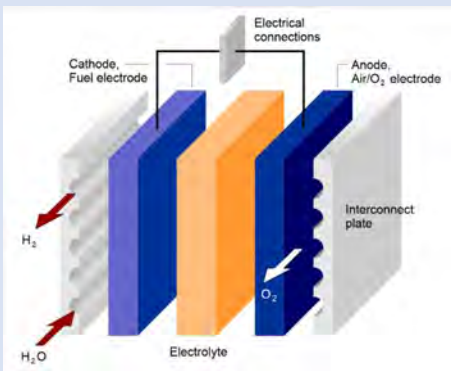
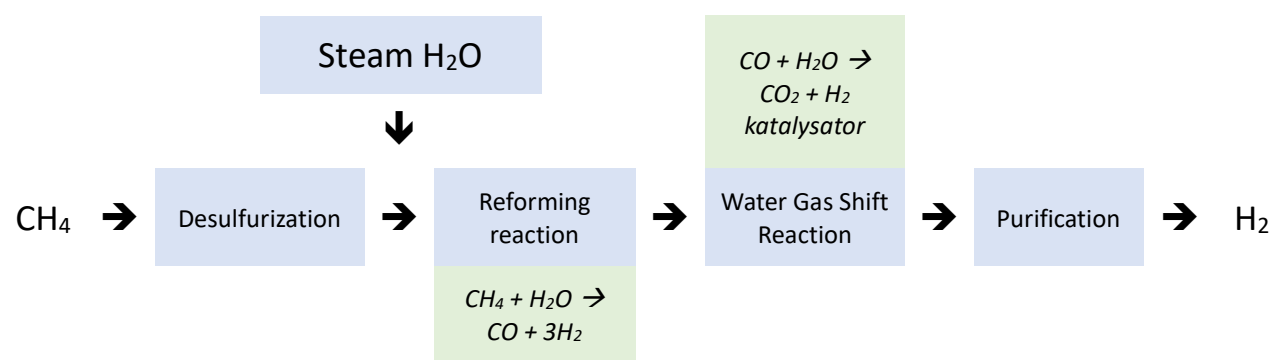


06.02	STOOM METHAAN HERVORMING
-------	--------------------------

Om grijze en blauwe waterstof te produceren maakt men gebruik van **Steam Methane Reforming (SMR)** waarbij natuurlijk gas, ofwel methaan (CH₄) onder hoge temperatuur reageert met water (H₂O) in de vorm van stoom, doorgaans in de aanwezigheid van een katalysator zoals nikkel.

Bij deze reactie ontstaat koolstofmonoxide (CO) en waterstof (H₂), waarbij een aanvullende reactiestap tussen het koolstofmonoxide en stoom verdere waterstof en koolstofdioxide (CO₂) brengt. Dit koolstofdioxide zorgt voor uitstoot bij grijze waterstof, waardoor deze methode niet ideaal is voor de groeiende marktvraag. Bij blauwe waterstof wordt het geproduceerde koolstofdioxide afgevangen om vervolgens opgeslagen of verwerkt te worden, wat zorgt voor minder, of zelfs helemaal geen directe uitstoot.



Vereenvoudigd proces van stoom methaan hervorming.

Gezien de delicate balans van inkomende stromen bij Steam Methane Reforming is het belangrijk dat het proces veilig en voorspelbaar verloopt. De aanwezigheid van ongewenste deeltjes kan negatieve consequenties hebben voor zowel de componenten binnen de SMR installatie als voor de efficiëntie van het gehele proces. Filters zijn dus van onschatbare waarde. Hierbij komt ook kijken dat het proces onder druk en verhoogde temperaturen plaatsvindt, wat door de aanwezigheid van ultra puur water als input voor een agressief en uitdagend milieu zorgt.

	SMR – proces in een overzichtelijke voorstelling van het bedrijf MAHLER AGS? Volg de link.	
	Overzicht op de volgende pagina onduidelijk? Volg de link en ontdek meer informatie op linkedin.	

Air Products can add value throughout your hydrogen plant Put our hydrogen expertise to work for you.

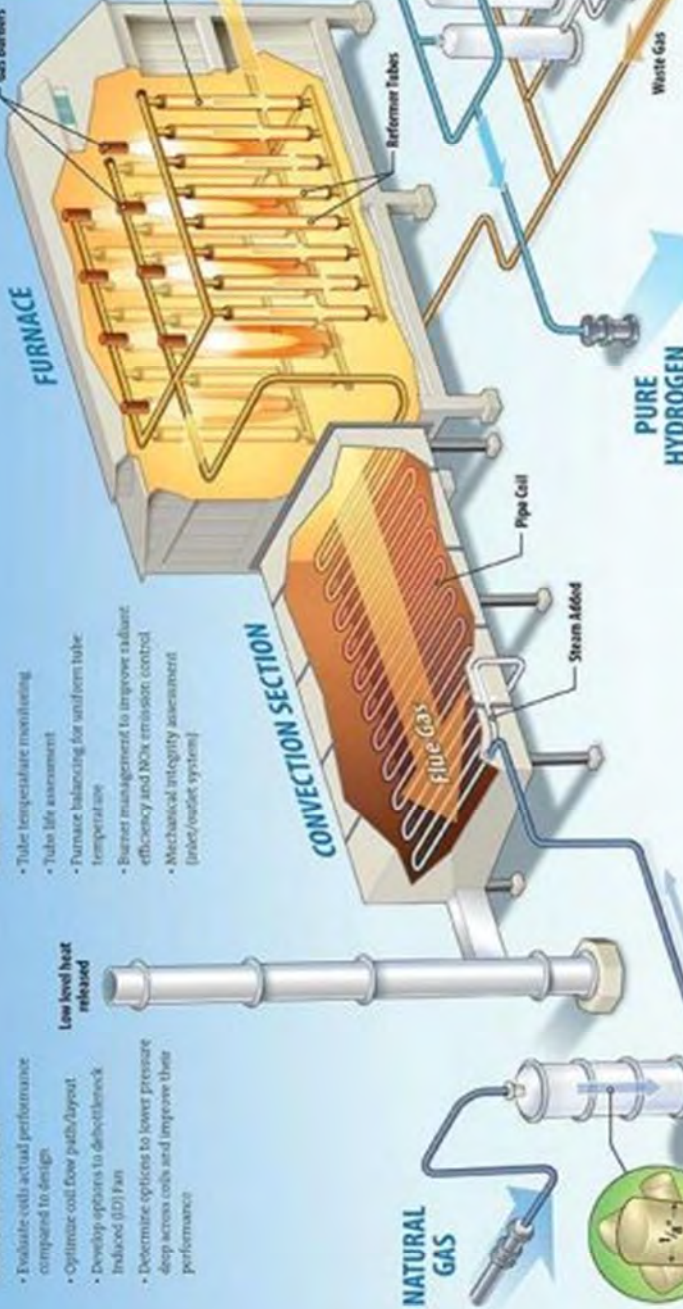
Convection section

- Evaluate cells actual performance compared to design
- Optimize coil flow path/layout
- Develop options to debottleneck induced (ID) fan
- Determine options to lower pressure drop across coils and improve their performance

Furnace

- Tube temperature monitoring
- Tube life assessment
- Furnace balancing for uniform tube temperature
- Burner management to improve radiant efficiency and NOx emission control
- Mechanical integrity assessment (inlet/outlet system)

Low level heat released



- ### Syngas Cooling Train
- Optimize shift reactions
 - Evaluate cooling train exchangers performance
 - Optimize PSA feed temperature



Nickel Ceramic Pellet

Pressure Swing Adsorbers (PSAs)

- Capacity and recovery optimization (cycle time, control system)
- Purge gas composition/flow optimisation to reduce oxygen savings in reformer furnace
- Adsorbent degradation assessment
- On site adsorbent replacement/upgrade Advisory Services

Overall Hydrogen Plant Services

- Reliability and productivity plant assessments
- Complete plant performance test at maximum and minimum production rates
- Fueling and corrosion assessment
- Plant compression system evaluation
- Emergency services/troubleshooting
- Safety audits
- Preventative maintenance programs

No other industrial gas company produces as much hydrogen as Air Products.

Feedstock purification

- Optimize to process a wide variety of SMR feeds (e.g. refinery off-gas, refinery fuel gas, heavy hydrocarbons, liquid feeds, LPG, butane)
- Feed gas impurities testing (e.g. sulfur, chlorides, mercaptans)

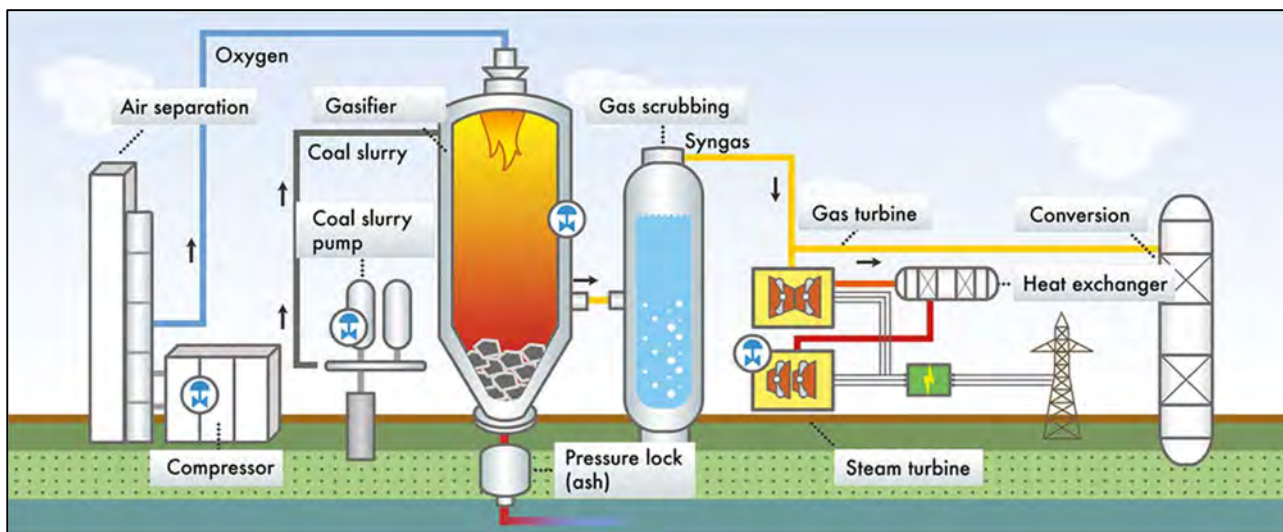
Overzicht van een SMR – proces in de industrie.

06.03 KOLENVERGASSING

Het proces begint met vergassing. Hierbij worden kolen omgezet in een zeer heet (tot wel 1800°C) synthesegas, of **syngas**, dat voornamelijk bestaat uit koolstofmonoxide, waterstofgas en koolstofdioxide, samen met kleine hoeveelheden andere gassen en deeltjes. Dit gebeurt door fijngemalen kolen te mengen met een oxidant, meestal stoom, lucht of zuurstof.

Vervolgens wordt het syngas gekoeld en gereinigd om de overige gassen en deeltjes te verwijderen, zodat alleen koolstofmonoxide, koolstofdioxide en waterstof overblijven. Syngas is eenvoudiger te reinigen dan de uitstoot van een conventionele kolengestookte energiecentrale. Tijdens het reinigen van het syngas worden kwik, zwavel, sporenverontreinigingen en fijnstof verwijderd.

Het gereinigde syngas wordt vervolgens naar een shiftreactor geleid. Tijdens deze reactie wordt koolstofmonoxide omgezet in extra waterstof en koolstofdioxide door het te mengen met stoom. Na deze stap bestaat het syngas voornamelijk uit waterstof en koolstofdioxide. Ten slotte wordt het syngas gescheiden in stromen van waterstof en koolstofdioxide. Nadat de waterstof verder is gereinigd, is het klaar voor gebruik.



Overzicht van een koolvergassing in de industrie.

06.04 BIOMASSA VERGASSING

Vergassing is een proces dat **organische** of fossiele koolstof houdende materialen bij hoge temperaturen van meer dan 700°C, zonder verbranding, met een gecontroleerde hoeveelheid zuurstof en/of stoom omzet in koolstofmonoxide, waterstof en koolstofdioxide.

De koolstofmonoxide reageert vervolgens met water om koolstofdioxide en meer waterstof te vormen via een water-gas-shiftreactie ($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ + kleine hoeveelheid warmte). Adsorptiemiddelen of speciale membranen kunnen de waterstof uit deze gasstroom scheiden.

Een vereenvoudigde voorbeeldreactie: $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{CO}_2 + \text{H}_2$ + andere verbindingen. In deze reactie wordt glucose gebruikt als vervanger voor cellulose. Werkelijke biomassa heeft een sterk variërende en complexe samenstelling waarbij cellulose één van de belangrijkste componenten is.

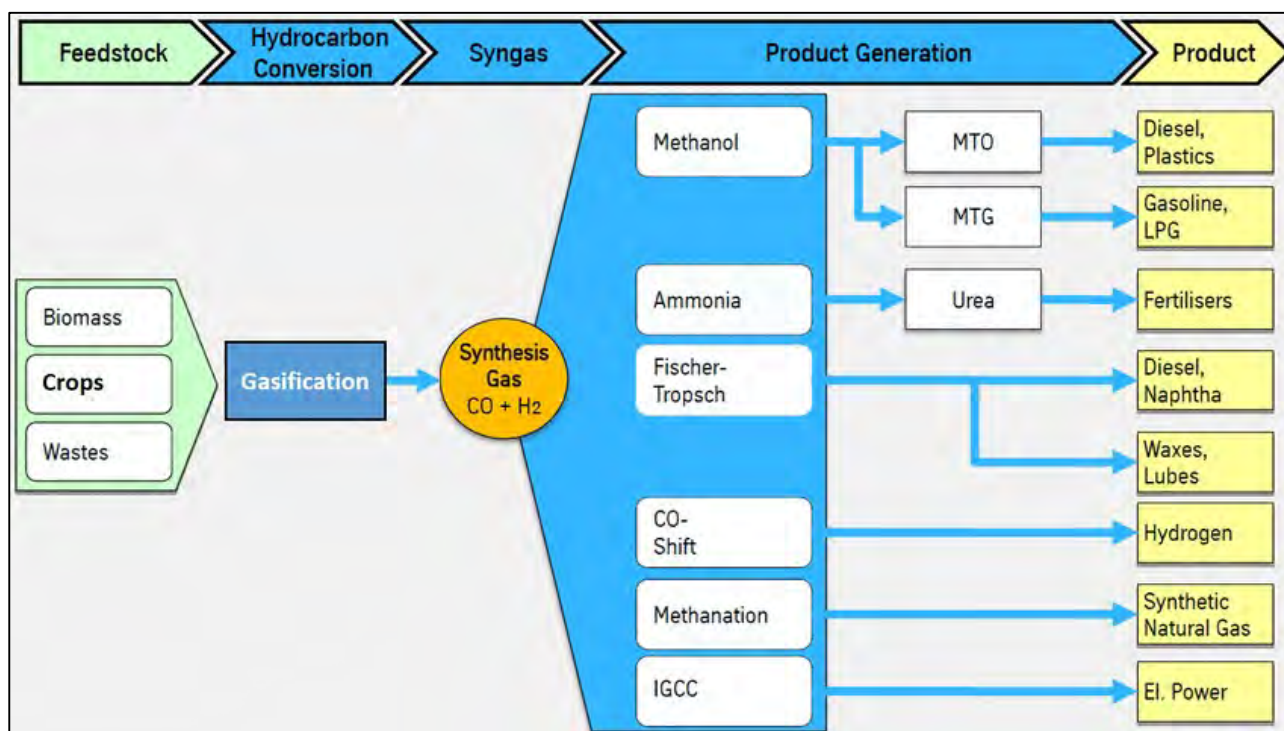
Bij dit proces spreekt men ook over de term pyrolyse in plaats van vergassing. Dit is de vergassing van biomassa in afwezigheid van zuurstof.

Over het algemeen is biomassa moeilijker te vergassen dan steenkool, en het produceert andere koolwaterstofverbindingen in het gasmengsel dat de vergasser verlaat; dit geldt vooral wanneer er geen zuurstof wordt gebruikt. Hierdoor is vaak een extra stap nodig



Automatische industriële biomassa pyrolyse vergasser.

om deze koolwaterstoffen met een katalysator om te zetten in een syngasmengsel van waterstof, koolstofmonoxide en koolstofdioxide. Net als in het vergassingsproces voor waterstofproductie, wordt de koolstofmonoxide in een shift-reactiestap (met stoom) omgezet in koolstofdioxide. De geproduceerde waterstof wordt vervolgens gescheiden en gezuiverd.



Vergassing van biomassa tot synthesegas kan gebruikt worden in verschillende toepassingen (Afb. Radtke en Wulcko 2015)

06.05 THERMOCHEMISCHE SPLITSING

Thermochemische watersplitsing maakt gebruik van zeer hoge temperaturen, opgewekt door geconcentreerde zonne-energie of restwarmte van kernreactoren, om water te splitsen in waterstof en zuurstof. Deze technologie biedt een veelbelovende oplossing op langere termijn voor waterstofproductie met mogelijk lage of geen uitstoot van broeikasgassen.

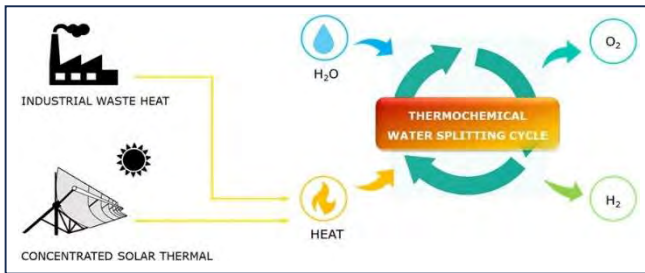
Het proces gebruikt temperaturen tussen de 500°C en 2.000°C om een reeks chemische reacties te veroorzaken die waterstof produceren. Eén van de belangrijkste kenmerken van dit systeem is dat de gebruikte chemicaliën steeds opnieuw worden ingezet, wat resulteert in een gesloten kringloop. Hierdoor verbruikt het proces alleen water en produceert het als eindproducten waterstof en zuurstof.

De benodigde temperaturen kunnen op 2 manieren worden bereikt:

- **Geconcentreerde zonne-energie:** met behulp van spiegels, zogenaamde heliostaten, wordt zonlicht op een centrale reactor geconcentreerd. Er ontstaat voldoende warmte om chemische reacties te ondersteunen.
- **Restwarmte** van kernreactoren: de warmte die vrijkomt bij geavanceerde kernreactoren kan worden gebruikt om de hoge temperaturen te leveren die nodig zijn voor het watersplitsingsproces.



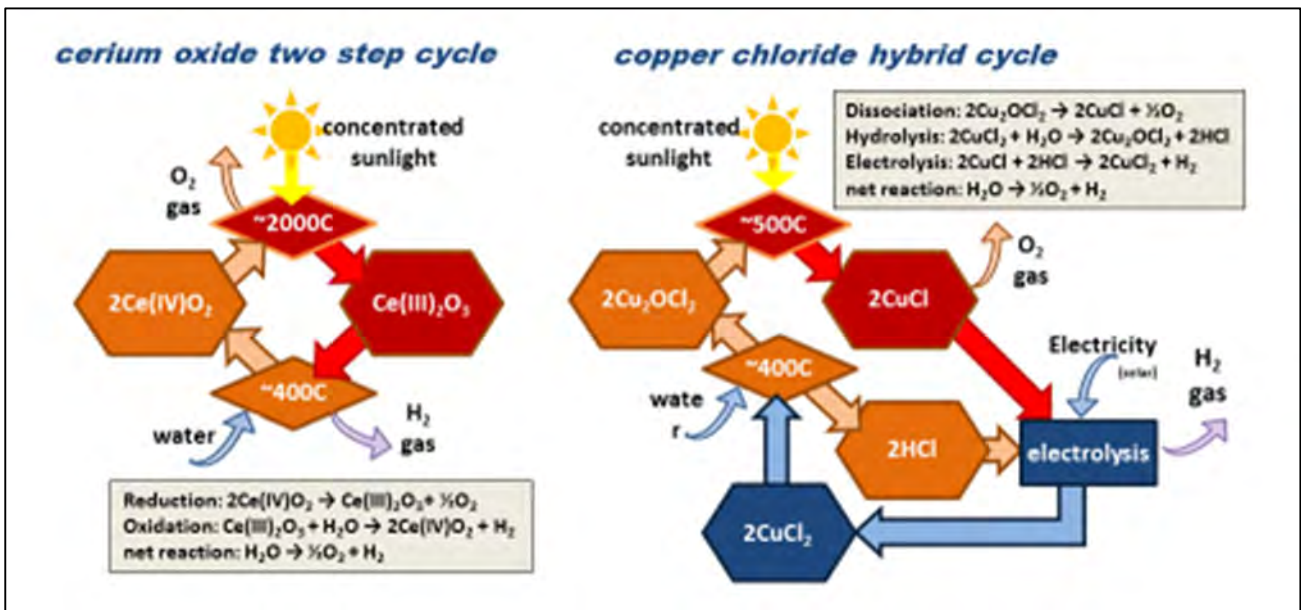
Opstelling heliostaten in Zuid – Afrika.



Er zijn al meer dan 300 verschillende thermochemische watersplittingscycli onderzocht, elk met hun eigen operationele voorwaarden, uitdagingen en mogelijkheden voor waterstofproductie.

Deze cycli variëren in complexiteit en efficiëntie, afhankelijk van de toegepaste chemische processen en de technologie die nodig is voor het opwekken van de vereiste hitte.

Twee bekende voorbeelden van thermochemische watersplitting zijn de **directe** tweestaps ceriumoxide-cyclus en de **hybride** koperdichloride-cyclus. Directe cycli zijn meestal eenvoudiger omdat ze minder stappen bevatten, maar ze vereisen hogere temperaturen om te functioneren. Hybride cycli zijn complexer en vereisen meer stappen, maar kunnen werken bij lagere temperaturen, wat hen geschikter maakt voor bepaalde toepassingen.



Schematische voorstelling thermochemische watersplitting.

Thermochemische watersplitting is een veelbelovende technologie voor het grootschalig produceren van schone waterstof, vooral omdat het gebruikmaakt van hernieuwbare energiebronnen en alleen water als grondstof nodig heeft.

06.06 WATERSTOF ALS BIJPRODUCT

Waterstof als **bijproduct** is een interessante en goedkope bron van waterstof. Elektrochemische processen zoals de industriële productie van bijtende soda en chloor produceren waterstof als **een afvalproduct**.

Het ontstaat door een elektrische stroom door een oplossing van zout – natriumchloride in water (= in de volksmond **pekkel**). Dit product scheidt en hercombineert door uitwisseling van elektronen chloorgas, opgeloste bijtende soda en waterstof.

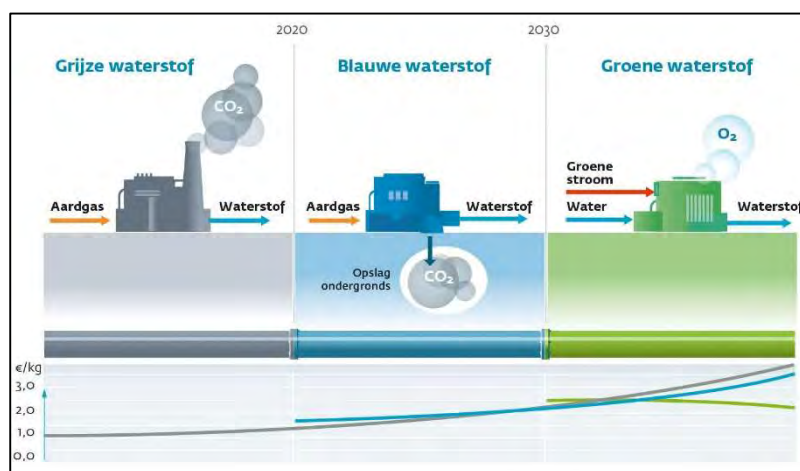
Door de aard van de chemische reactie, worden de chloor, de bijtende soda en de waterstof altijd vervaardigd in een vaste verhouding: 1,1 ton van bijtende soda en 0,03 ton waterstof per ton chloor.



