

Alkaliflex

Citation for published version (APA):

de Groot, M. T. (2020). *Alkaliflex: publiek eindrapport*.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/2020

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Alkaliflex

Publiek eindrapport

Samenvatting

In veel rapporten over water elektrolyse wordt gezegd dat alkalische water elektrolyse-technologie relatief inflexibel is ten opzichte van alternatieven zoals PEM elektrolyse, maar dit wordt zelden verder toegelicht. In het kader van het Alkaliflex project is de flexibiliteit van alkalische water elektrolyse dieper onderzocht. Vier flexibiliteitslimiteringen zijn geïdentificeerd: gelijkrichters, gas zuiverheid, warmtemanagement en gas-vloeistofgedrag. Voor de meeste van deze limiteringen zijn oplossingen beschikbaar om de flexibiliteit te verhogen en alkalische technologie is dan ook niet inherent inflexibel. Wel is het zo dat de oplossingen om de flexibiliteitslimiteringen weg te nemen geld kosten en het per project bepaald zal moeten worden of dit aantrekkelijk is.

Verder is het zeer de vraag of zeer flexibele elektrolyzers wel nodig zijn. De huidige behoefte aan zeer snelle flexibiliteit is namelijk beperkt en zeker op de lange termijn zal de waarde van korte termijn flexibiliteit waarschijnlijk afnemen door een toenemend flexibel aanbod. Daarentegen zal er door een toenemend aandeel van zonne- en windenergie wel meer behoefte komen aan flexibiliteit op uurbasis, maar hiervoor is zeer snel op- en afschakelen minder belangrijk. De minimale last waarop een elektrolyzer kan opereren blijft waarschijnlijk wel heel belangrijk.

Het Alkaliflex project laat ook zien dat er kansen zijn voor de ontwikkeling van efficiëntere elektrolyzers op basis van betere elektrodestructuren en dunnere membranen. In het Alkaliflex project is een eerste prototype van een nieuwe laboratorium-elektrolyzer ontwikkeld op basis van 3D-print technieken, die al beter presteert dan een commercieel verkrijgbare laboratoriumelektrolyzer. Voor verdere ontwikkeling is er wel behoefte aan modellen die het complexe gas-vloeistof gedrag in elektrolyzers beter kunnen beschrijven. De huidige modellen hebben nog veel moeite om het gedrag in sterke elektrolyten en bij hoge gasfracties te beschrijven.

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
1. Gegevens Project	4
2. Inleiding	4
3. Flexibiliteit van huidige alkalische waterelektrolyse	5
4. Analyse van huidige flexibiliteitslimiteringen	5
4.1. Gelijkrichters	5
4.2. Gaszuiverheid	6
4.3. Warmtemanagement	7
4.4. Gas-vloeistof stromingen	8
5. Kostprijsreductie van waterstof door flexibele operatie	9
6. Design-ideeën voor betere elektrolyzers	9
7. Experimentele validatie van betere elektrolyzers	10
7.1. Ontwikkeling van testfaciliteiten en testcellen	10
7.2. Eerste resultaten	11
8. Vervolgstappen	12
9. Appendices	13
9.1. Appendix 1: presentations on “Materials for alkaline electrolysis”	13
9.2. Appendix 2: presentation on “Intensification of alkaline electrolysis”	13
9.3. Appendix 3: presentation on “Making alkaline electrolysis more flexible”	13
9.4. Appendix 4: CFD of the pressure distribution of a NEL electrolyzer during start-up	13

1. Gegevens Project

Projecttitel: Alkaliflex: vergroting van de flexibiliteit en productiecapaciteit van alkalische waterelektrolyse

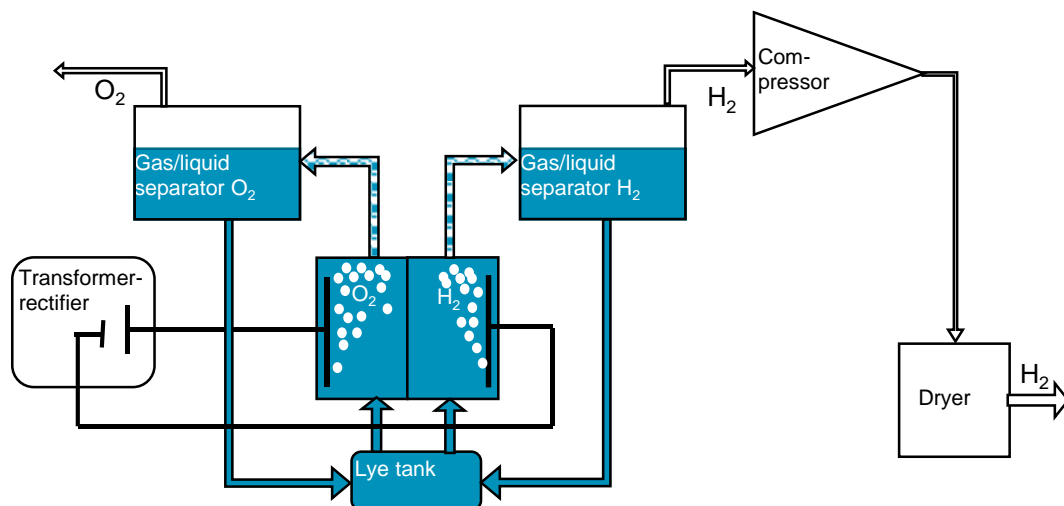
Penvoerder en medeaanvragers: Nouryon Industrial Chemicals bv en Technische Universiteit Eindhoven

