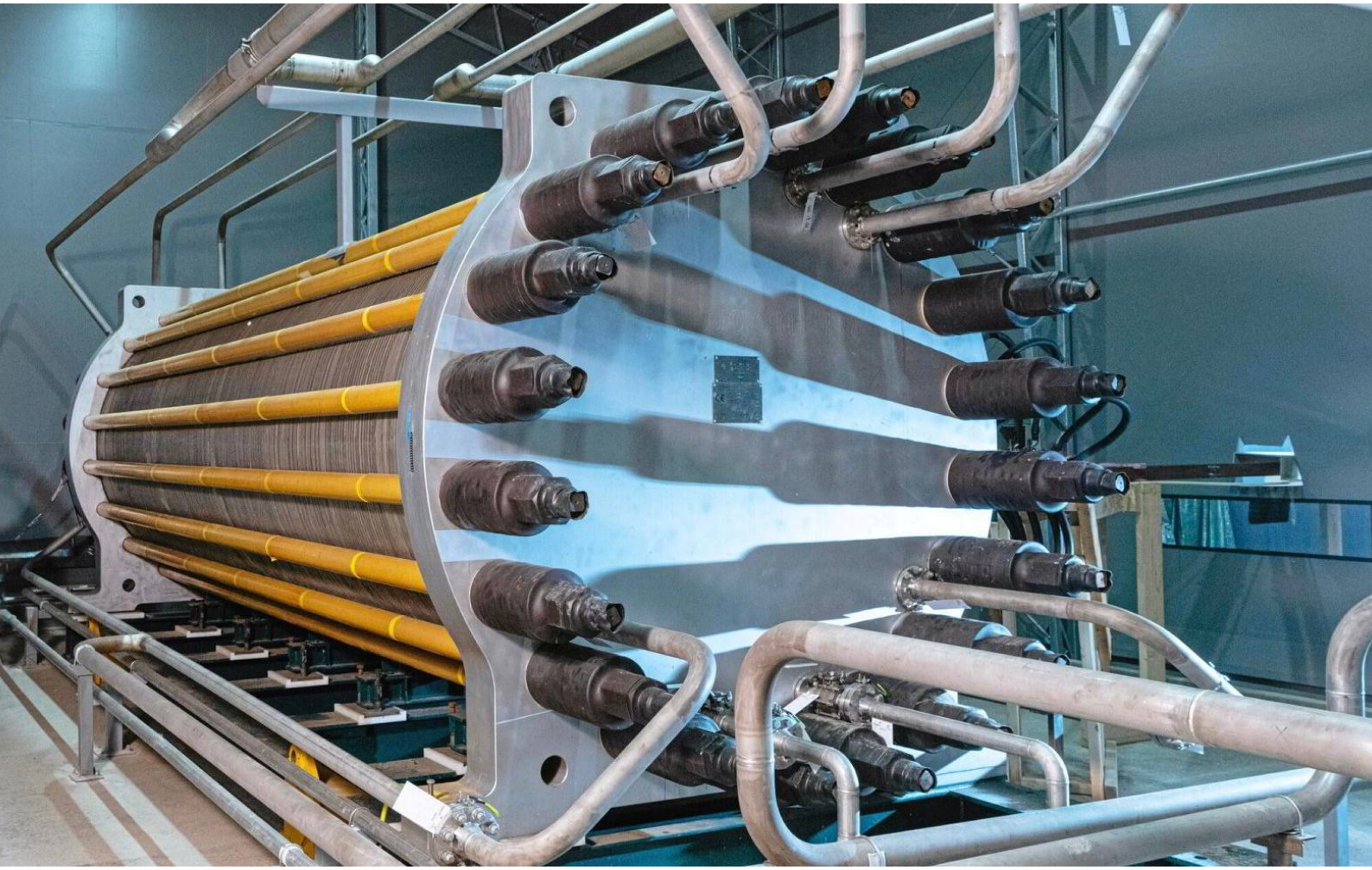
Circulaire Oplossingen voor Nederlandse Elektrolyse Industrie

Trends, Kansen en Knelpunten



In opdracht van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland

20 November 2025

Circulaire Oplossingen voor Elektrolysers in Kaart

Trends, Kansen en Knelpunten

November 2025

In opdracht van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland

✉ info@ekinetix.nl
☏ +31 (0) 88 1234 310
🌍 Ringwade 71, 3439 LM
Nieuwegein, Utrecht
@ www.ekinetix.nl

Foto voorpagina: Stack van een alkaline elektrolyser (Bron: HydrogenPRO)

Inhoud

Management Summary 1
Lijst van Afkortingen 3
1 Inleiding 5
1.1 Context: De rol van elektrolysers in de energietransitie 5
1.2 Beleidsmatige focus op circulariteit in elektrolysetechnologie 5
1.3 Doelen van deze analyse 5
1.4 Leeswijzer 6
2 Methodologie 7
2.1 Onderzoeksaanpak 7
2.2 Onderzoeksmethoden 9
3 Verkenning bedrijven actief in elektrolyserfabricage 11
3.1 Inleiding 11
3.2 Doel van de verkenning 11
3.3 Aanpak en bronnen 11
3.4 Resultaat van de verkenning 12
4 Verkenning onderzoeksprogramma's 15
4.1 Inleiding 15
4.2 Doel van de verkenning 15
4.3 Aanpak en bronnen 15
4.4 Structurering en categorieën 16
4.5 Resultaat van de verkenning 16
5 Overzicht van Circulaire Oplossingen 20
5.1 Inleiding en doelstelling 20
5.2 Onderzoeksvragen en reikwijdte 20
5.3 Methodiek 20
5.4 Aantal geïnterviewde partijen en type 21
5.5 Typologie van respondenten en rol in de waardeketen 21
5.6 Technologische volwassenheid (TRL) per type organisatie 22
5.7 Overzicht van geïdentificeerde circulaire oplossingen 22
6 Analyse van Trends en Lessen 30
6.1 Technologische status en volwassenheid 30
6.2 Gemene delers en best practices 30
6.3 Uitdagingen en barrières 31
6.4 Kosten- en materiaalimpact 31
6.5 Ondersteuningsbehoeften 32
6.6 Toekomstperspectief en Roadmap 33
7 Bereidheid en Behoefte tot Samenwerking 34
7.1 Huidige samenwerkingsverbanden 34
7.2 Waargenomen meerwaarde van samenwerking 34
7.3 Bereidheid en gewenste vormen van samenwerking 35
7.4 Randvoorwaarden voor effectieve samenwerking 36
7.5 Conclusie 37
8 Conclusies en Aanbevelingen 38
8.1 Overkoepelende beleidsmatige en strategische conclusies 38
8.2 Waar circulariteit nu impact maakt en waar kansen liggen 38
8.3 Concrete actiepunten voor RVO en beleidspartners 39
8.4 Visualisaties en instrumenten 40
8.5 Eindadvies 41
Appendix A 42
Appendix B 52
Referenties 60

Management Summary

De Nederlandse elektrolyse-industrie staat aan de vooravond van een versnelde groei. Terwijl de technologie zich beweegt van demonstratie naar grootschalige toepassing, ontstaat ook de noodzaak om circulariteit structureel te verankeren in ontwerp, productie en gebruik van elektrolysesystemen. Circulariteit is op dit moment nog geen primaire drijfveer in de sector, maar groeit snel in strategisch belang – als antwoord op grondstoffenschaarste, stijgende kosten en Europese duurzaamheidsdoelen.

Deze verkenning, uitgevoerd in samenwerking met bedrijven, kennisinstellingen en beleidsorganisaties, brengt in kaart welke circulaire oplossingen voor elektrolysers in Nederland worden ontwikkeld, wie hieraan werkt, wat de status is en welke ondersteuning nodig is om doorbraken te versnellen.

De analyse is gebaseerd op literatuuronderzoek, interviews met 20 partijen uit de waardeketen (OEM's, toeleveranciers, start-ups en kennisinstellingen), en validatie met experts uit lopende programma's zoals GroenvermogenNL, HyScaling en CIRCO.

Belangrijkste bevindingen

- **Circulariteit is in opkomst, maar nog secundair aan kostenreductie en opschaling.** Bedrijven richten zich primair op efficiëntie en marktintroductie, terwijl circulariteit vooral via materiaalreductie (PGM's, PFAS) en levensduurverlenging indirect wordt meegenomen.
- **De technologische status varieert sterk per elektrolysetechnologie.** Alkaline (AWE) is het verst gevorderd en meest geschikt voor hergebruik en refurbish; PEM richt zich op materiaalreductie; AEM en SOE bevinden zich nog in de R&D-fase maar ze bieden potentiële voordelen op het gebied van circulariteit ten opzichte van AWE en PEM technologieën.
- **Nederland beschikt over een sterke kennis- en maakbasis,** maar mist nog voldoende testfaciliteiten, standaardisatie en structurele financiering om circulariteit op te schalen.
- **MKB's en start-ups** zijn de belangrijkste dragers van innovatie, maar ervaren beperkte toegang tot testinfrastructuur en financiering.
- **Samenwerking wordt breed gedragen,** maar vraagt om duidelijke governance, IP-afspraken en een neutrale coördinator. Een Electrolyser Competence Center wordt breed gezien als sleutel om kennisdeling, validatie en standaardisatie te bundelen.

Waar circulariteit nu impact maakt

De huidige vooruitgang concentreert zich rond:

1. **Materiaalreductie en substitutie** (vermindering van PGM's, PFAS-vrije materialen);
2. **Levensduurverlenging en onderhoudsstrategieën** (predictief onderhoud, design-for-service, refurbishment);
3. **Systeem-efficiëntie en hergebruik van energie en water** (warmte-integratie, flexibiliteit in operatie).

Kansen en beleidsprioriteiten

Om de Nederlandse maakindustrie te positioneren als Europese koploper in circulaire elektrolysetechnologie zijn zes beleidslijnen van belang:

1. **Doelgerichte subsidieregelingen** voor MKB's en innovatieve bedrijven, met eenvoudige procedures en focus op R&D.
2. **Publieke test- en validatiefaciliteiten** met open toegang en spreiding over Nederland.
3. **Ketenintegratie en standaardisatie** voor stackinterfaces, onderhoudsprotocollen en circulariteitsmetingen.
4. **Industriebeleid gericht op schaalvergroting** en gebruik van Nederlandse technologie.
5. **Stimulering van circulaire businessmodellen** zoals lease- en terugnameconcepten ("Electrolyser-as-a-Service").
6. **Internationale positionering** van Nederland als testbed binnen Europese Programma's zoals Clean Hydrogen JU en IPCEI Hy2Tech.

Conclusie

De transitie naar circulaire elektrolyse is geen verre toekomstvisie, maar een noodzakelijke stap om de waterstofketen robuust, betaalbaar en duurzaam te maken. Met gerichte ondersteuning, samenwerking en standaardisatie kan Nederland zich in de komende tien jaar ontwikkelen tot een **voorloper in circulaire elektrolysetechnologie**, en zo niet alleen bijdragen aan klimaatdoelen, maar ook aan een sterke, strategisch autonome maakindustrie.

Lijst van Afkortingen

Algemeen & Beleidscontext

Afkorting	Betekenis
RVO	Rijksdienst voor Ondernemend Nederland
EU	Europese Unie
IPCEI	Important Project of Common European Interest
Hy2Tech/ Hy2Use	Europese IPCEI-programma's voor waterstoftechnologie en -toepassingen, en voor Nederlandse subsidieregeling
JU	Joint Undertaking (bijv. Clean Hydrogen JU)
NLHydrogen	Nederlandse Waterstof Associatie
NWBA	Nederlandse Waterstof- en Brandstofcel Associatie
ROM	Regionale Ontwikkelingsmaatschappij
TNO	Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek
DIFFER	Dutch Institute for Fundamental Energy Research
R&D	Research and Development
TRL	Technology Readiness Level
PGS	Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen

Technologieën & Systemen

Afkorting	Betekenis
AWE	Alkaline Water Electrolysis
PEM	Proton Exchange Membrane (Water Electrolysis)
AEM	Anion Exchange Membrane (Water Electrolysis)
SOE	Solid Oxide Electrolysis
BoP	Balance of Plant (hulpsystemen van een elektrolyser)
MEA	Membrane Electrode Assembly
PTL	Porous Transport Layer
BPP	Bipolar Plate
OEM	Original Equipment Manufacturer

Circulariteit & Ontwerpprincipes

Afkorting	Betekenis
R-ladder	Hiërarchisch model voor circulariteitsstrategieën (Refuse, Reduce, Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture, Repurpose, Recycle, Recover)
LCA	Life Cycle Assessment
CO_2	Koolstofdioxide
PGM	Platinum Group Metals (Iridium, Platina e.a.)
PFAS	Per- en polyfluoralkylstoffen
EPDM	Ethyleen-Propyleen-Dieen-Monomeer (synthetisch rubber)
PPS/ PPSU	Polyfenyleensulfide/Polyfenylsulfon – thermoplastische polymeren
H_2	Waterstofgas

Programma's & Initiatieven

Afkorting	Betekenis
HyScaling	Nationaal innovatieprogramma voor elektrolyse-opschaling
GroenvermogenNL	Nationaal programma voor waterstof, elektrificatie en groene chemie
CIRCO	Innovatieprogramma voor circulaire businessmodellen en ontwerpstrategieën
VoltaChem	Programma voor elektrochemische conversie en elektrificatie van de industrie
HyPRO	Programma binnen GroenvermogenNL gericht op elektrolyseontwikkeling
ISPT	Institute for Sustainable Process Technology
Metalot	Regionaal energie- en materialencluster in Noord-Brabant
Chemport	Innovatiecluster voor duurzame chemie in Noord-Nederland

Markt, Beleid & Economie

Afkorting	Betekenis
CAPEX	Capital Expenditure (investeringskosten)
OPEX	Operational Expenditure (operationele kosten)
LCOH	Levelized Cost of Hydrogen
KPI	Key Performance Indicator
MKB	Midden- en Kleinbedrijf

1 Inleiding

1.1 Context: De rol van elektrolysers in de energietransitie

Nederland staat voor een ingrijpende transitie naar een duurzame, klimaatneutrale en circulaire economie in 2050. Circulariteit betekent dat productie- en consumptiepatronen binnen de ecologische grenzen van de aarde moeten blijven. Daarnaast is een stabiele levering van grondstoffen essentieel om strategische afhankelijkheden in geopolitieke context te verminderen. Om deze ambitie te realiseren, is nauwe samenwerking tussen overheid, bedrijfsleven, kennisinstellingen en maatschappelijke organisaties onmisbaar. Deze samenwerking krijgt onder meer vorm via de Nationale Grondstoffenstrategie (NG) en het Nationaal Programma Circulaire Economie (NPCE).

De maakindustrie voor elektrolysers vormt een strategisch belangrijke pijler binnen de energietransitie. Elektrolyse is niet alleen een sleuteltechnologie voor de productie van groene waterstof, maar vervult – net als batterijen, e-boilers en andere flexibele technologieën – een steeds belangrijkere systeemrol. Door vraag en aanbod van elektriciteit beter op elkaar af te stemmen, kunnen elektrolysers netcongestie verminderen en grootschalige afschakeling van wind- en zonne-energie voorkomen. Uit diverse studies (waaronder CE Delft 2024[1]) blijkt dat een doordachte ruimtelijke inpassing van elektrolysers aanzienlijke besparingen kan opleveren, zowel op netwerkverzwaring als op kosten voor congestiemanagement.

Tegelijkertijd wordt de komende jaren een versnelde opschaling van elektrolysecapaciteit verwacht. Die groei brengt nieuwe uitdagingen met zich mee: een grotere vraag naar grondstoffen, hogere productievraag en druk op leveringszekerheid. In dat licht groeit het besef dat circulariteit een essentiële randvoorwaarde is voor duurzame opschaling. Door circulaire strategieën toe te passen – zoals hergebruik van materialen, modulaire ontwerpen en recycling – kunnen milieu-impact en kosten worden verminderd, terwijl de beschikbaarheid van kritieke materialen beter wordt gewaarborgd.

1.2 Beleidsmatige focus op circulariteit in elektrolysetechnologie

In de afgelopen jaren is de aandacht voor circulariteit binnen de elektrolysesector sterk toegenomen, mede door overheidsprogramma's die de duurzame opschaling van waterstoftechnologie willen versnellen. Binnen dit kader is in 2024 de ontwikkeling van de Routekaart Circulaire Elektrolysers gestart – een gezamenlijk initiatief van overheid, kennisinstellingen en industrie, met ondersteuning van onder meer RVO en TKI Nieuw Gas. Parallel hieraan heeft het CIRCO-programma een Keten Track uitgevoerd, waarin bedrijven uit verschillende delen van de waardeketen samenwerkten om circulaire ontwerpprincipes en businessmodellen voor elektrolysers te verkennen. Deze initiatieven hebben belangrijke inzichten opgeleverd over de rol van circulair ontwerp, materiaalkeuze en samenwerking bij de transitie naar een duurzame waterstofeconomie (zie ook: CIRCO – Elektrolysers in de energietransitie[2]).

Tegen deze achtergrond heeft de productgroep Circulaire Elektrolysers in de periode november 2024 tot en met maart 2025 een verkenning uitgevoerd naar kansrijke circulaire oplossingen. Daarbij zijn circa achttien oplossingen geïdentificeerd, gekoppeld aan onderdelen van zowel de elektrolyserstack als de balance of plant (BoP). Deze inventarisatie laat zien dat er in Nederland al veel initiatieven lopen, maar dat een volledig overzicht van circulaire oplossingen, betrokken partijen en ontwikkelstadia nog ontbreekt.

1.3 Doelen van deze analyse

Om tot een integrale en toekomstgerichte aanpak te komen, is het noodzakelijk dit portfolio verder in kaart te brengen. De R-ladder van circulariteit vormt hiervoor een geschikt kader om strategieën te structureren en hun effectiviteit te beoordelen. Een dergelijk overzicht biedt niet alleen richting aan bedrijven en kennisinstellingen, maar stelt beleidsmakers ook in staat gerichte stimuleringsmaatregelen en ondersteuningsinstrumenten te ontwikkelen.

Het doel van deze analyse is om een integraal beeld te krijgen van de stand van circulariteit binnen de Nederlandse elektrolysesector en om te bepalen waar de grootste kansen en knelpunten liggen voor verdere ontwikkeling. Meer specifiek richt de analyse zich op drie hoofdvragen:

[1] CE Delft 2024, "Elektrolysers, nettarieven en het elektriciteitssysteem", Link
[2] https://www.circonl.nl/elektrolysers-in-de-energietransitie-belangrijkste-inzichten-uit-de-keten-track/

1. Welke circulaire oplossingen voor elektrolysecomponenten en -systemen worden in Nederland momenteel ontwikkeld of toegepast?

2. Welke bedrijven, kennisinstellingen en samenwerkingsverbanden zijn hierbij actief, en wat is hun focus, ontwikkelfase en behoefte aan ondersteuning?

3. Welke beleids- en marktgerichte maatregelen kunnen de verdere toepassing en opschaling van circulaire oplossingen stimuleren?

Door deze vragen te beantwoorden, levert dit rapport input voor gericht beleid en innovatieondersteuning, zowel op nationaal als Europees niveau. Het onderzoek vormt tevens een bouwsteen voor de verdere uitwerking van de Routekaart Circulaire Elektrolysers, de Nationale Grondstoffenstrategie (NG) en het Nationaal Programma Circulaire Economie (NPCE).

1.4 Leeswijzer

De rest van dit rapport bestaat uit acht hoofdstukken en volgt de opbouw van de onderzoekscyclus: van context en methodiek tot resultaten en beleidsaanbevelingen.

- **Hoofdstuk 2 – Methodologie**: Beschrijft de onderzoeksaanpak, methoden en stappen die zijn gevolgd voor het verzamelen en analyseren van gegevens (inclusief interviews en deskresearch).
- **Hoofdstuk 3 – Verkenning bedrijven actief in elektrolyserfabricage**: Geeft een overzicht van Nederlandse bedrijven binnen de waardeketen van elektrolyse en hun positie ten opzichte van circulariteit.
- **Hoofdstuk 4 – Verkenning onderzoeksprogramma's**: Behandelt relevante nationale en Europese onderzoeks- en innovatieprogramma's op het gebied van elektrolyse en circulaire technologieën.
- **Hoofdstuk 5 – Overzicht van circulaire oplossingen**: Presenteert de geïdentificeerde oplossingen en koppelt deze aan specifieke onderdelen, doelen en ontwikkelfases.
- **Hoofdstuk 6 – Analyse van trends en lessen**: Analyseert technologische en organisatorische trends, hiaten, kostenimpact en ondersteuningsbehoeften.
- **Hoofdstuk 7 – Bereidheid en behoefte tot samenwerking**: Geeft inzicht in de huidige samenwerkingsverbanden, de meerwaarde van samenwerking en de randvoorwaarden voor een gezamenlijke aanpak.
- **Hoofdstuk 8 – Conclusies en aanbevelingen**: Integreert de bevindingen en formuleert strategische beleidsaanbevelingen voor RVO en andere stakeholders.
- **Hoofdstuk 9 – Appendix**: Bevat aanvullende informatie over de bedrijvenprofielen en onderzoeksprogramma's.

2 Methodologie

In dit hoofdstuk wordt de methodologische opzet van de verkenning beschreven. De aanpak combineert technische, economische en beleidsmatige perspectieven om inzicht te verkrijgen in de circulaire oplossingen voor elektrolysers en de actoren die hierbij betrokken zijn. Eerst wordt de algemene onderzoeksaanpak toegelicht, gevolgd door een beschrijving van de toegepaste onderzoeksmethoden en analysekaders.

2.1 Onderzoeksaanpak

De verkenning naar circulaire oplossingen voor elektrolysers is uitgevoerd met als doel een integraal beeld te vormen van de huidige initiatieven, ontwikkelingsfasen en uitdagingen in de Nederlandse elektrolysesector. De analyse richt zich op zowel technologische oplossingen (componentniveau) als organisatorische en systeemgerichte strategieën (waardeketen- en samenwerkingsniveau).

De onderzoeksaanpak kent drie hoofddoelen:

1. Het in kaart brengen van bedrijven, kennisinstellingen en programma's die actief zijn in de ontwikkeling of toepassing van circulaire oplossingen voor elektrolysers;
2. Het categoriseren en analyseren van deze oplossingen op basis van hun aard, doelstelling, ontwikkelfase en potentiële impact;
3. Het identificeren van kansen, barrières en ondersteuningsbehoeften voor beleid en samenwerking.

De verkenning richt zich op zowel de elektrolyserstack (de kern van het systeem waar de waterstofproductie plaatsvindt) als de balance of plant (BoP), de ondersteunende componenten die zorgen voor water-, warmte-, stroom- en gassenbeheer.

De analyse kijkt bovendien naar de volledige levenscyclus van deze systemen, van ontwerp en materiaalkeuze tot gebruik, onderhoud, hergebruik en recycling. Deze benadering maakt het mogelijk om circulariteit te beoordelen vanuit zowel een technisch-inhoudelijk als een strategisch-beleidsmatig perspectief.

2.1.1 Categorisering circulaire oplossingen

Binnen de context van de routekaart Circulaire Elektrolysers worden oplossingen onderscheiden voor de elektrolyserstack en de balance of plant (BoP). De focus ligt op materiaalreductie, ontwerpprincipes, levensduurverlenging en recycling. Zie hiervoor de onderstaande tabel.

Table 1: Circulaire oplossingen voor de elektrolyserstack en de balance of plant (BoP)

Stack	Balance of Plant (exclusief 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 6. Stackframe (staal): 100% recycling 7. Flowfield (Ni of RVS): 100% recycling 8. Membranen/diafragma AWE (Zirkonia & polymeer): Recycle 9. Membranen PEM (PFAS en Ir): Refuse PFAS en Reduce Iridium 10. Elektrodes (IP 'coatingpoeder op zinken plaat'): terug naar leverancier Stack als geheel - Voorkomen versnelde degradatie: 1. Nog te ontwikkelen operationele strategie: constante basisload om degradatie te voorkomen = Retain 2. Robuuster maken van de stack is een alternatieve strategie: een flexibele stack met minimale degradatie is de wens	1. Vermogenselektronica voor efficiëntie waterstofproductie: design for reduce & retain 2. Redesign vermogenselektronica voor flexibele elektrolysers 3. Membraanontwikkeling voor waterzuivering (ontzilting) 4. Warmtewisselaar (hergebruik warmte) (en evt. koppeling voor watervraagstuk) 5. AI, hele BoP in digital twin omzetten tbv simulatie van operatie en maintenance 6. Te ontwikkelen strategie operationeel gebruik (design for retain)

De circulaire oplossingsrichtingen omvatten onder meer:

- Materiaalhergebruik en recycling van metalen onderdelen zoals eindplaten, trekstangen en bipolaire platen (nikkel, RVS);
- Ontwikkeling van PFAS-vrije alternatieven voor afdichtingen en membranen;
- Reductie van het gebruik van kritieke materialen zoals iridium en platinum in katalysatoren;
- Optimalisatie van operationele strategieën om degradatie te beperken en onderhoud te minimaliseren;
- Toepassing van digital twins en AI voor predictief onderhoud en systeemefficiëntie;
- Herbruikbare of modulaire ontwerpen die refurbish of remanufacture mogelijk maken.

