toetsen of deze initiatieven al door bestaande activiteiten worden gedekt. Deze analyse wordt separaat uitgevoerd.

A. Ketenproject circulaire oplossing A. PFAS-vrije elektrolyzers (strategie Refuse)

Titel: Visie PFAS-vrije elektrolyzers (kopgroep)

Doel:

Dit project heeft als doel het ontwikkelen van een visie en een tijdlijn hoe stapsgewijs de sector toewerkt naar elektrolyzers zonder PFAS. De marktpartijen committeren zich aan het plan, maar vragen (indien nodig) daarmee ook iets van de overheid om het mogelijk te maken. Alternatief is dat zij de visie samen met de overheid onderschrijven waarbij beiden zich committeren en beloven daarin stappen te zetten.

Werkprogramma:

Fase 1: Vormen van een koplopersgroep voor visievorming.

Hierbij worden kernpartijen uitgenodigd en gecommitteerd voor deelname aan de visievorming: elektrolyserfabrikanten, toeleveranciers, TNO, TU/e en het Ministerie van KGG. Een voorbereidend document wordt opgesteld met belangrijkste thema's voor de sessies.

Duur: 6 weken.

Fase 2: Organiseren van 3 sessies om te komen tot een visie.

Drie halfdagse werksessies met tussenpozen van 3-4 weken:

- Sessie 1: Inventarisatie huidige situatie en gewenste eindsituatie;
- Sessie 2: Identificeren tussenstappen en randvoorwaarden;
- Sessie 3: Concretiseren tijdlijn en ieders rol en bijdrage.

Tussen de sessies wordt een conceptversie van de visie opgesteld en aangescherpt.

Duur: 3 maanden.

Fase 3: Tekenmoment voor de visie.

Organiseren van officieel tekenmoment met alle betrokken partijen, inclusief perspresentatie.

Duur: 2 weken voorbereiding.

Resultaten:

- Gedragen visiedocument met concrete tijdlijn;
- Commitment van alle betrokken partijen;
- Publieke bekendheid door perspresentatie.

Tijdlijn:

Het traject heeft een doorlooptijd van 6 maanden.

Maand 1-2: Fase 1: Opstarten

Maand 2-5: Fase 2: Visievorming

Maand 5-6: Fase 3: Vastlegging inclusief tekenmoment

Budget:

NTB, te gebruiken voor:

- Zaalhuur en catering 4 bijeenkomsten;
- Projectondersteuning voor verslaglegging en opstellen visiedocument;
- Reiskosten en uren deelnemers;
- Organisatie tekenmoment.

Projectleider en deelnemers:

Projectleider: n.n.b.

Deelnemers: Vertegenwoordigers van elektrolyserfabrikanten, toeleveranciers/componenten, TU Delft en Ministerie van KGG

B. Ketenproject circulaire oplossing B. Low iridium PEM met hoge efficiëntie

NB: Dit voorstel past waarschijnlijk in hoge mate in het huidige HyPRO-project dat onderdeel is van het R&D-programma van GroenvermogenNL en projecten binnen het NXTGEN Hightech groeifonds. Dit wordt uitgezocht, ook welke activiteiten mogelijk niet (voldoende) in genoemde projecten afgedekt zijn.

Titel: Innovate4LowIr (of I4LI of LowIR)

Doel:

Dit project heeft als doel het ontwikkelen en opschalen van fabricagetechnologie voor het aanbrengen van significant dunnere concentraties iridium die tot vergelijkbare prestaties qua efficiëntie en levensduur leiden als de huidige generatie PEM-elektrolyzers.