Projectperiode: februari 2018 – december 2019

2. Inleiding

Alkalische water elektrolyse is betrouwbaar, efficiënt en is ook de goedkoopste van de verschillende water elektrolyse technologieën. Het is de verwachting dat dat tot zeker 2030 zo zal blijven¹ en daarmee lijkt het de geëigende technologie voor de eerste GW-fabrieken. Echter, er wordt vaak geschreven dat alkaline water elektrolyse onvoldoende flexibel is en daarom minder goed zou aansluiten bij het variabele aanbod van zonne- en windenergie dan de concurrerende PEM technologie.²

Het lijkt erop dat de achtergrond voor deze aanname van beperkte flexibiliteit van de alkalische technologie voortkomt uit het aanbod van de huidige leveranciers die gewend zijn “vollast” fabrieken te bouwen en daarom hun fabrieken niet hebben ontworpen voor flexibele operatie. In de empirische wereld van de water elektrolyse is het echter niet direct helder wat de oorzaken precies zijn van die beperkte flexibiliteit. Het is goed hierbij te bedenken dat de limiteringen niet noodzakelijkerwijs alleen in de elektrolyser hoeven te zitten. Ze kunnen zich ook bevinden in de omliggende unit operaties, welke zijn weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1: schematische weergave van de elektrolyse en de omliggende unit operaties

Het doel van dit onderzoek was het maken van een significante stap in vergroting van de flexibiliteit van de alkalische technologie zonder dat dit leidt tot veel hogere kosten. Op termijn moet dit leiden tot alkalische water elektrolyse die competitief is met het belangrijkste grijze alternatief, namelijk stoomreforming.

De concrete doelen van dit onderzoek waren:

- 1) Het in kaart brengen van de flexibiliteit van de huidige alkalische water elektrolyse technologie.
- 2) Het vinden van de achterliggende technische oorzaken die de flexibiliteit van een alkalische water elektrolyse technologie bepalen.

¹ T. Smolinka et al., Studie IndWEDe, Industrialisering der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme, NOW-studie, 2018

² IRENA, Hydrogen from renewable power, technology outlook for the energy transition 2018

- 3) Het komen met voorstellen tot concrete technische verbetermogelijkheden ten opzichte van de huidige technologie.
- 4) Verificatie van deze technische oorzaken en het testen van verbetermogelijkheden middels experimenten in een laboratoriumopstelling.

3. Flexibiliteit van huidige alkalische waterelektrolyse

In het kader van dit project is uitgebreid met leveranciers gesproken over hun technologie en flexibiliteit in het bijzonder. De belangrijkste conclusies zijn:

- De klassieke atmosferische technologie zoals aangeboden door het Noorse bedrijf NEL heeft een geclaimde flexibiliteit van ongeveer 10%/min en een minimale last van 15%.
- Aanbieders van klassieke druktechnologie (met name Chinese partijen) hebben zich pas beperkt verdiept in flexibiliteit en daarom zijn betrouwbare flexibiliteitsgetallen voor deze technologie nog niet beschikbaar.
- Aanbieders van nieuwe atmosferische en druktechnologie, welke wordt bedreven op hoge stroomdichtheid, claimen dat ze in staat zijn om vanuit een hot start volledig te kunnen opschakelen naar vollast binnen 30 seconden.

Geen van de aanbieders heeft data overlegd die de door hen geclaimde flexibiliteit bevestigt. Dit heeft met name te maken met het feit dat geen van de aanbieders al fabrieken heeft geleverd die echt flexibel worden bedreven. Er zijn wel fabrieken die opereren met uit-aan (met name dag-nacht), maar dit vergt geen snelle flexibiliteit.

