



HYDROGEN

ENERGY FOR THE FUTURE?

NAAM:

INHOUDSTAFEL

01	Het klimaat verandert dagelijks!	4
01.01	Wat is het broeikaseffect?	4
01.02	Bereken uw ecologische voetafdruk.	7
02	Techniek staat niet stil!	8
03	Elektriciteit maakt ons leven eenvoudiger	9
03.01	Is een atoom het kleinste deeltje?	10
03.02	Wat is een stroom?	12
04	Elektriciteit opwekken	13
04.01	Hoe werkt een kerncentrale?	14
04.02	Hoe werkt een windmolen?	15
04.03	Wat is een zonnepaneel?	16
05	Waterstof: toekomst?	17
05.01	Wat is waterstof?	21
05.02	De eigenschappen van waterstof?	24
06	Productie van waterstof	28
06.01	Elektrolyse	30
06.02	Stoom methaan hervorming	38
06.03	Kolenvergassing	40
06.04	Biomassa vergassing	40
06.05	Thermochemische splitsing	41
06.06	Waterstof als bijproduct	42
07	De verschillende productiemethodes vergelijken	43
07.01	Impact op de omgeving	44
07.02	Energie – efficiëntie	45
07.03	Economische levensvatbaarheid	45
07.04	Technologische maturiteit	46
08	Opslag van waterstof	47
09	Transport van waterstof	50
09.01	Gecomprimeerde gasflessen	50
09.02	Pijpleidingen	52
09.03	Mengen met aardgas	53
10	Waterstof in brandstofcellen	54
10.01	Brandstofcellen: basis theorie	54
10.02	Wat is een bipolaire plaat?	56
10.03	Gas toevoer en koeling	58
10.04	Welke types van brandstofcellen zijn er?	59
10.05	BOP = Balance of Plant	62
10.06	Toekomst?	64
11	Waterstof als brandstof?	65
11.01	Het verbranden van waterstof	65
11.02	De verbrandingsmotor	66
11.03	De waterstofturbine	69
12	Wat is automotive?	71
12.01	Waarom autorijden op waterstof?	72
12.02	Waterstof tanken in België?	74
12.03	Autobussen op waterstof?	76
12.04	Vrachtwagens op waterstof?	78
13	Waterstof in de scheepsvaart	81
14	Waterstof in de luchtvaart	83
15	Waterstof in de industrie	86
15.01	Productie van ammoniak	88
15.02	Productie van methanol	89
15.03	Staalproductie	92

16	Is waterstof veilig?	93
16.01	Herkennen van waterstofsyste ...	94
16.02	Gevaren van waterstof?	96
16.03	Enkele maatregelen bij waterstof	97
16.04	Enkele incidenten	99
	Bronvermelding	101

In de cursus zijn enkele terugkomende symbolen terug te vinden:



Algemene aankondiging van een opdracht



Opzoekwerk op het internet



Opzoekwerk



Via een QR – code naar instructiefilmpje



Rekenopdracht

GRIT

Interreg
North Sea



Co-funded by
the European Union

01 HET KLIMAAT VERANDERT DAGELIJKS!



Landbouwgrond voor voedsel, stroom en gas voor huizen, brandstof om van A naar B te komen: we hebben meer ruimte en energie nodig dan de aarde aankan. Dit heeft **een klimaatsverandering** tot gevolg.

De aarde warmt op en hierdoor verandert ons klimaat. Dit is geen nieuw fenomeen want er waren eerder ijstijden en warme periodes met gevolgen voor het leven op aarde.

Het is nu wereldwijd gemiddeld ruim 1 graad warmer dan in de periode 1850 - 1900. De gevolgen voor de natuur en de nadelen van klimaatverandering zijn al zichtbaar. Bij verdere opwarming zullen de gevolgen ernstiger worden.

Klimaatonderzoekers wereldwijd komen steeds tot dezelfde conclusie: de mens is verantwoordelijk voor de opwarming van de aarde. Door menselijke activiteiten komen broeikasgassen vrij. Natuurlijke processen - zoals verandering van de activiteit van de zon en vulkaanuitbarstingen - spelen nauwelijks een rol in de opwarming van de aarde.

Hoe warmer het wordt, hoe rampzaliger de gevolgen. Iedere 0,1 graden telt voor de toekomst. De huidige opwarming van ruim 1 graad is niet meer terug te draaien. Maar opwarming boven de 1,5 of 2 graden is nog wel te voorkomen. Er is dus hoop, want als het lukt om de verdere opwarming te begrenzen zullen de nadelige gevolgen minder groot worden.

Voor maximaal 2 graden zou de wereldwijde CO₂-uitstoot snel moeten gaan dalen en ruim voor het einde van deze eeuw nul moeten zijn, voor maximaal 1,5 graden al ongeveer halverwege deze eeuw naar nul. Bovendien is het nodig CO₂ uit de atmosfeer te gaan halen en vast te leggen. Ook de uitstoot van andere broeikasgassen dan CO₂ moet sterk worden ingeperkt. Er is snelle en drastische actie nodig van overheden, bedrijven en consumenten.



*Meer informatie over klimaatsverandering?
Volg de link en ontdek een voorstelling van paleoloog Mei Nelissen werkzaam
op de universiteit van Nederland*



01.01 WAT IS HET BROEIKASEFFECT?

Van nature komen er **broeikasgassen** zoals CO₂ voor in de atmosfeer. Dat is maar goed ook, want anders zou het op aarde veel kouder zijn. Broeikasgassen zorgen er namelijk voor dat de warmte van de zon wordt vastgehouden.

Zonder broeikasgassen zou het hier gemiddeld -18 graden Celsius zijn. Door de broeikasgassen is het gemiddeld 15 graden Celsius waardoor het leven op aarde mogelijk is.

De laatste 250 jaar zijn er veel meer broeikasgassen in de atmosfeer gekomen. Die houden extra warmte vast, waardoor sinds 140 jaar de temperatuur stijgt: het versterkte broeikaseffect'.

In de volksmond spreekt men over "het broeikaseffect" maar eigenlijk bedoelt men "het extra broeikaseffect".

De mens is de belangrijkste oorzaak van de opwarming van de aarde. Sinds de industriële revolutie stoten we steeds meer broeikasgassen uit.

We gebruiken fossiele brandstoffen in fabrieken, energiecentrales,... om onze huizen te verwarmen en voor transport. Daarnaast kappen we steeds meer bossen en zorgt een stijgende veestapel waardoor er ook extra CO₂ vrijkomt.

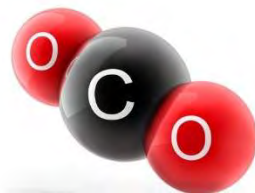
De belangrijkste broeikasgassen zijn: koolstofdioxide, methaan, lachgas en waterdamp.



CO₂ is de afkorting van **koolstofdioxide** en versterkt bijna 50% van de extra broeikassen. Een andere benaming is koolzuurgas. De twee belangrijkste bronnen van CO₂ zijn fossiele brandstoffen en verandering van landgebruik.

In vroege geologische tijdperken is koolstofdioxide vastgelegd door bomen en andere organismen. Daaruit zijn uiteindelijk fossiele brandstoffen (aardolie, steenkolen, aardgas) gevormd. Bij het verbranden van deze fossiele brandstoffen komt de CO₂ weer vrij.

Naast de uitstoot door fossiele brandstoffen zorgt verandering van landgebruik ook voor CO₂ emissies. Er vindt ontbossing plaats om bijvoorbeeld ruimte te maken voor landbouwgrond. Hierbij komt de CO₂ die in het hout is vastgelegd in de lucht terecht. Ook veengronden kunnen CO₂ laten ontsnappen wanneer deze droogvallen doordat ze grote hoeveelheden plantenresten bevatten, die omgezet kunnen worden in CO₂ als het waterpeil te ver zakt.



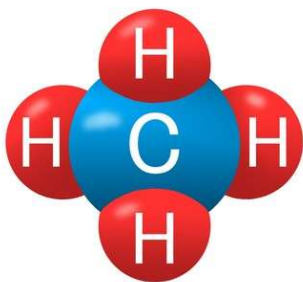
*Volg de link en ontdek verandering van de CO₂ – concentratie in 2021.
De kleuren zijn de maat voor de concentratie: rood = hoog en blauw = laag.
Bespreek de onderstaande case.*



Bij de animatie is de invloed van weersverandering en de langzame seizoenencycclus van plantengroei duidelijk merkbaar. Wat zien we tijdens de zomer en de winter? Welke evolutie zien we rond industriële gebieden?



*Een Waals kalkbedrijf heeft een proefproject opgestart om een deel van CO₂ door te geven aan een fabrikant van bouwstenen.
Bekijk de reportage van VRT via de link.*



Het kleurloze **methaan** met de chemische benaming CH₄ komt vooral vrij bij de veeteelt.

Koeien, schapen en geiten produceren methaan bij het verteren van voedsel. Die methaan komt via hun adem, boeren en scheten in de lucht. Verder komt er methaan vrij bij het verbouwen van rijst en uit afvalstortplaatsen.

Methaan is een sterk broeikasgas: 1 kilo methaan heeft hetzelfde effect als 28 kilo CO₂.

Lachgas is in de chemische wereld bekend onder de chemische benaming N_2O of distikstofoxide. Het komt vooral vrij uit grond die bemest is met kunstmest of dierlijke mest. Lachgas is een zeer sterk broeikasgas: 1 kilo lachgas heeft hetzelfde effect als 265 kilo CO_2 .

Waterdamp is eveneens een broeikasgas. Door de opwarming van de aarde wordt de lucht warmer, en warme lucht kan meer waterdamp bevatten. Omdat waterdamp een broeikasgas is, zorgt die extra waterdamp in de lucht voor meer opwarming, waardoor de lucht nog meer waterdamp kan bevatten, waardoor de aarde nog verder opwarmt enzovoort. Zo versterkt het broeikaseffect van waterdamp zichzelf. Mensen kunnen niets doen of laten om de hoeveelheid waterdamp in de lucht te sturen.

Fluorgassen zijn de sterkste broeikasgassen op aarde: ze kunnen duizenden keren zoveel opwarming veroorzaken als CO_2 . Bekende fluorgassen zijn HFK's en PFK's die kunnen voorkomen in onder andere spuitbussen, airco's en koelkasten. Het krachtigste fluorgas is SF_6 , dat wordt gebruikt als isolatiegas in het elektriciteitsnet. SF_6 veroorzaakt 22.800 keer zoveel opwarming als CO_2 .

Vorige eeuw zijn afspraken gemaakt om te voorkomen dat dit soort sterke broeikasgassen vrijkomen. Toch eindigen fluorgassen nog in de lucht, bijvoorbeeld als koelkasten en airco's niet worden vervangen door energiezuinige. Om te voorkomen dat fluorgassen weglekken ontwikkelen overheden steeds strengere regels.

Wat kunnen we op korte termijn zelf doen voor het klimaat? **Minder CO_2 uitstoten!** De onderstaande fiches laten de klimaatimpact zien die men in eigen handen of persoonlijke leefwijze heeft.





01.02 BEREKEN UW ECOLOGISCHE VOETAFDruk

Heb jij veel impact op de aarde? We gebruiken gemiddeld veel meer dan eigenlijk mogelijk is waardoor een eerlijke verdeling ondenkbaar is.

Door onze ecologische voetafdruk te berekenen zien we hoeveel hectare van de aarde men persoonlijke gebruikt.

Bij een eerlijke verdeling zou er per persoon 1,8 hectare of 3 voetbalvelden aan ruimte beschikbaar zijn op onze aardbol.

Wereldwijd gebruiken we nu echter gemiddeld 2,7 hectare per persoon. Als Belg ligt dit cijfer nog hoger = ongeveer 4 hectare... Op deze manier raakt de aarde langzaam uitgeput.

Het exact berekenen van de ecologische voetafdruk is vrij ingewikkeld en is afhankelijk van verschillende factoren zoals ons voedsel, de levensstijl, woonplaats,...

Op het internet zijn er verschillende testen terug te vinden om een schatting te krijgen van uw persoonlijke ecologische voetafdruk. Hiernaast staan enkele tips om uw resultaat alvast te verkleinen...



