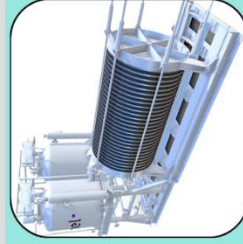
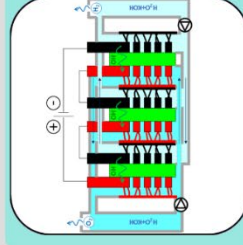


Green Hydrogen

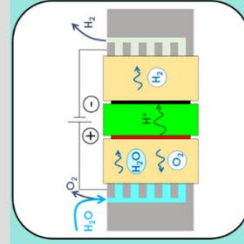
Green hydrogen is generated by splitting water molecules into hydrogen and oxygen through an electrolysis process powered by renewable electricity. Green hydrogen can propel vehicles (cars, trucks, trains, ships) with fuel cells or internal combustion engines, largely reducing their environmental impact compared to propulsion based on fossil fuels. It can also be used as a key resource for production of green ammonia (fertiliser) or green methanol (chemical industry or vehicle fuelling).



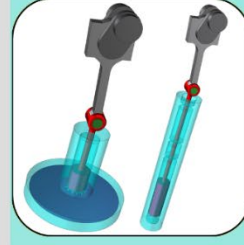
Water electrolysis
General
Seawater



Alkaline electrolysis
Technology
Part Load and Intermittence
Life Cycle Analysis



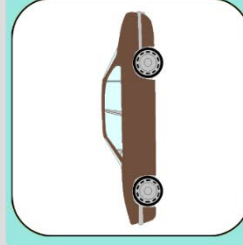
PEM electrolysis
Technology
Life Cycle Analysis



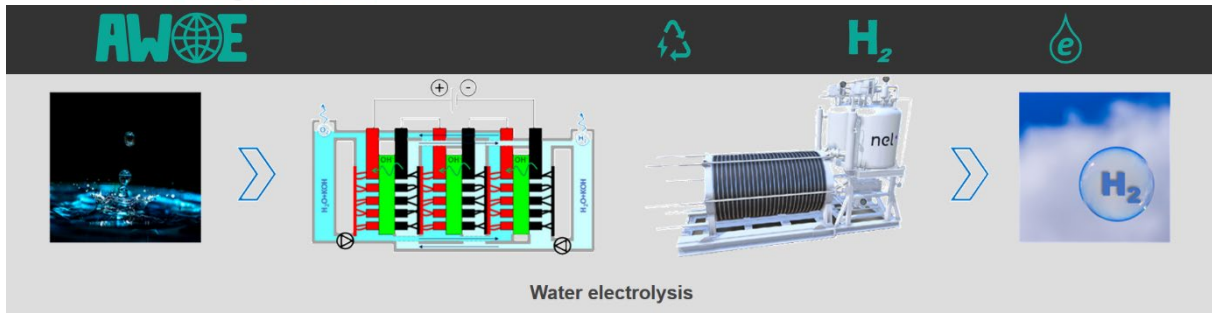
Compression
General
Life Cycle Analysis



Storage
General
Life Cycle Analysis
Underground



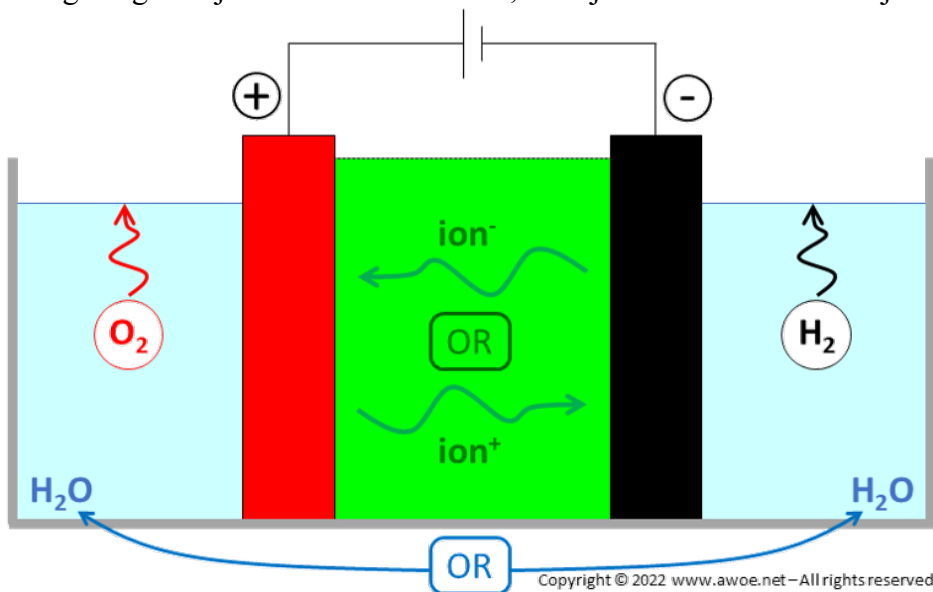
In-vehicle Usage
General
Life Cycle Analysis
Refuelling



Waterelektrolyse

Waterelektrolyse is het splitsen van watermolecuul H_2O in gasvormig waterstof H_2 en gasvormige zuurstof O_2 met behulp van een gelijkstroom (DC). Het doel is om relatief zeldzame maar energiedichte waterstof H_2 te maken uit overvloedig water H_2O , waarbij zuivere zuurstof over het algemeen een bijproduct is.

Het watermolecuul wordt ontleed in een paar ionen op één elektrode, de aard van de ontbinding is afhankelijk van het type elektrolyser. Het ene type ion reageert op de watersplitsende elektrode, terwijl het andere type met behulp van het elektrische veld door een elektrolyt naar de tweede elektrode wordt getransporteerd. Bij de kathode wordt waterstof H_2 geproduceerd en elektronen e^- geleverd door een externe bron worden verbruikt. Aan de anode worden zuurstof O_2 en elektronen e^- geproduceerd. Tijdens bedrijf stroomt er continu een gelijkstroom, maar met verschillende ladingsdragers in en uit de elektrolytische cel: de ladingsdragers zijn elektronen uit de cel, terwijl het ionen in de cel zijn.

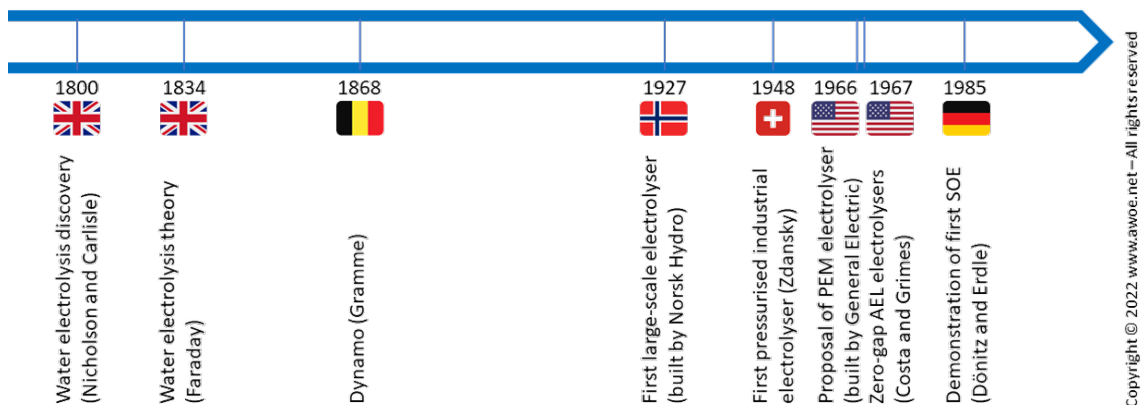


Schema's van waterelektrolyse

Naast de ionentransportfunctie fungeert de elektrolyt ook als een elektrische isolatie tussen elektroden en als een gasafscheider om te voorkomen dat zich mengt tussen H_2 en O_2 net na watersplitsing. De multifunctionele aard van de elektrolyt verklaart waarom slechts enkele materialen geschikt zijn.

Technologische evolutie

Watelektrolyse is geen recente ontdekking, maar nog steeds een domein met actieve technologische ontwikkeling. Het is historisch gezien de eerste bekende methode om zuivere waterstof te produceren, maar is tegenwoordig geen mainstream-technologie omdat H₂-productie uit fossiele brandstoffen goedkoper is. Toch zullen milieuzorgen en de groeiende beschikbaarheid van hernieuwbare elektriciteit in de nabije toekomst waarschijnlijk het aandeel van watelektrolyse in het waterstofproductielandschap vergroten.



Tijdlijn van de ontwikkeling van watelektrolyse

Watelektrolyse werd ontdekt in de vroege dagen van de negentiende eeuw en al in 1834 begrepen. Met de uitvinding van Gramme's dynamo in 1868 kon zuivere waterstof gemakkelijk op laboratoriumschaal worden geproduceerd. In de loop van de twintigste eeuw evolueerde elektrolyser naar grootschalige industriële eenheden (1927) met toenemende productiviteit (1948, 1967). Alternatieven voor de traditionele alkalische elektrolysers kwamen beschikbaar met de vooruitgang in materialen voor separatoren met als doel de compactheid (PEM, 1966) en efficiëntie (SOE, 1985) te verbeteren.

Er zijn 3 hoofdtypen elektrolysers:

- Lage temperatuur elektrolysers met een vloeibaar elektrolyt: [Alkalische elektrolysers](#) (AEL)
- Lage temperatuur elektrolysers met een vaste elektrolyt: Polymeer elektrolyt membraan elektrolysers (PEM)
- Hoge temperatuur elektrolysers met een vaste elektrolyt: Solid Oxide elektrolysers (SOE)

Merk op dat de laatste 2 typen theoretisch omkeerbare installaties zijn die kunnen worden gebruikt als elektrolyser (H₂ maken van elektriciteit) of brandstofcel (elektriciteit maken van H₂).

Omdat het het oorspronkelijke concept is dat is ontwikkeld uit meer dan 2 eeuwen, is alkalische watelektrolyse de meest ontwikkelde, volwassen en commercieel beschikbare technologie sinds decennia. Deze elektrolysers zijn betrouwbaar, veilig en vormen wereldwijd de go-to elektrolysetechnologie op commercieel niveau. Hun belangrijkste nadeel is gewicht en grootte in vergelijking met de andere typen voor dezelfde H₂-uitgang.

Polymeerelektrolytmembraanelektrolyzers zijn in de handel verkrijgbaar, veel compacter dan alkalische elektrolyzers en beter geschikt voor intermitterend en deellastgebruik. Toch zijn ze vandaag de dag nog steeds duurder en hebben ze een kortere levensduur. Naast compactheid zouden solid oxide elektrolyzers (SOE) ook voordelen in efficiëntie moeten opleveren, maar bevinden zich nog in een ontwikkelingsfase.

Huidige dichtheid

Volgens het concept is de hoeveelheid geproduceerde waterstof afhankelijk van de elektronenstroom door het elektrische circuit tussen de elektroden. Dienovereenkomstig is de hoeveelheid geproduceerd H₂ direct gerelateerd aan de stroomdichtheid (stroom per elektrodegebied, in A / cm²) bij het vergelijken van systemen van dezelfde grootte.

Een hogere stroomdichtheid is voordelig om met een gegeven elektrolyser meer waterstof te produceren. Maar omdat het in een elektrisch circuit is geïntegreerd, betekent een hogere stroomdichtheid ook een hogere spanning vanwege de circuitweerstand, vandaar een elektrisch verbruik dat sneller groeit dan de waterstofproductie ($P = V \cdot I = R \cdot I^2$).

Er is een economische afweging tussen de grootte van de elektrolyser en het elektriciteitsverbruik om de kosten van H₂-productie te minimaliseren:

- Een grotere elektrolyser met lage stroom heeft een grote initiële investering (CAPEX) maar lage bedrijfskosten (OPEX)
- Een kleinere elektrolyser met hoge stroomsterkte vereist minder initiële investering (CAPEX), maar heeft hoge bedrijfskosten (OPEX)

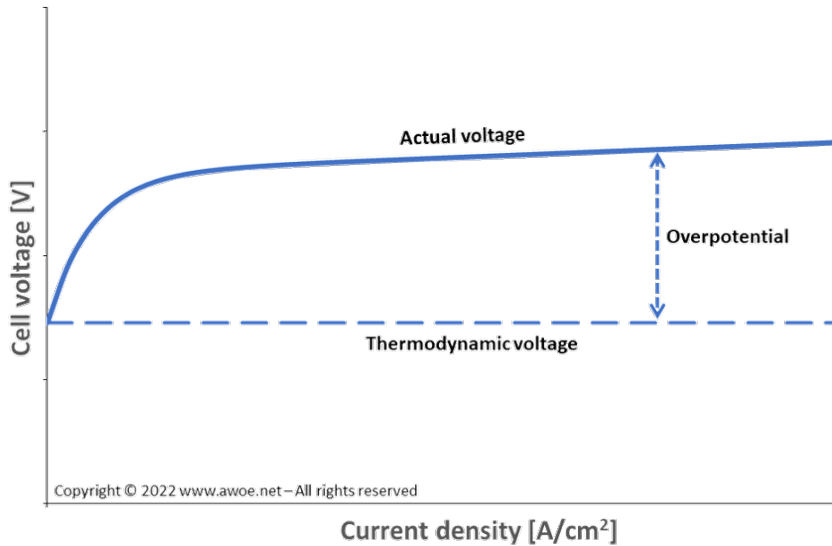
Bedrijfsspanning

De thermodynamische spanning die nodig is om een watermolecuul te splitsen onder omgevingsomstandigheden (1 atm, 298 K) is 1,23 V. Toch is dit de spanning voor een verwaarloosbare stroomdichtheid en dus niet de juiste spanning voor een industriële toepassing.

Bij het stromen van een aanzienlijke stroom verschijnen systeemverliezen die een deel van de elektrische energie in warmte afvoeren. De gevolgen zijn:

- De noodzaak om meer energie te leveren dan thermodynamisch verwacht om de reactie aan te drijven
- Een koelbehoefte voor de elektrolytische cellen van laagtemperatuurelektrolyzers

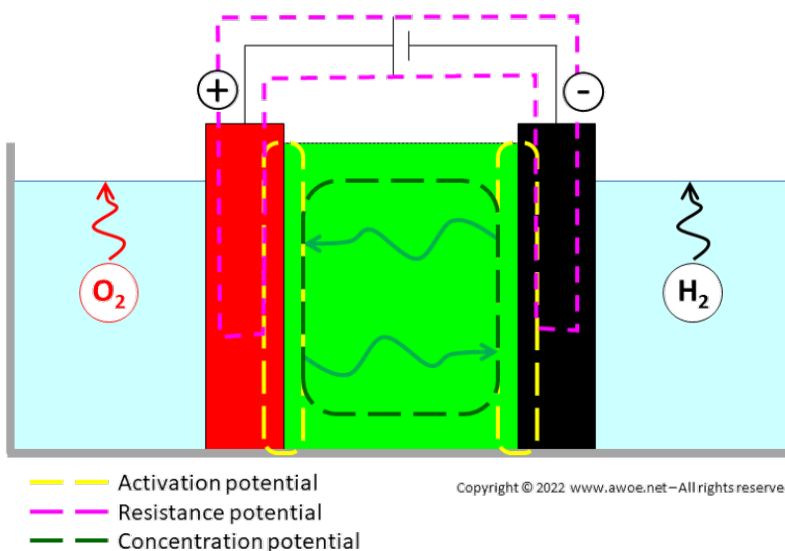
De benodigde extra energie wordt over het algemeen uitgedrukt in termen van overpotentiaal, d.w.z. de extra spanning boven 1,23 V voor de elektrolytische cel om waterstof te produceren. De overpotentiaal hangt zowel af van het celontwerp (grootte, lay-out, materiaalkeuze, ...) als van de bedrijfsomstandigheden (groeit met de huidige dichtheid, varieert met de temperatuur).



Schema's van overpotentiaal in elektrolytische cellen

Er zijn 3 hoofdcategorieën van overpotentie:

- Activeringsoverpotentiaal, gerelateerd aan de elektronenoverdracht tussen de elektrolyt en elke elektrode (sterk afhankelijk van de selectie van elektrode- en elektrolytmaterialen, maar ook van geometrie - poreuze elektroden versus platte / vaste elektroden). Voor waterelektrolyse is de anodische overspanning aanzienlijk groter dan de kathodische omdat de kinetiek van de O₂-reactie veel langzamer is dan die van de H₂-reactie
- Weerstandsoverpotentiaal, gerelateerd aan de elektronenoverdracht tussen elektroden (de klassieke elektrische circuitweerstand)
- Concentratie overpotentiaal, gerelateerd aan de ionenoverdracht binnen de elektrolyt, voornamelijk door concentratie (lagere ionenconcentratie bij de elektroden dan in het grootste deel van de elektrolyt wordt een beperkende factor)



Locatie van overpotentialen in elektrolytische cellen

Activeringsoverpotentiaal heeft over het algemeen een zeer steile afhankelijkheid van de stroomdichtheid bij lage stroom en vlakt vervolgens af, terwijl weerstandsoverpotentiaal meer lineair is. In ieder geval blijft de som van de overpotentialen lager dan de thermodynamische spanning en heeft de totale elektrolysespanningsafhankelijkheid van de stroomdichtheid de algemene vorm die in de bovenstaande schema's wordt weergegeven.

Systeemdruk

Bij atmosferische druk is de totale energie ΔH die nodig is om vloeibaar water te splitsen bijna onafhankelijk van de temperatuur (bereik 0-100 °C). Toch neemt de vereiste elektrolytische celspanning $E_{\text{-cel}}$ af met toenemende temperatuur T omdat $E_{\text{-cel}}$ betrekking heeft op Gibbs-energie ΔG :

$$E_{\text{-cel}} = \Delta G/nF = (\Delta H - T \Delta S)/nF$$

Dienovereenkomstig werken laagtemperatuurelektrolyzers op de hoogst mogelijke temperatuur ondersteund door het zwakste materiaal (meestal 80-90 °C) om het elektriciteitsverbruik te minimaliseren, zowel voor de elektrolyse zelf als voor celkoeling (minder koelvloeistofpompen).

Door het systeem onder druk te zetten, kan het splitsingsbereik van vloeibaar water theoretisch worden uitgebreid tot 230 °C. Toch beperken materiaalbeperkingen momenteel de effectieve bedrijfstemperatuur tot 100-130 °C. Bovendien verhoogt het onder druk zetten de vereiste celspanning iets (toename met ongeveer 0,2V bij het verschuiven van 1 naar 700 bar). Daarom wordt het werken bij boven-atmosferische druk over het algemeen niet gedaan om efficiëntie te winnen op de water elektrolyse stap, maar om de hoeveelheid waterstofcompressie tussen elektrolyse en opslag (meestal bij 350 of 700 bar) te voorkomen of te beperken.

Bij hoge elektrische stroom of hoge bedrijfsdruk treedt enig massatransport over de separator op omdat de gasoplosbaarheid in de elektrolyt niet strikt nul is. Transport van elektrolyt impliceert dan fractioneel transport van gas (H_2 of O_2). De stroom van H_2 en O_2 over de separator is evenredig met hun diffusiecoëfficiënt en vermindert de efficiëntie van het systeem.

Elektrolytische cel versus elektrolyser

Net als een batterij werkt een elektrolyser niet bij de elektrolytische celspanning maar bij veel hogere spanningen van een paar honderd volt. Individuele cellen worden in serie geassembleerd binnen stapels om de gewenste spanning te bereiken. De stacks kunnen vervolgens parallel worden geassembleerd om meer stroom / vermogen te absorberen.

In moderne ontwerpen is een elektrolysecel een galvanische keten van vlakke geometrie met 2 metalen elektroden die face-to-face zijn geplaatst en een dunne elektrolytische laag klemmen. De elektrolytische laag kan ionen zijn die zijn opgelost in een vloeibaar polair oplosmiddel (AEL), een iongeleidend polymeer (PEM) of een zuurstofiongeleidend keramiek (SOE). De stapel wordt gebouwd door elektrolytische cellen te accumuleren en te klemmen om lekkage te voorkomen.

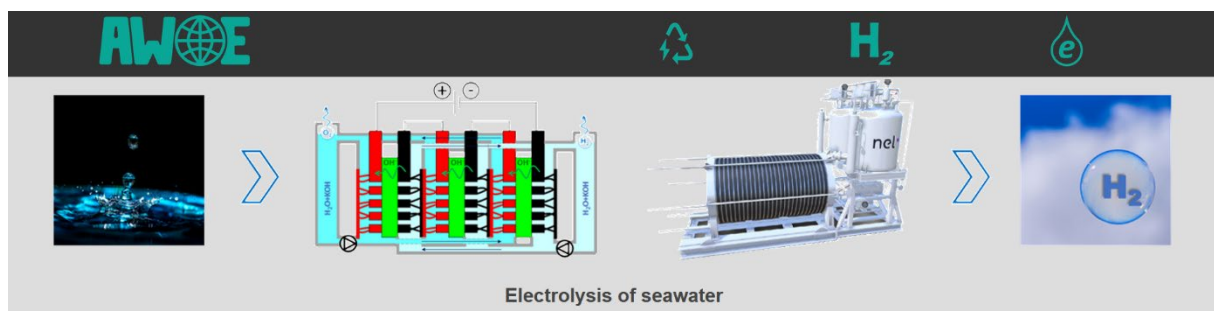
Levensduur

Van elke elektrolyser wordt verwacht dat deze goed werkt over een periode van meerdere jaren, d.w.z. 45.000 uur (~ 5 jaar) of meer.

De oudere ontwerpen van alkalische elektrolyzers toonden een levensduur van meer dan 100.000 uur en tot 15 jaar. Nieuwere systemen die bij hogere druk of temperatuur werken, hebben een hogere productiviteit en/of efficiëntie, maar hebben een levensduur die is teruggebracht tot 50.000 tot 70.000 uur (6-8 jaar bij continu bedrijf).

PEM-elektrolyzers moeten een vergelijkbare levensduur hebben als alkalische elektrolyzers, maar de meeste commerciële producten hebben een levensduur van minder dan 40.000 h (~ 5 jaar continu gebruik). Op dit moment is er nog steeds een gebrek aan gedetailleerd inzicht in het degradatiemechanisme, wat verdere vooruitgang belemmert.

Vaste oxide elektrolyzers hebben momenteel een levensduur van een paar duizend uur met een efficiëntiedegradatie van ongeveer 1% per 100 uur gebruik. Toch leidt vooruitgang in materialen en thermisch beheer tot voortdurende verbeteringen.



Elektrolyse van zeewater

Geschreven door [Vincent Knop](#)

Gepubliceerd op 4 juni 2022

Waterelektrolyse om waterstof te produceren vereist elektriciteit en water als belangrijkste inputs. Omdat bestaande elektrolyzers op gezuiverd water werken, is de meest gebruikelijke aanpak om zoet water te gebruiken dat verder wordt gezuiverd.

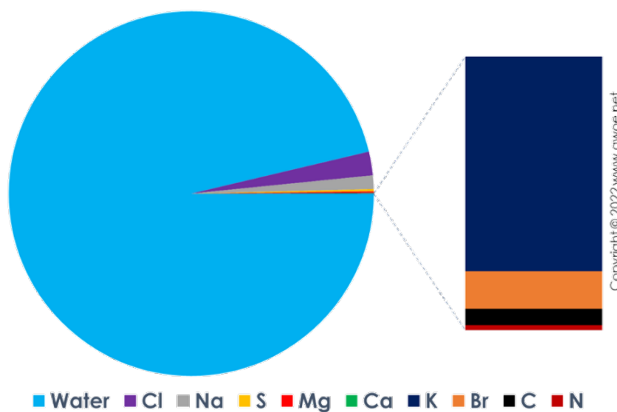
Niet-bevroren zoet water vertegenwoordigt echter minder dan 1% van de wereldwijde watervoorraden en is zeer heterogeen verdeeld over de planeet. Bovendien bevindt een groot deel van het potentieel aan hernieuwbare energie zich offshore, d.w.z. in of net boven zeewater. Daarom is er interesse in het gebruik van zeewater als basisbron voor de productie van groene waterstof.

Vereisten voor watersamenstelling en elektrolyser

Zoet water en zeewater onderscheiden zich door hun gehalte aan opgeloste zouten. Zoet water bevat minder dan 500 ppm opgeloste zouten. Zeewater bevat gemiddeld ongeveer 35.000 ppm opgeloste zouten, met aanzienlijke variaties van plaats tot plaats.

Geen van deze bronnen is direct compatibel met bestaande elektrolyzers die zuiver water vereisen, gedefinieerd als met een gehalte van minder dan 10 ppm opgeloste zouten. Om deze reden bevat elke industriële elektrolyser een zuiveringsfase.

Zeewater heeft een variabele samenstelling, maar een representatieve gemiddelde samenstelling kan worden gedefinieerd als ongeveer 21.000 ppm chloor, 12.000 ppm natrium, 2000 ppm zwavel, 1300 ppm magnesium, 400 ppm calcium en kalium, 70 ppm broom, 30 ppm koolstof en 10 ppm stikstof. Naast deze zouten is er een aanzienlijk gehalte aan micro-organismen en een op vervuiling gebaseerde inhoud zoals plastic deeltjes, sporen van zware metalen, ...



Gemiddelde samenstelling van zeewater

Gezien het grote gehalte aan zouten kan zeewater voor elektrolyse worden gebruikt door de elektrolyzers aan te passen aan zeewater of door zeewater te ontzilten met een vergelijkbaar proces als zoetwaterproductie voor menselijke consumptie.

Aanpassing elektrolyser

Direct gebruik van zeewater zou het bouwen van een elektrolyser vereisen die een groot zoutgehalte als input kan accepteren en een methode bevat om met micro-organismen om te gaan. De zeewaterontziltingsindustrie laat zien dat het absorberen van micro-organismen op de lange termijn vervuiling veroorzaakt, zodat voorfiltering of behandeling met UV-licht een waarschijnlijke vereiste is.

Zouten in zeewater kunnen worden ingedeeld in 3 categorieën:

- Zouten die interageren met de elektrochemische activiteit, voornamelijk chloor en brome
- Zouten die grote hoeveelheden afzettingen creëren, voornamelijk natrium en magnesium
- Anderen die kleine effecten hebben en daarom niet veel aanvullende behandeling nodig hebben

Chloor- en broomzouten concurreren met de zuurstofproductiereactie aan de anode omdat hun elektrochemische reacties rond hetzelfde potentieel werken en hun kinetiek sneller is dan die van het splitsen van watermoleculen. Binnen een zure omgeving (PEM-elektrolysatoren) zijn

de overpotentialen zo vergelijkbaar dat zeer geavanceerde elektrodematerialen nodig zijn om de zuurstofproductiereactie te bevorderen, maar tegenwoordig zijn deze niet duurzaam. Binnen een alkalische omgeving (alkalische elektrolyzers) is het overpotentiaalverschil groter en meer conventionele verbindingen en eenvoudigere productiemethoden zorgen nog steeds voor een goede selectiviteit ten gunste van watersplitsing.

Natrium en magnesium hopen zich op als afzettingen in de elektrolysercellen, vooral in alkalische omgevingen ($\text{pH} > 8,5$), indien niet vooraf gescheiden. De eenvoudigste oplossing is om zeewater voor te behandelen door een alkali in een buffertank toe te voegen om afzetting te bevorderen waar afzettingen kunnen worden verzameld en geëxtraheerd.

Hoewel dergelijke individuele aanpassingen al onafhankelijk zijn aangetoond in laboratoria, bestaat er nog geen industriële elektrolyser die alle aanpassingen combineert.

Voorbehandeling van zeewater

Hoewel de technologie vordert om zeewater direct te kunnen gebruiken in elektrolyzers (realistisch gezien alleen in alkalische elektrolyzers gezien de kosten van specifieke aanpassing voor PEM), zou de economie kunnen duwen in de richting van het gebruik van een tweestapsproces van waterzuivering en elektrolyse van gezuiverd water.

Omgekeerde osmose is een gevestigde technologie om zeewater (35.000 ppm zouten) om te zetten in zoet water (< 500 ppm zouten). Onderzoek heeft al aangetoond dat het een tweede keer stromen van dergelijk zoet water in de omgekeerde osmose-apparatuur gezuiverd water kan opleveren met minder dan 5 ppm zouten, waardoor het compatibel is met de vereisten voor elektrolyzers. Bovendien is het energieverbruik van de tweede zuiveringspas gering.

Gezien het relatief lage waterverbruik van elektrolyzers om elektrische energie om te zetten in chemische energie die is opgeslagen in waterstof, kunnen bestaande omgekeerde osmose-eenheden gemakkelijk aan een dergelijke vraag voldoen. Bovendien is het energieverbruik om het omgekeerde osmoseproces uit te voeren in de orde van een duizendste van het elektrische verbruik van elektrolyse, beide behandelen dezelfde hoeveelheid water.

Dienovereenkomstig heeft een tweestapsproces van zeewaterzuivering en conventionele elektrolyse het voordeel dat het alleen vertrouwt op bestaande technologie en geen enorme investerings- of bedrijfskosten toevoegt.

Demonstrator met zeewatervoorbehandeling

Een wereldprimeur tweestapsinstallatie wordt momenteel ontwikkeld door Vattenfall in Aberdeen, Schotland. Het Hydrogen Turbine 1 (HT1) -project heeft onlangs [£ 9,3 miljoen van de Britse overheid gekregen](#) om een offshore windturbineplatform te updaten om een waterstofproductie-eenheid te hosten, evenals om een onderzeese waterstofpijpleiding en een onshore waterstofopslageenheid te installeren. Het [Screening Opinion Request Report](#) beschrijft het toevoegen van zeven 40ft containers aan een 8,8 MW offshore turbineplatform voor:

- Zeewater pompen (inclusief pompen, filters en buffervat, tot 3,52 m³/h)

- Ontzilting (afstoting van pekel ~50% meer geconcentreerd in zouten dan verpompt water, tot 1,76 m³/h)
- Di-ionisatie (het omzetten van ontzilt water in zuiver water)
- [PEM elektrolyser](#) voor waterstofproductie (tot 0,18 m³/h)
- [Compressor](#) voor waterstof distributie (tot 200 bar)
- Onshore [waterstofopslag](#) en buistrailerrefueller compatibel met productie tot 4 ton waterstof per dag

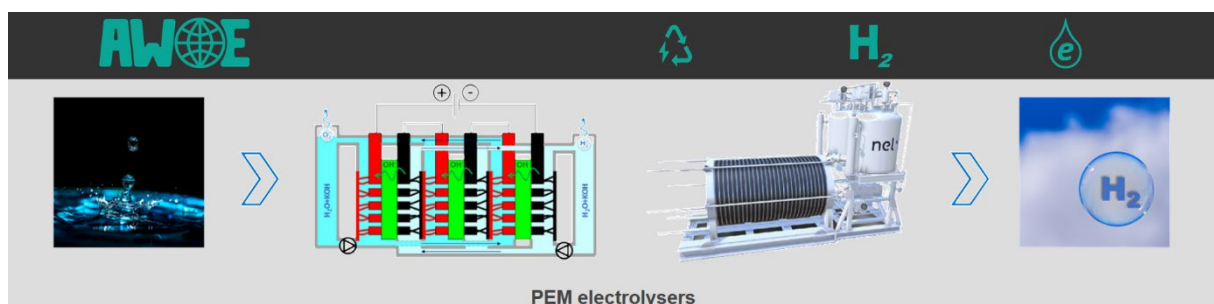
Met een elektrolyser die direct op het windturbineplatform is geïnstalleerd, kan een grote variabiliteit in elektriciteitsoutput worden verwacht, vandaar de keuze voor een PEM-elektrolyser. Naast de haalbaarheidsdemonstratie (operationeel in 2024/2025), is het belangrijkste gepubliceerde doel van het project om de real-life efficiëntie van een dergelijke "eiland"-installatie vast te stellen (geen aansluiting op het net, geen ondersteuning van een andere energiebron).