4. Analyse van huidige flexibiliteitslimiteringen

Op basis van de gesprekken met leveranciers en literatuuronderzoek zijn er vier belangrijke flexibiliteitslimiteringen geïdentificeerd, welke nu achtereenvolgens zullen worden besproken:

1. Gelijkrichters
2. Gaszuiverheid
3. Warmtemanagement
4. Gas-vloeistof stromingen

Een presentatie over dit onderwerp is te vinden in Appendix 3.

4.1. Gelijkrichters

Transformatoren en gelijkrichters zijn nodig om hoge voltage wisselspanning (HVAC) om te zetten in de lage voltage gelijkspanning (LVDC) benodigd voor elektrolyzers. Transformatoren verlagen het spanningsniveau, terwijl gelijkrichters wisselspanning omzetten in gelijkspanning. Gelijkrichters werken niet perfect, wat betekent dat er altijd wat kleine schommelingen in de spanning blijven, zogenaamde harmonische trillingen. Deze harmonische trillingen leiden tot energieverlies en “vervuilen” het elektriciteitsnet. Het flexibel bedrijven van elektrolyzers leidt tot meer harmonische trillingen, waarbij geldt dat hoe lager de last, hoe groter de harmonische trillingen. De harmonische trillingen kunnen worden verminderd door gebruik te maken van betere gelijkrichters en harmonische filters. Deze apparaten zijn echter wel duurder.

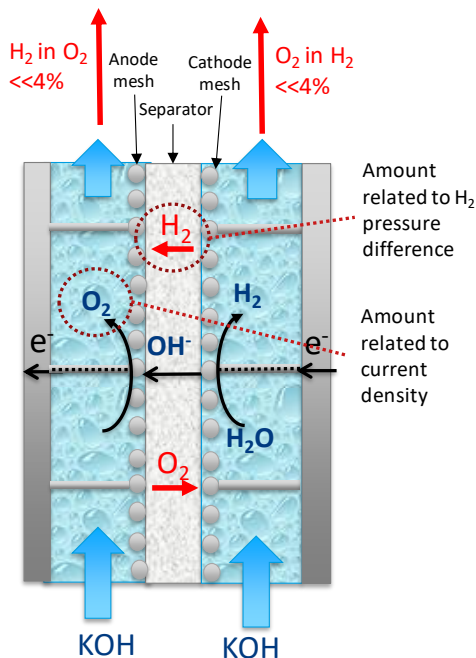
Alkalische elektrolyzers werden traditioneel gemaakt voor operatie op vollast op basis van waterkracht en hier zijn de meegeleverde transformatoren en gelijkrichters dan ook standaard voor ontworpen. Hierdoor zijn ze niet geschikt voor flexibele operatie. Dit kan echter relatief makkelijk worden opgelost door gebruik te maken van betere gelijkrichters en harmonische filters.

De hogere kosten van de gelijkrichters en de harmonische filters zijn echter wel een probleem voor de lange termijn competitiviteit van waterelektrolyse in het algemeen. Het elektrische systeem vertegenwoordigt namelijk een groot gedeelte van de investeringskosten van de fabriek (20%). Er is daarom een sterke behoefte aan innovaties op dit gebied om de kosten te reduceren. Interessante

recente ontwikkelingen zijn o.a. het vervangen van thyristor gebaseerde gelijkrichters door meer ontwikkelde alternatieven.³ Verder onderzoek hiernaar valt echter buiten de scope van het Alkaliflex project.

4.2. Gaszuiverheid

Gaszuiverheid is een belangrijke limitering voor de minimale last van de elektrolyzer, wat de laagste spanning is waarop de elektrolyzer kan draaien. Onder deze last moet de elektrolyzer worden uitgeschakeld en worden gespoeld met stikstof. De gaszuiverheid is een gevolg van het "lekker" van zuurstof en waterstof naar de "andere kant", zoals schematisch weergegeven in Figuur 2. Met name de hoeveelheid waterstof in zuurstof (HTO) is van belang, omdat deze altijd hoger is dan de hoeveelheid zuurstof in waterstof (OTH) door de hogere mobiliteit van waterstof en de lagere zuurstofproductie. De explosiegrens voor HTO ligt bij 4% H₂ in O₂. Voor de veiligheid is de grens bij elektrolyse op 2% gezet.



Figuur 2: schematische weergave van processen die gaszuiverheid beïnvloeden in alkalische water elektrolyse

De gaszuiverheid is afhankelijk van een vijftal factoren:

1. de stroomdichtheid: een lagere stroomdichtheid betekent minder gasproductie, waardoor er relatief meer "lekgas" (wat onafhankelijk is van de stroomdichtheid) in de uitgaande stroom terecht komt.
2. de druk: een hogere druk zorgt voor meer drijvende kracht voor gasdiffusie door het membraan.
3. de kwaliteit van het membraan: dichtere en dikkere membranen laten minder gas door dan dunne en open membranen.
4. drukschommelingen tussen anoliet en katholiet: deze kunnen leiden tot convectie van het elektrolyt door het membraan en met het elektrolyt wordt ook opgelost gas meegenomen.
5. Temperatuur: hogere temperatuur leidt tot hogere diffusie coëfficiënten en dus lagere gaszuiverheid.