Hoe duurzaam is uw lifestyle?
Volg de link en doe de test opgesteld door het World Wide Fund for Nature.



Geschrokken van het resultaat? Hoe denk je op korte termijn uw voetafdruk te verkleinen?

Vroeger leefden de mensen anders dan nu. Tegenwoordig heeft men andere behoeften en eisen: sneller, eenvoudiger, krachtiger, beter voor het milieu,... Dit merkt men ook bij de evolutie van vervoersmiddelen, machines,... Alles werkt met **een technisch systeem** waarbij verschillende onderdelen samenwerken en een essentiële taak zullen vervullen.

We zien dit ook bij de ontwikkeling van de fiets in de afgelopen 200 jaar. In 1817 werd door baron Karl von Drais **een loopfiets** ontworpen. Vanaf 1860 kwam de ontwikkeling van een fiets met **pedalen** en **een ronddraaiende trapas** in het voorwiel in een stroomversnelling. Later werd **de fietsketting** geïntroduceerd en ging men de modellen aanpassen naargelang de omstandigheden: stadsfietsen, sportfietsen,...

Door gebruik te maken van versnellingsapparaten is de fiets tegenwoordig geschikt voor elk terrein. En als men niet beschikt over de juiste versnelling of conditie is er nog een extra hulpmiddel mogelijk bij het fietsen: **elektriciteit**.

Dit hulpmiddel zien we niet alleen bij de fiets maar ook bij de meeste technische systemen rondom ons.



De loopfiets van Karl von Drais



Meer informatie over de montage van een fiets? Volg de link!



Een technisch systeem bestaat uit **3 onderdelen**:

INVOER = INPUT	VERWERKING	UITVOER = OUTPUT
-----------------------	-------------------	-------------------------

Dit systeem noemen we ook **een IVU – proces**.

Om een technisch systeem te laten werken heb je ook informatie, materie en energie nodig. Als energiebron gebruikt men meestal **elektriciteit**. Deze energie zal men omzetten in **een andere vorm**. De werking van een koffieapparaat maakt dit duidelijker waarbij men **een thermische energie** zal opwekken.

INPUT	VERWERKING	OUTPUT
Energie = elektriciteit	Elektriciteit omzetten in warmte	Warmte
	Water koken	Warmte voor de koffie
	Koffie warm houden	Warmte voor de warmhoudplaat

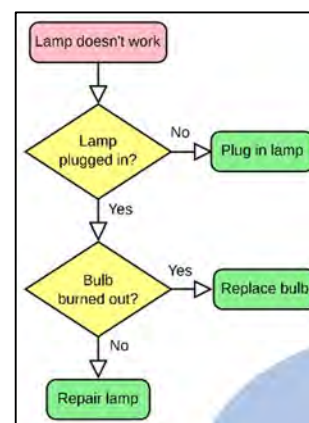
Elektriciteit kan men ook omzetten naar **bewegingsenergie** zoals bij een boormachine, pomp,... Hou er wel rekening mee dat elektriciteit een secundaire energiebron is. Men heeft een primaire energiebron nodig om een elektriciteit op te wekken.

De werking van een technisch systeem kan men in **een flowchart** lezen. Dit is een schema waarin alle onderdelen van het proces in **de juiste volgorde** zijn geplaatst met tussenliggende pijlen.

Afgeronde rechthoeken geven het begin en het einde aan. In de rechthoeken staan de verschillende handelingen.

Bij de **ruitvormen** worden voorwaarden ingevuld waarbij de antwoorden ja of neen kunnen zijn.

Bij het voorbeeld zien we de flowchart van een defecte lamp.





Een elektrische schroefboormachine op accu werkt niet.
Teken flowchart met de verschillende handelingen om het toestel correct te laten werken.
Gebruik de juiste vormen.



03 ELEKTRICITEIT MAAKT ONS LEVEN EENVOUDIGER

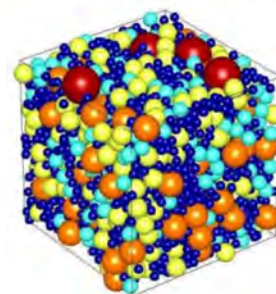
Als men het begrip elektriciteit wil begrijpen moeten we naar de materialen rondom ons gaan kijken. Een materiaal is een grondstof die nodig is om een product te maken zoals een plaat aluminium, een rol koperdraad, een gasfles,... Al deze materialen bestaan uit **een materie**. En dat zien we overal rondom ons!

Enkele voorbeelden: een tafel, een waterglas, het water dat men drinkt, een wolk, een steeksleutel,... Alles wat een massa heeft en ruimte nodig heeft is een materie.

Ook de lucht die men inademt is materie. Men kijkt er wel dwars doorheen en lijkt niks te wegen... Toch is het niet zo. Alles rondom ons is opgebouwd uit heel kleine deeltjes die een heel kleine massa hebben. Deze deeltjes noemt men **atomen**.

Deze atomen gaan op een speciale manier bij elkaar zitten waardoor er een structuur ontstaat: de moleculen. Mensen die dit bestuderen noemt men scheikundigen. Ze bekijken de eigenschappen van de stoffen, hoe ze reageren met andere stoffen,... ze gaan dat daarna in verschillende wetten verwerken die men o.a. zal gebruiken in de nijverheid.

In het woord scheikunde zit ook het woord scheiden. Een voorbeeld is koffie met melk en suiker. We zouden dit kunnen scheiden in verschillende stoffen zoals water, melk, koffiëpoeder en suiker.

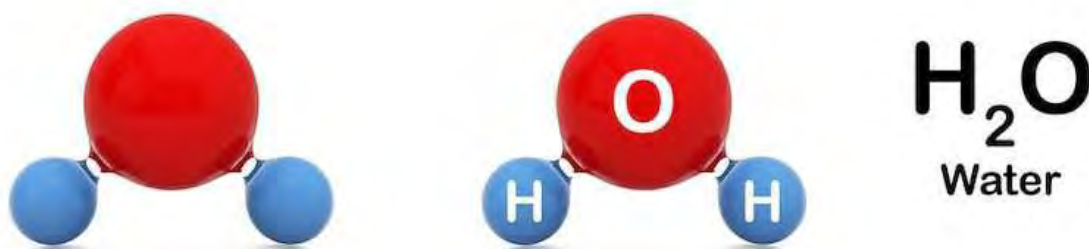


Een scheikundige gaat nog een stap verder want die gaat het water verder kunnen splitsen! Water bestaat uit 2 chemische elementen: waterstofatomen en zuurstofatomen. Deze elementen kan men niet verder splitsen en zal men dan ook een eigen letter geven die verwijst naar de Latijnse naam.

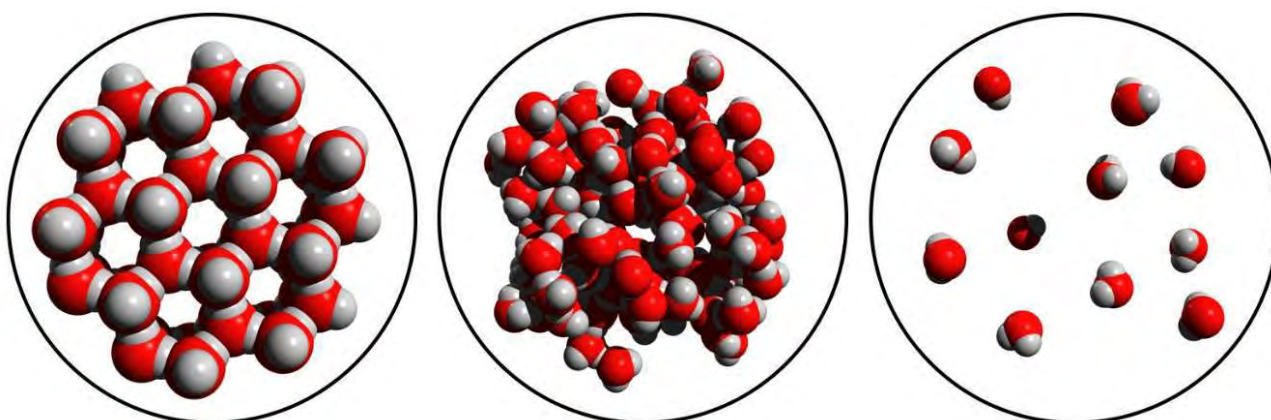
ATOOM	LETTER	LATIJNSE NAAM
Waterstof		
Zuurstof		

Een scheikundige of chemicus kan ook verschillende stoffen samenvoegen om tot een nieuwe materie te komen: synthetiseren. Meestal zal men in laboratorium werken waar bij men een gemeenschappelijke chemische taal gebruikt. De chemische benaming voor water is H_2O .

Scheikundigen hebben ontdekt dat water bestaat uit 2 atomen waterstof en 1 atoom zuurstof.



Water kan ook in verschillende vormen voorkomen: vloeibaar, gasvormig of in een vaste toestand. De structuur zal telkens verschillend zijn.



VLOEIBAAR	VAST	GASVORMIG
-----------	------	-----------

03.01 IS EEN ATOOM HET KLEINSTE DEELTJE?

Vroeger was men rijk als men veel **goud** had. Men ging dat zoeken in de natuur en als men dat gevonden had sprak men over **een goudklomp**. Zo'n klomp kan men verder verdelen in **kleinere stukjes** waarbij de eigenschappen steeds hetzelfde zullen blijven. Goud is dan ook een atoom met **een chemische benaming**.

ATOOM	LETTER	LATIJNSE NAAM
Goud	Au	aurum

Een atoom is het allerkleinste deeltje van een chemisch element dat nog steeds alle eigenschappen van dat element blijft behouden. Het zijn dan ook de bouwstenen van alles wat op **aarde** is terug te vinden.

Atomen zijn zo klein (= ongeveer 100 picometer) dat men ze enkel kan bekijken met **een speciale microscoop!** Als er miljarden atomen bij elkaar zitten worden ze pas zichtbaar. In de natuur komen 90 verschillende atomen of chemische elementen voor.

Daarnaast hebben scheikundigen in een laboratorium er nog meer dan 25 andere soorten atomen ontwikkeld. Elke dag werkt men aan het ontdekken en samenstellen van nieuwe elementen.

Ondertussen heeft men ook ontdekt dat atomen verder kunnen **gesplitst** worden in kleinere deeltjes waarvan sommige een elektrische lading bezitten:

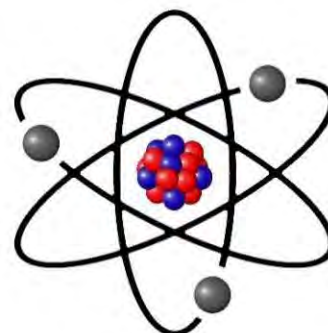


PROTONEN	NEUTRONEN	ELEKTRONEN
Positieve elektrische lading	Geen lading	Negatieve lading

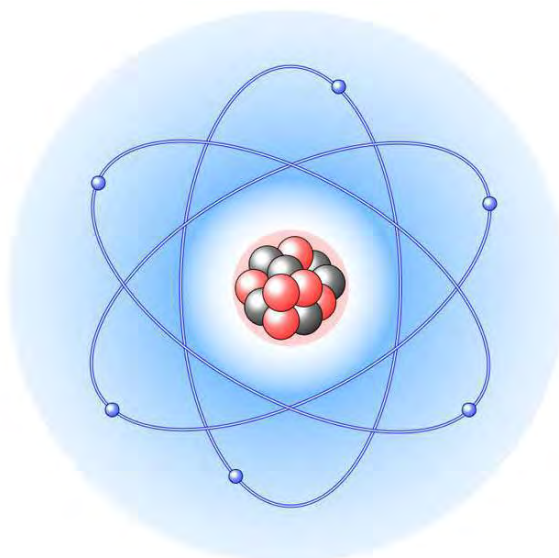
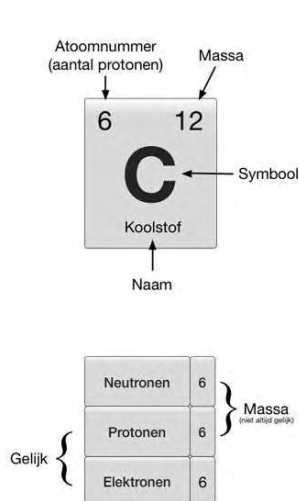
Na een verdere splitsing gaat het atoom wel zijn eigenschappen verliezen.