De productgroep *Circulaire Elektrolysers* onderscheidt daarbij vier prioritaire oplossingsrichtingen:

1. PFAS-vrije elektrolysers (*Refuse*);
2. Low-iridium PEM-elektrolysers (*Reduce*);
3. Low- of no-PGM-houdende AWE-elektrolysers (*Reduce, Refuse*);
4. Operationele strategieën ter bevordering van levensduur (*Retain*).

2.1.2 R-ladder voor circulariteit

Om de uiteenlopende oplossingen te kunnen vergelijken, is gebruikgemaakt van de R-ladder voor circulariteit. De R-ladder is een effectief instrument om de milieu-impact van producten over de gehele levensduur te minimaliseren. Dit raamwerk beschrijft de mate waarin materialen en producten in de kringloop worden behouden. De ladder onderscheidt strategieën van hoogwaardig hergebruik (*Refuse, Reduce, Reuse*) tot recycling en terugwinning (*Recycle, Recover*). Hoe hoger een strategie op de ladder, hoe efficiënter het grondstoffengebruik. De R-ladder kent de volgende indeling:

Table 2: De R-ladder voor circulariteit – strategieën voor slim grondstoffengebruik

Niveau	Strategie	Doelstelling/ Beschrijving	Categorie
R0	**Refuse**	Vermijd onnodige of niet-duurzame componenten en producten die geen meerwaarde bieden.	Slimmere inzet van grondstoffen
R1	**Reduce**	Minimaliseer materiaalgebruik door efficiënt ontwerp, lichtere constructies of procesoptimalisatie.	Slimmere inzet van grondstoffen
R2	**Redesign**	Ontwerp producten opnieuw om materiaalgebruik of milieu-impact te verlagen; vervang kritieke materialen.	Slimmere inzet van grondstoffen
R3	**Re-use**	Hergebruik producten of onderdelen zonder ingrijpende bewerking of verlies van functionaliteit.	Hergebruik en levensduurverlenging
R4	**Repair**	Herstel defecte producten of onderdelen zodat ze opnieuw kunnen worden ingezet.	Hergebruik en levensduurverlenging
R5	**Refurbish**	Moderniseer of upgrade bestaande producten om hun prestaties of levensduur te verbeteren.	Hergebruik en levensduurverlenging
R6	**Remanufacture**	Reconstrueer producten door onderdelen te demonteren, herstellen en opnieuw samen te stellen.	Hergebruik en levensduurverlenging
R7	**Repurpose**	Gebruik componenten of materialen opnieuw in een andere toepassing of context.	Hergebruik en levensduurverlenging
R8	**Recycle**	Herwin materialen uit afgedankte producten voor gebruik als grondstof in nieuwe producten.	Recycling en terugwinning
R9	**Recover**	Zet reststromen of energie-inhoud van materialen om in warmte of elektriciteit.	Recycling en terugwinning

Interpretatie:

- **R0–R2** → Voorkomen van grondstofgebruik (*ontwerpgericht*).
- **R3–R7** → Verlenging van product- en componentlevensduur (*gebruikgericht*).
- **R8–R9** → Terugwinning van materiaal of energie (*einde-levensfase*).

Binnen de context van elektrolysetechnologie zijn drie niveaus van ontwikkeling relevant:

- Direct toepasbare oplossingen, zoals metaalrecycling en hergebruik van eindplaten of trekstangen;
- Oplossingen in ontwikkeling, zoals de reductie van PGM's en de ontwikkeling van PFAS-vrije membranen;
- Lange-termijnoplossingen, zoals de terugwinning van samengestelde of micro-materiaalfracties.

Deze categorisering maakt het mogelijk om oplossingen te beoordelen op technologische rijpheid (TRL), economische haalbaarheid en milieu-impact. Het resultaat vormt een nulmeting van de status van circulariteit in de elektrolysesector, die als basis dient voor beleid en monitoring van de verdere uitrol van circulaire strategieën.

De hoofdgroepen van circulaire oplossingsrichtingen zijn:

1. Vermindering of vervanging van kritieke grondstoffen (iridium, platina, nikkel, titanium);
2. Ontwerp voor circulariteit (herbruikbare en recyclebare materialen zoals metalen en hoogwaardige kunststoffen);
3. PFAS-vrije elektrolysers;
4. Operationele strategieën gericht op levensduurverlenging;
5. Overige levensduurverlengende maatregelen, waaronder onderhoud, refurbish en remanufacture.

2.2 Onderzoeksmethoden

Gezien het multidisciplinaire karakter van dit onderzoek is een combinatie van kwalitatieve en kwantitatieve methoden toegepast. Het onderwerp omvat immers zowel technologische, economische als beleidsmatige aspecten, en vraagt om inzicht in zowel de feitelijke status van ontwikkelingen als de motieven, uitdagingen en behoeften van betrokken partijen.

De volgende onderzoeksmethoden zijn toegepast:

Literatuuronderzoek

Analyse van wetenschappelijke literatuur, rapporten, routekaarten, projectbeschrijvingen en beleidsdocumenten. Hiermee is een overzicht samengesteld van bestaande kennis en initiatieven rond circulaire elektrolysers. De analyse combineert nationale en internationale invalshoeken en vormt de basis voor de interviews en vergelijkende analyse.

Gestructureerde interviews

Interviews met vertegenwoordigers van bedrijven, kennisinstellingen en onderzoeksprogramma's, op basis van een vooraf vastgestelde vragenlijst. Deze gesprekken hebben inzicht opgeleverd in de stand van techniek, circulaire strategieën, uitdagingen en samenwerkingsbehoeften. De resultaten zijn schriftelijk uitgewerkt en thematisch geanalyseerd.

Vragenlijsten

Aanvullend is een gestandaardiseerde vragenlijst verspreid onder een bredere groep stakeholders om kwantitatieve informatie te verzamelen over lopende initiatieven, ontwikkelfasen, impact en ondersteuningsbehoeften. Het gebruik van een uniforme structuur maakt vergelijking tussen organisaties mogelijk, ook voor partijen die niet aan interviews konden deelnemen.

Technische validatie en impactanalyse

De verkregen informatie is gevalideerd door middel van technische expertise en, waar mogelijk, vergeleken met bestaande onderzoeksresultaten. Hierbij is gebruikgemaakt van kennis over elektrolysetechnologie en materialen om de juistheid en relevantie van de circulaire oplossingen te toetsen. Daarnaast zijn indicatieve

berekeningen uitgevoerd om de potentiële milieu- en materiaalimpact van specifieke oplossingsrichtingen te kunnen inschatten.

Stakeholdermapping

De betrokken partijen zijn in kaart gebracht via een stakeholderanalyse. Deze mapping geeft inzicht in de rollen, onderlinge relaties en posities binnen de waardeketen en maakt zichtbaar waar samenwerking wenselijk of noodzakelijk is. Hiermee worden ook hiaten en witte vlekken geïdentificeerd, die richting geven aan beleidsmatige interventies.

Circulariteitsanalyse aan de hand van de R-ladder

Tot slot zijn de geïdentificeerde oplossingen geanalyseerd aan de hand van de R-ladder. Deze systematische categorisering maakt het mogelijk om verschillen in aanpak, impact en marktrijpheid zichtbaar te maken. Zo ontstaat inzicht in waar circulariteit momenteel de meeste impact realiseert en welke trajecten verdere stimulering behoeven.

3 Verkenning bedrijven actief in elektrolyserfabricage

3.1 Inleiding

De Nederlandse maakindustrie speelt een sleutelrol in de wereldwijde ontwikkeling van elektrolysetechnologie. Met een sterke basis in hightech, materiaalinnovatie en systeemintegratie is Nederland goed gepositioneerd om een vooraanstaande rol te vervullen in de productie van elektrolysers en hun componenten. Deze technologie is cruciaal voor de productie van groene waterstof en vormt daarmee een kernonderdeel van de energietransitie.

Om de status van circulariteit binnen deze sector te kunnen beoordelen, is eerst een helder beeld nodig van de bedrijven die actief zijn in de waardeketen van elektrolyserproductie. Deze verkenning richt zich daarom op het identificeren van relevante Nederlandse bedrijven en hun activiteiten, technologische focus en positie binnen de keten. Het overzicht vormt de basis voor het analyseren van circulaire oplossingen, materiaalstromen en innovatiepotentieel.

3.2 Doel van de verkenning

Het doel van deze verkenning is om een actueel en gevalideerd overzicht te verkrijgen van bedrijven in Nederland die betrokken zijn bij de ontwikkeling en productie van elektrolysers en hun componenten. Deze inventarisatie biedt inzicht in:

- De aard en spreiding van bedrijven binnen de waardeketen (van componenten tot complete systemen);
- De technologische focus (AWE, PEM, AEM, SOE);
- De strategische ambities op het gebied van opschaling, circulariteit en marktontwikkeling;
- En de mate waarin circulaire principes reeds worden toegepast of onderzocht.

Het overzicht vormt een bouwsteen voor het bredere doel van deze studie: het identificeren van kansrijke circulaire oplossingen en het bepalen van hun status, ontwikkelfase en verwachte impact binnen de Nederlandse elektrolysesector.

3.3 Aanpak en bronnen

De verkenning is gebaseerd op een combinatie van bestaande studies, deskresearch, interviews en expertvalidatie.
Belangrijke uitgangspunten zijn:

- Gebruik van eerder ontwikkelde bedrijvenlijsten, zoals de *kansenkaart* uit het FME–TNO-rapport en de inventarisatie van het Elektrolyser Makersplatform en de Productgroep Circulaire Elektrolysers;
- Actualisatie van deze gegevens via recente bronnen (2024–2025), aangevuld met interviews, LinkedIn-analyse, bedrijfswebsites en openbare KvK-gegevens;
- Validatie en aanvulling met informatie uit nationale netwerken, waaronder FME, TNO, ROM's, het Nationaal Waterstof Programma, de NWBA en NLHydrogen.

De informatie is gestructureerd in een overzichtelijke database met voor elk bedrijf:

- Naam en locatie;
- Activiteiten en producten (componenten of systemen);
- Technologische focus (PEM, AEM, AWE, SOE);
- Positie in de waardeketen (eindproduct, subsysteem of component);
- Focus op circulaire thema's (hergebruik, recycling, ontwerp voor demontage);
- Doelen en ambities (opschaling, circulariteit, marktbereik);
- Omvang (indicatief aantal werknemers betrokken bij elektrolyseactiviteiten).

De bedrijven zijn vervolgens gecategoriseerd naar hun positie in de keten – van systeemintegratoren en stackproducenten tot componentleveranciers en toeleveranciers – om inzicht te geven in de structuur en samenhang van het Nederlandse ecosysteem.

3.4 Resultaat van de verkenning

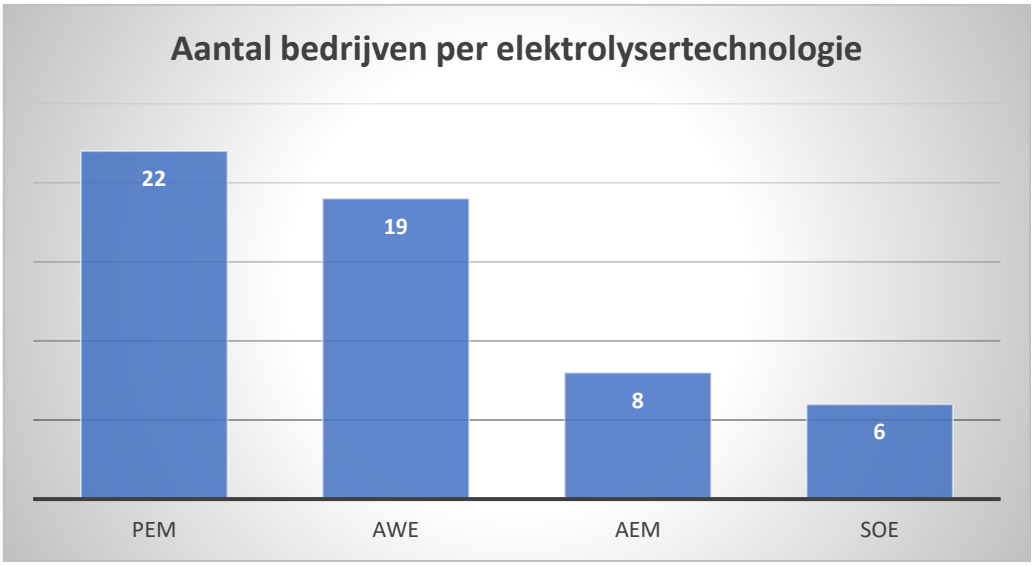
Het resultaat van deze verkenning is een gevalideerd overzicht van 83 bedrijven die actief zijn binnen de Nederlandse elektrolyse-sector. Het overzicht bestrijkt de volledige breedte van het veld – van start-ups en scale-ups tot gevestigde industriële spelers, en van componentontwikkelaars tot systeemintegratoren. Samen vormen deze partijen het fundament voor de verdere ontwikkeling van een circulaire en concurrerende elektrolyse-industrie in Nederland.

Om de samenstelling van dit ecosysteem inzichtelijk te maken, zijn de bedrijven geanalyseerd op hun technologische focus, positie in de waardeketen en focus binnen de R-ladder. De resultaten zijn hieronder samengevat.

Toelichting:

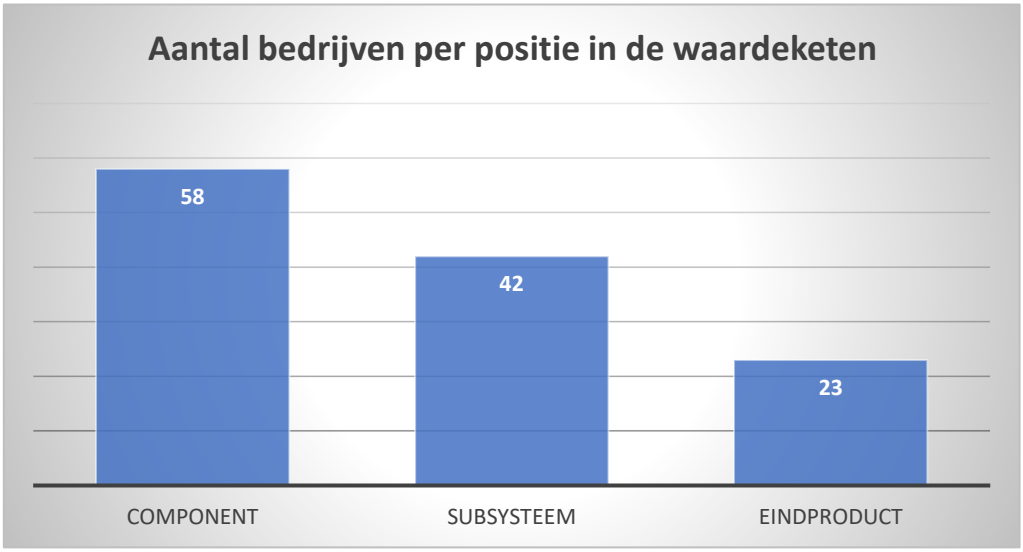
Sommige bedrijven zijn actief binnen meerdere technologieën en vervullen daarnaast meer dan één rol in de waardeketen. Ook passen zij verschillende circulariteitsstrategieën toe. In de onderstaande analyses worden deze bedrijven daarom meervoudig geteld, afhankelijk van het aantal technologieën, rollen en circulaire oplossingen waarin zij actief zijn.

Daarnaast zijn sommige bedrijven technologie-agnostisch, waardoor hun producten kunnen worden toegepast binnen verschillende elektrolysetechnologieën; om die reden worden zij niet onder een specifieke technologiecategorie ingedeeld.



Figuur 1: Aantal bedrijven per technologiefocus: PEM, AWE, AEM, SOE.

De meeste Nederlandse bedrijven richten zich op alkaline- (AWE) en proton exchange membrane-technologie (PEM), die samen het grootste deel van de markt vertegenwoordigen. Daarnaast groeit het aantal partijen dat actief is in anion exchange membrane-technologie (AEM), voornamelijk op onderzoeks- en pilotniveau. De toepassing van solid oxide electrolysis (SOE) bevindt zich nog in een vroeg stadium, maar vormt een belangrijk kennisdomein voor toekomstige warmte-integratie en systeemoptimalisatie.



Figuur 2: Aantal bedrijven per positie in de waardeketen (Component, Subsysteem, Eindproduct)

Hier lichten we eerst de posities in de waardeketen toe.

- Component: Omvat bedrijven die onderdelen of materialen leveren voor elektrolysesystemen, zoals elektroden, membranen, frames, afdichtingen en bipolaire platen. Deze partijen richten zich doorgaans op materiaalkwaliteit, circulariteit en technologische innovaties op onderdeel- of materiaalniveau.
- Subsysteem: Behelst bedrijven die deelmodules of ondersteunende systemen ontwikkelen die onderdeel zijn van de totale elektrolyse-installatie – bijvoorbeeld vermogenselektronica, waterbehandelingsmodules, gasdistributie, koeling, compressie, sensoren, of regel- en veiligheidssystemen. Hun rol ligt vaak in systeemoptimalisatie, betrouwbaarheid en onderhoudsstrategieën.
- Eindproduct (systeemintegrator/OEM): Betreft bedrijven die complete elektrolysesystemen ontwerpen, assembleren en leveren (turnkey of modules), inclusief stack, balance of plant (BoP) en besturingssystemen. Zij bepalen in hoge mate de productarchitectuur en integreren circulaire principes zoals modulair ontwerp, onderhoudsstrategie en herbruikbare componenten.

De verdeling binnen de waardeketen laat zien dat het merendeel van de Nederlandse bedrijven (58 bedrijven) actief is als componentleverancier. Deze groep vormt de ruggengraat van de binnenlandse maakindustrie en levert onderdelen zoals elektroden, membranen, frames en afdichtingen.

Daarnaast is een groot deel (42 bedrijven) actief in de ontwikkeling van subsystemen, zoals waterbehandelingsmodules, vermogenselektronica, koeling en compressie. Deze partijen spelen een sleutelrol in de betrouwbaarheid, efficiëntie en circulariteit op systeemniveau.

Een kleinere maar technologisch leidende groep (23 bedrijven) fungeert als systeemintegrator of OEM, verantwoordelijk voor de assemblage en levering van complete stacks en turnkey-elektrolysesystemen. Samen vormen deze groepen het fundament van de Nederlandse elektrolysewaardeketen.

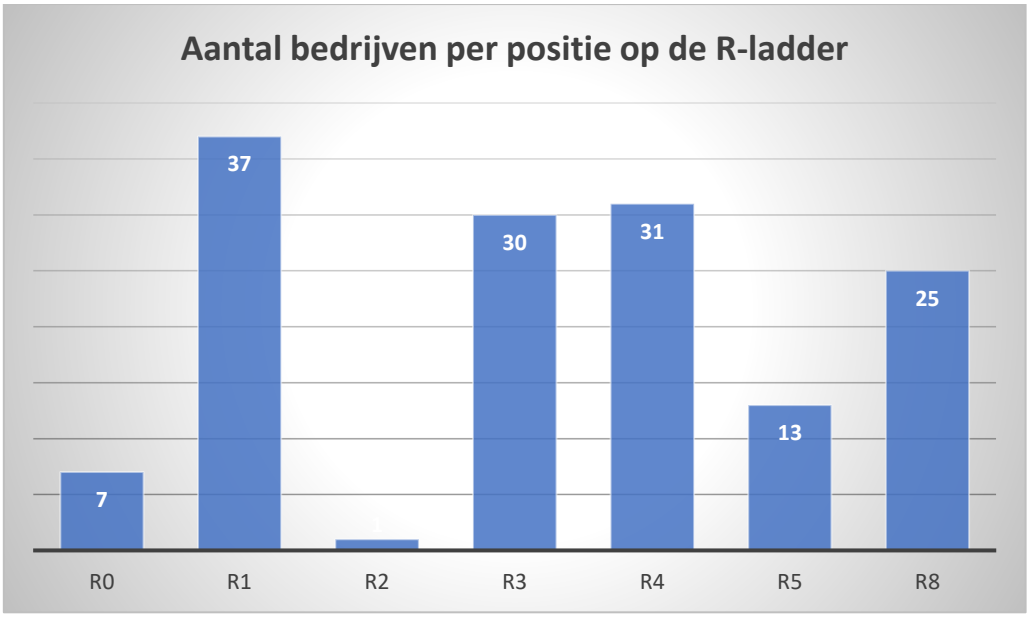


Figure 3: Aantal bedrijven per positie op de R-ladder
(R-strategieën die bedrijven momenteel toepassen of ontwikkelen)

De analyse van de R-ladder toont dat de meeste bedrijven zich momenteel concentreren op de hogere treden van circulariteit, met name R1 (Reduce), R3 (Reuse), en R4 (Repair). Deze strategieën leveren de grootste milieu- en materiaalefficiëntie op en sluiten aan bij de huidige prioriteiten in de sector: kostenreductie, levensduurverlenging en vermindering van grondstoffengebruik.

Daarnaast is er aanzienlijke aandacht voor R8 (Recycle), wat voornamelijk plaatsvindt in de ontwerpfase door het selecteren van geschikte materialen die aan het einde van de levensduur van het systeem kunnen worden gerecycled.

De lagere treden van de ladder – zoals R6 (Remanufacture), R7 (Repurpose) en R9 (Recover) – komen in deze dataset nog niet voor. Dit is niet per se een tekortkoming, maar weerspiegelt de logische focus van bedrijven op strategieën die verspilling voorkomen in plaats van herstellen.

Het blijft echter belangrijk om ook deze routes verder te verkennen en optimaliseren, zodat reststromen die niet meer geschikt zijn voor hergebruik of reparatie uiteindelijk binnen de kringloop behouden blijven.

Het volledige, gevalideerde overzicht van de 83 bedrijven met hun activiteiten, technologische focus en circulariteitsinitiatieven is opgenomen in de Appendix A.

4 Verkenning onderzoeksprogramma's

4.1 Inleiding

Naast de maakindustrie spelen onderzoeks- en innovatieprogramma's een cruciale rol in de ontwikkeling van circulaire elektrolysetechnologie. Nederland kent een sterk onderzoeks-ecosysteem waarin kennisinstellingen, bedrijven en overheden samenwerken aan de ontwikkeling, demonstratie en opschaling van elektrolyse en aanverwante technologieën. Deze programma's vormen de kennisbasis waarop toekomstige productinnovaties, industriële toepassingen en beleidsinterventies kunnen voortbouwen.

Om richting te geven aan verdere beleidsontwikkeling en samenwerking is het belangrijk om inzicht te krijgen in de lopende onderzoeksprogramma's die bijdragen aan de verduurzaming en circulariteit van elektrolyse. Deze inventarisatie brengt de belangrijkste nationale initiatieven in kaart en beschrijft hun inhoudelijke focus, partners en resultaten.

4.2 Doel van de verkenning

Het doel van deze verkenning is het samenstellen van een actueel overzicht van Nederlandse onderzoeksprogramma's die zich richten op elektrolyse en elektrolysercomponenten, met bijzondere aandacht voor circulariteit, technologische innovatie en opschaling.

De analyse biedt inzicht in:

- De thema's waarop onderzoek en innovatie plaatsvinden (zoals materialen, systeemintegratie, circulariteit, of productieketenontwikkeling);
- De betrokken partners uit bedrijfsleven, kennisinstellingen en overheid;
- De voortgang en resultaten van de programma's;
- En de mogelijke kruisverbanden tussen de verschillende initiatieven.

Het overzicht maakt zichtbaar waar al substantiële kennisontwikkeling plaatsvindt, en waar kansen liggen om onderzoek en industrie beter met elkaar te verbinden rond circulaire oplossingen.

4.3 Aanpak en bronnen

De inventarisatie is uitgevoerd op basis van een combinatie van deskstudie, openbare documentatie en interviews met betrokken programmaleiders en onderzoekers.

De volgende programma's zijn in ieder geval onderzocht vanwege hun directe relevantie voor elektrolyse en circulariteit:

- HyPRO (onderdeel van *GroenvermogenNL*);
- NextGen Hightech;
- VoltaChem;
- HyScaling;
- CIRCO-tracks gericht op waterstoftechnologie;
- ISPT Hydrohub.

Daarnaast is gekeken naar aanpalende initiatieven en netwerken die bijdragen aan kennisdeling, valorisatie en ketensamenwerking, waaronder:

- NLHydrogen;
- NWBA (Nederlandse Waterstof en Brandstofcel Associatie);
- Waterstof Industrie Cluster (WIC);
- Regionale samenwerkingsprogramma's;
- GroenvermogenNL als overkoepelend kader;
- Diverse start-up- en onderzoeksomgevingen op het gebied van waterstof.