Traditioneel werd voor alkalische water elektrolyse asbest gebruikt als membraan. Toen dit in de jaren negentig werd verboden is het vervangen door relatief open PPS (polyphenylenesulphone) membranen. Deze membranen zorgen voor voldoende gaszuiverheid bij vollastoperatie, maar zijn minder geschikt

³ J. Koponen et al., "Effect of converter topology on the specific energy consumption of alkaline water electrolyzers" IEEE transactions on power electronics, 2019, vol. 34, no. 7, 6171-6182

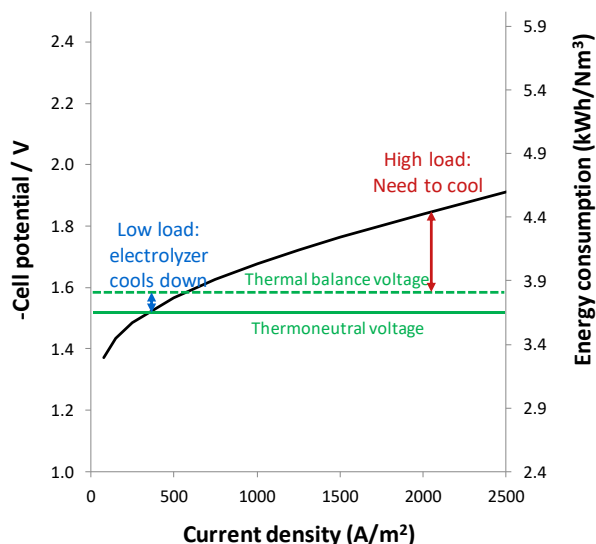
voor deellastoperatie. Met name voor drukelektrolyse betekent dit dat het waarschijnlijk niet mogelijk is om elektrolyzers met deze membranen onder de 50% last te opereren (al ontbreekt op dit gebied een referentie).

Gelukkig is er in de afgelopen 20 jaar een meer gesloten membraan ontwikkeld dat deellastoperatie van alkalische elektrolyse wel mogelijk maakt. Dit zogenaamde Zirfon membraan⁴ (dikte 0.5 mm) bestaat uit een combinatie van PPS en zirconiumoxide en heeft veel kleinere poriën (<1 µm) dan een traditioneel PPS membraan (~100 µm). Volgens de leverancier van het Zirfon membraan is het mogelijk om op lage last (10%) een HTO van onder de 1% te bereiken.

Alhoewel gaszuiverheid dus in principe ook geen (grote) barrière meer is voor flexibiliteit spelen ook hier belangrijke afwegingen, die relateren aan de totale kosten van de waterelektrolysefabriek. Om de kosten beperkt te houden willen we namelijk opereren bij een hoge stroomdichtheid en een hoge efficiency. Om dit te bereiken is een dunner membraan aantrekkelijk, maar dit gaat wel ten koste van de gaszuiverheid. Voor de uiteindelijke ideale water elektrolyse fabriek moet hier dus een zorgvuldige afweging in worden gemaakt. Een recente analyse⁵ suggereert dat het membraan nog wel wat dunner gemaakt kan worden dan de huidige dikte van 0.5 mm. De leverancier van het Zirfon membraan is ook van plan in de komende jaren dunnere membranen op de markt te brengen.

4.3. Warmtemanagement

De hoeveelheid warmte die een elektrolyzer genereert hangt sterk af van de last waarop hij wordt geopereerd: op vollast wordt veel warmte gegenereerd, terwijl op laaglast de elektrolyzer juist warmte nodig heeft (zie Figuur 3). Het flexibel opereren van de elektrolyzer vergt daarom een goed warmtemanagement.



Figuur 3: typische stroom-spanningscurve voor alkaline water elektrolyse. Wanneer de celpotentialaal boven de thermal balance voltage komt genereert de elektrolyse warmte. Onder de thermal balance voltage neemt de elektrolyse warmte op.