Een atoom bestaat uit **een kern** waarin **de protonen** en **neutronen** dicht op elkaar zitten. Ieder atoom heeft een nummer of getal: dit zijn het aantal protonen in de kern. We noemen dit **het atoomnummer** of **atoomgetal**. Als we het aantal protonen en neutronen optellen krijgen we **de atoommassa**.

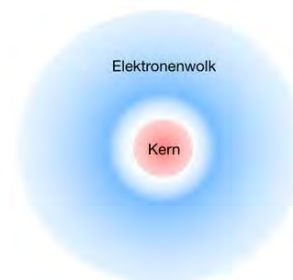
Rondom de kern vliegen er **elektronen** rond volgens **een bepaalde baan** of **elektronenschil**. We kunnen dit vergelijken met de planeten die rondom de zon cirkelen. Het aantal elektronen en protonen zal **gelijk** zijn waardoor de lading van een atoom nul zal zijn.



Al die elementen met hun atoomgetal werden door een Russische scheikundige **Dmitri Mendeljev** in een tabel geplaatst. We spreken dan over **de tabel van Mendeljev**.



	Naam	Massa	Lading
	Neutron	1 u	
	Proton	1 u	+
	Elektron		-



ATOOM	LETTER	ATOOMGETAL	LATIJNSE NAAM
Koolstof			



Zoek op het internet naar de tabel van Mendeljev en vul de informatie van de verschillende **chemische elementen** verder aan.
Let op: er is een verschil tussen **hoofdletters** en **kleine letters**!

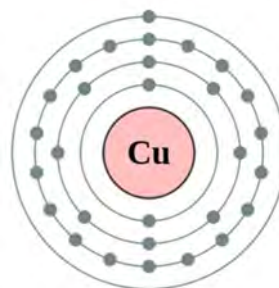
ATOOM	LETTER	GETAL
Stikstof		
Magnesium		
Chloor		
Vanadium		
Ijzer		
Radium		
Platina		
		29
	Pu	

ATOOM	LETTER	GETAL
Natrium		
Aluminium		
	Ca	
Chroom		
Nikkel		
Zink		
	Ag	
Wolfram		
Kwik		

03.02 WAT IS EEN STROOM?

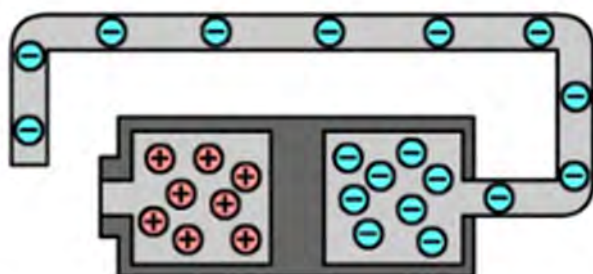
Omdat elektronen door een elektrische draad stromen zoals water bij een tuinslang spreekt men vaak over **stroom** in plaats van elektriciteit. Een ander gebruikt woord is **spanning**. Deze 2 woorden hebben niet dezelfde betekenis of functie: op een stopcontact staat spanning die ervoor zorgt dat er een stroom kan lopen door een verbruiker.

Om het begrip stroom te begrijpen starten we bij de **vrije elektronen** die niet vast zitten in een atoom of kunnen loskomen. Bij een metaal zijn de atomen in **een rooster** geschikt waarbij er **voldoende ruimte** is om tussen te bewegen. Een materiaal dat vaak gebruikt wordt bij elektrische leidingen is **koper**. Elk koperatoom heeft 1 vrij elektron met **een negatieve lading**.

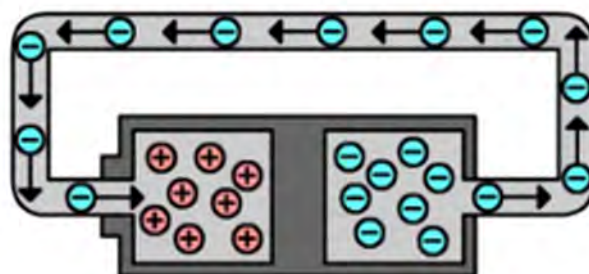


Het bewegen van lading noemen we **elektriciteit**. Om elektriciteit op te wekken heeft men **een spanningsbron** nodig. Dit is een voorwerp waarvan 1 onderdeel een overschot heeft aan negatieve ladingen = **de minpool**. Het andere onderdeel heeft een overschot aan positieve ladingen = **de pluspool**. Een batterij, een stopcontact en dynamo zijn spanningsbronnen.

Als men de 2 polen met elkaar gaat verbinden zullen de negatieve ladingen naar de pluspool stromen. De positieve ladingen bewegen niet omdat deze vastzitten in de atoomkernen. Men spreekt dan van **een gesloten stroomkring**.

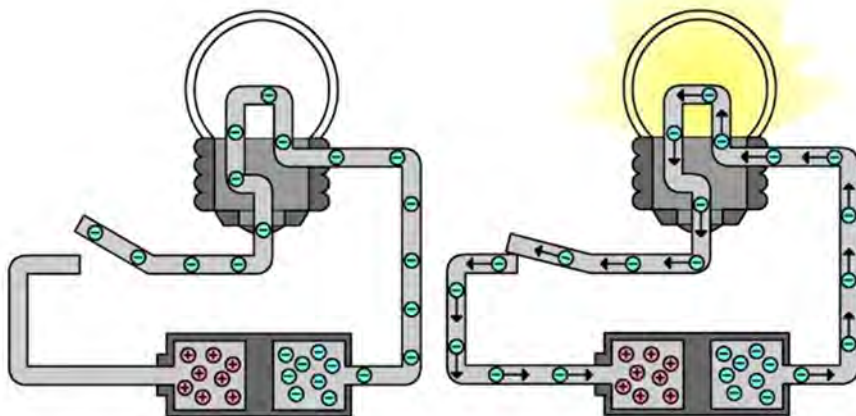


Open stroomkring



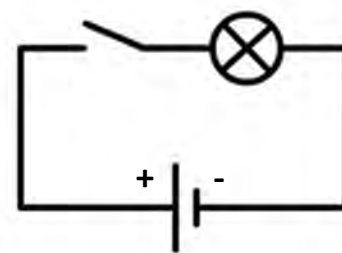
Gesloten stroomkring

Bij de stroomkring kan men ook **een schakelaar** en **een lamp** toevoegen. Een schakelaar is niet meer dan een klep waarmee de kring kan gesloten of geopend worden. Deze onderdelen zal men schematisch voorstellen met genormaliseerde symbolen.



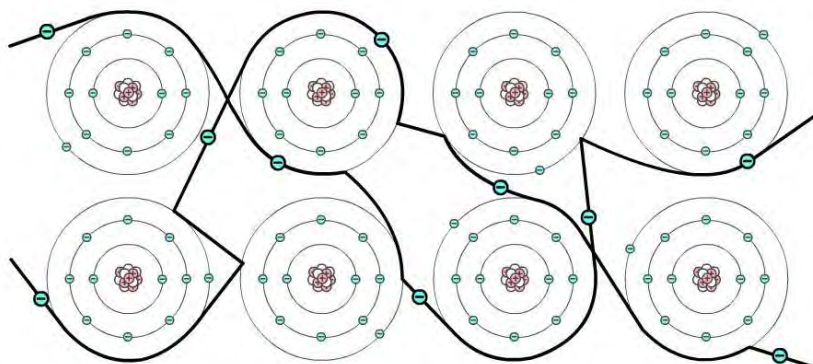
Open stroomkring

Gesloten stroomkring



Eenvoudige schematische voorstelling

Naast de stroom van de elektronen (= werkelijke stroomzin) spreekt men ook over **een conventionele stroomzin** buiten de spanningsbron. Deze loopt **van plus naar min!** Als de ladingen door een schakeling stromen, **botsen** ze voortdurend tegen de atomen waaruit de bedrading bestaat. In een gloeidraad van een lamp zijn deze botsingen voldoende om de draad te verhitten zodanig dat deze gaat gloeien en licht begint te geven = gloeilamp.



Schematische voorstelling van elektronen die botsen bij een elektrische stroom.



Gloeilamp

De moeilijkheid waarmee een materiaal ladingen doorlaat noemt men de weerstand. **Geleiders** zijn materialen met een kleine weerstand zoals metalen en zullen gebruikt worden voor de bedrading in elektrische schakelingen. Materialen met een grote weerstand zijn **isolatoren** zoals kunststof en hout. De elektronen kunnen hier niet vrij bewegen! Elektrische kabels in een schakeling bestaan uit een combinatie van geleiders en isolatoren om **de veiligheid** te kunnen garanderen.



Meer informatie over de link tussen atomen en elektriciteit? Volg de link!



04 ELEKTRICITEIT OPWEKKEN

Er bestaan verschillende manieren waarop er tegenwoordig elektriciteit wordt opgewekt. Vroeger werd elektriciteit enkel opgewekt in elektriciteitscentrales, tegenwoordig wordt het ook opgewekt op **een duurzame manier**. Men spreekt meestal over 2 soorten stroom: **groene** en **grijze stroom**. Groene stroom wordt opgewekt op natuurvriendelijke manier en komt uit **duurzame energiebronnen**.

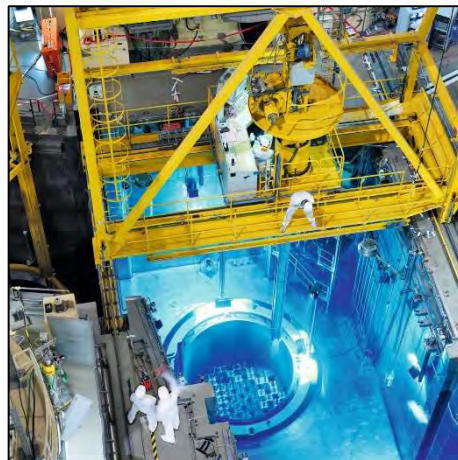
Bij groene stroom denkt men vaak aan windmolens maar er zijn ook nog andere manieren om stroom op een duurzame manier op te wekken. Men kan gebruik maken van de zon, water of de aarde. Grijze stroom wordt opgewekt met behulp van **fossiele brandstoffen** zoals olie, gas of kolen. Dit noemt men ook milieubelastende of niet – duurzame stroom. Het zijn voornamelijk de afvalstoffen die slecht zijn voor het milieu.

04.01 HOE WERKT EEN KERNCENTRALE?

Kernenergie is energie die vrijkomt door atoomkernen van uranium **te splijten**. Met die energie kan elektrische stroom worden gemaakt. Het is een relatief propere vorm van energie, waarbij geen directe CO₂ vrijkomt. België telt momenteel 2 kerncentrales: Doel en Tihange.

