



Alkaliboost

Dit onderzoek is uitgevoerd met Topsector Energiesubsidie van het Ministerie van Economische Zaken

Projectnummer: TWAS118004

Projecttitel: Alkaliboost: verhoging van de stroomdichtheid in alkaline water elektrolyse

Penvoerder en medeaanvragers: HyCC en Technische Universiteit Eindhoven

Projectperiode: mei 2019 – oktober 2023

Samenvatting

Alkaline water elektrolyse bestaat al meer dan honderd jaar en wordt daarom vaak gezien als een bewezen technologie waaraan weinig meer te verbeteren valt. Niets is echter minder waar. Er valt nog veel te verbeteren, wat ook nodig is om de kosten te verlagen en de flexibiliteit te vergroten.

In het Alkaliboost project is onderzocht of het mogelijk is de kosten te verlagen door de stroomdichtheid van alkaline water elektrolyzers te verhogen zonder katalysatoren gebaseerd op edelmetalen te gebruiken. Het antwoord op die vraag is ja. Door het gebruik van nieuwe, dunnere membranen is het namelijk mogelijk om de ohmse membraanweerstand in de elektrolyzer te verlagen. Wel lijken er ook andere ohmse weerstanden te zijn in de elektrolyzers, maar aan het begin van het project was het nog niet helder welke. Binnen het project is daarom uitgebreid onderzoek gedaan naar weerstand veroorzaakt door gasbellen, wat niet makkelijk is door het zeer complexe gas-vloeistof gedrag in een elektrolyzer. Uiteindelijk is geconcludeerd dat het effect van bellen op de ohmse weerstand weliswaar significant is, maar toch relatief beperkt ten opzichte van de membraanweerstand. Met name contactweerstand lijken een grote rol te spelen, wat een goed celontwerp belangrijk maakt. Al met al lijkt het mogelijk om de stroomdichtheid te verhogen tot $\sim 1 \text{ A cm}^{-2}$, wat een factor 4-5 hoger is dan de stroomdichtheid waarop traditionele alkaline electrolyzers worden geopereerd.

Wel kan het gebruik van dunnere membranen implicaties hebben voor de flexibiliteit van de elektrolyzer en met name de minimale last waarop de elektrolyzer moet worden geopereerd. Deze minimale last wordt namelijk bepaald door het lekken van waterstof door het membraan, wat toeneemt naarmate het membraan dunner wordt, maar ook afhangt van andere variabelen zoals temperatuur en druk. Binnen het Alkaliboost project is een model ontwikkeld wat het mogelijk maakt om het “waterstoflek” te voorspellen. Daarmee is het mogelijk om de condities zo te kiezen dat met een dun membraan toch een lage minimale last bereikt kan worden. Daarnaast is middels experimenteel werk gevonden dat de introductie van een kleine ruimte tussen kathode en membraan het lekken van het waterstof sterk kan reduceren. Deze innovatie maakt het mogelijk om alkaline elektrolyzers nog flexibeler te maken.

Op basis van het onderzoek lijkt het dus inderdaad mogelijk om de stackkosten te verlagen tot onder de 100 €/kW. Echter, zijn de stackkosten slechts een relatief klein deel van de totale kosten van een water elektrolyse fabriek. Om tot meer kostenreductie voor de totale fabriek te komen, zullen ook de kosten van de rest van de fabriek omlaag gebracht moeten worden. Daarom is ook nog gekeken naar de interactie tussen de elektrolyzer en de gelijkrichter. Hiervoor is een eerste model ontwikkeld, waarvan meer geavanceerde versies gebruikt kunnen worden om tot de beste keuzes te komen voor het geheel van elektrolyzers en stroomvoorzieningssysteem.

Met een geavanceerde alkaline water elektrolyse stack en andere innovaties in de fabriek zoals grotere modules zou het in de toekomst (2030) mogelijk moeten zijn om een 1 GW water elektrolyse fabriek te bouwen voor een prijs van 730 €/kW, wat een reductie van 50% is ten opzichte van een design met traditionele alkaline elektrolyzers. Er moet echter nog wel veel onderzoek en ontwikkeling gebeuren om dit nieuwe concept ook daadwerkelijk in de praktijk te brengen.

Inhoudsopgave

Samenvatting	iii
Inhoudsopgave	v
Hoofdstuk 1 Inleiding.....	1
Hoofdstuk 2 Investeringskosten traditionele alkaline water elektrolyse.....	3
Hoofdstuk 3 Op weg naar hogere stroomdichtheid	5
Hoofdstuk 4 Het effect van bellen in electrolyzers.....	11
Hoofdstuk 5 Flexibiliteit van alkaline elektrolyzer	14
Hoofdstuk 6 Koppeling tussen elektrolyzer en gelijkrichter	17
Hoofdstuk 7 Implicaties voor kostenreductie	21
Alkaliboost laboratorium opstelling.....	24
Wetenschappelijke publicaties gerelateerd aan het Alkaliboost project.....	26

Hoofdstuk 1

Inleiding

Alkaline water elektrolyse is efficiënt, betrouwbaar en goedkoop ten opzichte van andere water elektrolysetechnieken. De investeringskosten zijn echter nog steeds significant hoger dan voor waterstof productie middels “steam methane reforming” (SMR), wat een probleem is voor de competitiviteit van groene waterstof ten opzichte van grijze waterstof. De investeringskosten zijn extra belangrijk, omdat toekomstige electrolyzers niet altijd op volle kracht zullen kunnen draaien, doordat hernieuwbare elektriciteit niet altijd beschikbaar is. Een daling van de investeringskosten van alkaline water elektrolyse is daarom gewenst om de kosten van de energietransitie te verlagen.

Grote alkaline water elektrolyse bestaan al bijna honderd jaar (in 1928 werd de eerste 100+ MW installatie geopend in Noorwegen). De kracht van de alkaline technologie is dat de elektrochemische stacks relatief goedkoop zijn, doordat er geen dure edelmetalen of zeldzame aardmetalen worden gebruikt. Een zwak punt is echter de lage stroomdichtheid, waardoor er uit grote stacks maar relatief weinig waterstof komt. Idealiter zouden we graag alkaline stacks willen hebben, die bij hoge stroomdichtheid kunnen opereren en dus meer waterstof maken zonder veel duurder te zijn dan de bestaande stacks. Helaas zijn dit soort stacks nog niet ontwikkeld.

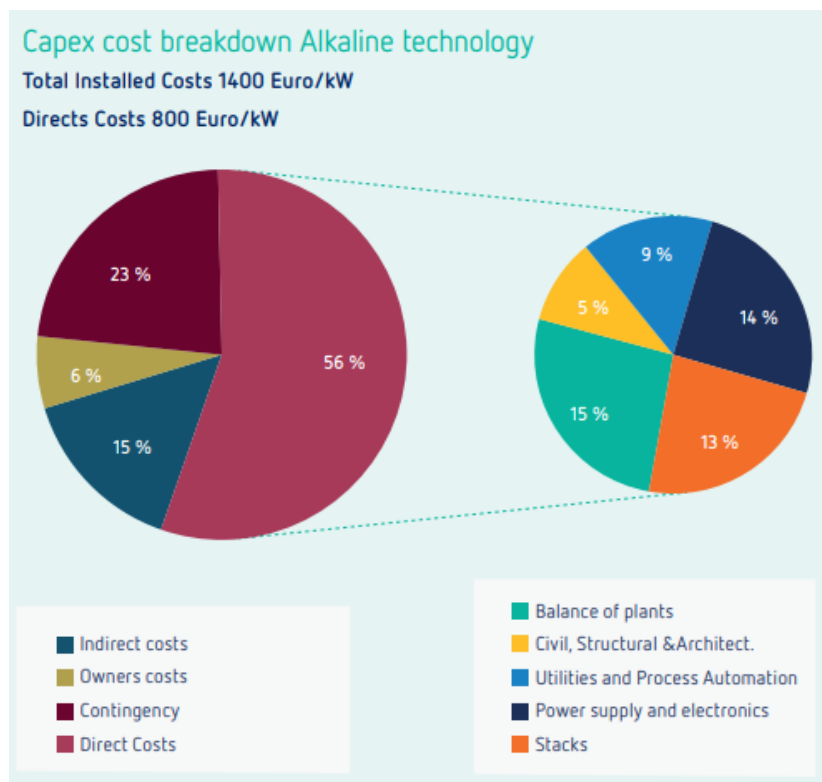
De doelstelling van het Alkaliboost project was het ontwikkelen en testen van nieuwe alkaline stack ontwerpen die het mogelijk maken om bij een veel hogere stroomdichtheid te opereren, waardoor de effectieve kosten van de elektrochemische stack dalen tot minder dan 100 €/kW. Focus lag initieel op het minimaliseren van de ohmse weerstand, die naast het membraan met name bepaald wordt door de structuur van de elektroden en de gevormde gasbellen. Gedurende het project werd de focus echter verbreed en werden ook andere belangrijke aspecten zoals “gas crossover” en de link tussen de electrolyzer en de gelijkrichter meegenomen, omdat deze ook van belang zijn voor de uiteindelijke kostprijs van de groene waterstof.

In dit rapport bespreken we eerst de kostenopbouw van traditionele alkaline waterelektrolyse-fabrieken (Hoofdstuk 2), om vervolgens te behandelen hoe de stroomdichtheid verhoogd kan worden (Hoofdstuk 3). Een apart hoofdstuk wordt geweid aan uitdagingen in het modelleren van het complexe gas-vloeistof gedrag in electrolyzers (Hoofdstuk 4). In hoofdstuk 5 behandelen we de flexibiliteit van electrolyzers door te kijken naar “gas crossover” en in hoofdstuk 6 de interface tussen electrolyzer en gelijkrichters. In het afsluitende hoofdstuk 7 laten we zien wat hogere stroomdichtheid en andere innovaties betekenen voor de investeringskosten van groene waterstoffabrieken.

