

# Evaluating lifetime of electrolyzers managing fluctuating supply of renewable energy

Eindrapportage 2016-2017





## Evaluating lifetime of electrolyzers managing fluctuating supply of renewable energy

### Author(s)

F.P.F. van Berkel (ECN)

S. ten Hoopen (Hydron Energy)

### Disclaimer

Although the information contained in this document is derived from reliable sources and reasonable care has been taken in the compiling of this document, ECN cannot be held responsible by the user for any errors, inaccuracies and/or omissions contained therein, regardless of the cause, nor can ECN be held responsible for any damages that may result therefrom. Any use that is made of the information contained in this document and decisions made by the user on the basis of this information are for the account and risk of the user. In no event shall ECN, its managers, directors and/or employees have any liability for indirect, non-material or consequential damages, including loss of profit or revenue and loss of contracts or orders.

In co-operation with

hydron energy

# **ELECTRE**

**EVALUATING LIFETIME OF ELECTROLYZERS MANAGING  
FLUCTUATING SUPPLY OF RENEWABLE ENERGY**

Eindrapportage 2016-2017

## CONTENTS

1. Inhoudelijke Eindrapportage .....	3
2 INHOUDELIJK EINDRAPPORT .....	5
2.1 Samenvatting .....	5
2.2 Inleiding.....	6
2.3 DOELSTELLING.....	8
2.4 WERKWIJZE .....	8
2.5 Resultaten .....	9
2.5.1 WP1 Definitie van electrolyzer belasting .....	9
2.5.2 WP2 Electrolyzer levensduur teststation .....	12
2.5.3 WP3 Levensduurtesten in steady-state .....	13
2.5.4 WP4 Levensduurtesten in dynamische mode .....	16
2.5.5 WP5 Levensduur data analyse .....	17
2.6 Bijdrage aan doelstellingen TKI-SysteemIntegratie .....	19
2.7 Conclusies en Aanbevelingen .....	19
3 Uitvoering van het project .....	20
3.1 Technische en organisatorische problemen en Oplossingen .....	20
3.2 Wijzigingen ten opzichte van ProjectPlan.....	20
3.3 Verschil tussen begroting en werkelijk gemaakte kosten .....	20
3.4 Wijze van Kennisverspreiding .....	20
3.5 PR project en verdere PR-mogelijkheden .....	21
3.5.1 Disseminatie Binnen NL.....	21
3.5.2 Commercialisatie teststation .....	21
3.5.3 Vervolgprojecten.....	21

## 1. INHOUDELIJKE EINDRAPPORTAGE

Projectnummer	TESI115002
Projecttitel	Evaluating Lifetime of <b>Electrolyzers</b> Managing fluctuating supply of <b>Renewable Energy</b> (ELECTRE)
Penvoerder	Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN)
Projectpartners	Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) Hydron Energy B.V.
Projectperiode	2 Januari 2016 – 2 Januari 2018
Publicatiedatum	14 maart 2018

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale Regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst van Ondernemend Nederland.

### Contactpersonen

ECN	Frans van Berkel <a href="mailto:vanberkel@ecn.nl">vanberkel@ecn.nl</a>
Hydron Energy	Sander ten Hoopen <a href="mailto:sander.tenhoopen@hydron-energy.com">sander.tenhoopen@hydron-energy.com</a>

## Lijst van afkortingen

RES	Renewable Energy Sources
PEM	Proton Exchange Membrane
PEMWE	Proton Exchange Membrane Water Electrolysis
PvE	Pakket van Eisen
MEA	Membrane Electrode Assembly
SNG	Synthetic Natural Gas
AST	Accelerated Stress Testing
FCH JU	Fuel Cell & Hydrogen Joint Undertaking
GDL	Gas diffusion layer

### 2.1 SAMENVATTING

Grootschalige inzet van duurzame bronnen zoals wind en zon is alleen mogelijk als tijdelijke overschotten opgeslagen kunnen worden of omgezet in andere energiedragers. In Europese scenario's wordt het omzetten van elektriciteit in waterstofgas via elektrolyse gezien als één van de meest kansrijke mogelijkheden om grote hoeveelheden energie op te slaan.

Elektrolyse is nu nog duur. Om een voldoende lange levensduur te kunnen garanderen worden dure materialen gebruikt. We weten ook dat een sterk wisselende belasting de levensduur van de electrolyzer verkort. In welke mate, en hoe het apparaat anders ontworpen of bedreven kan worden om de levensduur te verlengen, is niet bekend. In dit project is onderzocht welke invloed het volgen van een wisselend aanbod duurzame elektriciteit heeft op de levensduur van de electrolyzer. Einddoel (maar buiten de scope van dit project) is te komen tot breed geaccepteerde standaarden en protocollen voor levensduur bepaling.

Levensduurmetingen zijn tijdrovend en (daardoor) kostbaar. Samenwerking is volgens de elektrolysefabrikanten hard nodig voor het ontwikkelen van gezamenlijke meetmethodes en protocollen. Dit project heeft tot doel te komen tot bredere (Europese) samenwerkingsverbanden.

Ontwikkelaar van elektrolysesystemen **Hydron Energy** en onderzoeksinstituut **ECN** werken in dit project samen om te bepalen wat de meest belangrijke processen in de electrolyzer zijn die bijdragen aan de achteruitgang van de prestaties onder (wisselende) belasting. Belangrijke genomen stappen daarin zijn:

- Drie test-stations zijn ontworpen en gebouwd waarmee dynamische belasting profielen onderzocht kunnen worden onder waterstof drukken variërend van 1 tot 100 bar;
- Experimenteel vaststellen van de belangrijkste verouderingsfactoren voor de (Hydron Energy) electrolyzer technologie en gevolgd door verbetering van de technologie;
- Overzicht van meest dominante degradatie mechanismen in de PEM-gebaseerde electrolyzer
- Accelerated Stress Test protocollen zijn opgesteld om degradatiemechanismen van electrolyzer componenten kostenefficiënt in kaart te brengen
- Gezamenlijk met andere stakeholders uit industrie en kennisinfra binnen Europa is er een aanvang gemaakt met een Europese brede harmonisatie van testprotocollen voor electrolyzers (van single cellen tot stacks tot systemen) om prestatie en levensduur vast te bepalen.
- Opzetten van een vervolgproject binnen de topsector Energie om de test protocollen verder uit te werken en te valideren.

## 2.2 INLEIDING

De integratie van hernieuwbare energievoorzieningen in het energiesysteem is uitdagend vanwege het in evenwicht brengen van elektriciteitsaanbod en vraag met een groeiend aandeel van hernieuwbare energie in de energie mix. Naast de implementatie van back-up generatie en uitbreiding van de transmissie en verdelingscapaciteit is het bekijken van de opties voor management van opslag en elektriciteitsvraag vereist. Om deze reden is het de verwachting dat de waterstofproductie uit water middels elektrolyse een belangrijke rol gaat spelen in de integratie van hernieuwbare energie in het energie systeem. Zowel batterijen als electrolyzers kunnen elektriciteit in chemische vorm opslaan. Echter, in tegenstelling tot batterijen zijn de opslagcapaciteit en vermogen niet gekoppeld voor de electrolyzer. Om deze reden is een waterstof-gebaseerd opslag systeem bij uitstek geschikt voor de opslag van grote hoeveelheden energie. Daarnaast zijn er vele mogelijkheden om waterstof te gebruiken als een hoogwaardig product in de transport sector en in de chemische industrie. Dit is een belangrijk voordeel daar de opgeslagen energie in de vorm van waterstof niet terug omgezet hoeft te worden naar elektriciteit, hetgeen resulteert in een lage round-trip efficiëntie.