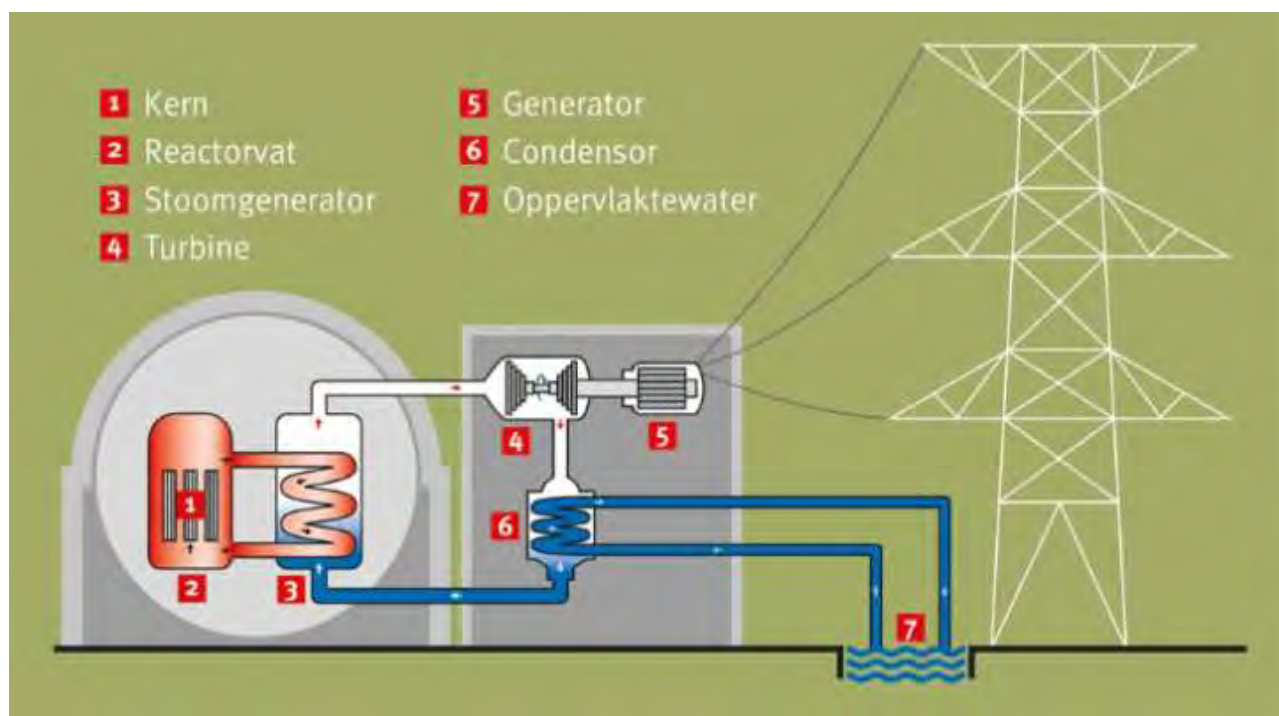


Kerncentrale van Doel



Reactorvat

Een kerncentrale werkt in principe als **een grote stoommachine**. Het verschil zit hem in de brandstof: **uranium** in plaats van kolen. Bij een kerncentrale worden in een reactor uraniumatomen gesplitst die warmte produceren. Daarmee maken ze stoom die een turbine aandrijft die elektriciteit opwekt. Omdat er in het proces ook radioactieve stoffen ontstaan, heeft een kerncentrale veel **veiligheidsvoorzieningen**.



Schematische voorstelling van een kerncentrale

In het hart van de kerncentrale bevindt zich de kern (1) met de splijtstof, veilig afgeschermd door staal en beton. In de kern wordt warmte geproduceerd door in de splijtstof uraniumkernen te splijten. Vandaar de naam **splijtstof**.

De **warmte** uit de kernsplijting wordt opgenomen door water van de eerste (nucleaire) kringloop. Dat circuleert onder hoge druk door het reactorvat (2). Met deze warmte wordt **stoom** gemaakt in de tweede (niet-nucleaire) kringloop van de stoomgenerator (3). De stoom drijft een turbine (4) aan. Die zit op een as die **een generator** (5) aandrijft. De stroom die de generator opwekt, wordt aan het **elektriciteitsnet** geleverd. De hete stoom wordt in een condensor (6) gekoeld tot water. Dat koelen gebeurt door koud oppervlaktewater (7) langs het stoomsysteem te voeren.

Is kernenergie **duurzaam**? Het Europees Parlement vindt van wel. Begin juli 2022 heeft Brussel besloten dat Europese investeringen in gas en kernenergie het label groen krijgen. Er dient rekening gehouden te worden met maximaal uitstoot CO₂ per kWh. Het is variabel per land en wordt berekend op de samenstelling van het productiepark.

Bij de opwekking van elektriciteit in een kerncentrale wordt geen CO₂ uitgestoten. Tijdens de bouw en ontmanteling van de centrales, tijdens de winning en het vervoer van uranium en bij het transport, de verwerking en opslag van kernafval ontstaat wel CO₂ – uitstoot. Het internationale panel van klimaatwetenschappers IPCC heeft berekend dat over de hele levenscyclus bezien ten opzichte van aardgas de totale broeikasgasuitstoot van kernenergie zo'n 40 keer lager is. Dit is vergelijkbaar met de uitstoot die bij windenergie komt kijken en zelfs lager dan die bij zonne-energie.

Uranium dat bij kernenergie als splijtstof wordt gebruikt is **een niet – hernieuwbare grondstof** en kan dus opraken, net als aardgas en steenkool. Daarom valt kernenergie nu onder grijze stroom. Men doet momenteel volop testen naar andere splijtbare stoffen zoals **thorium**. Men verwacht echter niet voor 2050 een doorbraak bij dit materiaal.

Bij het opwekken ontstaat afval dat lastig op te slaan is. Maar er komt dus weinig CO₂ bij vrij. Daarom onderzoeken wetenschappers, de Europese Commissie en de overheid of we kernenergie in de toekomst toch kunnen inzetten. Voorlopig blijft het een gevoelig onderwerp met voor- en tegenstanders.



Meer informatie over de werking van een kerncentrale?
Volg de link en ontdek het proces van kernsplijting tot elektrische stroom!



04.02 HOE WERKT EEN WINDMOLEN?

Het principe van een windmolen of **windturbine** is eenvoudig: de wind laat de bladen draaien, en deze beweging wordt omgezet in elektriciteit.

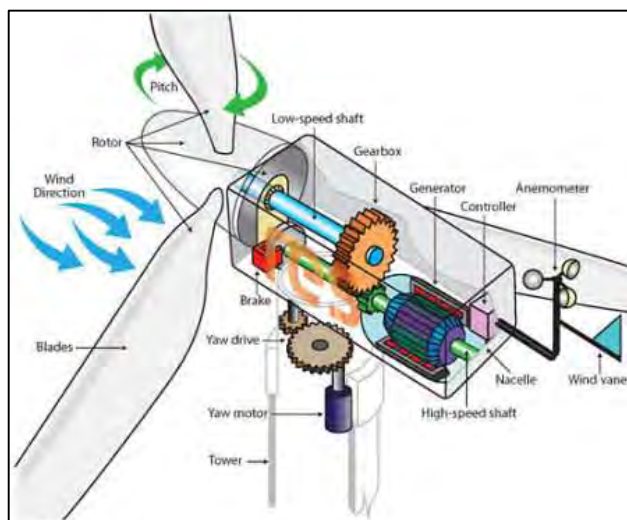
De meeste moderne windmolens hebben **drie rotorbladen** of de wieken. Het punt waar de bladen bij elkaar komen wordt de **rotor** genoemd. De wind zorgt ervoor dat het geheel gaat draaien.

De rotor is gekoppeld aan een **gondel** of de behuizing boven aan de mast. Een motor zorgt ervoor dat de gondel steeds zo gepositioneerd wordt, dat de bladen op de wind gericht zijn. Om de juiste richting van de gondel te bepalen, meet een windvaan boven op de molen voortdurend de windrichting.

In de gondel bevindt zich een **generator**: een grote **dynamo** die de draaiende beweging van de rotor omzet in elektriciteit. Men kan dit vergelijken met een eenvoudige fietsdynamo. Deze werking wordt later verder besproken.

Omdat de rotor een relatief lage snelheid heeft zal een tandwielkast zorgen voor een omzetting naar een hogere snelheid. Dit is nodig zodanig dat de generator voldoende **elektriciteit** kan opwekken.

Er bestaan verschillende uitvoeringen van windmolens: **verticale** en **horizontale**.



Verticale en horizontale windmolens



Benieuwd naar de opbouw van een horizontale windmolen?
Volg de link!



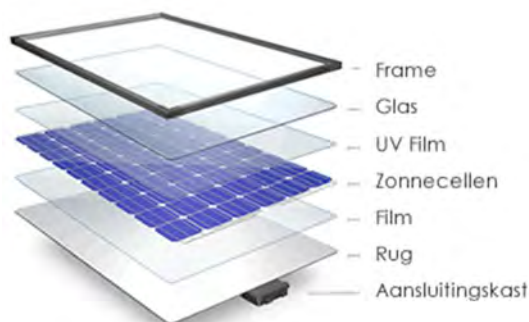
04.03 WAT IS EEN ZONNEPANEEL?

In 1839 ontdekte de Franse natuurkundige Becquerel het zogeheten fotonvoltaïsch effect: dat je stroom kunt opwekken uit zonlicht.

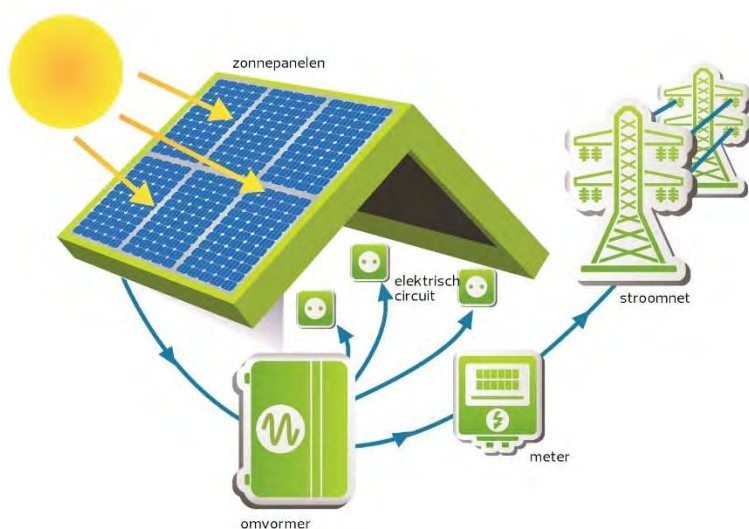
Een zonnepaneel bestaat uit meerdere cellen die meestal van **silicium** gemaakt zijn. Op het moment dat zonlicht op het zonnepaneel valt, maakt de zonne-energie elektronen los in het silicium. Hierdoor ontstaat er **spanningsverschil** tussen de boven- en onderkant van de cellen.

De bovenkant wordt positief- en de onderkant negatief geladen, waardoor er gelijkstroom ontstaat. Door meerdere zonnepanelen op elkaar aan te sluiten wordt een elektrisch circuit gecreëerd en kan er stroom door de panelen lopen.

Een **omvormer** speelt een essentiële rol in elke zonnepanelen installatie. De **gelijkstroom** die wordt opgewekt door zonnepanelen moet namelijk worden omgevormd tot **wisselstroom** die bruikbaar is in een woning. Nadat de omvormer de stroom heeft omgevormd en heeft gedeeld met de meterkast, kan men de wisselstroom uit zonnepanelen gebruiken via **stopcontacten**.



Opbouw zonnepaneel



Schematische voorstelling van een gebruik van zonnepanelen.



Werking van een zonnepaneel.

De werking van **een omvormer** bestaat uit enkele eenvoudige stappen:

- De opgewekte gelijkstroom gaat via een kabel naar de omvormer.
- In de omvormer wordt de gelijkstroom (DC) omgezet in wisselstroom (AC).
- De wisselstroom gaat naar de meterkast waardoor het verspreid kan worden in de woning. Overbodige opgewekte energie wordt overgezet naar het elektriciteitsnet waar het verrekend zal worden.



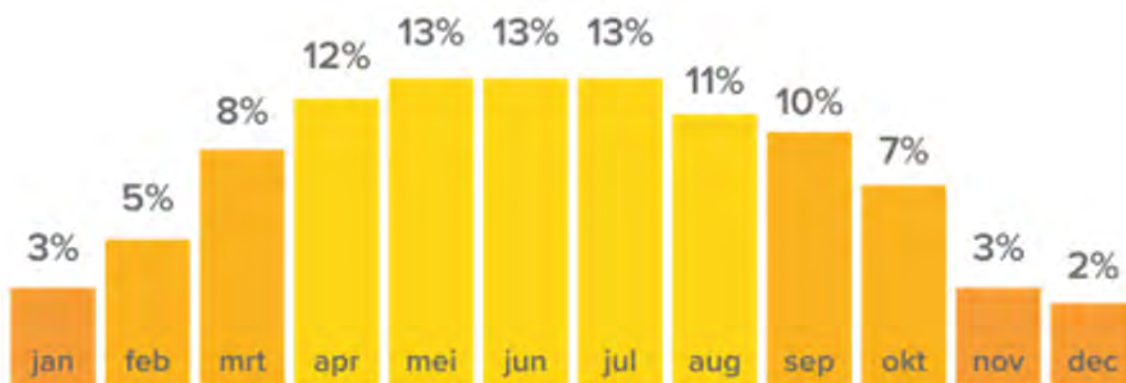
Het is ook mogelijk om op te slaan in **een thuisbatterij** en thuisaccu = gelijkspanning! Dit wordt meestal gebruikt voor het opladen van een elektrische wagen.