Werkprogramma:

Fase 1: ontwikkelen van de fabricagetechnologie (belangrijke spelers: fabrikanten en kennisinstellingen). De basis hiervoor is een innovatieprogramma, gericht op het ontwikkelen van de benodigde fabricagetechnologie waarmee veel lagere hoeveelheden iridium kunnen worden toegepast, tegen vergelijkbare prestaties zoals efficiëntie en levensduur. Hierbij zijn er twee opties (nog vast te stellen):

- Als er voldoende spelers op de markt zijn die een ver doorontwikkelde fabricagetechnologie in handen hebben, dan is er mogelijke sprake van weinig animo voor samenwerking in deze fase;
- Als de ontwikkeling van technologie pas aan het begin staat, is het wellicht mogelijk om pre-concurrentieel opties voor de fabricage uit te werken.

Waarschijnlijk zijn er al verscheidene oplossingen in de markt in vergaande staat van ontwikkeling. Hierbij is een eis dat iridium aan het einde van de levensduur terug te winnen moet zijn.

Fase 2: ontwikkelen van testprotocollen en normen voor efficiëntie en levensduur (belangrijke spelers: fabrikanten en testinstanties/onderzoeksinstituten). In een volgende fase is het noodzakelijk dat de low-iridium producten getest worden volgens afgesproken, liefst internationale protocollen, om de efficiëntie en levensduur vast te stellen op componentniveau. Hiervoor zijn onafhankelijke testinstanties en faciliteiten op alle schalen nodig die dit kunnen uitvoeren.

Fase 3: samenvoegen van componenten tot stacks die in elektrolyser-systemen kunnen worden ingebouwd (belangrijke spelers: elektrolyserfabrikanten, keuringsinstellingen, kennisinstellingen). In deze fase wordt onderzocht of het mogelijk is om hele systemen te bouwen en wat de prestatie en levensduur is van deze systemen. Daarmee moet duidelijk worden dat de nieuwe low-iridium stacks ook op systeemniveau goed functioneren.

Resultaten:

De belangrijkste resultaten zijn een of meer fabricagetechnologieën die aantoonbaar tot veel lagere concentraties van de iridium-load leiden en die met de huidige PEM-elektrolyzers minimaal vergelijkbare en liefst hogere prestaties hebben (efficiëntie, levensduur) die met erkende protocollen door onafhankelijke instituties zijn vastgesteld.

Timing:

In 2025: bouwen van een of meerdere consortia, waarschijnlijk is aansluiting bij WP1/HyPRO (van het groeifondsprogramma GroenvermogenNL) opportuun of vervult dit zelfs de gewenste rol. HyPRO is begin 2025 van start gegaan en houdt zich met deze materie bezig.

2026-2027: fabricagetechnologie in beeld, doorontwikkeling.

2028 en verder: eerste componenten met lage ir-load beschikbaar voor testen volgens geaccepteerde normen en protocollen; en opschaling.

Budget:

Indien deze circulaire oplossing onderdeel is van HyPRO (totaalbudget ca. € 50 miljoen), dan is een deel daarvan voor deze oplossing bestemd (*wordt getoetst*). Dit budget is door het nationaal groeifonds beschikbaar gesteld en komt uit de publieke middelen. Tevens wordt het project door private partijen gefinancierd.

Projectleider en deelnemers:

HyPRO wordt door TNO i.s.m. UTwente gecoördineerd. Diverse kennisinstellingen en industriespelers zijn onderdeel van het consortium (overzicht consortiumspelers volgt).

C. Ketenproject circulaire oplossing C verlenging levensduur: PGM-vrije hoog-efficiënte AWE

Titel: PGM, geld op de rem, anders zit je klem.

NB: Dit voorstel past waarschijnlijk deels in het huidige HyPRO-project dat onderdeel is van het R&D-programma van GroenvermogenNL, en projecten binnen het NXTGEN Hightech groeifonds. Dit wordt uitgezocht, ook welke activiteiten mogelijk niet (voldoende) in genoemde projecten afgedekt zijn.