Vooruitzichten

Conversie van alkalische elektrolyzers naar werken op zeewater lijkt technologisch haalbaar, terwijl een dergelijke conversie uitdagender is voor PEM-elektrolyzers. Offshore- of kustelektrolyse-installaties zouden echter interageren met intrinsiek variabele elektriciteitsbronnen, iets dat zich beter leent voor directe koppeling met PEM-elektrolyzers dan alkalische elektrolyzers.

Als alternatief zou zeewaterelektrolyse eenvoudigweg bestaande technologieën kunnen combineren, namelijk elke ontziltingsmethode en elke elektrolyser zonder veel extra kosten. Inderdaad, de totale kosten zijn de combinatie van bedrijfskosten (voornamelijk elektriciteit hier) en kapitaalkosten, waarbij ontzilting in beide categorieën grotendeels goedkoper is dan elektrolyse.

Groene waterstofproductie uit zeewater op basis van elektriciteit die in het mariene milieu wordt geoogst, is daarom geen onmogelijk technologisch hoogstandje, hoewel het vandaag de dag niet gebruikelijk is omdat de weinige bestaande elektrolyse-installaties zijn geïnstalleerd waar zoet water beschikbaar is. De resultaten van de Vattenfall-demonstrator in Schotland kunnen de perceptie veranderen en een nieuwe weg openen naar een grote waterstofeconomie.



Geschreven door [Vincent Knop](#)

Gepubliceerd op 6 maart 2022

Polymer Electrolyte Membrane (PEM) is een van de water elektrolysetechnologieën om watermoleculen te splitsen in waterstof en zuurstof. De naam komt van het gebruik van een gasdicht vast polymeermembraan als elektrolyt, het ionentransportmateriaal tussen elektroden.

Het PEM-acroniem verwijst soms ook naar Proton Exchange Membrane, een andere nauwkeurige beschrijving van de technologie.

Technologische volwassenheid

De ontwikkeling van PEM-elektrolyzers was het resultaat van onderzoek bij General Electric naar membranen voor brandstofcellen in de jaren 1960. In theorie kan zo'n elektrolyser of brandstofcel in beide modi worden gebruikt: water splitsen in waterstof (elektrolyser) of elektriciteit opwekken uit waterstof (brandstofcel).

Hoewel het een minder volwassen technologie is dan alkalische elektrolyzers, zijn PEM-elektrolyzers in de handel verkrijgbaar. Ze hebben een vergelijkbare efficiëntie als alkalische elektrolyzers, maar een aanzienlijk hogere stroomdichtheid omdat H^+ of mobieler dan OH^- binnen hun respectieve elektrolyten. Hoewel de stroomdichtheid beperkt is tot 0,2-0,4 A / cm² voor alkalische elektrolyser, ligt deze binnen het bereik van 0,6-2,0 A / cm² met PEM-elektrolyser, wat betekent dat een PEM-elektrolyser 5 keer kleiner kan zijn terwijl dezelfde hoeveelheid waterstof wordt geproduceerd.

Naast een hogere stroomdichtheid kunnen PEM-elektrolyzers ook werken bij hogere druk (tot 200 bar) maar nog steeds lage temperatuur (50-80 °C). Een hogere bedrijfsdruk betekent minder energieverbruik voor compressie in een later stadium, waardoor de algehele systeemefficiëntie wordt verbeterd.

PEM-elektrolyzers produceren waterstof met een zuiverheid van 99,99+% zonder dat er extra zuiveringsapparatuur nodig is.

Responsiviteit van elektrolyzers

Het verschil in elektrolyttoestand tussen alkalische en PEM-elektrolyzers impliceert een groot verschil in traagheid van het ionische transport. De vloeibare elektrolyt in alkalische elektrolyzers reageert traag op elke verandering in de voeding. Aan de andere kant reageert protontransport door een Nafion-membraan snel op elke stroomschommeling.

PEM-elektrolyzers zijn daarom relevanter voor directe koppeling met hernieuwbare energiebronnen die inherent variabel van aard zijn. Ter vergelijking: een alkalische elektrolyser zou een opslagapparaat (batterij, gepompte hydro,...) nodig hebben om stroomschommelingen te absorberen, wat een extra bron van verliezen is.

Elektrochemische reacties

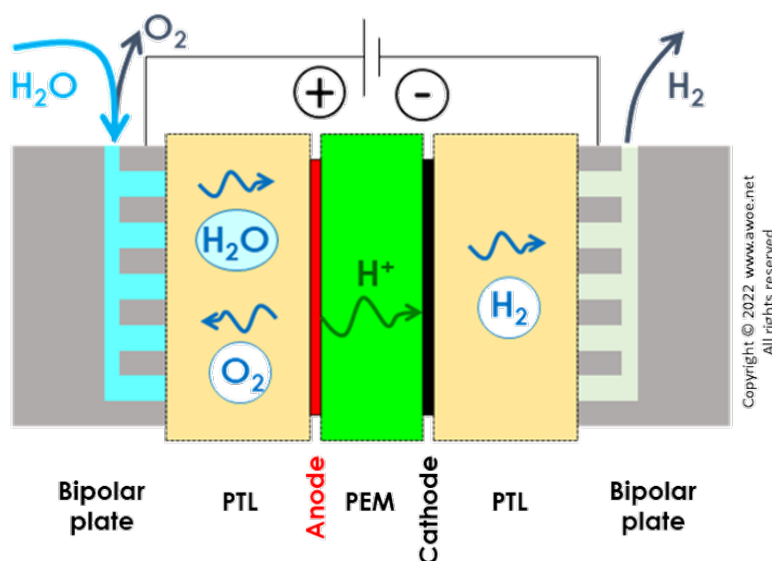
In PEM-elektrolyzers wordt gedeïoniseerd water door reactie aan de anodezijde geleverd en gesplitst



Protonen H^+ worden door het elektrolytische membraan naar de kathode getransporteerd waar waterstof wordt geproduceerd door ze te recombineren



Omdat het gebaseerd is op transport van H^+ (in plaats van OH^- voor alkalische elektrolyzers) betekent dit dat PEM-elektrolyzers in een zure omgeving werken. Dienovereenkomstig vereisen PEM-elektrolyzers nobele katalysatoren, zoals platina en iridium voor de elektroden.



Schema's van een PEM-elektrolyser

Structuur van een PEM-elektrolyser

De typische structuur van een PEM-elektrolyser is een stapeling van membraanelektrodeassemblages (MEA's) met tussenlagen die fungeren als interconnector en gascollector. De afzonderlijke cellen worden in serie geschakeld om een systeem met een significante spanning te creëren. Aan elk uiteinde fungeren stroomcollectoren van aluminium of koper als elektrische interface met de elektrolyseromgeving.

Een MEA is een samenstel van een polymeerelektrolytmembraan met aan de ene kant een zuurstofelektrodelaag en aan de andere kant een waterstofelektrodelaag.

De poreuze transportlagen (PTL's) zijn meestal 280 micron dik, gemaakt van koolstofpapier aan de kathodezijde en gesinterd titaniumschuim of vilt aan de anodezijde.

De interconnectoren of bipolaire platen zorgen voor de elektrische verbinding van individuele cellen. Ze zijn gemaakt van titanium en gevormd met kanalisatiestructuren voor water- en

gastransport. Sommige alternatieve ontwerpen gebruiken een titanium gaas om zowel de elektrische connectiviteit als wat interne ruimtevloeistofstroom te bieden.



Exploded view van een PEM-elektrolyser

Het frame rond de PEM-cellen is gemaakt van gegoten kunststof, optioneel met stalen versterking voor elektrolyzers onder druk. Afdichtingen zijn gemaakt van nitril, siliconenrubber of FKM O-ringen.

Ten slotte zorgen dikke eindplaten en bouten voor mechanische integriteit door de lagen samen te drukken. Vlakke veren worden aan het geheel toegevoegd om de compressie gelijkmatig te verdelen, waardoor lokale lekkage wordt voorkomen.

Membraan

Het vaste membraan in PEM-elektrolyser is een perfluorsulfonzuur (PFSA) membraan. Het meest gebruikte materiaal is Nafion van DuPont, een copolymeer van perfluorovinylothergroepen geëindigd met sulfonaatgroepen in een tetrafluorethyleenstructuur. Zodra het copolymeer is geproduceerd, wordt het eerst behandeld met een base en vervolgens met een zuur om de sulfonaatgroepen om te zetten in sulfonzuur. Omdat het een zuur is, kan het protonen geleiden, wat wordt gelabeld als een zuur met ionische eigenschappen. Nafion is zeer succesvol dankzij de goede thermische en mechanische stabiliteit.

Binnen PEM-elektrolyzers worden Nafion-membranen met een dikte van 60 tot 200 micron gebruikt. Het membraan is de kritische component die de levensduur van PEM-elektrolyzers beperkt, omdat het moeilijker te vervangen is dan de vloeibare elektrolyt van alkalische elektrolyzers.

Elektroden

Aan beide zijden van het membraan worden dunne elektroden van ongeveer 10 μm dikte direct aan het oppervlak gehecht.

De anode van een PEM-elektrolyser werkt onder zeer zure en sterk oxiderende omstandigheden, waardoor de keuze van mogelijk materiaal wordt beperkt. Het enige bekende materiaal dat zowel een hoge elektrodeactiviteit als materiaalstabiliteit biedt, is iridiumoxide (IrO_2).

De behoefte aan iridium is een probleem omdat het een relatief zeldzaam materiaal is, voornamelijk verzameld als bijproduct van de platinaproductie. Daarom is een aanzienlijk deel van het PEM-onderzoek gericht op het minimaliseren van de hoeveelheid gebruikt iridium door minimale belastingen en vormoptimalisatie van katalysatorlagen. Hoge prestaties zijn aangetoond met laboratoriumcellen met een lage belasting van $0,1 \text{ mg/cm}^2$, maar de commerciële belasting blijft in het bereik van 1 tot 3 mg/cm^2 .

De dunne iridiumcoating wordt over het algemeen aangebracht op een kern van titanium of platina-gecoat titanium, wat goedkopere en gemakkelijker beschikbare materialen zijn dan iridium, maar zeker niet op het punt van staal of aluminium.

De kathode werkt in een zure maar reducerende omgeving, waardoor de vraag naar materialen wordt verminderd. Kathodes zijn meestal gemaakt van platinazwart of van platinalagen op een koolstofkern. De platinabelasting ligt binnen het bereik van $0,2$ tot 1 mg/cm^2 .

Platinagroepmetalen of titaniumkernen bedekt met platinagroepmetalen worden ook gebruikt voor de interconnects (of bipolaire platen), zodat dergelijke materialen in grote hoeveelheden in een PEM-elektrolyser worden gebruikt.

Efficiëntie

De minimale spanning voor watersplitsing in waterstof en zuurstof is $1,23 \text{ V}$ (zie [Elektrolyse Algemeen](#)). Industriële elektrolyzers gebruiken echter een hogere spanning om de productiviteit te maximaliseren. De verhouding tussen de ideale en de praktische spanningen bepaalt de efficiëntie van een individuele cel:

$$\text{Eff} = 1.23\text{V} / E_{\text{cel}}$$

Industriële toepassingen werken bij een celspanning van $1,5$ tot 2 V , wat leidt tot een cefficiëntie van 62 tot 82% . Toch omvat een industriële elektrolyser ook tal van nutsvoorzieningen (pompen, transformatoren, besturingselektronica,...) en de werking impliceert enkele faradaïsche verliezen (ongewenste zijreacties in de cel). Bij het gebruik van een elektrolyser rond 30 bar om $99,999\%$ zuivere waterstof te produceren, zijn dergelijke verliezen goed voor $10-20\%$, zodat de elektrolysefficiëntie in het bereik van 50 tot 70% ligt.

Waterbehandeling en -gebruik

Waterde-ionisatie is vereist voordat het naar de anode wordt gevoerd om minerale afzetting en niet-gewenste elektrochemische reacties in de cellen te voorkomen. Wanneer water in de schoorsteen wordt gepompt, stroomt het door een ionenuitwisselingsharspatroon om een lage watergeleiding ($< 0,1 \mu\text{S} / \text{cm}$) te garanderen om snelle systeemdegradatie te voorkomen.

De anodische zijde bevat ook een warmtewisselaar om de systeemtemperatuur te regelen, meestal tussen $60 \text{ }^\circ\text{C}$ en $80 \text{ }^\circ\text{C}$. De kathodische zijde bevat geen koelcircuit omdat er tijdens bedrijf een netto transport van water van de anode naar de kathode is als gevolg van de

elektro-osmotische weerstand. Het regelen van de temperatuur aan de anodische kant regelt daarom indirect de temperatuur aan de kathodische kant en de kathodische kant omvat een waterafvoer.

Omdat de kathodische uitlaat een mengsel van waterstof en water stroomt, wordt deze afgekoeld tot bijna omgevingsomstandigheden voor eenvoudige scheiding van vloeibaar water van gasvormige waterstof. Het vloeibare water wordt vervolgens teruggevoerd naar de anode.

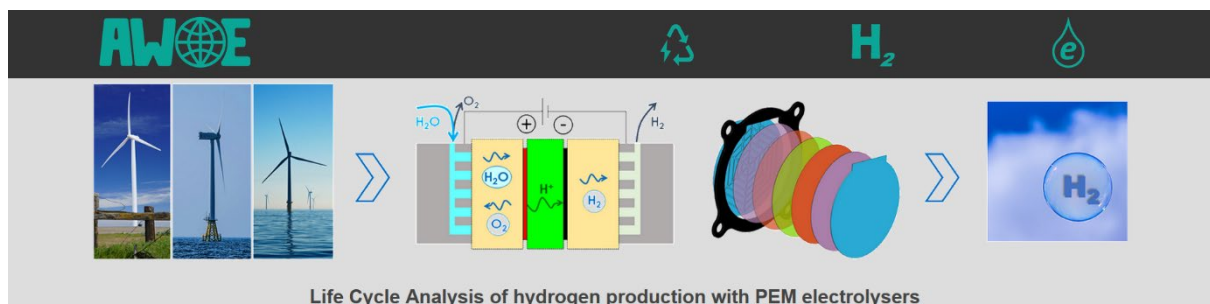
De waterstofstroom wordt in 2 opeenvolgende stappen gezuiverd:

- een katalytische de-oxozuivering om het zuurstofgehalte onder 5 ppm te verlagen
- een adsorptieve droger om het watergehalte onder 5 ppm te verminderen

Bedrijfsomstandigheden

Bij het gebruik van een PEM-elektrolyser op hogere druk betekent dit niet noodzakelijkerwijs dat alle circuits onder hoge druk staan. De zuurstofzijde wordt over het algemeen in de buurt van de omgevingsdruk gehouden om het systeemontwerp te vereenvoudigen en de zuurstofdoordringing naar de waterstofzijde te beperken. Dit heeft beperkte gevolgen zolang de geproduceerde zuurstof niet wordt gebruikt door direct naar de atmosfeer te worden afgevoerd. Alleen de waterstofkant zal enige significante druk ervaren.

Tegenwoordig hebben commerciële PEM-elektrolyzers een levensduur van 40.000 tot 60.000 uur. De membraanelektrodeassemblages en de anodische transportlagen zijn de beperkende delen. Hun revisie maakt het mogelijk om de volledige structuur voor een langere periode operationeel te houden.



Levenscyclusanalyse van waterstofproductie met PEM-elektrolyzers

Geschreven door [Vincent Knop](#)

Gepubliceerd op 19 maart 2022

[Polymeerelektrolytmembraanelektrolyzers](#) (PEM) zijn elektrolyzers met lage temperatuur (<100 °C) die een vast membraan gebruiken als scheidingsteken tussen de anode en de kathode. Ze hebben ongeveer dezelfde efficiëntie als [alkalische elektrolyzers](#) (AEL), maar werken op een grotere stroom (ongeveer 5 keer hoger dan AEL), zodat ze aanzienlijk compacter zijn voor dezelfde waterstofafgifte. PEM zijn ook toleranter voor

belastingsvariaties op korte termijn en daarom meer geschikt voor een koppeling met variabele [hernieuwbare bronnen](#).

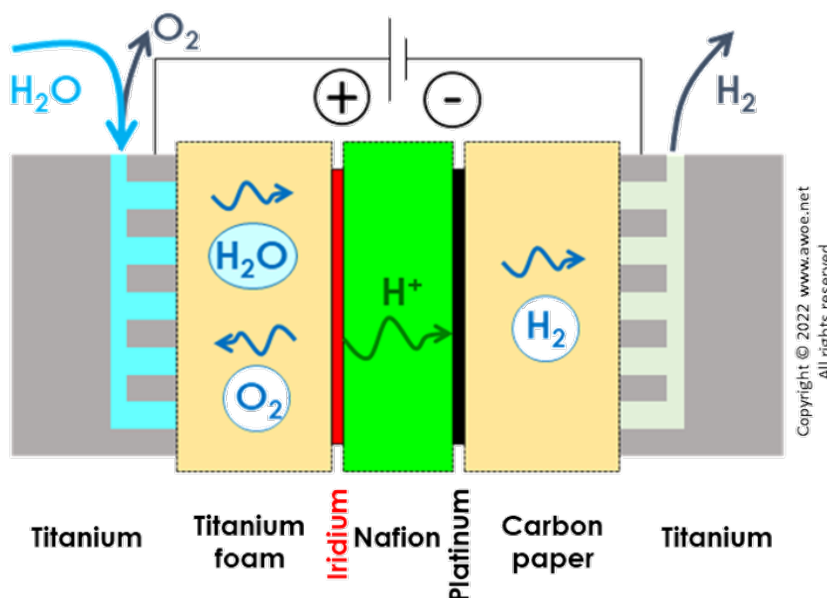
Ondanks al deze voordelen heeft de commerciële beschikbaarheid van PEM-elektrolyzers echter niet geleid tot het verdwijnen van alkalische elektrolyzers. De belangrijkste reden is de afhankelijkheid van PEM-elektrolyzers van zeer specifieke en dure materialen. Naast het economische aspect impliceert deze afhankelijkheid ook een grotere impact op het milieu, vooral op het gebruik van minerale hulpbronnen.

Materiaal

De zure omgeving gerelateerd aan H^+ -transport dwingt het gebruik van iridium en platina voor respectievelijk de anode en kathode. Omdat dit dure en moeilijk te verkrijgen materialen zijn, worden ze alleen gebruikt als coating of extreem dunne lagen over een kernmateriaal.

Titanium is het kernmateriaal voor elektroden, maar ook voor de interconnect, d.w.z. een van de interne elektriciteitsgeleidende componenten. Dienovereenkomstig is een PEM-elektrolyser van 1 MW gemaakt van meer dan een halve ton titanium, maar minder dan 1 kg iridium of platina.

Dergelijke metalen zijn moeilijker te verkrijgen dan staal of aluminium en hebben een grotere impact op het milieu. Dit verklaart waarom de materiaalinkoop en productie van PEM-elektrolyzers een hogere equivalente broeikasgasimpact heeft dan de materiaalinkoop en productie van alkalische elektrolyzers. Voor een identiek reactieoppervlak heeft de PEM-elektrolyser een 16 keer hogere broeikasgasimpact dan de AEL-elektrolyser (alleen stack). Maar de productiviteit is ook een stuk hoger dankzij de hogere stroom (ongeveer 5 keer hoger), waardoor de verhouding in equivalente broeikasgasemissies per kg geproduceerd H_2 onder de 4 ligt.



Belangrijkste materialen in de stapel van een PEM-elektrolyser

De zuurstofelektrode (anode) is goed voor bijna de helft van de broeikasgasimpact vanwege de samenstelling van iridiumoxide over titaniumkern. De rest van de verbinding gemaakt van titanium vertegenwoordigt nog eens 35% en de waterstofelektrode gemaakt van platina over titanium ligt tussen de 10 en 15%. Deze 3 componenten definiëren 98-99% van de broeikasgasimpact van de PEM-stack.

Balans van de plant

Naast de stapel cellen omvat een elektrolyserinstallatie ook pompen om water te laten circuleren (van elektrolyse en voor koeling), zuiveringsinstallaties (voor water en voor waterstof) evenals elektrische aansluitingen (transformator en gelijkrichter) en enkele vermogens- en besturingselektronica.

Al deze componenten vereisen aanzienlijke hoeveelheden materialen, meestal metalen. Bovendien zijn de elektrolyser en zijn hulpapparatuur ondergebracht in een gebouw, waarbij wat beton voor de funderingen wordt toegevoegd en op zijn minst een lichte structuur om gevoelige apparatuur te beschermen tegen slecht weer.

De meeste van deze apparaten zijn gemaakt van staal of aluminium, met uitzondering van funderingen van beton. Dienovereenkomstig bevat een functionele PEM-installatie aanzienlijke hoeveelheden staal, aluminium en beton, zelfs als er geen in de elektrolyser zelf zitten. De elektrische componenten (transformator, gelijkrichter) voegen ook koper toe aan de lijst met belangrijke materialen.

Per gewicht is het hoogste aandeel voor constructie-elementen (~80% voor funderingen en gebouwen), gevolgd door de hulpstoffen en ten slotte slechts ongeveer 5% voor de kern van de elektrolyser.

Efficiëntie

De werking van elektrolyzers heeft water en elektriciteit als belangrijkste ingangen. Terwijl ongeveer 9L water nodig is per kg geproduceerde waterstof, is er een nog groter waterverbruik voor koeling (ongeveer 10 keer). De broeikasgasimpact van water is laag, maar de waterbehandeling voorafgaand aan het gebruik in de elektrolyser draagt bij aan het elektriciteitsverbruik van de installatie.

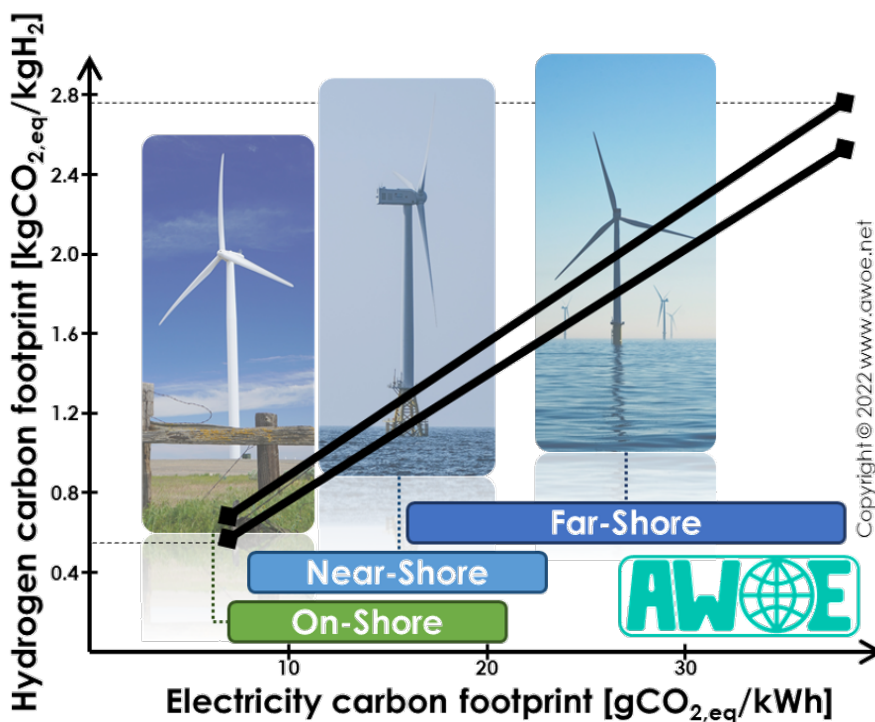
Met een rendement van ~65% is het elektriciteitsverbruik ~60 kWh/kg H₂. Dit grote verbruik impliceert dat elektriciteit de belangrijkste bijdrage levert aan de totale broeikasgasimpact van de werking van elektrolyzers. Met schone elektriciteit van de beste [windturbines](#) is de koolstofintensiteit van elektriciteit 7 gCO_{2,eq} / kWh, wat leidt tot een broeikasgasimpact van waterstof van 420 gCO_{2,eq} / kg H₂ alleen vanwege het elektriciteitsverbruik.

Levenscyclusanalyse

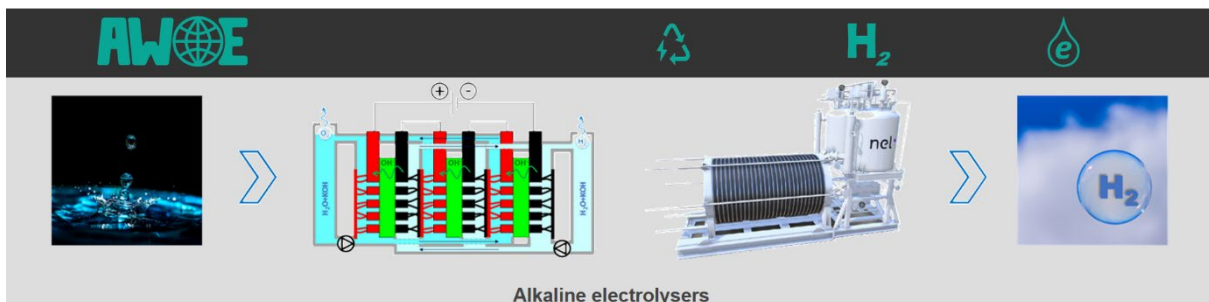
Uitgaande van een levenscyclus van 20 jaar en een werking van 8000 h/jaar, zullen de stapelcomponenten van een PEM-elektrolyser zeker moeten worden vervangen, wat betekent dat de dure elektrode moet worden vervangen door iridium of platinaplating. Aangezien de levensduur van PEM-elektrolyzers op zijn best 50.000 h is, zijn 3 stackvervangingen een minimum, waardoor de hoeveelheid verbruikte platina-groepmetalen grotendeels toeneemt.

Gepubliceerde cijfers over de koolstofintensiteit voor de elektrolysestapel tonen ongeveer 200 tot 300 gCO_{2,eq}/kg H₂, eenmaal rekening houdend met de vervanging van de schoorsteen voor lange bedrijfsuren gedurende 20 jaar. Er zijn een extra ~ 10 gCO_{2,eq} / kg H₂ voor de balans van de plant en ~ 4 gCO_{2,eq} / kg H₂ voor waterverbruik. Hoewel niet nul, blijven deze cijfers onder de impact van het elektriciteitsverbruik.

Bij een totaal elektriciteitsverbruik (stack+auxiliaries) van 60 tot 65 kWh/kg H₂ heeft de koolstofintensiteit van elektriciteit een zeer grote invloed op de milieu-impact van de geproduceerde waterstof. Gezien de schoonste elektriciteit van windturbines, kan de impact van het elektriciteitsverbruik zo laag zijn als 420 gCO_{2,eq}/kg H₂, wat leidt tot een totale impact van waterstof zo laag als 620 gCO_{2,eq}/kg H₂. Met een hernieuwbare mix die verschillende soorten windparken en enkele fotovoltaïsche panelen combineert (koolstofintensiteit van elektriciteit is 42 gCO_{2,eq} / kWh, neemt de impact van elektriciteit toe tot 2700 gCO_{2,eq} / kg H₂, zodat de stack-impact secundair wordt (<10%).

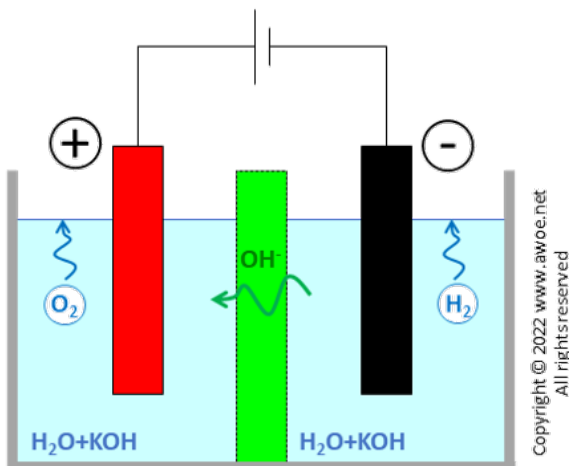


Koolstofvoetafdruk van groene waterstof afkomstig van elektriciteit van windturbines met een PEM-elektrolyser



Alkalische elektrolyzers

Alkalische elektrolyzers (AEL) zijn het oudste type elektrolyser en het dichtst bij de klassieke verklarende elektrolyser die in scheikundelessen wordt gebruikt om waterstof en zuurstof te produceren door watermoleculen te splitsen. Ze hebben 2 metalen elektroden gedompeld in een vloeistof op waterbasis en gescheiden door een membraan poreuze tot negatief geladen ionen. Bij het aanbrengen van een stroom tussen elektroden komt waterstof vrij bij de kathode en zuurstof bij de anode in de vorm van bellen.



Schema's van een originele alkalische elektrolyser

Met meer dan 200 jaar ontwikkeling is alkalische elektrolyse de meest volwassen, veiligste, meest betrouwbare en meest duurzame technologie op de markt. Alkalische elektrolyzers bestaan in elke schaal, van de kleine laboratoriumapparatuur tot industriële multi-MW-

eenheden. Sommige werken bij atmosferische druk, terwijl andere direct waterstof onder druk kunnen produceren.

Waarom alkalisch?

Het onderdompelen van elektroden in zuiver water is geen efficiënte manier om waterstof (of zuurstof) te produceren met elektrolyse, simpelweg omdat er bijna geen ion in de vloeistof zit, waardoor ionisch transport door de separator wordt voorkomen. Met bijna geen ladingstransport binnen het vloeibare deel van de elektrolytische cel, gedraagt het systeem zich als een elektrisch circuit met een schakelaar bijna volledig open: er gebeurt bijna niets.

Het simpelweg vervangen van zuiver water door leidingwater verhoogt grotendeels de reactiviteit en waterstofproductie omdat kraanwater mineralen bevat, die ionen vrijmaken zodra ze in water zijn opgelost. Daarom loopt de scheikundeles over elektrolyse op kraanwater en niet op gedestilleerd water.

In de richting van industriële toepassingen is de selectie van geschikte mineralen om op te lossen in water gericht op het maximaliseren van de ionenconcentratie in water en de levensduur van de apparatuur. Er zijn slechts 2 manieren om de ionische geleidbaarheid van de elektrolyt (water met opgeloste ionen) te verhogen:

- Het toevoegen van mineralen die H^+ ionen vrijmaken, wat leidt tot een zuur elektrolyt
- Het toevoegen van mineralen die OH^- ionen vrijmaken, wat leidt tot een alkalisch (of basisch) elektrolyt

Hoe zuurder of alkalischer de elektrolyt, hoe beter voor ionisch transport en dus voor waterstofproductie. Toch zijn zeer zure en zeer alkalische elektrolyten zeer agressief met elektrolysematerialen en veroorzaken ze betrouwbaarheidsproblemen.

Een zure elektrolyt zal de meeste metalen corroderen en daardoor de elektroden snel wegvreten, tenzij er zeer dure metalen uit de platinagroep worden gebruikt. Platina-elektroden of platinacoating op een koolstofdrager zijn over het algemeen vereist bij de H_2 -producerende kathode, terwijl iridiumdioxide het meest voorkomt bij de O_2 -producerende anode.

Een alkalische elektrolyt maakt het gebruik van goedkopere en gemakkelijker te verkrijgen metalen zoals nikkel en kobalt mogelijk. Er zijn zelfs ontwikkelingen die het gebruik van roestvrijstalen elektroden onderzoeken. Hoewel minder agressief dan sterk zure elektrolyten, zijn sterk alkalische elektrolyten nog steeds zeer corrosief en beperken ze intrinsiek de levensduur van de apparatuur.