De zon hoeft niet fel te schijnen om stroom op te wekken met zonnepanelen. Ook op bewolkte dagen produceren zonnepanelen elektriciteit. **Schaduw** heeft echter wel een effect op de werking. Wanneer er schaduw op een zonnecel valt, kan er minder stroom door de cel lopen.

Het vermogen van zonnepanelen wordt uitgedrukt in watt. De productie van stroom is echter niet altijd hetzelfde, omdat de hoeveelheid zonlicht op de zonnepanelen continu verandert. Ook hebben temperatuur, de plaatsing van de zonnepanelen en de soorten zonnepanelen invloed op de opbrengst. Om deze reden wordt bij zonnepanelen het **maximale vermogen** aangegeven, uitgedrukt in watt-piek (= Wp).

Dit maximale vermogen wordt vastgesteld in een testomgeving met ideale omstandigheden. Bij het berekenen van de daadwerkelijke opbrengst, gebruiken installateurs speciale software om de weersomstandigheden te combineren met de hellingshoek van een dak en de windrichting van het paneel. Zo kan worden uitgerekend hoeveel panelen men nodig heeft om een woning van voldoende stroom te voorzien.

De opbrengst van zonnepanelen is verschillend per maand omdat het **afhankelijk** is van de stralingsintensiteit van de zon.



Procentuele verdeling van de jaaropbrengst zonnepanelen.

05 WATERSTOF: TOEKOMST?

De reeds eerder vermelde procedures om elektrische energie op te wekken zijn ondertussen ingeburgerd in België en blijft men op zoek gaan **naar duurzame energievoorziening**. De laatste jaren investeert men meer in onderzoek naar een nieuwe technologie: waterstof (H₂)!

Wist je dat België een wereldspeler is in de behandeling van waterstof? Onze petrochemische en chemische industrie verwerkt jaarlijks bij 6 miljard m³ waterstof. Vooral de industrie rond de Antwerpse haven is een grote afnemer. Daarnaast hebben we ook één van de grootste waterstofnetwerken ter wereld: meer dan 600 kilometer ondergrondse pijpleidingen doorkruisen ons land.



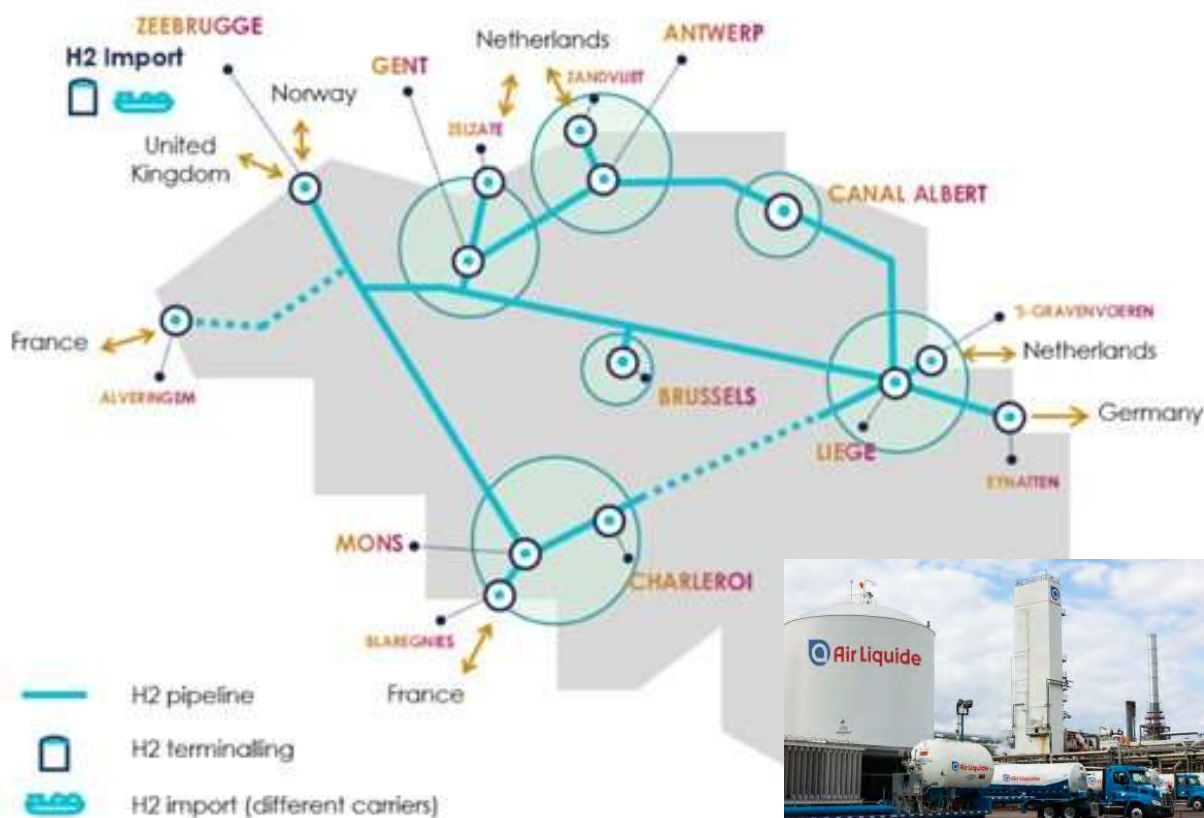
Wordt waterstof de brandstof van de toekomst?
Samen met Namibië wil België inzetten op groene waterstof.
Bekijk de reportage van VRT via de link.



Al van voor de Tweede Wereldoorlog is waterstof een belangrijk element in de chemische en petrochemische industrie. Het wordt gemaakt door aardgas te kraken en ook uitgewisseld tussen de verschillende industrieclusters in ons land en onze buurlanden Frankrijk en Nederland.

In België liggen maar liefst 613 kilometer waterstofpijpleidingen, met knooppunten rond de havens van Gent en Antwerpen. Geen enkel ander land ter wereld heeft een dergelijk uitgebreid netwerk.

In Duitsland ligt er 375 kilometer, in Nederland ongeveer 360 en in Frankrijk ongeveer 300. Groot-Brittannië heeft amper 40 kilometer pijpleidingen. In heel de VS ligt er 1.200 kilometer, vooral in Texas en Louisiana. Maar de VS is ruim 300 keer groter dan België!



Overzicht van de waterstofleidingen in België.

Het Belgische netwerk is de verdienste van één bedrijf, Air Liquide, dat in de jaren 60 een uitgebreid systeem van pijpleidingen voor industriële gasen uitbouwde. In 1938 werden in ons land de eerste leidingen gelegd.

Door de huidige pijpleidingen stroomt industrieel aangemaakte waterstof, afgesplitst tijdens het bewerken van aardgas, of de restfractie van bijvoorbeeld chloorfabrieken. Het is de meest efficiënte manier om waterstof te maken. Maar aardgas is een broeikasgas wat voor de klimaatopwarming geen goede zaak is. Het gaat hier eigenlijk over grijze waterstof, geen groene. Ze wordt vooral gebruikt voor de bewerking van chemische of petrochemische producten, bijvoorbeeld om het vervuilende zwavel uit aardolie te halen.

Air Liquide is wel bereid de pijpleiding uit te rusten met waterstoftankstations voor elektrische auto's en vrachtwagens op waterstof. Ondertussen zijn reeds de eerste tankstations aangesloten op de pijpleiding.



Tankstations voor waterstof beginnen langzaam in het straatbeeld te verschijnen.

Precies dat gebrek aan tankstations speelt de doorbraak van de waterstofauto's behoorlijk parten. Dat zijn dus elektrische auto's die hun stroom niet uit batterijen, maar uit waterstof halen. Op vijf minuten is zo'n auto volgetankt.

Waterstofauto's bestaan al meer dan tien jaar. Maar zolang er niet genoeg tankstations zijn, stellen de meeste constructeurs de grootschalige lancering van hun waterstofauto's uit. Batterij elektrische voertuigen (BEV) zijn eenvoudiger in constructie, goedkoper in aankoop, verbruik en onderhoud. De energiebedrijven stellen de lancering van hun tankstations uit zolang er niet genoeg waterstofauto's zijn. Een vicieuze cirkel, waardoor de massaproductie van waterstofauto's stagneert en de weinige beschikbare modellen nog peperduur zijn. Maar dankzij de waterstofpijpleidingen heeft België misschien wel een extra troef om die impasse te doorbreken.

Het netwerk zou de ruggengraat kunnen worden van een hele reeks tankstations op Belgische bodem. Voorlopig is in België nog geen enkel waterstoftankstation op de pijpleiding aangekoppeld. Voorlopig zal de bevoorrading gebeuren met tankwagens.



In Halle opende Colruyt Group in 2018 zijn eerste publieke waterstoftankstation dat 100% op groene waterstof draait. Volg de link RING TV voor meer informatie.



Of er ook groene waterstof in het netwerk van Air Liquide kan worden geïnjecteerd, is nog niet duidelijk. Maar de pijpleidingen zouden alleszins al een aanvulling kunnen zijn op echt groene tankstations die hun waterstof halen uit zonne- of windmolenparken. Net zoals elektrische auto's rijden op grijze of groene stroom, zouden waterstofauto's kunnen rijden op grijze of groene waterstof.

Het netwerk is een van de vele troeven die ons land heeft om een waterstofeconomie uit te bouwen. Maar er zijn er nog andere: onze bedrijven. Die kunnen de bouwstenen worden van een waterstofeconomie.

De belangenorganisatie WaterstofNet vzw heeft al verschillende projecten met bedrijven uitgewerkt. Onder meer voor ons transport.

Deze organisatie klopte daarvoor aan bij Colruyt Group en die hadden er wel interesse voor. Zo rijden sinds 2012 in het distributiecentrum van Halle waterstof – elektrische heftrucks rond die hun waterstof halen uit de zonnepanelen en windturbines van Colruyt Group.

Ook de belangstelling van de scheepvaart is gewekt. De Belgische rederij CMB.TECH heeft al werkboden en een kleinere passagiersboot rondvaren die aangedreven wordt door waterstof: de Hydrocat 48. Dit vaartuig zorgt voor het transport van zijn onderhoudspersoneel naar één van de windmolenparken.

Ondertussen varen in Noorwegen de eerste veerboten op waterstof. De volgende stap: grotere zeeschepen voor het transport van containers als proper alternatief voor de vervuilende brandstof van de huidige schepen. Men kijkt dan voornamelijk naar waterstofafgeleiden zoals ammoniak en methanol.

Omdat waterstof zowel elektriciteit als warmte kan leveren, is er ook meer en meer belangstelling vanuit de energiesector. Zo opende Umicore in 2013 de grootste waterstofenergiecentrale ter wereld. Die bestond uit een container vol brandstofcellen op het terrein van de toenmalige chloorfabriek van Solvay. De centrale leverde elektriciteit en warmte aan de fabriek van Solvay. Ze werd gevoed met de overschotten aan waterstof die uit dezelfde fabriek kwamen. De centrale heeft ongeveer 10 000 uur gedraaid.

Dit project werd stopgezet maar kreeg een vervolg in de Chinese regio Xinjiang met een centrale die tweemaal zo groot is. De afzonderlijke tanks kunnen 21 000 m³ waterstof opslaan.



Heftruck op waterstof bij Colruyt Group



Hydrocat 48 van de rederij CMB.TECH.



Waterstofcentrale in de Chinese regio Xinjiang.

Door de concurrentie van de Chinese markt kunnen de Belgische bedrijven niet achterblijven. Het Antwerpse bedrijf Umicore heeft belangstelling voor de waterstoftechnologie omdat het de nodige edelmetalen kan leveren voor de brandstofcellen die de elektriciteit en warmte uit het waterstof halen. Die brandstofcellen kunnen zowel worden ingezet in energiecentrales als in elektrische voertuigen.