We hebben verschillende methodes ontdekt voor de productie van waterstof. Sommige zijn niet besproken maar er is extra informatie terug te vinden op het internet. Plaats de juiste naam bij de beknopte verklaring: alkalische elektrolyse | SOEC elektrolyse | AEM elektrolyse | PEM elektrolyse | PEC elektrolyse | thermochemische splitsing | biologische waterstofproductie.

	Deze technologie gebruikt een geleidende oplossing van kalium of natrium. Het elektrolyseproces vindt plaats in een cel waar water wordt gesplitst in waterstof en zuurstof door middel van een elektrische stroom. Deze elektrolyzers staan bekend om hun robuustheid, betrouwbaarheid en lange levensduur.
	Deze technologie werkt bij hoge temperaturen (700-1000°C) en gebruiken keramisch materiaal als stroomgeleider. Deze technologie is zeer efficiënt omdat het gebruik maakt van warmte die kan worden hergebruikt binnen het systeem. Het is vooral geschikt voor industriële toepassingen waar al hoge temperatuur warmte beschikbaar is.
	Een technologie met een combinatie van alkalische als PEM-technologie. Door de toepassing van niet-edelmetalen worden de kosten gedrukt. Deze technologie is nog in ontwikkeling maar heeft potentieel voor lagere kosten en verbeterde efficiëntie.
	Deze technologie gebruikt een protonen geleidend membraan om water te splitsen in waterstof en zuurstof. Deze elektrolyzers hebben een compact en flexibel ontwerp, wat ze geschikt maakt voor dynamische toepassingen waar een snelle respons op veranderingen in de stroomvoorziening nodig is. Ze worden vaak gebruikt voor toepassingen waar een hoge zuiverheid van waterstof en een snelle opstart- en afschakeltijd vereist is.
	Deze technologie gebruikt zonne-energie om water te splitsen in waterstof en zuurstof, zonder tussenkomst van elektriciteit. Deze cellen bestaan uit halfgeleiders die licht absorberen en de energie gebruiken om water te splitsen. Deze technologie is aantrekkelijk vanwege het directe gebruik van zonne-energie, maar is nog in een vroeg ontwikkelingsstadium.
	Hierbij wordt gebruikgemaakt van thermochemische cycli, waarbij water wordt gesplitst door middel van chemische reacties die worden aangedreven door warmte, vaak van zonne- of nucleaire bronnen. Een voorbeeld is de Zwavel-Jodium (S-I) cyclus, die zeer hoge temperaturen vereist (boven de 800 graden Celsius). Deze methode heeft veel potentie voor efficiënte waterstofproductie, maar vereist nog veel onderzoek en ontwikkeling.
	Dit proces maakt gebruik van micro-organismen zoals algen en bacteriën die waterstof kunnen produceren op biologische wijze. Onder bepaalde omstandigheden (bijvoorbeeld in afwezigheid van zwavel) kunnen sommige microalgen waterstof produceren door natuurlijke fotosynthese. Deze productie is een interessante en duurzame optie, maar de schaalbaarheid en efficiëntie moeten nog aanzienlijk worden verbeterd.

07 DE VERSCHILLENDE PRODUCTIEMETHODE VERGELIJKEN



De verschillende productiemethoden van waterstof kunnen op verschillende manieren vergeleken worden.

Onze vergelijking is gebaseerd op basis van:

- Impact op de omgeving
- Energie – efficiëntie
- Economische levensvatbaarheid
- Technologische maturiteit.

Door de snelle vooruitgang van de technologie zal dit waarschijnlijk zeer snel veranderen en hopelijk in positieve zin.

07.01 IMPACT OP DE OMGEVING

De belangrijkste **indicatoren** voor milieueffecten in levenscyclusbeoordelingen zijn:

- verzuringspotentiaal (AP)
- potentieel voor mondiale opwarming (GWP)
- abiotische uitputtingspotentiaal (ADP)
- menselijke toxiciteit (HTP)
- eutrofiëringspotentiaal (EP).

In deze studie ligt de focus op GWP, vanwege **de broeikasgasuitstoot** bij waterstofproductie, samen met ADP (fossiele brandstoffen) en AP, om respectievelijk het verbruik van fossiele brandstoffen en de uitstoot van verzurende stoffen te beoordelen.

Verschillende literatuurbronnen rapporteren variërende waarden voor deze indicatoren, vooral bij waterstofproductie met schone energie. Dit komt door de beperkte toepassing van sommige technieken, wat leidt tot variaties in inventarisgegevens.

Om deze onzekerheid te omzeilen, presenteren we minimale, gemiddelde en maximale resultaten voor waterstofproductiemethoden. Sommige technologieën, zoals microbiële waterstofproductie, ontbreken in deze analyse vanwege beperkte levenscyclusdata.

H ₂ productie proces	AP (g SO eq)			GWP (kg CO ₂ eq)		
	Gemiddelde	Min.	Max.	Gemiddelde	Min.	Max.
SMR involving CCS				3.70	3.90	3.70
Steam methane reforming SMR	15.20	8.40	28.90	11.98	10.56	13.80
Coal Gasification (CG) involving CCS				4.87	4.14	7.14
Coal gasification	59.70	11.00	139.00	22.99	19.42	25.25
Biomassa gasification (BG)	22.50	14.50	37.10	3.54	2.67	4.40
Electrolyse via wind	4.30	0.20	11.80	1.08	0.03	2.21
Electrolyse via biomassa	29.00			2.70	2.40	3.00
Electrolyse via solar	6.10	2.10	8.10	1.82	0.37	2.50
Electrolysis (high temp. via nuclear)	4.40	3.40	4.80	1.24	0.42	2.00
Sulphur – iodine (S– I) cycle (via nuclear)	3.40	2.40	4.30	0.64	0.41	0.86
Copper – chlorine (Cu-Cl) via grid	91.70	76.60	99.50	14.67	12.30	15.90
Copper – chlorine (Cu-Cl) via nuclear	6.20	2.80	9.60	0.92	0.56	1.35
Methanol reforming	17.00			17.90		
Ethanol reforming	32.00			12.20		

Bron: Nnabuife, S.G.; Darko, C.K.; Obiako, P.C.; Kuang, B.; Sun, X.; Jenkins, K. A Comparative Analysis of Different Hydrogen Production Methods and Their Environmental Impact. *Clean Technol.* 2023, 5, 1344–1380.

Wat kunnen **besluiten** uit de tabel? Op fossiele brandstoffen gebaseerde methoden (= CG en SMR) hebben de hoogste AP – en GWP – waarden, hoewel koolstofafvang en -opslag (CCS) de uitstoot aanzienlijk kan verminderen.

CCS (carbon capture and storage) kan het potentieel voor mondiale opwarming (GWP) voor CG met 71,7% en voor SMR met 69,1% verminderen, afhankelijk van de efficiëntie van CO₂-afvang.

Het ADP van waterstofproductie uit fossiele brandstoffen is hoog, aangezien deze brandstoffen zowel energie als grondstof leveren. SMR is relatief efficiënter met een energieverbruik tussen 183,2 en 198,4 MJ, terwijl CG tussen 213,8 en 333,2 MJ ligt.

Alternatieve methoden, zoals elektrolyse op basis van hernieuwbare energie, hebben lagere ADP-waarden en minder impact op het milieu. Biomassavergassing heeft een gematigde impact, hoger dan elektrolyse, maar lager dan fossiele methoden.

De GWP van elektrolyse hangt sterk af van de energiebron: bij netstroomgebruik kunnen AP en GWP zelfs hoger zijn dan bij CG en SMR. Hernieuwbare energiebronnen zoals zon, wind of kernenergie verminderen deze waarden aanzienlijk. Het is daarom **essentieel** om elektrolysesystemen met schone energie **te combineren**.

07.02 ENERGIE - EFFICIËNTIE

De meeste commerciële waterstof (H₂) wereldwijd wordt momenteel geproduceerd via stoommethaanreforming (SMR), waarbij aardgas (methaan) reageert met stoom, wat H₂ en CO₂ oplevert. Hoewel SMR een gangbare en kostenefficiënte methode is, is het niet erg energiezuinig vanwege het hoge koolstofgehalte van methaan. De totale energie-efficiëntie van SMR ligt doorgaans tussen de 65 en 75%.

Bij elektrolyse worden watermoleculen gesplitst in H₂ en O₂. Dit proces is milieuvriendelijk, maar de energie – efficiëntie hangt af van de gebruikte energiebron. Met hernieuwbare energie kan een efficiëntie van 70–80% worden bereikt, terwijl elektriciteit uit fossiele brandstoffen de efficiëntie verlaagt tot 50–60%.

Biomassavergassing zet organisch materiaal, zoals hout of afval, om in een mengsel van H₂, CO en CO₂, dat verder kan worden verwerkt tot zuivere H₂. Hoewel deze methode hernieuwbaar en koolstofvrij is, varieert de energie – efficiëntie meestal tussen de 40 en 60%, met geavanceerde systemen die bijna 70% bereiken.

Samenvattend is SMR de meest gebruikte, maar minder energiezuinige methode. Elektrolyse is efficiënter, vooral met hernieuwbare energie, terwijl biomassavergassing een duurzame optie biedt met doorgaans lagere efficiëntie. Verbetering van de energie-efficiëntie blijft een belangrijke doelstelling voor toekomstige H₂-productie.



07.03 ECONOMISCHE LEVENSVATBAARHEID

De kosten voor de productie, het gebruik, transport en opslag van waterstof (H₂) spelen een cruciale rol bij de economische evaluatie van H₂ - energiesystemen. De kosten van primaire energiebronnen bepalen momenteel in grote mate hoe belangrijk H₂ - productie is. Waterstofproductiemethoden op basis van hernieuwbare energie zijn momenteel duurder dan die gebaseerd op fossiele brandstoffen, vooral door de elektriciteitskosten die een grote invloed hebben op de waterstofproductie uit niet – fossiele bronnen.

Elektrolyse is de meest gebruikte techniek om waterstof uit niet – fossiele brandstoffen te produceren. De kosten van elektrolyse worden beïnvloed door de prijs van de elektrolyser en het gebruik ervan. Ondanks dat elektrolyse geen CO₂ - uitstoot veroorzaakt, blijven de kosten van groene stroom hoger in vergelijking met fossiele brandstoffen. Factoren zoals drukwisselabsorptie en katalysatorkosten verhogen de prijs van thermochemische methoden, terwijl lagere biomassakosten en verbeterde efficiëntie de productie kunnen optimaliseren.



Economisch gezien is elektrolyse een geschikte optie voor kleinschalige waterstofproductie, maar bij grootschalige productie stijgen de kosten door het hoge elektriciteitsverbruik. De kosten voor waterstofproductie via fotochemische en donkere fermentatieve technieken liggen tussen de USD 2,5 en 2,8 per kg, terwijl de kosten voor deze technieken in 2017 werden geschat op respectievelijk USD 18,7 en 3,7 per kg.

In Australië liggen de kosten van H₂-productie via stoommethaanreforming tussen AUD 1,88 en 2,30 per kg, en via kolenvergassing tussen AUD 2,02 en 2,47 per kg. Alkalische elektrolyse kost AUD 4,78 tot 5,84 per kg, terwijl proton – uitwisselingsmembranen AUD 6,08 tot 7,43 per kg kosten.

De productie via partiële methaanoxidatie met synthesegas kost EUR 1,33 per kg H₂. De kosten van waterstofproductie uit aardgas bedragen van USD 0,37 tot 1,82 per kg, en uit kolen USD 2,48 tot 3,15 per kg. Ondanks hoge kosten voor wind- en zonne – energie van 2011 tot 2016, werd voorspeld dat de waterstofmarkt in deze periode met 6,21% zou groeien, van USD 87,3 naar 118 miljard. Biomassavergassing en pyrolyse produceren H₂ tegen prijzen van respectievelijk USD 8,91 tot 5,51 per GJ en USD 10 tot 14 per GJ.

Methode	Productiekosten (USD per kg)	Bron
Photo-catalytic H ₂ O splitting	5.00	Solar
Steam reforming	0.75	Methane
Centralised biomass gasification	1.20 → 2.40	Biomassa
Gasification without CO ₂ sequestration	0.92	Coal
Electrolysis	2.60 → 3.00	Nuclear
H ₂ O splitting	1.40 → 2.30	Nuclear

Overzicht met prijszetting in 2023.

Volgens bovenstaande tabel zijn de kosten van stoommethaanreforming (USD 0,75 per kg) aanzienlijk lager dan andere H₂ - productietechnieken. Zonne – elektrolyse is momenteel de duurste methode (USD 5,0/kg), maar met technologische vooruitgang kunnen deze kosten dalen, waardoor deze methode op termijn duurzamer en economisch voordeliger wordt.

Verwacht wordt dat de commercialisering van deze methoden in de toekomst toeneemt, en vanwege hun minimale impact op het milieu zullen de kosten voor waterstof productie naar verwachting vergelijkbaar of lager zijn dan die van traditionele technieken op basis van fossiele brandstoffen.

07.04 TECHNOLOGISCHE MATURITEIT

De huidige productie van laag-emissie waterstof (H₂) is aanzienlijk lager dan wat nodig is om aan de wereldwijde doelen van de NZE (Net Zero Emissions) – en AP (acidification potential) – scenario's te voldoen. Toch zijn er veel projecten aangekondigd om de productie van laag – emissie H₂ te vergroten.

Als alle projecten volgens plan worden afgerond, zou tegen 2030 jaarlijks 24 Mt laag – emissie H₂ kunnen worden geproduceerd. Ongeveer 50% hiervan zou afkomstig zijn van G7-landen.

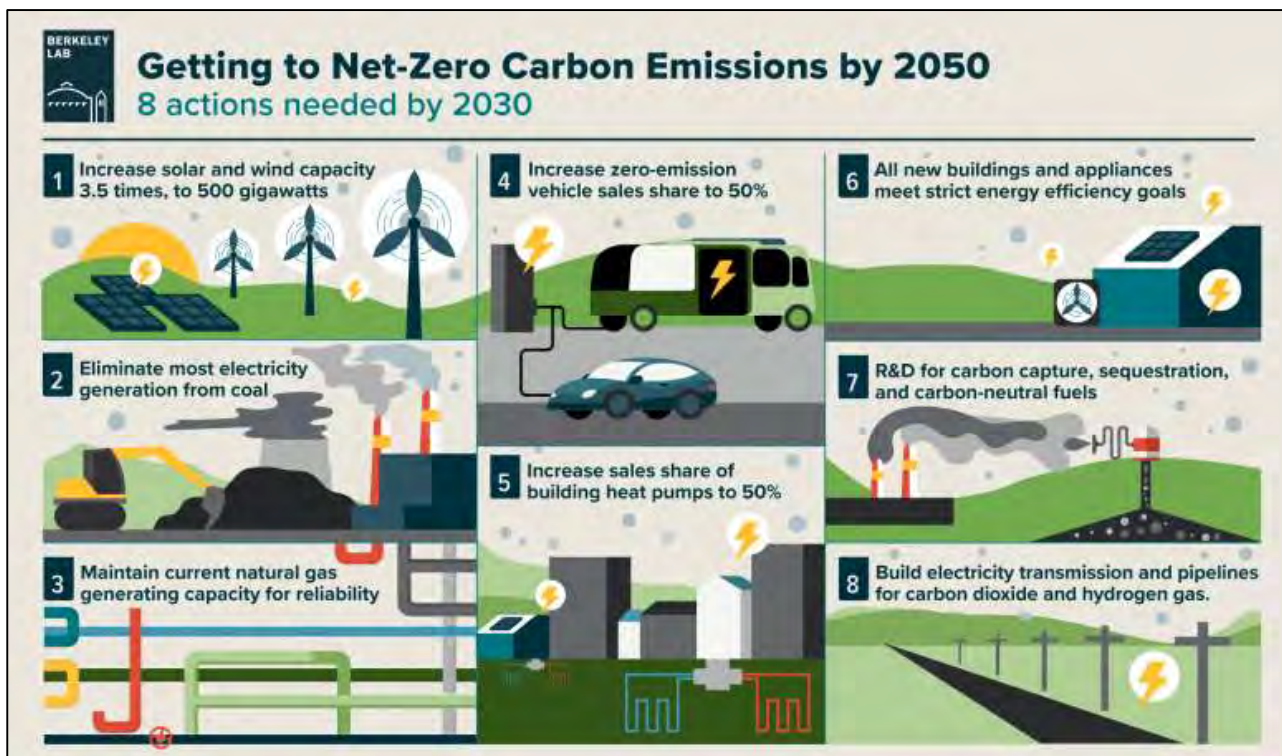


Volgens schattingen zou een kwart van de benodigde laag – emissie H₂ voor het NZE 2050 – scenario worden gedekt door de aangekondigde projecten, terwijl 80% van de AP – behoeften zou worden gehaald. Echter, veel van deze projecten lopen vertraging op door uitdagingen zoals een gebrek aan vraag, onzekerheid rond regelgeving en

accreditering, en een tekort aan infrastructuur om H₂ bij eindgebruikers te krijgen. Vooral ontwikkelingslanden, goed voor een kwart van de potentiële productie, kampen met extra problemen zoals een tekort aan opgeleid personeel en financiering. Zonder passende beleidsmaatregelen zal de productie naar verwachting beperkt blijven tot 6 Mt in 2030.

Slechts 4% van de huidige projecten bevindt zich in een vergevorderd stadium, oftewel in aanbouw of met een definitieve investeringsbeslissing (FID). Ongeveer een derde van de projecten zit nog in de conceptfase, terwijl de rest zich in de haalbaarheids- of engineeringfase bevindt. Ongeveer 2% van de CCU (carbon capture and utilisation)-projecten, goed voor 0,2 Mt H₂-productie in 2030, is bijna voltooid. Slechts 5% van de elektrolyseprojecten is vergevorderd, goed voor ongeveer 0,7 Mt H₂, terwijl het merendeel van de potentiële productie nog in de plan- of haalbaarheidsfase zit. Grote projecten kunnen wel tot een decennium duren om te realiseren.

In 2021 kwam meer dan 80% van de H₂-productie door G7-landen uit CCU-projecten met fossiele brandstoffen en 20% uit elektrolyse. Tegen 2030 zou G7 tot 8,5 Mt laag-emissie H₂ kunnen produceren, gezien het grote aantal projecten dat zich nog in de haalbaarheids- en engineeringfase bevindt. G7-landen spelen hierdoor een cruciale rol in de snelle ontwikkeling van laag-emissie H₂-productie.



Actie plan tegen 2030 met als einddoel in 2050: 0% CO₂ – uitstoot.

08 OPSLAG VAN WATERSTOF

Eén van de belangrijkste dingen waar we rekening mee moeten houden wanneer we waterstof écht willen integreren in het huidige (gas)netwerk, is **de opslag** en distributie.

Hoe gaan we miljoenen huishoudens en bedrijven in voorzien van waterstof?

Na de productie is het belangrijk dat waterstof veilig en efficiënt wordt opgeslagen.

De meest **voorkomende** methodes zijn in gasvorm, vloeibare toestand, als een gel of in poedervorm.

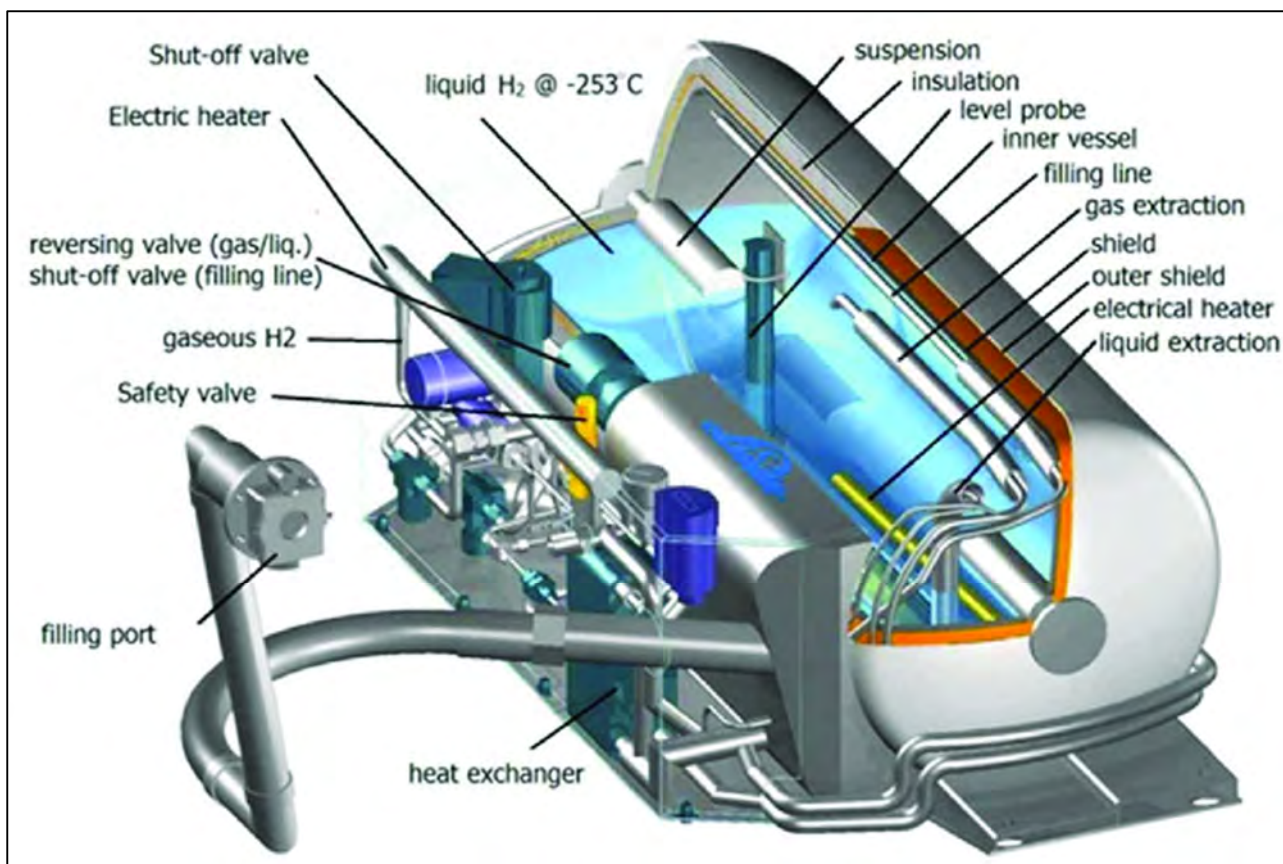


Waterstof opslaan als **gas** is de meest veelvoorkomende vorm. Na de elektrolyse van waterstof komt er al direct **waterstofgas** vrij. Om waterstofgas zo efficiënt mogelijk op te slaan zullen we het samendrukken om ruimte te besparen waardoor er meer gas in de tank kan gestockeerd worden.

Waterstofgas wordt vaak opgeslagen in **hogedrukvaten** van composiet. Het waterstof wordt tot 200, 350 of soms wel tot 700 bar samengedrukt om de ruimte te beperken. Dit klinkt efficiënt, maar er is wel een groot nadeel. Door waterstof te comprimeren gaat zo'n 6-15% van de waterstofenergie verloren, afhankelijk van hoe hard het wordt samengedrukt.