Om electrolyzers en waterstof opslag in te zetten voor het in evenwicht krijgen van vraag en aanbod op de elektriciteitsmarkt is er een stevige vooruitgang nodig in de ontwikkeling van de electrolyzer. Volgens de FCH-JU Horizon 2020 programma is er vooruitgang nodig ten aanzien van kosten, efficiëntie en levensduur van de electrolyzer [1]. De FCH-JU maakt gebruik van zogenaamde key performance indicatoren (KPI's) om de vereiste vooruitgang en realisatie in deze gebieden te monitoren (Zie tabel 1). De kosten van de electrolyzer moeten met een factor 2-5 verlaagd worden om een voldoende competitieve optie ten opzichte van H<sub>2</sub>-productie uit fossiele brandstoffen te vormen. De energie efficiëntie heeft eveneens een sterke economische impact: de levelized kosten voor opslag worden bepaald door de investeringskosten, de levensduur van het systeem of de vervangingskosten en de round-trip efficiëntie. Levensduur voor electrolyzers is een belangrijk aspect gegeven de uitdagende condities waaraan een electrolyzer is blootgesteld, hetgeen leidt tot degradatie in prestatie van belangrijke componenten zoals membranen, elektroden en afdichtingen.

Tabel1: KPI's defined by the FCH-JU in the Multi-annual work plan 2014-2020[1]

	H <sub>2</sub> production electrolysis,	Unit	State-of- the-art	2017	2020	2023
Cost	CAPEX <sup>[a]</sup> [M€/t/d] @ rated power		8.0	3,7	2.0	1.5
Efficiency	energy consumption @ rated power	kWh/kg	57-60 @100kg/d	55@500kg/d	52@1000+kg/d	50@1000+kg/d
Durability	efficiency degradation @ rated power <sup>[b]</sup>	%/year	2 – 4	2	1,5	<1
Safety	H <sub>2</sub> in oxygen @ rated power	%	25% LEL	25% LEL + flexibility		
Min-Max	flexibility with a degradation < 2% year		5% - 100% of nominal power	5% - 150% of nominal power	0% - 200% of nominal power	0% - 300% of nominal power
Hot start	from min to max power		1 minute	10 sec	2 sec	< 1 sec
Cold start	To max power		5 minutes	2 minutes	30 sec	10 sec

<sup>[a]</sup> including ancillary equipment and commissioning

<sup>[b]</sup> considering 8000 hour operations / year

De key performance indicatoren kosten, efficiëntie en levensduur zijn niet onafhankelijk van elkaar. De efficiëntie kan bijvoorbeeld worden verhoogd door het gebruik van hogere bedrijfstemperaturen. Hierdoor kan de vermogensdichtheid omhoog en de investeringskosten omlaag. Echter, de levensduur is weer gevoelig voor de bedrijfstemperatuur. Het bedrijven van de electrolyzer bij 80°C zal de levensduur van de electrolyzer verminderen. Dit laat zien dat kosten en efficiëntie direct gelimiteerd worden door de levensduur van de electrolyzer. Het verhogen van de bedrijfstemperatuur is essentieel in het verkrijgen van de kosten en efficiëntie verbeteringen, zoals gewenst volgens tabel 1. Een goed begrip van de electrolyzer levensduur of de degradatie processen is essentieel om de electrolyzer prestatie te verbeteren.

Het is echter tijdrovend om levensduur metingen te verrichten en de tijd vereist om de impact van verschillende variabelen te bekijken limiteert de mogelijkheid om levensduur metingen te verrichten aan een groot aantal materialen en cel ontwerpen. Het meest optimale scenario ten aanzien van levensduur testen is het uitvoeren van testen waarin de degradatie versneld wordt op zo'n wijze dat de levensduur van de componenten onder realistische omstandigheden voorspeld kan worden. Dit wordt Accelerated Stress Testing (AST) genoemd. Er is duidelijk behoefte aan dergelijke AST protocollen, zoals ook aangegeven door electrolyzer bedrijven als Hydrogenics [2].

Echter, de degradatie mechanismen zijn nog niet zo goed begrepen dat dit soort versnelde levensduur testen kan leiden tot het voorspellen van degradatie snelheden onder normale bedrijfscondities. Daarnaast is de situatie nu zo dat resultaten van levensduurtesten alleen met elkaar vergeleken kunnen worden indien de testen onder dezelfde condities worden uitgevoerd. Door het beperkte begrip voor de degradatiemechanismen is er een noodzaak om te komen tot standaardisering voor het testen van cellen en stacks op vergelijkbare wijze.

De standaardisering van levensduur testen is een belangrijke stap in de technologie acceptatie maar tegelijkertijd een kostbaar en tijdrovend proces. Het project ELECTRE voorziet in aanbevelingen voor de formulering van test protocollen. De validatie van deze testprocedures en de ontwikkeling van versnelde testprocedures moet tevens uitgevoerd worden op Europees niveau om voldoende electrolyzer fabrikanten en ontwikkelaars erbij te betrekken. Het ELECTRE project heeft deze Europese aanpak voorbereid.

## 2.3 DOELSTELLING

De doelstellingen van het project zijn de volgende:

1. Karakterisering van de dynamische belasting waaronder een electrolyzer werkt indien variabele hernieuwbare energie wordt gebruikt om waterstof te maken.
2. Vaststellen van de impact van de dynamische belasting waaraan de electrolyzer is blootgesteld op de levensduur van de electrolyzer.
3. Identificatie van de sleutelparameters om een levensduur teststation te ontwerpen en de levensduur op efficiënte wijze te meten.
4. Aansluiting op de Europese onderzoeksarena.

## 2.4 WERKWIJZE

Het project is opgedeeld in een aantal verschillende werkpakketten. De individuele werkpakketten, de doelstellingen per werkpakket, en de projectresultaten zijn samengevat in onderstaande tabel.

WP	Korte beschrijving	Partners (Lead)	Doelstelling in project voorstel	Project resultaten
1	Definitie van electrolyzer belasting	ECN, Hydron	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protocollen voor representatieve dynamische belasting patronen voor electrolyzer testen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Accelerated stress test (AST) protocol voor dynamische belasting</li> </ul>
2	Electrolyzer levensduur teststation	Hydron, ECN	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ontwerp en constructie van levensduur teststation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3 teststations gerealiseerd</li> </ul>
3	Levensduur testen in steady-state	ECN, Hydron	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Base-line gedrag voor de electrolyzer onder steady-state volledige belasting</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1000 uur steady state test met negatieve degradatie</li> <li>• Stackplatform met stabiel cel voltage gerealiseerd</li> </ul>
4	Levensduur testen in dynamische mode	ECN, Hydron	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vaststellen van degradatiesnelheden en karakterisering van de electrolyzer prestatie onder verschillende dynamische belastingspatronen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Duurtesten met bedrijfsparameter variaties conform de AST protocol uit WP1</li> <li>• Negatieve degradatie maakt interpretatie van levensduur moeilijk</li> </ul>
5	Levensduur data analyse	Hydron, ECN	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definitie van bedrijfswindow voor lange electrolyzer levensduur</li> <li>• Aanbevelingen voor test protocollen</li> <li>• Roadmap voor levensduur verbetering en electrolyzer kosten efficiëntie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vaststellen optimaal bedrijfswindow nog niet mogelijk</li> <li>• Validatie van AST-protocol behoeft meer lange duurtesten</li> <li>• Roadmap + plan van aanpak in NL</li> </ul>
6	Project management	ECN	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rapportage, workshop, projectcoördinatie</li> <li>• Opzetten van een Europees project</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deelname/presentaties diverse conferenties</li> <li>• NEXTGENP2H2 als vervolgproject</li> </ul>

In het volgende hoofdstuk zullen de resultaten per werkpakket worden besproken.

## 2.5 RESULTATEN

De resultaten per werkpakket zijn hieronder beknopt samengevat in individuele secties.

### 2.5.1 WP1 DEFINITIE VAN ELECTROLYZER BELASTING

*Doelstelling:* Karakterisering van de dynamische belasting van de PEMWE electrolyzer door het gebruik van hernieuwbare energie en een vertaling naar een dynamisch test protocol.

*Resultaat:* Overzicht van impact van hernieuwbare energie profielen op PEMWE electrolyzer levensduur, voornaamste PEMWE degradatie mechanismen en een voorstel tot een “Accelerated Test Protocol” voor het versneld vaststellen van de levensduur van de PEMWE electrolyzer en bijhorende componenten.