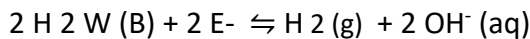
De meest gebruikte sterke base toegevoegd aan gezuiverd water is kaliumhydroxide (KOH) dat K^+ kationen en OH^- anionen produceert. De KOH-concentratie in de waterige oplossing ligt in het bereik van 20 tot 40% massa, over het algemeen binnen de smallere band van 25 tot 30% massa. Alternatieve basisopties zijn natriumhydroxide (NaOH) of zelfs natriumchloride (NaCl), dat Na^+ kationen en OH^- of Cl^- anionen produceert. KOH heeft over

het algemeen de voorkeur omdat het een hogere ionische geleidbaarheid heeft en CO₂ een lagere oplosbaarheid heeft in een KOH-wateroplossing. Met behulp van NaOH wordt CO₂ uit lucht gemakkelijk opgelost in de elektrolyt, waardoor carbonaat (CO₃²⁻) wordt gevormd en de ionische geleidbaarheid verder wordt verminderd.

Elektrochemische reacties

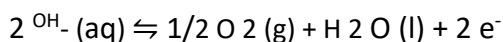
Na het selecteren van een alkalische elektrolyt die het transport van negatief geladen ionen OH⁻ bevordert, kan het algemene principe van elektrolyse worden verfijnd tot het specifieke geval van alkalische elektrolyse.

Watermoleculen worden aan de kathode gedissocieerd in H⁺ en OH⁻ met verdere oppervlaktere combinatie van H⁺ in gasvormig H₂ in aanwezigheid van elektronen e⁻ gebracht door het externe elektrische circuit.



OH-ionen in de elektrolyt worden door het elektrische veld naar de andere elektrode aangetrokken. De separator of membraan tussen de elektroden zorgt ervoor dat alleen OH-ionen van de ene naar de andere kant kunnen reizen. Zowel elektrontransport als H₂/O₂-transport worden voorkomen of op zijn minst zeer significant belemmerd. Elektrontransport zou kortsluiting veroorzaken, terwijl contact tussen H₂ en O₂ zou leiden tot een onmiddellijke recombinitie in H₂O.

Eenmaal getransporteerd naar de anode, worden OH-anionen geoxideerd, waarbij gasvormige zuurstof en vrijkomende elektronen worden geproduceerd die worden geabsorbeerd door het externe elektrische circuit.



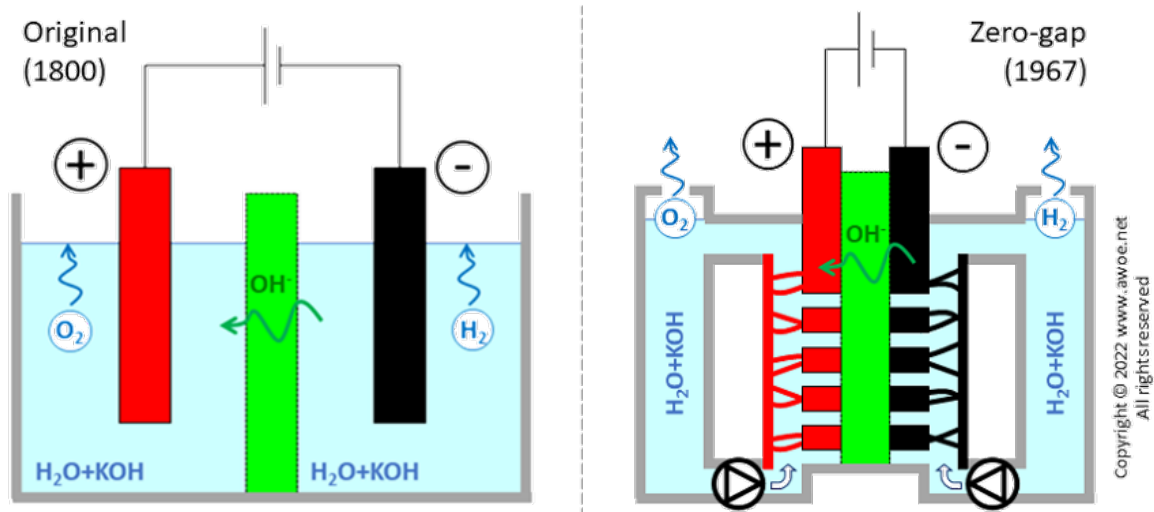
Zero-gap ontwerp

Het oorspronkelijke ontwerp voor de alkalische elektrolyser had vaste elektroden ondergedompeld in de waterige oplossing. Enige afstand tussen de elektroden en de separator/membraan is vereist om een snelle beweging van beide bellen en de elektrolyt te garanderen:

- Gasproductie creëert bellen aan het elektrodeoppervlak; Bellen hebben enige afstand nodig om uit het elektrolyt te stijgen, anders voorkomt accumulatie verder ionentransport naar het elektrodeoppervlak
- Het ionentransport binnen de elektrolyt door diffusie-only is te langzaam, zodat elektrolytenroeren gebruikelijk is, maar alleen effectief is dat de stroom niet in zeer smalle doorgangen wordt gedwongen

De afstand tussen elektroden beperkt het ladingstransport (als elektron of als ion) door de weerstand te verhogen, zodat de vereiste openingen de bereikbare stroomdichtheid beperken tot ~ 200 mA / cm². Omdat waterstofproductie recht evenredig is met de stroomdichtheid, vereist een dergelijk ontwerp enorme eenheden om grote hoeveelheden

waterstof te produceren (een lagere stroomdichtheid kan alleen worden gecompenseerd met grotere / meer elektroden).



Vergelijking van originele en zero-gap lay-outs voor alkalische elektrolyzers

Een nieuwer ontwerp werd voorgesteld in 1967 door Costa en Grimes, met behulp van poreuze elektroden direct in contact met de separator, het elimineren van de openingen (vandaar de naam zero-gap) en meer dan een verdubbeling van de haalbare stroomdichtheid tot $500 \text{ mA} / \text{cm}^2$. De installatie wordt compacter voor dezelfde productiesnelheid van waterstof en de verminderde overpotentials beperken het elektriciteitsverbruik, d.w.z. verbeteren de efficiëntie. Het zero-gap concept vereist echter een dubbel elektrolytcircuit, pompen voor vloeistofcirculatie en elektrolyt/gasafscidders. Het extra extra energieverbruik annuleert de meeste van de bovengenoemde efficiëntiewinsten, zodat compactheid, productiviteit en CAPEX de belangrijkste voordelen zijn.

Membraan materiaal

Het membraan scheidt reactiezones, is ondoordringbaar voor gassen, maar moet selectief doorlaatbaar zijn voor ionen. Het is dus een hydrofiel materiaal dat water of andere polaire componenten aantrekt, zoals OH^- , maar apolaire componenten zoals H_2 of O_2 afstoot.

Historisch gezien werden elektrolysermembranen gemaakt van 3 mm dikke asbestlagen, wat leidde tot een totale afstand tussen elektroden van ongeveer 5 mm. Vanwege asbestdegradatie bij hoge temperatuur werd de bedrijfstemperatuur van dergelijke elektrolyzers beperkt tot $80 \text{ }^\circ\text{C}$.

Het verbod op asbestgebruik dwong fabrikanten om over te stappen op meer uitgebreide materialen. Het toonaangevende materiaal voor AEL-membraan is een poreus materiaal dat wordt verkocht onder de handelsmerknaam Zirfon Perl en geproduceerd door Agfa. Het is samengesteld uit een open mesh polyfenyleensulfideweefsel, dat symmetrisch is gecoat met

een mengsel van ~ 15% polysulfon en ~ 85% zirkoniumoxide (ZrO_2). Het heeft een dikte van 0,5 mm, een porositeit van 55%, dezelfde dichtheid als water en een maximale bedrijfstemperatuur van 110°C.

Sommige onderzoeksinspanningen zijn gericht op de ontwikkeling van nieuw membraanmateriaal, met name gesulfoneerde polyether-ether-ketonen, dat bij hogere temperaturen kan werken. Geavanceerde alkalische elektrolyzers die tot 150°C werken, zijn al op laboratoriumniveau gedemonstreerd.

Merk op dat de structurele component van de separator (polyfenyleensulfide voor [Zirfon](#) [Perl](#)) alkalibestendig is en daarom ook voor het celframe kan worden gebruikt. Omdat het over het algemeen zwakke mechanische eigenschappen heeft, is het versterkt met staal in elektrolyzers onder druk.

Elektrode materiaal

De elektroden grenzen aan het membraan en zijn gemaakt van corrosiebestendig metaal. Hoewel vaste elektroden van zuiver nikkel in het verleden vaak werden gebruikt, is dit duur en maakt het niet mogelijk om maximale efficiëntie te bereiken.

De zuurstofproducerende anode is gemaakt van zuiver nikkel, van een nikkelcoating op een stalen kern of van een nikkel-ijzerlegering gecoat op een eenvoudige staal- of nikkelplaat. Merk op dat roestvrij staal een lagere overpotentiaal heeft dan nikkel (0,28V versus 0,61V) voor de productie van zuurstof, maar een slechtste elektrische geleidbaarheid (1,45 MS / m versus 14,3 MS / m), zodat het kiezen van het ene of het andere materiaal een afweging impliceert. Onderzoek naar roestvrijstalen elektroden of nikkel-ijzerlegeringen met een hoog ijzergehalte is aan de gang om een goedkoop alternatief voor nikkel te bieden.

De waterstofproducerende kathode heeft over het algemeen een stalen kern met enige katalytische coating. Afhankelijk van de fabrikant en het toepassingstype varieert de coating van gewoon niet-geactiveerd nikkel tot geactiveerde nikkellegeringen (NiMo, NiSn, NiS) of zelfs platinagroepmetalen. In tegenstelling tot de zuurstofreactie hebben platinagroepmetalen zeer lage overpotenties voor de waterstofreactie (0,09V voor Pa en Pt of zelfs 0,01V voor geplatineerd Pt), waardoor zowel nikkel (0,32V) als roestvrij staal (0,42V) worden verbeterd. Toch is een meer kosteneffectieve aanpak om enkele geactiveerde coatings te gebruiken waarbij nikkel wordt gegalvaniseerd met wat Mo, Sn of S (10-20% massa in de resulterende legering) om het overpotentiaal binnen het bereik van 0,11-0,27V te verminderen. Nikkel-zwavel is met name een zeer goede katalysator, maar de nikkel-zwavellaag lost gedeeltelijk op telkens wanneer de elektrolyser wordt gestopt onder de voorbijgaande toename van de elektrische potentiaal. De waterstofconversie-efficiëntie daalt dus met de tijd.

Terwijl conventionele (gapped) elektrolyzers de neiging hebben om vaste elektroden te gebruiken, gebruiken zero-gap elektrolyzers dunne poreuze of geperforeerde platen. Een dunne 0,3 mm zuivere nikkelplaat met 50% perforatie kan bijvoorbeeld worden gebruikt voor de anode, terwijl een vergelijkbare dunne 0,3 mm geperforeerde nikkelplaat gecoat met NiS kan worden gebruikt voor de kathode .

Atmosferische versus onder druk staande elektrolyzers

De meeste toepassingen die waterstof gebruiken, hebben waterstof onder druk nodig. Bovendien, waterstof is een zeer licht gas, het wordt nooit opgeslagen onder omgevingsomstandigheden. Als het niet vloeibaar wordt gemaakt, wordt het gecomprimeerd opgeslagen bij 350 of 700 bar. Dienovereenkomstig vereist het produceren van waterstof bij atmosferische druk verdere compressie voordat het wordt opgeslagen.

Om de compressietrap te verminderen, zo niet volledig te elimineren, kan waterstof ook worden geproduceerd met hogedrukelektrolyzers met demonstrator tot 170 bar. Niettemin vermindert de druk de grootte van de bel, wat het transport ervan door het membraan vergemakkelijkt, waardoor de cross-oververliezen toenemen. Druk vergemakkelijkt ook het oplossen van onzuiverheden in de elektrolyt (CO₂ uit lucht, bijvoorbeeld). Het algemene gevolg is een afname van de gaszuiverheid en de efficiëntie. Dienovereenkomstig werken de meeste commerciële elektrolyzers tussen 5 en 30 bar.

Efficiëntie en gaszuiverheid

De efficiëntie van een elektrolyser wordt berekend als de verhouding tussen de energie-inhoud van geproduceerde waterstof en de elektrische energie die wordt verbruikt voor elektrolyse, maar ook om alle benodigde hulpapparatuur (pompen, gasafscheider,...) te laten werken.

$$\eta = m_{H_2} \cdot LZV_{H_2} / E_{elec}$$

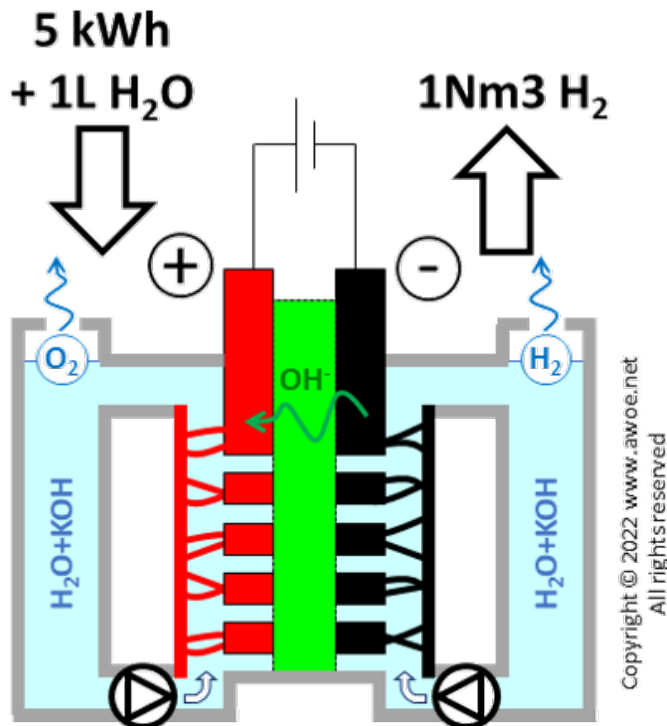
Merk op dat de juiste energie-inhoud om te overwegen de lagere verwarmingswaarde (LZV) van waterstof is, terwijl sommige zeldzame fabrikanten nog steeds efficiënties vermelden op basis van een hogere verwarmingswaarde (HHV) om voordeligere cijfers weer te geven.

Industriële alkalische elektrolyzers hebben een efficiëntie van 65+% (tot 67%) en produceren waterstof met een gaszuiverheid van 99,5+%vol (tot 99,9%vol). Ze werken over het algemeen tussen 60 en 90 °C met een stroomdichtheid van 0,2 tot 0,4 A/cm², wat leidt tot een schoorsteenlevensduur van 60.000 tot 90.000 h. Merk op dat een revisie om de membranen te vervangen en de elektroden opnieuw te activeren een alternatief kan zijn voor het vervangen van alle apparatuur die de milieubelasting verlaagt (zie Levenscyclusanalyse).

Naast waterstof produceert de elektrolyser ook zuurstof met een zuiverheid tot 99,7 % vol zonder hulpzuiveringsapparatuur. Deze zuurstof kan worden verkocht of geventileerd naar de atmosfeer. Gezien de relatief lage commerciële waarde van zuurstof in vergelijking met waterstof, wordt het over het algemeen alleen verkocht als er een lokaal verbruik of een reeds bestaande zuurstofafgifte-infrastructuur is.

Balans tussen energie en materialen

Het opwekken van waterstof door het splitsen van water vereist een aanzienlijke hoeveelheid energie, ongeveer 142 MJ per kilogram waterstof voor een ideale (100% efficiënte) elektrolyser. Met een rendement van 66% voor een realistische alkalische elektrolyser loopt dat aantal op tot 215 MJ per kg H₂ of 5,0 kWh per Nm³ van H₂ (Nm³ = 1 m³ bij normale omstandigheden, 1 atm, 20°C). Het grote elektriciteitsverbruik verklaart waarom het produceren van waterstof uit fossiele brandstoffen tegenwoordig betaalbaarder is.



Balans van energie en materialen in een alkalische elektrolyser

Naast elektriciteit verbruikt de productie van waterstof ook water in een verhouding van ongeveer 1L water per Nm³ geproduceerde waterstof. Merk op dat een deel van dit verbruik plaatsvindt in het waterzuiveringsproces dat voorafgaat aan de eigenlijke elektrolyse (water wordt eerst gezuiverd en vervolgens gemengd met de geselecteerde alkali). Het aanzienlijke waterverbruik is geen probleem bij het gebruik van een elektrolyser op basis van windenergie in Noorwegen, maar het is een enorme wegversperring bij het plannen van elektrolyserboerderijen in zonnige droge omgevingen.

Ten slotte verbruikt het systeem wat alkali om een geschikte concentratie OH⁻ in de elektrolyt te behouden. De orde van grootte is ongeveer 3,7 g KOH per kg H₂.

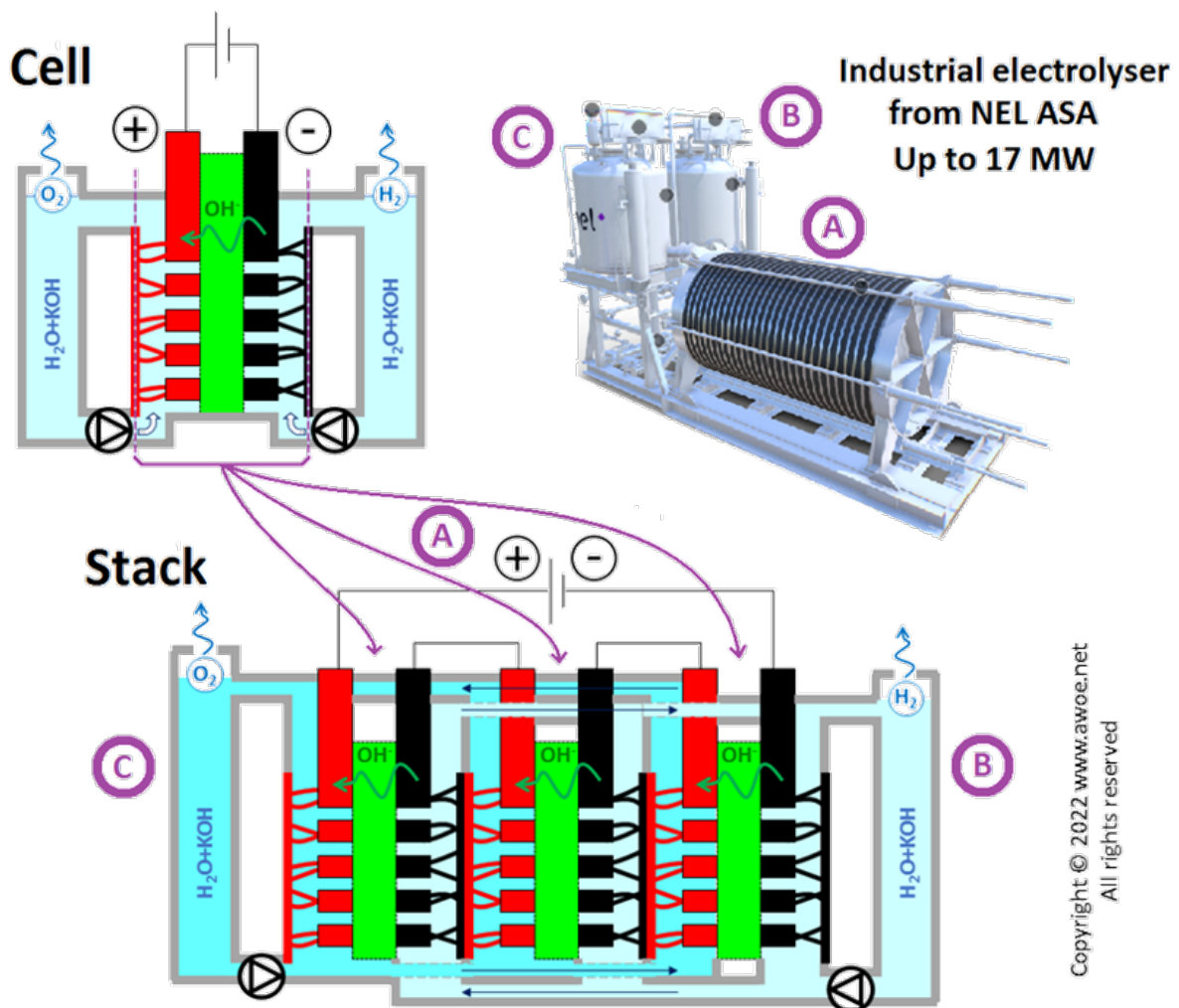
Industriële toepassing

Grootschalige alkalische waterelektrolyse is een volwassen industriële oplossing met tal van alkalische elektrolyserleveranciers die al tientallen jaren actief zijn. Een alkalische

elektrolyser is gewoon een stapel individuele cellen, zodat het een gemakkelijk schaalbare technologie is.

Er zijn 3 hoofdelektrolyser lay-outs:

- Oerlikon: vierkante elektroden, werking bij atmosferische druk, geen circulatiepomp
- Norsk Hydro: cirkelvormige elektroden, werking bij atmosferische druk, met circulatiepompen
- Zdansky/Lonza: ronde elektroden, werking onder druk, met circulatiepompen



Schema's van een industriële alkalische elektrolyserstack

Elke individuele alkalische cel werkt met gelijkstroom (DC) bij een spanning van 1,85 tot 2,05V en heeft een efficiëntie van 70-80%. Talrijke cellen worden in serie gecombineerd binnen een stapel, waardoor een compacte lay-out ontstaat die op een grotere spanning werkt.

De wereldwijde efficiëntie van een industriële eenheid ligt tussen 60 en 67% vanwege het energieverbruik van hulpapparatuur: AC / DC-omvormerverliezen, waterzuiveraar, gasdrogers op zowel O₂- als H₂-circuits, pompen die de elektrolyt circuleren,...

Een alkalische elektrolyser kan werken van nominaal vermogen tot ~ 15% van nominaal, maar de efficiëntie daalt onder nominale omstandigheden. De minimale bedrijfsbelasting wordt bepaald door de minimaal vereiste stroomdichtheid. Onder die drempel wordt de ionenstroom zwak en verbruikt gascross-over (H₂ en O₂ die door de separator stromen als gevolg van moleculaire diffusie en oplosbaarheid in de elektrolyt) een aanzienlijk deel van de geproduceerde gassen.

Alkalische elektrolyzers zijn in wezen steady-state eenheden. Grote variaties in stroom veroorzaken een plotselinge verandering in de hoeveelheid geproduceerd gas. Accumulatie van gasbellen kan een tijdelijke elektrische isolatie creëren, waardoor het systeem inefficiënt of onstabiel wordt. Plotselinge vermogensvariaties moeten daarom worden vermeden, waardoor ze niet geschikt zijn voor directe koppeling met sterk fluctuerende stroombronnen, zoals zonnepanelen en windturbines. Indirecte koppeling via een tussenstap die de elektrische energie-instroom opslaat en filtert (een batterij of een gepompte hydro zijn geldige opties) wordt aanbevolen.

Koppeling met fluctuerende stroombronnen door het activeren / deactiveren van sommige delen van de elektrolyser wordt ook niet aanbevolen, omdat opstart- en uitschakelprocedures grote elektrodepotentiaalvariaties kunnen produceren die een negatief effect hebben op de katalysator van elke elektrode, waardoor hun efficiëntie met de tijd afneemt. De accumulatie van start/stop-cycli is het equivalent van oxidatie-/reductiecycli voor de katalysator. Dit veroorzaakt zwellen en vorming van katalysatoroxiden, die op hun beurt mechanische spanning en / of katalysatorverliezen veroorzaken.

Anionische uitwisselingsmembranen als toekomst voor alkalische elektrolyzers

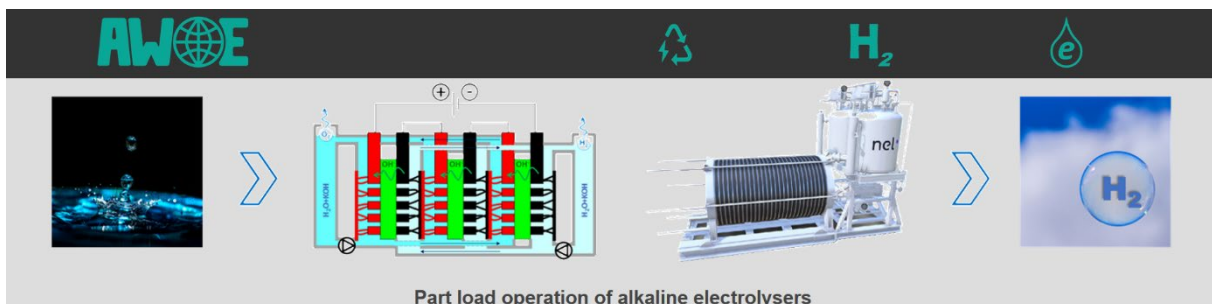
Anionische uitwisselingsmembranen (AEM) zijn ontworpen als een nieuwe alkalische benadering die zich op dezelfde manier gedraagt als polymeerelektrolysemembranen (PEM), maar met ^{een} OH-stroom door de separator. Het doel is om de elektrolyser op hogere druk te laten werken door gebruik te maken van een niet-poreus medium, d.w.z. niet te lijden onder de cross-over verliezen die worden ervaren door alkalische elektrolyzers (AEL).

AEM heeft geen elektrolyt nodig en werkt alleen met gedeïoniseerd water of een alkalische oplossing met een lage concentratie. De verwijdering van de corrosieve elektrolyt beperkt de risico's op lekkage, verbetert de volumetrische stabiliteit, vergemakkelijkt de vloeistofhantering en maakt het mogelijk de systeemgrootte en het gewicht te verminderen.

AEM-elektrolyzers gebruiken reeds bestaande niet-poreuze membranen met een hoge anionische geleidbaarheid. Toch is vanaf vandaag de aniongeleiding in dergelijke membranen aanzienlijk lager dan de kationgeleiding in ^{PEM-membranen} (OH⁻ zijn minder mobiel dan H⁺). Deze AEM-membranen lijden aan een gebrek aan chemische stabiliteit bij een hoge

pH, wat nodig is voor een goede anionische geleidbaarheid gedurende een redelijke levensduur.

Toch zijn sommige AEM-units al commercieel verkrijgbaar. Ze vereisen geen edelmetaal dat kan worden vervangen door goedkope overgangsmetalen (Fe, Ni, Co), net als AEL, terwijl ze gemakkelijk onder hogere druk kunnen werken, net als PEM, waardoor de noodzaak voor mechanische compressie van waterstof langs de lijn wordt geëlimineerd.



Deellastwerking van alkalische elektrolyzers

Geschreven door [Vincent Knop](#)

Gepubliceerd op 12 maart 2023

[Alkalische waterelektrolyse](#) is een gevestigde en relatief goedkope technologie om elektrische energie om te zetten in waterstof. In combinatie met een droog- en zuurstofzuiveringsstap produceert het gemakkelijk waterstof met een zuiverheid van meer dan 99,9%. Deze technologie is echter ontwikkeld voor nominale (bijna volledige belasting), steady-state werking en worstelt daarom met deellast en intermitterende werking. Het toenemende aandeel hernieuwbare elektriciteit in het net en de intentie om hernieuwbare elektriciteit op te slaan via waterstofopslag zijn dan ook een uitdaging voor alkalische waterelektrolyse.

Uitdagingen in verband met de werking van deellasten

Tijdens de werking van de elektrolyser wordt zuurstof geproduceerd aan de anodezijde en waterstof aan de kathodezijde, waarbij de separator de meeste overdracht van zuurstof naar de kathodezijde en waterstof naar de anodezijde voorkomt. De geproduceerde gassen zijn dus niet zuiver, maar het verontreinigingsniveau is laag. Problemen doen zich voor bij het werken bij lagere belastingen: de lekkage door de separator blijft ongeveer gelijk, terwijl de productiesnelheid afneemt, zodat de relatieve invloed van lekkage toeneemt, waardoor het verontreinigingsniveau toeneemt.

Bij nominale werking wordt het lage niveau van verontreiniging aangepakt door een zuiveringsstap toe te voegen, zuurstof uit de waterstofstroom te halen en waterstof uit de zuurstofstroom te halen. Dus waarom wordt het een probleem als de besmetting toeneemt? Omdat meer verontreiniging betekent dat mengsels aan beide zijden dichterbij het explosiviteitsbereik komen, wat leidt tot veiligheidsproblemen. Zuurstof en waterstof zijn onderling zeer reactief en verbranding/explosie is mogelijk zodra een verhouding van 4 %vol O_2 + 96 %vol H_2 of 96 %vol O_2 + 4 %vol H_2 is bereikt. Om veiligheidsredenen wordt een elektrolyser daarom uitgeschakeld zodra een van de minderheidssoorten de 2 %vol bereikt, zodat een ordelijke zuivering bij een laag risiconiveau mogelijk is.

Bij deellast neemt het verontreinigingsniveau toe met een dalende belasting en komt de minimaal toegestane belasting overeen met de limiet van 2 % vol voor verontreiniging in elke stroom. Afhankelijk van het ontwerp van de elektrolyser wordt een dergelijke limiet bereikt tussen 10% en 25% van de nominale werking. Dit betekent dat elke fluctuatie van de voeding onder 25% van nominaal een potentiële uitschakeling van de elektrolyser is. Afgezien van de voor de hand liggende vermindering van de waterstofproductie, zijn dergelijke shutdowns ongewenst om 2 belangrijke redenen:

1. Het opnieuw opstarten van de elektrolyser kost tijd, zodat de uitschakeling langer zal zijn dan de tijd die nodig is om de stroombron terug te brengen naar 25% van de nominale
2. Elke uitschakeling/opstart veroudert de elektroden, zodat frequente aan/uitgebeurtenissen de verwachte levensduur van de apparatuur verkorten, waardoor de onderhouds- en kapitaalkosten toenemen. Van nikkelelektroden is bijvoorbeeld bekend dat ze aanzienlijk afbreken na 5000 tot 10.000 start/ stop-cycli

Waarom is het limietbereik van alkalisch water van alkalische waterelektrolyzers 10% tot 25%?

Dit hangt samen met het beheer van de alkalische elektrolyt: hetzij via afzonderlijke circuits voor de zuurstof- en waterstofstromen, hetzij via een gemeenschappelijk pad.

Het mengsel van gas en elektrolyt voor elke elektrode wordt altijd afzonderlijk naar separatoren geleid om het meeste gas te extraheren, maar een deel van het restgas (bedoeld gas en onzuiverheden) blijft ingebed in de vloeistof. Als de elektrolytstromen die de separatoren verlaten worden gemengd voordat ze worden teruggevoerd naar elke elektrode, is er een menging van restgassen en een toename van restwaterstof aan de zuurstofproducerende kant, evenals een toename van restzuurstof aan de waterstofproducerende kant, waardoor het verontreinigingsniveau toeneemt en een uitschakeling bij een hogere belasting wordt opgelegd. Deze opstelling vereist meestal een uitschakeling in de buurt van de limiet van 25%.

Door de elektrolytstromen onafhankelijk te houden na de separatoren wordt dergelijke extra verontreiniging voorkomen en wordt de veiligheidslimiet dichterbij de belastingslimiet van 10% gebracht. Deze oplossing heeft echter zijn eigen nadelen: het waterverbruik aan de waterstofproducerende kant (kathode) verhoogt de elektrolytconcentratie, terwijl de waterproductie aan de zuurstofproducerende kant (anode) de elektrolytconcentratie verlaagt. Sommige vloeistofniveaubalancerings- en elektrolytconcentratiebalanceringsystemen zijn nog steeds vereist om het pompvermogen (vloeistofniveau) en de optimale elektrolytconcentratie te behouden (elektrolysefficiëntie is afhankelijk van de elektrolytgeleidbaarheid).

Bijvoorbeeld, met behulp van NaOH als elektrolyt, piekgeleidbaarheid is $\sim 65 \text{ S / m}$ bij 50° C en bereikt voor een concentratie net onder 20% mas, terwijl het gebruik van KOH, piekgeleidbaarheid is $\sim 95 \text{ S / m}$ bij 50° C en bereikt voor een concentratie net boven 30% mas.