Waterstof eerst **vloeibaar** opslaan wordt ook steeds populairder. Het voordeel is namelijk dat vloeibaar gas altijd minder ruimte inneemt dan normaal gas. Maar er zitten nog wel een flink aantal haken en ogen aan. Zo moet je waterstofgas eerst tot -253°C koelen voordat het zich in een vloeibare toestand kan bevinden. Vanzelfsprekend kost dit erg veel energie. Zo is berekend dat je voor het koel maken van waterstof ongeveer 1/3^{de} van de energie – inhoud van de tank nodig hebt.

Daarnaast vindt er na 14 dagen **energieverlies** plaats in een tank waarin vloeibaar waterstof wordt vervoerd. Vervolgens komt deze waterstofgas vrij in de tank wat weer op zijn plaats zorgt voor meer druk in de tank. Om dit tegen te gaan zitten er ventielen in de waterstoftanks, maar desondanks vindt er energieverlies plaats.

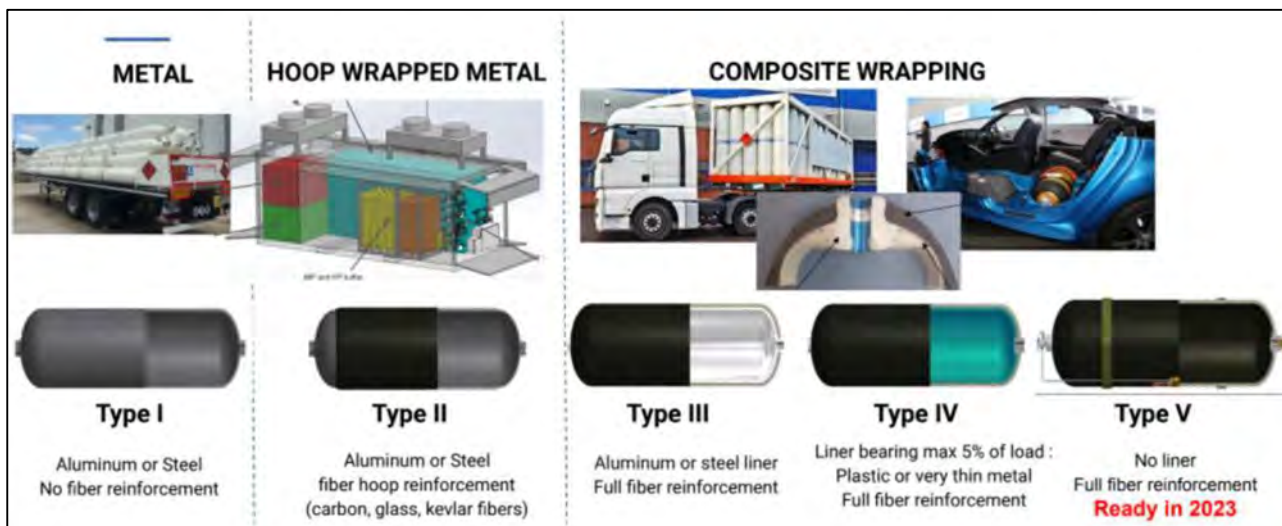


Doorsnede van een vloeibare waterstoftank.

Een kort overzicht om waterstof op **een veilige manier** te bewaren:

Eigenschappen	Vloeibaar	Gasvormig
Druk	12 tot 13 bar	700 tot 1000 bar
Temperatuur	Lager dan -253°C	-20°C tot +80°C
Dichtheid	1.013 bar, -253°C : 70.85 kg/m ³	1.013 bar, 0°C : 0.0899 kg/m ³ 700 bar, 15°C : 40.2 kg/m ³
Uitdaging	Temperatuur laag houden!	Hoge druk! Kans op lekkage!

Het is dan ook belangrijk om aandacht te schenken bij **de constructie** van de opslagtanks waarbij werkt met verschillende types.



Overzicht van tanks bij het transport op onze wegen.



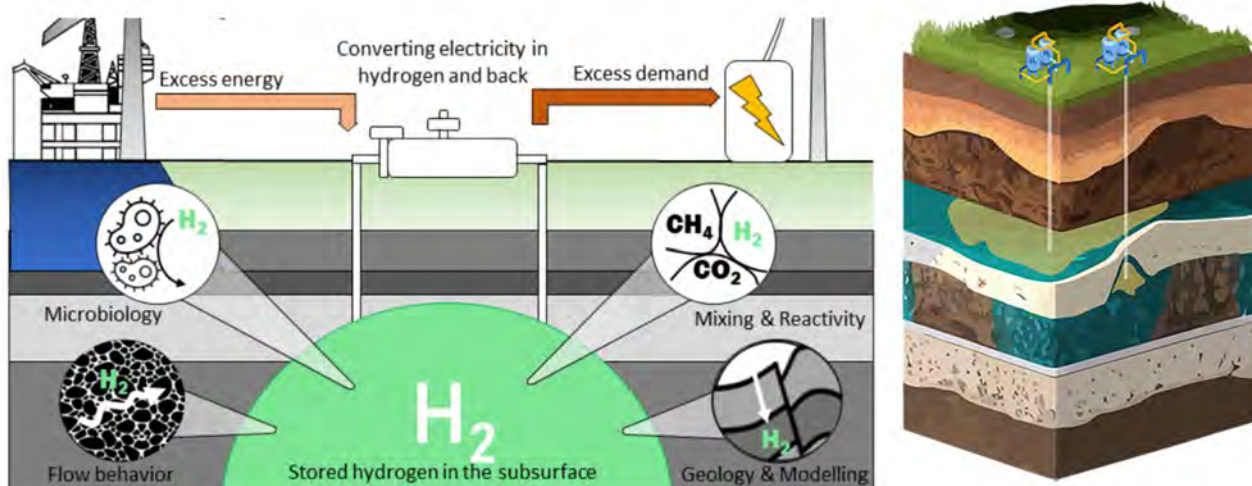
Meer informatie over de opslag van waterstof of de constructie van een waterstoftank? Volg de verschillende links.



Een andere optie is het gebruik van **metaalhydrides**, waarbij waterstof wordt gebonden aan metalen of legeringen. Dit systeem opereert bij een druk van 10 tot 50 bar en temperaturen variërend van 20°C tot 300°C, afhankelijk van het gebruikte materiaal. Hoewel het een veilige opslagmethode biedt, zijn de temperatuur en druk afhankelijk van de chemische eigenschappen van het metaal.

Daarnaast kan waterstof worden opgeslagen in chemische waterstofdragers, zoals vloeibare organische waterstofdragers (LOHC's) of ammoniak. De opslag zelf vereist meestal weinig druk en kan plaatsvinden bij kamertemperatuur, maar het vrijmaken van waterstof uit deze dragers vereist vaak temperaturen tussen 25°C en 250°C, afhankelijk van de chemische verbinding.

Ten slotte is er ondergrondse opslag, waar waterstof wordt opgeslagen in geologische structuren zoals **zoutkoepels** of lege gasvelden. Dit gebeurt meestal onder een druk van 100 tot 200 bar en bij temperaturen van 15°C tot 50°C, afhankelijk van de diepte van de opslagplaats en de geologische omstandigheden.



.Schematische voorstelling van ondergrondse opslag en de verdeling van verschillende grondlagen.

In 2021 is er voor het eerste onderzoek gedaan naar het opslaan van waterstof als **gel**. In Duitsland hebben onderzoekers uitgevonden dat ze een waterstof pasta kunnen maken waarin waterstof veilig kan worden aangevuld, vervoerd en opgeslagen. De productie van deze waterstofgel gebeurt door magnesiumpoeder toe te voegen bij het gas en te verwarmen tot wel 350 graden. Vervolgens wordt er ester en metaalzout toegevoegd waardoor het verandert in de zogenaamde “powerpasta”.

Wat is het nut van waterstof als een pasta? Allereerst is het een veilige manier van opslaan en vervoeren. Het waterstof kan pas bij temperaturen boven de 250 graden loskomen van de pasta en is dus niet licht – ontvlambaar. Daarnaast kan dit een eenvoudigere manier zijn om waterstof te tanken. Je hoeft alleen de waterstofpasta cartridge te vervangen en de watertank te vullen met leidingwater. Dit kan natuurlijk onderweg, maar ook gewoon thuis.

Een andere optie die steeds vaker getest wordt, is waterstof opslaan als **een poeder**. Dit kun je doen voor een vat te vullen met waterstof, boornitride (poeder) en ballen van staal. Wanneer je vervolgens het vat rond laat draaien zullen de stalen ballen druk leveren op het waterstof. Door urenlang het vat te laten tuimelen zal er uiteindelijk waterstof in poedervorm ontstaan. Het voordeel is wel dat waterstofpoeder licht is waardoor de opslag makkelijker is. Daarnaast is deze poeder onbeperkt houdbaar en vindt er geen energieverlies plaats!

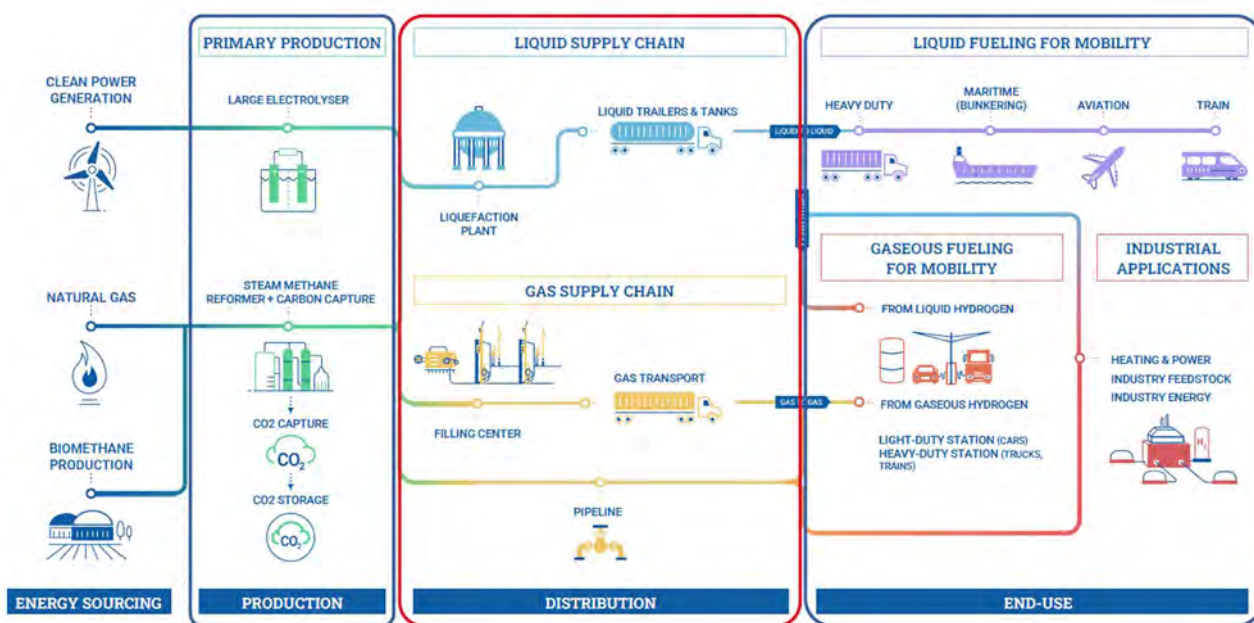
Waterstofpoeder wordt sinds mei 2023 actief geproduceerd in Nederland. Zo hebben Electriq Global en Zenith Energy de eerste waterstofpoederfabriek gebouwd in de haven van Amsterdam.

09 TRANSPORT VAN WATERSTOF

Waterstof kan in verschillende formaten over lange afstanden vervoerd worden. Het transport van samengeperste of vloeibare waterstof kan met de vrachtwagen of met tankers gebeuren. Voor samengeperste gasvormige waterstof zal men gebruik maken van pijpleidingen en vrachtwagens.

Kort samengevat zijn de meest voorkomende:

- Gecomprimeerde gasflessen of cryogene vloeistof tankers
- Pijpleidingen
- Mengen met aardgas



Overzicht van distributie waterstof.

09.01 GECOMPRIMEERDE GASFLESSSEN

Op dit moment is de meestvoorkomende manier van waterstof transport, het vervoeren van waterstof op vrachtwagens. Grote metalen of composieten tanks worden hierbij geladen op een vrachtwagen en vervolgens wordt dit op locatie gebracht zoals waterstof tankstations.

De **gasvormige waterstof** zal worden vervoerd in kleine tot middelgrote hoeveelheden in gecomprimeerde gasflessen per vrachtwagen. Bij grotere hoeveelheden worden onder druk gezette gasflessen gebundeld op CGH2 Tube Trailers.



1	Tube trailer voor transport van 500 kg waterstof op omgevingstemperatuur onder een druk van 200 – 250 bar.
2	Container trailer voor transport van 1000 kg op omgevingstermperatuur onder een druk van 500 bar.

De gasflessen zijn meestal gemaakt van staal en hebben een hoog netto gewicht. Dit kan leiden tot massa – gerelateerde vervoersbeperkingen. De nieuwste drukopslag systemen gebruiken lichtgewicht tanks voor het transport per vrachtwagen.

De lage dichtheid van waterstof heeft ook een impact op het transport: onder standaard condities (1,013 bar en 0 °C) heeft waterstof een dichtheid van 0,0899 kg per kubieke meter (m³). Als waterstof wordt gecomprimeerd tot 200 bar, stijgt de dichtheid tot 15,6 kg waterstof per kubieke meter, en bij 500 bar is dat bereiken 33 kg H₂/m³.

Gecomprimeerd gas kan niet zo compact worden opgeslagen als bij een tankwagen voor vloeibare brandstoffen (benzine of diesel brandstof). Dit betekent dat het beschikbare tankvolume voor waterstof per tanker lager is. Op dit moment wordt per vrachtwagen ongeveer 500 kg waterstof vervoerd, afhankelijk van de druk en het container materiaal.

De grootste tankvolumes voor gasvormig waterstof transport zijn op dit moment 26 kubieke meter. Rekening houdend met de lage waterstofdichtheid op 500 bar resulteert dit in ongeveer 1.100 kg waterstof per vrachtwagen.

Als alternatief kan waterstof in **vloeibare vorm** worden vervoerd in vrachtwagens of andere vervoermiddelen. Dit is rendabeler bij grotere afstanden. Bij een dichtheid van 70,8 kg/m³ kan ongeveer 3.500 kg vloeibaar waterstof of bijna 40.000 m³, bij omgevingsdruk, worden vervoerd bij een laadvolume van 50 m³.



Liquid trailer voor transport van 4000 kg onder 1 tot 4 bar bij een cryogene temperatuur.



Ook op zee wordt er verwacht dat je waterstof kunt vervoeren, ongeveer op de manier hoe we dat nu doen met olie aan de hand van grote tankers.

Zo is Kawasaki Heavy Industries bezig met het ontwikkelen van waterstoftankers die op zee waterstof kunnen vervoeren voor grote afstanden. Deze waterstoftankers zouden naar verwachting bestaan uit bolvormige tanks van ruim 40.000 m³.

Transport met vrachtwagens en schip heeft een extra nadeel: men heeft extra energie nodig. Maakt men gebruik van **pijpleidingen** is dit niet nodig. Het is dan ook de beste optie voor uitgebreid en op grote schaal gebruik van waterstof als energiebron. Rendabel zal het echter zijn met grote volumes van waterstof. Toch is er een mogelijkheid voor het ontwikkelen van pijpleiding netwerken voor de distributie van waterstof lokale of regionale netwerken, bekend als micro – netwerken. Deze kunnen vervolgens worden samengevoegd tot transregionale netwerken.

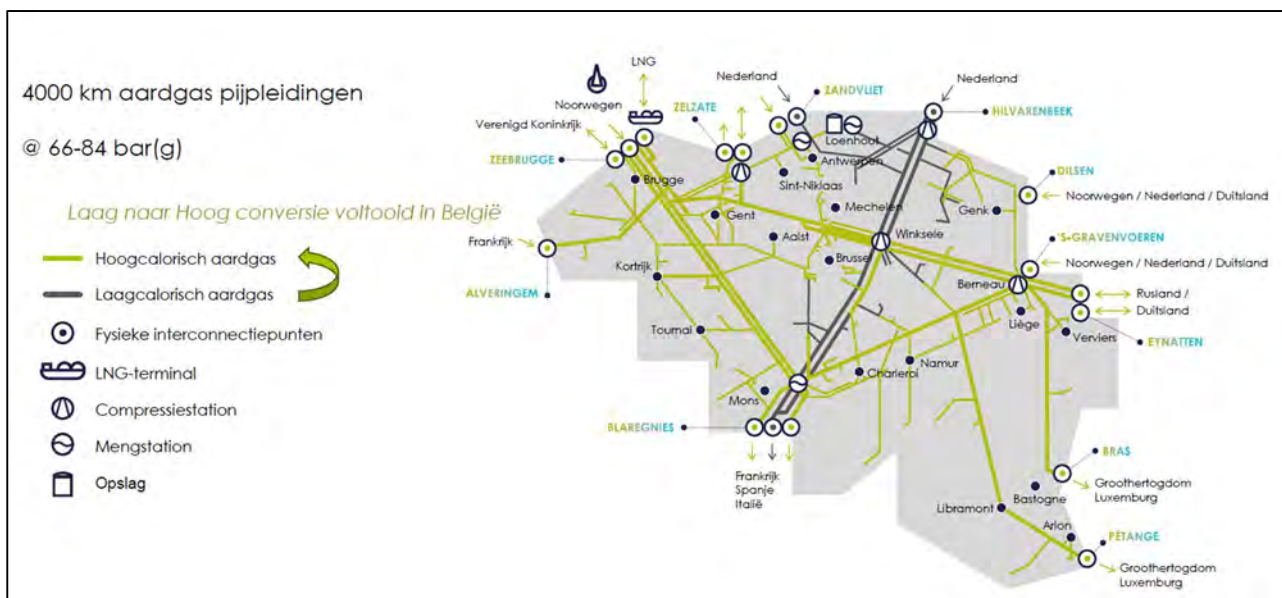


Wereldwijd waren in 2016 al meer dan 4.500 km waterstof pijpleidingen, waarvan de overgrote meerderheid wordt geëxploiteerd door waterstof producenten (HyARC 2017). De langste pijpleidingen worden geëxploiteerd in de VS, in de Staten Louisiana en Texas, gevolgd door België en Duitsland.

Deze waterstof pijpleidingen maken deel uit van de miljoenen kilometers voor aardgas over de hele wereld. Deze leidingen vervoeren het gas tussen steden of tussen verschillende landen om meer dan alleen de lokale industrie van gas te kunnen voorzien. Bestaande aardgasleidingen hebben over het algemeen een grote diameter en maken gebruik van staallegeringen (bij hoge druk) of materialen zoals gietijzer, koper, staal of kunststof (PVC of PE) in het geval van distributieleidingen.

Met de toenemende duurzaamheidsdoelen en richtlijnen staat het gebruik van aardgas echter onder druk. De producenten van de leidingen, maar ook gasproducenten en overheden stellen daarom de vraag of de bestaande infrastructuur voor aardgas ook gebruikt kunnen worden voor een duurzamer gas: duurzame waterstof.

Het onderzoek naar de beste leidingen voor gasvormige waterstof loopt al enkele jaren en er lijken mogelijkheden te zijn om bestaande infrastructuur om te zetten in een veilig waterstofnetwerk. Nederland is momenteel op weg om het eerste land te worden waarbij het bestaande aardgasnet geschikt zal zijn voor waterstof. Aanpassingen aan bestaande infrastructuur zoals bij een doorsneewoning zal wel moeten gebeuren.



Het Fluxys aardgasvervoersnet in België bestaat uit 4000 km pijpleidingen.

Het vervoer van gasvormige waterstof is complex, maar dat van **vloeibare waterstof** is zo mogelijk nog veel complexer. Om verspilling tegen te gaan en optimale veiligheid te garanderen moeten transferleidingen voor vloeibare waterstof extreem goed geïsoleerd worden. Vloeibare waterstof heeft namelijk een extreem lage temperatuur van $-252,9^{\circ}\text{C}$ koud.

Veiligheid is bij het transport van vloeibare waterstof essentieel. In combinatie met zuurstof, kan de cryogene vloeistof namelijk explosies veroorzaken. Komt er dan ook ijskoude vloeibare waterstof vrij door een lekkage in de transferleiding of bij onvoldoende isolatie, dan is de kans groot dat de omringende zuurstof condenseert. Deze gecondenseerde zuurstof kan in combinatie met vloeibaar waterstof gevaarlijke situaties opleveren.

Transferleidingen voor vloeibare waterstof zijn om deze reden aan strengere eisen gebonden dan die voor bijvoorbeeld vloeibare zuurstof of vloeibare stikstof.

Vacuüm isolatie (VIP) is dé methode gebleken voor het optimaal isoleren van transferleidingen voor vloeibare waterstof. Door leidingen of systemen te voorzien van een dubbele wand en tussen deze wanden alle lucht weg te zuigen, ontstaat een hoogvacuüm omgeving. In het luchtledige zijn nauwelijks moleculen over, zodat er geen warmte-overdracht meer kan plaatsvinden van de warme buitenbuis (*vacuum jacket*) naar de koude binnenbuis (*process pipe*). Zo wordt een groot deel van de omringende warmte buiten het systeem of buiten de leiding gehouden.

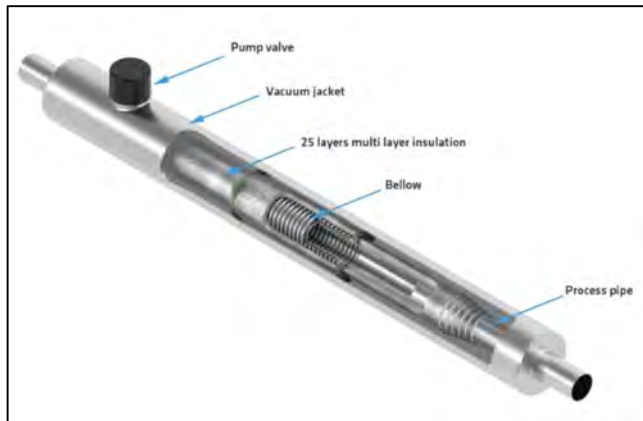
Vacuüm geïsoleerde transferleidingen hebben diverse voordelen. Ten eerste zorgt de hoge kwaliteit van de leidingen voor zeer hoge efficiëntie, waardoor de langdurige operationele kosten voor het systeem lager blijven dan die van conventionele isolatiematerialen.

Ten tweede nemen vacuüm geïsoleerde transferleidingen minder ruimte in beslag dan conventionele isolatiematerialen (PIR/PUR, Foamglas, Armaflex, Perlite, of Misselon). De dubbele wand biedt een isolatiewaarde die zo hoog is, dat deze met de bovenstaande materialen alleen benaderd kan worden met een groot aantal lagen aan materiaal.

Hierdoor wordt de diameter van de leiding aanzienlijk groter, terwijl ook de kans op zuurstof condensatie toeneemt naarmate de conventionele isolatie minder dampdicht is. Een veiligheidsprobleem, dat zich bij vacuüm isolatie niet voordoet.

In enkele specifieke branches wordt verwacht dat transferleidingen voor vloeibare waterstof worden uitgerust met een *double-containment* voor extra veiligheid (mocht de procesleiding een lek krijgen, is er altijd nog de *double-containment* om dit op te vangen).