Doel:

Dit project heeft tot doel om PGM-vrije AWE-elektrodes te ontwikkelen. Enkele Europese instituten en leveranciers zijn al hiermee bezig. Echter een duidelijke tijdslijn en verwachtingen ontbreken. Zo wordt er ook in Nederland (door TU/e en UTwente) onderzoek gedaan naar deze mogelijk verbeterde elektroden. Het onderzoek zou versneld kunnen worden als de krachten gebundeld worden en er een gezamenlijke strategie zou zijn om PGM-vrije elektrodes te ontwikkelen in samenwerking met industriepartners.

Werkprogramma:

Fase 1: Ontwikkelen van een roadmap en inventarisatie van mogelijke partners en kennisinstellingen. Belangrijke spelers kunnen hierbij verschillende elektrodeleveranciers vertegenwoordigen. Het is ook zeer wenselijk om inzicht te krijgen in de roadmap van de verschillende elektrodeleveranciers.

Fase 2: ontwikkelen van een testprocedure voor het kwantificeren van de efficiency en levensduur van de verschillende PGM-vrije elektrodes (belangrijke spelers hierbij: fabrikanten en testinstanties/onderzoeksinstituten).

Fase 3: Uitwerken en starten met het opzetten van testen van elektrodes in verschillende opstellingen. Dit kan op lab-schaal maar het is ook wenselijk om na te denken voor grotere opstellingen voor testen op schaal en lange-duurtesten. Universiteiten en kennisinstellingen zouden in deze fase een belangrijke rol moeten spelen. In deze fase kan het project worden vastgelegd en de uitvoering worden gestart.

Tijdslijn:

Fase 1: Visievorming (het opzetten en convergeren naar een gezamenlijke visie). Welke universiteit of instantie kan dit gaan leiden? Wie levert kennis en inzichten vanuit de industrie? Doorlooptijd is van M1 – M6.

Fase 2: Plan ontwikkelen voor testprocedures voor het kwantificeren (van M4 – M9).

Fase 3: Doelstellingen en projectuitvoering vastleggen inclusief de beschikking over de benodigde middelen (van M6 – M12).

Budget:

Dit is vooral een “urenproject”. Er worden nog geen grote investeringen in installaties gedaan. Belangrijk om de juiste mensen aan tafel te krijgen en het project door de juiste mensen te laten leiden. Geschatte manuren: 6 bijeenkomsten in totaal met 6-10 personen (480 manuren). Verder nog andere 500-1000 uur voorbereiding en uitwerking door projectmanager(s) en deelnemers. Huur vergaderlocaties en catering.

9 Stakeholder-engagementplan

Door het productteam is een stakeholder-engagementplan opgesteld dat in de komende maanden wordt uitgevoerd. Er is brede communicatie nodig om de routekaart circulaire elektrolyzers goed in het werkveld te laten landen. Echter, op de korte termijn ligt prioriteit bij de meest betrokken actoren, te weten de elektrolyzerfabrikanten en toeleveranciers van onderdelen/componenten. Deze groep is nog niet centraal georganiseerd, maar er zijn wel verschillende netwerken waar een deel van deze actoren goed vertegenwoordigd is en benut kan worden voor een brede support van de doelen van de routekaart:

- Elektrolysermakersplatform EMP, waarin verschillende fabrikanten en toeleveranciers zijn vertegenwoordigd (ca. 25 deelnemers);
- Nationaal Waterstof Programma, specifiek de werkgroep “maakindustrie” waar ook diverse relevante actoren zijn aangesloten;
- Brancheorganisaties, zoals NLHydrogen en NWBA;
- De programma's GroenvermogenNL (WP1 HyPRO) en NextGen Hightech waarbinnen de prioritaire actoren goed vertegenwoordigd zijn.