Hoofdstuk 2

Investeringskosten traditionele alkaline water elektrolyse

Figuur 1 laat de kostenopbouw zien van een traditionele alkaline water elektrolyse fabriek. De totale investeringskosten zijn 1400 €/kW. Dit bevat alle kosten die nodig zijn om de fabriek te bouwen, inclusief posten zoals "civil", "contingency" en "owners costs" die in andere publieke rapporten vaak niet worden meegenomen.



Figuur 1: kostenopbouw van een 1 GW elektrolysefabriek.¹

¹ <https://ispt.eu/media/ISPT-public-report-gigawatt-green-hydrogen-plant.pdf>

Van deze 1400 €/kW is 13% stack-kosten, oftewel 180 €/kW. Dit getal is afgeleid uit diverse aanbiedingen van traditionele alkaline technologie, zowel uit Europa als uit China. Deze 180 €/kW is laag ten opzichte van andere internationale studies en laat zien dat traditionele alkaline electrolyzers al relatief goedkoop zijn. Dat de stack kosten slechts 13% van de totale investeringskosten bedragen is voor velen verrassend, maar is in lijn met andere elektrochemische industrieën zoals de chloor-alkali industrie. Het laat zien dat om tot grote kostenreductie te komen het belangrijk is om ook naar andere kostencomponenten te kijken, zoals de zogenaamde balance of plant (de apparatuur rondom de elektrolyzers, zoals de gas-vloeistofscheiders, pompen en warmtewisselaars) en de stroomtoevoer in de vorm van transformatoren en gelijkrichters. Dit is een van de redenen dat we die ook expliciet behandelen in hoofdstuk 6.

Dat neemt niet weg dat een verdere kostenreductie van de stack gewenst is. Sommige andere kosten, zoals "owners costs" en "indirect costs" zijn namelijk gerelateerd aan de directe kosten en daarmee dus ook aan de stackkosten. In kostenschattingen worden voor deze kosten dan ook vaak een percentage van de directe kosten genomen. Het goedkoper maken van de stack verlaagt dus ook deze kosten.

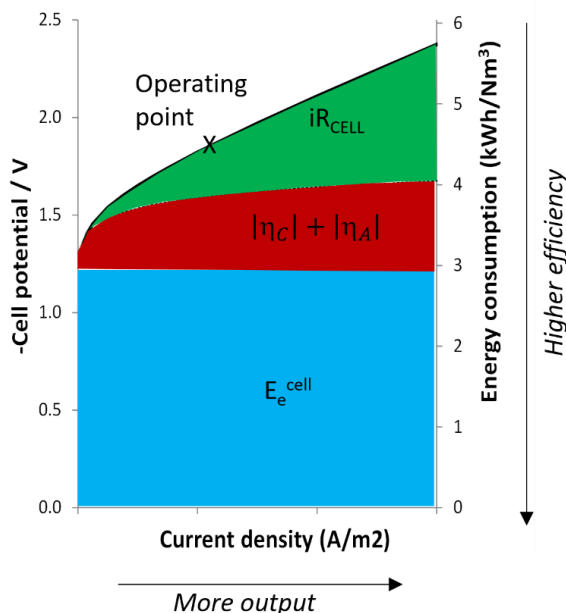
De kostenschatting zoals weergegeven in Figuur 1 is gemaakt in het kader van het GW project van ISPT <https://ispt.eu/projects/hydrohub-gigawatt/>, een groot project met meerdere bedrijven en kennisinstellingen, waaronder ook HyCC als de TU/e. Voor deze kostenschatting is gebruik gemaakt van de kennis die binnen het Alkaliboost project is opgedaan. In het kader van de samenwerking tussen Alkaliboost en het GW project is ook een bottom-up analyse gemaakt van de stackkosten (Krishnan et al. Int. J. Hydrogen Energy, 2023, 32313). Deze bottom-up analyse is echter met veel onzekerheden omgeven en daarom bespreken we hem hier niet in meer detail.

Hoofdstuk 3

Op weg naar hogere stroomdichtheid

Traditionele alkaline electrolyzers opereren op relatief lage stroomdichtheden van rond de $\sim 0.25 \text{ A cm}^{-2}$, wat bijna een factor tien lager is dan bij de concurrerende PEM technologie. In de laatste jaren zijn meer geavanceerde alkaline elektrolyzers op de markt gekomen, die op significant hogere stroomdichtheden kunnen opereren ($\sim 1 \text{ A cm}^{-2}$). Echter, deze nieuwe electrolyzers maken hoogstwaarschijnlijk gebruik van edelmetalen op hun elektroden,² waarmee het belangrijkste voordeel van alkaline technologie ten opzichte van concurrerende technologieën teniet wordt gedaan.

Het doel in ontwikkeling van alkaline technologie moet daarom zijn om de stroomdichtheid te verhogen zonder gebruik te maken van zeldzame en dure elektrodematerialen. Daarbij moet echter wel de efficiëntie behouden blijven. Uitgangspunt daarbij is de stroomspanningscurve van een electrolyzer, zoals weergegeven in Figuur 2. Deze laat de relatie tussen de cel spanning en de stroomdichtheid zien. De cel spanning is rechtstreeks gerelateerd aan de efficiëntie van het proces. De relatie laat altijd een stijgende lijn zien: bij hogere stroomdichtheid is de cel spanning altijd hoger en de efficiëntie dus lager.



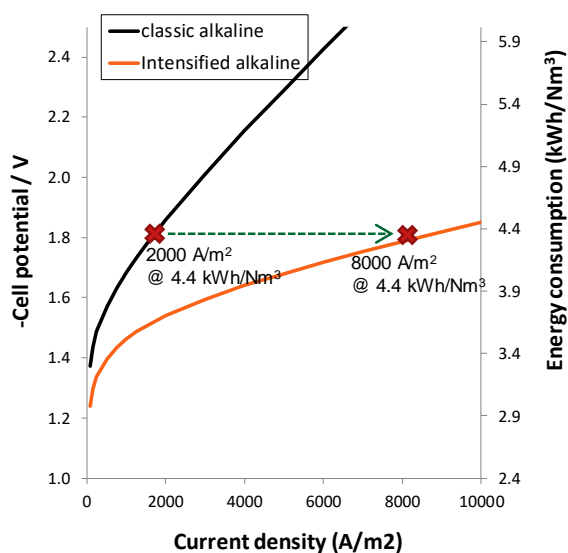
Figuur 2: relatie tussen de cel potentiaal en de stroomdichtheid van een water electrolyzer. Het energieverbruik is rechtstreeks gerelateerd aan de cel potentiaal.

² <https://www.denora.com/applications/H2-production-by-water-electrolysis.html>

De nominale stroomdichtheid en efficiëntie (het normale werkpunt van een elektrolyzer) zijn een keuze op de stroomspanningscurve. Het is mogelijk om te kiezen voor zeer efficiënte operatie bij lage stroomdichtheid, resulterend in lage variabele kosten, maar hoge CAPEX. Het andere uiterste is om juist te gaan voor hogere stroomdichtheid en dus lagere efficiëntie (lagere CAPEX, maar hogere variabele kosten). Wat het meest aantrekkelijk is wordt uiteindelijk bepaald door de business case. In de praktijk wordt eigenlijk altijd gekozen voor een nominale cel potentiaal tussen 1.8 en 1.95 V, wat overeenkomt met een stack efficiëntie tussen de 76% van 82% op basis van de bovenste verbrandingswaarde.

De stroomspanningscurve wordt bepaald door verschillende bijdragen, namelijk de evenwichtspotentiaal, de overpotentialen en de ohmse weerstanden. De evenwichtspotentiaal geeft de energie aan die nodig is om water te splitsen en heeft een beperkte afhankelijkheid van temperatuur en druk. De overpotentialen geven de extra energie aan die nodig is om waterstof en zuurstof aan kathode en anode. De ohmse weerstanden worden bepaald door de dikte en geleidbaarheid van het membraan, de geleiding van het elektrolyet en contactweerstand. Traditionele alkaline elektrolyzers hebben relatief hoge overpotentialen en ohmse weerstanden. Dit leidt tot een steile stroomspanningscurve (zie Figuur 3) en daardoor kunnen deze electrolyzers alleen bij een relatief lage stroomdichtheid efficiënt bedreven worden.

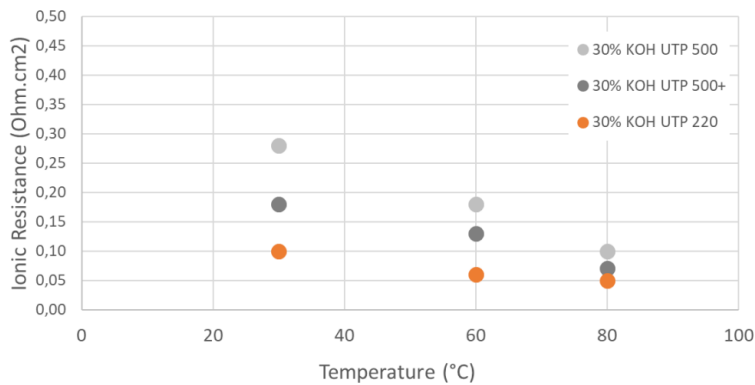
Om operatie bij hogere stroomdichtheden mogelijk te maken moet de stroomspanningscurve worden verlaagd door zowel de overpotentialen als ohmse weerstanden te verlagen. Dit is zichtbaar in Figuur 3, dat laat zien welke lijn nodig is om een stroomdichtheid van 0.8 A cm^{-2} te halen. Met name de verlaging van de ohmse weerstand is erg belangrijk, omdat ohmse weerstand juist bij hogere stroomdichtheden een grote bijdrage geeft (zie figuur 2). Voor de geavanceerde lijn is in dit geval dan ook uitgegaan van een verlaging van $1.25 \text{ } \Omega \text{ cm}^2$ naar $0.25 \text{ } \Omega \text{ cm}^2$, wat neerkomt op 80%. De verlaging van de overpotentialen is met 22% (van 0.45 V naar 0.35 V bij 0.2 A cm^{-2}) een stuk geringer.