Verder, voor elk programma zijn de volgende gegevens verzameld:

- Naam van het programma;
- Betrokken partners (bedrijven, kennisinstellingen, overheden);

- Doelen en ambities;
- Inhoudelijke focus (technologieontwikkeling, circulariteit, ketensamenwerking, opschaling);
- Resultaten tot nu toe (publicaties, prototypes, demonstraties);
- Tijdshorizon of looptijd.

De informatie is verzameld via:

- Websites en openbare documenten van de programma's;
- Publicaties van TNO, Topsector Energie, GroenvermogenNL en andere relevante instanties;
- Interviews met betrokken programmaleiders of onderzoekers;
- Overzichtsdossiers van CIRCO-tracks en projectbeschrijvingen.

4.4 Structurering en categorieën

De onderzoeksprogramma's zijn gestructureerd in een overzichtstabel (zie volgende pagina) en vervolgens gecategoriseerd naar thema, zodat patronen en onderlinge samenhang zichtbaar worden. De belangrijkste categorieën zijn:

Categorie	Beschrijving
Technologieontwikkeling	Fundamenteel en toegepast onderzoek naar elektrolysecomponenten en materialen.
Circulariteit en materiaalstromen	Projecten gericht op levensduurverlenging, recycling en hergebruik van componenten.
Ketenintegratie en systeemontwikkeling	Samenwerking tussen bedrijven en kennisinstellingen voor integratie van elektrolysers in energie- en grondstoffenketens.
Opschaling en industriële toepassing	Programma's gericht op pilot- en demonstratiefases, productieautomatisering en marktimplementatie.

Deze structuur maakt het mogelijk om zowel de inhoudelijke dekking van het Nederlandse onderzoekslandschap als de relevantie voor circulariteit te analyseren.

4.5 Resultaat van de verkenning

De inventarisatie resulteert in een overzicht van de belangrijkste onderzoeksprogramma's en samenwerkingsverbanden in Nederland op het gebied van elektrolyse. Deze programma's vormen samen een coherente kennisbasis die de ontwikkeling van circulaire elektrolysetechnologie ondersteunt.

In de volgende tabel wordt een samenvatting gepresenteerd van de onderzochte programma's, gevolgd door een verdere beschrijving per programma met hun doelstellingen, partners, thema's en resultaten. De gedetailleerde beschrijving per onderzoeksprogramma, inclusief inhoudelijke focus, betrokken partners, resultaten en looptijd, is opgenomen in de Appendix B.

Naam	Wat	Doelen & ambities	Technologie	Thema's	Start	Eind	Activiteiten	
							Wanneer	Wat
HyPro	Onderzoeks programma	Optimalisatie & kostenreductie van waterstoftechnologieën: • Efficiëntie verbeteren • Duurzame materialen ontwikkelen • Omgaan met variabele belasting (PEM) • Warmteintegratie (SOEC) • Onderzoek naar AEM & andere nieuwe elektrolysetechnologieën • Valorisatie van restgassen: plasmatechnologie & microreactoren • Integratie met vermogenselektronica en andere BoP-componenten	AWE PEM SOEC AEM	Technologieontwikkeling Systeemintegratie	2025	2029	2024 2025 2026 2027 2028-2029 2030	Ondertekening van het consortiumakkoord Ontwikkeling van testprotocollen en componenten Selectie & testen van materialen Ontwikkeling van monitoringtools en risicobeoordelingen Prestatieonderzoek, modelontwikkeling en ontwerp van stackmaterialen Operationele systemen op schaal
NXTGEN Hightech - Energy Domein	Onderzoeks programma	Realisatie van een coherent, wendbaar en internationaal toonaangevend hightech equipment ecosysteem: • Kostenreductie en efficiëntieverhoging van elektrolysers • Ontwikkeling van een concurrerende Nederlandse elektrolyserindustrie 3 elektrolyse-projecten: • PHOENIX-Alkalina: AWE • Derde-generatie elektrolyser: primair PEM en AWE, daarnaast SOEC, AEM, en CO_2-elektrolyse • Massaproductie van ZEF: microplants voor conversie van CO_2 en H_2O naar methanol m.b.v. zonne-energie	AWE PEM SOEC AEM CO2-elektrolyse	Technologieontwikkeling Marktontwikkeling Opschaling	2023	2030	2023-2030 2025, apr 2025 2025, sep 2025, okt 2026 2026+ 2026+	3 calls van elk 11 miljoen euro Publicatie whitepaper 'Elektrolyse: de motor van waterstofproductie' Installatie van 50 kW PHOENIX-Alkalina prototype Lancering SparkNano Omega: het eerste high-speed roll-to-roll spatial ALD-systeem wereldwijd VSParticle & Plug Power tonen uitstekende prestaties met tot 90% minder Ir-gebruik aan Installatie van 500 kW PHOENIX-Alkaline demo plant PHOENIX-Alkaline op 15 MW schaal ZEF-assemblagelijn van >75.000 microplants/jaar
Voltachem	Onderzoeks programma	Versnelling van industriële elektrificatie en decarbonisatie: • Ontwikkeling van nieuwe businessmodellen en technologieën • Productie van groene waterstof en chemische bouwstenen uit hernieuwbare elektriciteit: • Component-ontwikkeling en levensduurtesten • Upscaling en efficiëntieverbetering (TRL 3-5 naar TRL 5-7)	PEM SOEC AWE AEM	Technologieontwikkeling Opschaling Marktontwikkeling	2015	Heden	2015 2018 2020 2022 2023 2025 2026+	Lancering VoltaChem door TNO Nieuw protocol voor accelerated stress testing (AST) voor PEM Opening Faraday Lab, HydroHub, Stack Test Center & Field Lab Industrial Electrification Start Supercell-programma (PEM Gen 2) Raport 'Next Level SOEC' met Air Liquide, BP, OCI, TNO en ISPT Licentieovereenkomst met Powall voor low-iridium katalysatoren Opschaling richting gigawattcapaciteit en industriële demonstratieprojecten

							Doorlopend	Jaarlijkse events zoals "Scale 2 Impact" en Hydrogen Technology World Expo
HyScaling	Onderzoeks programma	Reductie van de levelized cost of hydrogen (LCOH) met 25-30% Het mogelijk maken van 5 GW elektrolyser capaciteit in NL in 2030 • Ontwikkeling van componenten, stacks, en volledige systemen voor PEM en AWE • Kostenefficiënte productieprocessen • Hogere efficiënties en langere levensduur • Systeemintegratie	PEM AWE	Technologieontwikkeling Systeemintegratie	2021	2024	2021 2022, jun 2023, jun 2024	Start HyScaling Publicatie 'HyScaling - public progress report 1st year' Publicatie 'HyScaling - public progress report 2nd year' Presentatie resultaten tijdens Waterstof Innovatiedag & publicatie van 2 webinars
Hydrohub Innovation Platform	Onderzoeks programma	Grootschalige groene H_2-productie d.m.v. 3 deelprogramma's: • GigaWatt Scale Electrolyser: ontwerp voor 1 GW fabriek met integratie van duizend elektrolysers • HyChain: in kaart brengen van internationale waterstofproductie- en transportketens • Hydrohub MegaWatt Test Center: kostenreductie en efficiëntieverhoging van elektrolysers d.m.v. ontwerp, realisatie & exploitatie van een testcentrum in Groningen	PEM AWE	Technologieontwikkeling Opschaling Systeemintegratie Veiligheid & regelgeving	2018	Heden	2018-2022 2020 2020 2022 2018-2019 2020-heden 2018-2023 2023-heden	Project: 'Gigawatt Scale Electrolyser' Rapport: 'Integration of gigawatt scale electrolyser in five industrial clusters' Rapport: 'Gigawatt green hydrogen plant' Rapport: 'A one-gigawatt green hydrogen plant: Advanced design and total installed capital costs' Rapporten voor HyChain deel 1, 2 & 3 Rapporten voor HyChain deel 4 & 5 Ontwerp & realisatie van het Hydrohub MegaWatt Test Center in Groningen (Phase 1) Exploitatie van het testcentrum voor onderzoek & ontwikkeling van commerciële exploitatiemogelijkheden (Phase 2)
HyDelta	Onderzoeks programma	• Grootschalige implementatie van H2 in Nederland • Het oplossen van technische, wetenschappelijke en sociale barrières	Generiek	Veiligheid & regelgeving Ketenintegratie	2020	2026	2022 2022-2023 2023-2024 2025-2026	HyDelta 1: 42 publicaties over o.a. waterstof veiligheid & waterstof in het gasnetwerk Hydelta 2: 26 publicaties over o.a. economische & maatschappelijke aspecten van waterstof HyDelta 3: o.a. economische & maatschappelijke aspecten van H_2 HyDelta 4: veiligheid & waterstofnetwerk
Circo track - elektrolyser	Workshop	• Circulaire kansen identificeren in elektrolyseketen • Circulaire businessmodellen & ontwerpstrategieën bij productie, integratie en operatie van elektrolyse systemen • Componenten, BoP, stacks, systeemintegratie, operationeel	Generiek	Technologieontwikkeling Systeemintegratie Circulariteit	2025	2025	2025, feb-mrt 2025	Initiatie, Ideate & Implement Workshop Identificatie van 5 oplossingsrichtingen: 1. Ontwerpinterventies voor hoogwaardige recycling 2. Nieuwe businessmodellen ter bevordering van hergebruik 3. Samenwerking binnen de keten 4. Standaardisatie & gedeelde data 5. Focus op Total Cost of Ownership (TCO)

HEAVENN	Demonstrati programma	• Ontwikkeling van een volledig functionele groene waterstofketen in Noord-Nederland • Demoprojecten die productie, distributie, opslag & eindgebruik van H2 samenbrengen in functionele 'H2 valley'	Generiek	Ketenintegratie Marktontwikkeling	2020	2027	Meerdere demo-projecten gericht op productie, distributie, opslag, en lokaal eindgebruik van H_2, verdeeld over 4 clusters: • Chemical Park Delfzijl • Emmen Industry • Opslag & gebouwde omgeving • Groene mobiliteit
GroenvermogenNL	Transitie-programma	De transitie naar grootschalig gebruik van groene waterstof in de Nederlandse industrie ondersteunen	Generiek	Human capital Opschaling Technologieontwikkeling	2021	2030	Verscheidene projecten verdeeld over de volgende thema's: 1. Research & development 2. Pilot en kleine demonstraties 3. Opschaling 4. Human capital agenda

5 Overzicht van Circulaire Oplossingen

5.1 Inleiding en doelstelling

De transitie naar een duurzame waterstofeconomie vraagt niet alleen om technologische opschaling, maar ook om een fundamentele herziening van hoe materialen worden ontworpen, gebruikt en hergebruikt. Circulariteit vormt hierin een essentiële randvoorwaarde. Binnen de elektrolyse-industrie biedt een circulaire benadering de mogelijkheid om grondstoffenefficiëntie te vergroten, milieu-impact te reduceren en strategische afhankelijkheden van kritieke materialen te verkleinen.

Het doel van deze analyse is om inzicht te verkrijgen in de circulaire oplossingen die in Nederland worden ontwikkeld of toegepast voor elektrolysers en hun componenten. Daarbij is onderzocht:

- Welke organisaties (bedrijven en kennisinstellingen) actief zijn;
- Welke **strategieën en innovaties** worden toegepast;
- Wat de **technologische status en ontwikkelfase** is;
- En welke **uitdagingen, drijfveren en ondersteuningsbehoeften** bestaan.

Deze verkenning vormt een nulmeting van de stand van circulariteit binnen de Nederlandse elektrolysesector, en biedt daarmee een basis voor beleidsontwikkeling en monitoring van de voortgang van de Routekaart Circulaire Elektrolysers.

5.2 Onderzoeksvragen en reikwijdte

De centrale onderzoeksvragen luiden als volgt:

1. Welke bedrijven en kennisinstellingen in Nederland werken aan circulaire oplossingen voor elektrolysers en hun componenten?
2. Welke concrete oplossingen worden ontwikkeld of toegepast, en wat is de status en verwachte impact hiervan?
3. Op welke onderdelen van de R-ladder (Refuse, Reduce, Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture, Recycle, Recover) richten deze oplossingen zich?
4. Welke technische, economische of organisatorische uitdagingen spelen hierbij een rol?
5. Welke vormen van samenwerking, kennisdeling of beleidsmatige ondersteuning zijn gewenst om verdere opschaling te versnellen?

De analyse richt zich op bedrijven en kennisinstellingen in Nederland die betrokken zijn bij de ontwikkeling, productie, toepassing of het onderzoek van elektrolysetechnologie. De scope omvat alle relevante technologieën – **AWE, PEM, AEM en SOE** – en bestrijkt zowel de **stackcomponenten** (membranen, elektroden, frames, afdichtingen) als de **balance-of-plant** (waterbehandeling, power electronics, koeling, gassenafvoer).

5.3 Methodiek

Gezien het multidisciplinaire karakter van circulariteit is een combinatie van kwalitatieve en kwantitatieve onderzoeksmethoden toegepast:

- **Interviews** met 15 bedrijven en 5 kennisinstellingen, verspreid over Nederland, met variatie in omvang (start-up tot multinational) en focus (onderzoek, productie, systeemintegratie).
- **Analyse van CIRCO Track-resultaten** en inzichten uit het programma *Elektrolysers in de Energietransitie*, waarin circulaire ontwerpprincipes en businessmodellen werden onderzocht.
- **Gebruik van de Routekaart Circulaire Elektrolysers** als raamwerk om oplossingen te categoriseren volgens de R-ladder.
- **Literatuuronderzoek** van publieke rapporten (TNO, RVO, GroenvermogenNL, HyScaling, etc.), wetenschappelijke publicaties, en beleidsdocumenten.
- **Webonderzoek** via bedrijfswebsites, nieuwsartikelen, jaarverslagen en LinkedIn-profielen ter validatie van bedrijfsactiviteiten en technologieën.

De verkregen informatie is vastgelegd in een gestandaardiseerde database en vervolgens geanalyseerd per technologie, per component en per organisatiecategorie.

5.4 Aantal geïnterviewde partijen en type

In totaal zijn **20 partijen geïnterviewd** (15 bedrijven en 5 kennisinstellingen). De samenstelling weerspiegelt de diversiteit van het Nederlandse elektrolyselandschap:

- **OEM's/systeemontwikkelaars:** producenten van complete elektrolysesystemen of stacks (AWE, PEM, AEM, SOE);
- **Toeleveranciers/componentproducenten:** ontwikkelaars van elektroden, membranen, frames, afdichtingen, vermogenselektronica, compressie- en waterbehandelingssystemen;
- **Start-ups & scale-ups:** jonge technologiebedrijven gericht op materiaalinnovaties, modulaire ontwerpen of nieuwe businessmodellen;
- **Kennisinstellingen en testfaciliteiten:** universiteiten en onderzoeksinstituten die onderzoek uitvoeren naar nieuwe materialen, recycling, testmethoden en levensduurverlenging.

De interviews zijn anoniem verwerkt om bedrijfsgevoelige informatie te beschermen. De resultaten zijn geaggregeerd gepresenteerd op sectorniveau en, waar relevant, uitgesplitst naar type organisatie of technologie.

5.5 Typologie van respondenten en rol in de waardeketen

De Nederlandse elektrolysesector bestrijkt de gehele waardeketen: van fundamenteel onderzoek tot productie, systeemintegratie en onderhoud. De rollen zijn complementair en deels overlappend, zoals weergegeven in tabel 5.1.

Table 3: Overzicht rollen en mogelijke bijdragen aan circulariteit

Rol in waardeketen	Type organisatie	Kernactiviteiten	Bijdrage aan circulariteit
Ontwerp & productie van stacks	OEM's	Stackarchitectuur, materiaalkeuze, membraan- en elektrodeconfiguratie, validatie	Vermindering materiaalgebruik, ontwerp voor hergebruik, recycling, alternatieve businessmodellen (lease)
Systeemintegratie & BoP	OEM's/ toeleveranciers	Slimme integratie of verminderen van het aantal vermogenselektronica, koeling, waterbehandeling, gasmanagement	Levensduurverlenging, onderhoudsstrategieën, modulaire vervanging
Componentontwikkeling	Toeleveranciers/ start-ups	Ontwikkeling elektroden, membranen, frames, afdichtingen, PTL/BPP, sensoren, stack-ontwerp zonder losse EPDM-afdichtingen en zonder gefluoreerde membranen	Reduce/substitute van kritieke materialen, recyclebaarheid, scheidbaarheid van materialen
Onderzoek, testen & validatie	Kennisinstellingen/ testcentra	Onderzoek naar degradatie, nieuwe materialen, recyclingroutes, testprotocollen	Nieuwe materialen, onderhouds- en reparatiestrategieën (bijv. methoden om componenten te herstellen of te hergebruiken), validatie van circulariteitsconcepten
Niche-innovaties & digitalisering	Start-ups/scale-ups	PGM-reductie, PFAS-vrij, monitoring, modulaire systemen, datagedreven onderhoud, decentrale productie	Innovatie in gebruiksfase, data voor levensduurverlenging, circulaire serviceconcepten, reduce/substitute van (kritieke) materialen

5.6 Technologische volwassenheid (TRL) per type organisatie

De technologische status van circulaire oplossingen varieert aanzienlijk tussen actoren. Tabel 5.2 toont de indicatieve TRL-bereiken per type partij.

Table 4: Indicatieve TRL-niveaus per type organisatie

Type organisatie	Typische TRL-bandbreedte	Kernactiviteiten en focus
OEM's/ systeemontwikkelaars	TRL 6–9	Prototypes en commerciële systemen (0,5–5 MW+); focus op stackdesign, flexibiliteit, veiligheid en circulariteit via materiaalkeuze en modulariteit
Kennisinstellingen	TRL 2–6	Onderzoek naar membranen, elektroden, PFAS-vrije opties, recycling en testprotocollen
Toeleveranciers/ engineeringbedrijven	TRL 4–8	Industrieel toepasbare componenten, certificering, design-for-service, onderhoudbaarheid
Start-ups & scale-ups	TRL 3–7	Snelle iteratie in niches (PGM-reductie en PGM-vrij, PFAS-vrij, modulaire designs); lab- tot pilotfase; samenwerking met OEM's of kennisinstellingen

Daarnaast verschilt het TRL-niveau ook bij de verschillende technologieën:

- **AWE/alkaline**: hoog TRL (6–9); focus op industrialisatie en kostenverlaging; Circulariteit richt zich vooral op recycling van constructiematerialen (zoals nikkel, roestvast staal en koolstofstaal in eindplaten, frames en behuizingen) en op onderhoudsstrategieën voor verlengde levensduur van elektrodes en stacks. Ook het gebruik van hoogwaardige en recyclebare kunststof als celplaatmateriaal draagt bij aan circulariteit.
- **PEM**: hoog TRL (6–9); circulariteit richt zich op reductie van PGM-gebruik (Ir, Pt), ontwikkeling van PFAS-vrije of beter scheidbare membranen, en verlenging van de levensduur bij dynamisch bedrijf.
- **AEM**: Opkomend (3–6); nadruk op PFAS-vrije membranen, vervanging van kritieke materialen (zoals PGM's en titanium), en validatie van stabiliteit en opschaalbaarheid.
- **SOE**: Nog experimenteel (3–6); circulariteit wordt vooral verkend via materiaalkeuze (bijv. keramische elektrolyten, coatings) en systeemintegratie met restwarmte en industriële processen.

AEM- en SOE-technologieën bieden potentiële voordelen op het gebied van circulariteit ten opzichte van AWE- en PEM-technologieën, met name wat betreft het gebruik van kostbare en toxische materialen. Niettemin bevindt AEM zich in een minder volwassen ontwikkelingsstadium dan AWE- en PEM-systemen. AEM-technologie is ontworpen om goedkopere, niet-edelmetalen katalysatoren en een vaste polymeerelektrolyt toe te passen, in tegenstelling tot AWE die afhankelijk zijn van een toxische loogoplossing en PEM-systemen die gebruikmaken van dure PGM's. SOE-systemen kunnen een hoge energie-efficiëntie realiseren, maar vereisen bedrijfstemperaturen op hoog niveau en ondervinden uitdagingen op het gebied van materiaaldegradatie en integratie in bestaande industriële restwarmte-infrastructuren.

5.7 Overzicht van geïdentificeerde circulaire oplossingen

De Nederlandse elektrolysesector werkt al op meerdere fronten aan circulariteit, zij het in uiteenlopende stadia van volwassenheid.

De nadruk ligt momenteel vooral op:

- Materiaalreductie (met name vermindering van PGM's en PFAS);
- Herbruikbare en modulaire ontwerpen, gericht op onderhoud en opschaalbaarheid;
- Levensduurverlenging via operationele optimalisatie, onderhoud en monitoring.

Recycling en refurbishing staan daarentegen nog in een vroege ontwikkelfase (TRL 3–6). De meeste bedrijven geven aan dat hun huidige prioriteit ligt bij commerciële validatie, kostprijsverlaging en opschaling. Circulariteit in de zin van recycling of hergebruik, bijvoorbeeld door terugwinning van PGM's van elektroden of door hergebruik van stack-onderdelen, komt pas op de agenda wanneer systemen aan het einde van hun levensduur terugkomen – een proces dat pas over meerdere jaren zal spelen.

Wel wordt bij een groeiend aantal partijen rekening gehouden met toekomstige circulariteit in het ontwerp, bijvoorbeeld door materiaalkeuze, modulaire opbouw of het vermijden van kritieke grondstoffen. De combinatie van sterke technologische innovatie, industriële maakcapaciteit en onderzoeksinfrastructuur geeft Nederland een solide uitgangspositie om richting 2030–2035 circulaire elektrolysetechnologieën op te schalen zodra de markt daarvoor rijp is.

5.7.1 Hoofdcategorieën van circulaire oplossingen

De Nederlandse elektrolysesector werkt op uiteenlopende manieren aan circulariteit. De geïdentificeerde oplossingen kunnen worden gegroepeerd in zes hoofdcategorieën, die verschillende niveaus van circulariteit op de R-ladder beslaan.

Voordat in dit hoofdstuk wordt ingegaan op de verschillende categorieën circulaire oplossingen, is het nuttig om twee veelgebruikte begrippen te verduidelijken. De termen *design-for-service* en *refurbishment* komen op meerdere plaatsen in dit rapport terug en worden hier kort gedefinieerd voor de duidelijkheid.

Design-for-service verwijst naar het zodanig ontwerpen van elektrolysesystemen dat onderhoud, inspectie en vervanging van onderdelen eenvoudig kunnen plaatsvinden. Dit omvat bijvoorbeeld gestandaardiseerde en modulaire ontwerpen van stacks en cellen, zodat individuele componenten vervangen of gerepareerd kunnen worden zonder het volledige systeem te demonteren.

Refurbishment-concept houdt in dat gebruikte of deels versleten componenten (zoals eindplaten, frames of volledige stacks) worden teruggenomen door de fabrikant, gereinigd, getest en hersteld voor hergebruik binnen nieuwe of gereviseerde systemen. Refurbishment kan dus zowel een ontwerpprincipe zijn – het product zó ontwerpen dat revisie technisch mogelijk is – als een bedrijfsmodel, waarbij OEM's gereviseerde onderdelen of systemen opnieuw aanbieden aan klanten.

In de rest van dit hoofdstuk beschrijven we de hoofdcategorieën van circulaire oplossingen.

Levensduurverlenging en onderhoudsstrategieën – R2 (Redesign), R3 (Reuse), R4 (Repair), R5 (Refurbish)

Een groot deel van de Nederlandse partijen richt zich op levensduurverlenging van stacks en componenten, omdat dit direct bijdraagt aan kostenverlaging en grondstoffenefficiëntie.

Belangrijkste strategieën zijn:

- **R2 – Redesign:** robuuste materiaalkeuzes en beschermende coatings en herontwerp ook op systeemarchitectuurniveau; meerdere OEM's en onderzoeksinstellingen werken aan verbeterde elektrode- en membraanmaterialen die degradatie door thermische en chemische belasting beperken.
- **R2 & R4 – Design-for-service:** systeemintegratoren ontwikkelen modulaire stacks en BoP-componenten die eenvoudig te onderhouden of deels te vervangen zijn, zonder volledige demontage van het systeem.
- **R3 & R4 – Predictief onderhoud en monitoring:** sensoren en data-analyse maken vroegtijdige detectie van prestatieverlies mogelijk, wat slijtage beperkt en onderhoud efficiënter maakt.
- **R5 – Refurbish/hergebruik van onderdelen:** eindplaten, frames, gasmodules en trekstangen worden in sommige ontwerpen hergebruikt na inspectie of herverwerking.

Bij alkaline-systemen is hergebruik technisch beter haalbaar dan bij PEM-systemen, omdat de gebruikte materialen (zoals nikkel en staal) eenvoudiger te demonteren, reinigen en opnieuw te assembleren zijn, terwijl PEM-stacks gevoeliger zijn voor verontreiniging en afdichtingsschade bij demontage.

Vermindering of substitutie van kritieke grondstoffen – R0 (Refuse), R1 (Reduce), R2 (Redesign), R8 (Recycle)

Vrijwel alle geïnterviewde partijen noemen de afhankelijkheid van kritieke grondstoffen als een belangrijk aandachtspunt.