Effect van druk

Het bedienen van de elektrolyser onder hogere druk is een veel voorkomende strategie om wat compressiewerk te besparen. Een hogere druk in de elektrolyser verhoogt echter ook het niveau van verontreiniging als:

1. De diffusie door de separator neemt toe
2. Er kan meer gas worden opgelost in de vloeistof

Deellastwerking onder druk is daarom het moeilijkste type omstandigheden.

Literatuuronderzoek toont aan dat de gemengde elektrolytcyclus zeer gevoelig is voor de combinatie van druk en stroomdichtheid:

- Bij atmosferische druk kan de stroomdichtheid worden teruggebracht tot $0,05 \text{ A/cm}^2$ voordat de veiligheidsgrens van 2 % vol H_2 in O_2 -stroom is bereikt
- Bij een werkdruk van 10 bar wordt dezelfde limiet bereikt voor een stroomdichtheid van $0,5 \text{ A/cm}^2$ en wordt elke lagere belastingsbewerking zeer gevaarlijk
- Bij een werkdruk van 20 bar, met een maximale stroomdichtheid van $0,7 \text{ A/cm}^2$, is werking onder de veiligheidsgrens van 2 % vol onmogelijk met gasverontreiniging al op 2,5 % vol

Deellast, onder druk staande werking vereist daarom gescheiden elektrolytcircuits met verplichte aanvullende strategieën om het vloeistofniveau en de elektrolytconcentratie in evenwicht te brengen.

Spanningsbeheer bij stroomonderbrekingen

Als de onzuiverheid van gas onder de veiligheidsgrens kan worden gehouden, kunnen kortdurende excursies onder de lage limiet (over het algemeen gedefinieerd als de minimaal aanvaardbare belasting voor continu bedrijf) worden getolereerd, maar alleen met een zeer zorgvuldig beheer van de elektrodespanning. Kathodedegradatie wordt aanzienlijk versneld onder een spanning van 0,25 V, zodat een uitschakeling kan worden besteld bij het sluiten van deze waarde, zelfs als de gasverontreiniging nog steeds laag is. De complexe meerlaagse elektroden kunnen tijdelijk fungeren als condensatoren, waardoor de spanningsval na een volledig vermogensverlies wordt vertraagd en de werking kan worden gehandhaafd als de stroom snel wordt teruggewonnen. Experimenten hebben mogelijke transiënten aangetoond die zo lang zijn als 10 minuten.

Temperatuurbeheer

Deellastbedrijf brengt ook nieuwe problemen met zich mee met temperatuurbeheer. De beste efficiëntie wordt bereikt wanneer de elektrolyttemperatuur tussen 50 en 80° C ligt (hogere elektrolytgeleidbaarheid, zonder de afbraak van componenten te induceren). Om verspilling van elektriciteit in een afzonderlijke verwarmingseenheid te voorkomen, is verwarming uitsluitend afhankelijk van het opvangen van verspilde warmte uit elektrolysereacties en een

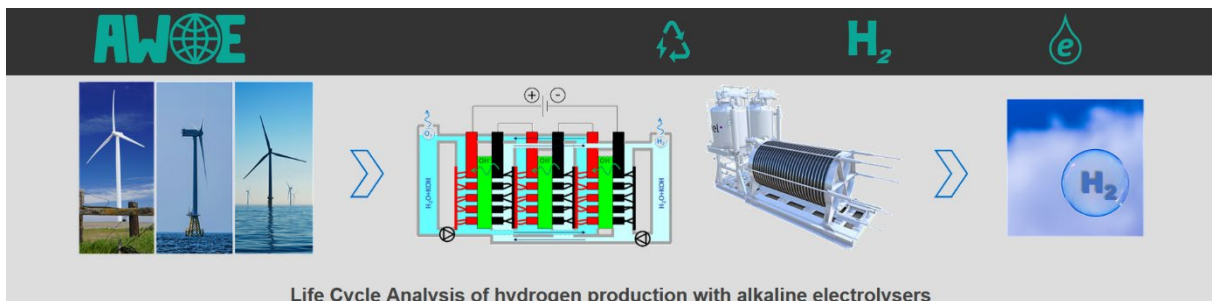
koelsysteem vermijdt meer dan 80 °C tijdens volledige belasting in een warme omgeving. Maar bij het verminderen van de belasting is de reactiewarmte laag en kan het bereiken van 50 °C een uitdaging worden.

Omgaan met deellast door middel van operationele strategie

Om om te gaan met stroomschommelingen en excursies onder de limiet van 10% tot 25%, zijn externe strategieën vereist:

- Ofwel het absorberen van stroomschommelingen door middel van energieopslagapparaten
- Of het implementeren van een elektrolyser stack sub-divisie

Dit laatste bestaat uit het bedienen van een subset van de totale elektrolyser, zodat de belasting hoog blijft op dat deel van de elektrolyser. Het beheer van load split en thermische toestand, evenals de registratie van individuele gebruiksgeschiedenis voor elke stack-subset bij het omgaan met elektrolyserveroudering en onderhoud, worden de moeilijkheden.



Levenscyclusanalyse van waterstofproductie met alkalische elektrolyzers

Geschreven door [Vincent Knop](#)

Gepubliceerd op 10 januari 2022

Waterstof wordt beschouwd als een schone brandstof of een schone energiedrager omdat het koolstofvrij is en kan worden opgewekt uit water en hernieuwbare elektriciteit. Maar zelfs als het volledig is gemaakt van hernieuwbare bronnen en daarom groen waterstof wordt genoemd, heeft het nog steeds een impact op het milieu door de middelen die nodig zijn om de hernieuwbare elektriciteitsoogstmachine en de elektriciteits-naar-waterstofomzetter, namelijk een elektrolyser, te bouwen.

Er zijn 3 soorten elektrolyzers: alkalisch, polymeerelektrolytmembraan en vast oxide. [Alkalische elektrolyzers](#) zijn de meest volwassen technologie en de meest voorkomende in industriële toepassingen. Het is met name al geïmplementeerd in waterstoftankstations voor voertuigen, waarbij waterstof direct op aanvraag wordt geproduceerd op het uitgiftepunt.

De milieu-impact van groene waterstof is minstens de som van de milieu-impact van hernieuwbare elektriciteit en van die van elektriciteitsomzetting in waterstof. [Windturbines](#) zijn een bron van hernieuwbare elektriciteit met een lage milieu-impact op een volledige [levenscyclus](#), waardoor ze een favoriete oplossing zijn om groene waterstof te produceren. Om de analyse van windturbines aan te vullen, is een levenscyclusanalyse op alkalische elektrolyzers noodzakelijk.

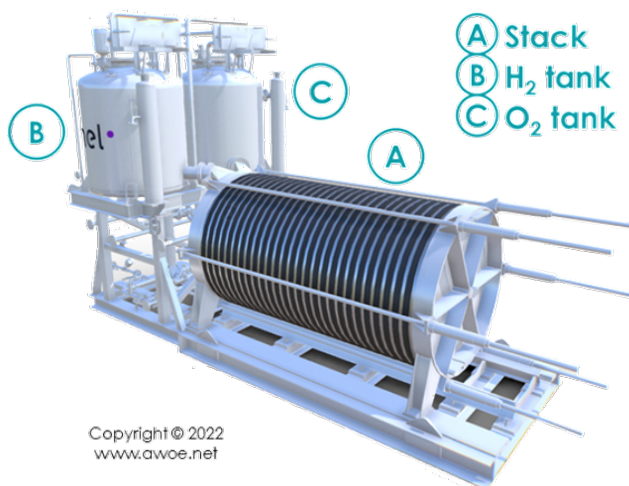
Gedeeltelijke inventarisatie van een alkalische elektrolyse-installatie

Alkalische waterelektrolyse splitst watermolecuul H_2O in waterstof H_2 en zuurstof O_2 verbruikt elektriciteit. Het werkt echter niet op leidingwater om minerale afzetting en ongecontroleerde elektrochemische reacties te voorkomen. In plaats daarvan is een alkalisch elektrolyt gemaakt van een mengsel van gezuiverd water en een sterk alkalisch additief (over het algemeen KOH met ongeveer 25% mas) de ionendrager. Het eerste element in een alkalische elektrolyse-installatie is daarom een waterzuiveraar, die een energetische kost heeft.

De watervraag voor H_2 -productie is ongeveer $1 \text{ l} / \text{Nm}^3 H_2$ (1 m^3 bij 1 atm , $20^\circ C$) of $8,3 \text{ l} / \text{kg} H_2$ eenmaal gezuiverd, waarvoor $9\text{-}10 \text{ l}$ ruw water nodig is.

Pompen gemaakt van materiaal dat bestand is tegen de corrosie van een sterk alkalisch mengsel (een soort polymeer) circuleren de elektrolyt in de stapel elektrolytische cellen. De cellen zelf zijn gemaakt van een frame, elektroden, elektrische verbindingen en een membraan/separator. Een pakking plaatst tussen de cellen in de stapel om lekkage te voorkomen.

Eenmaal geproduceerd, worden waterstof en zuurstof elk naar een droger en vervolgens naar een tank geleid. Bij elektrolyseruitlaat staat waterstof op een druk van 5 tot 30 bar. Verdere compressor kan nodig zijn voor opslag of afgifte, maar dit valt buiten het bereik van de huidige alkalische elektrolyseranalyse.



Lay-out van een alkalische elektrolyser

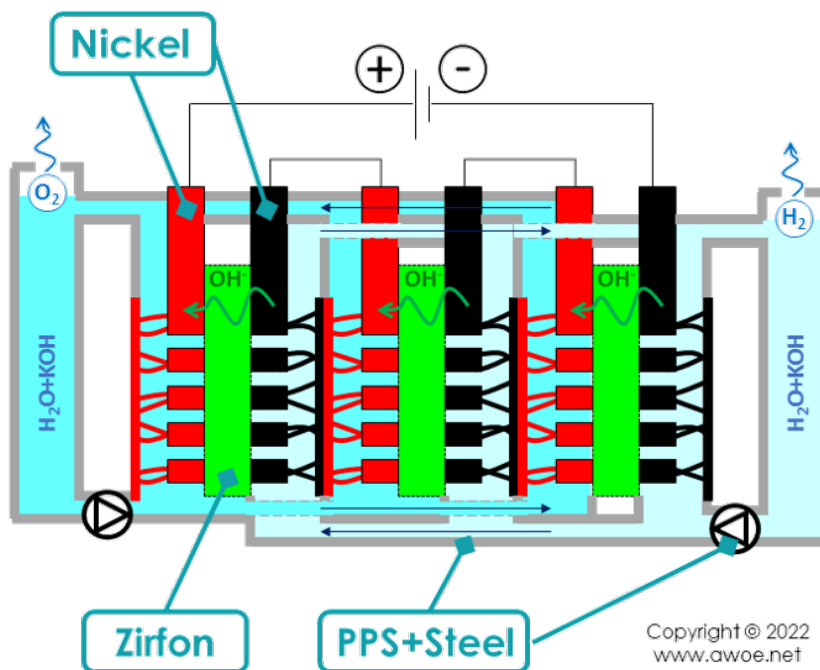
De elektrolytische cellen gebruiken laagspanningsgelijkstroom (een paar honderd volt) terwijl het elektriciteitsnet (of een direct gekoppelde windturbine) hoogspanningswisselstroom levert (minstens tientallen kilovolts). Dienovereenkomstig omvat de elektrolyserinstallatie een transformator en een gelijkrichter met vermogenselektronica.

Levenscyclusanalyse

De milieu-impact van de elektrolyser is het gevolg van de winning van materialen voor elk van de hierboven genoemde subelementen, de productie van subelementen uit grondstoffen, evenals de milieubelasting die wordt geërfd van de elektriciteitsproductie (al dan niet hernieuwbaar).

De belangrijkste materialen in een alkalische elektrolyser zijn:

- Staal voor alle tanks, leidingen, celframeversterking en containers
- Nikkel voor de elektroden
- Zirfon voor het diafragma
- Een sterke alkali, over het algemeen kaliumhydroxide (KOH)
- Een corrosiebestendig polymeer, bijvoorbeeld polyfenyleensulfide, als hoofdbestanddeel voor het frame en/of voor de pomp
- Aluminium en koper in de vermogenselektronica
- Polytetrafluorethyleen (PTFE) voor de pakking tussen de cellen



Belangrijkste materialen in de stapel van een alkalische elektrolyser

Vanwege de relatieve hoeveelheden en de milieu-impact van grondstofwinning zijn staal en nikkel de meest beïnvloedbare materialen. Het relatieve aandeel van staal en nikkel in de elektrolyserstapel varieert op basis van het ontwerp, maar het gebruik van staal voor

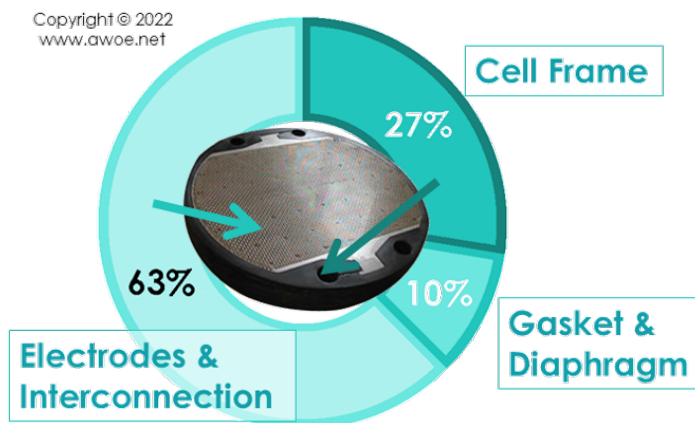
leidingen, tanks en elektrolysercontainers maakt het de belangrijkste component op de totale installatie.

Afhankelijk van hoe en waar de installatie wordt geïmplementeerd, kan beton voor fundering ook een belangrijke bijdrage leveren.

Elektrolyser stack

De impact van de elektrolyserstack, d.w.z. de kernstroom-naar-waterstofomvormer, hangt af van het ontwerp, de grootte (er is een schaalvoordeel voor MW-eenheden in vergelijking met kW-eenheden) en meestal de bedrijfsstrategie. De meeste installaties zijn ontworpen voor een levensduur van 20 jaar. Binnen dit tijdsbestek maakt het gebruik van de elektrolyser 2000 of 8000 uur per jaar een enorm verschil op de milieu-impact, omdat de absolute emissies voor de funderingen, de tanks, de leidingen of de container identiek zijn, ongeacht de hoeveelheid geproduceerde waterstof. In de huidige analyse worden gegevens gepresenteerd voor 8000h/j exploitatie, ervan uitgaande dat er enig netwerkbeheer of energieopslag is om de hernieuwbare elektriciteitsvoorziening (bijna) het hele jaar door in stand te houden.

Lange bedrijfsuren per jaar gaan gepaard met meer veroudering van cellen als gevolg van het corrosieve effect van de alkalische elektrolyt. Om een hoog rendement te behouden, moeten de elektroden en het membraan periodiek worden vervangen of gereviseerd. Meer dan 20 jaar met 8000 h/j zijn 1 tot 3 ingrepen aan elektroden en membraan gepland op recente eenheden. In een dergelijk geval wordt de impact van grondstoffen, productie- en vervangingswerkzaamheden geboekt als operationele emissies in plaats van bouwemissies (zie sectie Elektrolyserinstallaties). Een ingreep aan elektroden en membraan gaat over het algemeen gepaard met een spoeling van de elektrolyt die ook periodieke vernieuwing vereist.



Verdeling van de milieubelasting binnen een alkalische elektrolyserstapel

Met deze aannames is de milieu-impact van de schoorsteenconstructie:

- 20-35% is het celframe (polymeer + staal)
- Bijna 10% is pakking en membraan
- De rest zijn de elektroden en elektrische interconnectie

Meer dan de helft van de impact zijn de elektroden vanwege de materialen en productiemethoden die zijn geselecteerd om de stackefficiëntie te optimaliseren. Geactiveerde coatings op geperforeerde of poreuze elektroden vereisen arbeids-/energie-intensieve processen.

Elektrolyserinstallatie

Vanwege de lage stroomdichtheid die wordt gebruikt in alkalische elektrolyzers, is de celstapel enorm in vergelijking met de andere apparaten in de fabriek. Dienovereenkomstig wordt de bouw van de plant grotendeels gedomineerd door de bouw van de cellen. Bij het uitsluiten van de funderingen is het relatieve gewicht van de schoorsteen op de milieu-impact van de constructie ongeveer 90%, met vermogenslektronica als verre tweede.

Buiten de bouw wordt de milieu-impact van de werking, met uitzondering van de elektriciteitsvoorziening, ook gedomineerd door de elektrolyserstapel, voornamelijk als gevolg van de periodieke vervanging van elektroden. De impact verdeeld over de volledige levenscyclus is rond:

- 70% tijdens de bouwfase
- 28% tijdens de exploitatiefase
- 2% bij demontage en verwijdering

Koolstofvoetafdruk van de elektrolyserinstallatie

Nog steeds exclusief elektriciteitsvoorziening, varieert de totale koolstofvoetafdruk van de elektrolyser van 43 tot 287 gCO_{2,eq} / kgH₂ onder de gepubliceerde gegevens. De onderkant van het bereik heeft betrekking op installaties waarvoor blijkbaar geen elektrodevervanging is verantwoord, terwijl hogere aantallen meerdere vervangingen hebben gedurende de levensduur van 20 jaar. Een smaller bereik van 86 tot 138 gCO_{2,eq}/kgH₂ lijkt een consensus te zijn over installaties met een enkele mid-life elektrodevervanging, waarbij equivalente emissies dalen wanneer de installatie groter wordt.

Efficiëntie en elektrisch verbruik

Hoewel het koolstofvoetafdrukbereik van de elektrolyserinstallatie breed lijkt, heeft het slechts een secundaire invloed op de volledige koolstofvoetafdruk van elektrolytische waterstof vanwege de vereiste hoeveelheid elektriciteit.

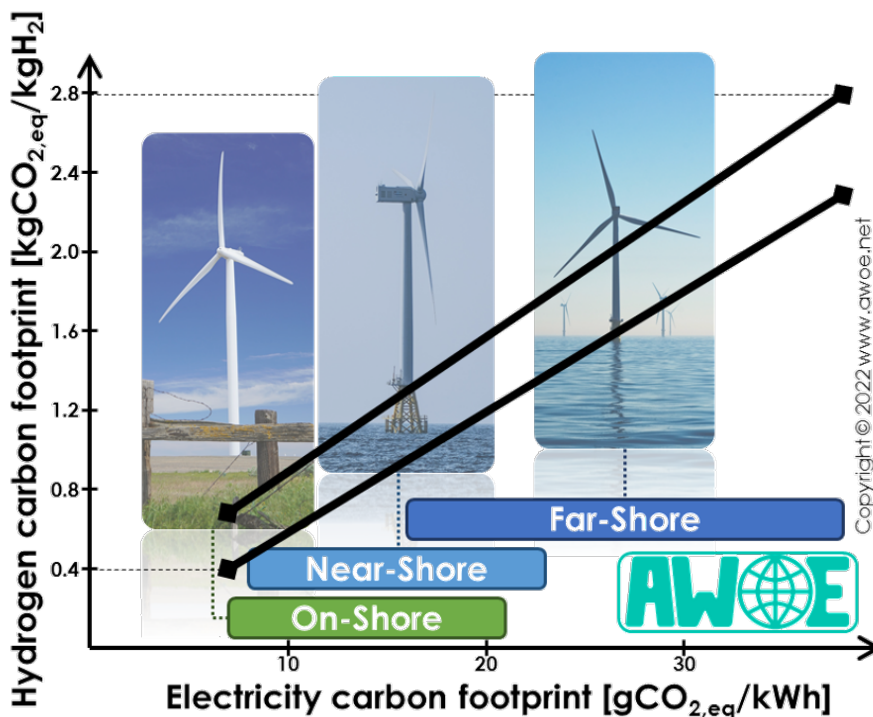
De belangrijkste reden voor het grote elektriciteitsverbruik is de energie die nodig is om een watermolecuul te splitsen: ~39,5 kWh/kgH₂, ongeveer 1,2 keer de energie-inhoud van het resulterende H₂-molecuul. Bovendien werken alkalische elektrolyzers met een efficiëntie van 70-80% op stapelniveau, maar met een efficiëntie van 60-67% op fabrieksniveau. Het resultaat is een specifiek energieverbruik van 59-66 kWh/kgH₂ (ongeveer 1,75 tot 2 keer de energie-inhoud van het resulterende H₂-molecuul).

Koolstofvoetafdruk van H₂ op basis van elektriciteit van windturbines

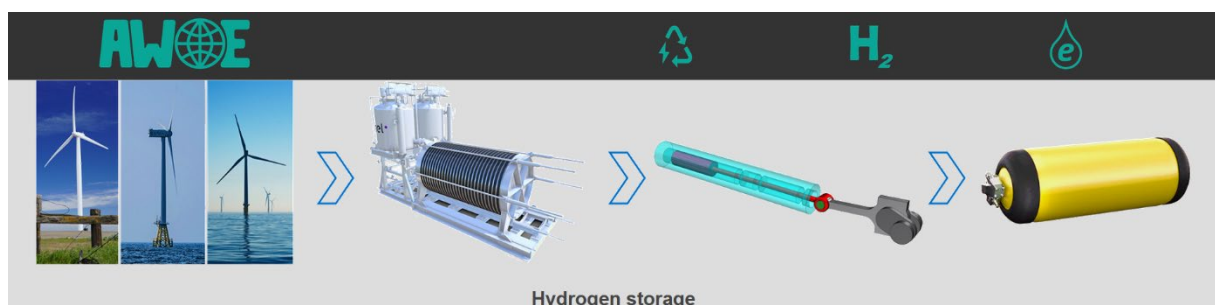
De koolstofvoetafdruk van elektriciteit opgewekt door windturbines is 7-38 gCO_{2,eq}/kWh (zie [Levenscyclusanalyse van windturbines](#)). Als gevolg hiervan heeft de elektriciteitsvoorziening

voor waterelektrolyse alleen al een koolstofvoetafdruk van 413-2508 gCO_{2,eq} / kgH₂, aanzienlijk meer dan de koolstofvoetafdruk van de elektrolyser, terwijl windturbines tot de schoonste bron van hernieuwbare elektriciteit behoren.

In combinatie met de elektrolyserimpact is de totale koolstofvoetafdruk van waterstofproductie dan 456-2795 gCO_{2,eq}/kgH₂, waarvan 90% betrekking heeft op de elektriciteitsvoorziening. Ter referentie, de koolstofvoetafdruk van de meest voorkomende manier om waterstof te produceren, Steam Methane Reforming (SMR) is 12-15 kgCO_{2,eq} / kgH₂. Elektrolyse waterstof aangedreven door windturbines is daarom 80-97% schoner dan de huidige referentie H₂ productiemethode.



Koolstofvoetafdruk van groene waterstof afkomstig van elektriciteit van windturbines met een alkalische elektrolyser



Waterstofopslag

Geschreven door [Vincent Knop](#)

Gepubliceerd op 5 februari 2022

De zeer specifieke eigenschappen van waterstof maken de opslag ervan onconventioneel. Bij omgevingstemperatuur is het een extreem licht gas dat onder zeer hoge druk (honderden bar) moet worden opgeslagen om een betekenisvolle massa binnen een redelijk volume te hebben. Omdat de liquefactietemperatuur -253 °C is, vereist opslag in vloeibare vorm cryogene tanks. Het vermogen van waterstof om te adsorberen aan ander materiaal maakt ook opslag als vaste stof mogelijk.

Of het nu gaat om compressie, liquefactie of adsorptie/desorptie, de opslagprocessen zijn energie-intensief. Bovendien leiden extreme omstandigheden (hoge druk, lage temperatuur) en het vermogen van waterstof om door tal van materialen te dringen tot zeer specifieke uitdagingen.

De selectie van de opslagmethode is afhankelijk van de toepassing. Voor wegvoertuigen wordt het tankvolume beperkt door voertuigverpakkingen, terwijl een grote waterstofmassa de voorkeur heeft om een groot bereik te bieden. Voor stationaire toepassingen is het gewicht minder een probleem, terwijl lekkage/ spoelpreventie om waterstofaccumulatie te voorkomen kritischer is. Deze zeer verschillende vereisten kunnen leiden tot verschillende opslagoplossingen.

Opslag als gecompriëerd gas

Waterstofopslag in gasvorm is momenteel de meest gebruikelijke aanpak omdat het een lichte, goed begrepen en relatief economische opslagmethode is. Dergelijke tanks worden ingedeeld in typen op basis van hun samenstelling en gerelateerde drukcapaciteiten:

- Type I: Volledig metalen constructie met druk tot 300 bar
- Type II: Meestal metaal met wat composiet overwrap in de hoepelrichting, met een drukvermogen van 200 bar
- Type III: Metalen voering (binnenlaag in contact met waterstof) met een complete composiet overwrap en een drukcapaciteit tot 700 bar
- Type IV: Volledig composiet constructie met verschillende materialen voor de voering en de overwrapping, geschikt tot 700 bar

De materiaalkeuze voor de tank beïnvloedt zowel de tankprijs als het gewicht. Type I tanks zijn de goedkoopste maar zijn zwaar; Eenmaal volledig gevuld, vertegenwoordigt waterstof slechts ongeveer 1,7% van het totale installatiegewicht. Type II-tanks zijn bijna net zo goedkoop en breiden het waterstofgehalte uit tot $\sim 2,1\%$ van de totale massa. Overschakelen naar tanks met een volledige composiet overwrap vergroot het drukvermogen, vermindert het gewicht, maar verhoogt ook de stukkosten met een factor 8-10. Een Type III-tank kan gemakkelijk 700 bar bereiken en een waterstofgehalte van 4,2% van de totale massa. Ten slotte hebben Type IV-tanks dezelfde drukmogelijkheden en prijs als Type III-tanks, maar zijn ze lichter, met een waterstofgehalte van 5,7% in massa in de tanks van een Toyota Mirai.

Aangezien 200 bar de minimale werkdruk is voor gecompriëerde gastanks, zijn er altijd en economische en ecologische extra kosten door waterstofcompressie zelf (zie [Levenscyclusanalyse van waterstofcompressie](#)).

Hoge druk dicteert ook dat de tankvorm een cilindrische eenheid is, omdat dit het beste compromis is tussen robuustheid tot hoge druk en een acceptabele verpakking voor integratie in voertuigen.

Type III tanks

Type III-tanks zijn composiet hogedruk waterstofopslagtank gemaakt van een metalen binnenlaag en een koolstofvezel gewikkelde buitenlaag. De voering (de binnenste laag) is over het algemeen gemaakt van aluminiumlegering 6061 vanwege de lage gevoeligheid voor verbrossing (oplossen en vangen van H-atomen in metaal, wat leidt tot verzwakking van metaaleigenschappen). Metalen eindbazen kunnen van aluminium of staal zijn. Andere aluminiumlegeringen zoals 2024 of 7075 hebben ook een goede weerstand tegen verbrossing, maar zijn gevoelig voor spanningscorrosie zodra er 3,5 ppm waterdamp in de waterstofstroom aanwezig is.

De koolstofvezels van de buitenste laag worden in een spiraalvormig en hoepelpatroon rond de binnenste laag gewikkeld om de structurele sterkte van de voering te vergroten door deze samen te drukken. Tijdens het vullen en bij hoge druk worden de gaskrachten op de voering meestal overgedragen als tractie in de vezels. Een epoxyhars lijmt vezels aan elkaar.

De vermoeiingssterkte van Type III-tanks kan worden verbeterd met autofrettagage: een interne druk voorbij de elastische limiet wordt toegepast op de aluminium voering om deze permanent te vervormen en permanente spanning in de koolstofvezels te creëren terwijl ze in hun elastische bereik blijven. Zodra de druk wordt vrijgegeven, creëren de koolstofvezels een compressiespanning in de lege voering terwijl de trekspanning in de vezels behouden blijft. Tijdens het tanken compenseert de compressiespanning gedeeltelijk het waterstofdrukeffect op de voering, wat op de lange termijn het effect van vul- / ledigingscycli op materiaalmoeheid vermindert.

Voor een Type III-tank die 5 kg waterstof bij 700 bar kan opslaan, is het tankvolume ongeveer 126 L en het tankgewicht (exclusief waterstof) ongeveer 151 kg.

Type IV tanks

Type IV-tanks gebruiken twee lagen synthetische materialen, namelijk een polymeer met hoge dichtheid voor de binnenste laag en koolstofvezel voor de buitenste laag. Toevoeging van glasvezel als derde laag rond de koolstofvezellaag is al onderzocht door een tankleverancier om verdere versterking toe te voegen.

De vervanging van de metalen binnenlaag door een polymeer binnenlaag verwijdert de verbrossingproblemen die zich voordoen bij Type I-III-tanks. Een zorgvuldige selectie van het linerpolymeer is echter vereist om lekken te beperken, omdat de buitenlaag van koolstofvezel niet ondoordringbaar is. Geschikte polymeren zijn polyethyleen, nylon-6 ook bekend als polyamide 6 (PA6) of PA6-gebaseerde composieten.

De buitenste laag is een koolstofvezelfilament dat zich rond de binnenste laag wikkelt en ingebed is in een epoxyhars die vezels aan elkaar lijmt. Deze buitenste laag kan tot 25 mm dik zijn. Een werking bij hoge temperatuur is noodzakelijk voor een goede verbinding van de hars en filamenten over hun hele lengte.

De koolstofvezelfilamenten comprimeren de binnenste laag, zodat de uitzetting van de binnenste laag bij het vullen wordt verminderd. De vezels werken alleen in verlenging tijdens het vullen van de tank en het vasthouden van hoge druk. Dienovereenkomstig zijn er 2 hoofdbreukmodi: filamentbreuk en delaminatie tussen filamenten en hars. Filamentbreuk is de

belangrijkste storingsmodus naast de binnenste laag, terwijl delaminatie de belangrijkste storingsmodus is op de buitendiameter.

Het overwicht van delaminatie op de buitenste lagen heeft het voordeel dat de gevoeligheid van de tank voor schokken wordt verminderd. Effecten beschadigen meestal vezels, maar op de buitendiameter, terwijl vezelbreuk niet de oorzaak is van falen in dit gebied.

De buitenste laag is de belangrijkste kostenpost in een Type IV-tank, maar ook de belangrijkste bron van milieu-impact. De selectie van de koolstofvezel en de productiemethode zijn daarom 2 zeer actieve onderzoeksgebieden om de kosten en milieubelasting te verminderen.

Voor een Type IV-tank die 5 kg waterstof bij 700 bar kan opslaan, is het tankvolume nog steeds ongeveer 126 L, maar het tankgewicht (exclusief waterstof) is teruggebracht tot 96 kg.

Opslag als vloeistof

In vergelijking met gasvormige toestand heeft de vloeibare toestand altijd een aanzienlijk hogere dichtheid. Voor elk vloeibaar gas onder omgevingsomstandigheden is koeling om vloeibare toestand te bereiken de meest voor de hand liggende benadering. Wanneer echter intensieve koeling nodig is (zoals voor waterstof), kan een combinatie van koelen en onder druk zetten een betere optie zijn. Ten slotte biedt waterstof nog een derde optie: adsorptie op een andere vloeistof die vloeibaar is onder omgevingsomstandigheden.

Cryogene opslag

Het opslaan van waterstof in vloeibare vorm bij omgevingsdruk wordt cryogene opslag genoemd omdat waterstof alleen vloeibaar is onder -253 °C bij omgevingsdruk. Een dergelijke lage temperatuur impliceert zowel een groot energieverbruik om het vloeibare stadium te bereiken als ongebruikelijke vereisten voor opslagtanks om herverdamping te voorkomen.