Figuur 3: vergelijking van de stroomspanningscurves van traditionele en geavanceerde alkaline waterelektrolyse technologie. De traditionele lijn is op basis van een overpotentialiaal van 0.45 V bij 0.2 A cm^{-2} en een ohmse weerstand van $1.25 \text{ } \Omega \text{ cm}^2$. De geavanceerde lijn is op basis van een overpotentialiaal van 0.35 V bij 0.2 A cm^{-2} en een ohmse weerstand van $0.25 \text{ } \Omega \text{ cm}^2$.

Is het inderdaad mogelijk om de ohmse weerstand met 80% te verlagen ten opzichte van traditionele alkaline elektrolyzers? Dit lijkt een erg ambitieus doel, maar een nadere bestudering van de ohmse weerstanden laat zien dat dit toch niet onmogelijk zou moeten zijn.

Traditionele alkaline elektrolyzers maakten namelijk gebruik van 2-4 mm dikke membranen gemaakt van asbest, met een weerstand van meer dan $1 \Omega \text{ cm}^2$. Tegenwoordig wordt vooral het 0.5 mm dikke Zirfon UTP 500 membraan gemaakt door het Belgische Agfa gebruikt. Zoals te zien is in Figuur 4 heeft dit membraan bij 80 °C (de normale operationele temperatuur) een weerstand van ongeveer $0.1 \Omega \text{ cm}^2$. Er is nu zelfs een nog dunner membraan op de markt met een weerstand die nog een factor twee lager ligt (UTP220).

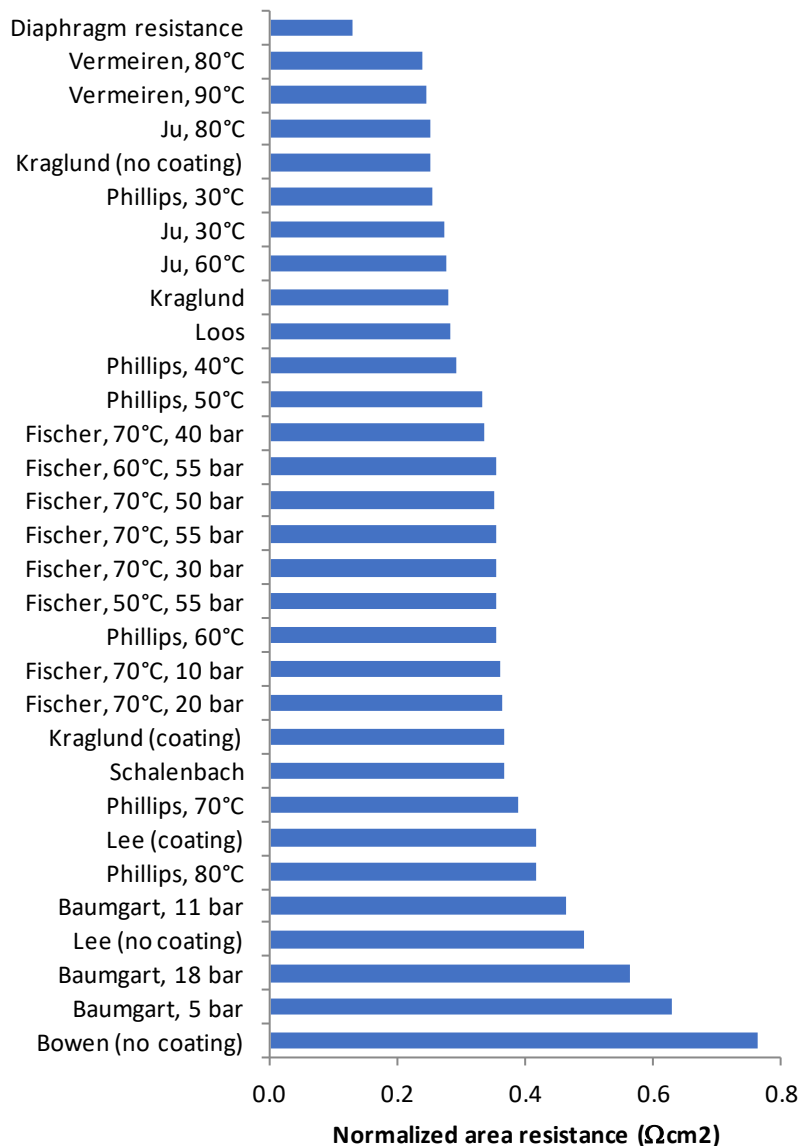


Figuur 4: gemeten ex situ membraanweerstand van verschillende types Zirfon in 30% KOH.³

Dit betekent dus dat de membraanweerstand ruim lager is dan de eerder genoemde $0.25 \Omega \text{ cm}^2$ benodigd voor de geavanceerde stroomspanningscurve zoals weergegeven in Figuur 3. Vraag is nu hoe groot de bijdrage is van de andere ohmse weerstanden, namelijk de weerstand door het elektrolyet en eventuele contactweerstand. Eigenlijk zou men verwachten dat voor “zero gap”-electrolyzers waar de elektrodes direct tegen het membraan zijn geplaatst, de weerstand door het elektrolyet slechts beperkt zou moeten zijn. Ook de contactweerstand zou bij een goed cel ontwerp mee moeten vallen. Daarmee zou de $0.25 \Omega \text{ cm}^2$ dus zeker haalbaar moeten zijn.

In de praktijk valt dat echter toch tegen. Figuur 5 laat namelijk de ohmse weerstanden zien die zijn geschat op basis van meer dan tien wetenschappelijke artikelen waarin zero gap alkaline electrolyzers met een Zirfon UTP500 membraan onderzocht zijn. Hieruit blijkt dat in al deze artikelen de weerstand significant hoger is, variërend van een factor twee tot een factor zeven.

³ Technical data sheet UTP220, provided by Agfa



Figuur 5: literatuuranalyse van geschatte ohmse weerstanden in zero gap alkaline electrolyzers die gebruik maken Zirfon UTP 500.⁴ De weerstanden zijn geschat door de stroomspanningscurves te fitten.

Hoe komt dit nu? Dit was de grote vraag die we binnen het Alkaliboost project hebben geprobeerd te beantwoorden. En natuurlijk de belangrijke vervolgvraag: kunnen we een electrolyzer ontwikkelen waarbij de weerstand inderdaad onder de 0.25 Ω cm² is?

Binnen het Alkaliboost project is veel aandacht besteed aan belgedrag. Hierbij was de hypothese dat er toch een kleine afstand tussen de elektroden en het membraan zit (ordergrootte enkele tientallen micrometers), die door de vorming van waterstof- en zuurstofbellen voor een groot gedeelte gevuld kan worden met gas. Hierdoor zou de ohmse weerstand over het elektrolyet toch significant kunnen zijn. Het is echter moeilijk om dit experimenteel vast te stellen en daarom is hier middels modellerwerk naar

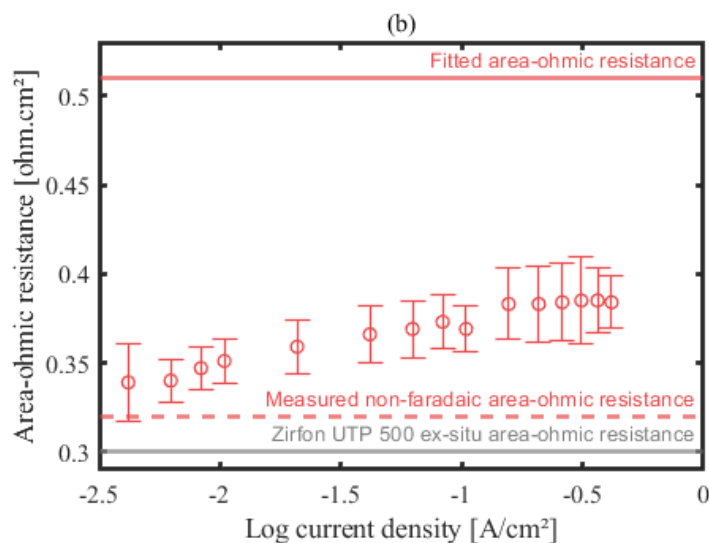
⁴ De Groot et al., *Electrochimica Acta*, 2021, 137684

gekeken. Dit wordt beschreven in het volgende hoofdstuk. Dit modelleerwerk is echter niet makkelijk en harde conclusies lijken er dan ook nog niet te trekken.

Op basis van recente metingen met elektrochemische impedantie spectroscopie (een techniek waarmee de ohmse weerstand in een elektrochemisch systeem kan worden bepaald) lijkt het effect van bellen in een “zero gap” alkaline electrolyzer relatief beperkt tot zo’n 20% extra weerstand ten opzichte van de pure membraanweerstand.⁵ Dit kan worden afgeleid uit het verschil in ohmse weerstand tussen zeer lage stroomdichtheden (waar er nauwelijks bellen zijn) en hoge stroomdichtheden (waar er heel veel bellen zijn), zoals weergegeven in Figuur 6. Deze metingen zijn echter wel uitgevoerd met relatief kleine elektrochemische cellen (tot 10 cm²) en het is nog even de vraag of deze resultaten ook gelden op grotere schaal. Met hoge snelheids-fotografie is verder vastgesteld dat bellen op het membraan kunnen blijven plakken en dat er eventueel ook gasbellen in het membraan zouden kunnen zitten. Bellen lijken echter zeker niet de enige verklaring te kunnen zijn voor de hogere ohmse weerstand.

