

WATERSTOF

Door Fred van Hessen

Waterstof mag dan “het meest voorkomende element in het universum” zijn, maar op aarde komt vrije waterstof niet voor; het moet gemaakt worden.

Van de [1 500 000](#) ton waterstof die in Nederland per jaar geproduceerd wordt is ongeveer de helft ‘zuivere waterstof’, de rest is ‘bijproduct waterstof’ van olie raffinage, staal productie, enz. 80% van de zuivere waterstof is voor de productie van ammonia, de rest is voor olieraffinage (hydrocracking) en de productie van methanol.

Er zijn verschillende manieren om zuivere waterstof (hierna toch maar aangeduid als ‘waterstof’) te maken, vaak aangeduid met de kleuren grijs, groen, blauw en turquoise.

Grijs

Tot nog toe wordt vrijwel alle waterstof gemaakt m.b.v. “[Stoom methaan reforming](#)” (SMR) omdat dit de goedkoopste methode is. Een moderne SMR plant bestaat uit 4 systemen: Desulfurization, Reforming, High-Temperature Shift (HTS) en Pressure Swing Adsorption (PSA). Een ton waterstof op deze manier geproduceerd gaat gepaard met de productie van [9,3 ton CO₂](#). (Daarom heet dit ‘grijze’ waterstof).

Andere manieren om waterstof te produceren, (groene, blauwe en turquoise (blauwgroene) waterstof), gaan gepaard met minder of geen uitstoot van CO₂, maar zijn vaak nog niet op industriële schaal toegepast en het product (de waterstof) is veel duurder dan de grijze variant.

Groen

Gebruik [elektrolyse](#) met ‘groene stroom’ (van zon en wind) om water te splitsen in waterstof en zuurstof. Resultaat: waterstof zonder een grammetje CO₂. Alleen zal het nog jaren duren vóórdat er voldoende groene elektriciteit voorhanden zal zijn. (Een GW electrolyser kan zo’n [150 kton waterstof](#) per jaar produceren, we moeten er dus 10 bouwen om alleen al de huidige productie te “vergroenen”. Daar komen nog plannen bij voor toekomstige elektrificatie van industrie, automobilititeit en huishoudens.)

Bij de huidige prijs van groene stroom moet de prijs van CO₂ tot €135 per ton oplopen (is nu [rond ~€70 per ton](#), intussen opgelopen tot €80/t) om te kunnen concurreren met ‘grijs’.

Ammoniak producent Yara is van plan een [100MW electrolyser](#) te bouwen, als onderdeel van het ‘[SeaH2Land](#)’ project van Ørsted. De waterstof wordt verwerkt tot ongeveer 75.000 ton per jaar groene ammonia. Dat is ~5% (!) van hun productie. Het project moet in 2024/2025 operationeel zijn, ervanuit gaande dat het door de overheid aangekondigde waterstof instrument en de juiste regelgeving eind 2021 gereed is. Yara alleen kan dus al 2GW absorberen, maar om ureum te kunnen maken zullen ze dan CO₂ moeten *importeren!*

Buiten ons land wordt het wat groter aangepakt:

Air Products en Saudi partners willen een [4 GW solar en wind park](#) bouwen in Arabië waarmee ze 650 ton waterstof per dag hopen te produceren. Start up: 2025, kosten: \$5 miljard. Om de waterstof te kunnen exporteren wordt deze omgezet in ammonia. Er zijn ook plannen om in de Australische woestijn op 6500 km² een zon-en-wind park te bouwen met een capaciteit van [3 GW](#).

[Dogger Bank Wind Farm](#) bestaat uit 3 secties, 1,2 GW elk, waarvan de eerste 2 zullen bestaan uit elk 95 Haliade-X 13MW offshore wind turbines van General Electric (waarvan er één sinds 2019 heeft proefgedraaid in Rotterdam). De turbines in de 3^{de} sectie zullen een vermogen hebben van 14 MW. “First power” wordt verwacht in 2023, completering van het project in 2026.

Echter electrolyzers worden gezien als systeem functie om het potentieel van 70 GW wind op zee te benutten. Dus er zullen op termijn naar verwachting wind – waterstof tenders komen.