Cryogene tanks voor opslag van vloeibare waterstof zijn niet ontworpen om druk te weerstaan, maar om een uitzonderlijk niveau van isolatie te bieden om waterstof zo lang mogelijk vloeibaar te houden. Hun gebrek aan drukvermogen betekent dat elke drukopbouw als gevolg van verdamping moet worden ontlucht. De verliezen die gepaard gaan met een dergelijke ontluchting worden afkoken genoemd.

Wat de kwaliteit van de isolatie ook is, er zal warmteoverdracht plaatsvinden en de tank zal volledig worden geventileerd op een voldoende lange tijdschaal. Daarom is cryogene opslag, ondanks het feit dat het een volwassen technologie is, geen geschikte methode voor langdurige opslag of opslag voor een toepassing met onbekende vertraging tot consumptie.

Hoe groter de tank, hoe lager de relatieve invloed van warmteverliezen. De tankvorm is ook belangrijk om verliezen te beperken: bolvormige tanks zijn optimaal omdat ze het kleinste externe oppervlak hebben voor een bepaald opslagvolume. Daarom zijn grote bolvormige tanks de voorkeursoplossing voor industriële toepassingen. Het opslaan van 5 kg waterstof in een bolvormige tank met 25 mm isolatiemateriaal eromheen zou ongeveer 94 L beslaan en ongeveer 67 kg wegen.

Koudgecomprimeerde en cryo-gecomprimeerde opslag

Koudgecomprimeerde en cryo-gecomprimeerde opslag is een hybride methode tussen cryogene opslag en hogedrukopslag. Door boven de 300 bar te werken, kan opslag werken tussen -233 en -193 °C, waardoor het warmteverliesprobleem enigszins wordt verminderd, maar vooral de waterstofdichtheid wordt verhoogd.

Een bijkomend voordeel komt van het vermogen van de tank om druk te weerstaan, zodat het afkoken grotendeels kan worden verminderd, zo niet volledig geëlimineerd, waardoor de duur van de opslag aanzienlijk wordt verlengd.

Schattingen van het Amerikaanse ministerie van Energie geven aan dat het opslaan van 5 kg bij 500 bar en -206 °C een tank met een capaciteit van ongeveer 65 L zou vereisen (bijna een winst van 50% ten opzichte van gecomprimeerde waterstof bij 700 bar) met een gewicht van ongeveer 71 kg (ongeveer 25% lichter dan het equivalente type IV zuivere compressie-item).

Vloeibare organische waterstofdragers

In plaats van waterstof op te slaan als een zuivere verbinding, is het mogelijk om sommige klassen vloeistoffen, over het algemeen grote aromatische koolwaterstoffen, te hydrogeneren en te dehydrogeneren. Deze vloeistoffen hebben een hoge dichtheid en deze dichtheid wordt bijna niet beïnvloed door de toevoeging van waterstof.

Hoewel vloeibare organische waterstofdragers (LOHC) over het algemeen worden beschouwd als transporteren van waterstof over lange afstanden in bestaande pijpleidingen, kunnen ze ook worden gebruikt voor opslag. Omdat waterstof is geïntegreerd in een bekende koolwaterstof, zijn de behandeling en apparatuur identiek aan de bestaande infrastructuur op basis van ruwe olie.

Het hydrogeneringsproces is exotherm (geeft warmte af) en loopt bij verhoogde druk (30-50 bar) en gematigde temperatuur (150-200 °C) over een katalysator. Het dehydrogeneringsproces is endotherm (absorbeert warmte), loopt ook bij verhoogde druk en bij ongeveer 100 °C hogere temperatuur, opnieuw over een katalysator. De warmte-eis om waterstof vrij te maken maakt het ongeschikt voor mobiele toepassingen, terwijl de grote hoeveelheden die nodig zijn om grote hoeveelheden waterstof op te slaan een gevaar voor de gezondheid kunnen vormen.

Opslag als vaste stof

Waterstof zelf kan realistisch gezien niet worden opgeslagen als een vaste stof, maar het kan worden geabsorbeerd op sommige klassen van vaste stoffen. Er zijn twee hoofdklassen: Metal Organic Frameworks en Metal Hydrides.

Metaal-organisch raamwerk

Metaalorganische raamwerken (MOF's) zijn het solide equivalent van LOHC, maar met het belangrijkste nadeel dat waterstofopslag alleen bij zeer lage temperaturen (ongeveer -200 °C) mogelijk is. Daarom zijn alle vereisten van cryogene opslag van toepassing, terwijl drukcapaciteit (20-30 bar) vereist is. Het systeemgewicht en -volume zijn vergelijkbaar met

een type IV gecompriemde gastank: voor 5 kg opslag is het tankgewicht ongeveer 91 kg en het tankvolume ongeveer 125 l.

Metaalhydriden

Metaalhydriden zijn verbindingen gemaakt van metaal en waterstof die overvloedig en betaalbaar zijn. Het waterstofgehalte kan worden verhoogd of verlaagd om waterstof op te slaan of vrij te geven.

Terwijl het ruwe opslagmateriaal massafracties van waterstof boven de capaciteiten van de gecompriemde gastank kan absorberen, vereist het beheer van de opslag- / afgiftekinetiek gecontroleerde warmtefluxen in een stevige tank, meestal gemaakt van staal. De complete apparatuur is daarom over het algemeen zwaarder dan een gecompriemde gastank voor een bepaalde hoeveelheid opgeslagen waterstof.

Een veel voorkomend basismetaleel voor metaalhydriden is magnesium, dat wordt gecombineerd met andere zoals nikkel om legeringen te maken die de opslag- / afgiftekinetiek en / of opslagcapaciteit verbeteren.

In het geval van MgH_2 geeft waterstofabsorptie 75 kJ/mol warmte af, terwijl het vrijgeven van de waterstof enige warmte toevoeging vereist. Op een mobiele applicatie met een verbrandingsmotor of een brandstofcel zijn er warmtebronnen uit het voortstuwingssysteem die als warmtebron kunnen worden gebruikt. De kinetiek van waterstofafgifte is echter vrij langzaam en afhankelijk van de warmteflux, zodat waterstofafgifte te langzaam kan worden om de werking van de warmtebron te behouden, waardoor een volledige uitschakeling ontstaat.

Opslag van chemische stoffen

Omdat waterstof zeer specifieke eigenschappen het moeilijk maken om op te slaan, is een alternatief om de bijbehorende energie op te slaan in andere chemische verbindingen die zonder veel verliezen uit waterstof kunnen worden geproduceerd. Het toevoegen van waterstof aan stikstof (uit de lucht) produceert ammoniak, terwijl het toevoegen van waterstof aan koolstofbronnen (meestal CO of CO₂) leidt tot methaan of methanol.

Hoewel methaan (het hoofdbestanddeel van aardgas) en ammoniak nog steeds gassen zijn onder omgevingsomstandigheden, zijn ze gemakkelijker op te slaan als gecompriemde gassen (methaan bij 250 bar bevat evenveel energie als waterstof bij 700 bar) of vloeibaar gemaakt bij lage temperatuur (ammoniak is vloeibaar bij -33 °C, vergeleken met -253 °C voor waterstof). Hun handling is bekend omdat ze al in verschillende industrieën worden gebruikt.

Methanol heeft het voordeel dat het een vloeistof is onder omgevingsomstandigheden, zodat het kan worden opgeslagen in een eenvoudige brandstoftank (op voorwaarde dat de compatibiliteit van polymeer en rubber is gecontroleerd). De aanwezigheid van koolstof en zuurstof in het molecuul impliceert echter een laag waterstofgehalte op massabasis.

Hoewel aantrekkelijk voor opslagdoeleinden, beperkt de chemische opslag de opties op gebruiksniveau. Waterstof is een zeer veelzijdige brandstof die kan worden gebruikt in zuigermotoren, turbinemotoren of brandstofcellen. De alternatieven hebben allemaal minder

voordelige eigenschappen die het gebruik ervan beperken tot specifieke toepassingen, waardoor de definitie van een enkele fit-for-all-oplossing wordt voorkomen.

Veiligheid van gecomprimeerde waterstoftanks

Opslagtanks voor gecomprimeerde waterstof zijn de meest gebruikte en de enige die worden verkocht voor gebruik door het grote publiek (Toyota Mirai, Hyundai Nexa), ze hebben de meest geavanceerde homologatieregels.

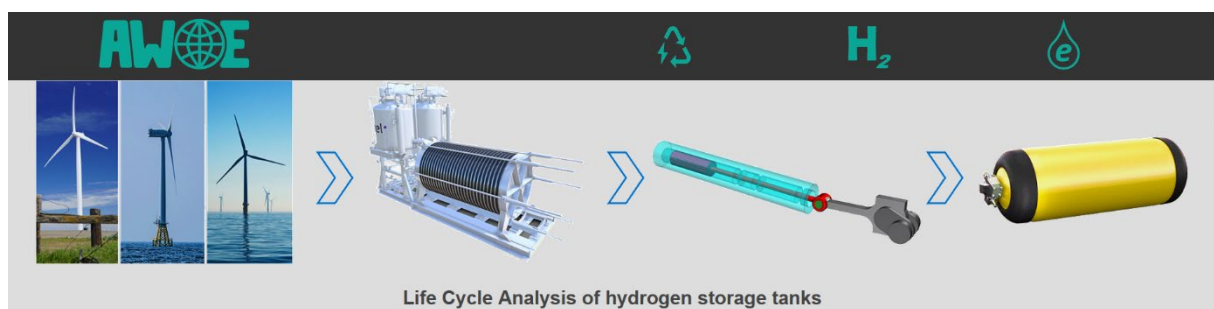
Hoewel het geen uitputtende lijst vormt, zijn de belangrijkste tests voor een hogedrukopslagtank:

- **Burst-testen:** water in de tank dwingen tot barsten, druk meten om de maximale drukmogelijkheden te definiëren. Homologatie vereist dat barsten alleen plaatsvindt na 200% (of 225% afhankelijk van de wetgeving) van de nominale druk (~ 1700 bar onder normale omstandigheden wordt vaak gemeld voor tanks met een nominale waarde van 700 bar). Terwijl de initiële composietmatrixstoring optreedt onder de nominale druk van de tank (ongeveer 400 bar onder normale omstandigheden voor een tank van 700 bar), treedt barsten op terwijl vezelbreuk domineert. Merk op dat hoge temperaturen de neiging hebben om tanks verder te verzwakken
- **Vermoeingstest:** het definiëren van het aantal cycli dat een tank kan overleven als gevolg van vullen / legen. Elke vulling zorgt voor uitzetting in de binnenste laag en tractie in de vezels, terwijl elke lediging compressie in de binnenste laag creëert en tractie in de vezels vrijgeeft. Op lange termijn veroorzaken deze cycli schade aan de voering, vezelbreuk, delaminatie tussen vezels en hars
- **Brandtesten:** waterstof moet veilig worden vrijgegeven door een klep in geval van omringende brand, waardoor explosies worden voorkomen
- **Penetratietest:** waterstoftank moet een kogelinslag zonder explosie overleven, hoewel geïnduceerde lekkage is toegestaan

Hogedrukopslagtanks moeten om veiligheidsredenen groter zijn dan hun nominale druk. Als een tank onder koude omstandigheden wordt gevuld met een bepaalde massa waterstof en vervolgens wordt blootgesteld aan een warmere omgeving, creëert gasverwarming extra druk omdat deze gevangen zit in een gesloten volume. Een tank van 700 bar kan daarom tot 825 bar ervaren onder hete omstandigheden (vandaar meldingen van barstdruk van ~ 1700 bar, d.w.z. ~ 200% van 825 bar).

Aangezien de omgevingstemperatuur zowel de druk in de tank als de mechanische prestaties van de tank beïnvloedt, vereisen alle homologatiewetgevingen tanktests tussen -40 °C en 85 °C voor een eerste tankvulling bij nominale druk en 15 °C.

Het vulproces zelf creëert temperatuurschommelingen tijdens het tanken die de bovenstaande limieten kunnen overschrijden als gevolg van het Joule-Thomson-effect. Een langzame tankbeurt zou dit risico verminderen, maar er is een tanktijd van ongeveer 4 minuten gespecificeerd om de tests relevant te houden met betrekking tot de werkelijke werking van lichte voertuigen.



Levenscyclusanalyse van waterstofopslagtanks

Geschreven door [Vincent Knop](#)

Gepubliceerd op 7 februari 2022

Omdat waterstofopslagtanks sterk verschillen in ontwerp, heeft hun productie ook aanzienlijk verschillende milieueffecten. Toch leidt het gebruik van geavanceerde materialen in elk geval tot een grotere milieubelasting dan een conventionele tank voor vloeibare brandstof.

Er zijn 3 soorten waterstofopslagtanks waarvoor voldoende gegevens zijn gepubliceerd om hun productie-impact te kwantificeren (zie [andere typen](#)):

- Type III-tanks voor opslag van gecomprimeerde waterstof, gemaakt van een aluminium voering en een composietwikkeling
- Type IV-tanks voor opslag van gecomprimeerde waterstof, gemaakt van een polymeervoering en een composietwikkeling
- Metaalhydridetanks voor opslag van vaste waterstof, gemaakt van een stalen container gevuld met metaalpoeder

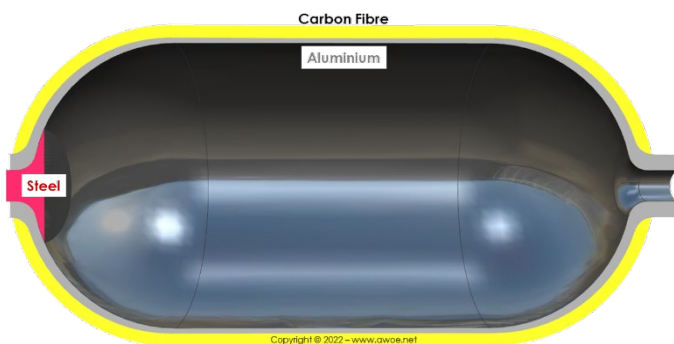
Terwijl type III- en IV-tanks waterstof opslaan bij hoge druk (350 of 700 bar), slaan metaalhydridetanks waterstof op bij tussendruk (~ 70 bar). Bijgevolg beperkt het gebruik van metaalhydridetanks tijdens bedrijf de hoeveelheid energie die wordt besteed aan waterstofcompressie (zie [Levenscyclusanalyse van waterstofcompressie](#)).

Type III- en IV-tanks zijn lichtere eenheden dan metaalhydridetanks, zodat ze de voorkeurskeuzes zijn voor de meeste mobiele toepassingen. Aan de andere kant maakt de lagere werkdruk van metaalhydridetanks en hun veel lagere risico op lekkage ze de beste optie wanneer veiligheidsproblemen de overheersende zorg zijn.

Type III tanks

Type III-tanks combineren aluminium met koolstofcomposiet om een tank te verkrijgen die zowel ondoordringbaar is voor waterstof als bestand tegen hoge druk. Aluminium staat in direct contact met waterstof, terwijl een composiet van koolstofvezels en epoxyhars zorgt voor de extra mechanische sterkte.

De grootste impact van het aluminium deel van de tank komt van de extractie van de grondstof, terwijl de productie van het koolstofcomposiet uit grondstoffen de belangrijkste emissiebron van de buitenste laag is. De milieukosten van de buitenste laag zijn afhankelijk van waar deze wordt geproduceerd, omdat elk land (of zelfs elke regio) een andere koolstofintensiteit voor stroom heeft. Dienovereenkomstig is een zeer breed scala aan koolstofintensiteitswaarden (van 6 tot 70 kgCO_{2,eq} per kg wikkelmateriaal) gerapporteerd voor de buitenste laag.



Schema van type III waterstoftank

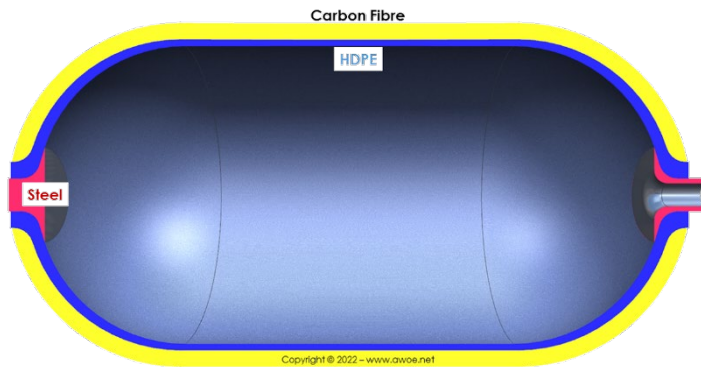
Een overzicht van in de handel verkrijgbare Type III-tanks toont 2 hoofdwerkdrukken: 350 en 700 bar. Voor een tank die 5 kg waterstof bij 350 bar kan opslaan, is het tankvolume 213,5 en het tankgewicht (exclusief waterstof) 91,6 kg. Voor een tank die 5 kg waterstof bij 700 bar kan opslaan, is het tankvolume 125,9 l en het tankgewicht (exclusief waterstof) 150,8 kg. Uitgaande van een koolstofintensiteit van 14,6 kgCO_{2,eq}/kg voor de productie van koolstofvezel, zijn de specifieke equivalente emissies voor elke tank respectievelijk 200 kgCO_{2,eq}/kg H₂-opslagcapaciteit en 329 kgCO_{2,eq}/kgH₂-opslagcapaciteit.

Type III tanks hebben een levenscyclus van 10 jaar met een tussentijdse inspectie om veiligheidsredenen. Afhankelijk van hoe vaak de vul- en ledigingsgebeurtenissen zijn, kunnen hun productie-emissies worden verspreid over een grote hoeveelheid waterstof.

Type IV tanks

Type IV-tanks hebben een vergelijkbare structuur als Type III-tanks, maar vervangen aluminium door een polymeer met hoge dichtheid als voeringmateriaal. Het doel is een vermindering van het tankgewicht.

De koolstofcomposietverpakking blijft het belangrijkste materiaal, dezelfde grote variatie in equivalente broeikasgasemissies is het gevolg van de locatie van composietproductie. Bovendien kiezen sommige fabrikanten voor een relatief dunne polymeerlaag en voegen ze een glasvezellaag toe rond het koolstofcomposiet om de mechanische eigenschappen te verbeteren. Toch kan glasvezel ook een materiaal zijn met een grote milieu-impact tijdens de productie.



Schema van type IV waterstoftank

Een overzicht van in de handel verkrijgbare Type IV-tanks toont een aanzienlijke gewichtstoename in vergelijking met Type III-tanks. Voor een tank die 5 kg waterstof bij 700 bar kan opslaan, is het tankvolume nog steeds 125,9 l, maar het tankgewicht (exclusief waterstof) wordt teruggebracht tot 96 kg. Uitgaande van een koolstofintensiteit van 14,6 kgCO_{2,eq}/kg voor de productie van koolstofvezel, zijn de specifieke equivalente emissies 221 kgCO_{2,eq}/kg H₂-opslagcapaciteit. Dienovereenkomstig zijn zowel het gewicht als de koolstofintensiteit van een type IV-waterstoftank die werkt bij 700 bar zeer vergelijkbaar met die van een type III-tank die werkt bij 350 bar. Het belangrijkste verschil is de vermindering van het opslagvolume met 40%, wat essentieel is voor lichte voertuigen. Maar vanwege de extra energiekosten (en milieukosten) van het comprimeren van waterstof van 350 tot 700 bar, is de Type III-tank misschien een betere keuze voor toepassingen die minder worden beperkt door verpakking.

Net als type III-tanks hebben type IV-tanks een levenscyclus van 10 jaar, zodat productie-emissies over veel tankgebeurtenissen kunnen worden verdeeld, waardoor de tankbijdrage aan elk evenement grotendeels wordt beperkt.

Metaalhydridetanks

In plaats van waterstof op te slaan als een gecomprimeerd gas, vertrouwen metaalhydridetanks op waterstofabsorptie in een metaalpoeder. Dienovereenkomstig vereisen dergelijke tanks niet zo'n hoge werkdruk (werking onder 100 bar).

De hoeveelheid waterstof die in het metaalvermogen kan worden opgeslagen, is echter beperkt tot enkele procenten massa, zodat een grote massa metaalhydride nodig is. Bovendien moet het metaalpoeder worden opgeslagen in een tank die bestand is tegen zowel het drukniveau als het gewicht van poeder, wat leidt tot een wijdverbreid gebruik van staal.

Een tank met 5 kg waterstof zou daarom ongeveer 716 kg wegen, waarvan 222 kg metaalhydride (en) en 278 kg de stalen behuizing is, binnen een volume van ongeveer 141 L.

Metaalhydriden zijn complexe materialen die energie-intensieve productiemethoden vereisen, hun koolstofvoetafdruk is groot. In combinatie met een grote massa staal heeft een dergelijke tank specifieke equivalente emissies van ongeveer 2057 kgCO_{2,eq}/kg H₂-opslagcapaciteit, d.w.z. 9 keer die van een Type IV-tank.

Hoewel het niet geschikt is voor auto's vanwege het gewicht, maken de veiligheidsvoordelen van matige druk en totale afwezigheid van lekken het geschikt voor stationaire toepassingen, zelfs in bevolkte gebieden. Maar omdat de technologie relatief nieuw is, is er geen duidelijke conclusie over hun levensverwachting, zodat het onmogelijk is om te zeggen of het vergelijken van 2057 kgCO_{2,eq}/kg H₂-opslagcapaciteit met 221 kgCO₂ een eerlijke vergelijking is.

Vergelijking met een brandstoftank voor vloeibare koolwaterstoffen

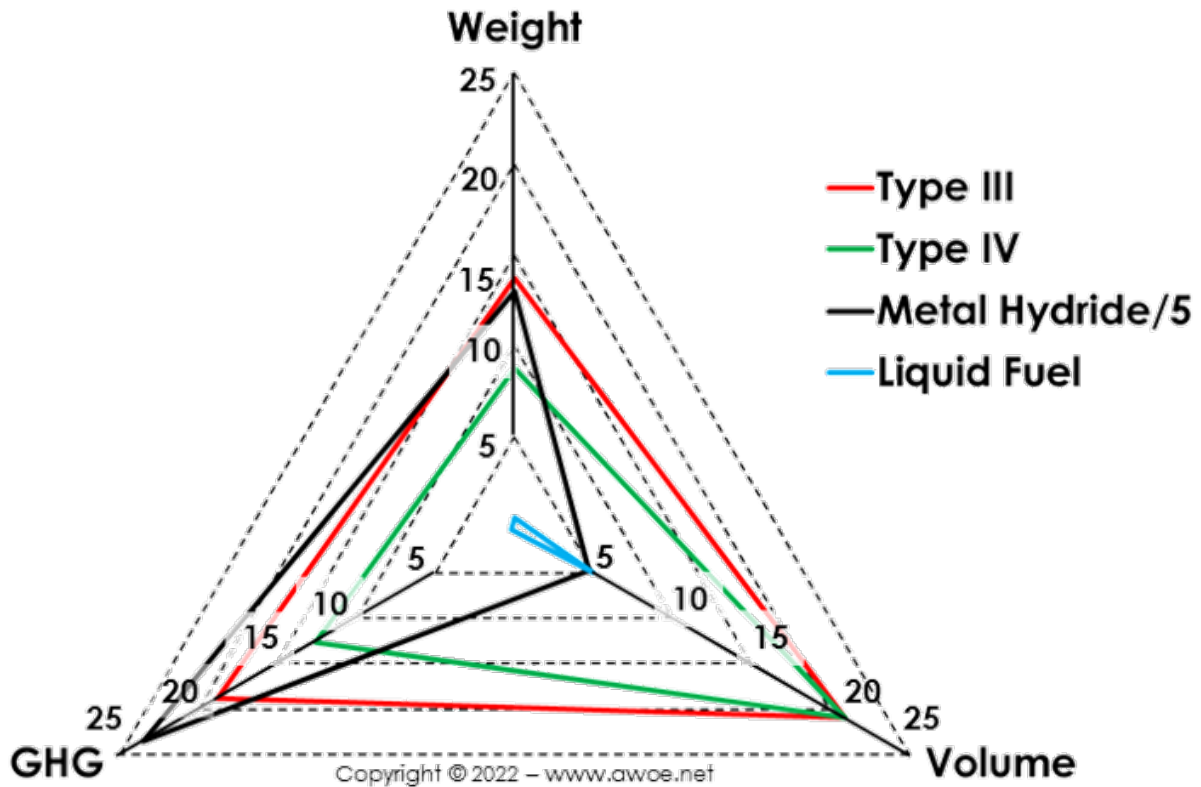
Bovenstaande getallen zijn verkregen door een tank te dimensioneren voor 5 kg waterstofopslag. Een eerlijke vergelijking met een conventionele benzinetank vereist een maat voor een vloeibare brandstoftank voor hetzelfde voertuigbereik.

Een MY2020 Toyota Mirai heeft een tankinhoud van 122 L (~5kg) en een nominale actieradius van 502 km (d.w.z. rijdt 103,6 km per kg H₂), terwijl een MY2021 Toyota Mirai een grotere tank heeft en een verbeterde specifieke actieradius van 115,5 km per kg H₂ (actieradius van 647 km). De nieuwste Toyota Mirai (MY2021) zou dus 577,6 km afleggen met 5 kg waterstof in de tank.

Het gemiddelde brandstofverbruik van nieuwe auto's in Europa is ongeveer 120 gCO₂/km, d.w.z. 5,17 L benzine per 100 km. Een actieradius van 577,6 km met benzine vereist dus een tank van 29,9 L.

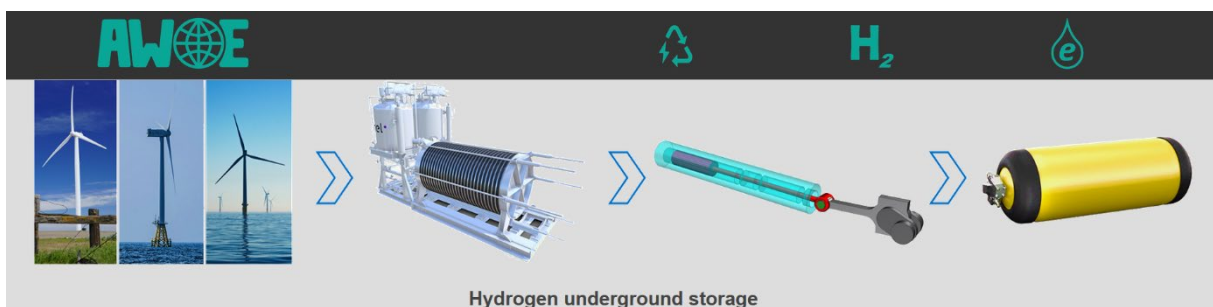
Een stalen brandstoftank van ongeveer 30 L voor benzine zou ongeveer 5,5 kg wegen, 88% is staal, de rest is verf / coating. Tankproductie zal echter nog eens 1,5 kg zachte staalplaat slopen tijdens het vormen en snijden, zodat de relevante ruwe staal massa ongeveer 6,5 kg is. Zodra rekening wordt gehouden met de uitstoot van grondstoffen en productieactiviteiten, stoot de inkoop van een dergelijke tank 17,4 kgCO_{2,eq} uit, d.w.z. het equivalent van ongeveer 3,5 kgCO_{2,eq} / kg H₂-opslagcapaciteit.

Een plastic brandstoftank van ongeveer 30 L voor benzine zou ongeveer 5,3 kg wegen, 90% is polyethyleen met hoge dichtheid, de rest is hars en ethylvynylalcohol. Het vormen van HDPE brengt geen aanzienlijk afval met zich mee, maar verbruikt meer elektriciteit. Zodra rekening wordt gehouden met de uitstoot van grondstoffen en productieactiviteiten, stoot de inkoop van een dergelijke tank 9,1 kgCO_{2,eq} uit, d.w.z. het equivalent van ongeveer 1,8 kgCO_{2,eq} / kg H₂-opslagcapaciteit.



Vergelijking van verschillende waterstofopslagtechnologieën met een vloeibare brandstoftank voor koolwaterstoffen

Dienovereenkomstig, ongeacht het geselecteerde type brandstoftank, heeft de opslagtank voor vloeibare koolwaterstofbrandstoffen een verwaarloosbare milieu-impact in vergelijking met elke technologie om waterstof op te slaan. Bovendien is de opslagtank voor vloeibare koolwaterstofbrandstoffen een stuk kleiner, een stuk lichter en kan deze vrijer worden gevormd om de verpakking in het voertuig te huisvesten.



Ondergrondse opslag op waterstof

Geschreven door [Vincent Knop](#)

Gepubliceerd op 8 mei 2022

Het gebruik van waterstof als energiedrager om de variaties van de productie van hernieuwbare energie in evenwicht te brengen, gaat ervan uit dat waterstof gedurende lange perioden (ten minste maanden) in grote hoeveelheden (ten minste TWh, tot PWh) kan worden

opgeslagen. Waterstof moet bovendien worden opgeslagen in de nabijheid van hernieuwbare energiebronnen en/of de locatie van de energievraag.

Hoewel het op elke locatie kan worden geïmplementeerd, is oppervlakteopslag van waterstof in tanks niet realistisch om aanzienlijke hoeveelheden op te slaan vanwege de kosten en landvereisten. Een aantrekkelijk alternatief is ondergrondse opslag in gunstige geologische formaties, met name zoutcavernes.

Ondergrondse gasopslag

Het opslaan van energie als gas is efficiënt, maar ook veeleisend in de ruimte, omdat gassen een lage dichtheid hebben. Het gebruik van oppervlaktetanks is beperkt tot kleine volumes vanwege tank- en landkosten. Het ondergronds opslaan van gas maakt het mogelijk om grote hoeveelheden op een veilige manier en gedurende lange perioden op te slaan voor seizoensgebonden balancerings.

Ondergrondse gasopslag is een wijdverspreide technologie voor aardgasopslag. Het wordt vooral gebruikt om de dynamische verschillen tussen productie en vraag op te vangen. Hoewel de aardgasproductie gedurende het jaar vrij constant is, is de vraag grotendeels verschoven naar de koude maanden. Overtollige aardgasproductie tijdens de warme maanden wordt ondergronds opgeslagen tot de volgende koude maanden. Zo'n opslag kan worden gedaan in uitgeputte olie- of gasvelden of in speciaal gebouwde grotten.

Terwijl aardgasopslag helpt bij het absorberen van vraagvariaties, zou waterstofopslag helpen bij het absorberen van productievariaties: overtollige elektriciteit uit perioden met een sterke hernieuwbare productie kan worden omgezet in waterstof en ondergronds worden opgeslagen. Waterstof kan dan direct worden gebruikt als een van waterstof afgeleide energiedrager (waterstof, ammoniak, methanol,...) of weer worden omgezet in elektriciteit tijdens perioden van zwakke hernieuwbare productie.

Werkingsprincipes van ondergrondse opslag

Elke ondergrondse gasopslag maakt gebruik van een caveerne of een poreuze geologische formatie om een gas op te slaan. Alleen formaties met een toplaag die ondoordringbaar is voor het opgeslagen gas zijn relevant om gaslekken te voorkomen.

Het opslagvolume wordt beschikbaar gesteld door het materiaal te verwijderen dat aanvankelijk aanwezig is in de caveerne of poreuze laag. Het leeg laten van een dergelijk volume zou een mechanische zwakte creëren die wordt veroorzaakt door het gewicht van alle bovenstaande lagen. Het voorkomen van scheuren en instorting vereist daarom een minimale druk in het opslagvolume. Naast de mechanische structuur is ook een minimale druk vereist om gaswinning te garanderen door eenvoudigweg het drukverschil tussen het ondergrondse opslagvolume en de ontvangstopervlaktank te gebruiken. Het maximum van deze 2 drukken bepaalt de minimale werkdruk van de opslag.

Specifiek gesproken over zoutcavernes, werkend onder de structurele minimale gasdruk creëert zoutdilatantie, waarbij het verschil tussen gasdrukeffect op wanden en spanning met het materiaal rond de caveerne buitensporig is, wat leidt tot microkraken en uitzetting van gesteentemateriaal naar de binnenste grot.