Terwijl bij andere isolatiemethoden een extra wand moet worden aangelegd om aan deze richtlijn te voldoen, heeft vacuüm isolatie vanzelf al twee wanden. Dit maakt vacuüm geïsoleerde transferleidingen extra veilig, extra breed toepasbaar én economisch veruit de beste keuze.



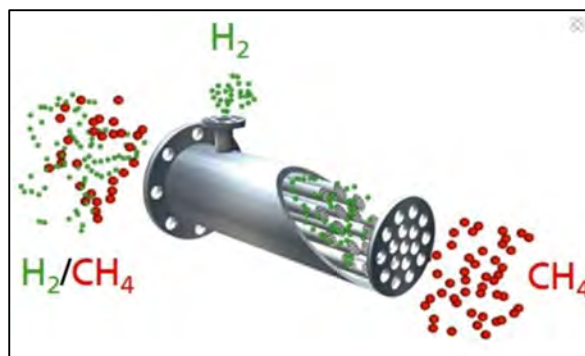
Doorsnede van een vacuüm geïsoleerde transferleiding.

09.03 MINGEN MET AARDGAS

Het mengen van waterstof in aardgaspijpleidingnetwerken is ook voorgesteld als een middel om zuivere waterstof aan markten te leveren. Dit in combinatie met scheidings en reinigings technologieën stroomafwaarts om waterstof van het aardgas mengsel af te halen.

Men kan ervan uitgaan dat veel van de gas transport netwerken, distributielijnen en opslagfaciliteiten die werden geëxploiteerd in het verleden nog steeds in gebruik zijn vandaag.

In het Engelse Leeds is de mogelijkheid onderzocht van het omzetten van de bestaande aardgas – netwerk in de regio



(voornamelijk gebruikt voor de gemeentelijke verwarming Supply) naar waterstof. Gezien hun lengte, zouden de grote gasnetwerken in vele industrielanden aanzienlijke hoeveelheden waterstof kunnen transporteren.

Om waterstof veilig te integreren in bestaande aardgaspijpleidingsystemen, moeten echter verschillende factoren worden geëvalueerd, zoals het risico van **brosheid** door waterstof (Hydrogen Embrittlement = HE).

De belangrijkste elementen voor HE – gevoeligheid zijn:

- **Intrinsieke parameters:** stalen microstructuur en chemische samenstelling.
- **Omgevingsparameters:** H_2 partiële druk in de leidingen, niveau van spanningen en frequenties, grootte en geometrie van bestaande fouten, onzuiverheden in getransporteerd gas en de temperatuur.

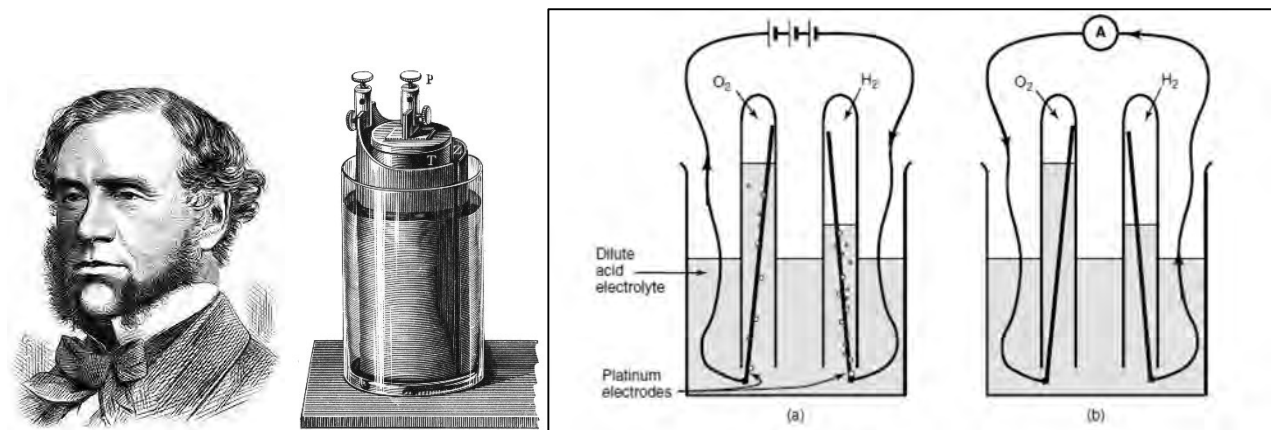
Theoretisch kunnen pijpleidingen zonder grote aanpassingen waterstofmengsels tussen de 15% en 30% aan zonder aanzienlijke negatieve effecten. Hoewel compressie van waterstof kan worden gebruikt voor transport en opslag, brengt deze compressie een energieverlies met zich mee dat kan oplopen tot 20% van de energie – inhoud die nodig is voor de compressie zelf.

10 WATERSTOF IN BRANDSTOFCELLEN

Batterijen zijn niet geschikt voor het opslaan van grote hoeveelheden elektriciteit gedurende een langere tijd. Een groot voordeel van waterstof is dat het kan worden geproduceerd uit overvloedige hernieuwbare energiebronnen. Men kan het eveneens stockeren voor een langere tijd.

10.01 BRANDSTOFCELLEN: BASIS THEORIE

De basiswerking van de brandstofcel op basis van waterstof is eenvoudig. De eerste demonstratie van een brandstofcel werd door wetenschapper William Grove in 1839, met behulp van een experiment gedaan volgens de onderstaande opstellingen.



William Grove (1811 – 1896)

Element van Grove

Schematisch experiment van Grove

Bij opstelling a wordt door **elektrolyse** water gesplitst in waterstof en zuurstof door er een elektrische stroom doorheen te laten lopen. Bij opstelling b wordt het omgekeerde proces afgebeeld. De waterstof en zuurstof reageren weer naar water en nu komt er een elektrische stroom vrij. We kunnen dus elektrische energie opslaan in de waterstof en deze er op enig moment weer uithalen.

Het **nadeel** is dat de geproduceerde stromen klein zijn door de volgende redenen:

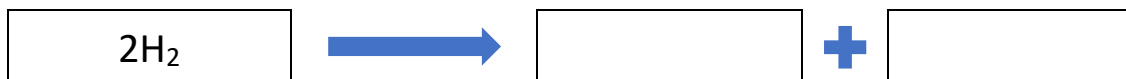
- Het kleine contactgebied tussen het gas en de elektrode.
- De grote afstand tussen de elektroden.

Om deze reden zijn elektroden meestal plat (vlak of gebogen), met een dun laagje elektrolyt. De structuur van de elektrode is poreus, zodat het gas er doorheen kan dringen met maximaal contact tussen de elektrode, het elektrolyt en het gas.

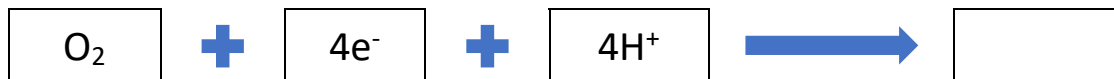
Om te begrijpen hoe de reactie tussen waterstof en zuurstof een elektrische stroom produceert, en waar de elektronen vandaan komen, moeten we de afzonderlijke reacties die bij elke elektrode plaatsvinden uitschrijven. In

detail variëren deze voor verschillende types van brandstofcellen zodat we starten met de eenvoudigste en nog steeds het meest voorkomende type.

Bij de anode van een (PEMFC) brandstofcel, ioniseren de waterstof gassen naar elektronen en H^+ ionen (of protonen).



Bij deze reactie komt energie vrij. Bij de kathode reageert zuurstof met elektronen die uit de elektrode komen en de H^+ ionen die door het elektrolyt komen. Er ontstaat zo zuiver water.



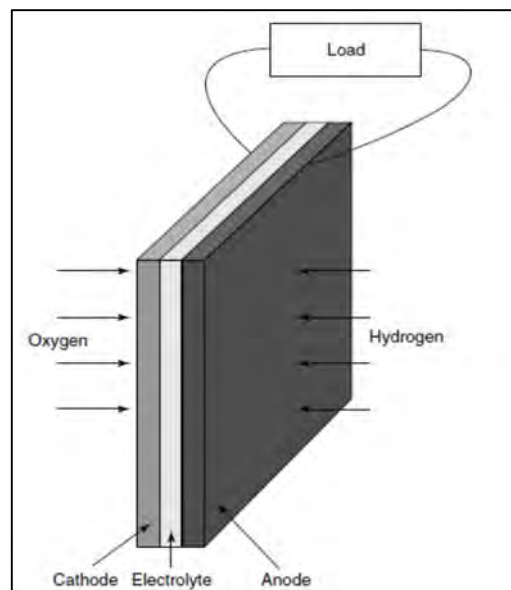
Om de reacties mogelijk te maken moet er een elektrisch circuit zijn van de anode naar de kathode waardoor de elektronen kunnen stromen.

Daarnaast moeten de H^+ ionen door het elektrolyt gaan. Bijvoorbeeld een zuuroplossing met vrije H^+ ionen. Ditzelfde kan ook gerealiseerd worden met bepaalde polymeren waardoor de H^+ ionen zich kunnen bewegen.

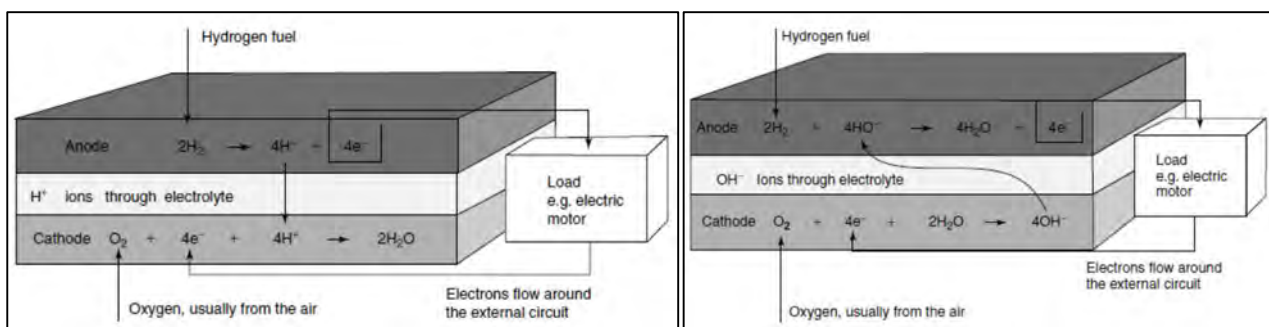
Deze polymeren noemen we ook wel het Proton – uitwisselingsmembraan. In het Engels spreekt men van Proton Exchange Membrane of PEM.

In de bovenstaande vergelijkingen kunnen we zien dat twee waterstof moleculen nodig zijn voor elk zuurstof molecuul om de reactie kloppend te maken, zie figuur.

Belangrijk is te begrijpen dat het elektrolyt alleen H^+ ionen door mag laten en niet de H_2 moleculen. Anders zou er geen elektrische stroom meer ontstaan.



Bij de onderstaande figuren merken we dat de elektronen van de anode naar de kathode stromen. De kathode is dus de elektrisch Positief, aangezien elektronen stromen van min naar plus lopen. De kathode daarentegen is altijd de elektrode waarin de elektronen stromen, en dus is de anode is altijd de elektrode van waaruit elektronen stromen.



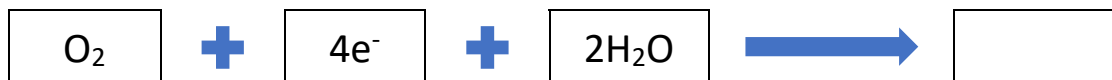
Dit is wat verwarrend maar niet verrassend omdat de negatieve elektronen stromen van min naar plus, en volgens de normale definitie 'conventionele positieve stroom' stroom juist andersom loopt: van de positieve naar de negatieve pool.

Een alkalinebrandstofcel of alkalische brandstofcel (Engelse benaming: Alkaline Fuel Cell of AFC) is een brandstofcel werkend met kaliloog (alkaline, ook wel kaliumhydroxide) als elektrolyt. Het ionentransport vindt plaats met behulp van hydroxide(OH^-)-ionen. De katalysator voor de ionisatie van waterstof is platina, of kobalt.

In een alkalische brandstofcel is de samengestelde reactie hetzelfde, maar zijn de reacties op de elektroden verschillend. Op de anode reageren deze met waterstof en wordt elektrische energie vrijgegeven en water geproduceerd.

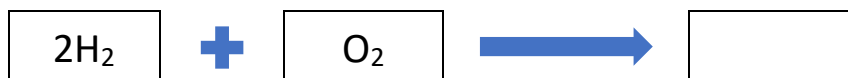


Bij de kathode reageert zuurstof met elektronen uit de elektrode en het water in de elektrolyt en worden nieuwe OH⁻ ionen gemaakt.



Om dit te kunnen realiseren moet er een elektrolyt zijn om de OH⁻ ionen door te laten en een elektrisch circuit voor de elektronen van de anode aan de kathode. Ook zien we in de vergelijkingen dat er twee keer zoveel waterstof nodig is als zuurstof. Daarnaast wordt water opgenomen bij de kathode maar twee keer zo snel geproduceerd bij de anode.

De samengestelde reactievergelijking wordt weer:



10.02 WAT IS EEN BIPOLAIRE PLAAT?

Cellen kunnen net als batterijen in **serie** of **parallel** geschakeld worden. In de praktijk wordt veelal gekozen voor de serieschakeling om de spanning op een voldoende hoog niveau te krijgen en de stroom te verlagen. Hoe lager de stroom hoe lager de elektrische verliezen.



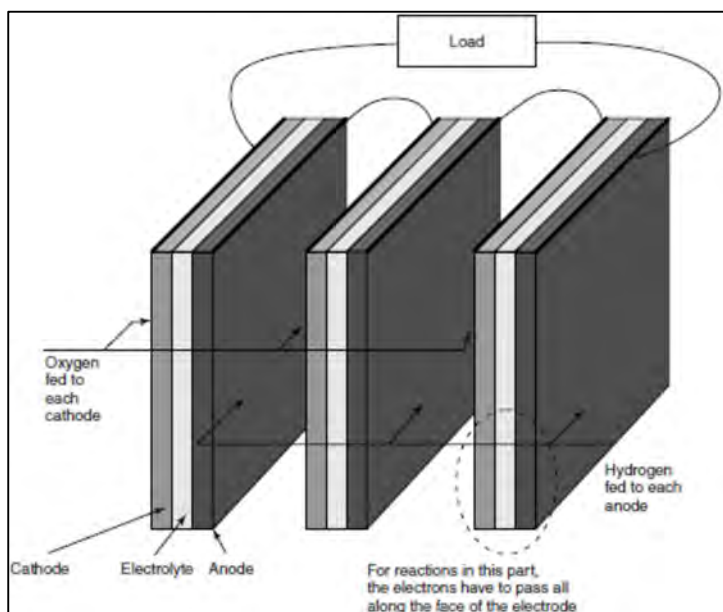
Het verschil tussen een serie en een parallelschakeling?
Volg de link.



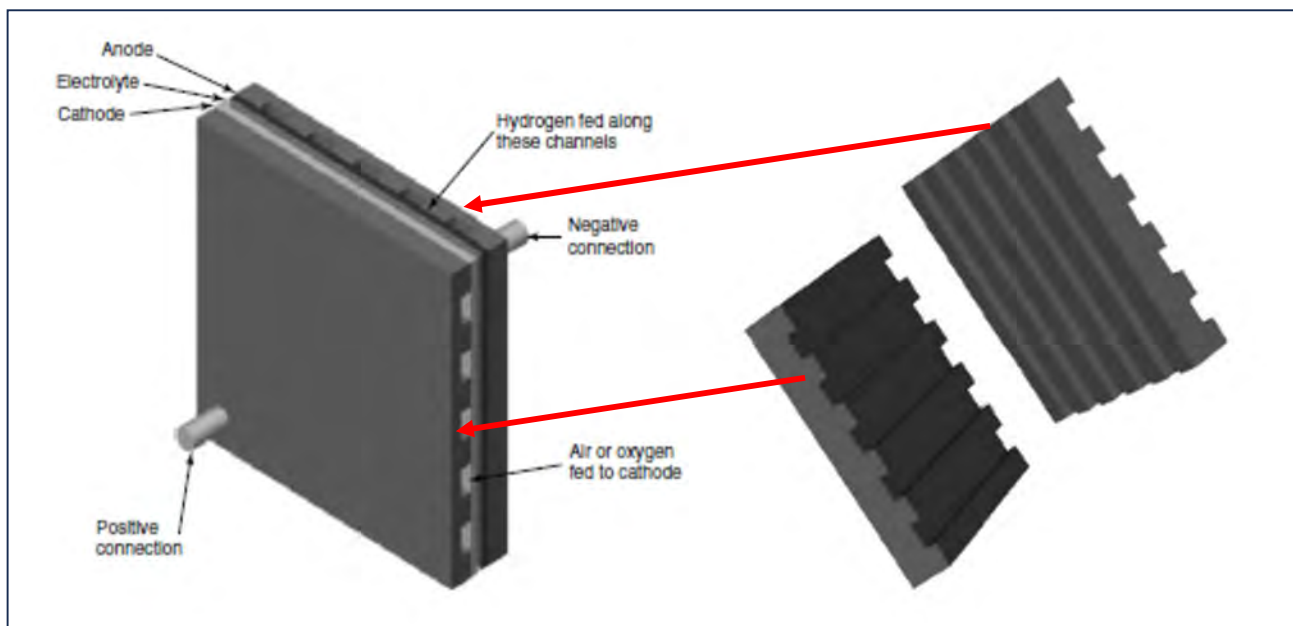
Dit betekent dat voor de productie van een nuttige spanning de cellen in een reeks verbonden worden. Een dergelijke verzameling van brandstofcellen in serie is noemt men **een stack**. De eenvoudigste manier is door het aansluiten van de rand van elke anode aan de kathode van de volgende cel, langs de lijn, zoals in de figuur is afgebeeld. Bij deze opstelling zien we een vereenvoudigde weergave van 3 in serie geschakelde cellen.

Het probleem met deze methode is dat de elektronen door het gehele oppervlakte van de elektrode naar het punt aan de rand waar deze is verbonden met de volgende cel. Alhoewel de elektroden goede geleiders zijn treedt hier toch **een ongewenst verlies** op.

Een betere methode van de cel te verbinden is door het gebruik van **een bipolaire plaat**. Deze maakt verbinding over het oppervlak van een kathode en de anode van de volgende cel op hetzelfde moment. De bipolaire plaat fungeert als een middel om zuurstof te voeden aan de kathode en waterstofgas aan de anode. De twee gasleveringen moeten strikt worden gescheiden.



De methode van het aansluiten op een enkele cel, over de elektrode oppervlakken, terwijl deze ook waterstof aan de anode en zuurstof aan de kathode toevoert, wordt getoond in de onderstaande figuur. De gegroefde platen zijn gemaakt van een goede geleider zoals grafiet of RVS.



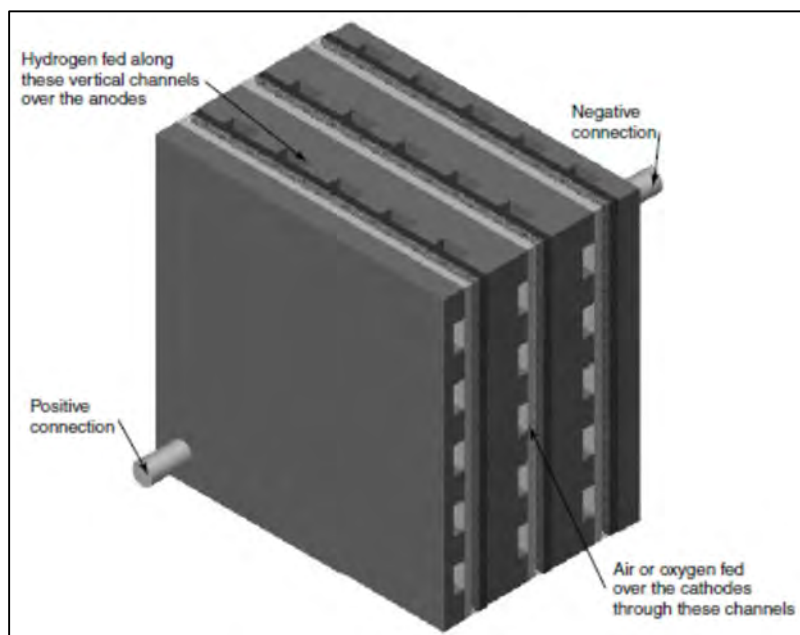
Vereenvoudigde voorstelling van een enkele brandstofcel met connecties voor het stroomcircuit en ingangen voor de toevoer van de gassen.

Voor het aansluiten van meerdere cellen in serie worden deze samen **gestapeld**. Deze stack heeft verticale kanalen voor het voeden van waterstof over de anodes en horizontale kanalen voor het voeden van zuurstof (of lucht) over de kathoden.

Het resultaat is een vast blok wat de elektrische stroom efficiënt, min of meer dwars door de cellen, van de ene elektrode naar de andere laat stromen.

Hierdoor zijn de elektroden goed ondersteund en de hele structuur is sterk en robuust. Het ontwerp van de bipolaire plaat is niet eenvoudig. Als het elektrisch contact moet worden geoptimaliseerd, moet het contactoppervlak zo groot mogelijk zijn, maar is ongunstig voor de goede gasstroom over de elektroden.

Idealiter moet de bipolaire plaat zo dun mogelijk zijn, om de elektrische weerstand te minimaliseren en om de brandstofcellen stapel klein te maken. Nadelig is dat de kanalen voor de gasstroom smal worden waardoor het moeilijker wordt om het gas rond de cel te pompen.



Een stack met 3 cellen waarbij de bipolaire platen de verbinding vormen tussen de cellen.

In het geval van brandstofcellen met lage temperatuur moet de circulatielucht verdampen en het product water wegnemen. Daarnaast zijn er meestal nog meer kanalen door de bipolaire plaat voor koelvloeistof.