Wat waarschijnlijk ook een belangrijke rol speelt zijn zogenaamde contactweerstand. Deze geven de weerstand aan tussen de elektroden en de stroomkabels. Normaalgesproken is de geleiding van metalen heel goed waardoor de weerstand beperkt is, maar met name op contactpunten tussen de verschillende metalen onderdelen van de elektrochemische cel kan deze wel degelijk significant zijn. Dit speelt met name aan de anoliet-kant waar nikkel door oxidatie een slecht geleidend oxidelaagje heeft. In het werk in het Alkaliboost-project bleek dat de contactweerstand veel groter waren dan eerder gedacht en wel 50% van de totale weerstand bedroegen. Het is niet onwaarschijnlijk dat dit ook het geval is voor een aantal studies die in Figuur 5 te zien zijn en voor grote industriële elektrolyzers. Daarmee is contactweerstand dus een zeer belangrijk onderwerp.

Binnen het Alkaliboost project is een speciale cel ontwikkeld waarmee het mogelijk is om direct aan de elektrode te meten zonder last te hebben van de contactweerstand. Figuur 6 laat zien dat in dat geval een weerstand behaald wordt die dicht bij de ex situ gemeten membraanweerstand uit Figuur 4 ligt. Dit bevestigt het belang van contactweerstand en laat zien dat het mogelijk is om de weerstand laag te houden. Belangrijk is om op te merken dat Figuur 6 is gemeten bij kamertemperatuur en de getallen dus lager zullen zijn bij de normale operationele temperatuur van 80 °C.



Figuur 6: met elektrochemische impedantie spectroscopie gemeten ohmse weerstand als een functie van stroomdichtheid voor UTP500 bij kamertemperatuur.

⁵ Garcia Lira Barros et al., *Electrochimica Acta*, submitted

Een andere verklaring voor de verhoogde weerstand is dat er bij hogere stroomdichtheden extra limiteringen plaatsvinden in de reacties aan de elektrodes, wat dan vervolgens leidt tot hogere overpotentialen dan verwacht. Op basis van metingen met elektrochemische impedantie spectroscopie lijkt dit inderdaad het geval te zijn. Het is nu nog niet duidelijk wat deze extra limiteringen precies zijn. Een mogelijke verklaring is dat bij zeer hoge stroomdichtheden een gedeelte van de actieve NiFe sites op de anode deactiveert. Dit heeft mogelijk te maken met het dynamisch evenwicht dat deze NiFe sites hebben met ijzer in het elektrolyet. Toevoeging van extra ijzer aan het elektrolyet zou deze limiteringen mogelijk kunnen verminderen.

Alhoewel vervolgonderzoek vereist is, kunnen we al wel concluderen dat de weg naar hogere stroomdichtheden in alkaline waterelektrolyse open lijkt te liggen. De membraanweerstand van $0.05 - 0.1 \Omega \text{ cm}^2$ bij 80°C liggen nu al een stuk lager dan het eerder genoemde doel van $0.25 \Omega \text{ cm}^2$ en zouden zelfs nog lager kunnen worden door de ontwikkeling van nog dunnere membranen. De bijdrage van bellen lijkt ook relatief beperkt en daarmee zou een goed ontworpen cel met beperkte contactweerstand een lage ohmse weerstand moeten hebben, waarmee efficiënte operatie bij hoge stroomdichtheden mogelijk moet zijn. Dit is in lijn met het feit dat er nu nieuwe geavanceerde alkaline electrolyzers op de markt komen die opereren bij hoge stroomdichtheden. Deze electrolyzers zijn echter nog wel relatief complex en maken gebruik van edelmetalen op hun elektroden, waardoor ze technoeconomisch nog niet (veel) aantrekkelijker zijn dan de traditionele alkaline electrolyzers. De uitdaging voor de komende jaren is dan ook om goedkope electrolyzers te maken die efficiënt bij hoge stroomdichtheden kunnen opereren.

Hoofdstuk 4

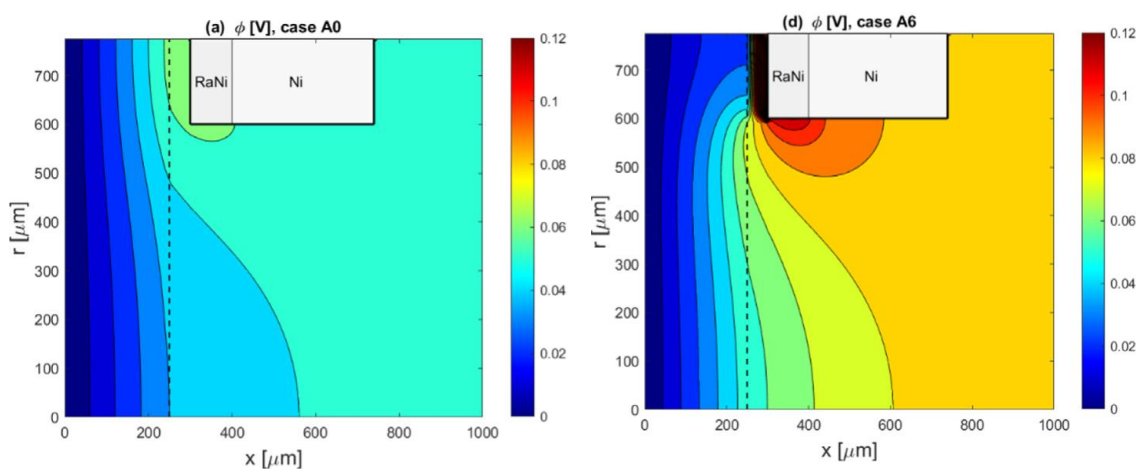
Het effect van bellen in electrolyzers

Wat betreft het effect van gasbellen op celspanning en stroomdichtheid is het belangrijk om twee dingen te onderscheiden. Ten eerste, bellen kunnen leiden tot een hogere zogenaamde Ohmse weerstand, omdat er vanwege de aanwezigheid van bellen tussen de elektrodes minder elektrolyt aanwezig is om de elektrische stroom te geleiden. Ten tweede, bellen kunnen een deel van het oppervlak op de elektrode innemen; een bel aan een elektrode kan een voet hebben waarmee de bel “vastzit” aan de elektrode (contacthoek in de vloeistof groter dan nul), waardoor er minder oppervlak van de elektrode beschikbaar is voor de reactie. Als gevolg daarvan is er een hogere activatiepotentiaal nodig om een gegeven nominale stroomdichtheid te bereiken in de elektrolyzer.

Het was aan het begin van dit project (in 2019) nog onduidelijk hoe groot de verhoging van de celspanning ten gevolge van bellen daadwerkelijk is. De verwachting was dat die vrij groot zou zijn, minimaal 10 procent van de totale celspanning. Die verwachting is in de literatuur vaak gebruikt als argument voor de praktische relevantie van het onderzoek aan bellen. Echter, zoals beschreven in het voorgaande hoofdstuk leiden experimenten uitgevoerd in 2023 binnen dit project tot de conclusie dat het effect van bellen op de celspanning waarschijnlijk klein is, veel kleiner dan 10 %, mits een zero gap of bijna zero gap geometrie wordt gebruikt. Dit is experimenteel vastgesteld voor kleine labcellen. Het is mogelijk dat de conclusie ook geldt voor grotere industriële cellen, maar zeker is dat nog niet.

Er zijn in dit project zowel experimenten als simulaties uitgevoerd. Dit hoofdstuk gaat over simulaties, simulaties op de microschaal en simulaties op de macroschaal. Een doel van het project was om voor de simulaties een model te ontwikkelen waarmee de experimenten in de opstelling van alkaline drukelektrolyse kunnen worden gesimuleerd. Gezien de grote hoeveelheid bellen in het experiment en de vele gaten in de zogenaamde geperforeerde plaat elektroden, zal een model van de complete cel vermoedelijk niet in staat zijn om de stroming rond de individuele bellen en in de grenslagen aan de wanden van alle gaten van de elektrodes nauwkeurig te simuleren. Daarom hebben zijn we begonnen met de ontwikkeling van een macrostromingsmodel op basis van de Euler-Lagrangiaanse techniek. In deze techniek worden lokale vloeistof- en gassnelheden en de gasfractie in een gegeven geometrie gesimuleerd. Individuele bellen worden meegenomen, maar de details van de stroming in de buurt van het beloppervlak niet. Voor de kracht op een bel wordt een empirische uitdrukking gebruikt en de geometrie van de gaten wordt niet in detail meegenomen. Helaas bleek de ontwikkeling van dit macromodel lastiger dan verwacht. Behalve een complexe meerfase stroming zijn er zoveel andere complexe verschijnselen die een rol spelen, zoals bijvoorbeeld de geometrie van de elektrodes, reactie aan de elektrodes, oververzadiging, ontstaan van bellen, groei van bellen, loslating van bellen en coalescentie van bellen. Omdat enerzijds de ontwikkeling en toepassing van een goed macromodel te lastig is en anderzijds er vanuit de experimentele kant van het project ook vragen kwamen over de microschaal is er binnen het project relatief veel vooruitgang geboekt in de modellering op microschaal. De resultaten op microschaal zullen we eerst bespreken.

We hebben elektrolyse op microschaal gesimuleerd met behulp van twee types modellen. In het eerste type werd de microschaal van de elektrode meegenomen terwijl de bellen niet individueel werden gemodelleerd, maar via een voorgeschreven gasvolume fractie. Op die manier is het effect van de aanwezigheid van bellen op de celspanning en op de lokale verdeling van de elektrische potentiaal in een bijna zero gap geometrie onderzocht.⁶ Figuur 7 toont resultaten van een simulatie zonder bellen en van een simulatie met bellen. De stroomdichtheid is beide gevallen 1 A/cm^2 . De Ohmse weerstand is $0.13 \Omega \text{ cm}^2$ zonder bellen en $0.24 \Omega \text{ cm}^2$ met bellen en een gasfilmlaag in de $50 \mu\text{m}$ "gap" tussen elektrode en membraan. De bijdrage van de bellen aan de celspanning is dus $(0.24 \Omega \text{ cm}^2 - 0.13 \Omega \text{ cm}^2) * 1 \text{ A/cm}^2 = 0.11 \text{ V}$. Maar dan zou er wel een filmlaag moeten zijn de gap. Er zijn aanwijzingen uit experimenten dat een dergelijk filmlaag kan optreden, maar of het optreedt hangt vermoedelijk wel af van de vorm van de elektrodes en de cel-constructie.