Elektrolyse kan op [verschillende manieren](#) uitgevoerd worden: Alkalisch, PEM of SOEC. (Zie onderstaand kader)

De eerste is op dit moment het goedkoopst en het meest doorontwikkeld, maar heeft een lage stroomdichtheid, is daardoor zwaar en neemt veel ruimte in beslag. De tweede gebruikt schaarse metalen (iridium / platina) in de elektroden en is daarom duur, maar veel compacter. Een ander voordeel is dat PEM-elektrolyse beter in staat is een wisselend elektriciteit aanbod te volgen en daardoor beter geschikt is om een net te stabiliseren en waterstof kan produceren met een druk van tot 200 bar, waardoor compressie overbodig wordt.

Elektrolyse in 3 smaken

[Alkalisch](#)
Een alkalische cel heeft elektroden van Raney nikkel gescheiden door een dun (0.050-0.5 mm) diafragma van bijvoorbeeld [Zirfon](#), a composietmateriaal van zirkoniumoxide en Polysulfone. Dit diafragma geleid géén elektronen, maar laat wél **OH⁻ ionen** passeren. Het water, dat die ionen moet leveren, is gemengd met 30% kalium hydroxide voor maximale elektrische geleidbaarheid

[PEM-elektrolyse](#)
In deze techniek zijn de elektroden van platina en iridium. Hierdoor zijn de cellen veel duurder dan de alkalische variant, maar ze laten wel een veel grotere stroomdichtheid toe, waardoor ze veel minder plaats innemen. De elektroden worden gescheiden door een membraan, dat **waterstofionen** (protonen) laat passeren, vandaar de naam “proton exchange membrane (PEM)”. Het membraan bestaat uit hetzelfde polymeer (PFSA, [Nafion](#)) dat al meer dan 50 jaar dienst doet in de productie van chloor.

[Linde installeert](#) een 24 MW PEM electrolyser die eind 2022 moet beginnen te produceren.

[Life Cycle Analysis](#) laat zien dat er weinig verschil is tussen deze twee technieken.

[SOEC](#)
In een solid oxide electrolysis cell worden de elektroden gescheiden door een keramisch membraan, dat **zuurstof ionen** (O²⁻) doorlaat.

[MULTIPLY](#) is een project in de Botlek, dat 60 kg waterstof per uur gaat leveren aan Neste m.b.v. een 2.6 MW SOEC unit. Verwachte oplevering: 2022.

Haldor Topsoe wil een [100 MW SOEC elektrolyse unit](#) bouwen in Duitsland voor de productie van groene ammonia. Verwachte oplevering: 2024

The diagram illustrates the internal structure and ion transport of three electrolysis technologies.
1. **AEC (Alkaline Electrolysis Cell):** Shows an Anode on the left and a Cathode on the right, separated by a Separator. Both electrodes are immersed in a KOH electrolyte. OH⁻ ions are shown moving from the cathode to the anode through the separator. O₂ is produced at the anode and H₂ at the cathode.
2. **PEMEC (Proton Exchange Membrane Electrolysis Cell):** Shows an Anode and a Cathode separated by a Membrane. H⁺ ions are shown moving from the anode to the cathode through the membrane. H₂O enters from the left, and O₂ is produced at the anode and H₂ at the cathode.
3. **SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cell):** Shows an Anode and a Cathode separated by a Membrane. O²⁻ ions are shown moving from the cathode to the anode through the membrane. H₂O enters from the right, and O₂ is produced at the anode and H₂ at the cathode.

Bij alle elektrolyse, van welke soort dan ook, komt warmte vrij. De eerste twee manieren worden bedreven bij 60-90°C. De vrijkomende warmte is dus ‘van lage kwaliteit’; het is

moeilijk er iets nuttigs mee te doen, behalve voeden aan een warmte net voor stadsverwarming.