Traditioneel worden alkalische elektrolyzers bedreven met een constante elektroliettoevoer en wordt het warmtemanagement geregeld door de koelwatertoevoer aan te passen op basis van de temperatuur uit de elektrolyzer. Dit systeem werkt goed bij operatie op vollast, maar bij flexibele operatie leidt het tot schommelingen in de temperatuur van de elektrolyse. Bij lage last daalt de temperatuur van de

⁴ Vermeiren et al., Evaluation of the Zirfon separator for use in alkaline water electrolysis and NiH₂ batteries, Int. J. Hydrogen Energy, 1998, Vol 23, 321-324

⁵ Schalenbach, M. et al., Acidic or Alkaline? Towards a New Perspective on the Efficiency of Water Electrolysis, 2016, 163, F3197-F3208

elektrolyzer, tenzij er actief wordt verwarmd. Als de elektrolyzer significant afkoelt is het niet meer mogelijk om de elektrolyzer instantaan naar vollast te brengen, omdat dit tot een spanningspiek (als gevolg van de slechtere geleiding bij lage temperatuur) zou leiden. Daarnaast is de efficiëntie van een elektrolyzer slechter bij lage temperatuur dan bij hoge temperatuur. In het Alkaliflex project is uitgebreid onderzoek gedaan naar het warmtemanagement in de elektrolyzer.

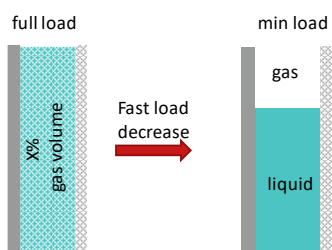
Het warmtemanagement van alkalische elektrolyzers kan flexibeler worden gemaakt door de volgende maatregelen:

1. Flexibele elektrolytietoevoer. Door bij laaglast de elektrolytietoevoer te beperken wordt het warmteverlies naar de omgeving verminderd. Dit is erg belangrijk voor een systeem dat juist warmte nodig heeft. De elektrolytietoevoer kan relatief makkelijk geregeld worden door het te koppelen aan de stroomdichtheid.
2. Een elektrolytverwarmer. Door bij laaglast het elektrolyt te verwarmen kan de temperatuur van de elektrolyzer constant worden gehouden. De elektrolytverwarmer kan worden geregeld op basis van dezelfde temperatuurmeting als de koelwatertoevoer (logischerwijs gaat de verwarmer pas aan als de koelwaterflow uit gaat).

4.4. Gas-vloeistof stromingen

De meest complexe flexibiliteitslimitering in alkalische waterelektrolyse is gerelateerd aan gas-vloeistof stromen en hier is dan ook het meeste onderzoek naar gedaan in het Alkaliflex project. Het gas-volume in de elektrolyzer hangt sterk af van de stroomdichtheid. Bij lage stroomdichtheid is het gasvolume laag en bij hoge stroomdichtheid is het gasvolume hoog. Flexibele operatie kan leiden tot de volgende effecten:

- Bij verlaging van de last kan een gedeelte van de elektrolyzer “droogvallen” (zie Figuur 4). Als gevolg hiervan kan er geen stroom meer lopen in het bovenste gedeelte van de cel en wordt de stroom (te) hoog in het onderste gedeelte van de cel. Dit kan tot beschadigingen leiden aan bijvoorbeeld de elektrodes.
- Bij verhoging van de last wordt er door de extra gasgeneratie veel vloeistof de cel “uitgedrukt”. Dit kan leiden tot lokale drukopbouw en kan in het ergste geval leiden tot lekken. Een ander effect in de cel is dat er doordat er meer waterstof dan zuurstof wordt gevormd een overdruk aan de waterstofkant kan ontstaan die leidt tot transport van elektrolyt met waterstof door het membraan leidend tot een slechtere gaszuiverheid. Een effect buiten de elektrolyzer is dat er veel extra vloeistof naar de gas-vloeistofscheiders gaat. Deze gas-vloeistofscheiders kennen een complexe regeling op basis van verschil in vloeistofhoogte om drukverschillen tussen anoliet en katholiet te minimaliseren. Een plotselinge toevoer van extra vloeistof kan deze regeling verstoren.



Figuur 4: “Droogvallen” van de elektrolyzer als gevolg van verlaging van last

De genoemde effecten zijn met name van belang voor atmosferische elektrolyse, waar gasfracties hoger zijn dan bij drukelektrolyse. Bij drukelektrolyse zijn de effecten veel kleiner en hoogstwaarschijnlijk niet limiterend voor de flexibiliteit.

Om bovengenoemde effecten te kunnen kwantificeren is een goed begrip van het gas-vloeistofgedrag in en buiten de elektrolyzer nodig, bijvoorbeeld om de gasfractie te kunnen bepalen als functie van de stroomdichtheid en om te kunnen bepalen hoe snel coalescentie van bellen leidt tot de vorming van een aparte gasfase zoals weergegeven in Figuur 4. Binnen het Alkaliflexproject is hier uitgebreid naar gekeken met behulp van Computational Fluid Dynamics (CFD) en de resultaten zijn te vinden in Appendix 4. Hierbij moet worden opgemerkt dat de huidige CFD modellen nog moeite hebben om gas-vloeistofstromingen onder elektrolysecondities (30% KOH, 90 °C, gasfracties tot 40%) goed te kunnen beschrijven en dat een verder ontwikkeling van deze modellen noodzakelijk is.