Concrete oplossingsrichtingen zijn:

- **R1 & R2 – Reductie van edelmetaalgebruik (PGM's)** in PEM-elektrodes door dunnere coatings, nanoporeuze structuren en alternatieve legeringen.
- **R0 & R2 – Vermijding van PFAS-houdende polymeren** in membranen en afdichtingen; onderzoek naar alternatieven zoals thermoplasten, EPDM-rubbers en polyethersulfonen (PPSU/PPS) met additieven.
  → De meeste partijen **streven ernaar om PFAS-vrije membranen te ontwikkelen**, maar erkennen dat **er momenteel nog geen functioneel volwaardig alternatief beschikbaar is**; verdere R&D is noodzakelijk.
- **R8 – Gebruik van zuivere metalen** zoals nikkel, koolstofstaal, titanium en koper voor bipolaire platen, stroomverdelers, behuizingen, frames en bevestigingsmaterialen die daardoor makkelijker te scheiden en recyclen zijn. Daarnaast wordt gekeken naar het aanbrengen van katalysatoren op de titanium Porous Transport Layer (PTL) in plaats van op membranen, wat scheiding en het terugwinnen van de katalysator vergemakkelijkt.
  → Dit hoort inhoudelijk deels ook onder *recycling van materialen*, maar wordt hier vermeld omdat **materiaalkeuze en zuiverheid reeds in de ontwerpfase** bepalend zijn voor toekomstige recycleerbaarheid.

Met name kennisinstellingen en toeleveranciers (zoals DIFFER, TU/e, VSParticle, SparkNano) richten zich op reduce en substitute binnen de R-ladder, terwijl OEM's (VDL, Bosch, Siemens Energy) deze innovaties vertalen naar hun stack-ontwerpen.

PGM-reductie en PFAS-vrije materialen worden breed gezien als voorwaarde voor toekomstige regelgeving en markttoegang, maar bevinden zich nog grotendeels in de onderzoeks- en validatiefase.

Ontwerp voor demontage of refurbishing – R2 (Redesign), R3 (Reuse), R4 (Repair), R5 (Refurbish), R6 (Remanufacture)

Circulariteit wordt steeds vaker meegenomen als ontwerpoverweging.

Belangrijkste principes zijn:

- **R2 & R4 – Mechanisch scheidbare verbindingen:** bout- of klemconstructies in plaats van gelaste of verlijmde verbindingen maken onderhoud en demontage eenvoudiger.
- **R4 & R5 – Losse afdichtingen:** afzonderlijke seals in plaats van geïntegreerde afdichtingen, zodat materialen beter kunnen worden gescheiden.
- **R3 – Modulaire stack-opbouw:** cellen en stacks worden als vervangbare modules ontworpen, wat reparatie, refurbishment en remanufacturing vereenvoudigt. Stacks met lagere prestaties kunnen worden hergebruikt in toepassingen met minder hoge eisen.
- **R0 – Ontwerp zonder gevaarlijke stoffen:** door PFAS-vrije en niet-toxische lijmen toe te passen, wordt veilige demontage mogelijk.

Toegepaste voorbeelden worden genoemd bij VDL Hydrogen Systems, Bosch, Siemens Energy, XINTC en Battolyser Systems, waar *design-for-service* en *refurbishment* integraal onderdeel zijn van het ontwikkelproces.

Hoewel richtlijnen en testprotocollen voor herhaalde montage- en demontagecycli momenteel nog niet bestaan, wordt vanuit de sector benadrukt dat de ontwikkeling daarvan wenselijk is om circulair ontwerp beter te kunnen valideren.

Recycling van materialen (membranen, elektroden, frames) – R7 (Repurpose), R8 (Recycle), R9 (Recover)

Recycling bevindt zich overwegend in de pilotfase, maar het belang ervan wordt breed onderkend. Belangrijkste initiatieven:

- **R8 – Recycling van nikkel-elektrodes (AWE):** OEM's en kennisinstellingen onderzoeken terugwinning van nikkel en katalytische lagen via smelten of elektrochemische scheiding.
- **R7 & R8 – Hergebruik of recycling van metalen stackframes en eindplaten:** stalen, nikkelen of titanium onderdelen worden hergebruikt of omgesmolten; kunststofframes (zoals thermoplasten zonder vezelversterking, bijv. PPS of PPSU) kunnen worden vermalen en herverwerkt tot nieuwe componenten.

- **R8 – Recycling van membraanmaterialen:** nog experimenteel; onderzoek loopt naar scheiding van polymeren en katalysatorlagen bij MEA's. Innovaties waarbij katalysatoren op *porous transport layers (PTL's)* worden aangebracht i.p.v. op membranen vergemakkelijken toekomstige terugwinning van PGM's.
- **R3 & R8 – Closed-loop samenwerking:** in enkele projecten worden gebruikte elektrodes teruggeleverd aan de leverancier voor herverwerking.

De algemene trend is dat recycling van actieve componenten (zoals katalysatoren) technisch nog complex is, terwijl recycling van structurele delen (frames, behuizingen, leidingen) al commercieel haalbaar is. Bovendien is nog onduidelijk of het gebruik van secundaire materialen voor katalysatoren dezelfde prestaties (zoals activiteit en stabiliteit) oplevert. Bedrijven houden bij materiaalkeuze en ontwerp steeds vaker rekening met toekomstige recycling ("design for future recycling").

Modulaire en herbruikbare componenten – R2 (Redesign), R3 (Reuse), R4 (Repair), R5 (Refurbish), R6 (Remanufacture)

Modulariteit wordt gezien als sleutel tot circulariteit, kostenreductie én opschaalbaarheid.

- **R3 & R4 – Modulaire stack-architecturen:** herbruikbare submodules (bijv. 10–20 cellen per unit) kunnen afzonderlijk worden vervangen, onderhouden, of gerepareerd. Hierbij worden bijvoorbeeld afdichtingen of stroomverdelers vervangen zonder de volledige stack te demonteren. In dit geval gaat het dus om modulariteit binnen één stack – het onderhoud of de vervanging van individuele cellen of celgroepen.
  Bij modulaire stack-opbouw daarentegen gaat het om modulariteit op een hoger niveau: stacks die uit meerdere cellen bestaan en als geheel kunnen worden uitgewisseld of opgeschaald binnen een systeem.
- **R4 & R5 – Gestandaardiseerde componenten:** uniforme frames, eindplaten en aansluitingen beperken afval en vereenvoudigen logistiek.
- **R2 – Plug-and-play subsystemen:** BoP-modules (zoals waterbehandeling of compressie-units) en rekken voor power electronics worden modulair opgebouwd, zodat ze bij systeemupgrades eenvoudig kunnen worden vervangen of hergebruikt – het gaat dus niet om monitoring, maar om herbruikbare systeemdelen die aansluiten op verschillende configuraties.
- **R3 – Testopstellingen bij kennisinstellingen:** deze worden hergebruikt in meerdere R&D-projecten en dragen zo bij aan materiaal- en kostenefficiëntie.

Deze ontwerpfilosofie sluit aan bij OEM's activiteiten (zoals bij XINTC) en bredere initiatieven binnen *HyScaling* en *GroenvermogenNL*, waar modulariteit ook wordt gezien als middel om de leveringsketen te standaardiseren en circulair te maken.

Circulariteit op systeemniveau (efficiëntie, flexibiliteit, energiehergebruik) – R1 (Reduce), R2 (Redesign)

Naast materiaalkringlopen richten meerdere partijen zich op systeemniveau-oplossingen die bijdragen aan efficiënt gebruik van energie en hulpbronnen:

- **R1 – Hogere systeem-efficiëntie** door restwarmte-integratie (SOE) en hergebruik van koelwater en zuurstofstromen.
- **R2 – Flexibele operatie** bij alkaline-systemen (zoals bij Battolyser Systems, VDL Hydrogen Systems, XINTC), om hernieuwbare elektriciteit optimaal te benutten en afschakeling te voorkomen.
- **R2 – Slimme besturing en load-management** beperken degradatie van componenten en verlengen de levensduur.
- **R1 & R2 – Lokale en decentrale productieconcepten** (zoals bij DEMCON, ZEF) verminderen transportverliezen en materiaalgebruik door directe koppeling van elektrolysers aan duurzame elektriciteitsbronnen, zonder zware tussenliggende conversie- en vermogenselektronica.

Deze benaderingen vallen onder "circulaire efficiëntie": een hoger rendement en lagere hulpbronneninput per geproduceerde kilogram waterstof.

Circulaire businessmodellen – R1 (Reduce), R2 (Redesign), R3 (Reuse), R4 (Repair), R5 (Refurbish), R6 (Remanufacture)

Sommige OEM's experimenteren met nieuwe businessmodellen waarbij de elektrolyser in hun bezit blijft en via lease of *Electrolyser-as-a-Service* wordt aangeboden.

Hierdoor blijven producenten verantwoordelijk voor prestaties, onderhoud en end-of-life-verwerking:

- **R1 & R2 – Monitoring en bijsturing** zorgen dat de elektrolyser optimaal opereert en slijtage beperkt blijft.
- **R3 & R4 – Uitruil van stacks of modules** maakt hergebruik in andere toepassingen mogelijk.
- **R5 & R6 – Refurbish en remanufacture** van teruggenomen installaties levert zowel materiaal- als kenniswinst op, doordat OEM's gebruikte systemen kunnen analyseren en verbeteren.

Deze aanpak kan de transitie naar een circulaire servicemarkt versnellen en levert waardevolle feedback op voor R&D en productverbetering. Daarnaast zijn eindgebruikers doorgaans huiverig voor de aanschaf van gebruikte elektrolyser(stack)s. Door circulaire businessmodellen, waarbij de OEM verantwoordelijkheid neemt voor de prestaties, wordt deze drempel weggenomen.

5.7.2 Samenvattende Matrix van Oplossingen

De onderstaande tabel geeft een samenvattend overzicht van de circulaire oplossingen die momenteel in Nederland worden ontwikkeld of toegepast. De indeling volgt de hoofdcategorieën uit de voorgaande paragrafen en is geordend volgens de R-ladder van circulariteit.

Tabel 5: Overzicht van circulaire oplossingen in de Nederlandse elektrolysesector

Categorie	R-strategieën	Type organisatie(s)	Voorbeelden van oplossingen	Doelen (milieu, kosten, autonomie)	TRL	Verwachte gereedheid	Belangrijkste uitdagingen	Beleids-/ondersteuningsbehoefte
Levensduurverlenging & onderhoudsstrategieën	R2, R3, R4, R6	OEM's, leveranciers, kennisinstellingen	Verbeterde coatings en membranen; design-for-service; predictief onderhoud; hergebruik van eindplaten en stackframes; modulaire stacks van kunststof die onafhankelijk kunnen draaien	Langer gebruik van componenten; minder materiaalverbruik; lagere onderhoudskosten; **lagere milieu-impact**	5–8	2026–2030	Technische betrouwbaarheid bij langdurig cyclisch bedrijf; beperkte validatie-data door jonge markt	Financiering voor duurtesten en testfaciliteiten; standaardisatie van onderdelen, onderhoudsprotocollen en operationele condities
Vermindering of substitutie van kritieke grondstoffen	R0, R1, R2, R8	Kennisinstellingen, OEM's, start-ups	Reductie van PGM's (Ir, Pt) in PEM-elektroden; PFAS-vrije membranen; alternatieve rubbers (EPDM); nikkel- of koolstofgebaseerde elektroden (vooral AWE; deels PEM)	Minder afhankelijkheid van schaarse materialen; kostenreductie; anticiperen op EU-wetgeving; **lagere milieu-impact**	3–7	2027–2032	Prestatie- en stabiliteitsverlies bij alternatieve materialen; beperkte testcapaciteit en industriële validatie	R&D-steun voor materiaalontwikkeling; Europese normering voor PFAS-vrije elektrolyse; intensievere samenwerking tussen start-ups en OEM's
Ontwerp voor demontage of refurbishing	R2, R3, R4, R5, R6	OEM's, leveranciers	Losse afdichtingen; mechanisch scheidbare verbindingen; modulaire cellen; hergebruik van trekstangen en eindplaten	Eenvoudiger onderhoud, hergebruik en recycling; hogere veiligheid bij demontage; **lagere milieu-impact**	4–7	2026–2029	Balans tussen lekdichtheid, veiligheid en demontagegemak; IP-bescherming door OEM's	Richtlijnen en design-tools voor circulair ontwerp; pilotfinanciering voor **lease- en refurbish-concepten**; afspraken over aanpassing van systemen door eindgebruikers
Recycling van materialen (membranen, elektroden, frames)	R7, R8, R9	Kennisinstellingen, OEM's	Recycling van PGM's, nikkel en RVS; terugname van elektroden; thermoplastische frames;	Kostenreductie; minder afhankelijkheid van kritieke materialen; sluiten van	3–6	2028–2033	Scheiding van actieve lagen en substraten (bijv. bij MEA's); lage marktwaarde van	Subsidiering van recyclingpilots; stimulering van **industriële retourketens** (gestructureerde

			gescheiden materiaalstromen	materiaalkringlopen; CO_2- en afvalreductie; **lagere milieu-impact**			gerecyclede materialen	inzameling van gebruikte onderdelen); samenwerking met metaalverwerkingsindustrie
Modulaire en herbruikbare componenten	R2, R3, R4, R5, R6	OEM's, start-ups, engineeringbedrijven	Modulaire stacks (10–20 of meer cellen per unit); gestandaardiseerde interfaces; herbruikbare BoP-modules; plug-and-play systeemarchitectuur	Flexibele opschaling; kortere service-tijd; lagere LCOH; schaalvoordelen; **lagere milieu-impact**	5–8	2025–2030	Compatibiliteit tussen leveranciers; ontbrekende technische standaarden	Ontwikkeling van nationale standaard voor stack-architectuur en operationele condities; ondersteuning voor systeemdemonstrators
Systeemniveau circulariteit (efficiëntie, flexibiliteit, energiehergebruik)	R1, R2	OEM's, kennisinstellingen, start-ups	Flexibele operatie (0–100 % load); warmte- en waterhergebruik; slimme besturing; decentrale productie-concepten	Hogere energie-efficiëntie; minder curtailment; lagere operationele CO_2-voetafdruk; minder materiaalgebruik; **lagere milieu-impact**	6–9	2025–2030	Systeemcomplexiteit; integratie met stroomnetten; beperkte marktprikkels voor **flexibel stroomgebruik**	Beleidskaders en stimulansen voor flexibiliteit in stroomgebruik; opname van warmte- en waterhergebruik in subsidieregelingen; platform voor keten-brede samenwerking
Circulaire businessmodellen	R1, R3, R4, R5, R6	OEM's, componentenleveranciers	Real-time monitoring; preventief onderhoud; uitruil van gebruikte stacks; remanufacturing; terugname van elektroden	Efficiënter gebruik van systemen; waardevolle R&D-informatie; lagere kosten over levenscyclus; **lagere milieu-impact**	5–8	2026–2032	Onvoldoende regelgeving; hoge kapitaalinvestering voor OEM's	Duidelijke regelgeving en financiële/fiscale stimulansen voor lease-modellen; subsidie-instrumenten voor circulaire serviceconcepten

Analyse op hoofdlijnen

- **Technologische volwassenheid:** De meeste Nederlandse initiatieven bevinden zich tussen TRL 5–8, met enkele fundamentele innovaties (PGM-vrij en -arm, PFAS-vrij) in TRL 3–6.
- **Marktfocus:** De commerciële vraag naar groene waterstof is nog beperkt. Bedrijven richten zich daarom primair op kostenreductie, betrouwbaarheid en opschaalbaarheid. Circulariteit krijgt slechts prioriteit waar het directe kostenbesparingen of strategische voordelen oplevert (zoals materiaalreductie of minder importafhankelijkheid).
- **Voortgang:** *Levensduurverlenging* en *kritieke-materialenreductie* zijn het verst gevorderd en al in commerciële ontwerpen geïntegreerd. *Recycling* en *refurbishing* bevinden zich nog in R&D- of pilotfase, maar worden in toenemende mate meegenomen in ontwerpbeslissingen.
- **Beleidsbehoefte:** De grootste ondersteuningsvraag ligt bij:
    - Uitbreiding van test- en validatiefaciliteiten (met name voor langdurige duurtesten),
    - Standaardisatie van ontwerpprincipes, onderhoudsprotocollen en operationele condities,
    - Financiering van pilot- en demoprojecten waarin de Nederlandse toeleverketen een rol speelt,
    - Stimulering van laag-TRL en potentieel disruptieve innovaties (TRL 2–5) ter ondersteuning van baanbrekende materiaal- en ontwerpconcepten.

6 Analyse van Trends en Lessen

De verkenning van circulaire oplossingen bij Nederlandse bedrijven en kennisinstellingen laat zien dat de elektrolysesector zich in een fase van snelle ontwikkeling bevindt. Hoewel de primaire focus nog steeds ligt op technologische opschaling en kostenverlaging, worden de principes van circulariteit geleidelijk geïntegreerd in ontwerpkeuzes, materiaalgebruik en operationele strategieën. Dit hoofdstuk bespreekt de belangrijkste trends, uitdagingen en lessen, ingedeeld naar technologische status, gemene delers, barrières, kosten- en materiaalimpact, ondersteuningsbehoeften en toekomstperspectief.

6.1 Technologische status en volwassenheid

De technologische status en volwassenheid van de verschillende elektrolysetechnologieën is deels reeds behandeld in sectie 5.6. Voor de volledigheid en samenhang van dit hoofdstuk worden de belangrijkste bevindingen hier nogmaals samengevat en aangevuld met relevante trends en lessen uit de sector.

De vier belangrijkste elektrolysetechnologieën – alkaline (AWE), proton exchange membrane (PEM), anion exchange membrane (AEM) en solid oxide electrolysis (SOE) – bevinden zich op verschillende niveaus van technologische en marktrijpe ontwikkeling, met elk hun eigen circulariteitskansen en uitdagingen.

Alkaline elektrolyse (AWE) is technologisch het verst ontwikkeld in Nederland en Europa. Meerdere OEM's bewegen van prototype naar commerciële demonstratie (TRL 6–9). De huidige innovaties richten zich op flexibel bedrijf (0–100% belasting), lekdichtheid, en robuuste materiaalkeuze, met name voor elektrodes (nikkel), thermoplasten en EPDM-afdichtingen. Circulariteit komt hier vooral tot uiting via *design-for-service,* hoog gestandaardiseerde ontwerp en *design-for-production* (massaproductie tegen laagste kosten) en *refurbishment*-concepten, waarbij onderdelen zoals eindplaten of trekstangen hergebruikt kunnen worden.

PEM-elektrolyse is internationaal gezien commercieel volwassen, maar in Nederland is competitief voordeel te behalen bij systeemintegratie, onderhoud en componenttoelevering (TRL 6–9). Circulariteitsmaatregelen richten zich op de reductie van edelmetalen (PGM's, zoals iridium en platina) en levensduurverlenging onder dynamische bedrijfscondities. Zo zijn in Nederland meerdere spelers actief die zich richten op de innovatieve productie van elektrodes waarbij minder PGM's gebruikt worden. Recycling van membranen en de vervanging van PFAS zijn daarentegen nog grotendeels R&D-gedreven en technisch uitdagend.

AEM-elektrolyse bevindt zich in een opkomende fase (TRL 3–6) en wordt gezien als veelbelovende route voor de reductie van kritieke materialen en de ontwikkeling van PFAS-vrije membranen. De belangrijkste technische drempels liggen nog bij stabiliteit, prestaties van de membranen en opschaling naar industriële schaal. De circulariteitswinst ligt hier vooral in het vermijden van schaarse en toxische materialen (Refuse/Reduce).

SOE-elektrolyse heeft nog een lage TRL (3–6), maar biedt strategische kansen voor sector- en warmte-integratie. De grootste circulariteitsvoordelen worden hier behaald op systeemniveau – door warmtehergebruik en efficiëntieverbetering – in plaats van via componenthergebruik. Materialen en recycling staan hier nog in de onderzoeksfase, maar de koppeling met industriële restwarmte maakt SOE-systemen intrinsiek aantrekkelijk vanuit circulariteitsperspectief.

6.2 Gemene delers en best practices

Ondanks de technologische verschillen zijn er duidelijke gemene delers zichtbaar tussen de bedrijven en programma's die circulariteit actief meenemen.

Een eerste belangrijke les is dat levensduurverlenging de meest directe winst oplevert. Robuuste coatings, condition-monitoring en *design-for-service* worden inmiddels breed toegepast. Refurbishment van niet-actieve componenten zoals eindplaten en trekstangen wordt ook steeds gebruikelijker.

Bovendien is het verminderen en daarnaast het terugwinnen van PGM's een prioriteit bij alle partijen. Het is duidelijk dat dit een aanzienlijke kostenbesparing oplevert en, op strategisch vlak, voor minder afhankelijkheid van grondstoffen zorgt. Bij AWE worden geheel PGM-vrije systemen onderzocht, terwijl bij PEM wordt erkend dat iridium of een vergelijkbaar materiaal (zoals ruthenium) altijd in bepaalde mate nodig zal zijn. De hoeveelheid gebruikt iridium wordt geminimaliseerd. Zowel OEM's als toeleveranciers streven hiernaar.

Daarnaast blijkt materiaalzuiverheid een cruciale voorwaarde voor toekomstige recycling. Bedrijven die kiezen voor zuivere metalen (zoals nikkel of RVS) en thermoplasten zonder vezelversterking vergroten hun

recyclepotentieel aanzienlijk. Het vermijden van composieten wordt in de praktijk beschouwd als een *best practice*.

Een derde gemene deler betreft ontwerpkeuzes die demontage vergemakkelijken, zoals het gebruik van losse afdichtingen (EPDM) in plaats van geïntegreerde seals, of het gebruik van geïntegreerde afdichtingsfunctie in de kunststofcelplaten. Dit maakt onderhoud eenvoudiger en verhoogt de materiaalterugwinbaarheid.

Modulariteit en gestandaardiseerd ontwerp blijkt een ander terugkerend thema. Modulaire stacks en submodules verkorten stilstand bij onderhoud, verlagen materiaalverlies en maken het mogelijk om upgrades door te voeren zonder volledige vervanging van installaties. Daarnaast maakt gestandaardiseerd ontwerp massaproductie mogelijk, wat leidt tot schaalvoordelen, het besparen van kosten en tevens bijdraagt aan circulariteit omdat het onderhoud, reparaties. refurbishing en remanufacturing vergemakkelijkt.

Tot slot geldt systeemflexibiliteit als een belangrijke vorm van circulaire efficiëntie: door dynamisch te opereren (0–100% load) kunnen installaties beter inspelen op de variabiliteit van hernieuwbare elektriciteit, waardoor curtailment afneemt en componenten minder zwaar worden belast.

6.3 Uitdagingen en barrières

Hoewel de technische vooruitgang aanzienlijk is, blijven er belangrijke obstakels bestaan op technisch, economisch, organisatorisch en human-capital vlak.

Technisch gezien is de recycling van actieve lagen (zoals elektroden en membranen) nog complex. De scheiding van katalysatorlagen van hun dragers is technisch moeilijk uitvoerbaar, terwijl alternatieven met minder edelmetalen nog onvoldoende bewezen stabiliteit bieden. Ook bestaat spanning tussen lekdichtheid en demontagegemak: mechanisch scheidbare constructies zijn aantrekkelijk voor circulariteit, maar kunnen de veiligheid en betrouwbaarheid onder druk beïnvloeden. Bovendien ontbreekt het aan langjarige duurtesten onder dynamische bedrijfscondities, waardoor betrouwbare degradatiedata schaars zijn.

Economisch kampt de sector met een structurele financieringskloof én een stagnerende markt. Hoewel eindgebruikers en industriële afnemers terughoudend zijn met investeringen in grootschalige elektrolyserinstallaties – mede door hoge kosten, trage besluitvorming en onzekerheid over afzetmarkten voor groene waterstof – ondervinden OEM's en componentenleveranciers daardoor extra moeilijkheden bij het aantrekken van kapitaal voor fabrieksopbouw, pilotproductie en demonstratieprojecten. Tegelijk blijft de businesscase voor recycling van specifieke componenten zwak zolang de marktvolumes laag en de materiaalprijzen volatiel zijn.

Organisatorisch ontbreekt het nog aan gestandaardiseerde interfaces, refurbish-protocollen en methoden om circulariteit meetbaar te maken. Zorgen over intellectueel eigendom beperken de bereidheid tot datadeling, wat samenwerking in retourstromen bemoeilijkt. Ook bestaan er te weinig open testfaciliteiten buiten projectconsortia, waardoor validatie en kennisdeling versnipperd blijven.

Human capital vormt ten slotte een structurele uitdaging. De groei van de elektrolyse- en maakindustrie wordt geremd door een tekort aan technisch geschoold personeel, met name in specialistische disciplines zoals materiaalkunde, systeemintegratie, procestechniek en onderhoud. Zonder versterking van de kennis- en opleidingsbasis dreigt de verdere opschaling van productiecapaciteit en innovatiekracht te stagneren.