De derde variant daarentegen vindt plaats bij 600-1000°C (daarom wordt het ook 'stoom elektrolyse' genoemd) en heeft een veel hogere efficiency (93% tegen ~70% voor de andere twee). Dit komt gedeeltelijk doordat 25% minder elektrische input nodig is bij 800°C dan bij 100°C. Door integratie in bijvoorbeeld een ammoniak fabriek (waar waterstof bij hoge temperatuur en druk nodig is) kan de gezamenlijke efficiëntie oplopen tot 97%. (Zie Factsheet Ammonia)

In de 25 kWe [PROMETEO](#) pilot, gefinancierd door de EU, wordt een geïntegreerd modulair systeem getest dat bestaat uit geconcentreerde zonnewarmte, hoge temperatuur warmte opslag (om continu door te kunnen werken) gekoppeld aan een solid oxide electrolyzer. Beoogd resultaat: TRL 5 in 2024.

Blauw

Zolang 'groen' onvoldoende capaciteit heeft om de klimaat doeleinden te helpen behalen moet 'blauw' als tussenmaatregel uitkomst bieden. Blauwe waterstof is grijze waterstof (d.w.z. gebaseerd op SME), maar gevolgd door CCS, ondergrondse opslag van de afgevangen CO₂. Dit is nogal controversieel, niet alleen vanwege de aversie tegen ondergrondse opslag (denk aan Barendrecht), maar ook omdat de vrees bestaat dat investeren in 'blauw' de invoering van 'groen' zal vertragen. Om te concurreren met 'grijs' is een CO₂ prijs nodig van €70 per ton.

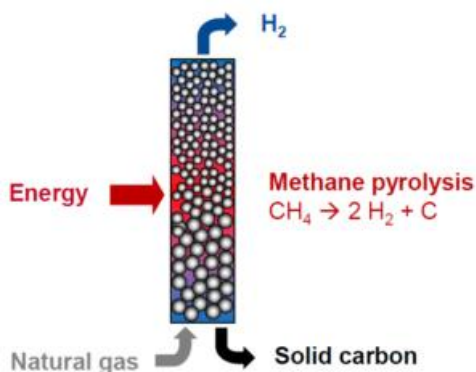
Toch staan er verschillende grote plannen op stapel:

BP heeft een 'memorandum of understanding' bekendgemaakt om tegen 2027 in [Teesside](#) 0,13mln ton blauwe waterstof te produceren, met de bedoeling de capaciteit te verdubbelen tegen 2030.

In Nederland is [H2Gateway](#) een project om 0,2mln ton blauwe waterstof te produceren ook tegen 2027. Het is gepland voor Den Helder dat op de kortste afstand tot geschikte lege gasvelden in de Noordzee ligt.

Turquoise

Turquoise is eigenlijk blauw (want gebaseerd op aardgas) maar toch wel groener, want de koolstof komt niet vrij als CO₂, maar in een vorm die nuttig gebruikt kan worden.



We spreken hier over de [pyrolyse van methaan](#). Gas wordt onder in een reactor gevoerd, die gevuld is met een vloeibaar metaal. Bij een temperatuur van 800-1000°C wordt methaan gekraakt met koolstof en waterstof als producten, die beide naar boven zweven/borrelen. Problemen zitten hem in de zuiverheid van beide producten en het vinden van een geschikte katalysator, die oplost in het gesmolten metaal en niet gedeactiveerd wordt door de koolstof. In een variatie, gepatenteerd door [TNO](#), drijft een laag gesmolten zout op het metaal, dat metaal resten van de koolstof deeltjes 'wast'.

De koolstof kan in de staalindustrie worden gebruikt; die gebruikt nu rond [0.6 ton](#) cokes per ton staal.

Intussen heeft het Amerikaanse Monolith Materials een methaan kraker ontwikkeld waar [geen gesmolten metaal](#) aan te pas komt. Grappig genoeg is waterstof voor hen een

bijproduct; hun hoofdproduct is carbon black. (Voor elke 3 ton carbon black krijg je een ton waterstof cadeau.) Een fabriek voor de productie van 14000 ton carbon black per jaar is in de commissioning fase. Constructie op een naastgelegen terrein voor de productie van [180 000 tpy carbon black](#) wordt verwacht in 2021 te beginnen. Deze wordt geïntegreerd met een HB-ammonia faciliteit.