Figuur 7: De elektrische potentiaal in een axisymmetrische geometrie die de geometrie van de kathodische kant rond 1 gat van een geperforeerde plaat kathode representeert. Resultaten van een simulatie zonder bellen (links) en met bellen en een gasfilm tussen elektrode en membraan (rechts). Uit Ref. 6.

In het tweede type model werden de details van de stroming rond een individuele bel op een microelektrode gesimuleerd. Voor dit geval is gekozen omdat hiervoor relatief veel experimentele data gevonden werd in de literatuur. Op een microelektrode is er op een gegeven tijd slechts één grote bel aanwezig. Die bel zit of vast aan de elektrode of die bel blijft op zijn plek of zweeft boven een tapijt van vele hele kleine belletjes. Dat tapijt is waargenomen bij zeer hoge stroomdichtheden (circa 10 A/cm^2).⁷ In ons onderzoek aan een bel op een microelektrode hebben we Marangoni flow onderzocht. Marangoni flow en de bijbehorende Marangoni kracht op de bel kan het tijdstip van loslating van de bel beïnvloeden en daarmee de uiteindelijke diameter van de bel mede bepalen. Marangoni flow wordt veroorzaakt door variaties in de oppervlakte spanning ten gevolge van variaties in temperatuur, in elektrolyet-concentratie en surfactant-concentratie.

Eerst zijn er simulaties gedaan waarin de diameter van de bel op de microelektrode constant werd verondersteld⁸ en die zijn vergeleken met experimentele resultaten uit de literatuur.⁹ De tangentiële

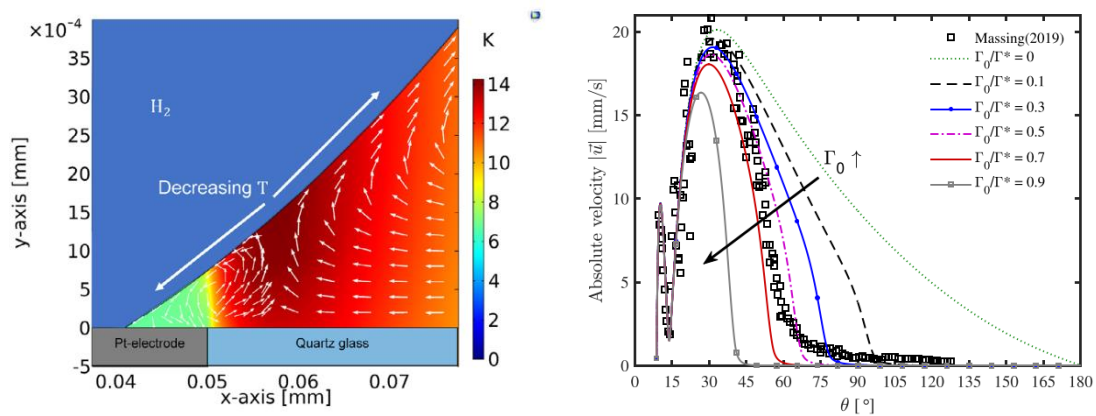
⁶ M.T. de Groot and A.W. Vreman (2021). Ohmic resistance in zero gap alkaline electrolysis with a Zirfon diaphragm, *Electrochim. Acta* 396, 137684.

⁷ A. Bashkatov, S.S. Hossain, X. Yang, G. Mutschke, K. Eckert (2019). Oscillating hydrogen bubbles at Pt microelektrodes, *Phys. Rev. Lett.* 123, 214503.

⁸ A.M. Meulenbroek, N.G. Deen, A.W. Vreman (2021). Competing Marangoni effects form a stagnant cap on the interface of a hydrogen bubble attached to a microelektrode, *Electrochimica Acta* 385, 138298.

⁹ J. Massing, G. Mutschke, D. Baczyszalski, S.S. Hossain, X. Yang, K. Eckert, C. Cierpka (2019). Thermocapillary convection during hydrogen evolution at microelektrodes, *Electrochimica Acta* 297, 929-940.

snelheid in de buurt van de bel is getekend in figuur 8 als functie van de hoek, die loopt van de onderkant van de bel (aan de elektrode) naar de bovenkant van de bel. De simulaties zijn uitgevoerd met en zonder een surfactant. Die simulaties laten zien dat een surfactant zorgt voor een stagnante bovenkant van de bel. Als er een surfactant aanwezig is zit die normaliter op de hele bel, maar de Marangoni flow zorgt ervoor dat de surfactant naar de bovenkant van de bel wordt getransporteerd. Omdat de simulatie met surfactant een veel betere overeenkomst geeft met het experiment dan de simulatie zonder surfactant, is de conclusie dat er (onbedoeld) surfactant aanwezig was in het experiment (Ref. 7). Vervolgens zijn er simulaties gedaan voor Marangoni flow rond een groeiende bel op de microelektrode. Daarvoor is een methode worden ontwikkeld die het rooster om de bel aanpast aan de groei van de bel.¹⁰ Daarna zijn er simulaties gedaan van Marangoni flow veroorzaakt door lading op de bel.¹¹ Tenslotte zijn er simulaties gedaan voor Marangoni flow veroorzaakt door variaties in de elektrolyet concentratie¹² en ook die simulaties zijn vergeleken met experimentele resultaten uit de literatuur.¹³



Figuur 8: Resultaten van een simulaties van Marangoni flow veroorzaakt door temperatuurverschillen op het oppervlak van de bel op een microelektrode (uit Ref. 8). Links een contourplaatje van de temperatuurstijging ten opzichte van een referentiepunt. Rechts een plaatje met snelheidsprofielen voor verschillende oppervlakteconcentraties Γ_0 van het surfactant, vergeleken met experimentele data uit de literatuur (Ref. 9).

Zoals eerder besproken, is er in dit project ook gewerkt aan modellen die de grotere schaal beschrijven. Een Euler-Lagrangiaans model is ontwikkeld en toegepast op elektrolyse. In dat model worden vele bellen met een vaste voorgeschreven diameter (bijvoorbeeld 100 micron) ingebracht aan een verticale wand van een langwerpig rekendomein (die verticale wand stelt de elektrode voor) en die belletjes kunnen vervolgens vrij bewegen in de stroming. Ze kunnen ook coalesceren met andere belletjes. We hebben de grootschalige stromingsrecirculatie veroorzaakt door die belletjes waargenomen in simulaties. De simulaties zijn dermate complex dat het nog niet af is; de beoogde simulatie van experimenten gedaan met de opstelling van alkaline drukelektrolyse bleek niet haalbaar met de beschikbare tijd en middelen voor het tijdstip van eindrapportage van dit project. Het is de bedoeling dit werk hierna voort te zetten.

¹⁰ A.M. Meulenbroek, B.W.J. Bernts, N.G. Deen, A.W. Vreman (2023). Numerical simulation of Marangoni flow around a growing hydrogen bubble on a microelektrode, *Electrochimica Acta* 472, 143457.

¹¹ A.M. Meulenbroek, A.W. Vreman, N.G. Deen (2023). A contradiction between electrostatic and electrocapillary bubble dynamics, to be submitted.

¹² A.M. Meulenbroek, A.W. Vreman, N.G. Deen (2023), to be submitted.

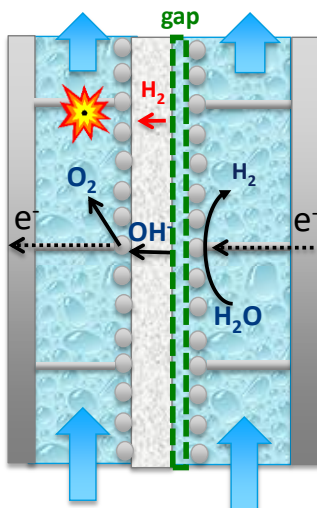
¹³ S. Park, L. Liu, C. Dmirkier, O. van der Heijden, D. Lohse, D. Krug, M.T. Koper (2023). Solvent Marangoni effect determines bubble dynamics during electrocatalytic hydrogen evolution, *Nature Chemistry* 15, 1532-1540.

Hoofdstuk 5

Flexibiliteit van alkaline elektrolyzer

In hoofdstuk 3 hebben we besproken dat de weg naar elektrolyzers die op hogere stroomdichtheid kunnen opereren open ligt, doordat de ohmse weerstand in de cel flink verlaagd kan worden. Dit wordt met name mogelijk gemaakt door het gebruik van dunnere membranen. Echter, het gebruik van dunnere membranen heeft ook een nadeel: het betekent dat er meer waterstof en zuurstof door het membraan heen zal lekken en dit kan het operationele werkgebied van de elektrolyzer negatief beïnvloeden.

De poreuze membranen die in alkaline water elektrolyse gebruikt worden zijn goed in staat om gasvormig zuurstof en waterstof uit elkaar te houden. Echter, ze laten in beperkte mate wel opgeloste waterstof en zuurstof door (schematisch weergegeven in Figuur 9). Wanneer de elektrolyzer op volle last wordt bedreven, leidt dit er toe dat een klein gedeelte van het gemaakte waterstof in de zuurstof terecht komt. Dit leidt tot een beperkt efficiëntie-verlies, maar is op zich geen groot probleem. Problematischer kan het worden wanneer de elektrolyzer wordt bedreven op een lage last: in dat geval is de zuurstofproductie namelijk lager en kan de waterstofconcentratie toenemen tot de onderste explosiegrens van 4%. Om het risico op een explosie te vermijden is er de regel dat een elektrolyzer uit moet worden geschakeld als de waterstofconcentratie meer is dan 2%. In de praktijk betekent dit dat een alkaline elektrolyzer een minimale last heeft: onder deze last kan de elektrolyzer niet worden geopereerd en moet hij worden uitgeschakeld. Deze minimale last hangt van veel factoren af, zoals druk, temperatuur, celontwerp, type membraan en de dikte van het membraan. Voor commerciële elektrolyzers varieert de minimale last tussen 10 en 50%.