6.4 Kosten- en materiaalimpact

De invoering van circulaire ontwerpstrategieën leidt op korte termijn tot hogere ontwikkel- en testkosten, maar op middellange termijn tot lagere totale kosten (TCO/LCOH) dankzij langere levensduur, onderhoudsgemak en hogere systeemefficiëntie.

Wat betreft materiaalimpact springen vier groepen grondstoffen eruit:

- **Iridium en platina (PGM's)** in PEM-elektroden staan onder de grootste strategische druk. Hun reductie of vervanging (alhoewel technisch uitdagend) is topprioriteit, zowel om kosten te verlagen als om leveringsrisico's te beperken.
- **PFAS-houdende polymeren** worden steeds problematischer vanwege aankomende regelgeving en reputatierisico's. Alternatieven zoals thermoplasten of EPDM zijn bij AWE haalbaar, maar in PEM en AEM nog in R&D-fase.

- **Nikkel** voor AWE-elektroden en bipolaire platen is breed inzetbaar en goed recyclebaar, maar blijft gevoelig voor prijsfluctuaties en aanbodzekerheid.
- **Titanium** is essentieel in PEM-elektrolyse vanwege zijn robuustheid en chemische stabiliteit, maar staat onder druk vanwege kosten, CO_2-impact, en recyclinguitdagingen. Er wordt actief gezocht naar vervangende materialen zoals RVS, mits goed gecoat.

Op systeemniveau zorgen maatregelen als warmte- en waterhergebruik voor structurele verlaging van operationele kosten en een lagere milieu-impact per kilogram waterstof.

6.5 Ondersteuningsbehoeften

Om de technologische en organisatorische uitdagingen die in dit hoofdstuk zijn beschreven te overwinnen, is een gerichte inzet van beleids- en ondersteuningsinstrumenten wenselijk en van groot belang .

De eerste prioriteit ligt bij **test- en validatiefaciliteiten**. Er is behoefte aan langjarige duurtesten, gestandaardiseerde condities (zoals operationele druk) en uniforme protocollen voor dynamisch bedrijf (0–100 % load), inclusief onafhankelijke metingen van prestaties en degradatie. Componentenleveranciers vragen daarnaast om validatieprogramma's waarin innovatieve producten onafhankelijk van industriële OEM's kunnen worden getest, zonder directe afhankelijkheid van commerciële contracten.

Een tweede behoefte betreft **financiering en stimuleringsinstrumenten**. De huidige programma's zijn vaak gericht op CO_2-reductie of korte-termijn-businesscases, terwijl de maakindustrie kapitaalintensieve fabrieken en pilotlijnen nodig heeft. Daardoor worden vooral tijdelijke projecten gefinancierd die de onrendabele top afdekken, maar zelden leiden tot fundamentele verbeteringen in elektrolysertechnologie of structurele verlaging van de LCOH. Daarnaast heeft GroenvermogenNL een budget van ongeveer €100 miljoen voor pilot- en kleine demonstratieprojecten. De focus ligt echter voornamelijk op hogere TRL-niveaus (7-8), waardoor er nog steeds behoefte is aan andere vormen van subsidies die innovatieve oplossingen met een lagere TRL ondersteunen.

Steunregelingen zouden daarom sterker kunnen focussen op **laag-TRL maar potentieel disruptieve innovaties**, én op versterking van de Nederlandse waardeketen. Zo wordt voorkomen dat investeringen weglekken naar reeds goedkope, maar weinig innovatieve buitenlandse aanbieders. Door gericht te investeren in technologische doorbraken kan Nederland een sleutelrol vervullen in het openbreken van de markt voor groene waterstof en het versnellen van de transitie naar kostenefficiënte én circulaire productie.

Daarnaast is **standaardisatie** cruciaal – zowel op technisch vlak (stack-interfaces, operationele condities zoals druk en temperatuur, refurbish- en recycleprotocollen) als op methodologisch vlak (rapportage van prestaties, degradatie en circulariteitsindicatoren). Standaardisatie versnelt het testen en valideren van nieuwe componenten doordat innovaties onder vergelijkbare condities kunnen worden beoordeeld.

Een concreet instrument hierbij is het **materiaalpaspoort**: een document dat inzicht biedt in de gebruikte materialen, coatings en verbindingstechnieken per component. Een dergelijk paspoort, vergelijkbaar met de aanpak in de auto-industrie, maakt demontage, recycling en traceerbaarheid eenvoudiger. Zo wordt circulariteit niet alleen een ontwerpprincipe, maar ook een praktisch uitvoerbare standaard die bijdraagt aan verantwoord grondstoffengebruik en transparantie in de keten.

Ook **ketenafspraken over retourstromen** zijn essentieel. Leveranciers en OEM's dienen structurele afspraken te maken over terugname van elektrolysers, elektroden, membranen en frames, inclusief datadeling over materiaalstromen en hergebruik.

Verder is **kennisdeling** een cruciale succesfactor. Vanuit de sector klinkt een duidelijke roep om de oprichting van een landelijk **Electrolyser Competence Center**, breed gedragen door programma's als High Tech NL, NXTGEN Hightech en GroenvermogenNL. Dit centrum kan fungeren als centraal loket voor samenwerking, standaardisering en versnelling van innovatie. Bestaande initiatieven zoals communities of practice worden waardevol gevonden, maar nog als versnipperd en te vrijblijvend ervaren.

Daarnaast is er behoefte aan **duidelijke regelgeving** die nieuwe businessmodellen zoals lease of Product-as-a-Service mogelijk maakt, zonder toename van administratieve lasten. Gerichte subsidiëring van dergelijke concepten is wenselijk, gezien de hoge kapitaalinvesteringen die hiermee gepaard gaan. Dit stimuleert innovatieve modellen die circulariteit en levensduurverlenging van elektrolysesystemen bevorderen.

Tot slot is **stimulering van high-tech productietechnologieën** noodzakelijk – vergelijkbaar met de rol die ASML speelt in de chipindustrie – om Nederland strategisch te positioneren in deze groeimarkt. Dankzij sterke

kennisposities in geavanceerde coatingtechnologieën, zoals Atomic Layer Deposition (ALD), beschikt Nederland over een unieke kans om toonaangevend te worden in de productie van hoogwaardige elektrolysercomponenten.

6.6 Toekomstperspectief en Roadmap

De ontwikkelingsrichting van circulaire elektrolysetechnologieën kan – mits in de ondersteuningsbehoeften wordt voorzien – in drie fasen worden onderscheiden.

Korte termijn (2025–2027): De komende jaren ligt de nadruk op praktische toepassingen van circulariteitsprincipes binnen AWE-demonstrators, met modulaire serviceconcepten en refurbishment van niet-actieve componenten. Predictief onderhoud en flexibel bedrijf worden opgeschaald binnen industriële pilots. De eerste recyclingpilots voor nikkelcomponenten en thermoplastische frames worden verwacht, evenals initiatieven voor standaardisatie van stack-interfaces en onderhoudsprotocollen. Daarnaast is de oprichting van een *Elektrolyser Competence Centre* wenselijk om kennisdeling, standaardisering en de versterking van de Nederlandse marktpositie te bevorderen. Ook wordt gestart met het opschalen van high-tech productietechnologieën, zoals coatingplatforms en ALD-processen, die essentieel zijn voor kostenefficiënte en circulaire componentproductie

Middellange termijn (2028–2030): In deze fase worden PGM-reducties in PEM-systemen commercieel relevant, en bereiken PFAS-arme of -vrije membranen TRL 6–7. Circulaire businessmodellen zoals *Product-as-a-Service* komen op, waarbij componenten worden teruggenomen en opnieuw gekwalificeerd. Warmte- en waterhergebruik worden standaard in BoP-pakketten geïntegreerd. Bovendien vindt marktbrede validatie plaats van dynamische bedrijfscycli en levensduurdata. High-tech productietechnologieën worden verder geautomatiseerd en geïntegreerd in industriële productieprocessen, met nadruk op schaalbaarheid en materiaalbesparing.

Lange termijn (2031–2035): Richting 2035 worden industriële recyclingstromen voor elektroden en membranen gerealiseerd, met name voor nikkel en op termijn ook PEM-materialen. AEM- en SOE-technologieën bereiken hogere TRL-niveaus, met aantoonbare circulariteitswinst door materiaalreductie en warmte-integratie. Circulariteit wordt dan structureel geïntegreerd in aanbestedingen, certificering en closed-loopketens voor sleutelmaterialen. Nederland positioneert zich als toonaangevende leverancier van hoogwaardige elektrolysecomponenten, mede dankzij haar voorsprong in high-tech productietechnologieën zoals ALD en precisiecoating.

7 Bereidheid en Behoefte tot Samenwerking

De transitie naar een circulaire elektrolysesector vereist nauwe samenwerking tussen bedrijven, kennisinstellingen, beleidsmakers en financiers. De waardeketen is technologisch complex en sterk verweven met internationale ontwikkelingen, waardoor geen enkele partij de benodigde innovaties zelfstandig kan realiseren. Dit hoofdstuk beschrijft de huidige samenwerkingsverbanden, de waargenomen meerwaarde van samenwerking, de bereidheid en voorkeuren van verschillende typen organisaties, de randvoorwaarden voor succesvolle samenwerking, en de beleidsaanbevelingen die hieruit volgen.

7.1 Huidige samenwerkingsverbanden

De meeste Nederlandse bedrijven en kennisinstellingen die actief zijn op het gebied van elektrolysetechnologie nemen al deel aan één of meerdere samenwerkingsverbanden. Enkele initiatieven hebben zich in de afgelopen jaren ontwikkeld tot spilfuncties binnen het nationale waterstof- en circulariteitslandschap.

HyScaling vormt één van de belangrijkste consortia gericht op de opschaling van elektrolyse in Nederland. Het brengt partners uit de industrie, onderzoeksinstellingen en de maakindustrie samen en biedt een platform voor kennisuitwisseling, testfaciliteiten en innovatie op componentniveau. Binnen HyScaling ontstaan ook eerste trajecten gericht op circulariteit, materiaalgebruik en ontwerp.

GroenvermogenNL fungeert als nationaal programma voor de financiering en kennisdeling rond grootschalige waterstofproductie en systeemintegratie. Verschillende geïnterviewde partijen nemen deel aan calls of consortia onder dit programma, bijvoorbeeld gericht op materiaalontwikkeling of integratie in industriële toepassingen.

Ook **HyPro** (onder GroenvermogenNL) en **NXTGEN Hightech** spelen een sleutelrol in de ontwikkeling van elektrolysetechnologie. HyPro richt zich op fundamenteel onderzoek en componentontwikkeling, met nadruk op prestatieverbetering, levensduurverlenging en materiaalinnovatie. Binnen dit programma werken bedrijven, universiteiten en toeleveranciers samen aan disruptieve oplossingen, waaronder PFAS-vrije membranen en PGM-reductie. **NXTGEN Hightech** ondersteunt industriële opschaling en high-tech maakcapaciteit, met projecten rond derde-generatie elektrolysers, geavanceerde coatingtechnologieën (zoals ALD), en circulaire stackontwerpen. Beide programma's bieden structurele ondersteuning aan innovatieve MKB's en scale-ups, en vormen een brug tussen technologieontwikkeling en markttoepassing.

Daarnaast speelt **CIRCO** een unieke rol als toegepast innovatieprogramma, waarin bedrijven circulaire businessmodellen en ontwerprichtlijnen ontwikkelen. De CIRCO Tracks gericht op elektrolyse en waterstoftechnologie hebben concrete handvatten opgeleverd voor circulair ontwerp, waaronder herbruikbare componenten en refurbishconcepten.

Ook programma's als **VoltaChem**, gericht op elektrochemische conversie en elektrificatie, en **ISPT Hydrohub**, waar ketenintegratie en schaalvergroting centraal staan, dragen bij aan de kennisontwikkeling.

Tot slot zijn er regionale netwerken en clusters – zoals **Metalot** (Brabant), **Chemport** (Noord-Nederland) en **North Sea Port** (Zeeland/Vlaanderen) – waarin toeleveranciers en start-ups samenwerken aan elektrolysecomponenten en innovatieve materialen.

Hoewel deze initiatieven waardevol zijn, blijkt uit de interviews dat circulariteit binnen elektrolyse vaak slechts een onderdeel vormt van bredere waterstofprogramma's, zonder een eigen gestructureerde kennis- of samenwerkingslijn. Innovatieve MKB's en start-ups ervaren bovendien drempels om aansluiting te vinden bij grote OEM's of publieke onderzoeksprojecten.

7.2 Waargenomen meerwaarde van samenwerking

Samenwerking wordt door vrijwel alle geïnterviewde partijen beschouwd als een **noodzakelijke voorwaarde** voor het realiseren van circulariteit. De keten is immers breed, met sterke onderlinge afhankelijkheden tussen ontwerp, materialen, productie, onderhoud en hergebruik.

De eerste meerwaarde ligt in **toegang tot kennis en testfaciliteiten**. Veel bedrijven beschikken niet over eigen laboratoria of duurtestfaciliteiten voor elektrolysers. Kennisinstellingen kunnen die lacune opvullen, mits er voldoende capaciteit beschikbaar is voor externe partijen. Ook toeleveranciers hebben behoefte aan

testfaciliteiten ter validatie van hun innovatieve componenten, aangezien industriële OEM's hier niet altijd interesse in, of tijd voor hebben.

Daarnaast maakt samenwerking **gezamenlijke standaardisatie** mogelijk. Harmonisatie van operationele condities, testprotocollen, stack-interfaces en circulariteitsmetingen kan alleen slagen via collectieve actie – een gedeeld kader dat door alle partijen wordt erkend en toegepast.

Een derde voordeel is de mogelijkheid tot **risicodeling**. De ontwikkeling van circulaire componenten of refurbish-concepten vergt aanzienlijke investeringen in R&D en demonstratie. Door samen te werken binnen consortia of gezamenlijke pilots kunnen bedrijven deze risico's spreiden en sneller tot validatie komen.

Ook leidt samenwerking tot **versnelling van innovatie**. Door OEM's, universiteiten en materiaaltoeleveranciers bij elkaar te brengen, kunnen ontwerp, testen en terugkoppeling in kortere cycli plaatsvinden. Ten slotte draagt samenwerking bij aan **marktvertrouwen, een verlaging van de LCOH, en zichtbaarheid**: gezamenlijke pilots en projecten vergroten de geloofwaardigheid en het competitieve voordeel van circulaire oplossingen bij investeerders, beleidsmakers en eindgebruikers.

Kortom, samenwerking wordt niet alleen als wenselijk, maar als **strategisch essentieel** beschouwd voor de concurrentiekracht en duurzaamheid van de Nederlandse elektrolysesector.

7.3 Bereidheid en gewenste vormen van samenwerking

De bereidheid tot samenwerking is hoog, al verschilt de gewenste vorm per type organisatie en mate van volwassenheid. Kennisinstellingen tonen de hoogste bereidheid: zij willen structurele onderzoeksprogramma's opzetten met open data-uitwisseling tussen platforms zoals GroenvermogenNL, HyScaling en CIRCO en pleiten voor een landelijk Competence Center. OEM's en systeemontwikkelaars staan eveneens positief tegenover samenwerking, mits er duidelijke afspraken bestaan over intellectueel eigendom en databeheer. Zij geven de voorkeur aan thematische werkgroepen rond *design for circularity* en componentstandaardisatie, bij voorkeur binnen precompetitieve kaders.

Table 6: Bereidheid en gewenste vormen van samenwerking

Type partij	Bereidheid	Gewenste vorm van samenwerking
Kennisinstellingen	Zeer hoog	Structurele R&D-programma's en data-uitwisseling via open platforms (GroenvermogenNL, HyScaling, CIRCO). Actieve betrokkenheid bij het **Electrolyser Competence Centre** voor standaardisatie, testfaciliteiten en kennisdisseminatie.
OEM's/ systeemontwikkelaars	Hoog (mits duidelijke IP-afspraken)	Thematische werkgroepen (*design for circularity*, component-standaardisatie) en deelname aan pre-competitieve onderzoeksconsortia. Betrokkenheid bij het **Competence Centre** voor validatie, retourstromen en benchmarking van prestaties.
Toeleveranciers & engineeringbedrijven	Gematigd tot hoog	Praktijkgerichte projecten en gezamenlijke testfaciliteiten; publiek-private pilots rond circulariteit, onderhoud en recycling. Aansluiting op het **Competence Centre** voor product- en materiaalkarakterisatie.
Start-ups & scale-ups	Zeer hoog	Netwerkondersteuning, matchmaking en gezamenlijke demonstratieprojecten; behoefte aan incubatie, zichtbaarheid en toegang tot test- en validatiecapaciteit binnen het **Competence Centre**.
Publieke onderzoek programma's/instellingen	Hoog	Coördinatie en governance van samenwerking via GroenvermogenNL/HyScaling; faciliteren van het **Electrolyser Competence Centre** als neutraal platform voor kennisdeling, standaardisatie en pre-competitieve innovatie.

Toeleveranciers en engineeringbedrijven zoeken vooral **praktijkgerichte samenwerkingsvormen**, zoals publiek-private pilots of gezamenlijke testfaciliteiten waar nieuwe componenten onder realistische condities kunnen worden gevalideerd. Start-ups en scale-ups hebben een bijzonder hoge bereidheid tot samenwerking, en vragen vooral om **netwerkondersteuning, matchmaking** en toegang tot incubatieprogramma's en demonstratieprojecten.

Er is interesse in lichte, flexibele vormen van samenwerking, zoals een **community of practice** of **cross-sectorale taskforces** gericht op specifieke thema's (bijvoorbeeld PFAS- en PGM-vervanging). Zulke initiatieven verlagen de drempel voor deelname van MKB's en bevorderen een gelijkwaardige samenwerking binnen de keten. Recent heeft GroenvermogenNL een Community of Practice Elektrolysers opgezet, wat deels kan voldoen aan de behoefte aan samenwerking.

Echter, vele partijen vinden een *community of practice* te vrijblijvend en daardoor minder effectief. Daardoor is er brede behoefte aan de oprichting van een **Electrolyser Competence Centre**. Een dergelijk centrum zou dienen als open platform voor kennisdeling, standaardisatie, testcapaciteit en coördinatie van gezamenlijke onderzoeksactiviteiten. Het kan ondergebracht worden binnen bestaande structuren van GroenvermogenNL, High Tech NL of HyScaling en fungeert dan als spil tussen beleid, industrie en onderzoek.

7.4 Randvoorwaarden voor effectieve samenwerking

Tijdens de interviews kwamen verschillende randvoorwaarden naar voren die bepalend zijn voor succesvolle samenwerking.

Vertrouwen en transparantie vormen de basis. Bedrijven willen wel kennis delen, maar vrezen verlies van intellectueel eigendom of concurrentievoordeel. Heldere afspraken over vertrouwelijkheid, databeheer en IP zijn daarom cruciaal.

Een tweede randvoorwaarde is **governance en regie**. Er is behoefte aan een neutrale coördinator – bijvoorbeeld RVO, TNO of een gezamenlijke programmalijn binnen GroenvermogenNL – die de verbinding tussen consortia bewaakt. Governance moet bovendien inclusief zijn, met ruimte voor zowel grote OEM's als innovatieve MKB's en start-ups.

Financiering vormt een derde knelpunt. Gezamenlijke activiteiten zoals testopstellingen, recyclestudies en refurbish-pilots vereisen een structurele financieringslijn. De huidige programma's dekken dit slechts gedeeltelijk. Veel partijen pleiten daarom voor een specifiek *"circulaire maakindustrie"-instrument* binnen de waterstofsector.

Daarnaast benadrukken respondenten het belang van **duidelijke doelen en tijdshorizonnen**. Samenwerking heeft alleen zin als deze leidt tot concrete resultaten, zoals het bereiken van PFAS-vrije membranen op TRL 7 in 2028 of een recyclingdemonstrator in 2031.

Tot slot zien veel partijen kansen voor **internationale koppeling**. Aansluiting bij Europese initiatieven zoals de *Clean Hydrogen Joint Undertaking* en de *IPCEI Hy2Tech/Hy2Use* wordt aantrekkelijk geacht, mits de Nederlandse focus op circulariteit hierin herkenbaar wordt verankerd.

7.5 Conclusie

De interviews laten zien dat de Nederlandse elektrolysesector een hoge bereidheid tot samenwerking heeft, maar dat een structureel kader en duidelijke regie nog ontbreken. De kennisbasis (DIFFER, TNO, universiteiten) en de maakcapaciteit (VDL, Battolyser Systems, XINTC, diverse toeleveranciers) vormen samen een sterk ecosysteem, maar de verbinding daartussen is nog fragmentarisch. Circulariteit is bovendien vaak een *afgeleide* van bredere innovatieagenda's, en verdient een expliciete plek in de nationale waterstof- en industriepolitiek.

Om samenwerking gericht te versterken, worden de volgende aanbevelingen gedaan richting RVO en programmapartners:

1. **Faciliteer een Electrolyser Competence Centre** onder GroenvermogenNL of HyScaling, die een *one-stop-shop* vormt voor kennisdeling, standaardisatie, validatie en coördinatie van circulaire innovatie.
2. **Ontwikkel een precompetitieve[3] programmalijn** waarin OEM's, kennisinstellingen en MKB's gezamenlijk werken aan TRL 4–7 innovaties voor PFAS-vrije, PGM-arme en refurbishbare componenten.
3. **Versterk test- en validatiecapaciteit** door een open testcentrum voor duurtesten en circulariteitsvalidatie, vergelijkbaar met Fieldlab HyScaling.
4. **Stimuleer circulair ontwerp via subsidieregelingen**, door R-laddercriteria (Reduce, Reuse, Recycle) op te nemen in de beoordeling van waterstofprojecten.
5. **Bevorder internationale positionering** door Nederland te profileren als EU-pilotregio voor circulaire elektrolysers, gekoppeld aan Hy2Tech en Clean Hydrogen JU.

[3] Precompetitief betekent dat partijen samenwerken in een vroeg innovatiestadium (voor commerciële concurrentie) om gezamenlijke kennis en technologie te ontwikkelen.

8 Conclusies en Aanbevelingen

8.1 Overkoepelende beleidsmatige en strategische conclusies

De Nederlandse elektrolysesector bevindt zich in een cruciale transitiefase: van **demonstratie** naar **industrialisatie**. De aandacht van bedrijven ligt momenteel primair bij kostprijsverlaging, betrouwbaarheid en opschaling, maar circulariteit begint steeds duidelijker een rol te spelen in ontwerpkeuzes, materiaalgebruik en onderhoudsstrategieën.

Uit de interviews en analyses komt een consistent beeld naar voren. Bedrijven **willen** wel degelijk duurzamer en circulair innoveren, maar **lopen tegen structurele en praktische barrières** aan – met name op het gebied van financiering, testcapaciteit, standaardisatie en samenwerking. Circulariteit is zelden een expliciet onderdeel van innovatieprojecten, maar komt impliciet terug in thema's als **PGM-reductie**, **PFAS-vrije materialen** en **modulaire ontwerpen**.

De belangrijkste beleidsmatige inzichten zijn:

- **Circulariteit is (nog) een afgeleide drijfveer** – de meeste bedrijven zien het als een volgende stap ná de commerciële volwassenwording van hun technologie.
- **De bereidheid tot samenwerking is groot**, maar de middelen ontbreken: testfaciliteiten, gedeelde standaarden en een passend financieringsinstrumentarium zijn noodzakelijke randvoorwaarden.
- **Het MKB en start-ups zijn de motor van vernieuwing**, maar hebben vaak beperkte toegang tot middelen, testinfrastructuur en partnerschappen met grotere OEM's.
- **De Nederlandse maakindustrie heeft een sterke uitgangspositie**, dankzij kennisinstituten, hoogwaardige machinebouw en materiaalkennis. Met gericht beleid kan Nederland zich ontwikkelen tot een Europese koploper in circulaire elektrolysetechnologieën.

Kortom: circulariteit is nog geen doel op zich, maar **een strategische hefboom** om innovatie, grondstoffenzekerheid en kostenverlaging te combineren.

8.2 Waar circulariteit nu impact maakt en waar kansen liggen

De impact van circulariteit is vandaag het duidelijkst zichtbaar op drie gebieden:

1. **Materiaalreductie en substitutie:** De vermindering van edelmetalen (zoals iridium en platina) en het onderzoek naar PFAS-vrije membranen vormen de belangrijkste technologische speerpunten. Deze ontwikkelingen dragen niet alleen bij aan milieu-winst, maar versterken ook de strategische autonomie van Nederland en Europa door afhankelijkheden van kritieke importmaterialen te verkleinen.

2. **Levensduurverlenging:** Predictief onderhoud, refurbish-strategieën en modulaire ontwerpen worden steeds vaker toegepast om de levensduur van installaties te verlengen. Dit is momenteel het meest concrete en commercieel het meest aantrekkelijke aspect van circulariteit, omdat het direct bijdraagt aan kostenverlaging en betrouwbaarheid.

3. **Systeem-efficiëntie en integraal ontwerp**: Flexibel bedrijf (0–100% load), warmte- en waterhergebruik en slimme sturing dragen bij aan efficiënter energie- en materiaalgebruik. Deze integrale benadering past binnen een bredere visie op *systeemcirculariteit*.