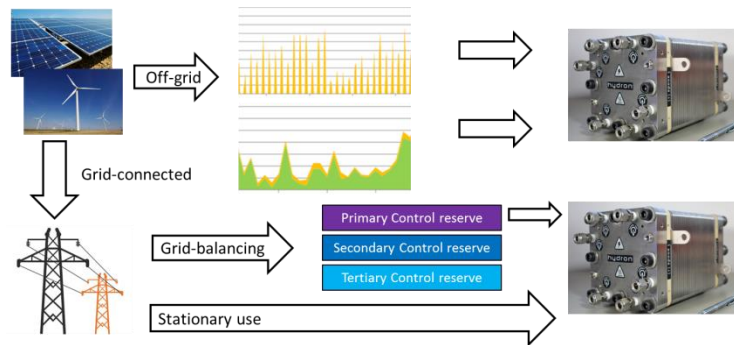
*Resultaatbeschrijving:* Figuur 2 toont op schematische wijze de verschillende mogelijkheden voor de integratie van electrolyzers in het hernieuwbare energiesysteem [4]. Het hernieuwbare energiesysteem kan ten aanzien van de electrolyzer integratie worden onderverdeeld in twee typen, nl. netwerk-gekoppelde en niet-gekoppelde hernieuwbare energie. Voor de niet-gekoppelde hernieuwbare energie zal er een directe verbinding zijn met wind- en zonne-energiebronnen waarbij de electrolyzer belasting-volgend zal zijn. Voor de netwerk gekoppelde hernieuwbare energie zijn er verschillende manieren waarop de electrolyzer bedreven kan worden. De electrolyzer kan netwerk diensten uitvoeren, waarbij de electrolyzer de belasting zal volgen op een tijdschaal variërend van seconden tot uren hangende de primaire, secundaire of tertiaire controle reserves. Daarnaast kan de waterstofproductie ook uitgevoerd worden in stationaire modus voor bijvoorbeeld een brandstof tankstation voor de mobiele sector. Deze optie heeft geen strenge eisen ten aanzien van flexibel bedrijf [5]. Voor zowel netwerk-gekoppelde als niet-netwerk-gekoppelde electrolyzer toepassingen zijn de volgende prestatie indicatoren, zoals ook getoond in tabel 1, van belang: respons tijd; belasting turn-down verhouding; koude en warme start tijd. Eichman et al. [6], and Skov et al. [7] concluderen dat de PEM-gebaseerde electrolyzer voldoende snel reageren en voldoende flexibel zijn om toegepast te worden in de hiervoor genoemde elektriciteitsmarkten. Echter wordt in deze studies ook benadrukt dat verder begrip betreffende de impact van zeer dynamisch bedrijf op de levensduur van de electrolyzer gewenst is. Verscheidene electrolyzer fabrikanten hebben reeds belangrijke ervaring opgedaan met de impact van dynamisch bedrijf van hun electrolyzer stacks en systemen op de levensduur. Bedrijf onder fotonvoltaïsche belastingpatronen gedurende 7000 uren door Hydrogenics [2] of 500,000 spanningscycles tussen 0 en 1.6 V door CETH2 [8] laat echter geen significante degradatie zien. NREL [9] heeft laten zien dat het vergelijken van programmeerbare zon/wind profielen met statisch bedrijf gedurende 7500 uren geen grote verschillen laat zien in degradatie. Samenvattend, lijkt op basis van deze gegevens dat dynamisch bedrijf met de huidige PEM-gebaseerde electrolyzer technologie niet resulteert in significant hogere degradatie.

Echter, het moet benadrukt worden dat deze gegevens zijn verzameld onder condities waar degradatie minimaal is. Op het moment dat een electrolyzer stack wordt geoptimaliseerd op basis van kosten en efficiëntie verandert het beeld. Methoden om deze optimalisatie doelstellingen te halen zijn het bedrijven onder hogere bedrijfstemperatuur en/of onder hogere stroomdichtheden. Onder deze condities is versnelde levensduur te verwachten, en zal ook de degradatie ten gevolge van dynamisch bedrijf een belangrijke(r) rol spelen.

#### *Degradatie mechanismen*

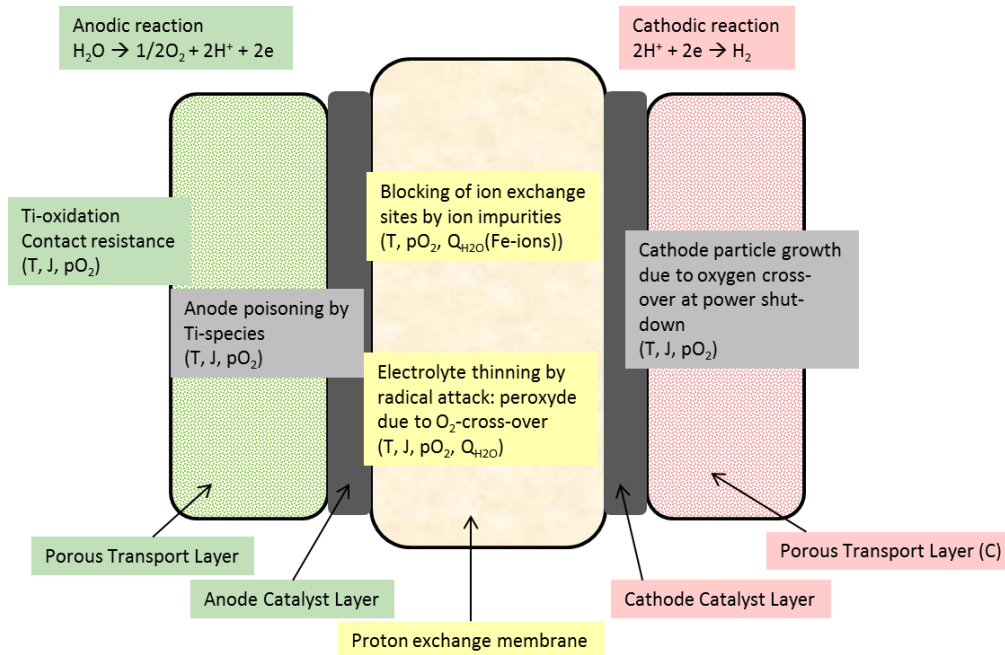
Om te komen tot testprocedures voor het vaststellen van de degradatiesnelheid en mogelijk een voorspelling te kunnen doen ten aanzien van electrolyzer levensduur is het van belang een goed overzicht te hebben van de meest dominante degradatieprocessen die plaats vinden in de electrolyzer. Hiervoor is een

Figuur 2. Integratie van electrolyzers in het energiesysteem.



literatuurstudie uitgevoerd waarbij niet alleen een overzicht van degradatiemechanismen is verkregen maar ook een overzicht van de bedrijfsparameters die hier een invloed op hebben (Zie figuur 3).

Deze bedrijfsparameters kunnen ingezet worden voor het vaststellen van een levensduur testprotocol. Bedacht moet worden dat een definitief levensduur-testprotocol pas opgesteld kan worden als er een goed (kwantitatief) begrip is van de degradatiemechanismen. Het huidige protocol moet dus worden gezien als een eerste stap op basis van de huidige kennis van de degradatiemechanismen. Een overzicht van de meest prominente mechanismen en de impact van de bedrijfsparameters op de verouderingsprocessen is gegeven in figuur 3. Deze figuur geeft een schematisch overzicht van de meest prominente degradatie mechanismen per component gaande van anode naar kathode plus de bedrijfsparameters die de hoogste invloed hebben op de degradatie.



Figuur 3. Overzicht van de Membrane Electrode Assembly (MEA) compositie en de belangrijkste degradatie mechanismen per component plus de bedrijfsparameters met de hoogste impact op de degradatie.

Hieronder volgt een puntsgewijs overzicht van de degradatie mechanismen:

1. Corrosie van de Anode Transport Poreuze Laag (engels: Porous transport layer of **PTL**) resulteert in contact verlies zoals gerapporteerd door Rakousky et al [10]. Een belangrijke toename in ohmse weerstand werd waargenomen bij stroomdichtheden van 2 A/cm<sup>2</sup> en 80°C, hetgeen toegekend kan worden aan corrosie van de titanium gebaseerde PTL-laag.