De hoeveelheid gas die ooit in het opslagvolume is achtergebleven om een minimale bedrijfsdruk te garanderen, wordt het kussengas genoemd. Om verontreiniging en scheidingsinspanningen tijdens de winning te voorkomen, is het kussengas over het algemeen identiek aan het nuttige gas. Het kussengas wordt gedefinieerd als een economische inventaris en maakt daarom deel uit van de initiële investering in de installatie.

Bij het toevoegen van gas in het opslagvolume neemt de druk toe, waardoor de volumewanden onder druk komen te staan. Elk type geëxploiteerde ondergrondse formatie heeft een maximale druk waarboven mechanische schade aan de structuur wordt gecreëerd, hetzij onmiddellijk of door vermoeiing gedurende meerdere vul- / ledigingscycli. Die maximale druk (minus een veiligheidsmarge) bepaalt de maximale hoeveelheid gas die in het opslagvolume aanwezig mag zijn.

Vanwege de vereiste voor een kussengas is de maximale massa gas in de opslag niet het massaopslagvermogen van de formatie. In plaats daarvan wordt de hoeveelheid opgeslagen gas, het werkgas genoemd, gedefinieerd als het verschil tussen de massa bij maximale druk en de massa bij minimale druk (totale massa minus kussengasmassa).

Opslagcapaciteit is niet de enige parameter die het nut van een opslagvolume definieert. Leverbaarheid of leveringscapaciteit is ook belangrijk, afhankelijk van het geplande gebruik van opgeslagen gas. Het wordt gedefinieerd als de snelheid waarmee gas kan worden gewonnen / geleverd / onttrokken aan de opslagfaciliteit. De leverbaarheid hangt zowel af van de kenmerken van de opslagapparatuur als van de laadtoestand. Een bijna volledig opslagvolume, d.w.z. gevuld onder hoge druk, zal sneller gas leveren dan een bijna "leeg" opslagvolume (druk in de buurt van minimaal toegestaan, niet in de buurt van nul). De aanvulling op de leveringscapaciteit is de injectiecapaciteit, de snelheid waarmee het opslagvolume kan worden gevuld. Het is ook afhankelijk van de laadtoestand met langzamer vullen wanneer de opslag bijna vol is.

Soorten ondergrondse opslag

Er zijn 3 hoofdtypen ondergrondse opslagformaties:

- Uitgeputte olie-/gasvelden
- Watervoerende lagen
- Zoutcavernes

Uitgeput aardgas of olievelden in de buurt van verbruikscentra zijn natuurlijke keuzes om aardgas op te slaan. Het omzetten van de velden van exploitatie naar opslag is relatief goedkoop omdat de meeste leiding- en pompapparatuur na herbestemming kan worden hergebruikt.

De omzetting van aardgas naar waterstof is echter niet eenvoudig vanwege de eigenschappen van waterstof (verbrossing van apparatuur, gasreactiviteit met de omgeving, zie details hieronder).

Aquifers zijn poreuze waterhoudende sedimentaire gesteenteformaties vergelijkbaar met olievelden. Een watervoerende laag afgedekt met een rotsformatie die ondoordringbaar is voor gas kan worden omgezet in een gasopslag door water af te voeren. Ze vereisen over het algemeen een groter deel van het kussengas dan gas- of olievelden en zijn minder flexibel

voor injectie en onttrekking. Voor aardgasopslag kunnen deze nadelen gedeeltelijk worden tegengegaan door een actieve wateraandrijving toe te voegen, die de druk in het reservoir handhaaft. Een dergelijke aanpak is minder gunstig voor waterstof, omdat water/waterstofscheiding bij de winning moeilijker is.

Zoutcavernes zijn puur opslagvolume, in plaats van poreuze media voor gas/ olievelden en watervoerende lagen. Ze profiteren van een lager aandeel kussengas en hogere injectie- en afgiftesnelheden. Ze worden gemaakt door water in een zoutformatie te injecteren en de pekkel te extraheren. Dit proces genaamd uitloging is per volume duurder dan de conversie van bestaande olie/gasvelden, maar maakt het mogelijk om de vorm van de caverne te optimaliseren. De hogere injectie- en onttrekkingspercentages impliceren dat meerdere cycli gedurende een jaar kunnen worden uitgevoerd, zodat de kosten per hoeveelheid opgeslagen en onttrokken gas gedurende een periode niet noodzakelijkerwijs hoger zijn dan voor de andere benaderingen. De meervoudige cycluscapaciteit is met name belangrijk voor waterstoftoepassingen vanwege de onvoorspelbare aard van hernieuwbare energiebronnen. Een belangrijk nadeel van zoutcavernes is dat zoutformaties niet overal op de planeet beschikbaar zijn, zodat het geen universele oplossing is.

Om veiligheidsredenen mag ondergrondse opslag alleen worden geïmplementeerd in regio's met zwakke tot geen seismische activiteit.

Waarom liever zoutcavernes?

Zoutcavernes zijn om meerdere redenen een bijzonder voordelige oplossing voor waterstofopslag:

- Zeer lage doorlaatbaarheid voor waterstof
- Geen waterverontreiniging
- Geen bacteriële besmetting
- Gebeeldhouwd tot gewenste vorm door uitloging

Omdat waterstof een kleiner molecuul is dan de meeste aardgascomponenten, is het gevoeliger voor lekken uit de opslag. Een zeer lage doorlaatbaarheid van de opslagwanden is daarom vereist, wat een zoutformatie biedt zonder afhankelijk te zijn van de aard van de afdekvorming (in tegenstelling tot de watervoerende lagen).

Waterstof bindt zich gemakkelijk met water, waardoor een separator nodig is om onttrokken gas te behandelen als er tijdens de opslag verontreiniging optreedt. Een mechanisch gecreëerde zoutcaverne is van nature watervrij in tegenstelling tot een watervoerende laag. Maar een zoutcaverne die ontstaat door uitloging (waterinjectie) zal wat restwater binnen de muren hebben, althans voor de eerste bedrijfscyclus, zodat water/ waterstofscheiding nodig zal zijn.

Uitgeputte olie/ gasvelden en watervoerende lagen bevatten bacteriën die waterstof kunnen omzetten in andere gassen, wat waterstof verbruiken en een gasbehandeling vereisen na terugtrekking om de zuiverheid van het gas te garanderen. Zout laat geen bacterieel leven toe, zodat bacteriële omzetting van waterstof geen probleem is.

Het vermogen om het reservoir tijdens uitloging te vormen, impliceert dat de vorm kan worden geoptimaliseerd voor injectie en terugtrekking (gevormd om stress tijdens drukvariaties te minimaliseren). Zoutcavernes hebben daarom een grote onttrekkings- of injectiesnelheid in vergelijking met hun werkgascapaciteit en hebben relatief lage buffergasbehoeften. Deze hoge snelheden maken zoutcaverne geschikt voor hoogdynamische werking (frequente onttrekking/injectie), een belangrijk punt voor waterstofproductie uit overtollige hernieuwbare elektriciteit, maar ook voor persluchtenergieopslagsystemen.

Het boetsen van een zoutcaverne kan vanaf het oppervlak worden gedaan met een verticale boring om water te injecteren en de resulterende pekkel te extraheren. Het injecteren van een vloeistof die lichter is dan water en niet reageert met zout, maakt het mogelijk om de grotuitzetting naar de bodem te richten en de vorm ervan te regelen. Het is daarom mogelijk om verticale capsulevormige grotten te creëren die de vormen zijn met minder mechanische belasting en dus de grootste amplitude tussen minimale en maximale gasdruk.

Zoutcavernes zijn relatief klein met maximaal enkele miljoenen m³, terwijl poreuze formaties tot een paar honderd miljoen m³ kunnen hebben. Bovendien zijn poreuze formaties wijdverspreider over de hele wereld. Toch compenseert een zoutcaverne een klein volume door minder behoefte aan kussengas: een uitgeput olie- of gasveld vereist ongeveer 50% kussengas, terwijl zoutcaverne met slechts 30% kussengas kan werken. Dit hangt samen met de overbelasting (of lithostatische) druk die ontstaat door het afdekken van gesteente (dichtheid van gesteenten maal diepte). Om veiligheidsredenen moet de druk in de caverne tussen 24 en 80% van de overbelastingsdruk worden gehouden. Een diepe zoutformatie afgedekt met zware rotsen zorgt daarom voor het grootste drukverschil tussen minimale en maximale waarden, waardoor de hoeveelheid werkgas wordt gemaximaliseerd (maar ook meer kussengas nodig is).

Om de mechanische stabiliteit van de zoutcaverne in de loop van de tijd te garanderen, is een minimale dikte voor wanden vereist: de dikte van de voetwand kan slechts 20% van de grot diameter zijn, terwijl de wanddikte van de hangende muur ten minste 75% van de grot diameter moet zijn. Bovendien wordt factor 2 tussen hoogte en diameter als optimaal beschouwd in een bedde zoutafzetting.

Potentieel in Europa

De rendabiliteit van ondergrondse opslag is grotendeels afhankelijk van de verhouding tussen werkend (nuttig) en kussen ("verloren") gas. Omdat waterstof voor sommigen veel lichter is dan aardgas, is deze verhouding nog kritischer en is waterstofopslag noodzakelijkerwijs duurder dan aardgasopslag (meer gasmassa nodig als kussengas). Om dit nadeel deels te compenseren, wordt waterstof over het algemeen opgeslagen bij een hogere druk dan aardgas, tot 200 bar.

Vanwege het potentiële effect van zoutcaverne op de stabiliteit van de grond, sluit het identificeren van relevante grotten de nabijheid van stedelijke gebieden uit, evenals belangrijke transportinfrastructuren zoals snelwegen en spoorwegen, die in dichtbevolkte gebieden zoals Europa een aanzienlijk deel van het land uitsluiten.

In Europa vond de belangrijkste zoutafzetting plaats in Noord-Europa en verspreidde zich van het oosten van het Verenigd Koninkrijk, onder de Noordzee naar Nederland, Denemarken over Noord-Duitsland en naar de centrale bekkens van Polen. Duitsland is dan ook het land

met de meeste onshore ondergrondse opslagcapaciteit en er is ook een groot offshore potentieel.

De analyse van Europese zoutformaties na uitsluiting van near-urban en near-infrastructure locaties toont een totaal potentieel van 84,8 PWhH₂, maar met slechts ongeveer 27% dat onshore is. Als er een verdere beperking tot 50 km uit de kust wordt toegevoegd (nabijheid van de meeste windparken), neemt het potentieel af tot 7,3 PWhH₂. Ter vergelijking: het Europese potentieel voor gepompte waterkracht is slechts 0,054 tot 0,123 PWhH₂.

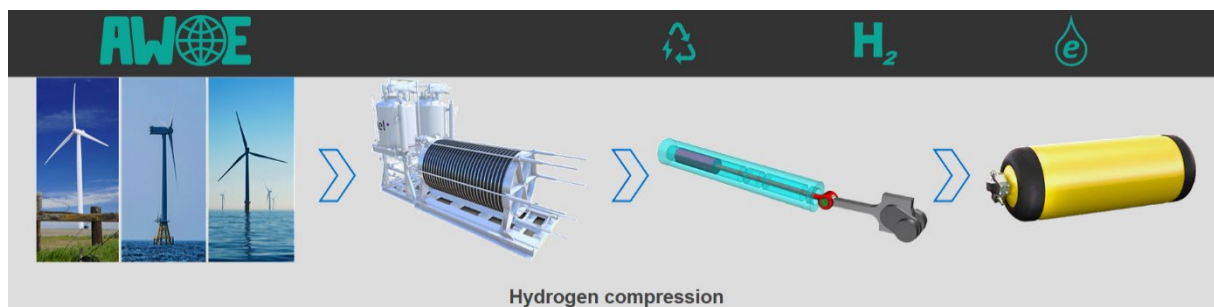
Per land heeft Duitsland het grootste potentieel met iets meer dan 40% van alle potentieel, waarbij alle hulpbronnen of alleen de onshore-hulpbronnen worden meegeteld. Nederland en het Verenigd Koninkrijk volgen, maar met slechts iets meer dan 10% van het potentieel. Noorwegen heeft de specificiteit dat het geen onshore potentieel heeft, maar een groot offshore potentieel. Frankrijk heeft wijdverspreide zoutafzettingen, maar deze bevinden zich voornamelijk in de buurt van dichtbevolkte gebieden, zodat het exploiteerbare potentieel slechts ongeveer 2% van het Europese potentieel uitmaakt.

Het werkelijke voordeel van opslag in zoutcavernes is een zeer complex onderwerp, afhankelijk van zowel potentieel overtollig aan hernieuwbare energie als potentieel waterstofgebruik. Overtollige elektriciteit van windparken (de meest voorkomende variabele energie in gebieden met een groot opslagpotentieel) is zeer variabel vanwege de afhankelijkheid van wind, maar ook van energieverbruik en de marktomstandigheden op de elektriciteitsmarkt. De beste schattingen definiëren een schijf van 1 tot 7% van de totale elektriciteitsproductie als overproductie.

De kant van het waterstofgebruik wordt tegenwoordig voornamelijk gedreven door de economie en varieert van land tot land omdat:

- De kosten van waterstofproductie en -opslag zijn afhankelijk van de kosten van elektriciteit (ongeveer 50% van de kosten is elektriciteit alleen voor elektrolyse)
- Groene waterstof gaat concurreren met bestaande waterstofproductiemethoden in de industriële sector (vooral aardgasreforming, zodat lokale aardgaskosten invloed hebben)
- Groene waterstof gaat concurreren met ruwe brandstoffen in de transportsector, zodat lokale brandstofprijzen invloed hebben

Ter wille van het argument concluderen analyses binnen het Europese project HyUnder dat opgeslagen groene waterstof zich voornamelijk zal richten op de transportsector in Spanje, terwijl het zich vooral zal richten op het balanceren van de elektriciteitsproductie tussen hernieuwbare rijke en hernieuwbare schaarse periodes in Roemenië. Deze verschillen vloeien voort uit verschillende hernieuwbare energiebronnen, opslagcapaciteiten, elektriciteitsprijzen en marktstructuur, evenals op ruwe olie gebaseerde productprijzen.



Waterstof compressie

Geschreven door [Vincent Knop](#)

Gepubliceerd op 16 januari 2022

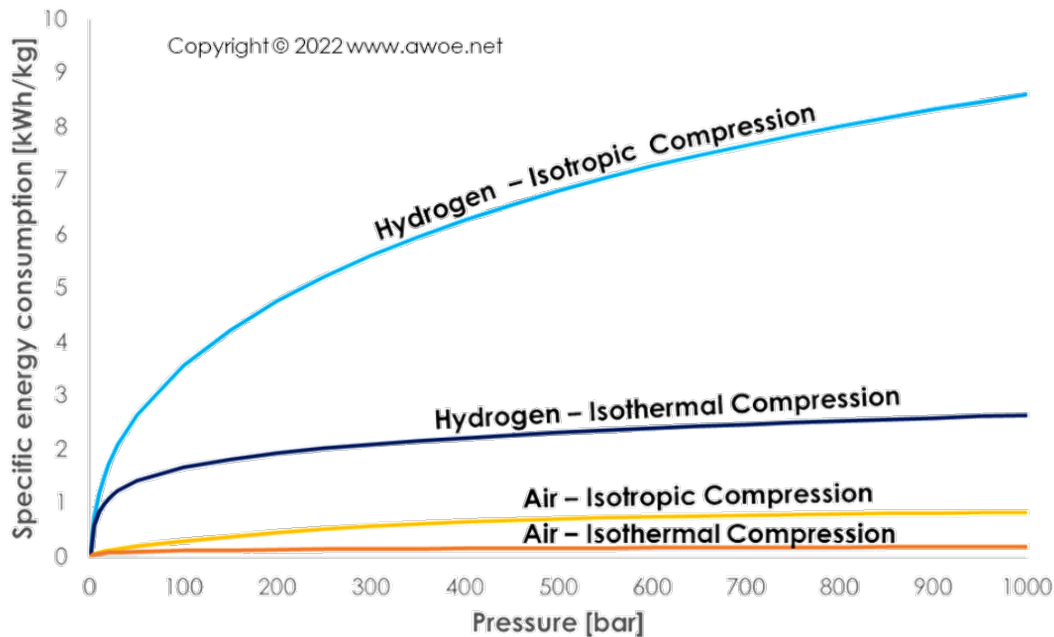
Waterstof wordt over het algemeen geproduceerd bij lage druk (5 tot 30 bar), omstandigheden waaronder het een enorm volume per gewichtseenheid inneemt: bij 5 bar en 25 °C neemt waterstof 2,48 m³/kg in beslag, terwijl lucht slechts 0,17 m³/kg inneemt. Daarom gebeurt het opslaan of transporteren van waterstof altijd onder hoge druk om ruimte te besparen. De meest voorkomende opslagdrukken zijn 350 bar of 700 bar, wat een compressiedruk van 450 of 900 bar impliceert om de opslagtanks te vullen.

Er zijn veel manieren om waterstof te comprimeren die kunnen worden onderverdeeld in 2 brede categorieën: mechanische compressie die ook van toepassing is op andere gassen en fysisch-chemische methoden die specifiek zijn voor waterstofeigenschappen. De meeste mechanische methoden hebben al industrieel gebruik bereikt, terwijl fysisch-chemische methoden zich in de onderzoeksfase bevinden.

Energiebehoefte en H₂ eigenschappen

Om een geschikte dichtheid voor opslag te bereiken, wordt waterstof gecomprimeerd tot hogere drukken (450 of 900 bar) dan enig ander gas. Bovendien, omdat het een zeer licht molecuul is, verbruikt het comprimeren van waterstof veel meer energie per kilogram gas dan enig ander gas.

Waterstofcompressie tot 1000 bar vereist tussen 2,6 kWh/kg voor een ideale isotherme compressie en 8,6 kWh/kg voor een isentrope compressie. Een werkelijke compressiegebeurtenis tot 1000 bar zou meertraps zijn met interkoeling tussen fasen en daarom vanuit thermodynamisch oogpunt tussen deze twee liggen. Toch zouden mechanische verliezen het energieverbruik verder verhogen. Ter vergelijking: dezelfde compressie voor lucht zou slechts 0,2 kWh/kg nodig hebben voor een ideale isotherme compressie en 0,8 kWh/kg voor een isentrope compressie.



Vergelijking van specifiek energieverbruik voor waterstof- en luchtcompressie

Waterstof heeft unieke eigenschappen die leiden tot veiligheidsproblemen tijdens compressie en opslag. Terwijl een gewoon gas afkoelt bij het uitzetten, warmt waterstof bij elke temperatuur boven het inversiepoint (-80 °C) op bij het uitzetten. Het probleem is dat gas uitzet van compressoruitlaat naar opslagtank of in geval van lekkage. Een gewoon gas zou dus gekoeld worden en minder reactief worden, maar waterstof wordt heter en reactiever. Bij lekkage richting de omgeving ontstaat een heet waterstof/luchtmengsel dat zichzelf kan ontsteken als de waterstofconcentratie boven enkele procenten ligt.

Mechanische compressie

Mechanische compressie gebruikt een deel van het koppel (direct of indirect) om waterstof in een kleiner volume te dwingen, waardoor de dichtheid en dus de druk wordt verhoogd door de temperatuurstijging te minimaliseren. Een directe omzetting van het koppel in H₂-druk impliceert een contact tussen waterstof en de delen die door de koppelbron worden bewogen. Een indirecte omzetting is afhankelijk van een tussenstap die waterstof isoleert van de koppelbron. Het belangrijkste doel van een dergelijke isolatie is om verontreiniging van waterstof door de smeering van de koppelbron te voorkomen.

De lijst met directe converters omvat:

- Zuigercompressoren, waardoor druk wordt gecreëerd door volumereductie
- Roterende compressoren met positieve verdringing, die druk creëren door de stroom in een doodlopend volume te forceren
- Centrifugaalcompressoren, die druk creëren door geïnduceerde snelheid om te zetten

De indirecte compressoren gebruiken over het algemeen een zuiger als drukbron om het eigenlijke waterstofcompressieapparaat te bedienen:

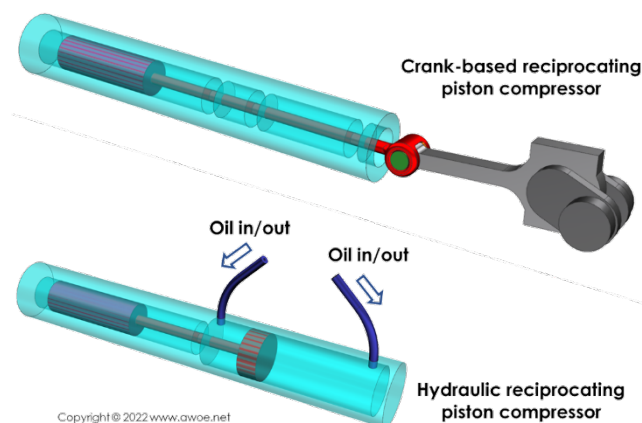
- Membraancompressoren, die een flexibele membranen gebruiken om waterstof uit de compressiezuiger te isoleren
- Ionische compressoren, die een vloeistof gebruiken om waterstof uit de compressiezuiger te isoleren

Zuigercompressoren

Zuigercompressoren verhogen de druk door een zuiger in een gesloten kamer te bewegen en daardoor het volume waarin het gas zit te verminderen. De zuigerbeweging zelf kan op 2 verschillende manieren worden geregeld:

- Mechanisch, via een crank-conrod mechanisme
- Hydraulisch, door olie in de kamer te persen die aan de achterkant van de zuiger werkt

De puur mechanische zuigercompressoren werken als zuigermotoren, behalve dat ze koppel absorberen om hogedrukassen vrij te maken in plaats van hogedrukassen te verbranden om wat koppel vrij te maken. De hydraulische apparaten hebben een externe oliepomp die hogedrukolie in en uit een controlekamer kan laten stromen die op de zuiger tegenover waterstof werkt.



Soorten zuigercompressoren

Wat de methode voor zuigerbewegingsregeling ook is, de compressieverhouding per compressietrap is beperkt tot ongeveer 10 vanwege geometrische overwegingen in de compressiekamer, voornamelijk de minimaal aanvaardbare tolerantie tussen de zuiger en de tegenoverliggende stationaire wand.

Het bereiken van drukken in de buurt van 1000 bar met een gas dat wordt geleverd bij 10 bar vereist slechts 2 compressietrappen in een verhouding van 10:1. Afhankelijk van de debieteis kunnen deze 2 fasen worden uitgevoerd met een enkele compressie-eenheid of met 2 compressie-eenheden in serie. Als een enkele compressie-eenheid wordt gekozen, wordt een tussentank gebruikt om het gas op te slaan tussen de eerste en tweede fase. In ieder geval wordt een intercooler tussen de fasen gebruikt om de waterstoftemperatuur te verlagen, zowel om veiligheids- als efficiëntieredenen.

Dergelijke compressoren profiteren van tientallen jaren ervaring bij fabrikanten en eindgebruikers, zodat ze uiterst betrouwbaar zijn met bekende onderhoudsintervallen en kortdurende uitvaltijd bij elke service. Ze bieden daarom een lange duurzaamheid, lange bedrijfsuren, zeer hoge drukmogelijkheden en hoge debietmogelijkheden. Het isothermische rendement is echter beperkt tot ongeveer 45%, inclusief het verbruik door hulpapparatuur (energieverbruik is ten minste 5,8 kWh/kg).

Zuigercompressoren kunnen olievrij zijn wanneer lage drukken of matige debieten worden nagestreefd. Zodra een hoge druk (> 350 bar) of een groot debiet nodig is, wordt een deelsmeermiddel verplicht gesteld. Deze smering is schadelijk voor de zuiverheid van waterstof, vandaar het gebruik van "inserts" om de waterstof te isoleren van op olie gebaseerde verontreinigingen. Dergelijke "inserts" kunnen een membraan zijn (zie membraancompressoren hieronder) of een ionische vloeistof (zie Ionische compressor hieronder).

Roterende compressoren met positieve verdringing

Verdringercompressoren gebruiken een paar intrincate onderdelen (tandwielen, lobben, schroeven,...) met een kleine tolerantie ertussen om het gas van de inlaat in een doodlopende uitlaattank te dwingen waar massaaccumulatie druk creëert. Tolerantie tussen onderdelen controleert lekkage terug naar de inlaat en wordt zeer uitdagend bij het verpompen van waterstof vanwege de extreem lage dichtheid en viscositeit.

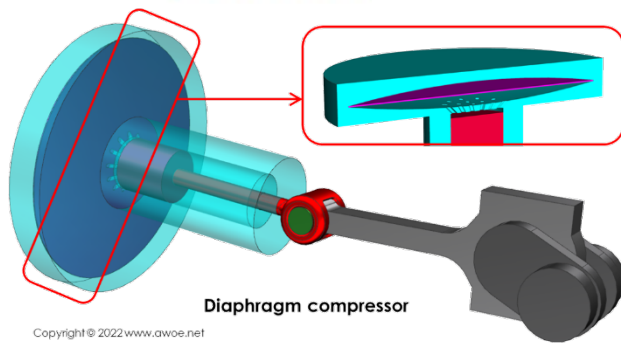
Centrifugaalcompressoren

Centrifugaalcompressoren dragen energie over aan het gas door het in beweging te dwingen, waarbij de geïnduceerde snelheid later wordt omgezet in druk door een geleidelijke toename van de doorsnede van de leidingen. Dit is de methode bij uitstek om hoge debieten te creëren, maar het heeft een beperkte drukverhoudingscapaciteit per compressietrap (maximaal 4-5). Dienovereenkomstig worden centrifugaalcompressoren veel gebruikt voor pijpleidingtoepassingen, maar zijn ze niet geschikt voor hogedrukopslag.

Membraancompressoren

Een eenvoudige manier om waterstof te isoleren uit smeerresten is door een membraan (enkele of meerdere lagen) te implementeren tussen de drukbron en de waterstoftoevoer. De drukbron werkt aan de ene kant van het membraan en vervormt het en duwt het tegen het gas aan de andere kant, waardoor in wezen druk wordt overgedragen.

Het ontwerp van de transmissiekamer en van het membraan is van cruciaal belang om de drukoverdracht te maximaliseren en tegelijkertijd de spanning in het membraan te minimaliseren om lange bedrijfsuren te bereiken. De holte is hol met zijn buitenste vorm die de vervorming van het membraan leidt.



Schema's van een membraancompressor

Er zijn meerdere methoden mogelijk voor het creëren van ingangsdruk op het membraan. Olie kan in en uit een kamer worden geperst door een hydraulische pomp of een krukaszuigermechanisme kan druk uitoefenen op een transmissievloeistof die op het membraan inwerkt.

Enige ruimte laten voor membraanvervorming betekent een toename van het dode volume in vergelijking met de directe compressie met een zuiger en dus een lagere compressieverhouding. Om een lagere drukverhouding in elke fase te compenseren, bevatten membraancompressoren meer compressietrappen met koeling tussen elke stap. De toegevoegde koelingsgebeurtenissen brengen het compressiepad dicht bij een isotherme compressie, waardoor de algehele efficiëntie wordt verbeterd (tot 70% isothermische efficiëntie wordt geclaimd, d.w.z. een energieverbruik van ten minste 3,7 kWh / kg).

Meerlaagse membranen maken verschillende mechanische eigenschappen of variërende fysisch-chemische eigenschappen mogelijk. Een materiaal met beperkte mechanische eigenschappen, maar dat niet lijdt aan versnelde veroudering wanneer het in contact komt met waterstof, kan met name aan de waterstofzijde worden gebruikt om een andere laag te beschermen met goede mechanische eigenschappen, maar een gevoeligheid voor waterstof. Een derde interne laag kan worden ingevoegd om elk lek uit de bovenste of onderste laag te detecteren, waardoor de afwezigheid van zowel waterstoflekkage als verontreiniging wordt gegarandeerd voor toepassingen met verplichte zuiverheid.

Ionische compressoren

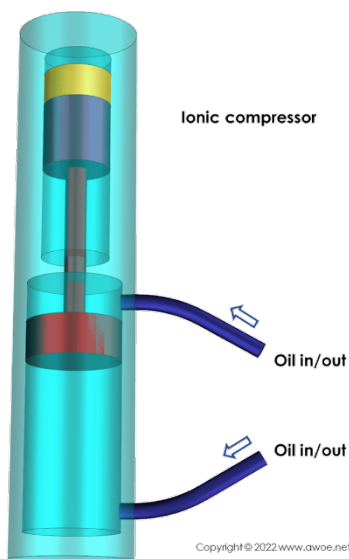
Ionische compressoren zijn zuigercompressoren met een paar vloeistoffen die op de zuiger inwerken om de efficiëntie van de compressie te optimaliseren.

De zuigerbeweging wordt geregeld door oliedruk aan de kant tegenover waterstof. De afwezigheid van mechanische onderdelen om de zuiger te verplaatsen en de afwezigheid van mechanische afdichtingen (zuigerveren) minimaliseren de wrijving, zowel het verbeteren van de efficiëntie als het verminderen van de warmteafgifte naar waterstof. Die oliedruk moet echter worden gegenereerd door een mechanisch apparaat op afstand met zijn eigen verliezen.

Aan de waterstofzijde van de zuiger bevindt zich een ionische vloeistof tussen de vaste zuiger en gasvormige waterstof. Ionische vloeistoffen worden geselecteerd omdat ze een niet-meetbare dampspanning hebben (in wezen geen waterstof verdampen en vervuilen), een zeer breed domein waarover ze vloeibaar blijven en geen waterstof absorberen. De ionische

vloeistof beschermt de zuiger tegen waterstof (geen versnelde metaalveroudering) en de waterstof tegen de zuiger (geen vervuiling).

Naast isolatie kan de ionische vloeistof worden gebruikt om de effectieve compressieverhouding van elke fase te verhogen. In een toepassing met een metalen zuiger kan de afstand tussen de zuiger en het tegenover elkaar liggende stationaire oppervlak niet in de buurt van nul komen om schade te voorkomen die verband houdt met contact met metalen onderdelen op snelheid. Omdat een vloeistof de effectieve zuiger is, kan die afstand verder worden verkleind, omdat overtollige vloeistof de compressietrap met waterstof via de uitlaatklep zou verlaten. Omdat de ionische vloeistof en waterstof niet mengbaar zijn, is dit niet gelijk aan verontreiniging, omdat een eenvoudige vortexstroom een perfecte scheiding van gas / vloeistof zou veroorzaken.



Schema's van een ionische compressor (geel volume is de ionische vloeistof)

Ionische compressoren (voornamelijk ontwikkeld door Linde) zijn tegenwoordig beschikbaar voor tankstations en leveren lage tot gemiddelde debieten (tot 33,6 kg/u). Linde rapporteert een elektrisch verbruik van 2,7 kWh/kg om H₂ te comprimeren van 50 tot 900 bar (1,2 kWh/kg vereist door een ideale isotherme compressie) voor de volledige installatie inclusief alle hulpapparatuur.

Niet-mechanische compressie

Niet-mechanische compressiemethoden zijn gericht op het benutten van waterstofeigenschappen om het te comprimeren zonder elektriciteitsomzetting in mechanisch vermogen, waardoor wat energie wordt bespaard en de efficiëntie wordt verbeterd. De methoden die momenteel in ontwikkeling zijn, zijn voornamelijk:

- Elektrochemische compressie
- Metaalhydride

Met behulp van protonenuitwisselingsmembraan, d.w.z. een membraan dat alleen doorlaatbaar is voor H^+ -ionen, is het mogelijk om de waterstofdruk te verhogen door het stroomopwaarts van het membraan te dissociëren en aan de andere kant opnieuw samen te stellen. Een externe voedingsbron is nodig om de dissociatie van H_2 in H^+ aan de anode te drijven met een overdracht van vrijgegeven elektroden e^- naar de kathode waar H_2 opnieuw wordt gevormd.