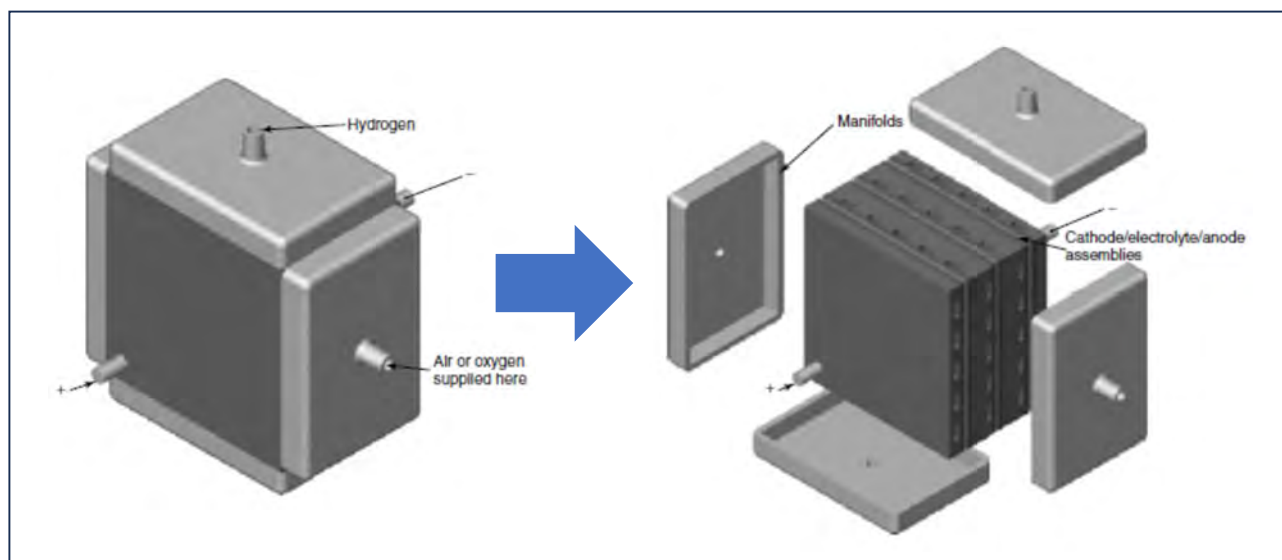
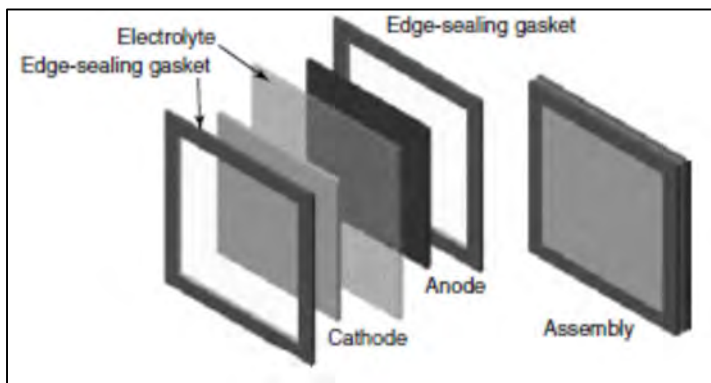


10.03 GAS TOEVOER EN KOELING

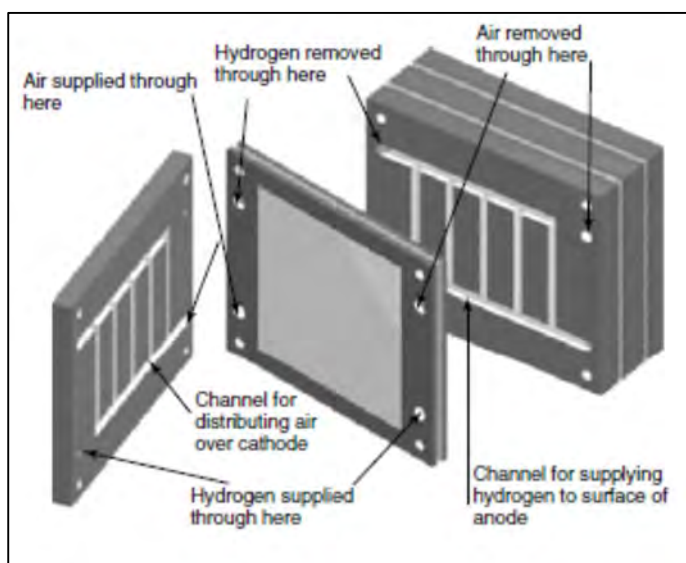
Theoretisch is het eenvoudig om een stack van meerdere cellen te ontwikkelen. Bij de realisatie zijn er echter problemen met de gasvoorziening en het voorkomen van lekkage. Omdat de elektroden poreus moeten zijn zouden deze lekken aan de randen. Het resultaat is dat de randen van de elektroden moeten worden afgedicht.

Soms wordt dit gedaan door het elektrolyt iets groter te maken dan de elektroden en de montage van een afdichting pakking rond elke elektrode.

Dergelijke assemblages kunnen gestapeld worden waarbij de waterstof en zuurstof kan worden geleverd aan de elektroden. Hiervoor gebruikt men toevoersystemen en spuitstukken. Door de verbindingen rond de rand van de elektroden, moet de waterstof alleen in contact komen met de anoden als het wordt gevoed in verticale richting door de brandstofcel stack. Zuurstof wordt horizontaal gevoed door de stack en mag alleen contact met de kathoden hebben.



Een stack met 3 brandstofcellen, externe spuitstukken en aansluiting voor de stroom. In deze opstelling is geen koeling mogelijk.



Interne toevoer en afvoer van gas.

De bovenstaande eenvoudige opstelling wordt gebruikt in sommige systemen maar het heeft enkele grote nadelen. Het systeem is moeilijk te koelen. Brandstofcellen zijn nooit 100% efficiënt waardoor er grote hoeveelheden warmte – energie en elektrische energie wordt gegenereerd.

In de praktijk moet dit type cel gekoeld worden door de lucht die over de kathoden stroomt. Dit betekent dat meer lucht geleverd moet worden dan noodzakelijk voor de chemische reactie. Soms is dit voldoende om de cel te koelen, maar het blijft een verspilling van energie.

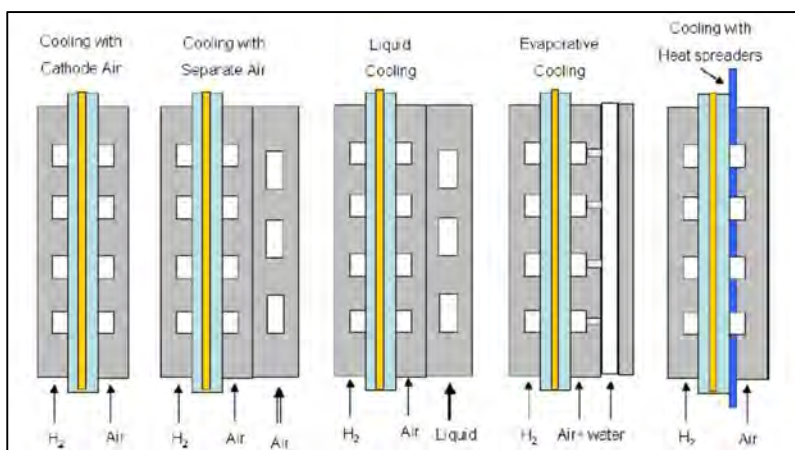
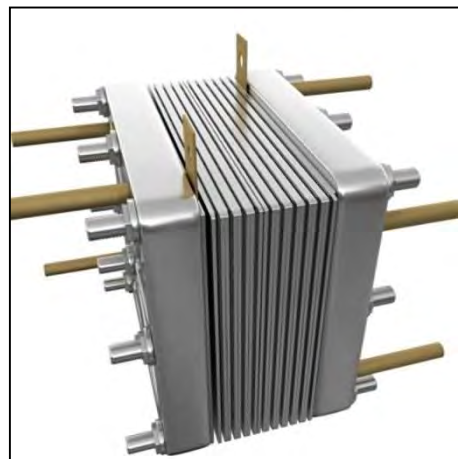
Het tweede nadeel is dat de pakking rond de rand van de elektroden niet gelijkmatig wordt ingedrukt (o.a. op het punt waar zich een kanaal bevindt). Dit resulteert in een verhoogde kans op lekkage van de reactiegassen.

Een oplossing vereist een complexere bipolaire plaat. De platen zijn groter gemaakt ten opzichte van de elektroden en hebben extra kanalen lopen door de stack die de brandstof en zuurstof voeden om de elektroden.

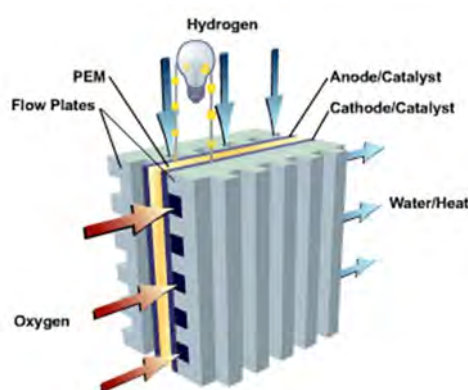
Zorgvuldig geplaatste gaten voeden de gassen in de kanalen die over de oppervlakte van de elektroden lopen. Dit type van regeling wordt een intern spruitstuk genoemd. Het resulteert in een brandstofcel stack als een massieve en solide blok met de reageerde gassen die binnen worden gevoerd aan de uiteinden. De eindplaat is vrij complex, met verschillende aansluitingen.

Hiernaast zien we de typische vorm van een brandstofcel als een solide blok van meerdere cellen met aansluitingen aan elk uiteinde.

De bipolaire plaat met interne spruitstuk kan worden gekoeld op verschillende manieren. De eenvoudigste manier is om smalle verticale kanalen te maken door de platen en koellucht of water door hen heen te laten lopen. Andere mogelijkheden zijn het laten condenseren van lucht en/of het gebruik van een warmte geleider.



Schematische voorstelling van de koelingsmethoden bij een PEM.



Het is duidelijk dat de bipolaire plaat meestal een complex onderdeel is in een brandstof cel stack. De keuze van het materiaal is ook niet eenvoudig. Grafiet wordt vaak gebruikt, maar is moeilijk om te bewerken doordat het broos is. Roestvrijstaal kan ook worden gebruikt, maar zal tot corrosie kunnen leiden in sommige soorten brandstofcellen. Keramische materialen worden gebruikt in de zeer hoge temperatuur brandstofcellen. De bipolaire plaat maakt dan ook altijd een belangrijke deel van de kostprijs van een brandstofcel uit.

Het risico op lekkage is relatief groot wanneer zo'n diversiteit aan onderdelen wordt samengesteld. Het gas zou kunnen ontsnappen langs de poreuze rand van de elektrodes. Andere zwakke plekken zijn de verbindingen tussen elke bipolaire plaat. Bovendien leidt het kleinste gat in een elektrolyt tot ernstige vervolglekage.

10.04 WELKE TYPES VAN BRANDSTOFCELLEN ZIJN ER?

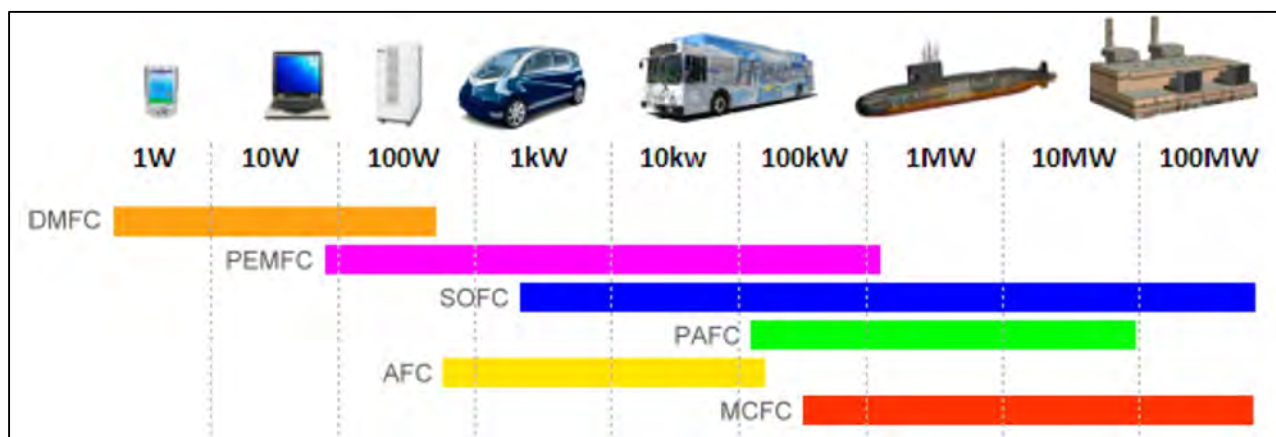
Naast het kostenplaatje zijn de **3 fundamentele technische problemen** bij brandstofcellen:

- Hoge kwaliteitseisen van waterstof.
- De lage reactiesnelheid bij een wisselende belasting.
- De beschikbaarheid van waterstof.

Om deze problemen op te lossen zijn verschillende soorten brandstofcellen ontwikkeld. De verschillende soorten worden meestal onderscheiden door het elektrolyt dat wordt gebruikt, maar er zijn altijd ook andere belangrijke verschillen. We onderscheiden nu verschillende klassen van brandstofcellen als levensvatbare systemen voor nu en de nabije toekomst. Een overzicht zien we in de onderstaande tabel.

	AFC	PEFC/PEM DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Designation	Alkaline FC	Polymer electrolyte / direct methanol FC	Phosphoric acid FC	molten carbonate FC	Solid oxide FC
Temperature	low	<100°C		up to 800°C	high
Catalyst Material	noble	Platinum		Metals	less noble
Gas Requirement	ultrapure	4-5.0 H ₂		C _n H _m	less pure
Cell Efficiency	low	40-50%		50-60%	high
System Complexity	high	Reformer		Internal Reformer	low
Start-Up-Time	low	Seconds		Hours	high
Dynamism	high				low

Eigenschappen van verschillende type brandstofcellen (bron: WBZU, ZSW, CALLUX via Vives Hogeschool)



Overzicht van de brandstofcellen volgens het vermogen.

De proton – uitwisseling membraan brandstofcel (**PEMFC** = Proton Exchange Membrane Fuel Cell) profiteert van de essentiële eenvoud van de brandstofcel. De elektrolyt is een solide polymeer waarin protonen mobiel zijn. De chemie is hetzelfde als de zure elektrolyt brandstofcel. De cellen werken op vrij lage temperaturen, dus het probleem van de trage reactie moet worden aangepakt door gebruik te maken van geavanceerde katalysatoren en elektroden. Platina is de katalysator, maar de ontwikkelingen in de afgelopen jaren betekenen dat er slechts minieme hoeveelheden hoeven worden toegepast die ook nog eens goed gerecycled kunnen worden.

Platina is daarmee een klein deel van de totale prijs van een PEM brandstofcel. PEM brandstofcellen werken alleen op zeer zuivere waterstof en kunnen vervuild raken als er sporen van CO en CO₂ in het waterstof aanwezig zijn. Hiervoor bestaan er zuiveringsprocessen.

Een theoretisch zeer aantrekkelijke oplossing voor de waterstof voorziening is het gebruik van methanol als brandstof. Dit kan gedaan worden in de PEM brandstofcel en worden directe methanol brandstofcellen (**DMFC**) genoemd waarbij men de methanol als brandstof in vloeibare vorm zal gebruiken. Het nadeel van deze cellen is de lage reactiesnelheid omdat er een extra omzetting nodig is.



De voeding komt uit een methanol brandstofcel aggregaat zorgde in het Nederlandse Schiedam voor de optimale werking van 2 slagbomen.



Hoewel PEM brandstofcellen werden gebruikt op het eerste bemande ruimtevaartuig, werd de alkalische brandstof cel (**AFC**) gebruikt op de Apollo en Shuttle Orbiter Craft. Het probleem van de trage reactiesnelheid is overwonnen door het gebruik van zeer poreuze elektroden met een platina katalysator en door bij vrij hoge druk te werken.

De fosforzuur Fuel Cell (**PAFC**) is het eerste type dat geproduceerd is in commerciële hoeveelheden. Dit principe wordt gebruikt bij veel 200kW – systemen en werd vervaardigd door de International Fuel Cells Corporation. Poreuze elektroden, platina katalysatoren, en een vrij hoge temperatuur (~220°C) worden gebruikt om de reactiesnelheid te verhogen tot een redelijk niveau. Het probleem van het tanken met waterstof wordt opgelost door aardgas (overwegend methaan) te hervormen tot waterstof en koolstofdioxide. Het grote nadeel is naast de kostprijs ook de grootte van het brandstofcel – systeem. PAFC systemen maken gebruik van de eenvoud van een brandstofcel om een buitengewoon betrouwbaar en onderhoudsvrij energievoorziening te realiseren. Verschillende PAFC systemen lopen continu voor lange periodes met weinig onderhoud.



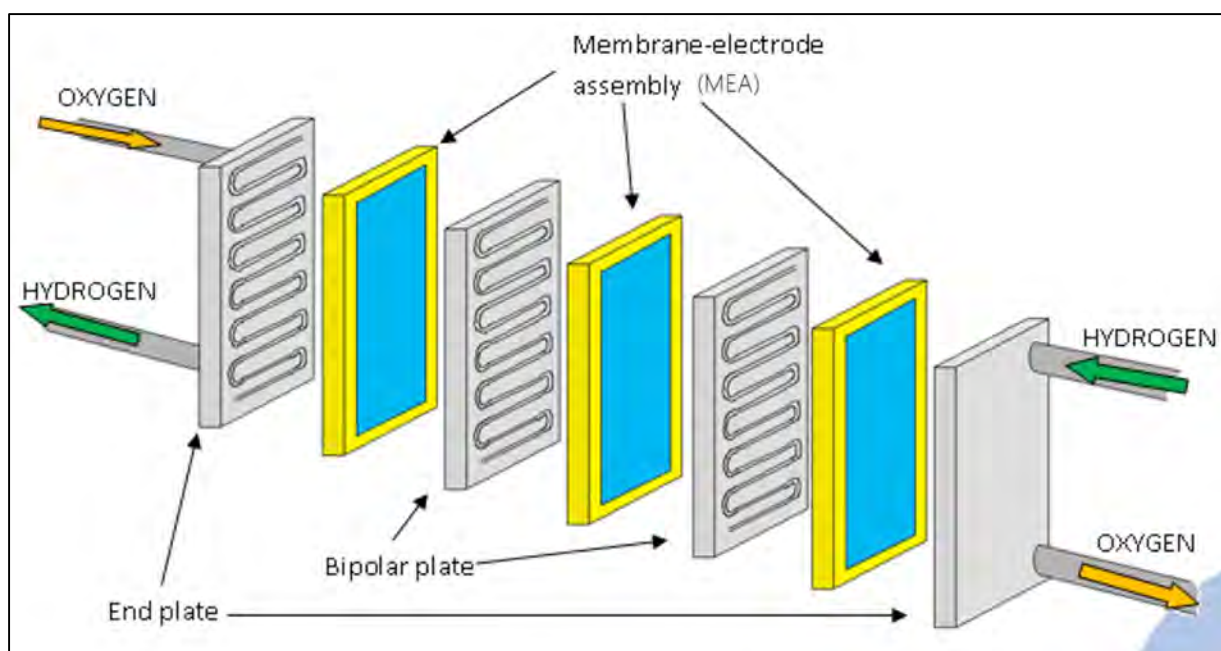
Elke brandstofcel type heeft voordelen maar ook weer uitdagingen. De Solid oxide brandstofcel (**SOFC**) opereert in het temperatuursbereik van 600 tot 1000°C. Dit betekent dat hoge reactiesnelheden kunnen worden bereikt zonder dure katalysatoren en dat gassen zoals aardgas direct kunnen worden gebruikt. Het kan ook intern binnen de brandstofcel hervormd worden zonder de noodzaak van een aparte eenheid.

Nadelig zijn de dure productiekosten van de keramische materialen in de cellen. Daarnaast is er nog een vrij grote hoeveelheid extra apparatuur nodig om een volledige brandstofcel systeem te maken. Deze omvat lucht – en brandstof voorverwarming. Ook het koelsysteem is ingewikkeld en niet eenvoudig op te starten.

Ondanks de werking bij temperaturen tot 1000°C blijft de SOFC altijd in de vaste vorm. Dit geldt niet voor de gesmolten carbonaat Fuel Cell (**MCFC**), die de interessante eigenschap heeft dat het de koolstofdioxide in de lucht nodig heeft om te werken. De hoge temperatuur betekent dat een goede reactiesnelheid wordt bereikt door gebruik te maken van een relatief goedkope nikkel – katalysator. Het nikkel vormt ook de elektrische basis van de elektrode. Net als de SOFC kan de MCFC rechtstreeks zonder interne hervormer gebruik maken van gassen zoals methaan en syngas (H₂ en CO).



Bekijk de onderstaande schematische voorstelling van een brandstofcel.
Welke type zien we? Leg de werking uit in uw eigen woorden.
Bijkomende informatie is eventueel terug te vinden op het internet.



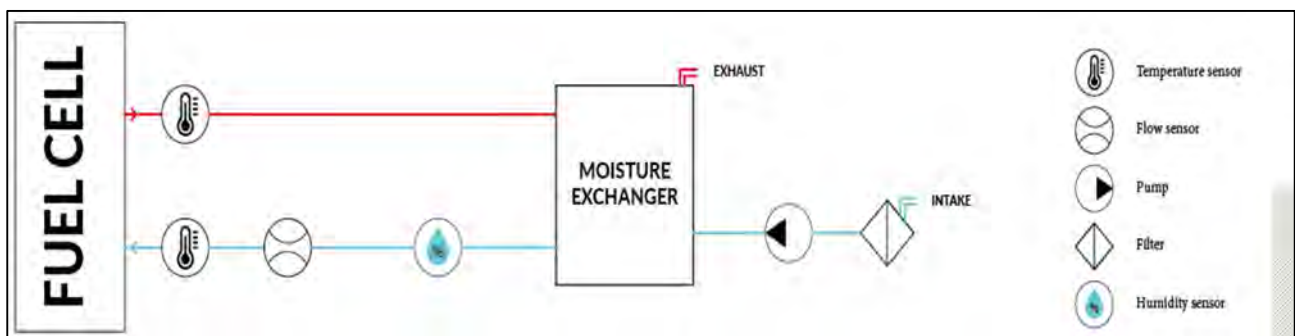
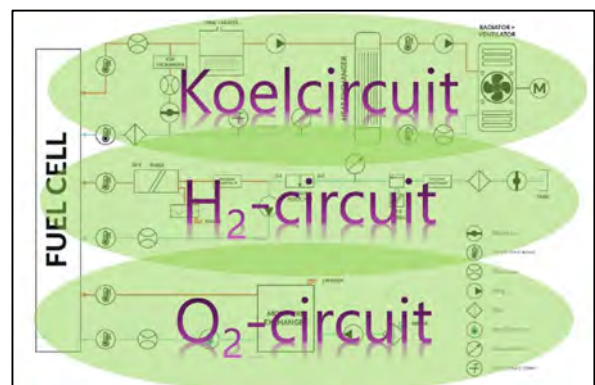
10.05 BOP = BALANCE OF PLANT

Zoals we gezien hebben bestaat de kern van een brandstofcel uit elektroden, het elektrolyt en de bipolaire plaat. Daarnaast bestaan er nog extra onderdelen waarbij men zal spreken over de **Balance of Plant** (= BOP).

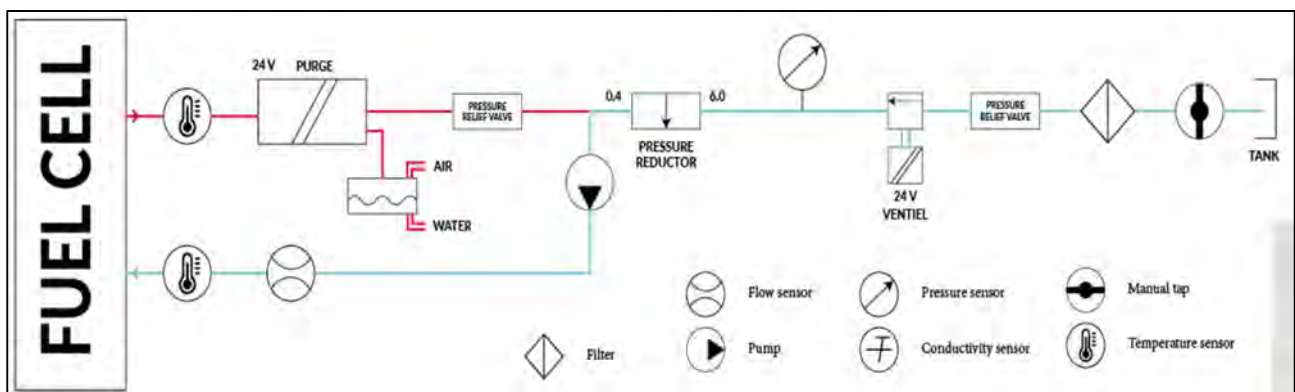
Het is een term om te verwijzen naar **alle extra ondersteunende** componenten en hulpsystemen van een energiecentrale. De opwekkingseenheid zelf is hiervan geen onderdeel.