Toekomstige kansgebieden liggen bij de organisatie van circulariteit op schaal. Naarmate de productie van elektrolysers groeit, zal de behoefte toenemen aan recycling-, refurbish- en terugname-systemen, lease-modellen en gestandaardiseerde componenten. Daarnaast vormt de **ontwikkeling van open testinfrastructuren** – waarin publieke en private laboratoria beter samenwerken – een sleutelvoorwaarde.

Tenslotte blijft de **beschikbaarheid van technisch geschoold personeel** een structurele uitdaging: zonder versterking van de human capital-basis kan verdere opschaling stagneren.

8.3 Concrete actiepunten voor RVO en beleidspartners

1. Doelgerichte en toegankelijke subsidieregelingen

- Ontwikkel specifieke financieringslijnen voor **MKB's en innovatieve bedrijven**, niet enkel voor grote consortia.
- **Vereenvoudig de aanvraagprocedures** en verlaag administratieve lasten, zodat ook kleinere ondernemingen kunnen deelnemen.
- **Reserveer middelen voor industrieel R&D** uitgevoerd door bedrijven, niet uitsluitend academische instellingen.
- Introduceer een **bonusmechanisme** voor projecten die gebruikmaken van Nederlandse technologie of circulaire ontwerpprincipes.

2. Versterking van testcapaciteit en validatie-infrastructuur

- Investeer in **publiek toegankelijke testfaciliteiten** met betaalbare toegang voor MKB's, verspreid over meerdere regio's.
- Benut bestaande capaciteit bij DIFFER, TNO en universiteiten door een **voucherregeling** of gezamenlijk beheer. Zorg bovendien dat deze ook betaalbaar zijn voor MKB's.
- Overweeg samenwerking met **testfaciliteiten in buurlanden** (zoals Duitsland of België) waar capaciteit en kosten gunstiger kunnen zijn – complementariteit is hier belangrijker dan concurrentie.
- Ondersteun de oprichting van een **Electrolyser Competence Centre** als neutraal nationaal platform voor validatie, duurtesten en standaardisatie.

3. Bevordering van ketenintegratie en samenwerking

- Faciliteer structurele contacten tussen componentproducenten, systeemontwikkelaars en eindgebruikers om innovaties sneller te valideren.
- Stimuleer **cross-brand testing**: het gebruik van gestandaardiseerde interfaces (druk, temperatuur, veiligheidscondities) waardoor componenten van verschillende merken in dezelfde testomgeving kunnen worden geëvalueerd.
- Creëer intersectorale platforms en **Community of Practice-structuren** waar bedrijven en kennisinstellingen gezamenlijk pilots uitvoeren en lessen delen.

4. Industriebeleid en innovatiekracht

- Positioneer de Nederlandse maakindustrie als **Europese koploper in circulaire elektrolyse** en hightech productietechnologieën.
- Ontwikkel een **gericht industriebeleid** dat innovatieve bedrijven ondersteunt bij schaalvergroting en export.
- Stimuleer het gebruik van **NL-geproduceerde componenten** in nationale subsidieprogramma's om binnenlandse waardecreatie te versterken.
- Leg in innovatieprogramma's de nadruk op **technologische vernieuwing en procesontwikkeling** (laag-TRL en potentieel disruptieve innovaties (TRL 2–5)), ter ondersteuning van baanbrekende materiaal- en ontwerpconcepten.

5. Circulair ontwerp en Product-as-a-Service

- Stimuleer **lease- en terugnamecontracten** (bijv. voor stacks, frames of elektroden) om hergebruik en dataleren te bevorderen.
- Faciliteer samenwerking tussen bedrijven en kennisinstellingen om **leerpunten uit teruggenomen producten** te vertalen naar verbeterde en efficiënter ontwerpen.
- Faciliteer en financier pilots voor **refurbish- en remanufacture-modellen** binnen OEM-businesscases, inclusief het opstellen van heldere kaders voor eigendom, aansprakelijkheid en terugname van installaties.

6. Standaardisatie en internationale positionering

- Versnel de ontwikkeling van **internationale normen** voor testcondities, druk- en temperatuuromgevingen.

- Werk met EU-partners aan harmonisatie van **circulariteitsindicatoren** en **ontwerpstandaarden**.
- Positioneer Nederland als **"testbed" voor circulaire elektrolysetechnologieën** – dat wil zeggen als experimenteer- en validatielocatie binnen Europese programma's (zoals Clean Hydrogen JU en IPCEI Hy2Tech), waar bedrijven hun innovaties kunnen demonstreren en certificeren onder realistische condities.

8.4 Visualisaties en instrumenten

De belangrijkste inzichten zijn vertaald naar drie ondersteunende visuals die richting geven aan beleid en uitvoering:

Roadmap 2025-2035 – Ontwikkelpad voor circulaire elektrolyse

De roadmap schetst de gefaseerde ontwikkeling van circulariteit binnen de Nederlandse elektrolyse-industrie richting 2035.

Table 7: Roadmap 2025–2035 – Ontwikkelpad voor circulaire elektrolyse

Fase	Focus	Beleidsactie
2025-2027	Toegang & faciliteiten	Voucherregeling voor MKB's, open testlabs, CIRCO-tracks, start Competence Centre
2028-2030	Opschaling & standaardisatie	(Acceptatie van) lease-modellen, gezamenlijke pilots, interface-standaarden, validatie-data
2031-2035	Industrialisatie & circulariteit	Closed-loop ketens, export van circulaire technologieën, EU-benchmarkpositie

In de **eerste fase (2025–2027)** ligt de nadruk op het creëren van randvoorwaarden – zoals open testfaciliteiten, toegankelijke financiering voor MKB's en de oprichting van een nationaal *Electrolyser Competence Centre*.

De **tweede fase (2028–2030)** richt zich op opschaling en standaardisatie: het ontwikkelen van lease- en terugname-modellen, gezamenlijke demonstratieprojecten en geharmoniseerde ontwerpstandaarden.

In de **derde fase (2031–2035)** verschuift de aandacht naar volledige industrialisatie, waarbij gesloten materiaalketens, grootschalige recycling en export van circulaire technologieën centraal staan. Samen markeren deze fasen de overgang van experiment naar structurele toepassing van circulariteit in de elektrolyseketen.

Heatmap technologie vs. Circulariteitsaspect

De heatmap geeft een indicatieve vergelijking van de vier belangrijkste elektrolysetechnologieën op kernaspecten van circulariteit.

Table 8: Heatmap technologie vs. circulariteitsaspect

Technologie	Materiaalreductie	Refurbish	Recycling	Modulaire bouw	Test- & validatiebehoefte
AWE	★★★★☆	★★★★☆	★★★☆☆	★★★★☆	Hoog
PEM	★★★★☆	★★☆☆☆	★★☆☆☆	★★★☆☆	Zeer hoog
AEM	★★★☆☆	★★★☆☆	★★☆☆☆	★★★☆☆	Hoog
SOE	★★☆☆☆	★☆☆☆☆	★★☆☆☆	★★☆☆☆	Hoog (warmteintegratie)

Hieruit blijkt dat alkaline-elektrolyse (AWE) momenteel het verst gevorderd is op het gebied van materiaalefficiëntie, modulariteit en refurbish-mogelijkheden, dankzij haar robuuste ontwerp en beproefde materialen. PEM-technologie scoort hoog op prestaties maar lager op circulariteit, vooral door het gebruik van kritieke materialen (PGM's) en PFAS-polymeren, waardoor recycling en refurbish nog beperkt toepasbaar zijn. AEM bevindt zich in een opkomende fase met veelbelovende perspectieven voor PFAS- en PGM-vrije alternatieven, maar de industriële validatie is nog beperkt. SOE biedt potentie op systeemniveau (warmte-integratie en efficiëntie), maar circulariteitsstrategieën op componentniveau bevinden zich nog in de onderzoeksfase. De hoge test- en validatiebehoefte bij alle technologieën onderstreept de noodzaak van gestandaardiseerde duurtesten, materiaalpaspoorten en open testfaciliteiten om circulariteitsaspecten betrouwbaar te kwantificeren.

Samenvattende R-ladderanalyse

Tabel 9: Samenvatting van de R-ladderanalyse

R-ladder posititie	Concrete Toepassingen
Redesign/Rethink	Circulaire businessmodellen, *design-for-service*, preventief onderhoud, modulair stack-ontwerp
Reduce/Refuse	PFAS-vrije polymeren, PGM-reductie (TRL 4–8)
Reuse/Repair	Vervanging en onderhoud van eindplaten, trekstangen, afdichtingen (TRL 6–9)
Refurbish/Remanufacture	Opkomend (TRL 5–7), o.a. modulaire stacks
Recycle	Beperkt tot metalen en frames (TRL 3–6)
Recover	Nog nauwelijks toegepast

De samenvattende R-ladderanalyse laat zien dat de meeste circulaire activiteiten zich momenteel concentreren op de hogere treden van de ladder – *Redesign, Reduce, Reuse* en *Repair* – die bijdragen aan een efficiënter grondstoffengebruik en langere levensduur van componenten. De toepassing van *Refurbish* en *Remanufacture* bevindt zich nog in een experimentele fase, terwijl *Recycle* hoofdzakelijk beperkt blijft tot metalen en ondersteunende constructiedelen. *Recover* wordt vooralsnog niet toegepast.

Deze verdeling weerspiegelt een positieve trend: bedrijven richten zich vooral op strategieën met de grootste milieu-impactvermindering (R0–R4), in plaats van op eind-of-ketenoplossingen zoals energieterugwinning (R9).

8.5 Eindadvies

De rode draad uit de verkenning is helder: **circulariteit is geen vrijblijvende optie, maar een noodzakelijke volgende stap** in de verduurzaming van de waterstofketen.

Om die stap te zetten, zijn drie pijlers essentieel:

1. **Innovatie** stimuleren én tegelijkertijd zorgen voor **standaardisatie en opschaling,** om zowel technologische vooruitgang als marktacceptatie te versnellen.
2. **Open testcapaciteit** versneld realiseren en toegankelijk maken voor een brede groep gebruikers, zodat innovatie en toepassing in de hele sector worden ondersteund.
3. **Eenvoudige en toegankelijke regelingen voor MKB's** verankeren in de nationale waterstofstrategie en subsidieprogramma's.

Met gerichte regie, duidelijke fasering en een sterk samenspel tussen overheid, kennisinstellingen en industrie kan Nederland zijn positie als **innovatieve en circulaire maakindustrie voor elektrolysers** waarmaken.

Appendix A

In de volgende tabellen worden deze bedrijven overzichtelijk gepresenteerd, inclusief hun positie in de waardeketen, technologische focus en bijdrage aan circulariteit.

	Bedrijfsnaam	Locatie	Activiteiten & Producten	Technologische focus (PEM, AEM, AE, SOE)	Visie op opschaling & automatisering	Positie in de keten	Focus R-ladder	Doelen & Ambities	Aantal werknemers
1.	**ABB**	Rotterdam	Elektrificatie & power conversion; DC-voedingen/rectifiers, DCS en drives voor elektrolyse.	Technologie-agnostisch: HyQ/DC power supplies (IGBT/thyristor/diode) tot multi-MW; >98–99% efficiëntie; grid power quality)	Wereldwijde referenties; inzet bij SOEC-testplatforms; complete pakketten van MV tot stack-input.	Componenten (BOP – vermogensvoeding & besturing).	R3, R5 Refurbishment/retrofit van vermogenselektronica; levensduurverlenging; hergebruik van kasten/frames (projectafhankelijk).	TCO-optimalisatie, snelle opschaalbaarheid, 24/7 service.	100,000+ (NL-vestigingen)
2.	**Additive Industries**	Eindhoven	OEM van geautomatiseerde metaal-AM systemen (MetalFab) voor serieproductie.	Laser-PBF voor complexe warmtewisselaars/ headers/bipolaalplaat-onderdelen en tooling.	Samenwerking met high-tech/automotive; geautomatiseerde cellen.	Productietechnologie (toelevering stack/BOP-delen via klanten).	R3 Materiaal-efficiëntie (poederhergebruik), design-for-lightweight; minder afval versus subtractieve bewerking.	Productiviteit/kwaliteit verhogen voor kritische metalen componenten.	100–250 (indicatief)
3.	**Admatec (Admatec Additive Solutions)**	Alkmaar	DLP-gebaseerde 3D-printers en diensten voor keramiek en metalen (Admaflex 130/300).	Alumina/zirconia/silica components – potentieel voor corrosiebestendige elektrolyser-onderdelen/bipolaalplaten/coatingsupports.	Hervatting activiteiten (2025) onder nieuwe entiteit; industriële serieproductie.	Productietechnologie/Componenten (keramiekdelen).	R1, R3 Materiaal-efficiëntie & near-net-shape; minder verspilling dan conventioneel.	Hoogvolume keramiek-AM met inline kwaliteitsmonitoring.	10–50 (indicatief)
4.	**Althen Sensors & Controls**	Rijswijk	Sensoroplossingen (druk/temperatuur/flow) en instrumentatie; hydrogen-compatibele druktransmitters (tot 1.500 bar, ATEX/IECEx/DNV-GL).	Technologie-agnostisch: H_2-compatibele (titanium/SOS) drukopnemers voor productie, opslag en tankstations.	Uitbreiding H2-portfolio en digitale RS485-transmitters.	Componenten (BOP – meting & veiligheid).	R3, R4 Kalibratie/reparatie; hergebruik sensoren/connectoren waar mogelijk.	Veilige, nauwkeurige monitoring in H2-keten.	50–200 (indicatief)
5.	**Ampulz**	Zwolle	Ontwikkeling en levering van klant-specifieke technische diensten en producten op het gebied van geavanceerde vermogenselektronica, stroomvoedings- en conversiesystemen, en distributienetwerken.	Energieopwekking en conversie, ondersteuning voor elektrolyseprojecten (PEM/BOP).	Samenwerking met diverse partners in de energiesector, gericht op grootschalige inpassing van hernieuwbare elektriciteit.	Componenten (BOP, vermogenselektronica)	R5 Modulair ontwerp; refurbish/upgrade mogelijk.	Opschaling: integratie van grootschalige hernieuwbare energie; Circulariteit: optimalisatie van energie-efficiëntie; Marktbereik: Nederlandse en internationale energiesector.	200–500 (VONK groep, indicatief)
6.	**Angst+Pfister B.V.**	Zoetermeer	Afdichtingen/engineered components; H_2-toepassingen tot hoge druk	Ondersteunend (afdichtingen/BoP)	Lokale engineering + global supply	Componenten	R1, R4 Ontwerp: langere levensduur door hoogwaardige afdichtingsmaterialen; reparatie/vervanging zonder volledige systemen af te schrijven	Opschaling: EU supply & logistiek; Circulariteit: levensduur/onderhoud; Marktbereik: NL/EU	50–100
7.	**Avantium R&D Solutions (met TNO)**	Amsterdam	PEM-elektrolyser teststations (single/multi-cell) – productie & verkoop	PEM (teststations)	N.v.t.	Subsystemen/ Componenten (test)	N.v.t.	Opschaling: serie teststations (afhankelijk van de marktvraag); Circulariteit:	scale-up

								n.v.t.; Marktbereik: wereldwijd R&D	
8.	**AVOXT**	Eindhoven	Membraneloze AE-elektrolyser (hogere efficiëntie, flexibiliteit; perslucht/gas-separatie in ontwerp)	AE (membrane-less)	Opschaling naar MW-modules; directe drukopbouw; snelle load-following	Eindproduct/ Subsystemen	R1, R4 Ontwerp: hogere systeem-efficiëntie (lager energieverlies); lagere onderhoudsbehoefte door membraneloos ontwerp	Opschaling: seed→pilot→5+ MW; Circulariteit: lagere onderhoudskosten; Marktbereik: chemie/brandstoffen	startup
9.	**AWL-Techniek**	Harderwijk	Systeemintegrator/robotica; turnkey productielijnen voor elektrolyser/fuel-cell equipment	Ondersteunend (productie/ automatisering)	Modulaire machines; laserlassen/vision/QC	Subsystemen	R1 Efficiëntere productie (minder materiaal/afval)	Opschaling: turnkey lijnen (Hannover Messe flyer); Circulariteit: proces-efficiency; Marktbereik: wereldwijd	700+ wereldwijd
10.	**Battolyser Systems**	Rotterdam	Flexibel opererende pressurized alkaline electrolyser	AWE (pressurized) + geïntegreerde opslag (Ni-Fe batterij)	Industriële serieproductie in Rotterdam; financiering via EIB en VC; modules 2.5–5 MW; integratie met variabele hernieuwbaar.	Eindproduct (OEM elektrolyser/batterij)	R1 Ontwerp: minder kritieke materialen (gebruik van Fe i.p.v. PGM's)	1 GW/jaar productievermogen; uitrol naar industriële klanten in EU; kostendaling door schaal.	≈50
11.	**Bosal**	Eindhoven/ Alkmaar	Hoogwaardige warmtewisselaars voor SOFC/SOEC en Hot Balance of Plant (HotBOP) systemen	SOE/SOFC	Partnerschap met SolydEra & VDL voor industriële schaal	Componenten (heat exchangers)	R1, R8 materiaaloptimalisatie, efficiënter materiaalgebruik; recycling van metalen	Opschaling: multi-MW HotBOP; Circulariteit: materiaaloptimalisatie en recycling van metalen; Marktbereik: industriële elektrolyse & brandstofcellen wereldwijd	Onbekend
12.	**Bosch**	Tilburg	Hybrion PEM-stacks (1.25 MW; tot 22.9 kg H_2/h; tot 34 bar)	PEM (systeem en componenten)	Seriematige productie; orders ~100 MW; EU-projecten	Eindproduct/ Componenten	R0, R1 Refuse: PFAS vrije membrane; Ontwerp: hogere power-density; Reduce: het gebruik van porous transport electrodes (PTE), waarbij de katalysator op de PTE zit. Dit maakt het membraan vrij van edelmetalen	Opschaling: Bamberg-productie; Circulariteit: vermindering van PGM-gebruik en PFAS-vrije membranen; ontwerp gericht op hogere materiaal-efficiëntie; Marktbereik: wereldwijd	multinational
13.	**Braskem Netherlands**	Rotterdam	Technologie-agnostisch (polymeren voor BoP/behuizingen)	Ondersteunend (materialen)	Supply-keten voor kunststoffen; EMEA-distributie	Materialenleverancier (polymeren voor componenten/BoP)	R1, R8 Ontwerp: (bio)polymeren voor BoP/behuizingen	Opschaling: EMEA-supply; Circulariteit: inzet van (bio)polymeren en oplossingen voor design for recycling; Marktbereik: EMEA	multinational
14.	**Bronkhorst High-Tech**	Ruurlo	Mass-flow meters/controllers, drukregelaars; real-gas H_2-kalibratie; BoP voor elektrolyse test/operatie.	Technologie-agnostisch (flow/pressure control)	Modulaire instrumentatieplatforms; digitale integratie.	Componenten (MFC/MFM/druk)	R1, R4 Reparatie/kalibratie & levensduurverlenging instrumentatie.	Leverancier aan elektrolyse-OEMs en testfaciliteiten wereldwijd.	800–1000 (groep, indicatief)

15.	**Circonica**	Leiden Bio Science Park	Ontwikkeling van HELP-SOFC/SOEC (Hollow Electrodes & Loose Plates) – circulaire energiecel	SOE/SOFC	Micro-WKK → woningbouw; industriële pilots	Eindproduct/ Subsystemen	R1, R3, R8 Recycling: mono-materialen; Hergebruik: ja; Ontwerp: ja	Opschaling: betaalbare micro-WKK; Circulariteit: multi-fuel & lange levensduur; Marktbereik: gebouwde omgeving & telecom	Onbekend
16.	**Contour Advanced Systems**	Winterswijk	System integrator 'one-stop' (mechanisch/elektrisch/ klimaat/EMC) voor o.a. energie-specials.	Hydrogen units en smart-energy specials, incl. behuizing, integratie en supply-chain management.	Turnkey-leveringen, meerdere certificeringen (ISO/AQAP/VCA).	Systeemintegrator (BOP-modules/ containers).	R4, R5 Ontwerp voor onderhoud/modulariteit; refurbishment mogelijk.	Schaalbare H2-units voor mobiliteit/industrie.	200–500 (indicatief)
17.	**CoorsTek**	Uden	Technische keramiek voor elektrolysers/brandstofcellen (SOEC/SOFC) en membranen; substrates/tubes/ honeycombs.	Proton/oxide-keramische membranen, SOEC-componenten, porous keramische dragers.	Samenwerking met industrie; productbrochures voor H2-toepassingen.	Componenten (cel/membraan/ substraten).	R1, R4 Materialen met hoge levensduur; service/vervanging componentniveau.	Efficiëntere H2-productie en gas-naar-chemie conversies.	5,000+ (groep; NL-vestiging)
18.	**Cryoworld**	Wieringerwerf	LH2-oplossingen voor opslag, distributie en refuelling; cryo-systemen voor H2-luchtvaart/space.	Technologie-agnostisch (BoP/infrastructuur)	Productportfolio en beursexposure (World Hydrogen Summit); projecten binnen ICEFlight/aviation.	BOP/infrastructuur (LH2 opslag/transfer).	R3, R4 Herbruikbare skid-modules; onderhoud/reparatie; lange levensduur.	Standaardisatie en serieproductie LH2-componenten, uitbreiding internationale markt.	50–200 (indicatief)
19.	**D&M Vacuümsystemen**	Budel	Proceskamer-/coating- en testinfrastructuur voor elektrolyser- en membraanontwikkeling.	Proces/vacuümkamers, coating- en testinfrastructuur – technologie-agnostisch, BoP/test.	Eigen engineering/productie/service; groei machinepark.	BOP/test- & productie-equipment.	R3, R4 Reparatie/service; hergebruik modules waar mogelijk.	High-tech vacuümoplossingen voor H2-/thin-film toepassingen.	50–200 (indicatief)
20.	**Delft IMP (Powall/ ALD-coatings)**	Delft	ALD nanocoatings op poeders; schaalbare apparatuur & licenties.	Poedercoatings voor katalysatoren en (PEM) elektrolyse/fuel cells; lage iridium anodekatalysatoren (licentie TNO–Powall).	€10 mln Series A (InvestNL/Sandwater); industrialisatie van ALD-poedercoatinglijnen.	Componenten (katalysatorpoeders / CCM-voorbewerking).	R1 Materiaalreductie (edelmetalen) door nanocoatings; langere levensduur.	Minder kritieke materialen, langere levensduur en lagere LCOH.	10–50 (indicatief)
21.	**Demaco Holland**	Noord-Scharwoude	Ontwerp, productie en installatie van cryogene infrastructuren; vacuum-geïsoleerde leidingen, koppelingen, laadarmen.	Technologie-agnostisch (Liquid hydrogen (LH2) transfer & opslag; turnkey cryo-systemen)	Deel van OPW Clean Energy Solutions; deelname WHS 2025.	BOP/infrastructuur (LH2 supply chain).	R3, R4 Modulaire leidingsystemen; onderhoud/reparatie.	Versnellen wereldwijde LH2-implementaties, configurator/ standaardplatforms.	200–500 (indicatief)
22.	**Demcon**	Enschede/ Delft/Best/ Groningen	Ontwerp & systeemintegratie voor (decentrale) elektrolyse-systemen; engineering, prototyping en serie-bouw van modules/BoP.	Technologie-agnostisch (PEM/AEM/AE; systeemintegratie)	Ontwerp-naar-productie; schaalbare modules; industriële automatisering	Subsystemen & systeemintegrator (BoP, modules)	R3, R4 Ontwerp: modulariteit & maakbaarheid	Opschaling: productielijnen met partners; Circulariteit: DfX/onderhoud; Marktbereik: NL/EU	>1.000
23.	**Diffutherm**	Nuenen	Thermochemische diffusie-coatings (o.a. alumineren, chromeren) en PVD/CVD; corrosie-/slijtagebescherming voor metalen onderdelen.	Technologie-agnostisch (oppervlaktebehandelingen/coatings)	Seriecoatinglijnen; kwaliteitssystemen; engineering op maat.	Componenten (gecoate onderdelen)	R5 Levensduurverlenging door coatings; refurbish/coatre-work.	Opschaling: serie-coat trajecten voor H_2-onderdelen; Circulariteit: levensduurverlenging; Marktbereik: NL/EU high-tech/energie.	50–200 (indicatief)