Wat van belang is, is of bedrijven geïnteresseerd kunnen worden voor de routekaart (what's in it for me?). Belangrijke drivers kunnen zijn:

- Versterking verdienvermogen door nu alvast met circulaire elektrolyzers aan de slag te gaan en daarin tot de koplopers te behoren;
- Minder afhankelijkheid van specifieke landen/regio's waar kritieke grondstoffen vandaan komen, uitmondend in meer zekerheid over de lange termijn beschikbaarheid van de benodigde grondstoffen;
- Mogelijk lagere kosten nu, en waarschijnlijk nog meer later, i.v.m. mogelijke schaarste of handelsbeperkingen van schaarse/kritieke grondstoffen, zoals iridium en PGM's;
- Lagere milieubelasting door meer “ketenzorg”: grondstoffen en producten met een grote voetafdruk worden vermeden. Daarmee wordt vooruitgelopen op mogelijke wetgeving (denk aan PFAS).

Om deze groep zo goed mogelijk te kunnen bereiken, worden de volgende acties voorgesteld:

1. Inventarisatie maken van alle fabrikanten en toeleveranciers van elektrolyzers in Nederland. Hieraan gekoppeld wordt tevens in beeld gebracht of en hoe zij al aan circulariteit werken (incl. onderwerpen, doelen, timing). Hiervoor is een opdracht in uitvoering (octrooi-analyse) en in voorbereiding waarbij alle betrokkenen worden benaderd; de tweede opdracht wordt in de komende weken uitgezet en leidt in het najaar van 2025 tot resultaten. Hierbij wordt gebruikt gemaakt van de resultaten van eerder werk, zoals door TNO, FME, ROMs en Topsector Energie;
2. Actief communiceren naar de hiervoor genoemde netwerken (vanaf nu) en straks alle spelers actief benaderen als ze in kaart zijn gebracht. Onderwerpen zijn:
 - a. Circulariteit in relatie tot elektrolyzers (de routekaart);
 - b. Goede voorbeelden en best practices;
 - c. Ondersteuningsmogelijkheden bij onderzoek en implementatie;
3. Passieve(re) communicatie via website en nieuwsbrieven, in lijn met het vorige punt. Deze acties worden in navolging van punt 2. z.s.m. opgepakt (timing: medio 2025). Op de website van de Circulaire Maakindustrie ([link](#)) komt de routekaart als rapportage (openbare versie), de samenvatting van de routekaart en verdere gegevens over het opstellen en de uitrol van de routekaart;
4. Indien er behoefte aan is (wordt onder de eerste bullet nagevraagd), zijn bijeenkomsten (specifiek of als onderdeel van andere events) opportuun. Mogelijk is ook een soort koplopersgroep een optie.

Deze acties zijn na punt 1. aan de orde.

10 Projectenportfolio

Aan de hand van de 18 circulaire opties is een inventarisatie gemaakt van de projecten die al lopen op hetzelfde terrein (zie onderstaande tabel). Wat opvalt is dat er op oplossingen met een hoge impact vaak al één of meerdere (onderzoeks)projecten lopen. Daarnaast is een separaat document gemaakt met daarin openbare informatie over alle projecten die subsidie ontvangen van RVO en waarbij circulariteit een rol kan spelen.