In de waterstofindustrie spreken we meestal over **3 circuits**:

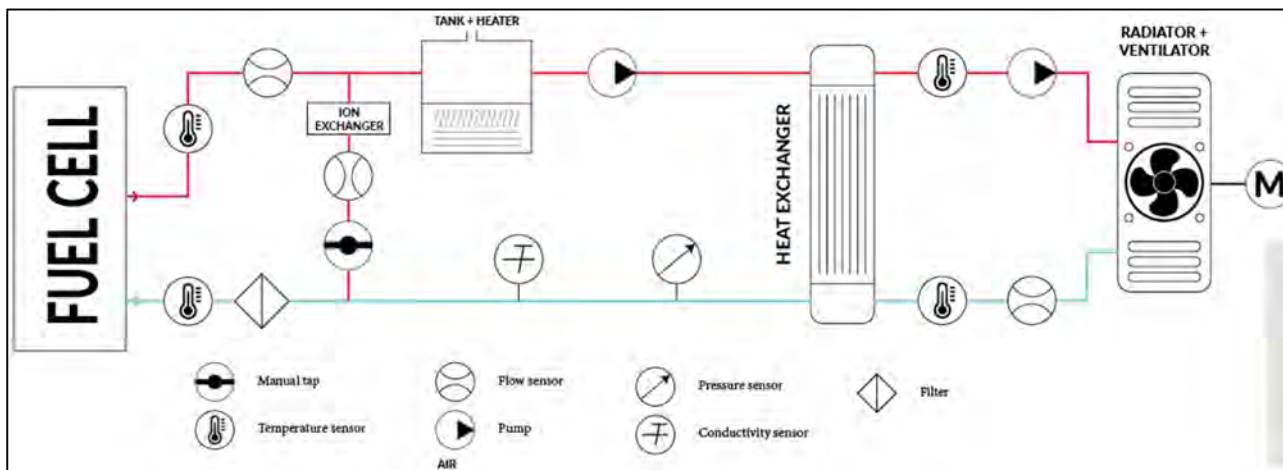
- zuurstof (O₂)
- waterstof (H₂)
- koeling.



Schematisch overzicht van een zuurstofcircuit (bron VIVES hogeschool).



Schematisch overzicht van een waterstofcircuit (bron VIVES hogeschool).



Schematisch overzicht van een koelcircuit (bron VIVES hogeschool).

De benodigde extra componenten hangen sterk af van de aard van de brandstofcel en de gebruikte brandstof. Hieronder zien we een beknopte opsomming van de belangrijkste onderdelen welke ook terug te vinden waren op de schematische voorstellingen van VIVES hogeschool:

Lucht en brandstof toevoer: bij alle, op de kleinste brandstofcellen na, zal de lucht en brandstof moeten worden verspreid via de stack met pompen of blazers. Vaak worden gekoelde compressoren gebruikt.

Omzetting elektrisch vermogen: de gelijkstroom (DC) output van een brandstofcel stack zal zelden geschikt zijn voor directe aansluiting op een elektrische lading waarbij een vermogensregelaar noodzakelijk is. Dit kan een spanningsregelaar zijn of een DC/DC Converter. Een gelijkstroom aan wisselstroom omzetter (DC/AC) is duur. Elektromotoren drijven de pompen, blowers, en compressoren aan en zijn een vitaal onderdeel van een brandstofcel systeem.

Brandstofopslag waaronder de aanvoer en opslag van waterstof.

Brandstof hervorming: als de brandstofcel geen waterstof gebruikt zal een brandstof verwerkingssysteem nodig zijn.

Verschillende Regelventielen evenals drukregelaars zullen meestal nodig zijn. In de meeste gevallen zal een controller nodig zijn om de onderdelen van het systeem te coördineren.

Voor de grotere brandstofcellen zal een koelsysteem nodig zijn. Bij een WWK zal dit een warmtewisselaar zijn om de warmte niet te verliezen maar bij een ander proces te gebruiken.

Voor het bevochtigen van één of beide gassen is een bevochtiger toegevoegd. Een licht vochtig membraan is noodzakelijk voor het transporteren van ionen.



Balance of Plant in de industrie voor grote vermogens tot 1000 MW.



BOP ook klein en compact? Compacte brandstofcel systemen van een auto. De vermogens liggen ratio 150 kW.

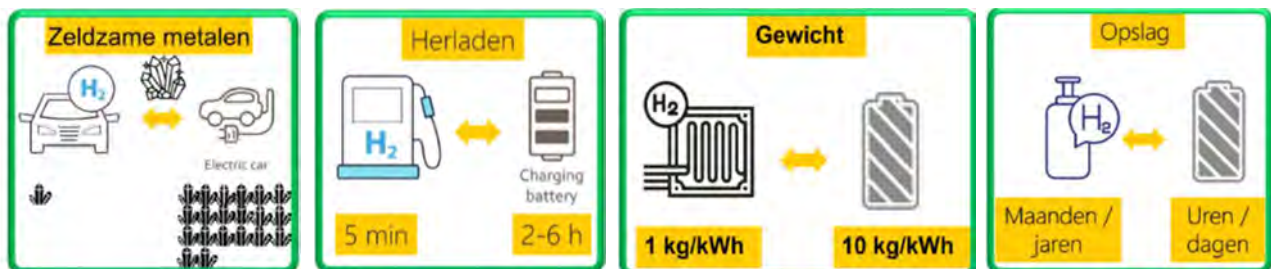
10.06 TOEKOMST?

Brandstofcellen zijn **efficiënter** dan verbrandingsmotoren en kunnen ook toegepast worden bij kleine lokale systemen om elektriciteit op te wekken.

Brandstofcellen zijn eenvoudig en compact met weinig of geen bewegende onderdelen. Dit zal leiden tot betrouwbare systemen met een lange levensduur. Het heeft zelfs een langere levensduur dan batterijen.

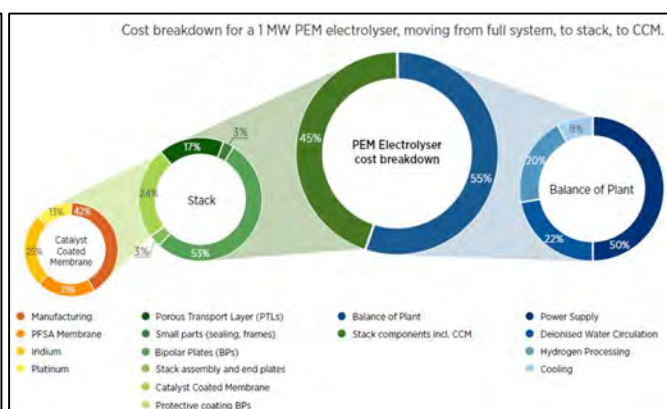
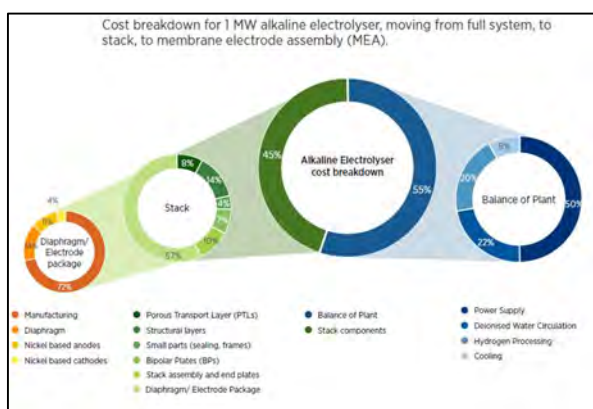
Een bijkomend voordeel is het geluid van het systeem. Brandstofcellen zijn zeer stil! Dit is belangrijk bij draagbare, mobiele of stationaire toepassingen.

Men spreekt ook over lage emissies door zuiver water als bijproduct waardoor men spreekt over **zero emission**.



Enkele interessante vergelijkingen...

Spijtig genoeg zijn er ook nadelen... voorlopig is het nog een minder bekende technologie maar het belangrijkste nadeel is de kostprijs! Door het gebruik van duurdere materialen zoals platina en de kleine productie spreekt men van een hoge **capex**. Dit bewijzen de onderstaande overzichten. Hopelijk zal de productie de komende jaren stijgen waardoor de kostprijs zal dalen!



Vergelijking kosten tussen PEM – en MEA – technologie (bron AGFA).

11 WATERSTOF ALS BRANDSTOF?

Waterstof is een **energiedrager** waarbij de energie ook vrij kan komen door waterstof te verbranden. We hebben reeds gezien dat waterstof zeer explosief en zeer licht ontvlambaar is. Met deze gegevens kunnen we waterstof gecontroleerd verbranden. Het kan een vervanger zijn voor de gasvormige brandstoffen (zoals methaan) en vloeibare brandstoffen (benzine en diesel). Het grote voordeel is dat de verbrandingsgassen geen CO₂ bevatten.

Een ander belangrijk voordeel is dat met relatief beperkte aanpassingen een ombouw naar waterstofverbranding gerealiseerd kan worden. Men kan waterstof ook mengen met de fossiele brandstoffen.

Het nadeel is tweeledig: het rendement is in de verbrandingsmotor lager dan het rendement van een brandstofcel.

Daarnaast komen door de hogere temperaturen NO_x vrij. Dit zijn stikstofoxiden in gasvorm die vooral vrijkomen bij de verbranding van fossiele brandstoffen zoals uitlaatgassen van voertuigen, industriële uitstoot,... Deze groep gassen bestaat voornamelijk uit stikstofmonoxide (NO) en stikstofdioxide (NO₂).

Om die reden kiest de automobielwereld of **Automotive** nu voor de brandstofcellen. Er zijn echter nog genoeg andere mogelijkheden met name in de zware voertuigen met grote motoren. Hiermee is ook de maritieme wereld in beeld omdat deze motoren redelijk eenvoudig omgebouwd kunnen worden naar waterstof.

In de gebouwde omgeving is het verbranden van waterstof een bruikbaar alternatief voor aardgas. Doordat het bestaande netwerk voor de distributie gebruikt kan worden moet men alleen de branders van CV – ketels vervangen. Studies wijzen er echter op dat waterstof minder efficiënt is als verwarmen met een warmtepomp.

Tenslotte is waterstof ook interessant als brandstof in de energiecentrales.

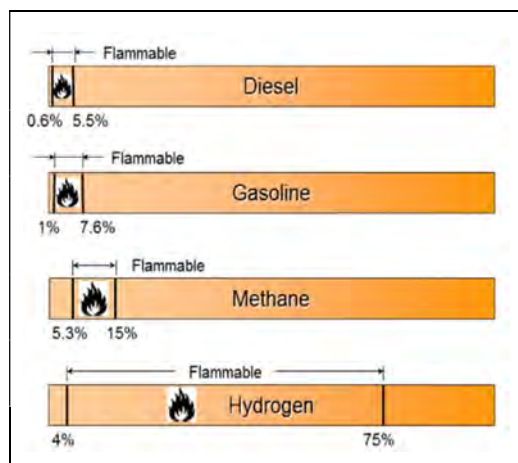


11.01 HET VERBRANDEN VAN WATERSTOF

Bij het overzicht van verschillende brandstoffen merken we dat waterstof een zeer licht ontvlambaar gas is.

Het heeft ontvlambaarheidsgrenzen zijn 4 tot 75 vol% brandstof in de lucht. De temperatuur in de waterstofvlam kan oplopen tot meer dan 2000°C in een zuurstofatmosfeer en de minimale ontstekingsenergie van 0,02 mJ is erg laag. Men moet dus branders gebruiken die specifiek zijn aangepast voor waterstof.

Ondertussen heeft men reeds CV – ketels ontwikkeld die voor 100% werken op waterstof zodat ze ook kunnen gebruikt worden bij de verwarming van woningen en gebouwen. Het probleem in de woningbouw is momenteel de toevoer van waterstof. Producenten voor CV – ketels ontwikkelen momenteel toestellen die in de toekomst eenvoudig kunnen omgeschakeld worden naar waterstof als brandstof.



	Hydrogen	Gasoline Vapor	Natural Gas
Flammability limits	4 – 75%	1.4 – 7.6%	5.3 – 15%
Explosion limits	18.3 – 59.0%	1.1 – 3.3%	5.7 – 14%
Ignition energy	0.02 mJ	0.20 mJ	0.29 mJ
Flame temperature	2045°C	2197°C	1875°C

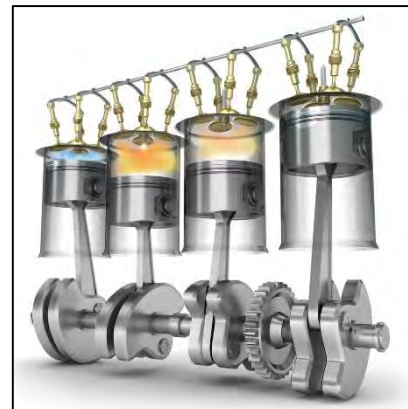
Verbrandingseigenschappen van brandstoffen.

11.02 DE VERBRANDINGSMOTOR

Het principe van een waterstofverbrandingsmotor is gebaseerd op een **mengselmotor** waarbij het brandstofmengsel door middel van een **bougie** wordt ontstoken. Men spreekt ook over een Otto – motor en werd ontwikkeld in de 19^{de} eeuw door de gelijknamige familie.

Het brandbare mengsel van brandstof en lucht wordt buiten de verbrandingskamer gevormd in een zogenaamde carburateur of door brandstofinjectie in het inlaatspruitstuk en tegenwoordig ook direct in de cilinder. Onder normale omstandigheden bevat lucht 80% stikstof (N_2) en 20% zuurstof (O_2).

Door de aanwezige zuurstof is dit mengsel in de juiste mengverhouding brandbaar. In de verbrandingsruimte wordt het mengsel aangezogen door een onderdruk die daar ontstaat tijdens de inlaatslag.



Na de inlaatslag volgt de compressieslag: het mengsel wordt samengeperst. Hierna brengt een vonk het mengsel tot ontbranding. Dit zorgt voor een stijging in druk wat leidt tot volumevergroting. Door deze volumevergroting ontstaat zogenaamde arbeidsslag. Hierbij wordt er een inspanning geleverd waardoor een voertuig in werking treedt.



Benieuwd naar de vereenvoudigde werking van een viercilinder in een dieselmotor? Volg de link.

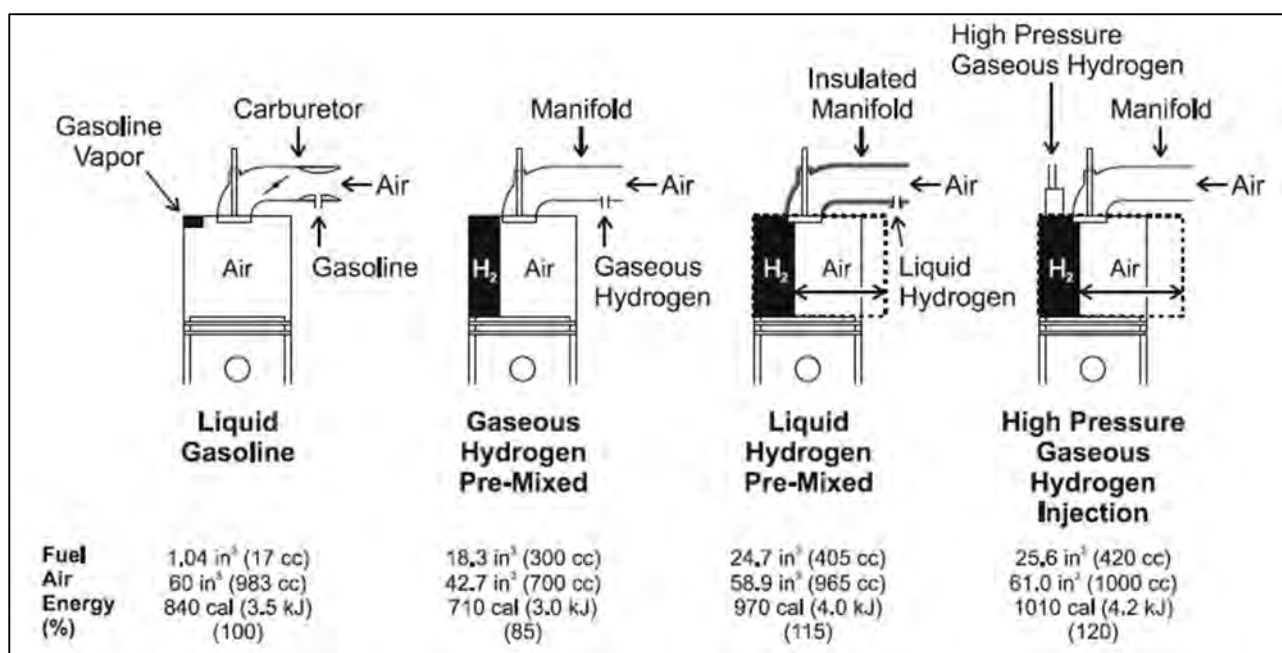


Het idee om waterstof te integreren dateert al van rond 1930. Men kan waterstof mengen met een andere brandstof of als zuivere brandstof gebruiken. De belangrijke verbetering is dat door waterstof bijmenging het rendement van de motoren verhoogd kan worden.

Indien alleen waterstof wordt toegepast als brandstof dan zijn er **drie verschillende opties** om dit te realiseren:

- Waterstofgas vermengen met lucht in het inlaatspruitstuk.
- Vloeibaar waterstof injecteren in het inlaatspruitstuk.
- Vloeibaar waterstof injecteren in de verbrandingskamer.

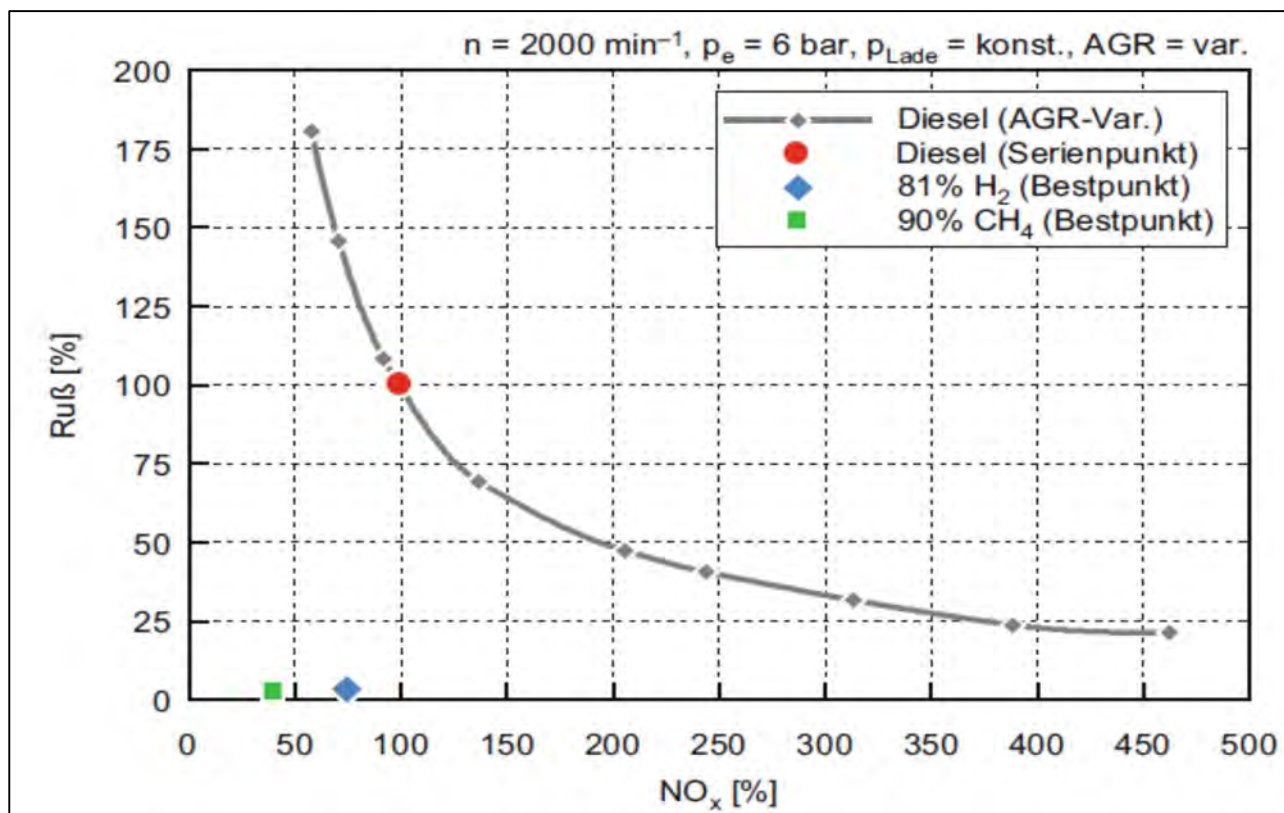
De optie is afhankelijk van hoe de toestand van de waterstof: gas of vloeibaar. Cryogene opslag is noodzakelijk bij vloeibare waterstof. Bij waterstofgas is het vermogen ca. 15% lager dan bij de benzine motor met dezelfde inhoud. Bij overige opties is het specifieke vermogen respectievelijk 15% en 20% hoger dan bij de benzine motor.



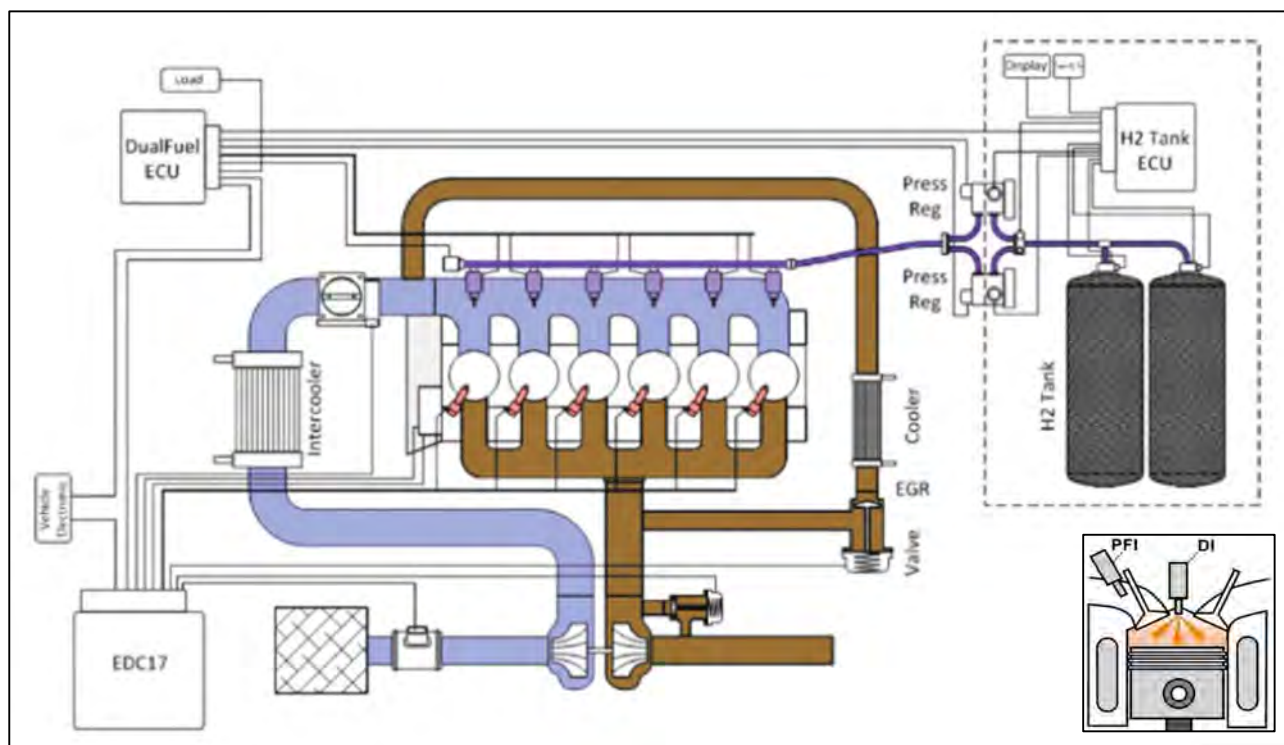
Principes van een waterstofverbrandingsmotor.