In dit verhaal speelt nog een tweede Vlaams bedrijf een sleutelrol: de kmo Borit uit Geel waar het de flinterdunne metalen plaatjes maakt waaruit brandstofcellen zijn samengesteld.

Ook Agfa-Gevaert is actief in de waterstoftechnologie: het vervaardigt de membranen van de elektrolyse-apparaten die waterstof afsplitsen uit water.

Maar er zijn ook andere ontwikkelingen die zich concentreren op verbrandingsmotoren op waterstof. Klassieke motoren dus, die voertuigen of grotere stroomgroepen aandrijven en nu vooral draaien op diesel en benzine. Maar je kan ze ook op propere waterstof laten draaien. Grotere motoren kunnen zelfs bedrijven en kmo's voorzien van stroom en warmte.

Ons land heeft dus duidelijk een aantal unieke troeven in handen om een belangrijke speler te worden in een mogelijke waterstofeconomie. Maar er is haast bij: ook andere landen zien dat de belangstelling voor waterstof toeneemt en spelen hun economische troeven uit. Zo telt Duitsland intussen al meer dan 100 publieke waterstoftankstations. Elke twee weken moet er eentje bij komen. Het kleine aantal publieke tankstations bij ons steken daar schril tegen af, zeker als je weet dat we bijna twee keer meer pijpleidingen hebben liggen dan Duitsland. Een gecoördineerd beleid lijkt dan ook almaar meer een noodzaak te worden om de waterstoffrein niet te missen.



Umicore: chemiebedrijf in Antwerpen.



Heb je een beeld over waterstof in de toekomst?
Volg de link aandachtig, lees de onderstaande standpunten en plaats een kruisje in de juiste kolom.



Waterstof wordt tegenwoordig reeds gebruikt in de chemische industrie.	☐ JUIST ☐ FOUT
Waterstof bestaat uit 3 groepen: groene, blauwe en grijze waterstof.	☐ JUIST ☐ FOUT
Pijpleidingen en tubetrailers brengen waterstof naar de gebruikers.	☐ JUIST ☐ FOUT
Met waterstof kan een alternatief vormen op plaatsen waar warmtepompen onmogelijk zijn.	☐ JUIST ☐ FOUT
Overschotten van wind- en zonne-energie kan omgezet worden naar waterstof.	☐ JUIST ☐ FOUT
Van waterstof kan men groene stroom maken.	☐ JUIST ☐ FOUT
WaterstofNet is een samenwerkingsplatform rond waterstof in Vlaanderen en Nederland.	☐ JUIST ☐ FOUT

Noteer minimaal 5 toepassingen waar men waterstof kan gebruiken.

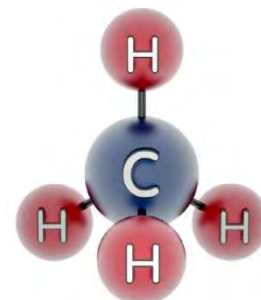
05.01 WAT IS WATERSTOF?

Volgens het periodiek systeem van **Mendeljev** is waterstof met symbool hoofdletter H, het eerste element en meest voorkomende element in ons universum.

Een waterstofatoom bestaat uit slechts één proton met positieve lading en één elektron met negatieve lading. Het is **het kleinste molecule** dat bestaat met een diameter van $2,9 \times 10^{-10}\text{m}$. Ter vergelijking: diameter methaanmolecule CH_4 (aardgas) = $3,8 \times 10^{-10}\text{m}$.

Het komt onder normale omstandigheden niet voor als een enkel element maar in een verbinding. Men zal dan spreken over **diwaterstof** met als formule H_2 .

Onder normale omstandigheden is waterstof (H_2) **een kleurloos, brandbaar en doorzichtig** gas. Het behoort tot de groep van de niet – metalen en is het lichtste gas dat we kennen. Per gewicht in (in kg) heeft waterstof wel een hoge energie dichtheid van 120 megajoule (MJ) per kg. Dat is bijna drie keer zo veel als aardgas (45 MJ per kg).



Molecule methaan CH_4

In 1671 beschreef de Iers – Engelse chemicus Robert Boyle dat een gas brandbaar was. Dit kwam vrij bij een reactie tussen ijzer en een verdund zuur. De Engelse natuurkundige Henry Cavendish (1731 – 1810) ontdekte tijdens een experiment met kwik in 1766 dat dit gas een chemisch element was. Hij wist veel eigenschappen van het gas nauwkeurig te beschrijven maar vermoedde dat het metaal de bron was in plaats van het zuur. Hij noemde daarom zijn nieuw ontdekte element brandbaar gas van metalen. Door Antoine Lavoisier werd enkele jaren later de huidige naam van waterstof aan het element gegeven: **Hydrogenium**.



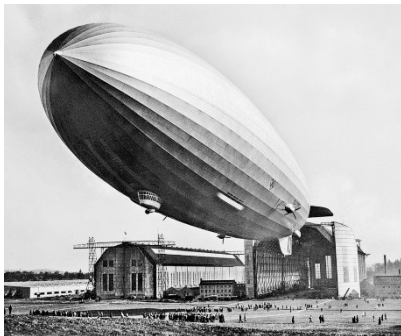
Waterstof op de tabel van Mendeljev en werd ontdekt door Henry Cavendish in 1766..

Dit element heeft ondertussen een lange weg afgelegd. Enkele historische data...

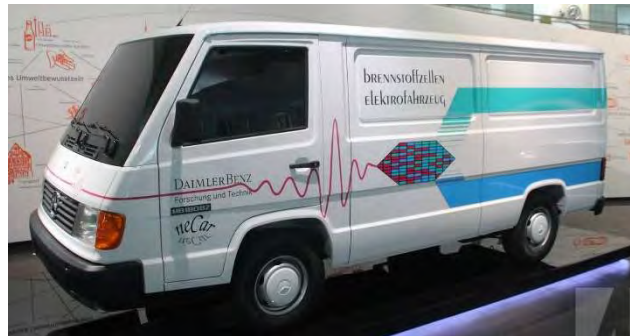
1800	De eerste toepassing van elektrolyse .
1838	Ontwikkeling van de eerste brandstofcel .
1874	Jules Verne voorspelde reeds het gebruikt van waterstof als brandstof in de toekomst .
1920	De eerste motoren op waterstof.
1937	Zeppelin De Hindenburg op waterstof : ramp is ontstaan door de ontvlambare verf op het frame!
1958	NASA ontwikkelt vloeibare waterstof brandstofcellen.
1994	Eerste auto op waterstof rijdt over een afstand van 130 km met gemiddelde snelheid van 90 km/h.
1999	In Europa rijden 30 bussen op waterstof.



1874: Jules Verne



1937: Hindenburg



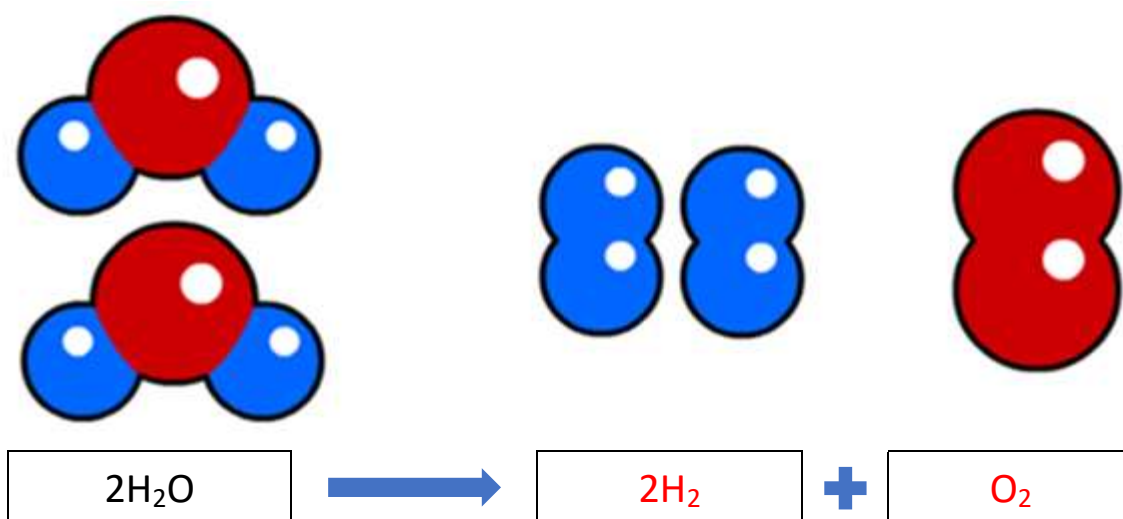
1994: Daimler Benz Necar

Het chemische element waterstof maakt 75 procent van de totale massa van het universum uit. Zo bestaat de zon voor meer dan twee derde uit waterstof. Daarnaast zit het ook in water, alle levende organismes en fossiele brandstoffen op aarde.

Waterstof is bij kamertemperatuur in de puurste vorm kleur – en geurloos en niet – giftig. Bij temperaturen lager dan $-252,77\text{ }^{\circ}\text{C}$ wordt waterstof vloeibaar. Als het nog verder gekoeld wordt tot onder $-259,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ zal het een vaste vorm aannemen.

Waterstof bestaat op aarde niet op zichzelf. Het atoom is meestal een onderdeel van grotere moleculen, verbonden aan andere atomen zoals zuur- of koolstof. Hierdoor moet het losgeweekt worden uit componenten die het bevatten zoals water (H_2O).

Hiervoor gebruikt men **de onderstaande reactievergelijking**.



Wat is een scheikundige reactievergelijking?
Volg de link waarbij de verbranding van koolstof wordt omgezet in een reactievergelijking.



Bij de omzetting van waterstof en zuurstof naar water komt er **energie** vrij. Deze energie werd gebruikt om waterstof te maken. Men kan dus waterstof maken uit water met duurzaam opgewekte elektriciteit waarbij men spreekt over **groene waterstof**.



Lees de verschillende cases en maak de juiste berekening.

Uit een flesje water van 0,5 liter kan men 55 gram waterstof halen. Een auto op waterstof verbruikt ongeveer 1000 gram per 100 kilometer. Hoeveel kilometer kan men rijden met water uit 1 flesje?

Gegeven:

Gevraagd:

Oplossing:

Een auto op waterstof wil 125 kilometer rijden. Hoeveel flesjes water van 0,75 liter heeft men nodig? Sommige gegevens worden uit het vorige vraagstuk gehaald!

Gegeven:

Gevraagd:

Oplossing:

Waterstof (H) is ook een belangrijk onderdeel van alle organisch materiaal, zoals steenkool, aard- olie of gas, en biomassagassen. Ook uit die materialen kan waterstof geproduceerd worden, maar de duurzaamheid van zulke processen wordt in grote mate bepaald door de molecuuldelen die “overblijven” nadat de waterstof (H) atomen zijn losgeweekt.

In het geval van water, blijft er zuurstof (O₂) over als restproduct. Bij organisch materiaal vormen de overgebleven koolstofatomen nieuwe moleculen met zuurstofatomen uit de omgeving en resulteert het proces in koolstofdioxide (CO₂). Indien dit vrij komt in onze atmosfeer zal het de klimaatverandering versterken.

Losweken van waterstofatomen uit grotere moleculen is energie slopend wat ook de kracht is van waterstof. Wanneer pure waterstof weer wordt vrijgelaten om verbindingen aan te gaan met andere atomen en terug te keren naar een staat die in de vrije natuur voorkomt, komt die grote hoeveelheid energie van het losweken weer vrij.

Waterstof is op die manier geschikt als **energiedrager** voor het opslaan en transporteren van energie als vloeistof, gecompriemd gas of in vaste vorm.

Voor de productie van waterstof of het losweken van de H – atomen uit grotere moleculen is dus een energiebron nodig. In het geval van water kan (groene) elektriciteit gebruikt worden voor het uit elkaar trekken van de waterstof- en zuurstofatomen.

Bij waterstof die gemaakt wordt uit fossiele brandstoffen wordt veelal de (warmte-)energie uit de fossiele brandstof gebruikt om waterstof te laten vormen uit de fossiele atomen en water dat vaak wordt toegevoegd in de vorm van stoom op hoge temperaturen.

De aard van die bron zal **de duurzaamheid** van de waterstof bepalen waarbij men over **kleuren** zal spreken zoals grijs, blauw en groen. In de nabije toekomst zal men ook spreken over goud met de zon als bron.