24.	**DuFor Polyester Specialties**	Zevenaar	(r)PET/polyestergrondstoffen en compounds; circulariteit (CuRe-consortium).	Polymeeroplossingen voor vezels/films/engineering – relevant voor afdichtingen en componentdragers.	Samenwerking in CuRe Technology pilot Emmen; closed-loop ambities.	Materialenleverancier (polyesters voor BOP/isolatie/ packaging).	R8 Sterke focus op design for recycling en closedloop (rPET).	CO2-reductie, gesloten kringlopen.	10–50 (indicatief)
25.	**Dupont**	Dordrecht	Ion Exchange Resin (AmberLite™ P2X110) voor PEM-elektrolyse; waterzuiveringstechnologie	PEM	Industriële wateroplossingen wereldwijd	Componenten (membranen/ion exchange)	R8 Recycling: waterhergebruik; Hergebruik: n.v.t.; Ontwerp: n.v.t.	Opschaling: integratie in PEM-systemen; Circulariteit: waterhergebruik; Marktbereik: wereldwijd	Onbekend
26.	**Eekels Technology**	Kolham	Systeemintegratie en engineering van elektrotechnische installaties, automatisering en werktuigbouw voor marine, offshore en industrie.	Elektrische aandrijfsystemen, walstroomaansluitsystemen, automatisering, waterstofsystemen (BOP).	Onderdeel van TBI, actief in grootschalige projecten en onderhoud, inzet op Zero Emission Technology.	Systeemintegrator, componenten leverancier (BOP)	R5 Modulaire kasten/panels; refurbish/upgrade mogelijk.	Opschaling: duurzame energieoplossingen voor maritieme sector en industrie; Circulariteit: emissiereductie, digitalisering, energie-efficiëntie; Marktbereik: internationaal, marine, offshore, industrie.	500–1000 (indicatief; TBI >6.200)
27.	**ERIKS**	Alkmaar	Industriële componenten (afdichtingen, slangen, appendages) geschikt voor H_2 toepassingen en elektrolyse BoP.	Technologie-agnostisch (BoP componenten)	Eigen rubberlab; maatwerk; supply-chain services; H2-Suitable portfolio	Componenten/ BoP	R1, R4 Minder lekkage en vervangingsfrequentie → minder materiaalgebruik; Levensduurverlenging via betere seals	Opschaling: snelle maatwerkproductie EU; Circulariteit: onderhoud/duurzaamheid; Marktbereik: NL/EU	multinational
28.	**Eurekite**	Enschede	Flexiramics® – flexibele keramische vezels/matten voor hoge T° en chemische bestendigheid; toepasbaar in batterij/filtratie/isolatie.	SOE/hoog-T° randapparatuur & isolatie (agnostisch)	Opschalen Flexiramics®-productie; uitbreiding applicaties/markten.	Componentmaterialen (keramische vezels/isolatie)	R3 Lange levensduur/hittebestendigheid; hergebruik afhankelijk applicatie.	Opschaling: Flexiramics® productie; Circulariteit: levensduur/ temperatuurbestendigheid; Marktbereik: wereldwijd advanced materials.	10–50 (indicatief)
29.	**Schelde Exotech**	Ritthem	Handel/verwerking van zeldzame/metalen (Nb, Ta, Ru, Ti, etc.); potentiële supply voor katalysatoren/coatings/legeringen in elektrolyse.	Technologie-agnostisch (materiaal supply)	Schaalbare metaalverwerking/recycling van high-value metalen.	Grondstoffen/ Materialen	R8 Sterke focus op recycling/terugwinning van edel- en speciale metalen.	Opschaling: meer terugwinning/scheiding; Circulariteit: metaalrecycling; Marktbereik: wereldwijd OEMs/materialen.	50–200 (indicatief)
30.	**Ferro Techniek (onderdeel Otter Controls Group)**	Nijverdal	Thick-film heating elements en flow-through heaters (op metaal); toepassingspotentieel in elektrolyse-randapparatuur (humidifiers, thermal management).	Technologie-agnostisch (verwarming/thermisch management)	Industrialisatie via Otter Group; seriematige productie; custom designs.	Componenten (thick-film heaters)	R4 Efficiënte energie-inzet; reparatie/vervanging element mogelijk (design-afhankelijk).	Opschaling: serie thick-film heaters; Circulariteit: energie-efficiëntie/levensduur; Marktbereik: wereldwijd OEMs.	100–250 (indicatief)
31.	**FINN**	Groningen	Fijnmechanische bewerking en assemblage van metaal/kunststof componenten (CNC draaien/frezen) voor o.a. high-tech, defensie en high-pressure industrie.	Precisiecomponenten en toelevering voor (alkalische/PEM) stack/BOP-delen.	Complete engineering tot sub- en eindassemblage; inzet van moderne CNC & meettechnologie.	Componenten leverancier (precisie-onderdelen).	R3, R4 Rework/herbewerking; levensduurverlenging door precisie & toleranties.	Seriematige precisieproductie voor waterstofwaardeketen.	50–200 (indicatief)
32.	**Fluidwell**	Veghel	Meet- en regelinstrumentatie (flow/druk/telemetrie) voor	Technologie-agnostisch (instrumentatie)	Integratie BoP; truck-dispenser kalibratie-oplossing	Componenten/ Instrumentatie	N.v.t.	Opschaling: modulaire systemen 50–500 kW; Circulariteit: n.v.t.; Marktbereik: decentrale H_2	n.b.

			procesindustrie; inzetbaar in H_2-/elektrolyse-BoP.						
33.	**FMI Additive Manufacturing**	Bergen op Zoom	Ontwerp, productie en assemblage van hoogwaardige mechanische componenten en modules voor hightech, medische en industriële sectoren.	Additive manufacturing, precisiecomponenten voor PEM-elektrolyse en andere toepassingen.	Leverancier voor semiconductor, olie & gas, petrochemie, lucht- en ruimtevaart; groei door acquisities en innovatie.	Componenten (stack, hightech modules)	R1, R8 Poederrecycling & near-net-shape productie; minder materiaalafval.	Opschaling: uitbreiding productiecapaciteit en internationale klantenkring; Circulariteit: inzet op duurzame materialen en processen; Marktbereik: hightechindustrie wereldwijd.	200–500 (groep)
34.	**Frames Group**	Alkmaar	Systeemintegratie en BoP voor elektrolyse; PEM-elektrolyser skids (25 kW referentie) en engineering voor GW-concepten.	PEM (kleinschalig) + technologie-agnostisch BoP	Standaardisatie van skids en modulaire BoP; deelname aan gigawatt-ontwerptrajecten.	Subsystemen/BoP & systeemintegratie	R3 Ontwerp voor modulariteit/onderhoud; hergebruik componenten (projectafhankelijk).	Uitbreiding referenties in EU; integratie met OEM-stacks (Plug, etc.).	500–1000 (groep, indicatief)
35.	**Fujifilm Manufacturing Europe**	Tilburg	Ion-exchange & gas separation membranes (**activiteiten stopgezet nov 2024**)	PEM/AEM (membranen)	Afbouw; service naar klanten geborgd	Componenten	–	Opschaling: beëindigd; Circulariteit: n.v.t.; Marktbereik: n.v.t.	–
36.	**Hatenboer-Water**	Schiedam	Waterbehandeling (ontzouting/filtratie/RO) voor offshore/onshore; partner in PosHYdon; relevant voor elektrolyse feed-water.	Technologie-agnostisch (waterbehandeling)	NL-engineering & productie; wereldwijde service	Subsystemen/ Componenten (waterbehandeling)	R1, R8 Waterterugwinning; minder chemicaliën via RO/EDI	Opschaling: project-engineering; Circulariteit: Waterterugwinning; minder chemicaliën via RO/EDI; Marktbereik: maritiem/industrie wereldwijd	51–100
37.	**HFI Hartman**	Roden	Fijnmechanische bewerking, plaatwerk & assemblage; prototyping en serieproductie van metalen componenten.	Technologie-agnostisch (precisiedelen voor stack/BOP)	Geautomatiseerde CNC-productie; cleanroomassemblage; digitalisering productie.	Componenten/ Subsystemen (mechanische delen & modules)	R3, R4 Rework/hergebruik mogelijk; duurzame metaalverwerking.	Opschaling: serie-CNC-productie; Circulariteit: materiaal-efficiëntie; Marktbereik: NL/EU industrie.	100–250
38.	**Hydron Energy (Schaeffler)**	Noordwijk	PEM-elektrolyser stacks; bipolar plates met Enertect-coating	PEM	50 kW → 1 MW stacks; industriële schaal	Componenten	R8 Recycling: coating zonder edelmetalen; Hergebruik: n.v.t.; Ontwerp: n.v.t.	Opschaling: massaproductie bipolar plates; Circulariteit: coating zonder edelmetalen; Marktbereik: automotive & industrie wereldwijd	Onbekend
39.	**HyET E-Trol**	Arnhem	Ontwikkeling van AEM-elektrolysers met hoge differentiële druk (tot ~200 bar) en PCEC/H-SOEC concepten; OEM in ontwikkeling.	AEM (hogedruk) & PCEC/SOEC-varianten (R&D)	Industrialisatie vanuit pilot naar 100 kW+ stacks; deelname aan EU-projecten (hogedruk AEM).	Eindproduct (OEM in ontwikkeling)	R1, R4 Ontwerp voor onderhoud/modulariteit; materiaalgebruikreductie.	Kostendaling CAPEX/OPEX; directe hogedruk-H_2 zonder externe compressor.	10–50 (indicatief)

40.	**HyET Hydrogen (EHC)**	Arnhem	Elektrochemische waterstofcompressie en -scheiding (EHC/EHP); complementair aan hogedruk-elektrolyse en BoP.	Technologie-agnostisch (downstream compressie/zuivering)	Opschaling EHC-modules; integratie met elektrolyser-OEMs en HRS.	Componenten/ Subsystemen (compressie/zuivering)	R5 Modulaire servicemodellen; refurbish van cellen mogelijk.	Internationale uitrol; partnerschappen (Baker Hughes, etc.).	50–200 (indicatief)
41.	**HyGear**	Arnhem	On-site H_2 productie (Hy.GEN, SMR/elektrolyse) + Hy.GEN-E® (alkaline/PEM); gaszuivering (Hy.REC), systemen & service.	AE en PEM (kleinschalige systemen)	Modulaire systemen; 24/7 service; remote monitoring	Eindproduct (OEM kleinschalige systemen)	R8 Recycling: gasrecycling (Hy.REC)	Opschaling: wereldwijde roll-out; Circulariteit: H_2-recycling; Marktbereik: 25+ landen/industrie	51–200
42.	**ICH B.V.**	Hollandscheveld	Specialist in pneumatiek en afsluiters, verkoop, ontwikkeling en productie van industriële componenten voor klant-specifieke oplossingen.	Pneumatiek, afsluitertechniek, industriële automatisering (BOP-componenten voor elektrolyse).	Eigen assemblageafdeling, digitalisering via Smart Connected Supplier Network (SCSN).	Componenten leverancier (BOP, afsluiters, pneumatiek)	R3, R8 Onderhoud/hergebruik modules; componentrecycling mogelijk.	Opschaling: uitbreiding assortiment en digitalisering van processen; Circulariteit: klantgerichte oplossingen en efficiëntie; Marktbereik: industrie, machinebouw, waterstoftechnologie.	50–200
43.	**IHI Hauzer Techno Coating**	Venlo	PVD/PACVD-coatingapparatuur en -services; DLC en functionele coatings.	Coatings voor PEMFC/PEMWE – metaal bipolaalplaten en PTL's; low-friction/wear/corrosie; inline high-volume.	Samenwerking met IHI Ionbond; oplossingen van prototype tot hoogvolume.	Componenten/ productietechnologie (coatings & equipment).	R1, R5 Duurzame coatingprocessen; minder materiaalverbruik (iridium/nikkel).	Levensduurverlenging en kostenreductie van BPP/PTL; schaalbare productie.	200–500
44.	**IHI Ionbond (NL)**	Venlo	PVD/CVD-coatings voor metalen BPP's & PTL's (PEMFC/PEMWE): DOT™/Carbon-coating	PEM (BPP/PTL-coatings)	Industriële coatinglijnen; shop-in-shop en service-centers	Componenten	R4, R5 Ontwerp: corrosiebescherming + lage ICR ⇒ langere levensduur	Opschaling: uitbreiding coatingcapaciteit; Circulariteit: levensduurverlenging BPP/PTL; Marktbereik: NL/EU/OEM's	200+ wereldwijd
45.	**Kalpana Systems**	Delft	Spatial ALD-machines voor dunne films (batterijen, katalysatoren, elektrolysercomponenten)	Ondersteunend (coatingtechnologie)	Industriële sALD-machines; factor 1000 sneller dan conventioneel ALD	Componenten (coating)	R1, R8 Recycling: materiaalbesparing; Hergebruik: n.v.t.; Ontwerp: n.v.t.	Opschaling: high-volume sALD; Circulariteit: materiaalbesparing; Marktbereik: energie & verpakkingen wereldwijd	Onbekend
46.	**KepserPro Metaal**	Cuijk	Metaalbewerking, lassen, assemblage; productie van behuizingen & constructiedelen; ervaring in H_2-gerelateerde toepassingen.	Technologie-agnostisch (mechanische componenten)	Lean-productie, digitalisering & serie-productie; uitbreiding met lasrobots.	Componenten (behuizingen/frames)	R5, R8 Metaalrecycling; modulaire constructies; refurbish mogelijk.	Opschaling: serieproductie behuizingen; Circulariteit: metaalrecycling; Marktbereik: NL/EU industrie.	50–200
47.	**KMWE**	Eindhoven	High-precision machining & assemblage; OEM-onderdelen en modules voor high-tech, luchtvaart & energie.	Technologie-agnostisch (precisieonderdelen/assemblage)	Geautomatiseerde productielijnen & digital twins; smart manufacturing.	Componenten/ Subsystemen (precisie-modules)	R1, R3, R4 Design-for-manufacture & onderhoud; energie-efficiënte processen.	Opschaling: smart manufacturing; Circulariteit: energie-efficiëntie; Marktbereik: wereldwijd high-tech/energie.	500–1000
48.	**Lumileds**	Eindhoven	Halfgeleider-/fotonicaproductie (LEDs, opto-elektronica); relevant voor sensoren/optische monitoring in H_2-systemen.	Technologie-agnostisch (sensoriek/fotonica)	Opschaling via wafer-fabs; automatisering productie.	Componenten (sensoriek/ opto-elektronica)	R1, R4 Materiaalreductie & efficiëntie; levensduurverlenging.	Opschaling: waferproductie; Circulariteit: materiaal-efficiëntie; Marktbereik: wereldwijd (industrie & energie).	5.000+ (groep)

49.	**Machinefabriek Boessenkool**	Almelo	Grote, nauwkeurige machinebouw/verspaning; co-makership voor complete machines en systemen.	Toelevering van heavy-duty frames/drukdelen en skids voor energie/industrie (relevant voor elektrolyse-opstellingen).	120+ jaar ervaring; state-of-the-art machinepark.	Componenten/ Systeemframes	R3, R4 Ontwerp voor onderhoud/hergebruik; modulaire bouw.	Co-engineering en turnkey realisatie.	100–250
50.	**Magneto Special Anodes**	Schiedam	Titanium/MMO-anodes en stroomcollectoren; componenten voor elektrochemische industrie incl. (alkaline) elektrolyse.	AE componenten (anodes)	Industrialisatie coating/refurbishment; maatwerk	Componenten (anodes/coatings)	R0, R1, R3, R5 Hergebruik: recoating/refurbishment; Refuse: metaalvrije electrode; Reduce: vermindering van hoeveelheid coating, maar behoud van stabiliteit is hierbij van belang	Opschaling: wereldwijde leveringen; Circulariteit: refurbish anodes; Marktbereik: chemie/energie	51–100 (wereldwijd ≈300)
51.	**Masévon Group**	Hardenberg	Ontwikkeling en productie van high-tech systemen (system development & integration, vacuum, cleanliness, frame/plaatwerk, machining).	Systemen en modules voor high-tech/energie; integrator voor vacuüm/clean-assemblies relevant voor stackproductie.	Uitbreiding faciliteiten (cleanrooms/productiehal) en groep van complementaire bedrijven.	Systeemintegrator/ OEM toelevering.	R3, R4 Ontwerp-voor-modulariteit; onderhoud/hergebruik mogelijk.	'Make complex easy'; verdubbeling omzet, internationale groei.	500–1000 (groep)
52.	**Metal Membranes**	Leeuwarden	Ontwikkeling en productie van anorganische poreuze (metaal)membraan-filters.	Filtratie/membranen voor (elektro)chemische processen; potentiële stack/BOP-toepassingen.	Gefinancierd (Series A); IP en nicheproductie.	Componenten (membranen/filters).	R4, R8 Materiaalrecycling (edelmetalen); membraanreparatie.	Industrialiseerbare metaalmembranen voor brede industrie-inzet.	10–50
53.	**MTSA Technopower**	Arnhem	Test benches & turn-key pilots voor elektrolyse	Alle (test/validatie)	Standaardiseerbare testplatforms; geautomatiseerde testcycli	Subsystemen	R3 Ontwerp: modulaire testopstellingen	Opschaling: meer testcapaciteit; Circulariteit: indirect via optimalisatie; Marktbereik: NL/EU	50–100
54.	**MXPolymers**	Wageningen	PFAS-vrije SPX3-polymeer & membranen voor PEM (fuel cells/elektrolyse/ compressors)	PEM (membranen/ionomeren)	Consultancy + productontwikkeling; custom polymeren	Componenten (membranen/ ionomeren)	R0, R1 Ontwerp: PFAS-vrij, hogere prestaties	Opschaling: SPX3-membranen naar MEA's; Circulariteit: PFAS-vrij; Marktbereik: H_2-toepassingen	<25
55.	**Nanohybrids**	Amsterdam Science Park	Core-shell nanodeeltjes voor katalysatoren (Ni, Fe, Zn); R&D voor elektrolyse	Ondersteunend (katalysatorontwikkeling)	Lab→pilot; samenwerking HyPRO	Componenten (nanomaterialen)	R1, R3, R8 Recycling: minder kritieke metalen; Hergebruik: n.v.t.; Ontwerp: n.v.t.	Opschaling: katalysatorontwikkeling; Circulariteit: minder kritieke metalen; Marktbereik: NL/EU R&D	Onbekend
56.	**NEWES Hydrogen**	Hengelo	(Ultra)hogedruk alkaline-elektrolyser (HP-AE) met directe H_2-uitvoer tot ~350 bar; modulair ~1 MW modules koppelbaar tot ~25 MW.	AE (high-pressure)	Compacte, modulaire bouwblokken; focus op kostenreductie (-30% CAPEX claim) en footprint (-20%); minder OPEX en <80 dB.	Eindproduct (OEM elektrolyser)	R0, R1 Refuse: geen zelddzame metale worden gebruikt; Ontwerp: minder BoP (geen compressoren/drogers) ⇒ lager materiaal-/energieverbruik	Opschaling van demo naar multi-MW projecten; positionering als NL high-pressure AE OEM.	51–100
57.	**NEYA / VONK**	Zwolle	MW-rectifiers & power conversion voor elektrolysers	Alle (power electronics)	Modulaire vermogensblokken; digitale besturing	Subsystemen/ Componenten	R4, R5 Ontwerp: modulaire opbouw	Opschaling: grotere vermogensmodules; Circulariteit: energie-efficiëntie; Marktbereik: NL/EU	50–100

58.	**NPROXX**	Heerlen	Type IV composiet hogedruk H_2-drukvaten (350/700 bar) voor mobiliteit, opslag en HRS; modules voor stationair en mobiel gebruik.	Technologie-agnostisch (waterstofopslag)	Industrialisatie van Type IV productie; certificering en 30-jaar levensduur claims; series voor HDV/trein/stationair.	Componenten/ Subsystemen (H_2-opslagvaten/ modules)	R3, R4, R8 Herbruikbare skids; recycling CFRP/liners ontwikkelingsgericht; service/inspectieprogramma's .	Opschaling: serieproductie tanks; Circulariteit: recycling/ inspectie-programma's; Marktbereik: wereldwijd mobiliteit & infra.	200–500 (indicatief)
59.	**NTS Norma**	Hengelo & Drachten	Ultra-precisie verspaning en mechatronische assemblage (<1 µm); componenten & modules voor high-tech systemen.	Technologie-agnostisch (precisie-componenten/ assemblage)	'Factory of the Future' (Drachten); robotisering, metrologie, cleanroom.	Componenten/ Subsystemen (precisie-modules)	R3, R4 DfM/DfA; rework/reuse onderdelen; kwaliteitsborging verlengt levensduur.	Opschaling: fabrieksuitbreiding & robots; Circulariteit: rework/kwaliteit; Marktbereik: wereldwijd high-tech/energie.	2.000+ (NTS Group; site-specifiek lager)
60.	**ON2Quest**	Hoevelaken	BoP-componenten & engineering voor AEM-testopstellingen op hoge druk (50–200 bar)	AEM (test/BoP)	Flexibele testsetup tot 1 kW; gas-vloeistofscheider & BoP-integratie	Subsystemen/ Componenten	N.v.t.	Opschaling: meer partners/testcases; Circulariteit: n.v.t.; Marktbereik: NL-lab/industrie	n.b.
61.	**Oreel Hallum**	Hallum	Plaatwerk/constructies in staal/RVS/alu; laserlasrobotica; frames, kasten en modules voor machinebouw/energie.	Technologie-agnostisch (plaatwerk/frames)	Robotisering & digitalisering; paperless/automated factory; serie-opdrachten.	Componenten/ Subsystemen (frames/behuising)	R3, R4, R8 Metaalrecycling; modulair ontwerp; reparatie/hergebruik mogelijk.	Opschaling: serieplaatwerk; Circulariteit: metaalrecycling/modulariteit ; Marktbereik: NL/EU machinebouw/energie.	200–500 (indicatief)
62.	**Parker Hannifin NL**	Oldenzaal	Filtratie/droogtechniek & componenten voor H_2-systemen	Alle (BoP)	Standaard modules; integratie in OEM-lijnen	Componenten	R3, R4 Ontwerp: vervangbare cartridges	Opschaling: uitbreiding productlijnen; Circulariteit: vervangbare delen; Marktbereik: wereldwijd	multinational
63.	**Plug Power/ Frames (NL)**	Alphen aan den Rijn	Turn-key elektrolyseroplossingen & systems integration	PEM/AE (systeemintegratie)	Opschaling via integratie van Plug stacks + Frames-BoP; 1 MW → 1,000 MW plants	Subsystemen/ Eindproduct	R3, R4 Ontwerp: geïntegreerde BoP ⇒ lagere CapEx	Opschaling: EU-capaciteit uitbreiden; Circulariteit: standaardisatie BoP; Marktbereik: EMEA	≈300
64.	**Powall**	Delft	Gas-fase (droge) nanocoatings via ALD voor poeders/elektrokatalysatoren; continue reactor (industrieel).	PEM (katalysatorpoeders/ coatings)	Continu-reactoren; Operio; pilot→industrie	Componenten (gecoate poeders)	R1 Ontwerp: materiaal-efficiëntie & minder kritieke grondstoffen (o.a. iridium)	Opschaling: ALD-coatingcapaciteit; Circulariteit: minder PGM/Co; Marktbereik: energie-materialen	scale-up
65.	**Prodrive Technologies**	Eindhoven	Vermogenselektronica/omvormers/rectifiers en besturing voor elektrolyse-voeding en industriële automatisering.	Technologie-agnostisch (power electronics voor alle stacktypes)	98.6% EURO-eff.; PF>0.99; <3% THD; modulaire racks	Subsystemen/ Componenten (power conversion)	R1, R4 Ontwerp: hoge efficiëntie ⇒ minder verliezen	Opschaling: schaalbare racks; Circulariteit: lagere verliezen/levensduur; Marktbereik: GW-projecten	3.000+ (bedrijf)
66.	**PTG/e (Polymer Technology Group Eindhoven)**	Eindhoven	Contract R&D in polymeren/membranen/ ionomeren; labs op TU/e-campus	Ondersteunend (materialen R&D)	Project-gebaseerde R&D; maatwerk materialen & karakterisatie	Componenten (materialen R&D)	R0, R1 Ontwerp: materiaal-optimalisatie	Opschaling: pilot→industriële validatie (MIC/e samenwerking); Circulariteit: PFAS-vrije alternatieven (indien gevraagd); Marktbereik: NL/EU	≈20
67.	**Pure Water Group**	Helmond	Waterzuivering voor elektrolyse (RO, EDI, MD, EDR) voor ultrapuur water; engineering en service.	Technologie-agnostisch (ultrapuur water voor alle stacktypes)	Pre-engineered CEDI tot 180 m³/u; OEM-integratie	Subsystemen/ Componenten (waterbehandeling)	R1, R8 Ontwerp: minder chemicaliën (CEDI); waterterugwinning	Opschaling: OEM-kanalen; Circulariteit: waterhergebruik; Marktbereik: wereldwijde projecten	n.b.