2. Verontreiniging van de anode elektro-katalysator door titaan-ionen uit de titanium PTL [10] resulteert in een degradatie van de uitwisselingsstroomdichtheid van de anode, resulterend in een toename van de anode overpotentiaal bij vaste stroomdichtheden en temperatuur (bijvoorbeeld bij  $2\text{A}/\text{cm}^2$  en  $80^\circ\text{C}$ ).
3. Het blokkeren van ion uitwisselingsites in het Nafion elektrolyt door  $\text{Fe}^{3+}$ -ionen zoals gerapporteerd door Wang [11] en Sun [12] leidt tot een toename van de ohmse weerstand en afname van de elektro-katalytische activiteit van de electrode door het blokkeren van ion uitwisselingsposities dicht bij de electrode. Verontreiniging van het proceswater met metaalionen zoals Fe-, Cu- en Ca-ionen wordt veroorzaakt door de corrosieve condities binnen de electrolyzer gestimuleerd door de combinatie van de zuurgraad van het water met de aanwezigheid van zuurstof aan de anode kant en de temperatuur. Het lijkt erop dat deze blokkering van de ionenuitwisselingsposities reversibel is en de electrolyzer prestatie herwonnen kan worden door te wassen met zwavelzuur bevattende wateroplossing.
4. De aanwezigheid van radicalen in het Nafion elektrolyt kan resulteren in het dunner worden van het membraan zoals gerapporteerd door Chandesris [13]. Een elektrolyt membraan degradatie model is ontwikkeld beschrijvende de zuurstof cross-over van de anode naar de kathode resulterend in de vorming van waterstof peroxide bij de kathode tezamen met de vorming van radicalen via de Fenton-reactie door aanwezigheid van metaalion verontreinigingen. Dit proces resulteert in het dunner worden van het elektrolyt membraan.
5. Groei van kathode katalysator deeltjes gedurende electrolyzer shut-down perioden resulterend in toename van kathode verliezen zoals gerapporteerd door Brightman [14]. Het is aangetoond dat de platina kathode elektrochemisch actief oppervlak afneemt ten gevolge van stroom cycli. Er zijn indicaties dat dit gebeurt ten gevolge van zuurstofoversteek van de anode gedurende vermogen shut-down. Het mechanisme van verlies van actieve platina sites wordt toegekend aan Ostwald ripening, Pt nano-deeltjes groei via migratie en oppervlakte diffusie en het losraken van Pt-deeltjes of agglomeratie ten gevolge van corrosie van de koolstof-drager.

Dit overzicht laat zien dat bedrijfstemperatuur, zuurstof druk aan de anode en stroomdichtheid cycli een impact hebben op de degradatie mechanismen. Deze bedrijfsparameters zijn gebruikt als variabele om te komen tot een 'Accelerated Stress Test (AST)' protocol. Tabel 2 geeft een overzicht van het AST protocol voorstel tezamen met de vereiste electrolyzer prestatie analyse, zowel in-situ als wel ex-situ. Het protocol is stapsgewijs opgebouwd, waarbij in de eerste stap de bedrijfstemperatuur wordt gevarieerd van  $60$  tot  $90^\circ\text{C}$ , de tweede stap variaties in anode zuurstofdruk ( $2$  bara tot  $10$  bara) en de derde stap de variatie in stroomsterkte.

Het AST-protocol is zo geconstrueerd dat achtereenvolgens stapsgewijs de temperatuur en dan de anodedruk wordt verhoogd. Tenslotte wordt de cel onderworpen aan repeterende variaties in stroomdichtheid. De eerste stap is de variatie in temperatuur van  $60$  tot  $90^\circ\text{C}$  in intervallen van  $10^\circ\text{C}$  met een constante stroomdichtheid van  $1,5\text{ A} / \text{cm}^2$ , een anodedruk van  $2$  bara en een kathodedruk van  $10$  bara. De invloed van temperatuur wordt als eerste stap gekozen, omdat het verhogen van de temperatuur alle door temperatuur geactiveerde afbraakprocessen versnelt. Op basis van het temperatuurprofiel zal de totale temperatuurvariatiestap ongeveer  $1000$ - $1200$  uur duren.

Het voorgestelde AST test protocol is beproefd in WP 4.

AST PROTOCOL		In-situ analysis	Ex-situ analysis
<u>Variation T:</u> 60, 70, 80, 90 °C $J = 1.5 \text{ A/cm}^2$ $P_{an} = 2 \text{ bar}$ $P_{cat} = 10 \text{ bar}$ Test time = 800-1200 hours		<u>V(t) vs T:</u> 60, 70, 80, 90 °C	<u>EIS, J-V:</u> Ohmic losses Polarisation losses
<u>Variation pO<sub>2</sub> (anode):</u> 2, 5, 8 bara $T = 80 \text{ °C}$ $P_{an} = 2 \text{ bar}$ $P_{cat} = 10 \text{ bar}$ Test time = 800-1000 hours		<u>V(t) vs pO<sub>2</sub> (anode):</u> 2, 5, 8 bara	<u>Gas analysis:</u> Increase in gas cross over  <u>Water analysis:</u> Fluor release
<u>Variation J:</u> $J\text{-high} = 3 \text{ A/cm}^2$ $J\text{-cycle} = 0\text{-}3 \text{ A/cm}^2$ $T = 80 \text{ °C}$ $P_{an} = 8 \text{ bara}$ $P_{cat} = 10 \text{ bar}$ Test time = 600 hours		<u>V(t) vs J:</u> $J\text{-high} = 3 \text{ A/cm}^2$ ; $J\text{-cycle} = 0\text{-}3 \text{ A/cm}^2$	<u>Post test analysis:</u> Electrolyte thickness Catalyst particle growth Contact resistances

Tabel 2. Overzicht van het AST protocol voorstel, opgebouwd uit drie stappen, variatie in T, variatie in  $pO_{2(\text{anode})}$  en variatie in stroomsterkte. De analyse vindt plaats middels in-situ analyse, J-V karakterisering, impedantie metingen en gas en fluor release analyse, en ex-situ post test analyse, SEM en contact weerstandsmetingen.

## 2.5.2 WP2 ELECTROLYZER LEVENSDUUR TESTSTATION

**Doelstelling:** Design en constructie van een PEMWE electrolyzer teststation geschikt voor het bepalen van de levensduur aspecten van de PEMWE electrolyzer

**Resultaat:** Drie prototype teststations ten behoeve van het bepalen van de electrolyzer levensduur onder dynamische bedrijfscondities zijn gerealiseerd en de eerste experimentele validatie heeft plaatsgevonden. De eerste stappen in commercialisatie van de teststations zijn gezet.

**Resultaatbeschrijving:** Voor het testen van prestatie en levensduur van kleinschalige PEM-gebaseerde electrolyzers is een geavanceerde testinfrastructuur gerealiseerd bij ECN in nauwe samenwerking met Hydron Energy. Hiertoe is een geautomatiseerd hoge druk teststation ontworpen door ECN en Hydron, welke in drievoud is geproduceerd.