Circulaire oplossing	score impact	score draagvlak	projecten
1. Eindplaten: 100% hergebruik op de kortere termijn en materiaalrecycling op de lange termijn	middel	middel	
2. Trekstangen: 100% recycling of downcycling	middel	middel	
3. Bipolaire platen: 1) vernikkeld carbonstaal 100% recycling, 2) Ni 100% hergebruik (terug naar stackleverancier), 3) RVS 100% recycling via metaalverwerkers. 4) Ti met Pt coating: nog onduidelijk wat mogelijk is	hoog (Ti), middel (Ni)		vervangen Ti door gecoat staal, Hyscaling, HyPRO
4. Kunststofframes: recycling van hoogwaardige kunststoffen (PPS, PSU of PPSU)	laag	laag	NXTGEN Hightech Energy07/08: gebruik kunststoffen, nog geen recycling
5. Afdichtingen: vaak PFAS-houdend. Refuse, ontwikkeling van alternatieven (2x)	high	medium	HyPRO
6. Stackframe (staal): 100% recycling	low	low	
7. Flowfield (Ni of RVS): 100% recycling			
8. Membranen/diafragma: AWE (Zirkonia & polymeer) (1x)			
9. Membranen PEM (PFAS en Ir): Refuse pfas en Reduce Iridium (4x)	high (Ir) medium (PFAS)	high (Ir) medium (PFAS)	Hyscaling, NXTGEN Hightech, Hypro, Alive, CleanHyPro
10. Elektrodes (IP 'coatingpoeder op zinken plaat'): terug naar leverancier (1x)	low	low	Hyscaling, NXTGEN, HyPro
Stack als geheel - voorkomen van versnelde degradatie:			
11. Nog te ontwikkelen operationele strategie: constante basisload om degradatie te voorkomen = Retain	high	high	Hypro, Hydrohub MWTC APC, iPosh (niet alleen constante basisload, ook advanced process control)
12. Robuuster maken van de stack is een alternatieve strategie: een flexibele stack met minimale degradatie is de wens.	high	high	Hypro, Hydrohub MWTC APC, iPosh (niet alleen constante basisload, ook advanced process control)
13. Vermogenslektronica voor efficiëntie waterstofproductie: design for reduce & retain (1x)	medium	high	HyPro
14. Redesign vermogenslektronica voor flexibele elektrolyzers (1x)	medium	high	HyPro
15. Membraanontwikkeling voor waterzuivering (ontzilting)	low	medium	
16. Warmtewisselaar (hergebruik warmte) (en evt. koppeling voor watervraagstuk) (1x)	low	medium	
17. Al, hele BoP in digital twin omzetten tbv simulatie van operatie en maintenance	high	medium	HyPro, Hydrohub MWTC APC, HVCE
18. Te ontwikkelen strategie operationeel gebruik (design for retain) (2x)	high	high	HyPro, Hydrohub MWTC APC

Tabel 7: Inventarisatie projectenportfolio

Op basis van alle activiteiten die het productteam heeft benoemd is een integrale concept-routekaart gemaakt voor 3 tijdsperiodes. Dit concept bevat verschillende actielijnen.

Tabel 8: Actielijnen “Projecten”

Actielijnen met 'projecten'	2025	2026-2027	2028-2030
Actielijn Beleidsagenda			
Europese harmonisatie	Position paper	Uitrol beleid kennisdeling demo's	Europees beleid
Regelgeving PFAS-vrij	Ontwikkelen stimulus	Ontwerp EU-regelgeving	PFAS NL-Ely
NL-Ely (NL-Elektrolyzers)	Verkenning kader staatssteun	Organiseren IPCEI voor NL-Ely	CE Ely in EU-beleid verankerd
Actielijn Synergie in uitvoering			
Coördinatie kennisdeling oplossingen low-ir (bestaande projecten)	Samenwerkingskader	Uitwisselingsprogramma	Ecosysteem
Iridium as a service (IraS)	Businessplan	Ontwikkeling	Operationeel
Nextgen AWE-elektrodes	Planning	Plan & Financiering	Realisatie
Ketenproject oplossing A: Visie PFAS-vrije elektrolyzers (kopgroep)	rondetafel & playing field	Prioritering PFAS	1e PFAS vrije NL-Ely
Ketenproject oplossing B: low-Ir PEM met hoge efficiëntie	Onderzoek/werkplan	Uitvoering	Implementatie (als mogelijk)
Ketenproject C: PGM-vrije hoog-efficiënte AWE	Onderzoek/werkplan	Uitvoering	Implementatie (als mogelijk)
Actielijn Generieke projecten			
Standaardisatie meetprotocollen voor prestaties in gebruiksfase	Definitief plan	Uitbreiding testinfrastructuur op alle schalen & ontwikkeling en harmonisatie van testprotocollen	Operationeel
NL-Ely onderzoeksagenda	Definitie lopend & GAP	Uitvoering projecten	1e resultaten
Kennisdeling & demo projecten voor optimalisatie gebruiksfase	Plan	Demo	Ecosysteem
Subsidies en financiële voordelen In kaart brengen			
Faciliteren van ketensamenwerking inclusief continue betrekken	Opstarten	Verankeren in programma's	
Productpaspoort, definitie van de relevante basisinformatie	Uitzoeken	Verankeren in programma's	
Actielijn Communicatie & Engagement agenda			
Coördinatie van communicatie & disseminatie naar (MKB) bedrijven	Definitief gedragen plan	Ontwikkeling	Operationeel
Doelgroepcommunicatie	Plan met Tier 1 en 2	Uitvoering	Effecten op doelgroep
Actielijn Sectorcoördinatie			
Community of Practice en Elektrolyser Open Innovation Centre	Kwartiermaken	Ontwikkeling	Risicodeling