Terwijl elke overdracht door een membraan slechts leidt tot een matige toename van de druk, maakt een stapel membranen het mogelijk om tot 1000 bar te bereiken. Lopend onderzoek beweert dat de efficiëntie kan oplopen tot 70-80%.

Dit type compressor is zeer compact en heeft geen bewegend deel, waardoor de onderhoudsvereisten worden beperkt. De progressieve membraandegradatie beperkt echter de levensduur ver onder die van een mechanisch compressieapparaat.

Metaalhydride

Metaalhydridecompressoren vertrouwen op de eigenschappen van sommige metalen die warmte kunnen afgeven terwijl ze waterstof bij lage temperatuur absorberen om hydriden te vormen. Zodra de resulterende hydriden zelf worden verwarmd, komt waterstof vrij bij een hogere druk. Het metaalhydride kan worden verwarmd met heet water of met een elektrische stroom om de waterstofafgifte te activeren.

Deze methode kan worden gebruikt als een zuiver compressieapparaat of als een opslagapparaat met lagedruktoevoer en hogedrukafgifte, waarbij de compressie- en opslagstappen in één eenheid worden gecombineerd.



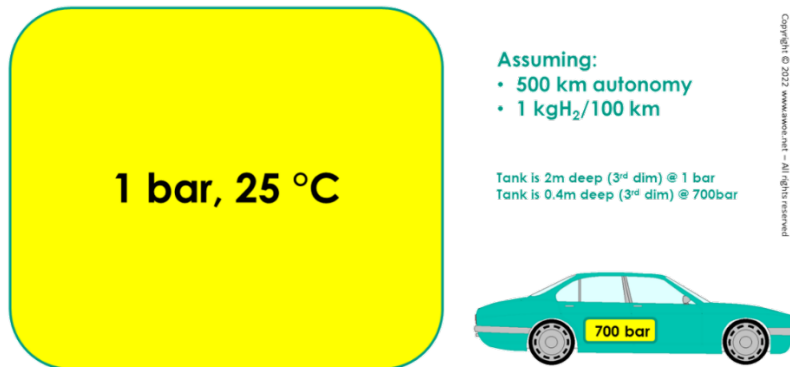
Levenscyclusanalyse van waterstofcompressie

Geschreven door [Vincent Knop](#)

Gepubliceerd op 23 januari 2022

Het comprimeren van waterstof voor opslag of gebruik in een voertuig is verplicht vanwege het enorme volume dat nodig zou zijn om het bij omgevingsdruk op te slaan. Een tank van 40 liter gevuld met 700 bar kan bijvoorbeeld 1,5 kg waterstof opslaan (het energetische

equivalent van 6 liter benzine), terwijl 19.380 liter nodig zou zijn bij omgevingsdruk om dezelfde massa op te slaan.



Schema van ruimteclaim voor opslag van 5 kg waterstof (500 km autonomie) bij verschillende drukken

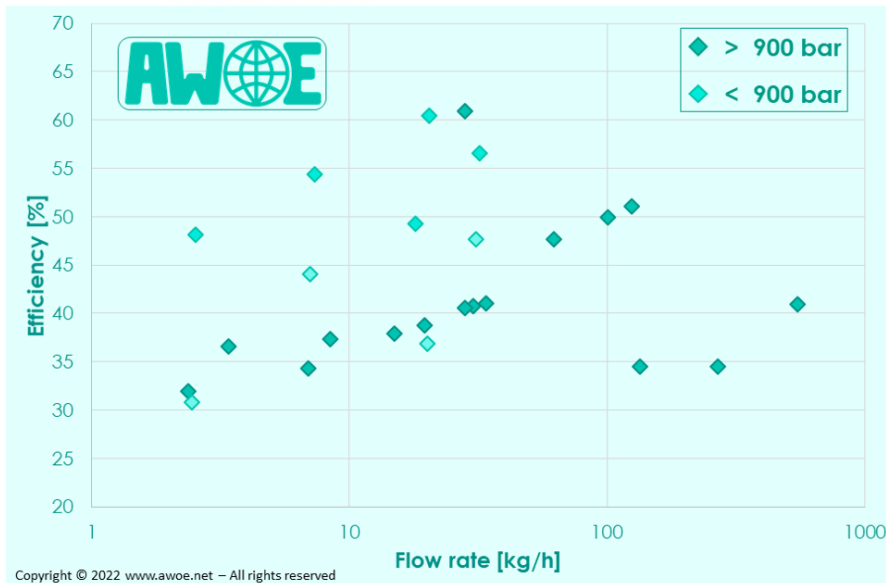
Volwassen waterstofcompressietechnologie is tegenwoordig een kwestie van mechanische compressie ([zie alle bestaande technologieën](#)). Om precies te zijn, de meest voorkomende technologieën voor hogedrukcompressie voor opslag- en doseerdoeleinden zijn zuigercompressoren, membraancompressoren en ionische compressoren.

Centrifugaalcompressoren worden veel gebruikt voor pijpleidingen, maar dit valt buiten het bereik van de huidige analyse omdat ze niet het drukk niveau kunnen bereiken dat nodig is voor opslag.

Efficiëntie en energieverbruik voor H₂-compressie

Zoals voor elk compressieproces staat de efficiëntie van de compressor centraal in de operationele kosten en de milieu-impact van waterstofcompressie. Toch is de relatieve invloed groter voor waterstof omdat de eigenschappen ervan (voornamelijk de zeer lage dichtheid) een compressie bij hogere druk en een groter energieverbruik vereisen om dergelijke drukken te bereiken. Ter herinnering, een isothermische compressie van waterstof van omgevingsdruk tot 1000 bar vereist 2,64 kWh / kg, terwijl dezelfde compressie voor lucht slechts 0,19 kWh / kg vereist.

Zo'n enorm energieverbruik benadrukt het belang van elke efficiëntiewinst tijdens compressie om de groene waterstofroute op het pad van schone technologieën te houden. Het verzamelen van efficiëntie van verschillende in de handel verkrijgbare eenheden voor waterstofcompressie, inclusief zuigercompressoren, membraancompressoren en ionische compressoren, benadrukt de algemene trends. Het rendement lijkt grotendeels afhankelijk te zijn van het vereiste debiet: terwijl een isotherme efficiëntie van ongeveer 60% kan worden bereikt bij een laag debiet, wordt een isotherme efficiëntie van 40% waargenomen op zeer grote eenheden die zowel zeer hoge druk als zeer grote debieten leveren.



Efficiëntie van waterstoffcompressoren als functie van de leveringsdruk en het debiet

Door het bereik van haalbare efficiëntie te integreren, ligt het effectieve energieverbruik voor waterstoffcompressie van omgevingstemperatuur tot 900 bar (voor opslag bij 700 bar) tussen 4,31 en 6,46 kWh / kg. Waterstof wordt echter over het algemeen geproduceerd tussen 10 en 30 bar in een [elektrolyser](#), waarbij 15 bar het meest voorkomt, terwijl compressie van omgevingstemperatuur tot 15 bar een aanzienlijk deel van het pad naar 900 bar is. Daarom is het relevante energieverbruik om 900 bar te bereiken voor waterstof afkomstig van een elektrolysertoevoer bij 15 bar lager en varieert van 2,68 tot 4,03 kWh / kg.

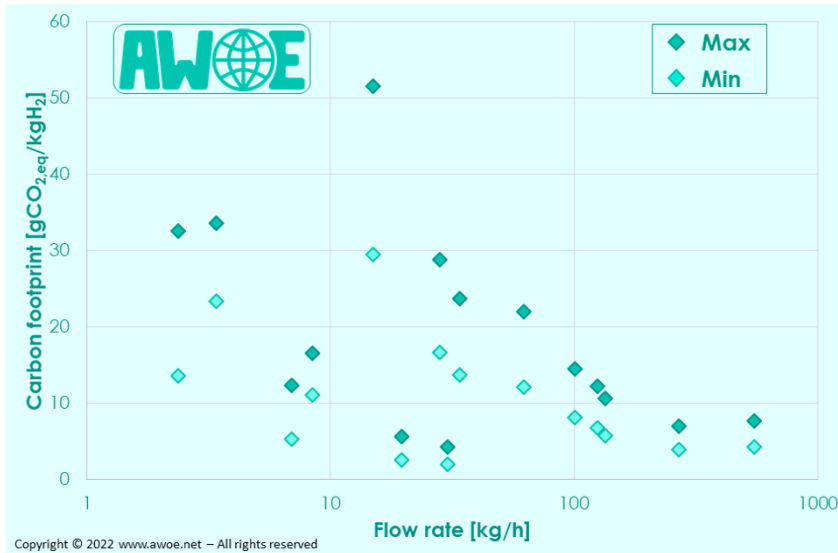
Koolstofvoetafdruk van productie en installatie

Compressoren die 1000 bar kunnen leveren bij industriële debieten zijn grote eenheden met uitgebreid gebruik van hoogwaardig staal. Naast de compressor zelf omvat de installatie ook een bevattende structuur en een betonnen fundering.

Op basis van gegevens van fabrikanten, GREET-gegevens voor materialen en enkele literatuurgegevens over energieverbruik tijdens de productie, is het mogelijk om de broeikasgasemissies voor het bouwen van de compressie-eenheid te schatten. Merk op dat het energieverbruik van de productie een aanzienlijk deel van het eindresultaat is. Dienovereenkomstig worden de gerelateerde broeikasgasemissies berekend rekening houdend met het bereik van de koolstofvoetafdruk van elektriciteit in het land van productie (met behulp van nationale statistieken over de elektriciteitsproductie in 2020), waardoor een reeks equivalente emissies wordt gedefinieerd, aangezien de exacte timing van de productie binnen het jaar de werkelijke emissies zou beïnvloeden.

Om de totale equivalente emissies van CO₂ om te zetten in specifieke emissies (gCO_{2,eq}/kgH₂), gingen we ervan uit dat de compressor gedurende 20 jaar 8000 h/j in bedrijf is (wat volledig mogelijk is op basis van de onderhoudsvereisten van compressoren). De levensduur van dergelijke compressoren is over het algemeen langer dan 20 jaar, maar dit is de standaardduur voor de levenscyclusanalyse van zowel de elektrolyser die de waterstof levert als de windturbines die de elektrolyser en de compressor van stroom voorzien.

Voor compressoren met voldoende openbaar toegankelijke informatie (drukvermogen, structuur, materialen, verpakking) is het mogelijk om de specifieke equivalente emissies van productie en installatie te schatten. De emissies hebben de neiging om af te nemen met de grootte van de compressor, simpelweg omdat de hoeveelheid geproduceerde waterstof veel vordert (X-as is hier logaritmisch) en de relatieve invloed van de bevattende structuur en funderingen afneemt. Een waarde van ongeveer 5 gCO_{2,eq}/kgH₂ is mogelijk wanneer de productie relatief schone elektriciteit gebruikt (100 gCO_{2,eq}/kWh of minder), maar de belangrijkste fabrikanten zijn gevestigd in landen die af en toe zeer vuile elektriciteit produceren, wat leidt tot een grote toename van equivalente emissies.



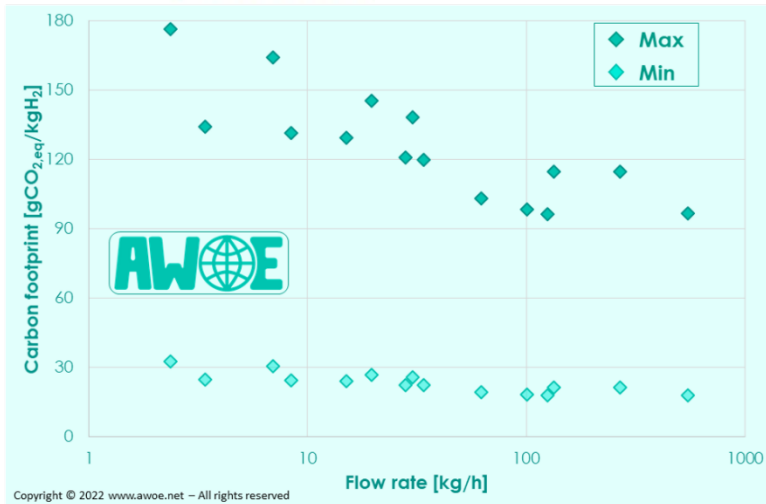
Koolstofvoetafdruk van verschillende waterstofcompressoren - alleen productie en installatie

Koolstofvoetafdruk van bedrijf

Voor de geselecteerde compressoren, waarbij het specifieke energieverbruik bekend is, is het mogelijk om de koolstofvoetafdruk tijdens bedrijf te schatten. Voor dit doel gingen we ervan uit dat windturbines de exclusieve bron van elektriciteit zijn, niet alleen om groene waterstof in de elektrolyser te produceren, maar ook om het te comprimeren voor opslagdoeleinden.

Zoals blijkt uit een [levenscyclusanalyse van windturbines](#), liggen de equivalente broeikasgasemissies van hun elektriciteitsproductie tussen 7 en 38 gCO_{2,eq}/kWh, afhankelijk van het type windturbine en de locatie. Omdat groene stroom nooit zal worden verkocht met een onderscheid tussen type turbines, hebben we een reeks equivalente emissies berekend op basis van de extreme koolstofvoetafdruk.

Wanneer alleen naar de werking wordt gekeken, worden de equivalente emissies voor compressie aangedreven door de reinheid van elektriciteit. Er is natuurlijk een factor van ongeveer 5 tussen de slechtste en de beste omstandigheden, simpelweg gebaseerd op hoe schoon de elektriciteit is. Dit lijkt belangrijker te zijn dan het compressorontwerp en de efficiëntie ervan, die hooguit een factor 2 tussen eenheden impliceert.



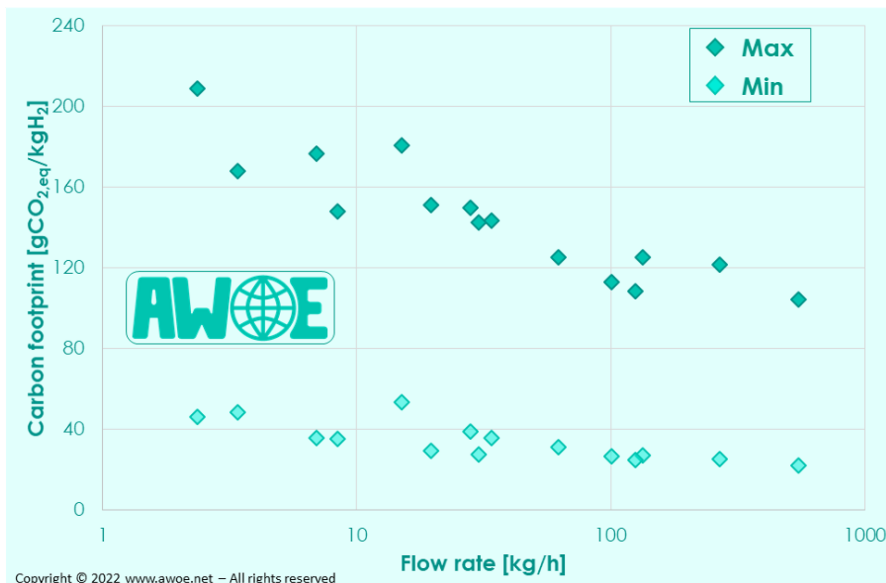
Koolstofvoetafdruk van verschillende waterstoffcompressoren - alleen werking (alleen elektriciteit van windturbines)

Totale milieu-impact van waterstoffcompressie voor opslag of afgifte

De berekende equivalente emissies voor compressorinstallatie en -werking kunnen worden gecombineerd om de totale emissies te verkrijgen (literatuuronderzoek bevestigt dat verwijdering slechts een marginaal effect heeft op het eindresultaat). Het is duidelijk dat vanwege de specifieke eigenschappen van waterstof de werking een aanzienlijk grotere impact heeft dan de installatie (verhouding van 6 op 1).

De totale equivalente emissies voor waterstoffcompressie worden daarom voornamelijk aangedreven door:

- Bij een eerste bestelling, de equivalente emissies van elektriciteit die wordt gebruikt om de compressor aan te drijven
- Bij een tweede orde, de grootte van de compressor met grotere eenheden die leidt tot lagere emissies per kg H₂ geproduceerd over 20 jaar

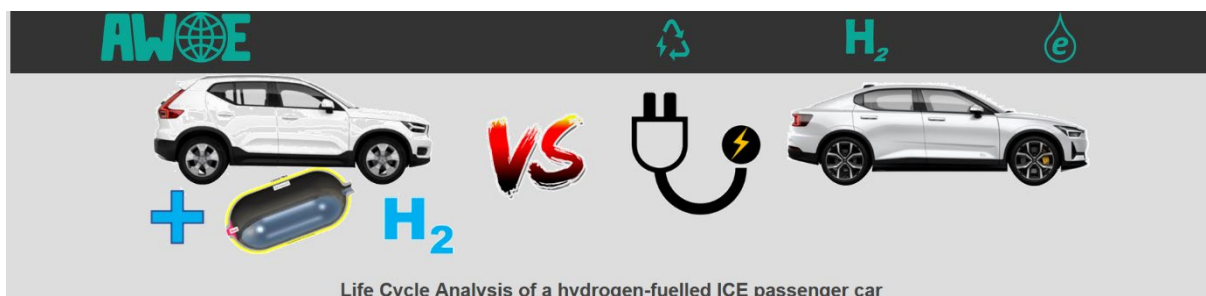


Totale koolstofvoetafdruk van verschillende waterstofcompressoren (alleen elektriciteit uit windturbines)

Een belangrijk resultaat van deze analyse is dat compressie van waterstof voor opslagdoeleinden slechts een secundair effect heeft op de uitstoot van broeikasgassen door groene waterstofequivalenten in vergelijking met [waterelektrolyse](#). Voorspelde specifieke emissies kunnen zo laag zijn als 20 gCO_{2,eq}/kgH₂, maar kunnen oplopen tot 200 gCO_{2,eq}/kgH₂ (uitgaande van een compressorbedrijf van een jaar), wat gunstig is in vergelijking met literatuurgegevens die een werkelijke kleine compressie-eenheid beschouwen^[1].

Verwijzingen

^[1] Burkhart et al., Waterstofmobiliteit uit windenergie – Een levenscyclusanalyse gericht op de brandstofvoorziening, Applied Energy, 181 (2016), 54-64



Levenscyclusanalyse van een ICE-personenauto op waterstof

Geschreven door [Vincent Knop](#)

Gepubliceerd op 19 februari 2022

Voertuigen op waterstof behoren tot de voorgestelde technologieën voor een emissievrije transportsector. Toch houdt het zero-emissielabel alleen rekening met emissies tijdens het rijden met voertuigen, niet met de volledige levenscyclus.

Dit artikel is een bijdrage aan de levenscyclusanalyse van voertuigen op waterstof en vergelijkt deze technologie met bestaande voertuigen op benzine en batterij-elektrische voertuigen (een alternatieve oplossing voor een emissievrije transportsector).

De analyse beschrijft de verschillende categorieën broeikasgasemissies gedurende de levenscyclus van een voertuig:

- Productie van het voertuig (met uitzondering van de energieopslagvoorziening)
- Productie van het energieopslagapparaat
- Productie, conditionering en distributie van de energie
- Emissies tijdens het rijden met het voertuig

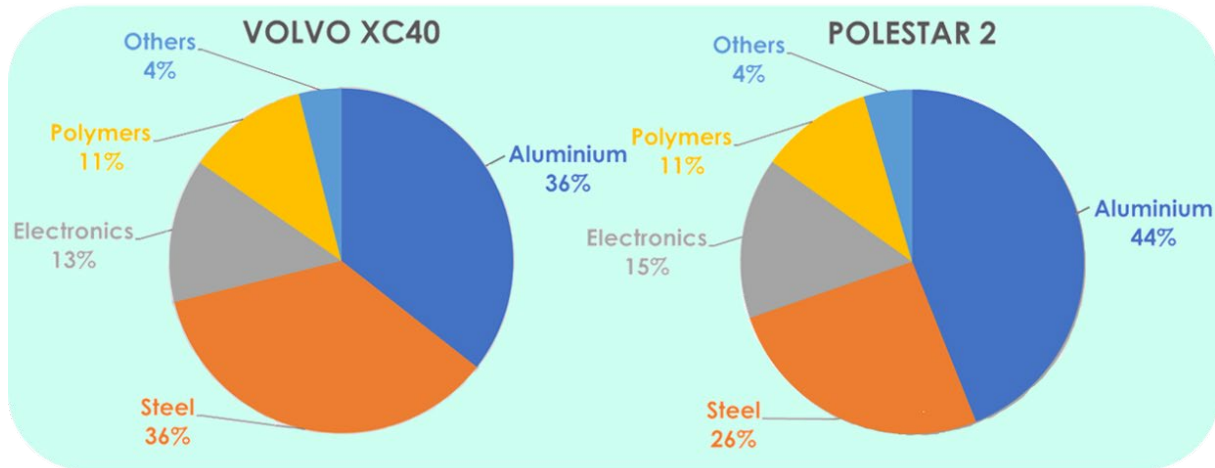
De referentievoertuigen voor conventionele en batterij-elektrische opties zijn een Volvo XC40 en een Polestar 2. Dit zijn in de handel verkrijgbare voertuigen waarvoor een volledige [levenscyclusanalyse](#) is gepubliceerd door hun respectieve fabrikanten. Het voertuig op waterstof is een afgeleide van de Volvo XC40 (verbrandingsmotor op waterstof), met tanks die vergelijkbaar zijn met een Toyota Mirai, waardoor de introductie van tal van hypothesen wordt vermeden.

In de volgende secties worden voertuigen voor elke hierboven genoemde categorie vergeleken en wordt vervolgens de centrale invloed van de kilometerstand van het voertuig op conclusies over de milieuvriendelijkheid van het voertuig belicht.

Koolstofvoetafdruk van het voertuig met uitzondering van de energieopslagvoorziening

De [levenscyclusanalyse](#) die Polestar in samenwerking met Volvo heeft gepubliceerd, biedt gedetailleerde informatie over de milieu-impact van de productie van een Volvo XC40 op benzine of een batterij-elektrische Polestar 2. Deze publicatie verdeelt verder de benodigde middelen voor de Polestar 2 tussen de lithium-ionbatterij en de rest van het voertuig, wat essentieel is voor het begrijpen van verschillen tussen technologieën.

Het is vermeldenswaard dat een vergelijking van een Volvo XC40 met een Polestar 2 redelijk is in termen van marktplaatsing: het zijn beide premium voertuigen van vergelijkbare voertuigklasse, grootte en "shell" -gewicht (gewicht exclusief het energieopslagapparaat).



Materiaal carbon footprint voor de "shell" van een Volvo XC40 en een Polestar 2

De gepubliceerde gegevens geven met name een uitsplitsing van de koolstofvoetafdruk van het voertuig in relatie tot de verschillende materiaalklassen. Voor de schaal hebben beide voertuigen een redelijk vergelijkbare totale koolstofvoetafdruk: 17 ton CO_{2,eq} voor Polestar 2 en 14 ton CO_{2,eq} voor Volvo XC40. De opsplitsing in materialen laat zien dat de Polestar 2 zwaarder leunt op aluminium onderdelen dan de Volvo XC40. Het lijkt erop dat aluminium staal verdringt, waarschijnlijk in het chassis van het voertuig. Naast materiaalgerelateerde emissies zijn er ook productie-emissies: 2,2 ton CO_{2,eq} voor Polestar 2 en 2,1 ton CO_{2,eq} voor Volvo XC40.

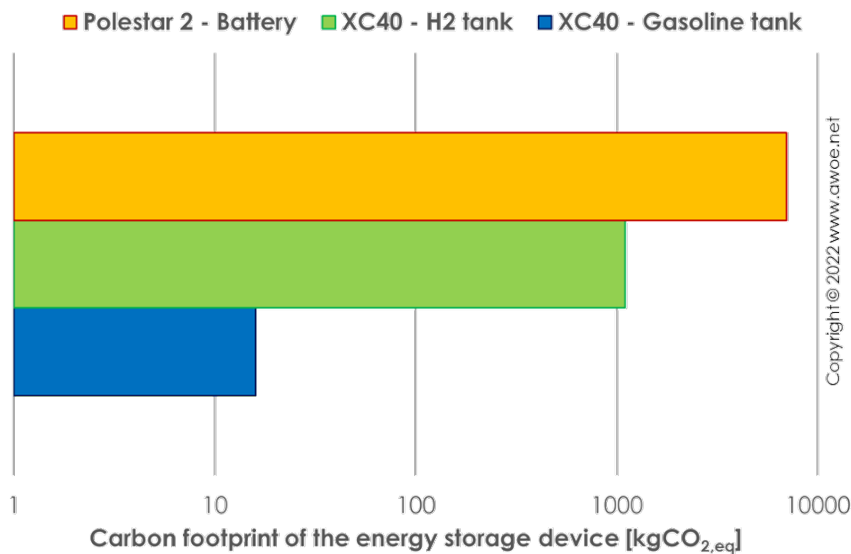
De hypothetische personenauto op waterstof is een Volvo XC40 die is omgebouwd naar waterstofbrandstof door het injectiesysteem bij te werken en de benzinetank te verwisselen voor een [waterstof Type IV-tank](#). Er zijn geen wijzigingen aan het Volvo-chassis inbegrepen en de aanpassing van de verbrandingsmotor is beperkt tot het brandstofsysteem. Dienovereenkomstig heeft de schaal van het voertuig op waterstof dezelfde koolstofvoetafdruk als het voertuig op benzine (onthoud dat brandstoftanks in deze sectie zijn uitgesloten).

Koolstofvoetafdruk van het energieopslagapparaat van het voertuig

Volvo XC40's op benzine zijn uitgerust met een polymeer 54L-brandstoftank. Op basis van de analyse van Dlamini et al.^[1] kunnen we schatten dat de productie van zo'n tank een koolstofvoetafdruk heeft van ~16 kgCO_{2,eq}, waarbij de productie van het polymeer met hoge dichtheid de belangrijkste bijdrage levert.

Het ombouwen van een Volvo XC40 naar waterstofbrandstof met behoud van een verbrandingsmotor vereist de toevoeging van een waterstofbrandstoftank. Een Type IV-tank met een inhoud van 5 kg waterstof (hetzelfde als een Toyota Mirai MY2020) zou een behoorlijke actieradius bieden. De [levenscyclusanalyse van type IV-tanks](#) geeft aan dat de productie van een dergelijke tank een koolstofvoetafdruk heeft van ~ 1,1 ton CO_{2,eq}. De productie van de koolstofvezel levert verreweg de belangrijkste bijdrage aan deze koolstofvoetafdruk, zodat vooruitgang op het gebied van koolstofvezelproductie toekomstige verbeteringen in de milieu-impact van type IV-tanks zou kunnen opleveren.

De Life Cycle Assessment van de [Polestar 2](#) geeft aan dat de koolstofvoetafdruk van de productie van zijn 78 kWh-batterij 7 ton CO_{2,eq} is. Helaas wordt in de publicatie niet aangegeven welk deel of proces de belangrijkste bijdrager(s) is (zijn).



Vergelijking van de koolstofvoetafdruk van verschillende energieopslagtechnologieën aan boord (logaritmische schaal)

Er is een groot verschil tussen technologieën op het energieopslagapparaat met tanks voor vloeibare brandstoffen (benzine hier) met de laagste milieu-impact. Het energieopslagapparaat voor waterstof blijkt een lagere milieubelasting te hebben dan een voertuigaccu.

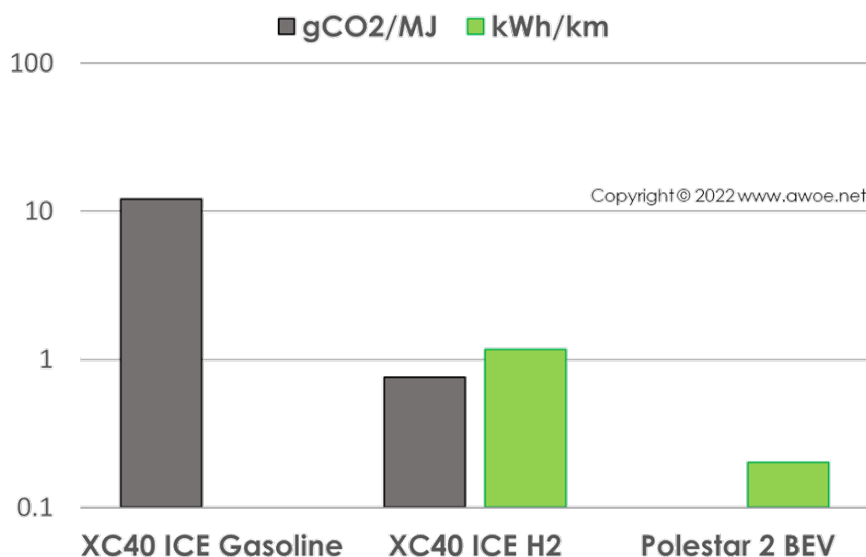
Energieproductie, conditionering en -distributie

Eriksson en Ahlgren^[2] voerden een literatuurstudie uit naar de milieu-impact van brandstoffen op basis van ruwe olie, waardoor inzicht werd verkregen in de koolstofvoetafdruk van het winnen, raffineren en distribueren van benzine. Ze identificeerden 8 bronnen die deze impact kwantificeerden en stelden een bereik van 6,7-18,5 gCO_{2,eq} / MJ vast voor alle operaties van put tot tank, waarbij de meeste studies zeer dicht bij het gemiddelde van 12,1 gCO_{2,eq} / MJ lagen. Met een gemiddelde CO₂-classificatie van 163 gCO_{2,eq} / km voor XC40's op benzine, is hun nominale energieverbruik 2,22 MJ / km en de koolstofvoetafdruk van alle well-to-tank-operaties is 26,9 gCO_{2,eq} / km.

Het ombouwen van een benzinemotor naar waterstofbrandstof zou enkele efficiëntievoordelen moeten opleveren. Studies die een dergelijk voordeel kwantificeren, bereiken echter geen duidelijk gemeenschappelijk beeld en de meeste omvatten enkele motoraanpassingen na de verandering van brandstof om de efficiëntiewinsten te maximaliseren. Om conservatief te zijn, hebben we er daarom in de huidige analyse voor gekozen om te overwegen dat de waterstofmotor dezelfde efficiëntie heeft als zijn tegenhanger op benzine. We gingen er dan ook van uit dat het gemiddelde energieverbruik van het voertuig ook 2,22 MJ/km is met waterstof.

De [levenscyclusanalyse van waterstofproductie door middel van alkalische elektrolyse](#) geeft een overzicht van elektriciteitsverbruik op de koolstofvoetafdruk aan. Het elektriciteitsverbruik van een state-of-the-art alkalische elektrolyse-installatie is ~60 kWh/kgH₂. Naast het elektriciteitsverbruik omvat de bouw en het onderhoud van de elektrolyse-installatie ook een minimale koolstofvoetafdruk van 86 gCO_{2,eq}/kgH₂, wat overeenkomt met 1,59 gCO_{2,eq}/km voor een voertuig met een energieverbruik van 2,22 MJ/km. De omzetting van het elektriciteitsverbruik in equivalente CO₂-emissies is sterk afhankelijk van de locatie van de elektrolyse-installatie en dus van het land (of zelfs de regio) waarin het voertuig wordt gebruikt (zie hieronder).

Omdat waterstof een zeer licht gas is, wordt het nooit opgeslagen onder omgevingsomstandigheden. Omdat we uitgingen van een Toyota-Mirai-achtige Type IV-tank in het voertuig, is een compressiestap tussen elektrolyse en tanken van het voertuig vereist. De [Life Cycle Analysis of hydrogen compression](#) kwantificeert de milieu-impact van deze stap in de brandstof distributie. De waterstofcompressie tot 900 bar (om een tank bij 700 bar te voeden) vanaf een druk van 15 bar aan de elektrolyse-uitlaat kan worden verkregen voor een elektriciteitsverbruik van ~3 kWh/kgH₂. Net als bij elektrolyse is er ook een milieu-impact van het bouwen en onderhouden van de compressie-installatie, die zo laag kan zijn als 5 gCO_{2,eq}/kgH₂ (of 0,09 gCO_{2,eq}/km voor een voertuig met een energieverbruik van 2,22 MJ/km). Nogmaals, de uitstoot van broeikasgassen gerelateerd aan elektriciteitsverbruik is afhankelijk van de locatie van de fabriek (zie hieronder).