Een beter begrip van gas-vloeistof gedrag in elektrolyzers biedt ook een kans om efficiëntere elektrolyzers te ontwikkelen. Gasbellen dragen namelijk bij aan de ohmse weerstand in elektrolyzers, die voor een belangrijk deel de efficiëntie van de elektrolyzers bepaalt. Een beter begrip over het gedrag kan bellen kan gebruikt worden voor de ontwikkeling van betere elektrodestructuren. Dit is het doel van het vervolproject van Alkaliflex, genaamd Alkaliboost.

5. Kostprijsreductie van waterstof door flexibele operatie

Nouryon heeft voor dit project een flexibiliteitsmodel ontwikkeld voor de operatie van water elektrolyse op basis van historische data. Dit model beschrijft dat door flexibele operatie nu met name op de balanceringsmarkt significante inkomsten kunnen worden verkregen, die kunnen oplopen tot 0.5 Euro/kg H₂. Hierbij moet worden opgemerkt dat de balanceringsmarkt een relatief kleine markt is (~300 MW gecontracteerd), waardoor deze markt minder interessant wordt wanneer elektrolyse verder zal worden opgeschaald. Ook zal het belang van deze markt afnemen door de verdere uitrol van batterijsystemen.

Voor de langere termijn betekent dit dat de focus voor flexibiliteit zal verschuiven naar de “day ahead markt”, die werkt op uurbasis. De verwachting is dat de prijsfluctuaties op deze markt toe zullen nemen als gevolg van het toenemende aanbod van wind- en zonne-energie, waardoor flexibele operatie interessant blijft. Het is nu lastig in te schatten wat de opbrengsten precies zullen zijn. Het feit dat deze markt op uurbasis opereert betekent dat de elektrolyzer minder flexibel hoeft te zijn dan voor de balanceringsmarkt. Een flexibiliteit in de orde van 10%/minuut lijkt dan voldoende. Alle alkaline elektrolyzers lijken hier makkelijk aan te kunnen voldoen.

Waar de hele snelle flexibiliteit waarschijnlijk dus minder belangrijk zal worden, geldt dat niet voor de minimale last en de opstarttijd vanuit een koude start. Streven zal blijven om de minimale last zo klein mogelijk te houden om zo min mogelijk elektriciteit te hoeven gebruiken in de “dure uren”. Voor de koude start geldt dat het doel moet zijn om deze zo kort mogelijk te maken. Nu duurt het nog vaak uren om een elektrolyzer op te starten. Voor de minimale last spelen de gelijkrichters, gaszuiverheid en warmtemanagement een belangrijke rol. Het gas-vloeistof gedrag is daarvoor minder belangrijk.

In het toekomstige elektriciteitsstelsel zal steeds een afweging moeten worden gemaakt of een elektrolyzer op minimale last of uit wordt gezet. Deze afweging zal gemaakt worden op basis van de verwachte duur van de lage/geen last periode en de eigenschappen van de minimale last en de koude start. Hierbij moet ook worden meegenomen dat het vaak aan en uitzetten van elektrolyzers ten koste kan gaan van de verwachte levensduur.

6. Design-ideeën voor betere elektrolyzers

Op basis van flexibiliteitsbeperkingen beschreven in Hoofdstuk 4 kunnen nu al de volgende aanbevelingen gedaan worden voor het flexibeler maken van alkalische elektrolyse-systemen:

- Het gebruik van verbeterde gelijkrichtersystemen
- Het gebruik van meer gesloten membranen
- Het gebruik van variabele elektroliettoevoer
- Het gebruik van een elektrolietverwarmer

Hierbij moet worden opgemerkt dat deze opties kunnen leiden tot extra kosten en de afweging moet worden gemaakt of deze extra kosten opwegen tegen de extra inkomsten die gegenereerd kunnen worden uit flexibiliteit. Dit kan sterk verschillen per project en deze afweging zal dan ook per project gemaakt moeten worden.

Een belangrijke boodschap uit dit werk is dat er in principe geen onoverkomelijke flexibiliteitslimiteringen zijn die alkalische waterelektrolyse ongeschikt maken voor gebruik in een elektriciteitssysteem met veel hernieuwbare elektriciteit.