Bijlage 1

Samenstelling van het productteam

Het productteam bestaat uit vertegenwoordigers van de waterstofsector.

De samenstelling is als volgt:

Jörg Gigler, TKI Nieuw Gas, Topsector Energie (voorzitter)

Alfred Mosselaar, RVO (secretaris)

Jelle Blekxtoon, FME

Paul Gosselink, BOM

Wilbert Heffels, VDL Hydrogen Systems

Jochen Löffler, TNO

Roald Suurs, TNO

Paul Verbraak, ministerie van Klimaat en Groene Groei

Mark Zuyderwijk, Route Circulair

Het proces werd begeleid door:

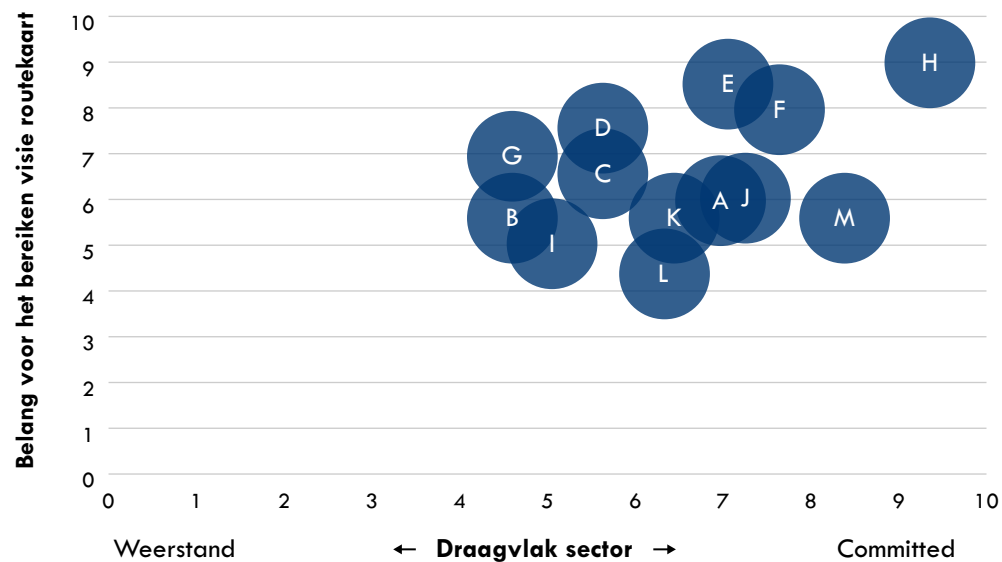
Rien van Leeuwen, Ruysdael

Jeannette Levels-Vermeer, Circon

Bijlage 2

Prioritering van doelen

Figuur 4: Belang en draagvlak van sector voor routekaart doelen



Dit is een publicatie van

Productteam Circulaire Elektrolyzers

Deze publicatie is tot stand gekomen in opdracht van het Ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG) in samenwerking met het Ministerie van Economische Zaken (EZ), onder begeleiding van Circonnect, Rijksdienst Voor Ondernemend Nederland (RVO) en TKI Nieuw Gas.

Voorzitter

Jörg Gigler, TKI Nieuw Gas | Topsector Energie

Secretaris

Alfred Mosselaar, RVO