68.	**RNSolutions**	Sint-Oedenrode	Membrane distillation modules voor ultrapuur water (UPW) – relevant voor elektrolyse	Ondersteunend (waterbehandeling)	Industriële toepassingen (zero liquid discharge)	Subsystemen/ Componenten	R3, R8 Recycling: waterhergebruik; Hergebruik: n.v.t.; Ontwerp: n.v.t.	Opschaling: grotere modules; Circulariteit: waterhergebruik; Marktbereik: industrie wereldwijd	Onbekend
69.	**SALD**	Eindhoven	Spatial ALD voor coatings op membranen, elektroden, batterijen	Ondersteunend (coatingtechnologie voor PEM/AE)	Roll-to-roll systemen; industriële integratie	Componenten	R1, R8 Recycling: materiaalreductie; Hergebruik: n.v.t.; Ontwerp: n.v.t.	Opschaling: massaproductie nano-coatings; Circulariteit: materiaalreductie; Marktbereik: energie & elektronica wereldwijd	≈20
70.	**Siemens Energy (PEM stacks JV Air Liquide)**	Rijswijk	PEM-stacks, MV transformers, gelijkrichters (IGBT of thyristor, control systems, primaire warmtewisselaar en alle verbindende leidingwerk en elektrische aansluitingen	PEM (systeem en componenten)	Sterk geautomatiseerde fabriek; robotics/digitalisering	Eindproduct/ Componenten	R0, R8 Recycle: membrane met kritische materialen (Pt/Ir); Ontwerp: hoge efficiëntie/seriematig	Opschaling: 1→3 GW/jaar; Circulariteit: PFAS vrije membraan; Marktbereik: wereldwijd	multinational
71.	**SparkNano**	Eindhoven	Spatial ALD/PEALD depositie voor dunne-film katalysator- en membraanlagen; schaalbaar (roll-to-roll).	PEM/AEM componentfabricage (thin-film/ALD)	100× snellere ALD; roll-to-roll; inline integratie	Proces-equipment/ Componentfabricage	R1 Ontwerp: materiaal-efficiëntie (factor 40–50 minder Ir)	Opschaling: massaproductie; Circulariteit: minder PGM; Marktbereik: elektrolyse/FC/batterijen	scale-up
72.	**Sunfire SOEC (MultiPLHY)**	Rotterdam	SOEC-elektrolyser 2.6 MW bij Neste (≈60 kg H_2/uur) – industriële demo	SOE (SOEC)	Industriële integratie; hoge efficiëntie door warmtebenutting	Eindproduct/ Subsystemen	R1 Ontwerp: lagere stroomvraag (SOEC)	Opschaling: commissioning/start-up 2023–2025; Circulariteit: minder elektriciteit per kg H_2; Marktbereik: raffinage	–
73.	**SuWoTec**	Groningen	Electrode-/materiaalinnovaties en energieopslag (o.a. modulaire batterijoplossingen) met focus op circulariteit; Potentiële toepasbaarheid in elektrolysecomponenten; early-stage R&D	PEM/AEM (electrode-/materiaaltoepassingen) - indicatief	Seriematige productie van modules; samenwerking met onderwijs/werkbedrijven.	Componentmaterialen/Subsystemen	R1, R8 Sterke circulariteitsfocus (recyclebare ontwerpen/materialen).	Opschaling: serie modules/materialen; Circulariteit: recyclebare ontwerpen; Marktbereik: NL/EU energie & R&D.	10–50 (indicatief)
74.	**Teijin Aramid**	Arnhem	Aramiden voor hogedruksystemen/leidingen (H_2)	Alle (materialen)	Uitbreiding vezelproductie; industriële integratie	Componenten	R3, R4 Ontwerp: hoge duurzaamheid/veiligheid	Opschaling: capaciteitsuitbreiding; Circulariteit: langere levensduur; Marktbereik: wereldwijd	multinational
75.	**thyssenkrupp nucera (scalum®)**	Veghel	Alkaline water electrolysis (AWE) 20 MW modulair: scalum®	AE (AWE)	Seriematige 20 MW modules; reserveringscontracten 100s MW	Componenten/ Subsystemen (AWE-modules)	R1 Ontwerp: schaalbaar & minder zeldzame materialen	Opschaling: GW-range; Circulariteit: lagere materiaalintensiteit; Marktbereik: EU/NA	multinational
76.	**VDL Hydrogen Systems**	Eindhoven/ Heerenveen	Ontwikkeling/maakpartner voor alkaline stacks en systeemproductie; samenwerking/merger met Battolyser voor flexibele grootschalige elektrolyse.	AE (ontwikkeltraject)	Opschaling via VDL-productiefaciliteiten; industrialisatie van stack-productie.	Componenten/ Stack-productie & systeemproductie	R3, R8 Ontwerp: materiaalzuiverheid, scheidbaarheid en recyclebaarheid; design-for-manufacture & service; modulariteit.	Grote serieproductie in NL; kostendaling door schaal en integratie.	10.000+ (VDL Groep; unit kleiner)

77.	**Veco Precision**	Eerbeek	Electroformed micro-precisie onderdelen; flow fields/bipolaire platen voor PEM/AE; nikkelcomponenten.	PEM & AE componenten (flow fields/bipolar plates)	Massaproductie op micron-nauwkeurigheid; LDI-technologie	Componenten (flow fields, BP)	R1 Ontwerp: miniaturisatie/precisie (minder materiaal)	Opschaling: grote NL-faciliteit; Circulariteit: materiaal-efficiëntie; Marktbereik: semicon/energie/medisch	≈200
78.	**Veolia NL**	Schiphol-Rijk	Water/UPW-systemen voor elektrolyse	Alle (waterbehandeling)	Modulaire UPW-skids; remote monitoring	Subsystemen	R3, R8 Recycling: waterterugwinning; Ontwerp: modulaire units	Opschaling: grotere UPW-capaciteit; Circulariteit: waterhergebruik; Marktbereik: wereldwijd	multinational
79.	**VONK (Neya power supplies)**	Zwolle	Vermogensconversie en gelijkrichters voor elektrolysers (Neya); containerized power supply, besturing en DC-grids.	Technologie-agnostisch (power supplies)	Gestandaardiseerde, schaalbare power-supply platforms voor MW- en GW-electrolyse.	Subsystemen/ Componenten (power conversion)	R4, R5 Modulaire opbouw; refurbishment/upgrades mogelijk.	Leveren van elektrolyser-voedingen in EU-projecten; samenwerking met OEMs/system integrators.	200–500 (indicatief)
80.	**VSParticle**	Delft	Spark ablation nanoparticle tools en nanoprinting voor katalysatorlagen; iridiumreductie voor PEM-elektrolyse.	PEM (katalysatoren/CL)	Pilotlijn (CLEANHYPRO); 10× lagere Ir-loading	Componenten/ Proces-equipment (katalysatorfabricage)	R1 Ontwerp: minder PGM-gebruik	Opschaling: pilot→lijn; Circulariteit: materiaalreductie Ir; Marktbereik: R&D/industrie wereldwijd	scale-up
81.	**XINTC**	Eerbeek	Modulaire AE-systemen met kunststof gasmodules; direct koppelbaar aan zon- en windenergie; schaalbaar van 600 kW tot 100+ MW; >100.000 on/off-cycli.	AE (advanced alkaline)	modulaire secties van 150 kW geïntegreerd in een 1.2 MW-container. Opschaling mogelijk met 1.2 MW containers tot 100+ MW.	Eindproduct	R0, R1, R2, R4, R8 Ontwerp: geen kritieke materialen; alkaline technologie op een nieuwe manier ingezet met kunststof; reductie van vermogenselektronica door directe zonnekoppeling; recyclebare stacks van kunststof; bij uitval van een gasmodule ontstaat er geen volledige systeemstilstand.	Opschaling: middensegment tussen 600 kW en 100+ MW; Circulariteit: lagere O&M/kunststof modules; Marktbereik: decentrale H_2-productie in verschillende kwaliteiten	scale-up
82.	**Yokogawa NL**	Amersfoort	DCS/SCADA, sensoren, analyzers en advanced control (APC/MPC) voor elektrolyse-/H_2-installaties; optimalisatie van elektrolyser-operatie.	Technologie-agnostisch (controls/instrumentatie)	Digitale twin/advanced analytics; standaardiseerbare templates voor elektrolyse-planten.	Subsystemen (control/ instrumentatie)	R4, R5 Levensduurverlenging via condition monitoring; retrofit/upgrade van control-systemen.	Opschaling: uitrol standaard control-templates; Circulariteit: retrofit/ levensduurverlenging; Marktbereik: wereldwijd energie/industrie.	17.000+ (groep; NL-vestiging kleiner)
83.	**ZEF – Zero Emission Fuels**	Delft	Modulaire micro-plant: CO2 direct air capture (DAC) unit + alkaline elektrolyse + methanolsynthese; direct gekoppeld aan PV.	AE + DAC + MeOH	Massaproductie van modulaire units; direct-PV-koppeling (geen zware power electronics)	Eindproduct/ Subsystemen	R1, R3 Ontwerp: materiaalbesparing door modulariteit	Opschaling: numbering-up (velden); Circulariteit: CO_2-hergebruik; Marktbereik: zonne-rijke regio's/remote	startup/scale-up

Appendix B

Het onderstaande overzicht geeft een samenvatting van de belangrijkste Nederlandse onderzoeksprogramma's op het gebied van elektrolyse en elektrolysercomponenten. Voor elk programma worden de inhoudelijke focus, betrokken partners, resultaten en looptijd beschreven.

Dit overzicht biedt inzicht in waar kennisontwikkeling en innovatie plaatsvinden en vormt een belangrijke basis voor het identificeren van circulaire innovaties en de rol van kennisinstellingen daarin.

8.5.1 HyPro

HYPRO (2024-2029)			
DOELEN & AMBITIES	**TECHNOLOGIEËN**	**THEMA'S**	**ACTIVITEITEN**
Optimalisatie & kostenreductie van waterstoftechnologieën: • Efficiëntie verbeteren • Duurzame materialen ontwikkelen • Omgaan met variabele belasting (PEM) • Warmteintegratie (SOEC) • Onderzoek naar AEM & andere nieuwe elektrolysetechnologieën • Valorisatie van restgassen: plasmatechnologie & microreactoren • Integratie met vermogenselektronica en andere BoP-componenten	AWE PEM SOEC AEM	Technologie-ontwikkeling; Systeemintegratie	2025 Ontwikkeling van testprotocollen en componenten 2026 Selectie & testen van materialen 2027 Ontwikkeling van monitoringtools en risicobeoordelingen 2028-2029 Prestatieonderzoek, modelontwikkeling en ontwerp van stackmaterialen 2030 Operationele systemen op schaal

Partners

Kennisinstellingen	Bedrijven	Start-ups
Avans Hogeschool	BASF	Adsensys
DIFFER	Bosal Group	AVOXT
Fontys Hogeschool	Bosch	Battolyser Systems
HAN	Braskem	Circonica
Hanzehogeschool Groningen	Eneco	Dr Ten
Maastricht University	FEV energy	ELEXEL
Radboud Universiteit	Hauzer	Fluidwell
Rijksuniversiteit Groningen	Ionbond	HyET E-Trol
Saxion Hogeschool	I-Qatalyst	HyStream
TNO	Johnsons Matthey	Nano Hybrids
TU Delft	LyondellBasell	NEWES
TU Eindhoven	PRODRIVE	On2Quest
Universiteit Leiden	RWE	Powall
Universiteit Utrecht	Sairem	SALD
Universiteit van Amsterdam	Shell	SparkNano
University of Twente	SolydEra	TSG Group
Wageningen Universiteit	Sitech	VS Particle
	Teijin	
	TOPSOE	
	Total Energies	
	Vatenfall	
	VDL	
	Veco	

8.5.2 NXTGEN Hightech

NXTGEN HIGHTECH (2023-2030)			
DOELEN & AMBITIES	**TECHNOLOGIEËN**	**THEMA'S**	**ACTIVITEITEN**
Realisatie van een coherent, wendbaar en internationaal toonaangevend hightech equipment ecosysteem: • Kostenreductie en efficiëntieverhoging van elektrolysers • Ontwikkeling van een concurrerende Nederlandse elektrolyserindustrie 3 elektrolyse-projecten: • PHOENIX-Alkalina (AWE) • Derde-generatie elektrolyser (primair PEM en AWE, daarnaast SOEC, AEM, en CO_2-elektrolyse) • Massaproductie van ZEF: microplants voor conversie van CO_2 en H_2O naar methanol m.b.v. zonne-energie	• AWE • PEM • SOEC • AEM • CO_2-elektrolyse	Technologie-ontwikkeling; Marktontwikkeling; Opschaling	**2023-2030** Drie calls van elk 11 miljoen euro **2025** Publicatie whitepaper 'Elektrolyse: de motor van waterstofproductie' Installatie van 50 kW PHOENIX-Alkalina prototype Lancering SparkNano Omega: het eerste high-speed roll-to-roll spatial ALD-systeem wereldwijd VSParticle & Plug Power tonen uitstekende prestaties met tot 90% minder Ir-gebruik aan **2026** Installatie van 500 kW PHOENIX-Alkaline demo plant **2026+** PHOENIX-Alkaline op 15 MW schaal ZEF-assemblagelijn van >75.000 microplants/jaar

Partners

Bedrijven	Start-ups	Kennisinstellingen	Samenwerkingsverbanden
Boers & Co[3]	Doeko[2]	Technische universiteit Eindhoven[1]	High Tech NL[1, 2, 3]
Bosch[2]	Magneto[2]	TNO[1, 2, 3]	
Demcon[1]	Powall[2]	TU Delft[2, 3]	
Douna[1]	Promolding[3]	TU Eindhoven[2]	
NPK Design BV[3]	Sparknano[2]	Universiteit Twente[1]	
Redstack[1]	Verbi[2]		
SPGprints[1]	VSParticle[2]		
VDL Hydrogen Systems[1,2]			
VDL Steelweld[3]			

Betrokken bij [1]PHOENIX-Alkalina, [2]Derde-generatie elektrolyser, [3]Massaproductie van ZEF

8.5.3 VoltaChem

VOLTACHEM (2015-HEDEN)			
DOELEN & AMBITIES	**TECHNOLOGIEËN**	**THEMA'S**	**ACTIVITEITEN**
Versnelling van industriële elektrificatie en decarbonisatie Productie van groene waterstof en chemische bouwstenen uit hernieuwbare elektriciteit: • Component-ontwikkeling & levensduurtesten • Opschaling en efficiëntieverbetering (TRL 3-5 naar TRL 5-7) Ontwikkeling van nieuwe businessmodellen en technologieën	AWE PEM SOEC AEM	Technologie-ontwikkeling; Marktontwikkeling; Opschaling	**2015** Lancering VoltaChem door TNO **2018** Nieuw protocol voor accelerated stress testing (AST) voor PEM **2020** Opening Faraday Lab, HydroHub, Stack Test Center & Field Lab Industrial Electrification **2022** Start Supercell-programma (PEM Gen 2) **2023** Rapport 'Next Level SOEC' met Air Liquide, BP, OCI, TNO en ISPT **2025** Licentieovereenkomst met Powall voor low-iridium katalysatoren **2026+** Opschaling richting gigawattcapaciteit en industriële demonstratieprojecten **Doorlopend** Jaarlijkse events zoals "Scale 2 Impact" en Hydrogen Technology World Expo

Partners

Energie	Procesindustrie	Leveranciers & licentieverleners	Beleids-, kennis- en brancheorganisaties
Eneco	Dow	Avantium	ChemistryNL
Gasunie	DSM	Bosch	DVGW
Mestverwerking Fryslan	Eastman	Capgemini	e-Refinery
Orsted	Evonik	Frames	EnTranCe
TotalEnergies (Pitpoint)	GAFT	Fujifilm	Enviu
SkyNRG	Groningen Seaports	Morphic (GI Dinamics)	European Commission
Stedin	Huntsman	Haldor Topsoe	Fieldlab
Suez	HVC	Hydrogenics	FME
Twence	Linde	Hydron Energy	Fraunhofer
USG Industrial Utilities	Lyondellbasell	Hygear	Gemeente Rotterdam
Vattenfall	Mabalbar Associates	Hysytech	Hydrohub
	Nouryon	Ineratec	IEA
	Novamont	Johnson Matthey	Innovation Quarter
	OCI	Maritiem Kennis Centrum	ISPT
	Perstorp	Proton Ventures	instm
	PTT Global Chemical Public Company Limited	PV3 Technologies	InvestNL
	Radici Chimica	Siemens Energy	nlr
	Repsol	Sitech	NWO
	Sabic	Spliethoff	Port of Amsterdam
	Shell	Sunfire	Port of Antwerp
	Tata Steel	Thyssenkrupp	Port of Rotterdam
	Teijin Ltd.	Vertech group	Regen
	Toepsoe	ZEF	TNO
	Total Energies		TU Delft
	Tronox		VEMW
	Vopak		VNCI
			Wageningen University & Research
			WaterstofNet
			Wuppertal Institut

8.5.4 HyScaling

HYSCALING (2021-2024)			
DOELEN & AMBITIES	**TECHNOLOGIEËN**	**THEMA'S**	**ACTIVITEITEN**
Reductie van de *levelized cost of hydrogen* (LCOH) met 25-30% Het mogelijk maken van 5 GW elektrolyser capaciteit in NL in 2030 • Ontwikkeling van componenten, stacks, en volledige systemen • Kostenefficiënte productieprocessen • Hogere efficiënties en langere levensduur • Systeemintegratie	• AWE • PEM	Technologie-ontwikkeling; Systeemintegratie	**2021** Start HyScaling **2022** Publicatie 'HyScaling - public progress report 1st year' **2023** Publicatie 'HyScaling - public progress report 2nd year' **2024** Presentatie resultaten tijdens Waterstof Innovatiedag & publicatie van 2 webinars

Partners

Bedrijven	Start-ups	Kennisinstellingen	Samenwerkingsverband	Overheden
Borit	Delft IMP	Fraunhofer IPT	Brainport Development (BPD)	Brabantse Ontwikkelings Maatschappij (BOM)
Danieli Corus	DotX Control	Hanze Hogeschool-EnTranCe	FME	
Frames	Hydron Energy	TNO	ISPT	
Greenberg	Magneto	TU Delft		
Traurig				
Hauzer	MXPolymers	TU/e		
HyCC	SALD			
Ionbond	ZEF			
MTSA				
Teijin				
VDL				
Veco				
Vonk				
VSL				

8.5.5 Hydrohub Innovation Platform

HYDROHUB INNOVATION PLATFORM (2018 - HEDEN)			
DOELEN & AMBITIES	**TECHNOLOGIEËN**	**THEMA'S**	**ACTIVITEITEN**
Grootschalige groene H_2-productie d.m.v. 3 deelprogramma's: **GigaWatt Scale Electrolyser** Ontwerp voor 1 GW fabriek met integratie van duizend elektrolysers **HyChain** Internationale waterstofproductie- en transportketens in kaart brengen **Hydrohub MegaWattt Test Center** Kostenreductie en efficiëntieverhoging van elektrolysers d.m.v. ontwerp, realisatie & exploitatie van testcentrum in Groningen	PEM AWE	Technologie-ontwikkeling; Opschaling; Systeemintegratie; Veiligheid & regelgeving	**2018-2022** Project: 'Gigawatt Scale Electrolyser' **2020** Rapport: 'Integration of gigawatt scale electrolyser in five industrial clusters' Rapport: 'Gigawatt green hydrogen plant' **2022** Rapport: 'A one-gigawatt green hydrogen plant: Advanced design and total installed capital costs' **2018-2019** Rapporten voor HyChain deel 1, 2 & 3 **2020-heden** Rapporten voor HyChain deel 4 & 5 **2018-2023** Ontwerp & realisatie van het Hydrohub MegaWatt Test Center in Groningen (Phase 1) **2023-heden** Exploitatie van de elektrolysers in het testcentrum voor onderzoek & ontwikkeling van commerciële exploitatiemogelijkheden (Phase 2)

Partners

Bedrijven	Kennisinstellingen	Samenwerkingsverband	Overheden
Deltalinqs[1 3] Dow[1 3] Frames[1 2 3] Gasunie[1 3] Haskoning[3] HyCC[2 3] Kalavasta[3] Metabolic[3] MTSA Techopower[1] Nobian[2 3] North Sea Port[1] Nouryon[1 3] OCI Nitrogen[1 3] Orsted[1] Port of Amsterdam[1] Port of Rotterdam[1 3] Proton Ventures[3] Quo Mare[3] Quintel[3] SDR Platform[1] Shell[2] Stedin[1 3] Tata Steel[1] TenneT[2] Vopak[1 3] Yara[1 2 3] Yokogawa[2]	Hanze University of Applied Sciences[2] Imperial College London[1] ISPT[1 2] Rijksuniversiteit Groningen[2] TNO[1 2 3] TU/e[1] Universiteit Utrecht[1] TU Delft[3]	Smart Delta Resources[1]	Gemeente Amsterdam[1] Gemeente Rotterdam[1] Groningen Seaports[1 2] Provincie Noord-Holland[1] Provincie Groningen[1] Provincie Zuid-Holland[1 3] TKI Energie & Industrie[1 2]

Betrokken bij [1]GigaWatt Scale Electrolyser, [2]HydroHub MegaWatt Test Center, [3] HyChain

8.5.6 HyDelta

HYDELTA (2020-2026)			
DOELEN & AMBITIES	**TECHNOLOGIEËN**	**THEMA'S**	**ACTIVITEITEN**
Grootschalige implementatie van H2 in Nederland Het oplossen van technische, wetenschappelijke en sociale barrières	Generiek	Veiligheid & regelgeving Ketenintegratie	**2022** HyDelta 1: 42 publicaties over o.a. waterstof veiligheid & waterstof in het gasnetwerk **2022-2023** HyDelta 2: 26 publicaties over o.a. economische & maatschappelijke aspecten van waterstof **2023-2024** HyDelta 3: o.a. economische & maatschappelijke aspecten van waterstof **2025-2026** HyDelta 4: veiligheid & waterstofnetwerk

8.5.7 CIRCO Track – Elektrolysers

CIRCO TRACK - ELEKTROLYSERS (2025)			
DOELEN & AMBITIES	**TECHNOLOGIEËN**	**THEMA'S**	**ACTIVITEITEN**
Circulaire kansen identificeren in elektrolyseketen Circulaire businessmodellen & ontwerpstrategieën bij productie, integratie en operatie van elektrolyse systemen Componenten, BoP, stacks, systeemintegratie, operationeel	Generiek	Technologie-ontwikkeling Systeemintegratie Circulariteit	**2025** Initiatie, Ideate & Implement Workshop (feb-mrt) Identificatie van 5 oplossingsrichtingen: 1. Ontwerpinterventies voor hoogwaardige recycling 2. Nieuwe businessmodellen ter bevordering van hergebruik 3. Samenwerking binnen de keten 4. Standaardisatie & gedeelde data 5. Focus op Total Cost of Ownership (TCO)

Partners

Bedrijven	Start-ups
Bosal	Battolyser Systems
Bosch	HyCC
Endress+Hauser Group	Powall
Plug Power	
Uniper	

8.5.8 HEAVENN (demonstratieprogramma)

HEAVENN (2020 -2027)			
DOELEN & AMBITIES	**TECHNOLOGIEËN**	**THEMA'S**	**ACTIVITEITEN**
Ontwikkeling van een volledig functionele groene waterstofketen in Noord-Nederland Demoprojecten die productie, distributie, opslag & eindgebruik van H2 samenbrengen in functionele 'H2 valley'	Generiek	Ketenintegratie Marktontwikkeling	Meerdere demo-projecten gericht op productie, distributie, opslag, en lokaal eindgebruik van H_2, verdeeld over 4 clusters: • Chemical Park Delfzijl • Emmen Industry • Opslag & gebouwde omgeving • Groene mobiliteit

8.5.8 GroenvermogenNL (transitieprogramma)

GROENVERMOGENNL (2021 -2030)			
DOELEN & AMBITIES	**TECHNOLOGIEËN**	**THEMA'S**	**ACTIVITEITEN**
Transitie naar grootschalig gebruik van groene waterstof in de Nederlandse industrie ondersteunen R&D-projecten, pilots, demonstratie- en opschalingsprojecten, human capital	Generiek	Human capital Opschaling Technologieontwikkeling	Verscheidene projecten verdeeld over de volgende thema's: 1. Research & development 2. Pilot en kleine demonstraties 3. Opschaling 4. Human capital agenda

Referenties

RVO 2025, Routekaart Circulaire Elektrolysers 1.0

FME 2025, Excelling in Hydrogen - Solutions for a sustainable world

Ekinetix 2022, Waterstof: kansen voor de maakindustrie in Zuid-Holland, in opdracht van Gemeente Rotterdam, Provincie Zuid-Holland, InnovationQuarter

FME-TNO 2020, Elektrolysers: Kansen voorde Nederlandse Maakindustrie

Ekinetix 2019, Waterstof: kansen voor de Nederlandse industrie

Websites van bedrijven en kennisinstellingen

Dit rapport is tot stand gekomen in opdracht van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO).

Dit rapport is opgesteld onder verantwoording van Ekinetix. De resultaten reflecteren niet noodzakelijkerwijs het standpunt van RVO of andere in deze studie genoemde partijen. Er kunnen geen rechten worden ontleend aan de inhoud van deze studie.

Alle informatie in dit rapport is intellectueel eigendom van Ekinetix.

Dit rapport is te citeren als:

Ekinetix (2025), Circulaire Oplossingen voor Elektrolysers in Kaart- Trends, Kansen, Knelpunten.

© Ekinetix, November 2025