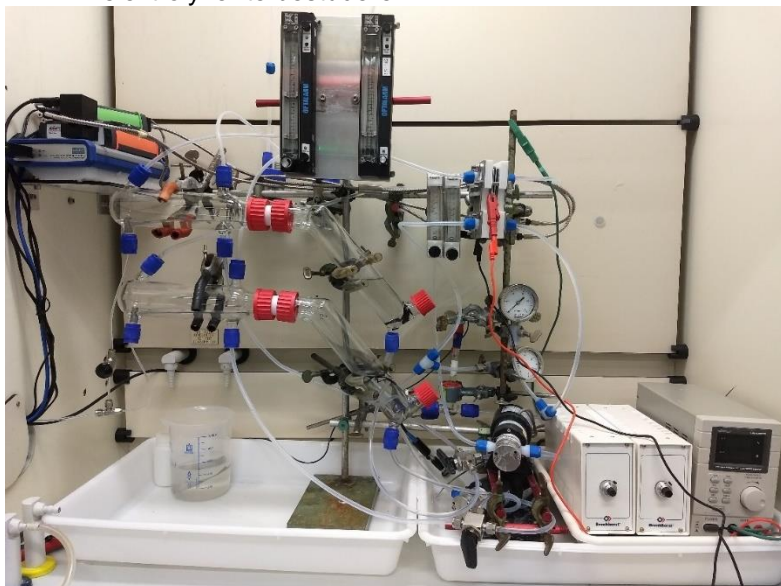
Zoals beschreven in Hoofdstuk 4.4 biedt kennis over gas-vloeistof gedrag in elektrolyzers ook kansen voor het ontwerp van efficiëntere elektrolyzers, doordat het potentieel mogelijk is om ohmse weerstand te verlagen. Op dit moment zijn de CFD modellen nog onvoldoende in staat om ons al te helpen met het vinden van een beter design, waardoor dit werk nu nog empirisch is. Pas in het vervolgproject Alkaliboost verwachten we concrete aanbevelingen te kunnen doen op basis van modellen.

7. Experimentele validatie van betere elektrolyzers

7.1. Ontwikkeling van testfaciliteiten en testcellen

Alhoewel we nu nog geen concrete verbeteringen kunnen doen voor betere celontwerpen op basis van CFD heeft het Alkaliflex project al wel een aantal stappen gezet om een experimentele validatie van nieuwe celontwerpen mogelijk te maken:

1. **Het maken van een atmosferische laboratoriumopstelling om nieuwe celontwerpen te testen.** Deze opstelling, welke is weergegeven in Figuur 5, maakt het mogelijk om de stroomspanningscurve voor nieuwe celontwerpen te testen bij atmosferische condities en lage temperatuur. Ook is het met deze opstelling mogelijk om het gas-vloeistof gedrag rondom de elektrolyzer te bestuderen.



Figuur 5: laboratoriumopstelling voor het uitvoeren van alkalische elektrolyse bij atmosferische druk en lage temperatuur

2. **Het maken van nieuwe celontwerpen middels 3D-print technieken.** Figuur 6 toont een foto van een alkalische water elektrolyzer die gemaakt is met behulp van 3D-printtechnieken. De ontwikkeling van deze elektrolyzer is belangrijk, omdat er geen commerciële laboratoriumelektrolyzers beschikbaar zijn die gebruikt kunnen worden voor onderzoek naar nieuwe celontwerpen.

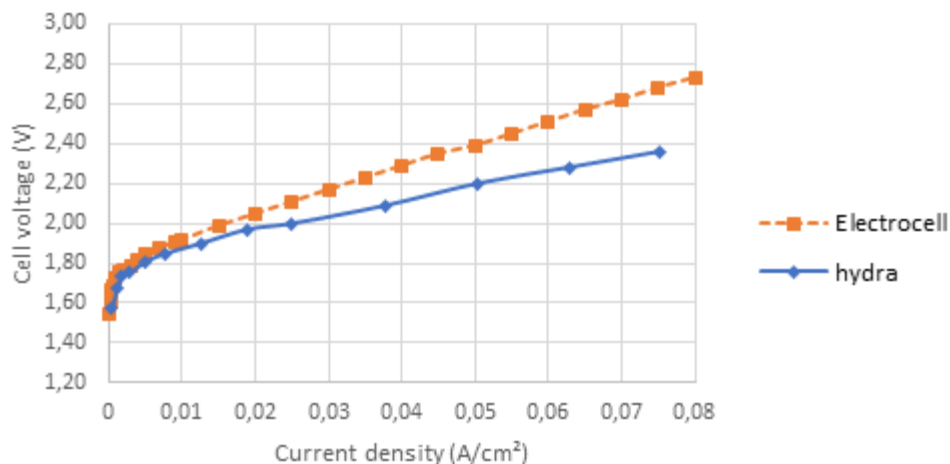


Figuur 6: Alkalische water elektrolyse cel gemaakt middels 3D printen

- Hoge druk en temperatuuropstelling voor alkalische elektrolyse.** Om echt te kunnen bepalen of nieuwe elektrolyzers beter zijn dan de huidige ontwerpen is het nodig om te meten bij hoge temperaturen (tot 90 °C) en hoge druk (tot 50 bara), omdat dan de ohmse weerstand minder is en gasbellen voor minder extra weerstand zorgen. Het bouwen van een hoge drukopstelling is echter een tijdrovende en dure bezigheid en kon niet worden voltooid binnen de projectduur van Alkaliflex. Wel is er al met de bouw begonnen en volgens planning zal de opstelling in het najaar van 2020 operationeel zijn.