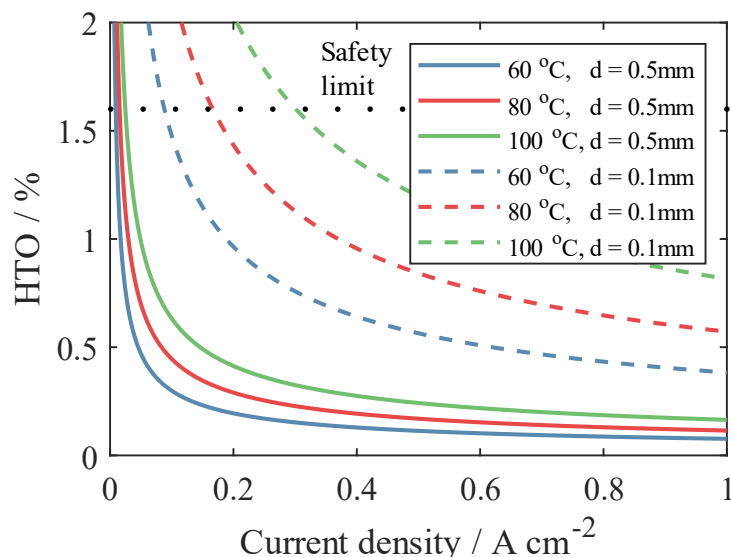


Figuur 9: schematisch weergave van het lekken van waterstof door het membraan in een alkaline water elektrolyse cel.

De minimale last is erg relevant, aangezien we elektrolyzers willen bedrijven op variabele zonne- en windenergie. Een hoge minimale last betekent dat elektrolyzers uitgeschakeld moeten worden als het even wat minder waait of de zon onvoldoende schijnt. Een lagere minimale last maakt het juist mogelijk om de elektrolyzer in operatie te houden. Naast het feit dat op deze manier meer waterstof kan worden

gemaakt, is het ook beter voor de elektrolyzer, omdat de elektroden in de elektrolyzer sneller kunnen degraderen door veelvuldig uit en aan zetten.

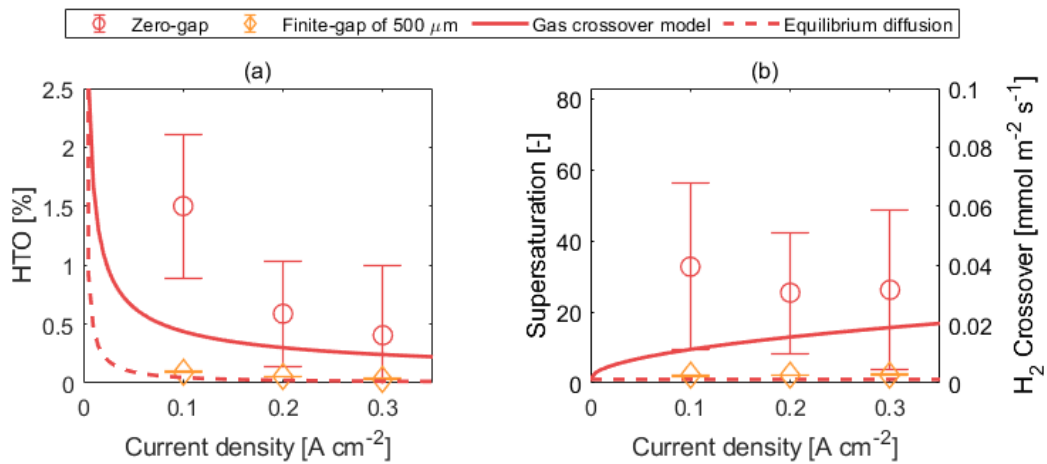
Alhoewel een dunner membraan dus goed is voor de ohmse weerstand, heeft het wel het ongewenste effect dat de minimale last van de elektrolyzer hoger wordt. Bij het kiezen voor de optimale membraandikte moet hier dus een afweging worden gemaakt. Binnen het Alkaliboost project is op basis van experimentele resultaten voor zero gap-elektrolyzers uit de literatuur een model ontwikkeld dat uit kan rekenen hoeveel waterstof door het membraan heen lekt als functie van de verschillende variabelen (temperatuur, druk, elektrolietconcentratie en membraandikte). Hiermee is het mogelijk om uit te rekenen wat de beste operationele condities en membraandikte zijn om tot een efficiënte elektrolyzer te komen, die toch een lage minimale last heeft (zie Figuur 10). Een belangrijke conclusie uit het model is dat het aantrekkelijk is om de elektrolyzer op niet al te hoge druk te bedienen (5-10 bar). Dat maakt het namelijk mogelijk om een dun membraan te gebruiken en toch een lage minimale last te bereiken.



Figuur 10: gemodelleerde hoeveelheid waterstof in zuurstof (HTO) in een geavanceerde alkaline water elektrolyzer als functie van de stroomdichtheid voor verschillende temperaturen en membraandiktes. Druk = 10 bar, 30 wt% KOH.¹⁴

In het kader van het Alkaliboost project zijn ook experimenten uitgevoerd om te kijken hoe het lekken van waterstof af hangt van het ontwerp van de cel. Daaruit is gebleken dat de hoeveelheid waterstof in de zuurstof sterk kan worden gereduceerd door een kleine ruimte tussen het membraan en de kathode te introduceren (zie Figuur 11). Een verklaring hiervoor is dat het waterstoftransport door het membraan wordt gedreven door de oververzadiging van waterstof aan het membraanoppervlak. Deze oververzadiging hangt af van de afstand tussen het membraan en de kathode, waar de oververzadiging altijd hoog is.

¹⁴ De Groot et al., Int. J. Hydrogen Energy, 2022, 34773



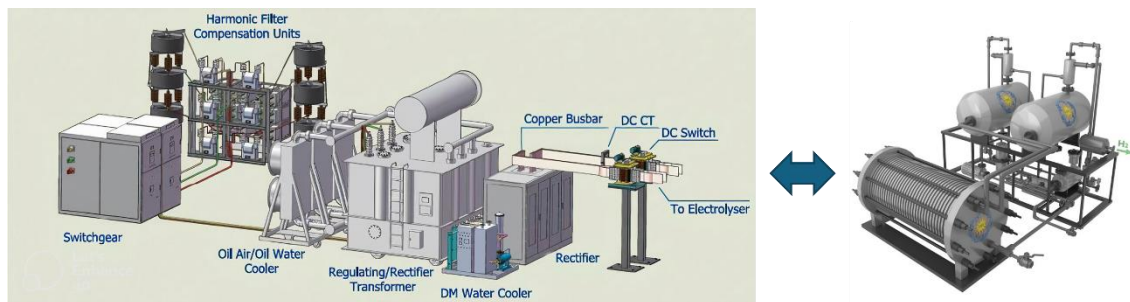
Figuur 11: de hoeveelheid waterstof in zuurstof als functie van de stroomdichtheid voor een “zero gap” electrolyzer vergeleken met een electrolyzer met een ruimte tussen membraan en kathode.

Een kleine ruimte kan het waterstoftransport dus flink verlagen, maar leidt wel tot een hogere ohmse weerstand. Echter, zo lang de ruimte beperkt blijft (<500 micrometer) is de verwachting dat de toename van de ohmse weerstand beperkt is en daarmee het voordeel van het lagere waterstoftransport ruim opweegt tegen de iets hogere ohmse weerstand. De optimale afstand moet echter nog gevonden worden en is onderdeel van vervolgonderzoek. De kleine ruimte opent de weg naar alkaline electrolyzers die een stuk flexibeler zijn dan de bestaande electrolyzers en toch op hoge druk en hoge stroomdichtheid kunnen opereren.

Hoofdstuk 6

Koppeling tussen elektrolyzer en gelijkrichter

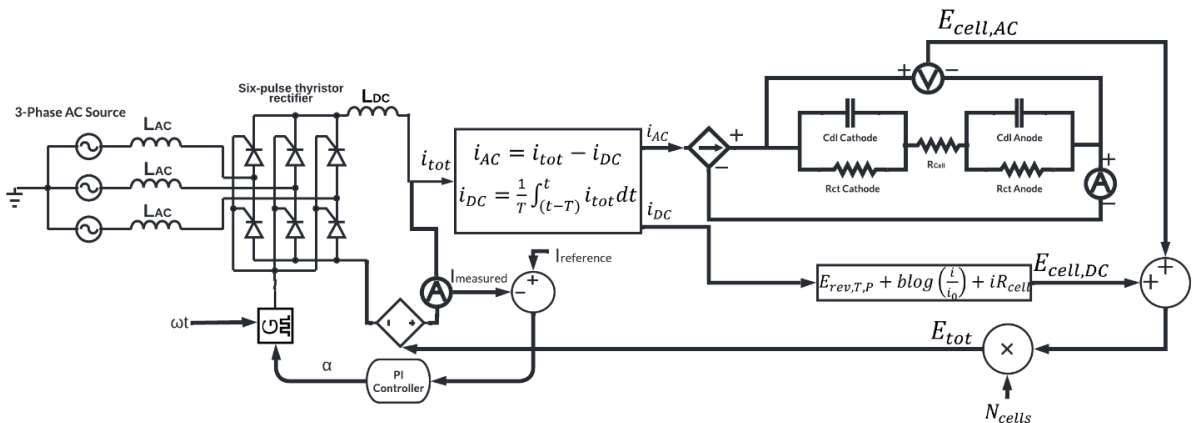
In het Alkaliboost project is ook gekeken naar de koppeling tussen de elektrolyzer en de stroomvoorziening, zoals schematisch weergegeven in Figuur 12. Reden daarvoor is dat de stroomvoorziening een belangrijke bijdrage levert aan de totale kosten van het systeem (zie Figuur 1) en om de kosten van het totale systeem te verlagen moeten dus ook daar kosten worden gereduceerd. Dit is een extra uitdaging, omdat de noodzaak tot flexibele operatie de kosten van de stroomvoorziening juist kan verhogen. Een sleutelcomponent in de stroomtoevoer is de gelijkrichter. Deze zet wisselstroom om in de gelijkstroom die nodig is voor de elektrolyzer. Hoe goed deze omzetting is hangt af van het ontwerp van de gelijkrichter.