Er zijn meerdere concepten ontwikkeld, zowel uitgaande van diesel als mengselmotoren. Bij dieselmotoren kan gekozen worden voor aardgas en waterstofgas als alternatief. In beide gevallen wordt een sterke reductie van de roetuitstoot gerealiseerd.

De grafiek laat het verband zien tussen roetuitstoot en NOx. Hoe hogere de temperatuur, hoe lager de roetuitstoot en hoe hoger de NOx uitstoot. Door toepassing van waterstof en aardgas wordt de roetuitstoot verwaarloosbaar maar blijft er nog wel een NOx uitstoot bestaan. Deze NOx kan door middel van een katalysator weer omgezet worden.



Verband tussen de uitstoot van roet en NOx van een motor op diesel, aardgas (90% CH₄) en waterstofgas (81% H₂)



Opbouw van een waterstof – diesel dual fuel motor.

De **prestaties** van een motor in waterstof – of benzinemodus kunnen we vergelijken met onderstaande tabel. Opmerkelijk is dat alhoewel de prestaties qua vermogen gelijk zijn, die van waterstof duidelijk achterblijven op de actieradius van het voertuig. Hiermee is dit direct ook het knelpunt.

	hydrogen	petrol
Max. power at engine speed	191 kW / 5100 rpm	191 kW / 5100 rpm
Max. torque at engine speed	390 Nm / 4300 rpm	390 Nm / 4300 rpm
Acceleration, 0-100 km/h	9.5 s	9.5 s
Top speed $v_{\max}$	230 km/h	230 km/h
Usable hydrogen storage capacity	7.8 kg LH ₂	74 litre
Overall consumption	3.6 kg/100 km	13,9 l/100km
Operating range	> 200 km	> 500 km
CO ₂ emissions	5 g/km*	332 g/km
Other emissions	<< EU4 limits	< EU4 limits

Door de toepassing van brandstofcel technologie kan men met dezelfde hoeveelheid waterstof langere afstanden afleggen (factor 1,5-2). Daarnaast biedt de combinatie met elektrische aandrijving en een batterij veel meer mogelijkheden om tot een nog beter rendement over de hele energieketen te komen.

In feite is de vergaande ontwikkeling van de elektrische aandrijving en aansluitend de ontwikkeling van brandstofcellen (goedkoper en compacter) de reden dat verbrandingsmotoren met waterstof in feite in grote serie productie minder interessant is. Een nadeel bij verbrandingsmotoren is de geluidsproductie en natuurlijk de NO_x productie (waarvoor een katalysator moet worden toegepast).

Toch zijn er nog wel degelijk mogelijkheden wanneer met name bestaande voertuigen verduurzaamd moeten worden. Er bestaan speciale ombouwkits voor vrachtwagens en daarnaast zijn er ook nog toepassingen in de scheepvaart. Daar waar de levensduur van het voertuig of vaartuig lang is loont het ook de moeite om deze om te bouwen naar waterstof in combinatie met een verbrandingsmotor.

MAN Engines, de motorafdeling van MAN, heeft in samenwerking met CMB.TECH een V12 diesel scheepsmotor omgebouwd naar een hybride krachtbron die zowel op waterstof als diesel kan lopen. Is dit ook wat voor de trucksector?

MAN bouwde een MAN D2862 LE428 om naar een D2862 LE448 voor gebruik op de Hydrocat 48, een schip voor personeelsvervoer. De motor heeft 1029 pk bij 2100 toeren. De ombouw bestond overigens enkel uit het retrofitten van het waterstofinjectiesysteem.

MAN Engines heeft onlangs zijn eerste twee dual fuel waterstofmotoren voor werkschepen in serie in bedrijf gesteld. De motoren zijn IMO Tier III-gecertificeerd en uitgerust met een uitlaatgasnabehandelingssysteem met selectieve katalytische reductie (Selective Catalytic Reduction). Beide V12-motoren zijn door MAN Engines voorbereid voor dual fuel-werking en door ontwikkelingspartner CMB.TECH uit Antwerpen aangevuld met een waterstofinjectiesysteem. De motor met lage emissie wordt gebruikt op 's werelds eerste waterstofaangedreven crew transfer vessel (CTV), de Hydrocat 48 van Windcat Workboats.

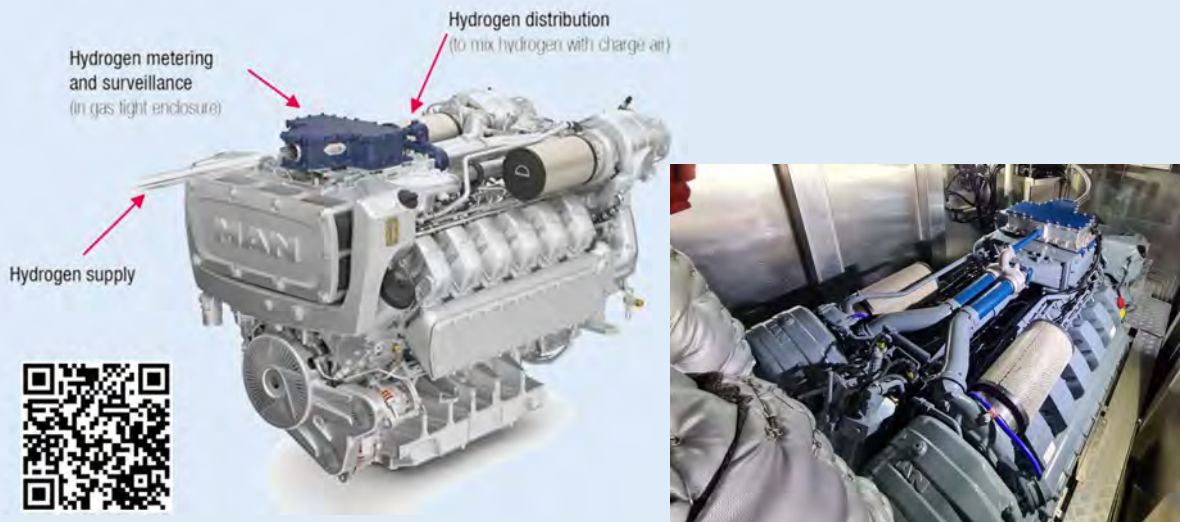
“Het bijzondere aan onze technologie is dat we een conventionele dieselmotor gebruiken, die niet geoptimaliseerd hoeft te worden voor waterstof”, zegt Werner Kübler, hoofd ontwikkeling bij MAN Engines. Er wordt dus een beproefde V12-scheepsmotor gebruikt waarbij waterstof via een adapter in de laadlucht wordt gebracht en aan de verbrandingscyclus wordt toegevoegd. Het verbrandingsproces wordt daarbij op gang gebracht volgens het dieselpincipe, dat de inspuiting van ongeveer 5 procent dieselbrandstof vereist. De parameters van de diesel common rail inspuiting zijn hier geoptimaliseerd voor dual fuel werking.

MAN Engines heeft een jarenlange ervaring in de ontwikkeling van brandstof besparende en betrouwbare dieselmotoren, ook voor werkschepen. Voortbouwend op deze ervaring zijn we erin geslaagd om ook bij dual fuel-bedrijf de beste verbruikswaarden te bereiken en hetzelfde gedrag te garanderen als bij dieselbedrijf bij volle belasting.

Tegelijkertijd verminderen we ook de CO₂-uitstoot door het gebruik van waterstof met gemiddeld ongeveer 50%, en zelfs tot 80% als piekwaarde”, voegt Kübler toe.



Een ander voordeel van het gebruik van de conventionele en geavanceerde dieselmotor is de gebruikelijke eenvoudige bediening wat betreft onderhoud en service. Bovendien kan de zuivere dieselwerking zonder onderbreking doorgaan als bijvoorbeeld de waterstofvoorraad uitgeput is. Beschikbaarheid, rijcomfort en bedrijfsveiligheid zijn dus altijd gegarandeerd op het hoge niveau waar een traditionele dieselmotor om bekend staat.

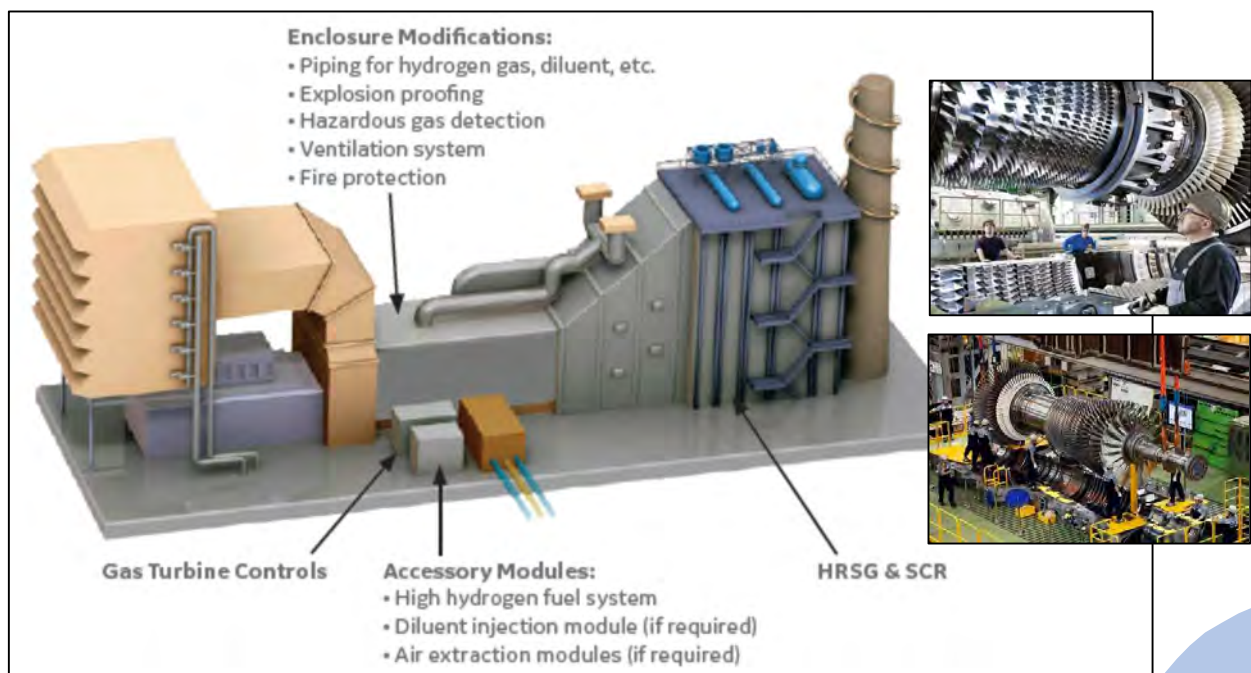


MAN Engines biedt zijn klanten en partners oplossingen zoals het “MAN Smart HYBRID Experience” hybride systeem of motoren voor gas/elektrische aandrijving, om bij te dragen aan CO₂-reductie en duurzame scheepvaart. Nu de MAN D2862 LE448 dual fuel motoren voor werkschepen klaar zijn voor serieproductie, is in dat opzicht een nieuwe mijlpaal bereikt. “Door te beginnen met dual fuel verbrandingsmotoren kunnen we waterstoftechnologie operationeel maken in de industrie en een kick-start geven aan de verdere ontwikkeling van de technologie, regelgeving, toeleveringsketen, etc.”, zegt Willem van der Wel, Managing Director van Windcat Workboats.

Bron: MAN engines

11.03 DE WATERSTOFTURBINE

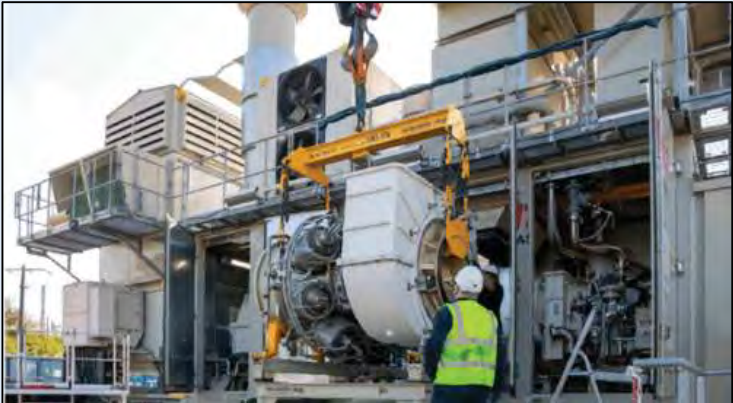
Gasturbines worden ook toegepast in elektriciteitscentrales. Als brandstof zal men ook voor waterstofgas kunnen kiezen. De bestaande installaties dienen wel aangepast te worden om de veiligheid te garanderen. Eén van de belangrijkste aandachtspunten is de verbrandingstemperatuur. Hoe groter het aandeel waterstof in de brandstof, hoe groter de aanpassingen van het systeem.



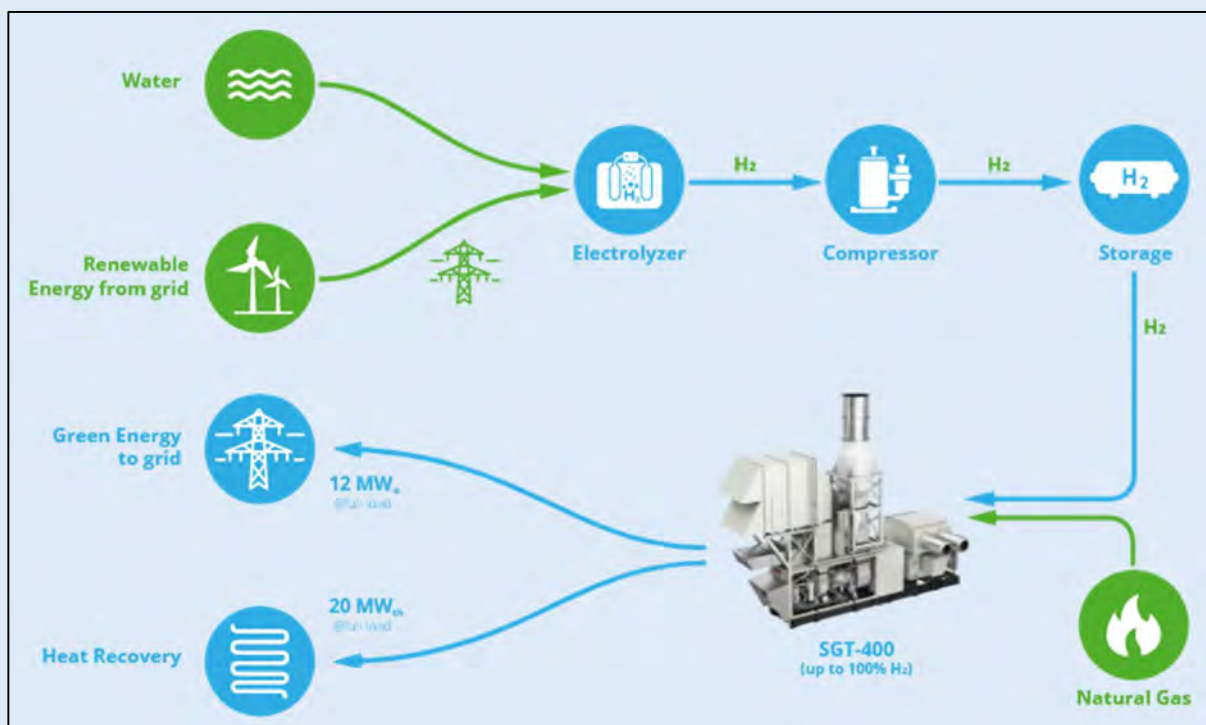
Samenstelling gasturbine met waterstof.

Het HYFLEXPOWER-project heeft op het fabrieksterrein van Smurfit Kappa, wereldleider in papieren verpakkingen, in Saillat-sur-Vienne (Frankrijk) een volledig waterstofsysteem in gebruik genomen. Het project bestaat uit het produceren, opslaan en gebruiken van de 100 procent hernieuwbare waterstof. De waterstof wordt gebruikt om een Siemens Energy SGT-400 industriële gasturbine aan te drijven.

In 2021 werd gestart met de bouw van de industriële gasturbine. De turbine kon in 2022 starten met een eerste reeks tests. In deze fase werd er gewerkt met een mengsel van aardgas met 30 procent waterstof. Afgelopen week heeft de power-to-hydrogen-to-power demonstrator bewezen dat state-of-the-art turbines met droge lage-emissietechnologie kunnen worden gevoed met maximaal 100% waterstof, evenals met aardgas en eventuele mengsels daartussenin.



De benodigde waterstof wordt ter plaatse geproduceerd door een 1MW elektrolyser en vervolgens opgeslagen in een tank van bijna een ton. Een Siemens Energy SGT-400 industriële gasturbine wordt vervolgens aangedreven met de lokale waterstof.



“De kennis en ervaring die we hebben opgedaan met het HYFLEXPOWER-project waarbij we de 1^e gasturbine hebben geïnstalleerd om op 100 procent waterstof te draaien, zal ons helpen om onze volledige gasturbinevloot verder te ontwikkelen voor een toekomst op basis van waterstof. De interactie tussen elektrolyse, opslag en waterstofconversie op één locatie is op indrukwekkende wijze aangetoond en nu is het een kwestie van het opschalen van de resultaten”, zegt Karim Amin, lid van de Raad van Bestuur van Siemens Energy.

Het HYFLEXPOWER-project toont aan dat waterstof kan worden gebruikt als een flexibel energieopslagmedium en dat het ook mogelijk is om een bestaande gasgestookte elektriciteitsturbine om te bouwen naar hernieuwbare waterstof. Het is een echte aanjager voor het versnellen van de decarbonisatie van de meest energie-intensieve industrieën.

Bron: Siemens Energy



Meer informatie over het HYFLEXPOWER project waaraan Siemens heeft meegewerkt? Volg de link.



12 WAT IS AUTOMOTIVE?

Automotive is een verzamelnaam voor bedrijven die werkzaam zijn in de productie en verkoop van voertuigen en in het bijzonder automobielen. Het onderhoud van een auto valt hier niet onder. Het woord **automotive** is een samenstelling van het Griekse woord autos (zelf) en het Latijnse woord motivus (beweging).

Als men spreekt over waterstoftechnologie in Automotive zijn er **2 varianten**:

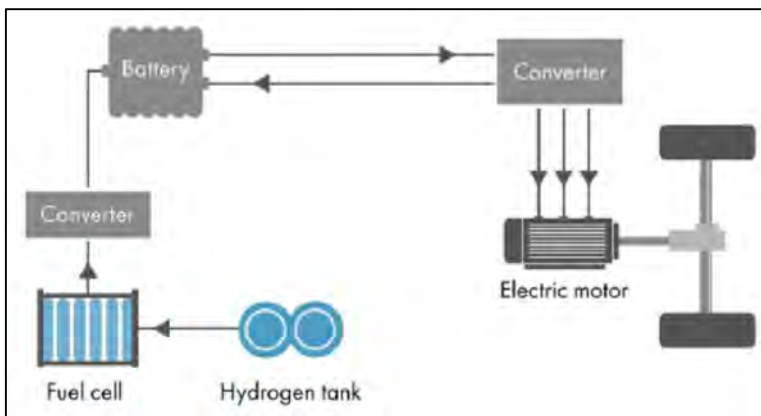
- Een batterij elektrisch voertuig met een **range extender** of een bereikvergroter.
- Een voertuig met alleen aandrijving vanuit de brandstofcel.

Van de eerste variant is de Mercedes Benz GLC F – cell enkele jaren geleden op de markt gebracht. Het nieuwe model heeft een unieke plug-in hybride Setup waarbij men de brandstofcel en batterijtechnologieën zal combineren. Als gevolg daarvan rijdt dit model zowel op elektriciteit als op waterstof. In de hybride mode, kan deze SUV tot 478 km rijden met een volledige tank van 4,4 kg van waterstof. In de volledige elektrische modus kan men maximaal 51 km rijden.

Een voordeel van deze variant is dat voor de kortere ritten het voordeel van zuiver elektrisch rijden van toepassing is waardoor men een hoog rendement heeft. De batterij levert het maximale vermogen en de brandstofcel kan geoptimaliseerd worden voor het bijladen van de batterij en kan daarmee kleiner en goedkoper worden. Een kleinere brandstofcel betekent dat het benodigd vermogen voor met hoge snelheid rijden beperkt beschikbaar is.



Mercedes Benz GLC F – cell

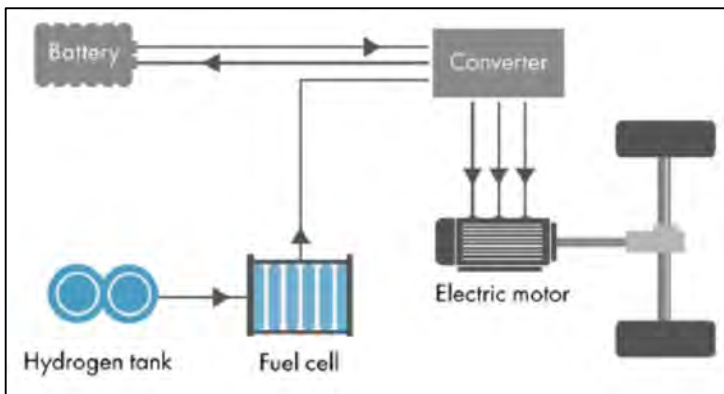


Schematische voorstelling elektrisch voertuig met brandstofcel als range

Een voorbeeld van de tweede variant is de Toyota Mirai. In dit voertuig wordt al het elektrische vermogen geleverd door de brandstofcel. Dit betekent een kleinere batterij maar ook een grotere brandstofcel. De Toyota Mirai heeft een batterij met een maximum vermogen van 9 kW.