Samengevat kunnen we zeggen dat waterstof het meest eenvoudig chemische element is. Het heeft in normale omstandigheden de onderstaande kenmerken:

KLEURLOOS	NIET – CORROSIEF	NIET - OXYDEREND
NIET – RADIOACTIEF	Niet – kankerverwekkend	NIET – TOXISCH

05.02 DE EIGENSCHAPPEN VAN WATERSTOF?

Sommige van de belangrijkste eigenschappen van waterstof zijn reeds vermeld in het vorige puntje. Hieronder bespreken we deze nogmaals kort en vullen we verder aan met de overige eigenschappen:

- Waterstof is de kleinste molecule.
- Lage dichtheid.
- Geurloos, kleurloos en niet giftig.
- Verbranding geeft water.
- Lage ontstekingsenergie.
- Breed ontvlambaarheidsgebied.
- Een waterstofvlam straalt weinig warmte uit doordat de warmte in de vlam blijft.
- Waterstof brandt met een hoge snelheid.

Waterstof is een gas en heeft een lage dichtheid.

- Onder normale omstandigheden is waterstof een gas.
- Het heeft een lage dichtheid: 1 liter weegt 0,083 gram.
- 1 liter lucht weegt ongeveer 1,2 gram waardoor waterstof 14x lichter is dan lucht.
- Waterstof stijgt van alle stoffen het snelste op.



Waterstof stijgt van alle gassen het snelste op.
Meer informatie? Bekijk de filmpjes met medewerking
van de Nederlandse brandweer (bron NIPV)..

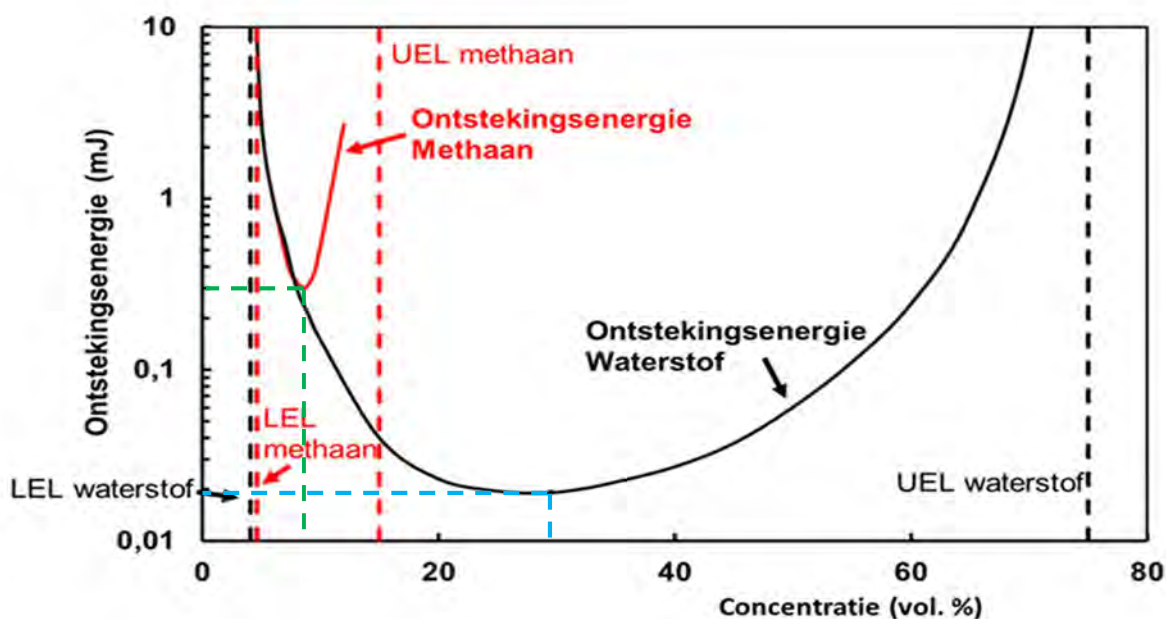


De verbranding van waterstof geeft water.

- Bij **de verbranding** van waterstof ontstaat water: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$
- Waterstof bevat geen koolstof waardoor er bij een verbranding **geen CO₂** vrij komt.

Waterstof heeft een lage ontstekingsenergie.

- De **ontstekingsenergie** van waterstof is afhankelijk van de **concentratie** waterstof wat men zal uitdrukken in vol.%.
- De laagste ontstekingsenergie van waterstof is bij 30 vol.% en heeft een ontstekingsenergie van **0,019 mJ**.
- Bij aardgas is de laagste ontstekingsenergie hoger: 0,3 mJ.

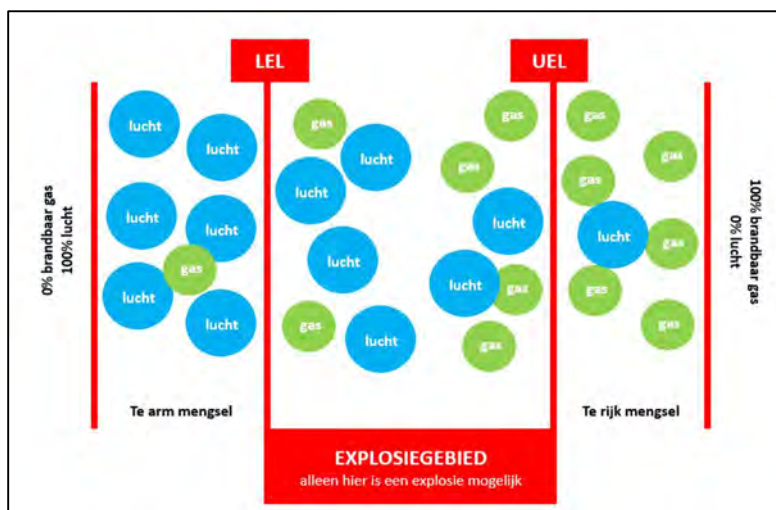


Waterstof heeft een breed ontvlambaarheidsgebied.

Als men 2 stoffen gaat mengen spreekt men ook over **het explosiegebied**.

De verhouding tussen de 2 stoffen moet binnen de explosiegrenzen liggen.

- **Onderste explosiegrens** (LEL – Lower Explosion Limit): minimale hoeveelheid gas of damp in de lucht om een explosie te veroorzaken. Om veilig te werken moeten men altijd ruimschots onder de LEL blijven!
- **Bovenste explosiegrens** (UEL – Upper Explosion Limit): maximale hoeveelheid gas of damp in de lucht om een explosie te veroorzaken.



Wat is een explosiegebied?

Als een mengsel te weinig explosieve stof bevat, spreekt men van **een arm mengsel** wat niet kan exploderen. Te veel explosieve stof is **een rijk mengsel** en kan ook niet exploderen.

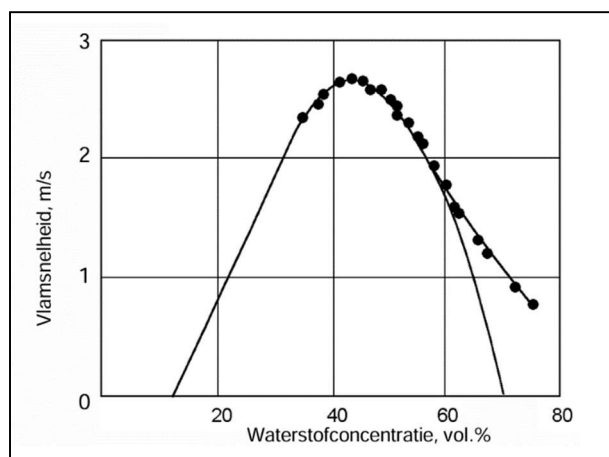
De onderste explosiegrens (LEL) van waterstof is 4 vol.% terwijl de bovenste explosiegrens 75 vol.% bedraagt. Dit is **veel breder** dan de ontvlambaarheidsgrens bij aardgas.

De warmte en snelheid van een waterstofvlam?

Waterstof bevat **geen koolstof** waardoor er bij een verbranding geen roetdeeltjes zullen gevormd worden.

Door de afwezigheid van deze deeltjes is een waterstofvlam **kleurloos** en straalt de vlam ook **weinig warmte** uit.

De **vlamsnelheid** is afhankelijk van de waterstofconcentratie en deze kan oplopen tot meer dan 2 meter per seconde.



Vlamsnelheid van waterstof is meer dan 2 m/s.

Waterstof heeft een hoge energiedichtheid per kilogram.

In waterstof zit **veel energie per kg** en is veel meer vergeleken met andere brandstoffen. Het is ruim 3 keer zoveel in vergelijking met aardgas. Men spreekt als eenheid over kilowattuur per kilogram of kWh/kg.

Energiedichtheid heeft een boven- en een ondergrens: low heating value of high heating value.

Bij verbranding of omzetting naar energie is het de vraag of alle warmte die daarbij vrij komt ook opgevangen en gebruikt wordt. Als dat het geval is, wordt er gesproken van een high heating value of de bovengrenzen.

BRANDSTOF	ENERGIEDICHTHEID
Waterstof	33,3 – 39,4 kWh/kg
Aardgas	11,7 – 15,3 kWh/kg
	12,8 – 14,2 kWh/kg
	12,2 – 12,8 kWh/kg

BRANDSTOF	ENERGIEDICHTHEID
	11,7 – 12,8 kWh/kg
Ruwe aardolie	11,7 – 13,1 kWh/kg
	6,6 kWh/kg
	6,3 kWh/kg

Overzicht brandstoffen en de energiedichtheid.

Zuiverheid van waterstof.

Bij het maken van waterstof komen er onzuiverheden mee. Afhankelijk van de productiemethode en de grondstof waar de waterstof van gemaakt wordt. Deze onzuiverheden kunnen water, zuurstof, koolstofdioxide, stikstof, koolstofdioxide en andere stoffen zijn. Zo heeft een brandstofcel een waterstof zuiverheid nodig van 99,999% waterstof en zijn er eisen gesteld aan de 0,0001% onzuiverheid. Waterstof als grondstof of gebruikt in een verbranding heeft telkens een andere norm.

WATERSTOF	ZUIVERHEID	ONZUIVERHEDEN
Hydrogen 3.0	$\geq 99,9\%$	$H_2O < 30 \text{ ppm}$
Hydrogen 4.0	$\geq 99,99\%$	$H_2O \leq 20 \text{ ppm}$ $O_2 \leq 10 \text{ ppm}$
Hydrogen 5.0	$\geq 99,999\%$	$H_2O \leq 5 \text{ ppm}$ $N_2 \leq 3 \text{ ppm}$ $O_2 \leq 2 \text{ ppm}$ $C_xH_y \leq 0.5 \text{ ppm}$
Hydrogen 6.0	$\geq 99,9999\%$	$H_2O \leq 0.5 \text{ ppm}$ $N_2 \leq 0.5 \text{ ppm}$ $O_2 \leq 0.5 \text{ ppm}$ $C_xH_y \leq 0.1 \text{ ppm}$ $CO \leq 0.1 \text{ ppm}$ $CO_2 \leq 0.1 \text{ ppm}$

Overzicht zuiverheden en onzuiverheden waterstof, bron Linde gas industrial gas data sheets.



The Linde group staat wereldwijd in voor de verdeling van gas.
Ga op zoek naar informatie van Hydrogen 5.0.

Wat is de inhoud bij een gasfles van 600 L in m ³ ?	
Wat is de zuiverheid van Hydrogen 5.0?	
Wat is de aansluiting van de gasfles?	
Welke draadaansluiting wordt er gebruikt?	
Welke richting heeft de schroefdraad op de fles?	
Welke RAL – kleur heeft de schouder en cilindrisch deel van de gasfles?	
Welke norm heeft de aansluiting?	



Hydrogen 5.0

Voor welke toepassingen wordt dit gas gebruikt?