In het ontwerpproces is er een Programma van Eisen (PvE) voor het teststation opgesteld, waarbij er inter alia ingezoomd is op de functionele specificaties. Vervolgens zijn de process flow diagram (PFD) en het piping and instrumentation diagram (P&ID) opgesteld. Deze technische documentatie vormde onder meer de basis voor de veiligheid- en risicoanalyse. Er zijn principeoplossingen bedacht voor de verschillende procesonderdelen waarna de verschillende systeemcomponenten zijn gedefinieerd en geïdentificeerd. Simultaan zijn er CAD tekeningen vervaardigd van het teststation. Op een bij ECN gebouwde skid, zijn deeloplossingen (zoals automatische gas/water scheidingstechnologie) getest. Tevens is er een supervisory monitoring en control systeem opgetuigd voor volledige geautomatiseerde operatie van het teststation. Uiteindelijk is, na een aantal iteraties, het eerste station gebouwd en is de werking gevalideerd met een eerste, door Hydron aangeleverde, enkel-cel PEMWE stack. Vervolgens zijn er op basis van het gerealiseerde teststation nog twee identieke teststations gebouwd,

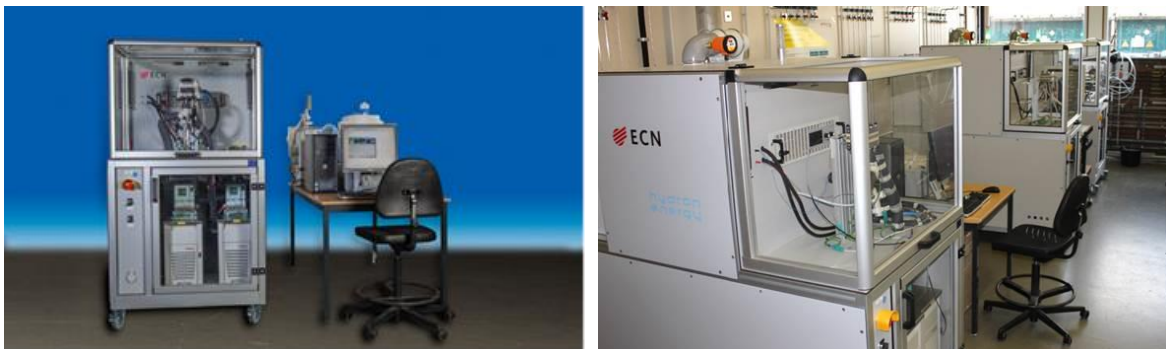
geïnstalleerd en in gebruik genomen bij ECN. Gedurende de looptijd van het project zijn nog diverse verbeteringen aangebracht op basis van de gebruikerservaringen.

Derhalve omvat de testinfrastructuur bij ECN 3 teststations, waarvan er een staat weergegeven in figuur 4, met de volgende eigenschappen:

- Mogelijkheid tot (geprogrammeerde) variatie in bedrijfsprofielen ten aanzien van stroom, druk en temperatuur
- Hoge kathode druk tot 100 bara
- Midden anode druk tot 10 bara
- Stroomsterkte tot 300 A geschikt voor het testen van 25-100 cm<sup>2</sup> cel/stack platforms

De vereiste in-situ karakterisering omvat temperatuurmetingen, J-V-kenmerken, de controle van de kwaliteit van gas en proces water kwaliteitscontrole (m.n. fluor verlies door het elektrolyt).

Figuur 4. Foto van de levensduur teststation + test infrastructuur bij ECN.



### 2.5.3 WP3 LEVENSDUURTESTEN IN STEADY-STATE

*Doelstelling:* De ontwikkeling van een PEMWE enkel-cel stack platform ten behoeve van de validatie van het teststation en het uitvoeren van lange duurtesten onder steady-state condities.

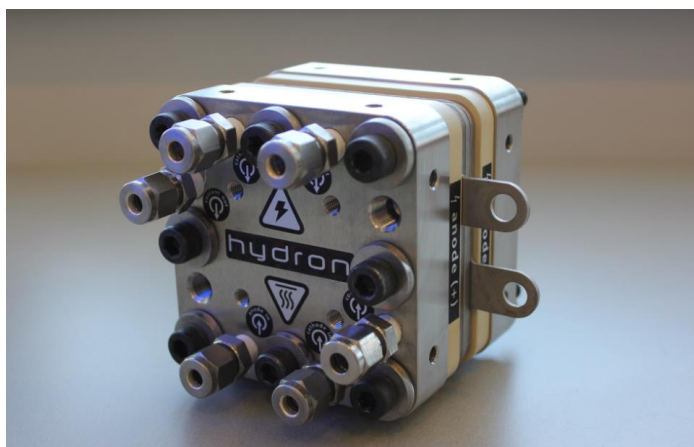
*Resultaat:* Zeven enkel-cel stack platforms zijn gerealiseerd. Een 1000-uurs test onder steady-state condities is uitgevoerd als baseline experiment. De eerste enkel-cel stack platforms vertonen een negatieve degradatie gedurende de lange duurtesten. Dat wil zeggen dat de cellen in de loop van de tijd, in tegenstelling tot de verwachting, beter gaan presteren. Optimalisatie van de enkel-cel stack platform heeft geleid tot een stabielere prestatie.

*Resultaatbeschrijving:* Voor de validatie van de testprotocollen heeft Hydron Energy een PEMWE stack platform ontwikkeld (model: EL25HP) (zie figuur 5). Dit stackplatform beschikt over een actief electrode oppervlak van 25 cm<sup>2</sup>. Deze stack kan als enkel-cel of meer-cel stack worden uitgevoerd. Het stackplatform kan getest worden tot een druk van 100 barg (drukverschil of gebalanceerde druk). De stack kan bedreven worden onder hoge stroomdichtheden en bevat een warmte uitwisseling vloeistofcircuit voor de temperatuurcontrole. Vanwege de flexibele en modulaire architectuur, kunnen verschillende onderdelen gemakkelijk worden uitgewisseld. Het platform is zeer geschikt voor de karakterisering van het membranen, MEA ontwikkeling en het testen van andere celcomponenten.

De eerste twee enkel-cel stackplatforms zijn gebruikt om de functionaliteit van het teststation te testen en te optimaliseren. De gerealiseerde verbeteringen in het teststation zijn de optimalisatie in nauwkeurigheid van de data acquisitie waaronder het verkrijgen van elektrochemische impedantie data, het optimaliseren van de

alarmen functionaliteit en optimalisatie van de wijze van water/gas scheiding onder verschillende gasdruk niveaus. Tabel 3 geeft een overzicht van de gebruikte enkel-cel stacks en de reden van de test.