Toyota Mirai



Schematische voorstelling brandstof elektrisch voertuig met batterij als buffer

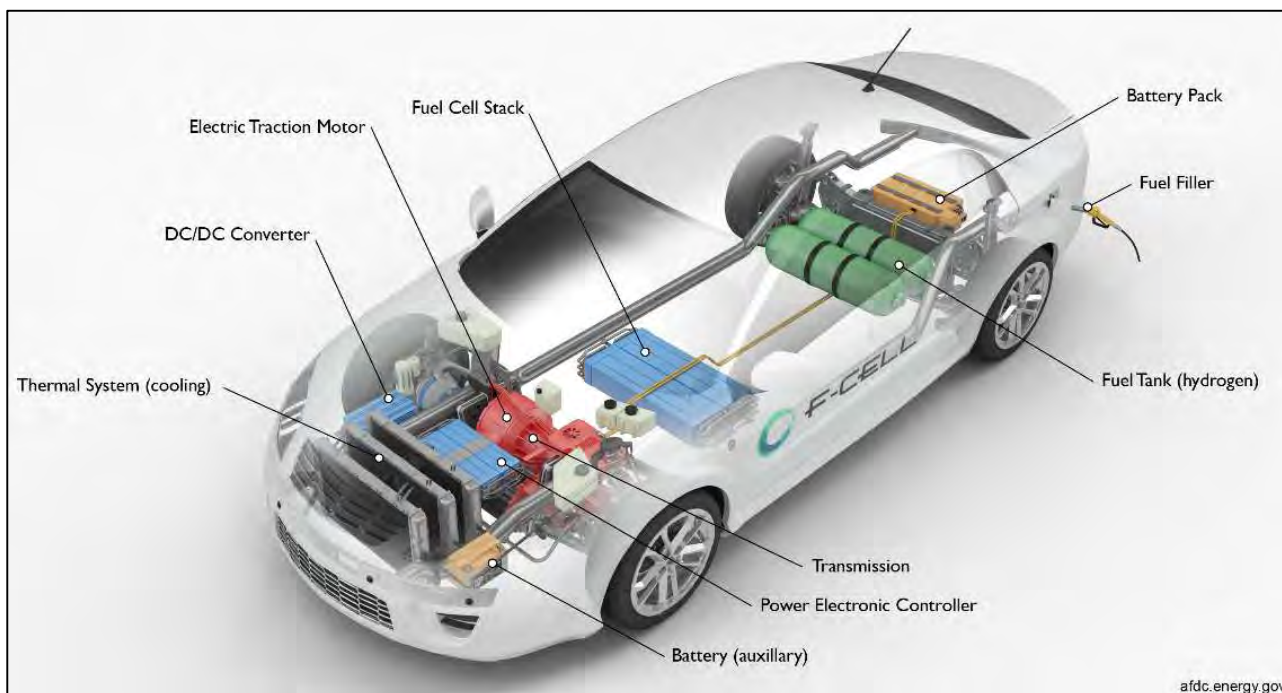
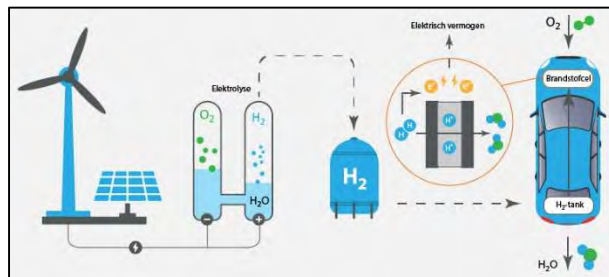
12.01 WAAROM AUTORIJDEN OP WATERSTOF?

Elektrische auto's zijn steeds populairder aan het worden en de verwachting is dat alle auto's op alternatieve brandstof in de toekomst zullen rijden. Verschillende fabrikanten brengen dan ook nieuwe modellen op de markt. In dat assortiment bestaat inmiddels ook de categorie waterstofauto's. Zou de waterstofauto de toekomst hebben, of zijn er verborgen gebreken?

Een waterstofauto is een volledig elektrische auto. Deze vierwieler wordt door één of zelfs meerdere elektromotoren aangedreven. Met deze elektromotor wordt elektrische energie omgezet in mechanische energie. Met deze mechanische energie is het mogelijk om een werktuig of voertuig aan te drijven. Het grote verschil tussen een gewone elektrische auto en een auto op waterstof is de manier waarop de energie die opgewekt is, wordt opgeslagen.

In 2013 bracht Hyundai de eerste auto op waterstof op de commerciële markt. Voordat je overweegt een waterstofauto aan te schaffen, is het van belang op de hoogte te zijn van de beperkingen en voordelen van de verschillende modellen.

Belangrijk is naast de kostprijs ook het bereik met een volle tank.



Opbouw van een auto op waterstof.



Hyundai Nexo



Toyota Mirai met inbouw van de waterstoftanks.





Twee commerciële modellen zijn de Hyundai NEXO en de Toyota Mirai. Ga op zoek naar de specificaties van deze modellen en maak een vergelijking zoals het verbruik, kostprijs,...

Hyundai NEXO	Toyota Mirai

In het genre van auto's op andere brandstof dan fossiele brandstoffen, is waterstof maar een kleine categorie. Of waterstof dan ook echt zal doorbreken, is nog de vraag.

In de tank van een auto die rijdt op waterstof gaat ongeveer 5 tot 6 kilogram. Een volle tank kost zo'n 50 tot 60 euro. Hiermee kun je een afstand rijden van gemiddeld 500 kilometer, kilometerprijs brandstof ligt in de buurt van diesel. Aankoopprijs van de waterstofauto is wel hoger omdat er momenteel een kleine productie is.

Hoewel waterstofauto's net als batterij – elektrische auto's geen schadelijke stoffen uitstoten tijdens het rijden, kan het opwekken van de brandstof waterstof wel zorgen voor schadelijke milieu-impact. Voordeel is dat een auto op waterstof al op enkele minuten kan volgetankt worden. Daarnaast ligt de actieradius van de waterstofauto flink hoger dan een benzineauto of batterij – elektrische auto. Met actieradius wordt het aantal kilometers bedoeld dat je kunt rijden op één volledig volgetankte accu.

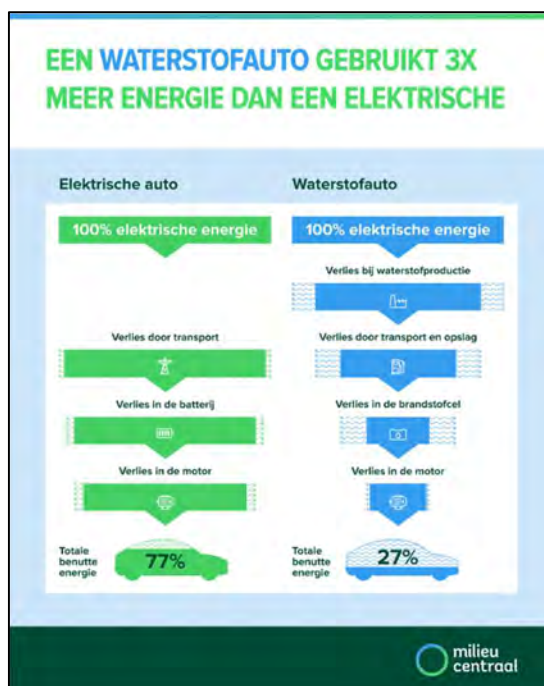
Het grote verschil tussen een waterstofauto en een reguliere elektrische auto is de manier van energie opslaan. De elektrische auto gebruikt een groot accupakket. De waterstofauto haalt daarentegen zijn energie uit waterstof.

Als een waterstofauto waterstof gaat produceren, gaat ongeveer 50 procent van de energie verloren. Er wordt gesproken van een rendement van 30% als we kijken naar de voordelen van rijden op waterstof. Bij een elektrische auto is dit rendement maar liefst 95%.

De waterstof toekomst? Momenteel is de waterstofauto nog vol in ontwikkeling. Alleen Toyota en Hyundai hebben een model uitgebracht en omdat er nog maar weinig waterstofauto's rijden is er ook nog geen tweedehandsmarkt.

Een auto op waterstof kopen is dus duur. Niet alleen de aankoopprijs maar ook het tanken van waterstof kost 1,5 tot 2 keer zoveel als het opladen van een elektrische auto. Waterstof is misschien geen fossiele brandstof, maar het blijft wel een dure brandstof. Het opwekken van elektriciteit daarentegen kan nog voordeliger indien de consument thuis zonnepanelen heeft. Hierdoor zal elektriciteit niet snel stijgen in prijs en zal elektrisch opladen, op korte termijn, goedkoper blijven dan waterstof tanken. Daarnaast hebben de onderdelen die in een waterstofauto zitten meer onderhoud nodig, waardoor de onderhoudskosten van een waterstofauto ook hoger liggen.

Is een waterstofauto kopen dus de toekomst? Op dit moment is de elektrische auto de populairste keuze onder de elektrische voertuigen. Echter leven we in een tijd waarin technologie een enorme rol speelt en snel vooruitgang boekt.



12.02 WATERSTOF TANKEN IN BELGIË?

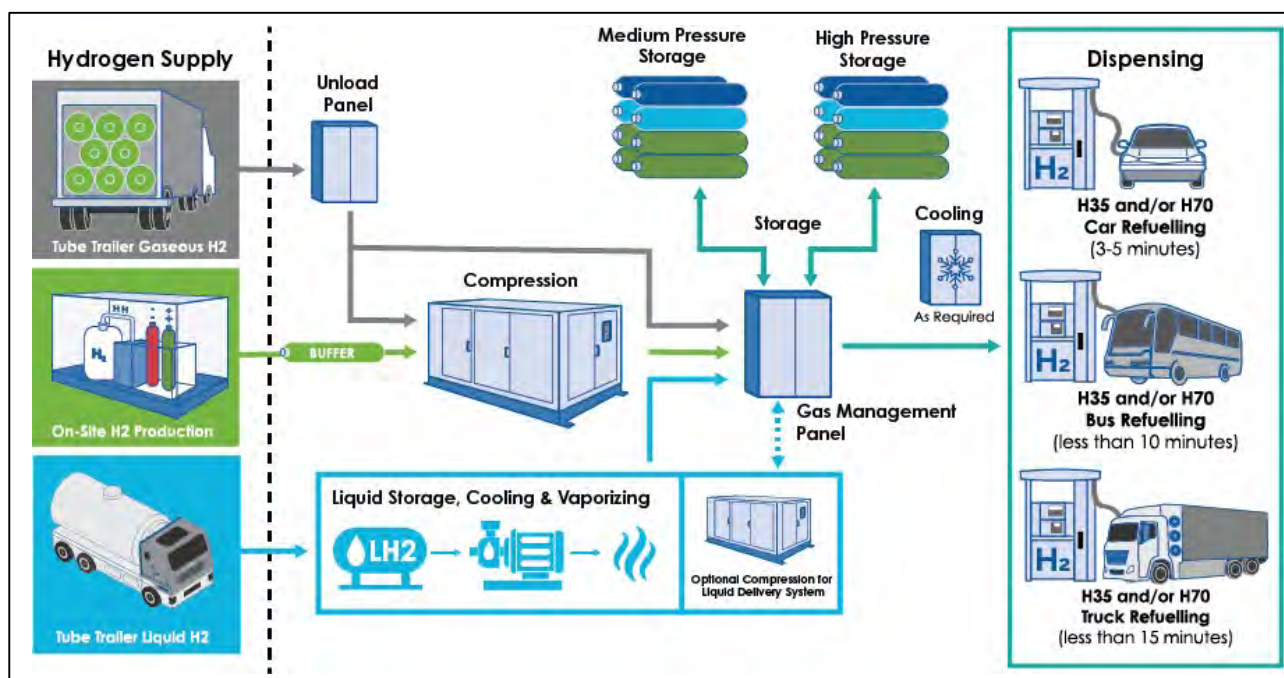
Anders dan bij een elektrische auto vul je een auto die op waterstof rijdt op de ouderwetse manier, gewoon door middel van tanken. Het tanken van een auto op waterstof duurt ongeveer even lang als het tanken van een benzineauto en gaat dus een stuk sneller dan het opladen van een accu van een batterij – elektrische auto.

De brandstof komt echter niet alleen maar met voordelen. Er zijn op dit moment namelijk nog maar weinig plekken waar je een waterstofauto in België of Nederland kunt tanken. Mede hierdoor is het aantal auto's op waterstof nog vrij beperkt en moet men goed plannen om te voorkomen dat men bij een lange rit met een lege tank langs de weg komt te staan!

In het kader van het H2Benelux project heeft WaterstofNet onderstaande kaart opgesteld met de status van waterstoftankstations in de Benelux.



De internationale benaming voor een tankstation op waterstof is **Hydrogen Refueling Station** of **HRS**. Er is niet veel verschil tussen een traditioneel tankstation voor diesel en benzine en een HRS: u rijdt naar de pomp, sluit de nozzle aan op het voertuig en start het tankproces. Sommige processen op de achtergrond verlopen echter wel iets anders bij een waterstoftankstation.



Schematische voorstelling van een waterstoftankstation of HRS.

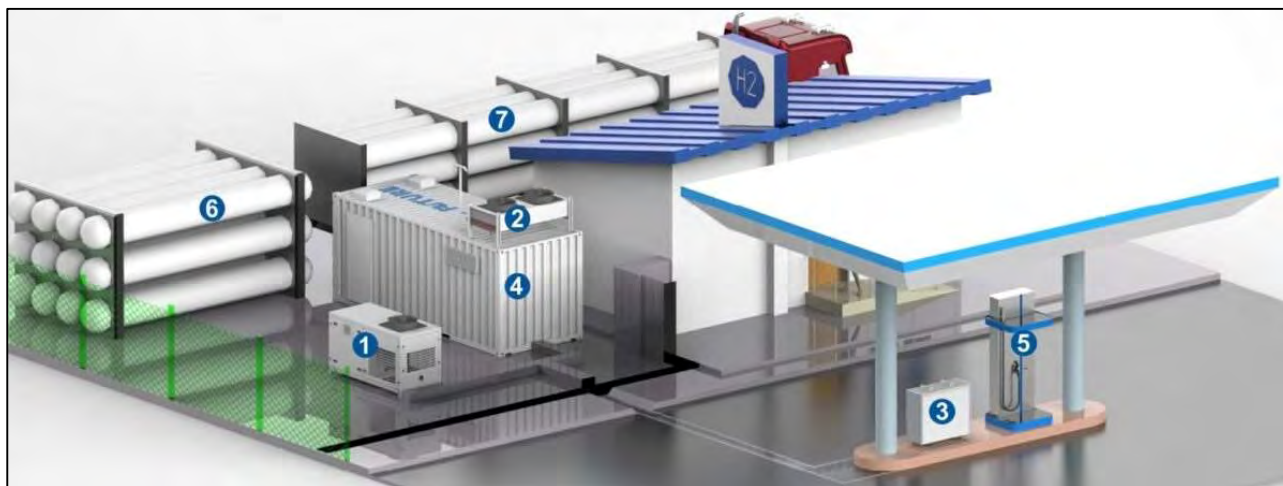
Het begint al bij de levering van de alternatieve energiedrager. Gewoonlijk wordt waterstof ook per vrachtwagen naar het tankstation vervoerd. Er zijn ook uitzonderingen waarbij men op de site zelf waterstof produceert. Wegens de explosieve atmosfeer wordt de brandstof opgeslagen in **een lagedruktank**.

De grootste technische uitdaging van een waterstoftankstation ligt bij het tankproces. In de lagedruktank waarin de waterstof wordt opgeslagen, heeft de waterstof een druk van 20 tot 200 bar. Bij het tanken, moet deze druk veelvoudig worden vergroot, afhankelijk van het voertuig. Dit gebeurt in **de hogedrukcompressor**.

Zodra de waterstof tot de juiste druk is samengeperst, kan er worden getankt aan de pomp met **een nozzle**. Om ervoor te zorgen dat het tanken veilig verloopt en dat er geen waterstof weglekt, controleren magneetveldsensoren of de nozzle goed op de tank van het voertuig zit. Deze sensoren detecteren ook eventuele trillingen (= onvoorziene botsing,...) en kan het tankproces in geval van nood meteen stopzetten.



*Bekijk de onderstaande opstelling van een HRS met verschillende onderdelen.
Plaats de juiste Engelse benaming bij de verschillende componenten.*



	Cooling system
	Air heater
	Container with compressor
	Aluminium block with the H ₂ heat exchanger

	Dispenser with nozzle.
	Hydrogen Supply
	Middle and high pressure H ₂ tanks



*Bij sommige processen ontstaan er hoge temperaturen en gaat men chillers gebruiken.
Op welke plaats gaat men deze componenten inpassen bij een waterstoftankstation?
Wat is het doel van deze component?*

12.03 AUTOBUSSEN OP WATERSTOF?

Bussen zijn één van de meest belangrijke vormen van vervoer in België. Dagelijks gebruiken ruim 1 miljoen mensen het openbaar vervoer om naar school, werk of andere bestemmingen te gaan. De bus is dan ook een populaire keuze omdat je hierdoor relatief eenvoudig en voordelig van A naar B kunt reizen. Omdat men milieubewust is kijkt men dan ook naar groenere alternatieven zoals de waterstof bus.

Het waterstofgas wordt opgeslagen in de tank van de bus, wat gemeten wordt in kilo's in plaats van liter. De meeste waterstofbussen hebben een tank van rond de 25 kilo, waarmee men ongeveer 300 kilometer onafgebroken mee kan rijden. Daarnaast zit in elke waterstof bus een brandstofcel (of waterstof verbrandingsmotor) wat die het waterstofgas omzet naar elektriciteit. Elke waterstof bus heeft dus naast een waterstof tank, ook een batterij.

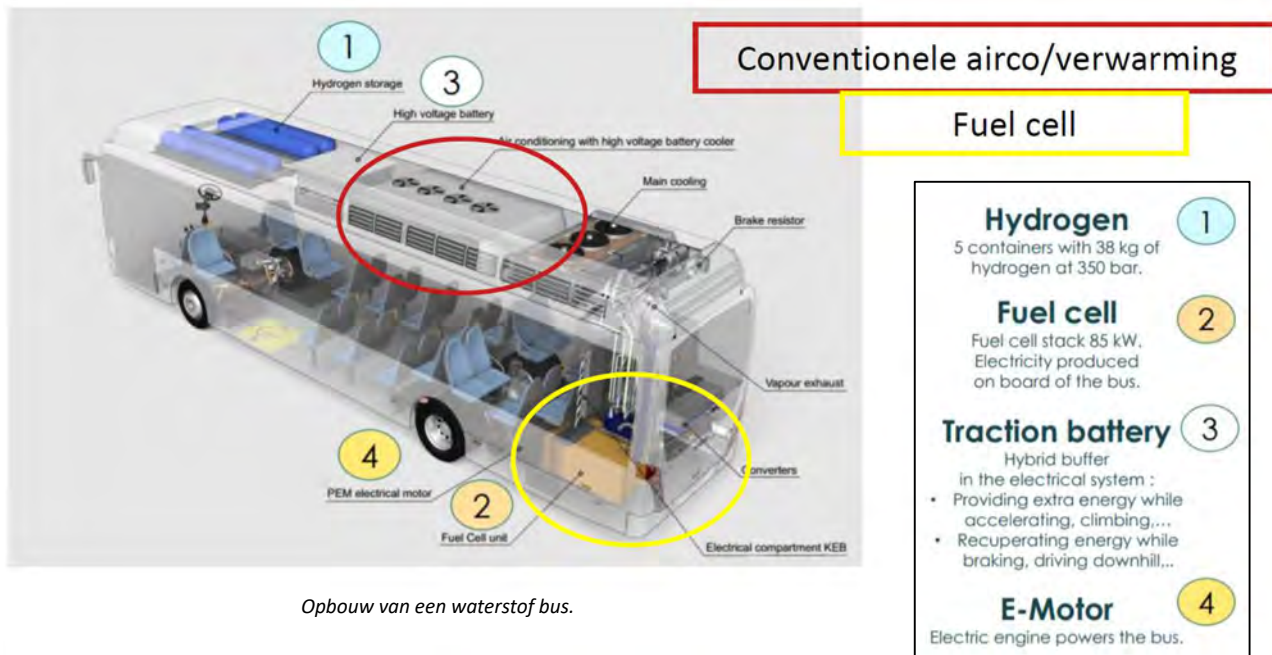


Het grote nadeel aan het rijden met batterijen is het gewicht. In een elektrische auto is dit nog geen groot probleem aangezien deze voertuigen niet zo zwaar zijn, maar het is wel een probleem wanneer je in een elektrische bus of zelfs vrachtwagen wilt rijden. Deze voertuigen hebben dusdanig veel batterijen nodig om ver te kunnen rijden dat ze te zwaar worden, waardoor elke batterij erg veel elektriciteit moet gebruiken om vooruit te komen.

Ook met autobussen moet men een keuze maken om het gewicht te verminderen: minder accu's of minder passagiers meenemen. Beide oplossingen zijn niet optimaal: minder batterijen = minder afstand afleggen. Minder passagiers is zeker geen oplossing? Om deze redenen wordt er gekeken naar bussen die op waterstof rijden.

Een waterstof bus kan namelijk met één tankbeurt van ongeveer 10 minuten, ruim 300 kilometer rijden. Elektrische bussen moeten vaak uren opladen om 150 kilometer te rijden. Dit is logistiek vervelend: bus staat stil en passagiers moeten wachten. Daarnaast gaan de accu's van elektrische bussen ook minder lang mee in de winter, wat niet het geval is bij waterstof bussen.

Waterstof bussen kosten bij aankoop ruim 600 000 euro. Wanneer je dit vergelijkt met diesalbussen van 225 000 euro en elektrische bussen van 450 000 euro, is dit een flink bedrag. Dit komt onder anderen omdat de brandstofcel van een waterstof bus al ruim 130 000 euro kost. Dit is ook bijna precies het verschil tussen de kosten van een elektrische bus en waterstof bus. Verder lijken de bussen namelijk erg veel op elkaar.



De kosten voor waterstof tanken zijn ook nu nog redelijk hoog. Eén kilo waterstof tanken kost momenteel ongeveer 12,10 euro inclusief BTW. Een volle tank kost dus ongeveer 250 euro waarop een waterstof bus 300 kilometer kan rijden. Omgerekend is dit 83 cent per kilometer. Voor een elektrische bus is het ongeveer 10 cent per kilometer. Dit betekent dat een waterstof bus nu nog 8x duurder in verbruik is dan het elektrische alternatief.

Een stadsbus op diesel rijdt ongeveer 3 kilometer per liter diesel. Een liter diesel kost momenteel ongeveer 1,90 euro. Wanneer we dit omrekenen naar een rit van 300 kilometer, kost een diesel bus per kilometer ongeveer 0,63 cent. Een elektrische bus is qua kosten per kilometer dus ook een stuk goedkoper dan een diesel bus.

De onderhoudskosten tussen elektrische en waterstofbussen zijn bijna identiek. De brandstofcel van de waterstof bus gaat ongeveer 1 miljoen kilometer mee wat ongeveer 130 000 euro aan onderhoudskosten bedraagt. Als we dit gaan vergelijken met diesel en elektrische bussen, komen we op het volgende uit:

	Bus op diesel	Elektrische bus	Waterstof bus
Onderhoudskosten per kilometer in euro	0,20 euro	0,10 euro	0,13 euro

We merken dat de onderhoudskosten vergelijkbaar zijn met een elektrische bus. Als we hier ook aankoopprijs en tankkosten bijtellen, kunnen we besluiten dat een elektrische bus nog steeds voordeliger is dan een waterstof bus.

Kort samengevat zijn er voordelen maar ook nadelen.

Voordelen van bussen op waterstof:

- Zoals eerder verteld is het tanken van waterstof een stuk **sneller** dan het opladen van een elektrische bus. Tanken duurt ongeveer 10 minuten vergeleken met enkele uren. Daarnaast kunnen waterstof bussen ongeveer de **dubbele** afstand afleggen.
- Bussen die op **groene waterstof** rijden, stoten geen CO₂ uit, hierdoor is een waterstof bus een beter alternatief dan diesel bussen met betrekking tot het milieu.
- Een waterstof bus heeft ongeveer dezelfde eigenschappen als een elektrische bus. Hierdoor zal er geen geluids- of geuroverlast plaatsvinden, wat voornamelijk in de steden **positief** is.
- Omdat waterstof bussen een stuk **lichter** zijn dan elektrische bussen, zullen ze de wegen minder belasten dan elektrische bussen. Daarnaast kun je hierdoor een stuk langer rijden op één tank vergeleken met de energie die je nodig hebt voor alle accu's in een elektrische bus.
- Technologieën zijn zo ver ontwikkeld dat waterstofgas **veilig** opgeslagen wordt in speciale tanks.

Nadelen van bussen op waterstof:

- Aangezien waterstof bussen in de aankoop erg duur zijn, worden deze bussen flink **gesubsidieerd** door de EU. Omdat de ontwikkelingen in deze branche hier erg afhankelijk van zijn, is er een groot risico dat dit stagneert wanneer de subsidies stoppen.