Figuur 12: schematische weergave van de stroomtoevoer naar de elektrolyzer en de elektrolyzer zelf

Om de kosten van de stroomtoevoer zo laag mogelijk te houden is het belangrijk om te kijken naar het systeem van gelijkrichter en elektrolyzer als geheel. Vanuit elektrolyse is het namelijk het beste om voor een zeer goede gelijkrichter te gaan, omdat dit tot de hoogste efficiency leidt. Echter, dat is ook meteen de duurste gelijkrichter. Door naar het totale systeem te kijken kan de conclusie zijn dat het technoeconomisch beter is om te kiezen voor een minder perfecte gelijkrichter. Dit zal betekenen dat de geproduceerde gelijkstroom niet perfect is, wat tot wat efficiëntie verlies leidt bij de elektrolyzer. Dit wordt dan echter gecompenseerd door de lagere kosten van de gelijkrichter.

Om de juiste beslissing op systeemniveau te kunnen nemen, moeten we alle belangrijke aspecten van zowel de elektrolyzer als het stroomvoorziening begrijpen, en vooral de interactie daartussen. Hier staan we voor een uitdaging: de elektrolyzer is het domein van elektrochemische ingenieurs, terwijl het stroomvoorzieningssysteem het domein is van de elektrochemische ingenieurs. Om deze werelden bij elkaar te brengen is binnen het Alkaliboost project een gecombineerd gelijkrichter-elektrolyzermodel ontwikkeld. Dit resulterende model wordt getoond in Figuur 13.

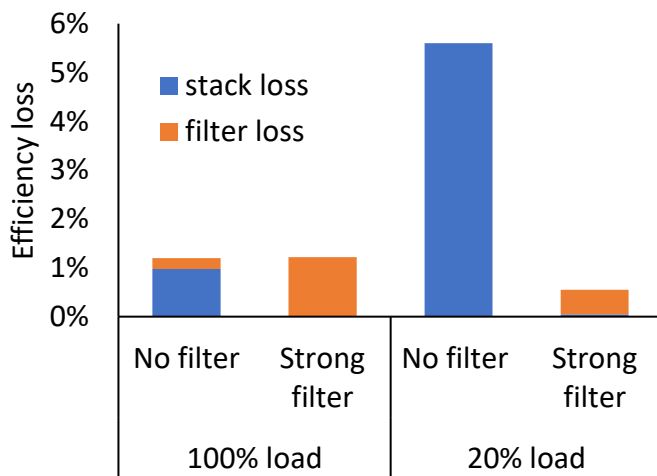


Figuur 13: gecombineerd gelijkrichter-elektrolyzer model.¹⁵

Het model combineert een 6-puls thyristorgelijkrichtermodel met een elektrochemisch model dat uit twee delen bestaat: een steady-state elektrolysemodel dat de cel-potentiaal berekent op basis van de gemiddelde stroom en een dynamisch model dat de variatie in cel-potentiaal berekent op basis van de variatie in invoerstroom. De invoerwaarden die nodig zijn voor het elektrochemische model zijn verkregen uit laboratoriumexperimenten. Het gecombineerde elektrochemische model werd vervolgens ook experimenteel gevalideerd in het laboratorium, waaruit bleek dat het in staat is om de celpotentiaal op milliseconde-schaal te voorspellen. Hoewel het elektrochemische model is gemaakt voor een kleinschalige laboratorium-elektrolyzer, kan het eenvoudig worden aangepast een industriële elektrolyzer te beschrijven.

Het model is gebruikt om efficiëntieverliezen te bepalen die verband houden met imperfecte gelijkrichting. Deze efficiëntieverliezen treden zowel op in de elektrolyzer als in de gelijkrichter. In de elektrolyzer zijn de verliezen te wijten aan de "rimpelingen" in de stroom, die het gevolg zijn van de imperfecte gelijkrichting van de stroom door de 6-puls-gelijkrichter. In de gelijkrichter worden de verliezen veroorzaakt door een filter, dat tot doel heeft de rimpelingen te verminderen. Het modelleringswerk, waarvan de resultaten te zien zijn in Figuur 14, toonde aan dat een sterk filter resulteert in minder efficiëntieverliezen in de elektrolyzer, maar dat dit gepaard gaat met hogere verliezen voor het filter. Dit betekent dat er een afweging moet worden gemaakt als het gaat om de grootte van dat filter. Bij deze afweging moet ook rekening worden gehouden met het bedrijfsprofiel van de elektrolyzer, aangezien de efficiëntieverliezen afhankelijk zijn van de belasting van de elektrolyzer.

¹⁵ S.F. Amireh et al., Journal of Power Sources 560 (2023) 232629



Figuur 14: efficiëntieverliezen als gevolg van imperfecte gelijkrichting met en zonder opname van een filter in de gelijkrichter.

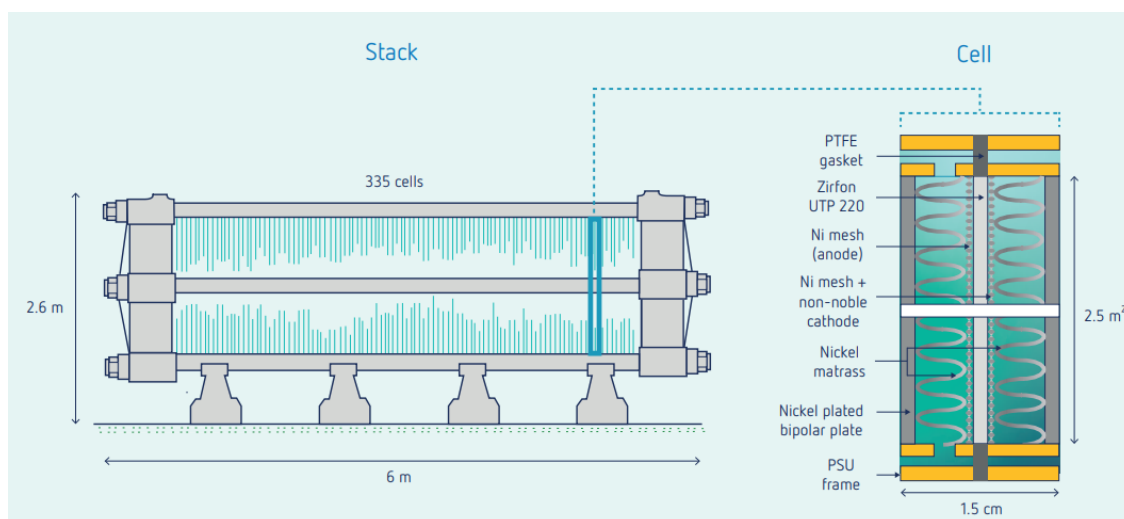
Moderne elektrolysefabrieken maken geen gebruik maken van thyristorgelijkrichters met 6 pulsen, maar gebruiken in plaats daarvan meer geavanceerde gelijkrichters met 12 of 24 pulsen of “insulated-gate bipolar transistor” (IGBT). Daarom zijn de getoonde resultaten nog niet direct relevant voor deze fabrieken. Doel van het onderzoek was in eerste plaats om het potentieel van dit soort modellering aan te tonen. Om echt waarde te creëren zullen meer geavanceerde gelijkrichtermodellen gecombineerd moeten worden met elektrolysemodellen. Dit type modellering kan dan vervolgens helpen bij het maken van de juiste ontwerpkeuzes in de fabriek, vooral als de modellen effectief kunnen worden gekoppeld aan kostenmodellen voor zowel CAPEX als OPEX. Op basis daarvan kan dan de meest geschikte gelijkrichter (IGBT of op thyristor gebaseerd) worden geselecteerd. Het kan zelfs worden gebruikt bij het bepalen van het meest geschikte operationele profiel van de elektrolysefabriek, aangezien het voedingssysteem een van de flexibiliteitsbeperkende factoren kan zijn.

Er is zelfs nog meer mogelijk op het grensvlak tussen het stroomvoorzieningssysteem en de elektrolyzer. Geavanceerde gelijkrichtersystemen (bijv. IGBT) kunnen potentieel worden gebruikt als hulpmiddel om de toestand van een elektrolyzer te karakteriseren. Waar de huidige beoordelingen van de toestand grotendeels beperkt zijn tot metingen van stack- en celpotentiala, zou een geavanceerde gelijkrichter de weg kunnen openen voor metingen die vergelijkbaar zijn met elektrochemische impedantiespectroscopie, de techniek die nu eigenlijk nog alleen op laboratoriumschaal wordt toegepast vanwege de relatief hoge kosten. Idealiter zou dit de voorspelling van de resterende levensduur van een elektrolyzer mogelijk moeten maken voordat prestatieverlies optreedt. Dit vergt echter nog wel veel onderzoek.

Hoofdstuk 7

Implicaties voor kostenreductie

Wat betekenen de innovaties besproken in eerdere hoofdstukken voor de kosten van een water elektrolyse-fabriek? In samenwerking met het GW project is geprobeerd deze vraag te beantwoorden. Allereerst is gekeken naar de implicaties voor de stack. Figuur 15 laat zien hoe een geavanceerde elektrolyzer er mogelijk uit zou kunnen zien. Van de buitenkant is hij heel vergelijkbaar met een traditionele stack. Het verschil zit hem aan de binnenkant waar een dunner membraan wordt gebruikt en daarnaast nikkel-“matrassen” om een goede “zero gap” te krijgen en tevens de contactweerstand te minimaliseren. Het moet worden opgemerkt dat in dit design nog geen ruimte tussen kathode en membraan is toegepast om het lekken van waterstof te verminderen (zie Hoofdstuk 5). Die innovatie kwam namelijk pas nadat dit geavanceerde design al wat ontwikkeld. Het is echter relatief makkelijk om deze kleine ruimte alsnog te introduceren om daarmee de gaszuiverheid te verhogen.