Figuur 5. Het in ELECTRE ontwikkelde EL25HP PEMWE stackplatform

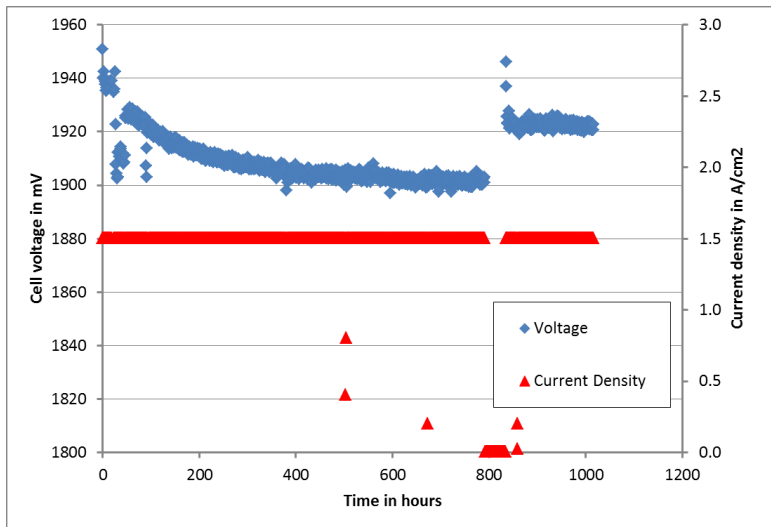


Tabel 3. Overzicht van de enkel-cel stack platform en uitgevoerde testen

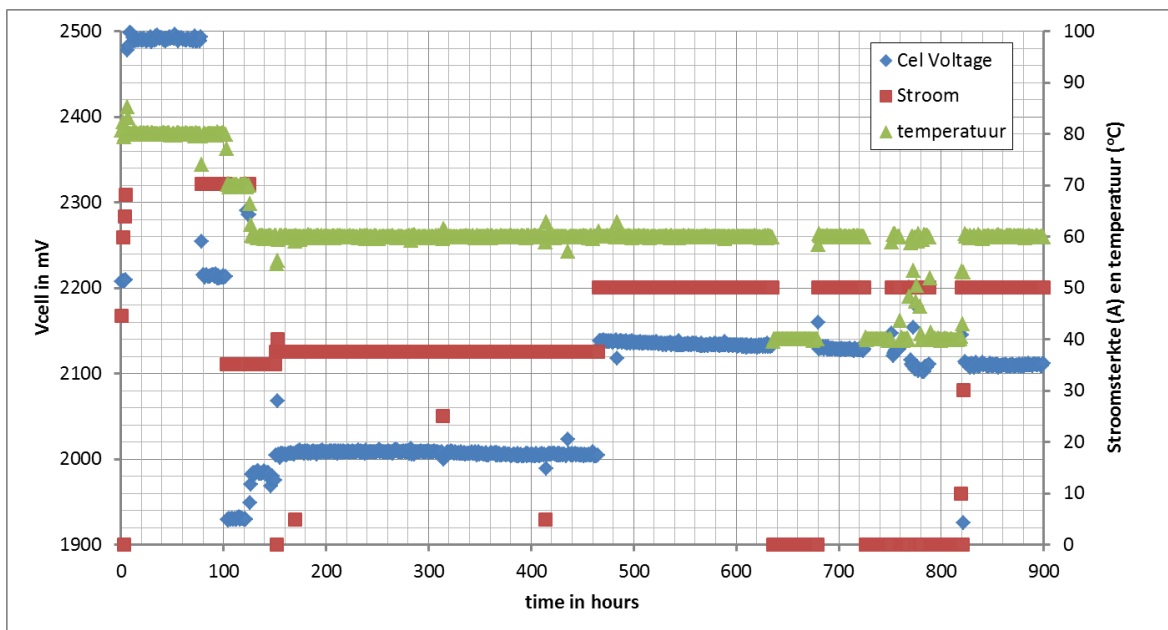
Enkel-cel stackplatform code	Doel van de test	WP	Periode
EL25-HP1-001	Validatie teststation Electre 1	WP2	11-2016 tot 1-2017
EL25-HP1-002	Validatie teststation Electre 1	WP2	1-2017 tot 2-2017
EL25-HP1-003	Steady-state-test 1000 uur test	WP3	2-2017 tot 4-2017
EL25-HP1-004	Validatie teststation Electre 2 en 3	WP2	6-2017 tot 9-2017
EL25-HP1-005	Validatie AST-procedure	WP4	5-2017 tot 9-2017
EL25-HP1-006	Validatie steady state en AST-procedure	WP3/4	10-2017 tot 1-2018
EL25-HP1-007	Validatie AST-procedure	WP4	11-2017 tot heden

Binnen WP3 is het enkel-cel stackplatform EL25-HP1-003 gebruikt om de eerste 1000-uurs test uit te voeren in steady state. Figuur 5 geeft de resulterende levensduur curve en de condities waaronder getest is. Het verloop van het cel voltage vertoont een negatieve degradatie en een sprong in cel voltage bij een tijdstip van 800 uur veroorzaakt door een shut-down van het teststation ten gevolge van een temperatuur alarm. Deze negatieve cel degradatie was typisch voor de eerste 5 enkel-cel stackplatforms en vormde een probleem om goed inzicht te verkrijgen in het degradatie gedrag van deze cellen. Het opvoeren van temperatuur en stroomsterkte bleef resulteren in een negatieve degradatie. Voor de toepassing van de electrolyzer is het beter dat deze een constante prestatie vertoont (constante voltage bij constante temperatuur, druk en stroomsterkte) en geen negatieve of nog erger positieve degradatie. Op basis van de eerste karakteriseringen, is het enkel-cel stackplatform geoptimaliseerd om te komen tot een stabiel voltage als functie van de tijd. Het resulterend duurgedrag van de geoptimaliseerde cel is te zien in figuur 6. Het cel voltage signaal is veel stabielier alhoewel de negatieve degradatie nog wel enigszins aanwezig is bij een bedrijfstemperatuur van 60°C in het tijdvak van 100-800 uur. Ook bij het verhogen van de stroomsterkte van 37.5 naar 50 A (Stroomdichtheid van 1,5 naar 2 A/cm<sup>2</sup>) blijft het cel voltage stabiel. De alarmincidenten rond de 600-800 uur met een shut-down tot gevolg leidde echter tot een stapsgewijze verlaging van het cel voltage. Deze waarnemingen worden nog niet begrepen. De voorzichtige conclusie is dat de optimalisatie van het enkel-cel stackplatform resulteert in een stabielier cel voltage.

Figuur 5. Het cel voltage van EL25-1-003 als functie van de test tijd bij een bedrijfstemperatuur van 60°C, een anode druk van 1 barg en een kathode druk van 9 barg en een stroomsterkte van 1,5 A/cm<sup>2</sup>.



Figuur 6. Het cel voltage van EL25-1-006 als functie van de test tijd bij een bedrijfstemperatuur van 60°C en 70°C, een anode druk van 1 barg en een kathode druk van 9 barg en een stroomsterkte van 1,5 A/cm<sup>2</sup>.



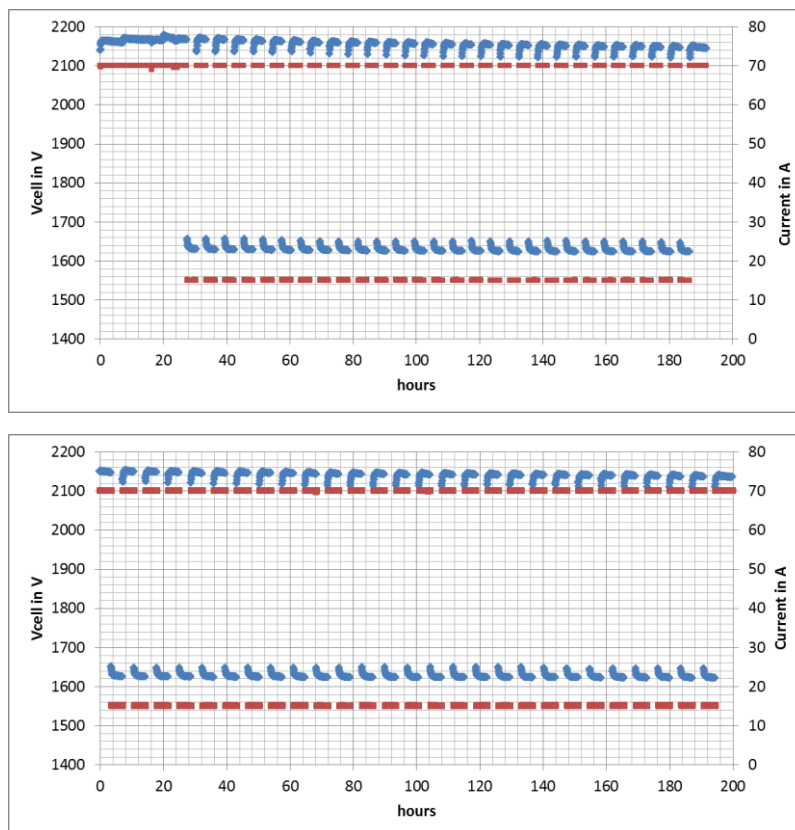
## 2.5.4 WP4 LEVENSDUURTESTEN IN DYNAMISCHE MODE

**Doelstelling:** Vaststellen van degradatiesnelheden en karakterisering van de electrolyzer prestatie onder verschillende dynamische belastingpatronen.

**Resultaat:** Er zijn meerdere duurtesten uitgevoerd met variatie in temperatuur, zuurstofdruk aan de anode en variatie in stroomsterkte conform de in WP1 opgestelde AST-protocol. Interpretatie van de data is niet mogelijk ten gevolge van het optreden van negatieve degradatie.

**Resultaatbeschrijving:** In dit werkpakket is een aanzet gegeven tot de validatie van het in WP1 voorgestelde AST protocol. Met name het enkel-cel stack platform EL25-1-005 (zie tabel 3) is hiervoor gebruikt. Figuur 7 laat de resultaten zien van het effect van de derde stap uit het AST protocol waarin de zuurstofdruk aan de anode hoog (7 barg) is en de stroomsterkte gevarieerd wordt tussen 0,6 tot 3 A/cm<sup>2</sup> met een totale cyclus tijd van 6 uur bij een bedrijfstemperatuur van 80°C. Dit is de meest extreme bedrijfsconditie volgens het voorgestelde AST-protocol. Figuur 7 laat echter zien dat het cel voltage over het totale aantal van 54 cycli afneemt met ongeveer 50 mV. Er treedt dus een negatieve degradatie op. Dit betekent dat het enkel-cel stack platform van Hydron Energy deze bedrijfscondities aankan. Echter, het optreden van negatieve degradatie maakt het lastig om conclusies te trekken omtrent de validatie van het AST-protocol.