Vergelijking van de koolstofvoetafdruk en de elektriciteitsvraag voor de energieproductie en -conditionering van voertuigen (logaritmische schaal)

Een batterij-elektrisch voertuig verbruikt alleen elektriciteit en heeft dus geen uitstoot gerelateerd aan energiewinning of conditionering. Toch brengt de verdeling van elektriciteit over het transportnet verliezen met zich mee.

Terwijl de verliezen op het industriële hoogspanningsnet (die van invloed zijn op een elektrolyser) relatief laag zijn, is de transmissie en distributie via het laagspanningsnet een

stuk minder efficiënt. Deze verliezen houden voornamelijk verband met spanningsconversie van hoogspanning (>100.000 V) naar laagspanning (<1.000 V) en energieleiding in onderstations. In de levenscyclusanalyses^[3,4] van de International Council on Large Electric Systems wordt geconcludeerd dat de energieverliezen tussen elektriciteitsproductie en lokaal verbruik gemiddeld ongeveer 10% bedragen.

Het elektriciteitsverbruik van de Polestar 2 bedraagt 0,202 kWh/km. Rekening houdend met een gemiddeld verlies van 10% over het distributienet betekent een elektriciteitsverbruik van ~ 0,222 kWh / km vanuit het oogpunt van de elektriciteitsproducent. Nogmaals, de omzetting van dit elektriciteitsverbruik in equivalente CO₂-emissies hangt af van de methode voor elektriciteitsproductie (zie hieronder).

Emissies tijdens het rijden met het voertuig

De uitstoot van broeikasgassen tijdens het rijden met het voertuig is het belangrijkste verschil tussen het conventionele benzinevoertuig en de alternatieve benaderingen. De waterstofmotor geeft alleen waterdamp en stikstofoxiden af (in een lage concentratie om te voldoen aan de emissiewetgeving) bij de uitlaat, terwijl de batterij-elektrische auto helemaal geen gasvormige emissies heeft.

Zoals eerder aangegeven, bedraagt de nominale CO₂-uitstoot van de gemiddeld door het wagenpark gemiddelde Volvo XC40 163 gCO₂/km. Dit grote nadeel in emissies tijdens gebruik komt op een balans voor het grote voordeel in emissies van de productie van energieopslagapparatuur. Daarom mogen we een kruispunt verwachten waarlangs de alternatieve benaderingen een lagere milieu-impact hebben dan de conventionele.

Maar omdat een groot deel van de emissies van de alternatieve aandrijfoplossingen gerelateerd is aan de koolstofvoetafdruk van elektriciteit, heeft de locatie van het voertuiggebruik invloed op de oversteekplaats.

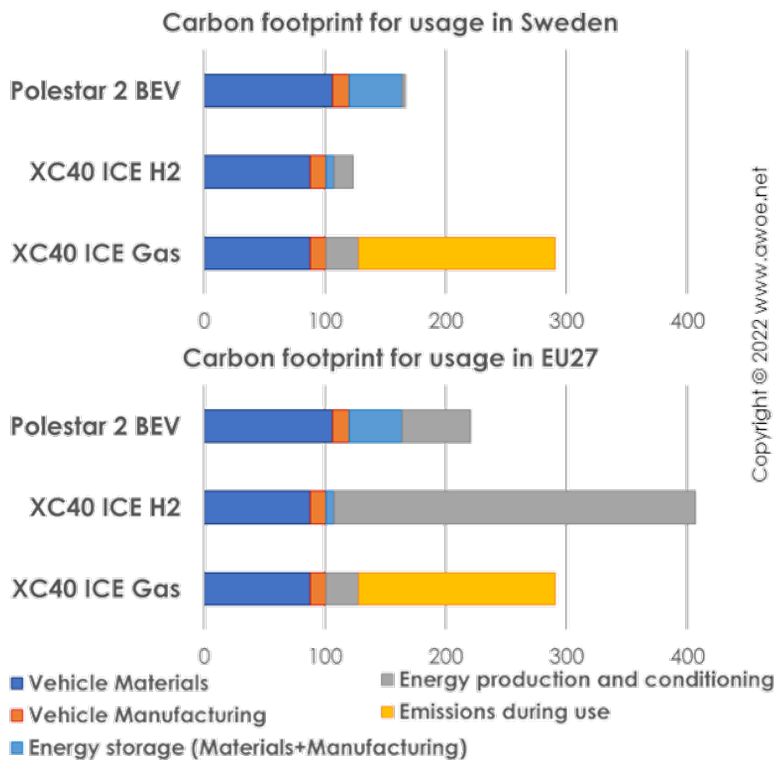
Invloed van de locatie van het voertuiggebruik door de koolstofvoetafdruk van elektriciteit

Hoewel de milieu-impact van een voertuig op benzine overal hetzelfde is, hangt de milieuvriendelijkheid van de alternatieve methoden af van de lokale koolstofvoetafdruk van elektriciteit.

Om deze invloed te kwantificeren, vergeleken we de werking van voertuigen voor een lage koolstofvoetafdruk en voor een matig hoge koolstofvoetafdruk. We kozen Zweden als referentie voor een lage koolstofvoetafdruk (gemiddelde koolstofvoetafdruk van elektriciteit van 12 gCO_{2,eq}/kWh in 2019) en de volledige Europese Unie als referentie voor een matig hoge koolstofvoetafdruk (gemiddelde elektriciteitsvoetafdruk van 255 gCO_{2,eq}/kWh in 2019). Dit wordt als matig hoog beschouwd omdat sommige landen zoals Duitsland en Polen een aanzienlijk hogere koolstofvoetafdruk van elektriciteit hebben, wat een zeer hoog niveau definieert.

Naast de koolstofvoetafdruk van elektriciteit is ook een totale kilometerstand voor de levenscyclus van het voertuig vereist om de initiële emissies van de productie te vergelijken met de gebruiksemissies voor energieproductie en de emissies tijdens het reizen. De officiële statistieken van de Europese Unie geven een gemiddelde kilometerstand van 15.000 km per

jaar per voertuig en een gemiddelde levensduur van 10,9 jaar voor elk voertuig, wat ongeveer een totale kilometerstand van 160.000 km oplevert.



Vergelijking van de koolstofvoetafdruk van voertuigen over een volledige levenscyclus voor 2 verschillende koolstofvoetafdrukken van elektriciteit

Alle eerdere emissie- en elektriciteitsverbruikswaarden worden omgerekend in CO_{2,eq}-emissies per afgelegde kilometer op basis van een levenscyclus van 160.000 km en een koolstofvoetafdruk van elektriciteit van 12 of 255 gCO_{2,eq}/kWh. Zonder veel verrassing is het conventionele benzinevoertuig nooit de schoonste over 160.000 km. Toch is het ook nooit de smerigste! Wanneer elektriciteit schoon is, is een ICE-voertuig op waterstof schoner dan een batterij-elektrisch voertuig. Vuile elektriciteit impliceert echter dat een ICE-voertuig op waterstof nog vuiler is dan een ICE-voertuig op benzine.

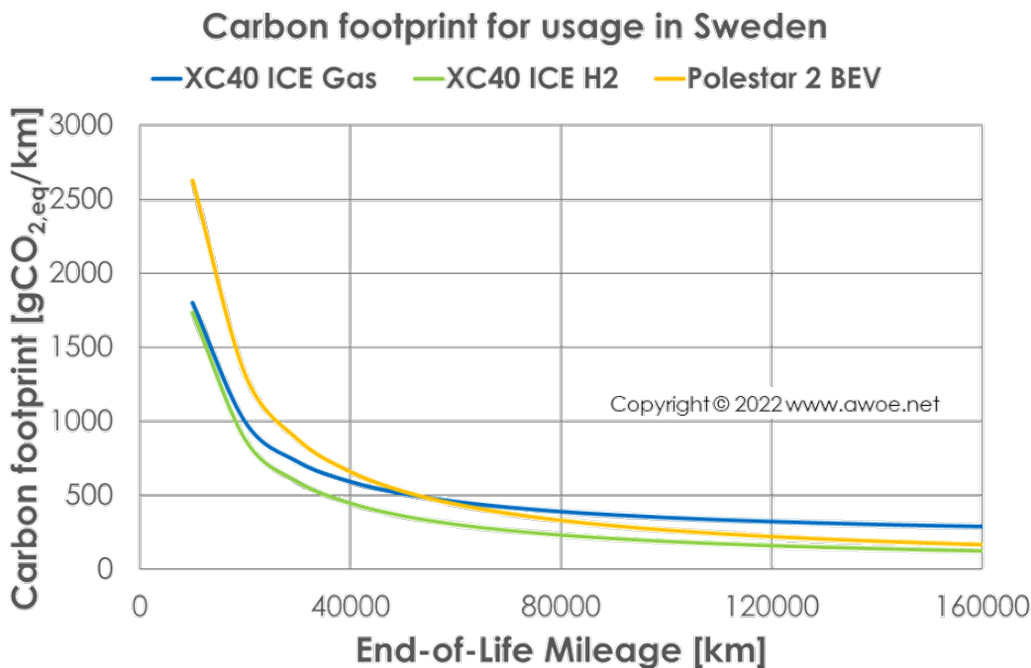
De concurrentie tussen het batterij-elektrische voertuig en het waterstofvoertuig hangt af van het relatieve gewicht van de initiële productie-emissies voor het energieopslagapparaat en van de koolstofvoetafdruk van elektriciteit. Het produceren van een batterij heeft een grotere impact op het milieu dan het produceren van een waterstoftank. Maar het omzetten van elektriciteit in waterstof omvat grote verliezen, waardoor de koolstofvoetafdruk van elektriciteit met een factor van ten minste 2 wordt benut.

Invloed van kilometerstand bij het einde van de levensduur

Een alternatieve benadering om de verschillende voortstuwingstechnologieën te analyseren, is om te kijken naar de evolutie van hun specifieke broeikasgasemissies met kilometerstand aan het einde van de levensduur. Wat het voertuigtype ook is, de initiële productie heeft een grote impact op het milieu, zodat het verhogen van de kilometerstand aan het einde van de levensduur altijd de specifieke uitstoot van broeikasgassen vermindert. Maar vanwege

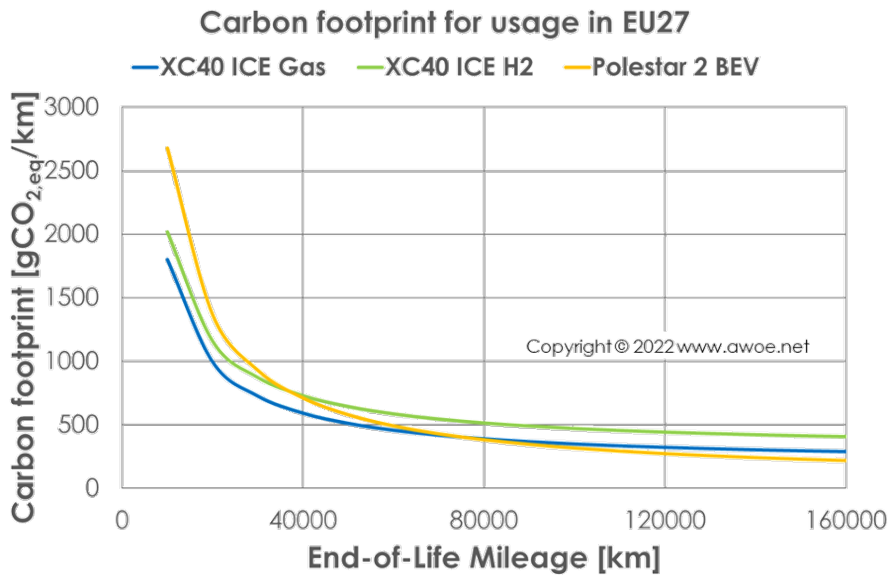
emissies tijdens energieproductie en conditionering en van emissies tijdens het reizen, ervaren niet alle technologieën hetzelfde specifieke emissieverval.

Gezien het geval van een schoon elektriciteitsnet (Zweden) is het waterstofvoertuig altijd de beste oplossing. In de productiefase van het voertuig is het veel beter dan het batterij-elektrische voertuig vanwege de milieubelasting van de batterijproductie. Bovendien heeft de productie van een Type IV-tank een lagere koolstofvoetafdruk dan het verbranden van benzine zodra het voertuig 7.000 km aflegt.



Invloed van afgedankte kilometers op de koolstofvoetafdruk van voertuigen in Zweden

De productielast van de batterij is zo groot dat zelfs met een schone elektriciteitsvoorziening het batterij-elektrische voertuig alleen maar een milieuvriendelijkere oplossing wordt dan een ICE-voertuig op benzine na 54.000 km. Ondanks de inefficiëntie van het produceren van waterstof uit elektriciteit, convergeert het batterij-elektrische voertuig alleen naar de koolstofvoetafdruk van het waterstofvoertuig voor een kilometerstand van 700.000 km, een onwaarschijnlijke totale kilometerstand voor een van deze technologieën.

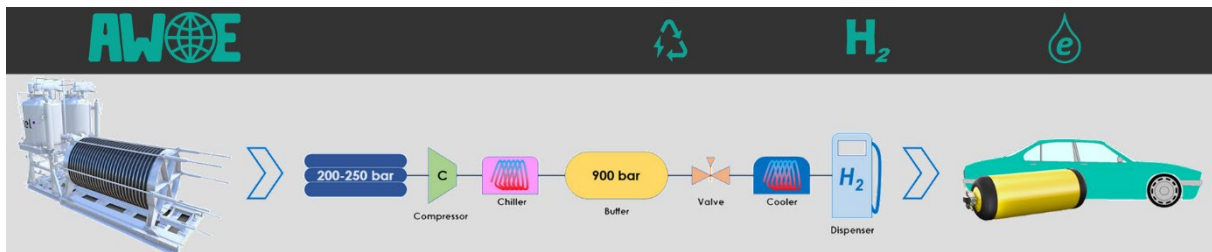


Invloed van afgedankte kilometers op de koolstofvoetafdruk van voertuigen in de Europese Unie

Wanneer er alleen vuile elektriciteit beschikbaar is, is het voertuig op waterstof altijd de slechtste oplossing. Bovendien, zolang de totale kilometerstand lager is dan 75.000 km, is het verbranden van benzine in een ICE-voertuig schoner dan het gebruik van een batterij-elektrisch voertuig. Daarom is er geen enkele technologische oplossing die de schoonste transportoplossing biedt onder alle omstandigheden.

Verwijzingen

- [1] Dlamini et al., The environmental LCA of steel vs HDPE car fuel tanks with varied pollution control, *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16 (2011), 410-419
- [2] Eriksson en Ahlgren, LCA's van benzine en diesel - een literatuuroverzicht, Swedish University of Agricultural Science, Report 2013:058
- [3] Cigré, Life Cycle Assessment (LCA) voor bovenleidingen, International Council on Large Electric Systems (Cigré), Parijs
- [4] Cigré, Elektrische voeding met behulp van SF6-technologie, International Council on Large Electric Systems (Cigré), Parijs



Waterstoftankstation

Geschreven door [Vincent Knop](#)

Gepubliceerd op 3 april 2022

Waterstoftankstations verschillen van conventionele vloeibare tankstations door het niveau van controle dat tijdens het tanken vereist is om de veiligheid te handhaven.

Terwijl vloeibare brandstof net boven de omgevingsdruk wordt geleverd door brandstof door de drukverliezen van de dispenser te persen, betekent het leveren van waterstof het manipuleren van gas tot 900 bar, waardoor grote mechanische en thermische stress in voertuigtanks ontstaat. Bovendien, om concurrerend te blijven met conventionele brandstoffen, wordt een vergelijkbare tanktijd van 3-4 minuten verwacht, wat de stress verder versterkt als gevolg van de snelle dynamiek van de opbouw van beperkingen.

Om een dergelijk doel te bereiken, wordt het tanken volledig geregeld door het station, waarbij het debiet wordt geselecteerd, de gastemperatuur wordt geregeld, met name door waterstof te koelen (tot -40 °C) en zich aan te passen aan de omgevingsomstandigheden (voornamelijk omgevingstemperatuur).

Waterstoftemperatuur

Tijdens het tanken stroomt waterstof uit een hogedruktank in de voertuigtank, alleen op basis van drukverschil, hoewel het debiet wordt geregeld door een klep.

In tegenstelling tot conventioneel tanken op vloeibare brandstof, heeft de gebruiker geen controle over het tankdebiet omdat het waterstofdebiet de temperatuurstijging in de tank beïnvloedt. Deze temperatuur moet om veiligheidsredenen onder een kritische waarde worden gehouden (internationale norm, met name SAE J2600 & J2601, beperkt de gemiddelde tanktemperatuur tot 85 °C).

Temperatuurbepaling tijdens het tanken is specifiek voor het tanken van gas en meer in het bijzonder voor waterstof vanwege de eigenschappen. Gas tanken houdt in dat het reeds in de tank aanwezige gas wordt gecomprimeerd met het toegevoegde gas uit de hogedrukbron. Een dergelijke compressie verhoogt de temperatuur in de tank. Bovendien heeft waterstof de specifieke eigenschap om op te warmen terwijl het uitzet van hoge naar lage druk (Joule-Thomson-effect), zodat de uitzetting over de klep die het debiet regelt, ook de gastemperatuur verhoogt.

De noodzaak om de tanktemperatuur onder de 85 °C te houden, komt voort uit veiligheidsoverwegingen voor hogedruktanks (350 of 700 bar). Een overmatige toename van de tanktemperatuur zou leiden tot een verzwakking van de tankmaterialen, waardoor hun vermogen om de gasdruk te weerstaan afneemt. Bovendien, terwijl een tank een nominale waarde heeft van 700 bar bij 15 °C, kan deze tot 875 bar ervaren onder warmere omgevingsomstandigheden.

De vereiste controle over de tanktemperatuur betekent dat het debiet dat door het tankstation wordt geleverd, afhankelijk is van de omgevingstemperatuur en de koelcapaciteit van het station. Als de omgevingstemperatuur hoger is, wordt het debiet verlaagd om de temperatuurstijging in de tank te beperken. Als het tankstation is uitgerust met het meest effectieve koelsysteem, kan het waterstof leveren tot -40 °C, zodat het een hogere omgevingstemperatuur aankan voordat het debiet aanzienlijk daalt.

Waterstofdruk

De meeste waterstofvoertuigen zijn uitgerust met tanks van 350 of 700 bar. Deze drukken zijn de niveaus die nodig zijn bij 15 °C om de nominale waterstofmassa in de tank te bereiken. Dergelijke drukken zijn hoog om te compenseren voor waterstof met een zeer lage dichtheid, zodat een geschikte hoeveelheid waterstof kan worden opgeslagen om een redelijke actieradius te leveren (H₂-verbruik voor een up-to-date brandstofcelauto is ongeveer 1 kg waterstof voor 100 km, zodat tanks van ongeveer 5 kg waterstof gebruikelijk zijn).

Hoewel tanks een vermogen van 350 of 700 bar hebben, kunnen ze bij hogere druk werken om hogere omgevingstemperaturen aan te kunnen (protocollimieten zijn -40 °C tot +50 °C). Een tank van 700 bar kan tot 875 bar werken onder warme omgevingsomstandigheden zonder enig risico op storingen, waardoor het tankstation ook meer dan 700 bar op een warme dag moet kunnen leveren.

Omdat het tanken wordt gerealiseerd door van een hogedrukbron naar een tank met lagere druk te stromen, moet de druk van het tankstation daarom veel meer dan 700 bar bereiken. Omdat de stroomregelklep, de waterstofkoeler en de dispenser drukverliezen zijn tussen de bron en de voertuigtank, betekent het leveren van ongeveer 800 bar een nog hogere drukbron, meestal in het bereik van 900-950 bar. Gezien het hoge energieverbruik om dergelijke drukniveaus te bereiken, zal het tankstation werken op de laagste praktische waarde binnen dit bereik.

Het opslaan van een grote hoeveelheid waterstof bij 900 bar zou grote tanks met een zeer hoge drukclassificatie vereisen en dergelijke tanks zijn erg duur. Naast de kosten is er ook het gevaar van het opslaan van grote hoeveelheden waterstof onder zeer hoge druk en de potentiële grote verliezen in verband met drukregeling in een warme omgeving. Dienovereenkomstig hebben de meeste stations een lokale elektrolyser (die waterstof produceert wanneer dat nodig is) of gebruiken ze een tussenliggende drukopslag (meestal tussen 200 en 250 bar, de standaard voor gastanks op trailers), beide aangesloten op een compressor om tot 900 bar te bereiken. Omdat compressie de gastemperatuur verhoogt, wordt de compressor over het algemeen gevolgd door een koelmachine om waterstof terug te brengen naar de omgevingstemperatuur en om de vraag naar de waterstofkoeler tijdens het doseren te verminderen.

Drukverhoging

De SAE-norm schrijft voor dat het tanken een lineaire drukverhoging in de voertuigtank moet zijn, waarbij het debiet wordt geregeld op basis van de verwachte maximale temperatuur in de tank tijdens het tanken. De klepregeling is daarom gebaseerd op de kennis van de evolutie van het brandstofverbruik, afhankelijk van de omgevingsomstandigheden, de mogelijkheden van het tankstation en de tankomstandigheden van het voertuig. Een dergelijke kennis komt van standaard opzoektabelen of standaardcorrelaties die zijn gedefinieerd in de SAE-standaard.

Tijdens het gebruik van opzoektabelen regelen de begincondities het tanken volledig, omdat de methode geen feedback van de voertuigtank vereist. De drukhelling is zo gedefinieerd dat deze nooit hoger is dan 85 °C van de tanktemperatuur, ongeacht het type tank en voertuig. Deze methode is daarom veilig maar conservatief in de meeste omstandigheden, dus suboptimaal in termen van tankduur.

Met behulp van de correlaties met behulp van feedback van het voertuig (na een eerste fase van de jaren 30 op basis van opzoektabelen), kan het momentane debiet tijdens het tanken worden aangepast aan de kenmerken van het voertuig om een hoger massadebiet te bereiken terwijl de maximale temperatuur binnen het veilige bereik blijft. De correlatiemethode versnelt het tanken door zich aan te passen aan specifieke voertuigen. Afhankelijk van de omstandigheden kan dit resulteren in energiebesparing of overconsumptie (ongeveer 6% in elke richting).

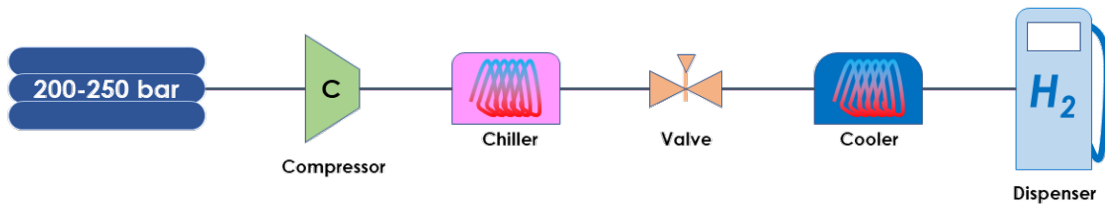
In ieder geval mag het waterstofdebiet nooit hoger zijn dan 60 g/s om oververhitting van de voertuigtank te voorkomen, zodat het vullen van een tank van 5 kg van leeg minstens 11/2 minuut nodig heeft. In werkelijkheid dicteert het op tabel gebaseerde tankprotocol toegepast op een tank van 700 bar bij een omgevingstemperatuur van 20 °C een gemiddelde drukverhogingssnelheid (APRR) van 21,8 MPa / min en een einddruk van 74,5 MPa, zodat het tanken van een lege tank 31/2 minuten vereist.

Een dergelijke drukverhogende benadering betekent dat het eerste deel van het tanken de meeste temperatuurstijging veroorzaakt omdat:

- De druk in de voertuigtank is het laagst, wat leidt tot de hoogste uitzetting over de klep
- Het gas dat zich al in de tank bevindt, ervaart de grootste compressieverhouding van de volledige tankcyclus

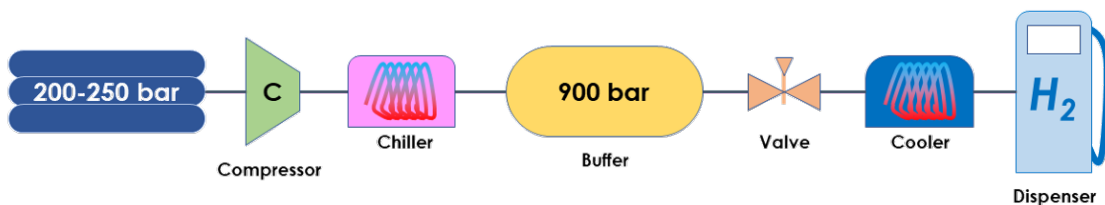
Energieverbruik

De eenvoudigste installatie om waterstof met 900 bar aan een regelklep te leveren, zou zijn om alleen een compressor te laten pompen vanuit een tussenliggende drukopslag. Dit vereist echter dat het compressorgebruik wordt gesynchroniseerd met waterstofafgifte en dat de compressor wordt gedimensioneerd met het maximaal vereiste debiet. Een hoog debiet en een snelle respons dwingen beide tot overmaat van de compressor met betrekking tot een alternatief ontwerp met een buffervat.



Indeling waterstof-tankstation zonder buffervat

Daarom bevat een praktisch tankstation altijd ten minste een buffervat dat waterstof via de regelklep en koeler aan de dispenser levert. Dit buffervat wordt door de compressor laat in het tanken of na het tanken bijgevuld. Vanuit het oogpunt van energieverbruik omvat een volledige tankbeurt het leveren van de waterstof en vervolgens het terugzetten van de hogedrukbron naar zijn oorspronkelijke status, d.w.z. het comprimeren van wat waterstof tot 900-950 bar.



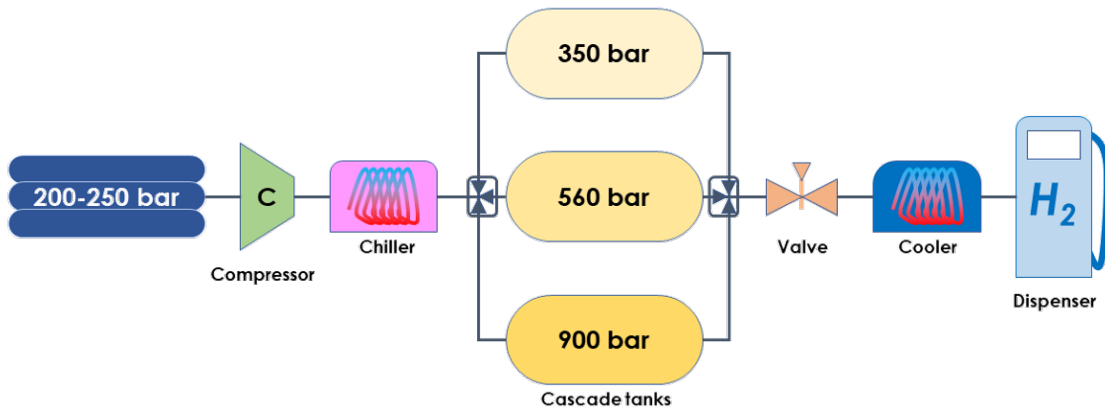
Indeling waterstof-tankstation met buffervat

Tijdens het tanken is het energieverbruik voornamelijk gerelateerd aan waterstofkoeling voor het beheer van de temperatuur van de voertuigtank. Na het tanken (of laat in het tanken als het buffervat een kleine capaciteit heeft), levert de compressor wat waterstof onder zeer hoge druk aan het buffervat om het binnen het bereik van 900-950 bar te houden.

De waterstofcompressie tot 900-950 bar vertegenwoordigt ongeveer 50% van het totale energieverbruik, terwijl de koelmachine ongeveer 30% van de totale energie verbruikt en de koeler aan de dispenserzijde ongeveer 20% verbruikt.

Trapsgewijze installatie

Compressie van waterstof tot 900 bar is het grootste aandeel van het energieverbruik, het verkorten van het gebruik van een 900 bar bron tijdens het tanken is de sleutel tot energiebesparing. Om dit te doen, splitst een cascade-installatie het buffervolume in meerdere tanks met verschillende drukk niveaus. Het laagste drukk niveau wordt gebruikt aan het begin van het tanken voordat automatisch wordt overgeschakeld naar de tussenliggende drukk niveaus en alleen het hoogste (900 bar) drukk niveau wordt gebruikt voor de laatste fase.



Indeling waterstof-tankstation met cascade van buffertanks

Meerdere analyses van cascade-installaties hebben aangetoond dat een set van 3 buffertanks met een geometrische progressie van drukniveaus de beste aanpak is om energie te besparen. Een lagedrukbuffertank slaat waterstof op bij ongeveer 350 bar. Een tussendrukbuffertank slaat waterstof op bij ongeveer 560 bar. En een hogedrukbuffertank slaat waterstof op bij ongeveer 900 bar. Er is een piek in de koelbehoeften bij het schakelen tussen tanks, omdat de drukverhouding over de regelklep omhoog springt. De verdeling van de drukniveaus heeft dus ook invloed op de dimensionering van de koelers en de bijbehorende kapitaalkosten.

Tijdens het tanken wordt de voertuigtank eerst op het laagste niveau aangesloten totdat de drukspleet over de regelklep een bepaalde limiet bereikt, schakelt vervolgens over naar het tussenliggende niveau en gebruikt alleen het hoogste niveau voor het laatste deel van het tanken. De energiebesparing met deze aanpak komt van

1. Het gebruik van een lagere drukbron voor een groot deel van het tanken, wat leidt tot minder compressiewerk om deze tanks terug te brengen naar hun oorspronkelijke druk
2. De verminderde uitzetting over de regelklep, waardoor de gasverwarming wordt verminderd (Joule-Thomson-effect) en daardoor het energieverbruik bij de koeler wordt verminderd
3. Het sneller bijvullen van de buffertank betekent een capaciteit voor meer tanken van voertuigen binnen een bepaalde periode, waardoor het vereiste aantal compressoren en dispensers voor een wagenpark wordt verminderd, waardoor het hulpverbruik van het station wordt beperkt

De totale energiebesparing bij de overgang van een enkele buffertank naar drie buffertanks is ongeveer 1/3. Er zijn nog steeds besparingen met meer tanks, maar de winsten worden klein terwijl de extra kosten hoog zijn. Een 3-buffer-tank systeem wordt daarom over het algemeen gezien als de beste afweging. In een orde van grootte verbruikt het tanken van 240 kWh waterstof in een voertuigtank ongeveer 6 kWh, d.w.z. ongeveer 2,5% van de energie-inhoud.

Zodra het tanken voorbij is, kan het bijvullen van elk buffervat worden gedaan, te beginnen met het laagste of het hoogste drukniveau. De volgorde voor bijvullen heeft slechts een bescheiden effect op het energieverbruik (ongeveer 1% lager wanneer u vanaf het laagste

begint), maar beginnen bij het hoogste heeft het voordeel dat meerdere opeenvolgende tankevenementen mogelijk zijn zonder veel capaciteitsverlies.

Merk op dat, omdat het op tabellen gebaseerde tankprotocol het debiet uitsluitend definieert op basis van de omgevingsomstandigheden en de maximale mogelijkheden van het station (hoogste druk, laagste koeltemperatuur), er geen verschil is in tankduur tussen een enkele tank en een cascade-installatie. Door de tank met de hoogste druk echter minder uit te putten, is de cascade-installatie in staat tot meer opeenvolgende tankgebeurtenissen.