Figuur 15: schematische weergave van een geavanceerde alkaline elektrolyzer.¹⁶

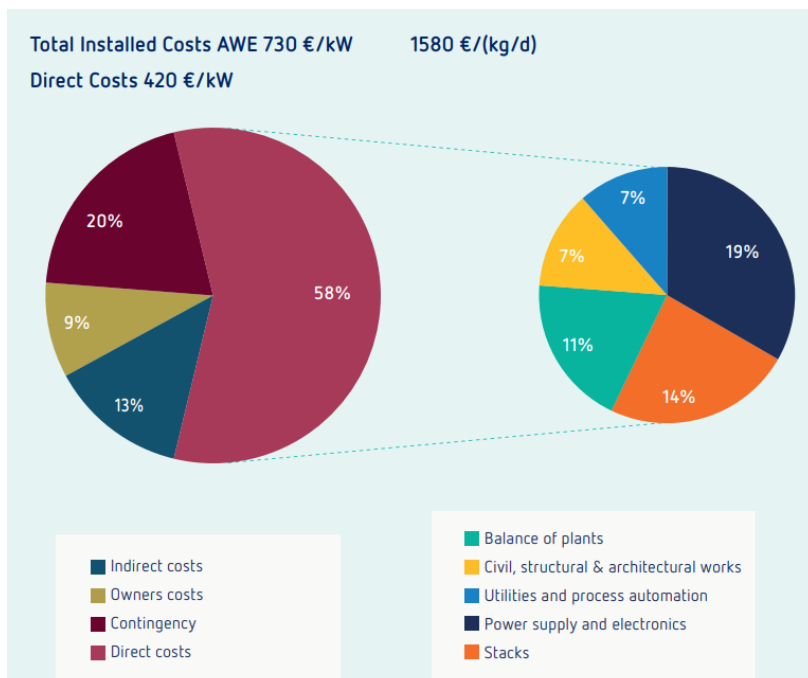
De eigenschappen van de stack zijn weergegeven in Tabel 1. Deze tabel laat zien dat het geavanceerde design het mogelijk maakt om bij veel hogere stroomdichtheid te opereren, waardoor de geproduceerde hoeveelheid waterstof bijna een factor tien hoger is dan in het traditionele design. Daarnaast opereert de nieuwe elektrolyzer bij een hogere druk van 5 bar, wat kosten bespaart in de compressie. De druk is bewust niet hoger gekozen dan 5 bar, om een minimale last van 15% te behouden. Door de hogere stroomdichtheid dalen ook de stackkosten in €/kW ruim onder de 100 €/kW.

¹⁶ <https://ispt.eu/media/Public-report-gigawatt-advanced-green-electrolyser-design.pdf>

Tabel 1: eigenschappen van een geavanceerde alkaline elektrolyse stack in vergelijking met een traditionele elektrolyse-stack

	Traditioneel	Geavanceerd (2030)
Nominale stroomdichtheid	0.2 A cm ⁻²	1.3 A cm ⁻²
Stack efficiëntie (% of HHV)	80%	80%
Nominaal stack vermogen	2.2 MW	19.6 MW
Nominale stack waterstof productie	485 Nm ³ h ⁻¹	4,460 Nm ³ h ⁻¹
Operatie temperatuur (°C)	80	100
Operatie druk (bar)	1	5
Minimale last	15%	15%
Stack kosten (€/kW)	~160	~60

Zoals besproken in Hoofdstuk 2 zijn de investeringskosten voor de totale fabriek veel meer dan alleen de stack-kosten. Daarom is er binnen het GW project ook een schatting gemaakt voor de totale kosten van een geavanceerde alkaline waterelektrolyse fabriek. Deze schatting laat zien dat het mogelijk is om de totale kosten van de fabriek bijna te halveren tot 730 €/kW (zie figuur 16). Naast de goedkopere stacks komt dit met name door het gebruik van grotere modules, verlaagde compressiekosten en een compacter stroomvoorzieningssysteem. Wel moeten we opmerken dat deze kostenschatting gemaakt is voor de inflatiegolf van 2022, waardoor ze nu waarschijnlijk significant hoger uit zou komen. Desalniettemin laat het zien dat een significante kostenreductie mogelijk is door innovatie.



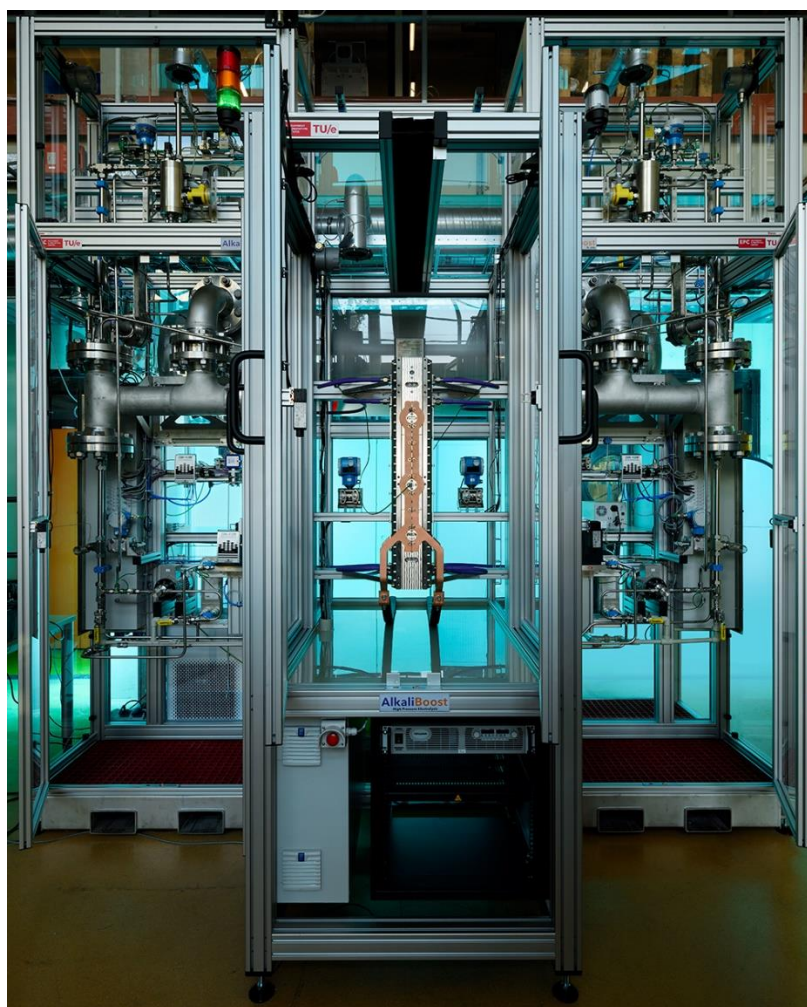
Figuur 16: kostenopbouw van een geavanceerde 1 GW elektrolysefabriek.¹⁷ De kostenschatting is gemaakt in het jaar 2021.

Bovenstaand ontwerp bestaat tot nu toe slechts op papier en om het te realiseren moet nog heel veel werk verricht worden. Het Alkaliboost project moet daarom gezien worden als slechts een aanzet tot andere projecten. Deze projecten zullen met name in samenspel met de maakindustrie worden uitgevoerd, omdat die uiteindelijk de elektrolyzers en de complete fabrieken zal moeten bouwen. Het goede nieuws is dat er ondertussen al een aantal mooie vervolgprojecten lopen, zoals HyScaling en NXTGEN Hightech, waarin de maakindustrie een prominente plek heeft.

¹⁷ <https://ispt.eu/media/Public-report-gigawatt-advanced-green-electrolyser-design.pdf>

AlkaliBoost laboratorium opstelling

De binnen het project gerealiseerde opstelling voor alkaline drukelektrolyse is te zien op onderstaande foto. Met deze opstelling is het mogelijk om alkaline waterelektrolyse-onderzoek uit te voeren tot een druk van 50 bara en 90 °C.



Wetenschappelijke publicaties gerelateerd aan het Alkaliboost project

R. Lira Garcia Barros, J.T. Kraakman, C. Sebregts, J. van der Schaaf, M.T. de Groot, "Impact of an elektrode-diaphragm gap on diffusive hydrogen crossover in alkaline water electrolysis", *International Journal of Hydrogen Energy*, **2023**, 49, 886

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923049777?via%3Dihub>

A.M. Meulenbroek, B.J.W. Bernts, N.G. Deen, A.W. Vreman, "Numerical simulation of Marangoni flow around a growing hydrogen bubble on a microelektrode", **2023**, 472, 143457

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468623016298?via%3Dihub>

Senan F. Amireh, N. Heineman, P. Vermeulen, R. Lira Garcia Barros, D. Yang, J. van der Schaaf, M.T. de Groot, "Impact of power supply fluctuation and part load operation on the efficiency of alkaline water electrolysis", *Journal of Power Sources*, **2023**, 560, 232629

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775323000046>

M.T. de Groot, J. Kraakman, R. Lira Garcia Barros, "Optimal operating parameters for alkaline water electrolysis", *International Journal of Hydrogen Energy*, **2022**, 82, 34773

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922035790>

M.T. de Groot, A.W. Vreman, "Ohmic resistance in zero gap alkaline electrolysis with a Zirfon diaphragm", *Electrochimica Acta*, **2021**, 369, 137684

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468620320776>

A.M. Meulenbroek, A.W. Vreman, N.G. Deen, "Competing Marangoni effects form a stagnant cap on the interface of a hydrogen bubble attached to a microelektrode", **2021**, 385, 138298

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468621005880?via%3Dihub>