Om deze reden heeft Hydron Energy een enkel-cel stack platform ontwikkeld met een meer stabiel stroom-voltage gedrag, hetgeen geresulteerd heeft in de cellen met code EL25-1-006 en 007. Op het moment van schrijven worden deze stackplatforms beproefd. EL25-1-006 wordt beproefd onder de eerste stap van het AST protocol, variatie in temperatuur, en EL25-1-007 zal beproefd worden onder de derde stap van het AST-protocol, een bedrijfstemperatuur van 80°C en hoge pO<sub>2</sub> anodeplus variatie in stroomsterkte.



Figuur 7. Twee grafieken met elk 27 cycli van de stroomsterkte variatie tussen 0,6-3 A/cm<sup>2</sup> en de impact op het celvoltage bij een zuurstofdruk van 7 barg aan de anode, een waterstofdruk van 9 barg aan de kathode en een bedrijfstemperatuur van 80°C.

---

## 2.5.5 WP5 LEVENSDUUR DATA ANALYSE

*Doelstelling:* Aanbevelingen ten aanzien van het optimale bedrijfswindow voor lange electrolyser levensduur op basis van de analyse van de experimentele levensduur data uit WP 3 en 4 en aanbevelingen voor test protocollen. De verkregen informatie moet leiden tot een roadmap voor levensduur verbetering en electrolyser kosten reductie.

*Resultaat:* Het vaststellen van het optimale bedrijfswindow is vooralsnog niet mogelijk ten gevolge van de voornamelijk optredende negatieve degradatie. De voorgestelde testprotocollen zijn alleen werkzaam indien negatieve degradatie geen of mindere rol speelt. Er is meer experimentele data vereist met de geoptimaliseerde enkel-cel stackplatforms, die stabiel presteren. Dit is werk 'in progress'. Een eerste-orde roadmap is opgesteld waarin beschreven het traject naar kosteneffectieve robuuste componenten tezamen met de Nederlandse componenten industrie.

*Resultaatbeschrijving:*

Ondanks een AST-protocol dat tot doel heeft te komen tot versnelde degradatie van een cel, wordt bij het testen van een groot deel van de cellen een *verbetering* van de cel prestaties gevonden. Op basis van deze bevindingen is duidelijk dat het AST protocol, met T-variantie van 60-80°C, variantie in pO<sub>2</sub> anode en variantie in stroomsterkte, niet zondermeer leidt tot het gewenste resultaat.

Belangrijke les is daarbij dat er, vóór het toepassen van een AST protocol, de stabiliteit van de configuratie moet zijn aangetoond onder milde condities. Het Hydron Energy stack platform is tijdens het project geoptimaliseerd wat heeft geleid tot een stabiel gedrag van het cel voltage.

Stabiel gedrag bij een bedrijfstemperatuur van 60°C is nu voor de geoptimaliseerde stack aangetoond. Deze kan als referentie dienen voor het beproeven van kwaliteit van toekomstige kosten efficiënte electrolyzer componenten. Testen met deze cellen ter AST-validatie lopen verder na afloop van het ELECTRE project.

Op dit moment kan, op basis van de resultaten van het ELECTRE project het ontwikkelde AST protocol niet gevalideerd worden. De volgende stappen moeten doorlopen worden om te komen tot validering van het protocol:

- Verbetering van de criteria waar een cel/stack aan moet voldoen om zinvol aan een AST protocol te onderwerpen.
- Uitvoeren van een groter aantal metingen met cellen die voldoen aan deze criteria waarbij één en dezelfde cel uitvoering wordt gebruikt voor lange duur metingen (onder condities waar een gematigde degradatie wordt verwacht) en het toepassen van het AST protocol.
- Optimalisatie van de meetprocedures en -methodes rond het teststation waardoor meer specifieke informatie beschikbaar komt met betrekking tot de specifieke verouderingsprocessen die een rol spelen.

Deze punten worden in het vervolgonderzoek geadresseerd.

### Roadmap naar verbeterde electrolyzer levensduur

Innovaties in de electrolyzer die leiden tot verbetering van de levensduur bij hogere temperaturen en stroomdichtheden zijn noodzakelijk. Duidelijk is dat deze innovaties voor een belangrijk deel tot stand komen door gebruik te maken van verbeterde componenten. Dit vereist intensieve samenwerking tussen de toekomstige leveranciers en producenten van electrolyzers. Betere membranen, katalysatoren en andere celcomponenten komen alleen tot stand als de leveranciers hun producten intensief en gericht kunnen (laten) testen tijdens de ontwikkelingsstap. Gericht betekent daarbij dat de informatie die bij de testen wordt verkregen zoveel mogelijk betrekking heeft op de specifieke component die wordt getest. Dit betekent noodzakelijkerwijs het "ontrafelen" van de verschillende degradatiemechanismen die een rol spelen bij het testen.

Het ELECTRE project past in een strategie om Nederlandse “maakbedrijven” te positioneren als toeleveranciers voor de toekomstige electrolyzer-industrie. Binnen het ELECTRE project is de kennis en infrastructuur om componenten te testen verder uitgebouwd en is een eerste opzet gemaakt van de testprocedures.

Een tweede stap is Nederlandse bedrijven te betrekken bij de ontwikkeling van componenten. Dit wordt vervolgd gegeven in het onlangs toegekende AMPERE project, waarin een industriële gebruikersgroep van potentiële Nederlandse toeleveranciers zal worden opgezet en innovatieve componenten zullen worden ontwikkeld en getest. Verdere validatie van het AST testprotocol zal ook plaats vinden in dit project. Aan dit project nemen behalve de ELECTRE partners ook de Polymer Technology Group (PTG/e) en FujiFilm deel om nieuwe materialen te ontwikkelen.

Daarnaast is het project NextGenP2H2 gestart waarbij het testen van cellen wordt uitgebreid naar het testen van stacks. Ook binnen dit project wordt voort gebouwd op het lange-duur testen van cellen.

Om acceptatie van de testresultaten te verkrijgen van electrolyzer-fabrikanten, is harmonisatie van de testen een belangrijk aspect. Vanuit het ELECTRE project heeft ECN een belangrijke bijdrage geleverd aan de lopende harmonisatie inspanningen. Deze worden, in opdracht van de FCH-JU, gecoördineerd door de Joint Research Centre (JRC) in Petten.

Tabel 4 geeft een overzicht van de belangrijkste elementen om te komen tot succesvolle implementatie van componenten van Nederlandse maakbedrijven in de electrolyzer-industrie.

Tabel 4. Overzicht van de benodigde stappen ter implementatie van componenten van de Nederlandse maakbedrijven en hetgeen reeds bereikt is in Electre en de vervolgactiviteiten.