7.2. Eerste resultaten

Figuur 8 laat de stroom-spanningscurves zien voor de Hydra-elektrolyzer en een commercieel verkrijgbare Electrocell-elektrolyzer. De Hydra-elektrolyzer is het eerste prototype voor alkalische waterelektrolyse gemaakt met behulp van 3D-printtechnieken. De figuur laat duidelijk zien dat dit prototype het al significant beter doet dan de commercieel verkrijgbare Electrocell. De reden hiervoor is dat de Hydra-elektrolyzer een zero gap configuratie heeft, terwijl dit niet het geval is voor de Electrocell. Er zijn op dit moment geen commercieel verkrijgbare laboratorium-elektrolyzers met een zero-gap configuratie.



Figuur 8: Stroom-spanningscurves voor de Hydra en Electrocell elektrolyzers bij atmosferische druk, 1 M KOH en kamertemperatuur. De Hydra cel is een zero-gap configuratie gemaakt met behulp van 3D-printen.

Alhoewel de Hydra-elektrolyzer het al beter doet dan de Electrocell, is de stroom-spannings curve nog niet bepaald indrukwekkend: de celpotentialen zijn al erg hoog bij lage stroomdichtheden. Dit is te verklaren door het feit dat de temperatuur laag is, 1 M KOH gebruikt wordt als elektrolyet (dit geleidt veel slechter dan 25-30% KOH) en de elektroden nog niet geactiveerd zijn, waardoor ze een hoge overpotentiaal hebben. Verder is het pas het eerste prototype, waardoor en nog veel ruimte is voor verbetering. In het vervolproject Alkaliboost verwachten we dan ook veel betere prestaties te gaan behalen.

8. Vervolgstappen

Het Alkaliflex project kan gezien worden als een verkennend project wat vele mogelijkheden geeft voor vervolgonderzoek.

Zoals eerder aangegeven lijken er geen onoverkomelijke flexibiliteitslimiteringen te zijn in alkalische elektrolyse en het project biedt duidelijke handvaten voor de verder flexibilisering van alkalische elektrolyzers. Aangezien de flexibiliteitsbehoefte projectafhankelijk is en er kosten geassocieerd zijn met het flexibel maken van elektrolyzers zal per project worden bekeken wat de beste technische oplossing is. Dit doet Nouryon in nauw overleg met de leveranciers van haar elektrolyzers.

Het onderzoek laat ook zien dat er kansen lijken te liggen voor efficiëntere elektrolyzer-ontwerpen. Er is daarom al een vervolproject gestart wat zich daar op richt. Dit project heet Alkaliboost en in dit project zullen nieuwe celontwerpen en elektrodestructuren worden getest bij realistische elektrolysecondities (90 °C, tot 50 bar). Ook is er duidelijk behoefte aan meer begrip over het gas-vloeistof gedrag in elektrolyzers. Dit zal niet alleen worden onderzocht in het Alkaliboost project, maar ook in het meer fundamentele project Bubblelectric. In beide projecten zal zowel experimenteel onderzoek als ook onderzoek middels modellen plaatsvinden.

De hoop is dat deze onderzoekstrajecten zullen leiden tot elektrolyzer-ontwerpen die efficiënter zijn dan de huidige state-of-the-art elektrolyzers. Als dit inderdaad het geval is, biedt dit kansen voor het realiseren van een mogelijke start-up op dit gebied, aangezien het onwaarschijnlijk is dat bestaande elektrolysepartijen snel genegen zullen zijn hun ontwerp aan te passen.

9. Appendices

9.1. Appendix 1: presentations on “Materials for alkaline electrolysis”



Appendix 2_Materials
for intensified alkaline

9.2. Appendix 2: presentation on “Intensification of alkaline electrolysis”



Appendix
3_Intensification of alk

9.3. Appendix 3: presentation on “Making alkaline electrolysis more flexible”



Appendix 5_making
alkaline electrolyzers 1

9.4. Appendix 4: CFD of the pressure distribution of a NEL electrolyzer during start-up



Appendix 8_CFD of
pressure distribution i

Alkaliflex

Nouryon