Implementatie stappen voor componenten van NL-industrie	Bereikt binnen ELECTRE	Follow-up activiteiten
Testinfrastructuur en -kennis	Beiden opgebouwd en ter beschikking voor verdere projecten met industriële toeleveranciers.	Verschillende projecten lopen die gebruik maken van de opgebouwde infra en kennis. Verdere verbetering van robuustheid en mogelijkheden tot karakterisering nodig.
Kennis verouderingsprocessen (degradatie mechanismen)	Goede inventarisatie van mogelijke mechanismen. Opbouw van Europees netwerk ter verificatie gestart.	Verdere verdieping van kennis, met name door intensivering van samenwerking op Europees niveau. Link met karakterisering versterken.
Versnelde levensduur protocollen (AST)	AST procedure opgesteld, maar nog niet gevalideerd.	Uitvoering van uitvoerige levensduur testen met één en dezelfde cel architectuur. Daarnaast ook hier zoeken naar Europese samenwerking (big data)
Identificatie van kansen voor de NL industrie	Nog niet geadresseerd in ELECTRE	Belangrijkst focus van het Ampere project ligt op een brede evaluatie van de kansen voor componentverbetering
Ontwikkeling van nieuwe componenten	Idem	Idem
Afstemming test protocollen met eindgebruikers (electrolyzer-fabrikanten)	ECN is betrokken bij de ontwikkeling van Europese test protocollen.	Verder afstemming van AST protocollen met fabrikanten is noodzakelijk.
Testen van componenten in commercieel beschikbare electrolyzers	Nog niet geadresseerd in ELECTRE	Netwerk met fabrikanten versterken

---

## 2.6 BIJDRAGE AAN DOELSTELLINGEN TKI-SYSTEEMINTEGRATIE

De volgende bijdragen zijn geleverd aan de doelstellingen van de TKI systeemintegratie:

De resultaten verkregen in dit project zijn belangrijk voor de waardeketen:

- Verlaging van de acceptatie-barrière van nieuwe materialen middels de ontwikkelde testprotocollen die gebruikt kunnen worden om electrolyzer component toeleveranciers op een kostenefficiënte manier te helpen in het vaststellen van de bijdrage van nieuwe componenten aan de levensduur;
- Kennis op het gebied van het dynamische bedrijf en impact op levensduur draagt bij in de optimalisatie van de electrolyzer voor het gebruik van de overmaat hernieuwbare energie stromen;
- Verkregen begrip van degradatiemechanismen en testprotocollen voor het versneld vaststellen van de prestatie van electrolyzer componenten resulteert in versnelde introductie van kosteneffectieve componenten;
- De verkregen kennis op het gebied van degradatie en testprotocollen is gebruikt worden om potentiële component toeleveranciers te betrekken bij de electrolyzer ontwikkelingen voor toekomstige projecten (Een consortium is gevormd voor het TKI-gas project AMPERE); Voor een EU-project call in 2018 wordt gemikt op hetzelfde consortium aangevuld met partijen buiten NL;
- Het ontwikkelde teststation draagt bij aan het versneld testen van electrolyzer componenten onder een grote variatie van stroomsterkten, voltage niveaus, watertoevoersnelheden, zuurstof en waterstofdruk, zoals vereist in de voorgestelde levensduur testprotocollen;
- Voor het ontwikkelde teststation is een commercialisatie pad ingezet;
- Het testprogramma zoals uitgevoerd op de stack platforms van Hydron Energy heeft geleid tot een verdere verbetering van de prestatie van de technologie.

---

## 2.7 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

De volgende conclusies kunnen getrokken worden uit de resultaten van dit project:

- Testprotocol voor het versneld vaststellen van electrolyzer componenten is voorgesteld;
- Realisatie van 3 teststations voorzien van de operationele mogelijkheden voor het toepassen van de testprotocollen;
- Gedeeltelijke validatie van testprotocollen;
- Verbetering van prestatie van Hydron Energy's PEMWE technologie;
- Levensduurtestdata dienen een belangrijk onderdeel te zijn voor het definiëren van een roadmap.

De aanbevelingen voor het vervolgtraject zijn de volgende:

- Verdere validatie van het voorgestelde en ten dele gevalideerde testprotocol;
- Line-up van het testprotocol met de EU harmonisatie op dit vlak zoals uitgevoerd door FCHJU;
- Optuigen van een commercialisatie-strategie voor het product: PEMWE teststation.

## 3 UITVOERING VAN HET PROJECT

### 3.1 TECHNISCHE EN ORGANISATORISCHE PROBLEMEN EN OPLOSSINGEN

De volgende technische problemen zijn ondervonden en opgelost:

- Negatieve degradatie van enkel-cel stackplatform;
- Onduidelijkheid in de literatuur over de impact van dynamische belasting op levensduur van de electrolyzer. Feitelijk tonen de grote electrolyzer fabrikanten geen verschil in degradatie tussen statisch en dynamische belasting. Als gevolg van deze waarneming is de nadruk komen te liggen op het vaststellen van zogenaamde “ Accelerated Stress Testing (AST)” protocollen voor met name het verkorten voor de lead time to market voor de introductie van nieuwe kosten effectieve electrolyzercomponenten;
- Vele technische horden genomen voor de ontwikkeling van het teststation. De genomen verbeteringen hebben geleid tot een robuuster gedrag van de electrolyzer waarbij het aantal storingen is teruggebracht tot 1 storing/1000 test-uren. Dit vereist nog verdere optimalisatie in het commercialisatietraject;
- De voorgestelde test protocollen zijn niet volledig gevalideerd. De validatie wordt verder doorgepakt in het vervolgproject NEXTGENP2H2.

De volgende organisatorische problemen zijn ondervonden en opgelost:

- De teststations zijn duurder uitgevallen dan gedacht vanwege de benodigde flexibiliteit in bedrijfsparameters. Dientengevolge is er extra investeringsgeld ingezet om drie teststations on-spec te realiseren.

### 3.2 WIJZIGINGEN TEN OPZICHTE VAN PROJECTPLAN

- Slechts drie teststations gerealiseerd ten opzichte van de vier geplande teststations;
- Validatie van het testprotocol is niet volledig voltooid vanwege de aanwezigheid van negatieve degradatie van de initiële stackplatforms. Door het aanpassen van de stackplatforms en het voorkomen van de negatieve degradatie is de echte validatie pas in de laatste fase van het project op gang gekomen;
- Op basis van de lessons learned gedurende het project is er verbetering doorgevoerd in het ontwerp van Hydron's stack.

### 3.3 VERSCHIL TUSSEN BEGROTING EN WERKELIJK GEMAAKTE KOSTEN

Geen budgetoverschrijdingen door ECN en Hydron Energy

### 3.4 WIJZE VAN KENNISVERSPREIDING

- Poster “titel” bij ICE 2017;
- Deelname aan de European PEFC and Electrolysis Conference in Luzern + publicatie binnen de proceedings;
- Bezoeken aan potentiële electrolyzer componenten leveranciers binnen NL.

## 3.5 PR PROJECT EN VERDERE PR-MOGELIJKHEDEN

### 3.5.1 DISSEMINATIE BINNEN NL

- Publicatie over Electre in Process Control door Arend de Groot;
- Publicatie binnen Voltachem nieuwsbericht;
- Poster bij Voltachem Jaarevent (9 November 2017).

### 3.5.2 COMMERCIALISATIE TESTSTATION

Hydron Energy heeft een flyer opgesteld voor de ontwikkelde teststations. Deze zal in de komende jaar beschikbaar komen ter promotie. Er is waardevolle informatie verkregen door gesprekken met klanten van Hydron, inzake de ervaringen met 'third party' teststations (welke momenteel op de markt zijn). Voorts zijn er contacten gelegd met internationale onderzoeksinstituten/kennisinstituten betreffende de mogelijkheid voor het leveren van geïntegreerde testopstellingen (inclusief stack hardware). Tevens is er een eerste aanzet gemaakt tot het bepalen van een verkoopprijs voor de ontwikkelde teststations. Het is de verwachting dat er nog een aantal slagen dienen te worden gemaakt op technisch gebied, alvorens er tot marktintroductie kan worden overgegaan.

### 3.5.3 VERVOLGPROJECTEN

AMPERE (een projectconsortium met Fuji Film, PTG, Hydron Energy en ECN) is een vervolg project van ELECTRE. In dit project worden nieuwe materialen voor PEMWE ontwikkeld en beproefd in nauwe samenwerking met de Nederlandse industrie;

NEXTGENP2H2 (consortium van Hydron Energy, Frames, ECN) is een vervolg project van ELECTRE waarbinnen de testprotocollen en testen van verbeterde testcomponenten ter hand zullen worden genomen.

Energy research Centre of the Netherlands

PO Box 1

1755 ZG PETTEN

The Netherlands

Contact

+31 (0)88 515 4949

[info@ecn.nl](mailto:info@ecn.nl)

[www.ecn.nl](http://www.ecn.nl)