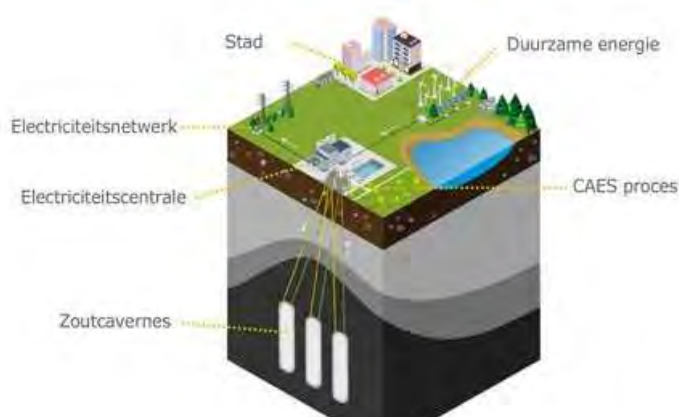
Waterstof is een uitstekende energie drager.

Waterstof wordt gezien als belangrijke energiedrager om bijvoorbeeld overtollige groene energie **langdurig** op te slaan.

Waterstof daarentegen verliest nauwelijks energie over langere perioden en gaat ingezet worden voor het opslaan van energie. Op deze manier kan men in de toekomst het effect van zomer en winter overbruggen. Men is volop aan het experimenteren met **zoutcavernes** en **gasvelden**.

De mogelijkheid om waterstof op te slaan in zoutcavernes is al bewezen in projecten in Engeland en de Verenigde Staten. In Nederland is een proefproject bij de zoutcavernes in Zuidwending.

Onder de Noordzee liggen, net als onder land, meerdere zoutstructuren die mogelijk geschikt zijn. Opsporingsonderzoek, inclusief proefboringen is nodig om de mogelijkheden op individuele locaties te bevestigen.



Principe zoutcavernes in Zuidwending.

Er zijn in de Noordzee veel gasvelden die mogelijk in aanmerking komen voor opslag van waterstof. Deze gasvelden zijn merendeels al ontwikkeld en aangesloten op een platform en aardgasinfrastructuur. De technische haalbaarheid van waterstofopslag in gasvelden moet echter nog definitief worden bewezen.

Ondergrondse waterstofopslag kan verschillende doelen dienen, vergelijkbaar met aardgasopslag: kort-cyclische opslag, seizoensopslag en strategische opslag. Afhankelijk van het type opslag zijn de kosten van de benodigde faciliteiten en infrastructuur op zee tussen de anderhalf en tweeëneenhalf keer hoger dan op land.

Voor seizoensopslag en strategische opslag heeft de benodigde hoeveelheid gas die nodig is om de berging op druk te houden – het zogeheten kussengas – een aandeel van zo'n 60-70% in de kosten. Dit deel van de kosten verschilt overigens niet van ondergrondse waterstofopslag op land.



Meer informatie over opslag van waterstof in zoutcavernes?
Volg de link.



Vergelijk de onderstaande eigenschappen en plaats één van de volgende brandstoffen op de juiste plaats: benzine, diesel, CNG, LPG en waterstof.

LPG = Liquefied Petroleum Gas .
CNG = Compressed Natural Gas.

Samenstelling	C ₈ – C ₂₅	C ₄ – C ₁₂	C ₃ H ₈ & C ₄ H ₁₀	CH ₄	H ₂
Gemiddelde dichtheid	840g/l vloeibaar	750g/l vloeibaar	2,25g/l gas	0,83g/l gas	0,09g/l gas
Ontstekingstemperatuur	220°C	220 – 280°C	460°C	595°C	585°C
Opstapelingspunt bij lekkage	Grond	Grond	Grond	Verspreiding	Verspreiding
Bereik met 10 liter brandstof	185km	167km	119km	40km bij 200bar of 20MPa	25km bij 700 bar of 70MPa

06 PRODUCTIE VAN WATERSTOF

Momenteel wordt het meeste waterstof gemaakt uit methaan waarbij er broeikasgas zal vrijkomen. Dit noemt men grijze waterstof. De duurzaamheid van waterstof is afhankelijk van **de productiewijze** en zal men weergeven in **kleuren**.

Grijze waterstof: waterstofproductie op basis van fossiele brandstoffen, zoals kolen, aardgas en aardolie waarbij per ton waterstof ongeveer 9 ton CO₂ in de lucht vrijkomt.

Op dit moment wordt zo'n 95% van de geproduceerde waterstof ter wereld op deze manier gemaakt, vaak op basis van aardgas via grote reformers. Men spreekt vaak over SMR = steam methane reforming.



Blauwe waterstof: bij het productieproces van grijze waterstof wordt de CO₂ (grotendeels) afgevangen en opgeslagen. Men spreekt dan over CCS = carbon capture and storage.

Het kan ook gebruikt worden als grondstof onder de benaming CCU = carbon capture and utilisation. Bij de productie van chloor ontstaat er ook restwaterstof.



Waterstof wordt groen indien het gemaakt wordt via elektrolyse waar water wordt opgesplitst in waterstof en zuurstof door middel van hernieuwbare elektriciteit.



Roze waterstof is waterstof die geproduceerd is uit water en elektriciteit afkomstig van kerncentrales. Hierbij komt geen emissie van CO₂ vrij, maar worden de specifieke kenmerken van kernenergie waaronder afval gekoppeld aan de geproduceerde waterstof.

Wanneer waterstof in de natuur in zijn puurste vorm voorkomt spreekt men over witte waterstof. Deze waterstof kan "gewoon" uit de grond gehaald worden, net zoals het geval is bij aardgas. Echter hebben we geleerd dat er bij het gebruik van waterstof geen CO₂ vrijkomt en bij aardgas wel. Daarnaast heb je geen stroom of aardolie nodig om deze waterstof te produceren, witte waterstof is namelijk al puur.

Witte waterstof is dan ook de beste vorm van waterstof, maar het is onduidelijk hoeveel witte waterstof er op de aarde beschikbaar is. We weten ondertussen wel dat witte waterstof diep in de aardbodem te vinden is dankzij chemische reacties, voornamelijk in Afrika. Sinds 2011 worden er bijvoorbeeld in dorpen in Mali witte waterstof opgewekt en gebruikt als energiebron. Maar nu is er ook geloof dat er op veel meer plekken in de wereld witte waterstof in de grond zit en er wordt dan ook uitgebreid onderzoek gedaan. Onder anderen in Zuid-Amerika, Australië en de Verenigde Staten, maar ook in Europese landen als Frankrijk en Spanje.

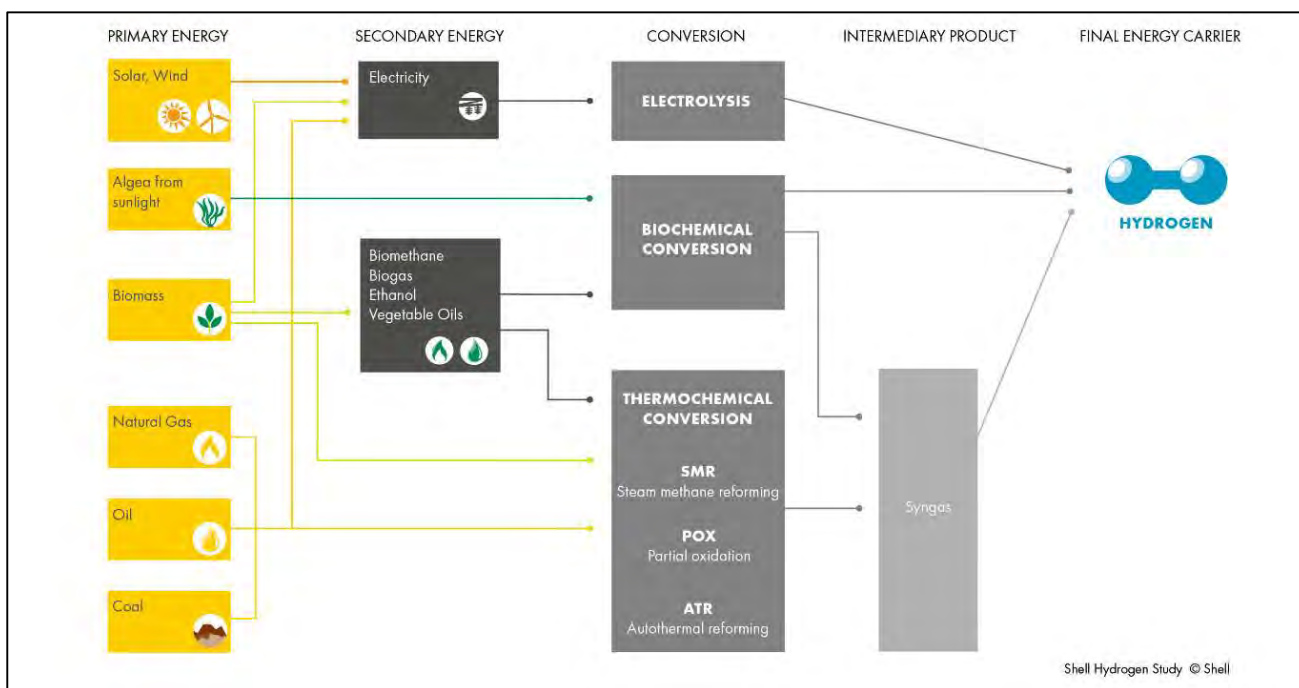
Tegenwoordig is men volop op zoek naar andere hernieuwbare bronnen van waterstof. Op de KU Leuven is men volop bezig met het ontwikkelen van een waterstofpaneel. Spreekt men binnen enkele jaren over de gouden waterstof?



Meer informatie over groene waterstof in Nederland?
Volg de link.



De productie van waterstof wordt duidelijker als men een overzicht bekijkt van **de energieketens** zoals bij de onderstaande figuur.



We ontdekken de volgende **primaire energiebronnen** die hernieuwbaar zijn: zon, wind, algenproductie op zonlicht en biomassa. De fossiele en niet hernieuwbare energiebronnen zijn aardgas, olie en kolen.

Bij de **secundaire energiebron** spreekt men over een energiedrager vooraleer er waterstof kan geproduceerd worden. Een voorbeeld hiervan is de opwekking van elektriciteit.

Voor de **omzetting** of conversie zijn er 3 mogelijkheden:

- **Elektrolyse:** productie van waterstof en zuurstof uit water.
- **Biochemische omzetting** waarbij waterstof uit algen wordt geproduceerd.
- **Thermografische omzetting** uit brandstoffen in de chemische industrie.

Daarnaast zijn er eventueel ook nog **tussenproducten** zoals syngas. Dit is een gasmengsel van waterstof en koolmonoxide.

Op het einde van de keten zal het product waterstof zijn waarbij **de zuiverheid** de toepassing zal bepalen. Voor brandstofcellen is het noodzakelijk om **zuiver waterstof** te gebruiken.

Deze diversiteit aan potentiële aanvoerbronnen is de belangrijkste reden waarom waterstof zo'n veelbelovende energiedrager is.

06.01 ELEKTROLYSE

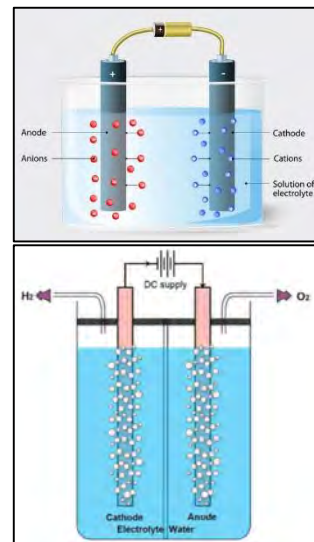
Elektrolyse is het proces waarbij elektriciteit reageert met water waardoor waterstof en zuurstof gescheiden wordt. Het eindproduct is **zuiver waterstofgas**. Een moderne elektrolyse – installatie streeft naar een rendement van ca. 80%.

Een elektrolysesysteem bestaat uit verschillende onderdelen. In theorie is het een vat met water waarin één elektrolyt en twee elektroden met een kathode en anode zich bevinden.

Elektrolyten zijn chemische verbindingen die in een oplossing of in gesmolten toestand geheel of gedeeltelijk in ionen gesplitst zijn, waardoor de oplossing of vloeistof een elektrische stroom kan geleiden.

De **kathode** is hierbij de negatieve pool en de **anode** de positieve pool. Wanneer er elektriciteit naar beide elektroden wordt geleid, zullen aan de twee kanten van het elektrolyt een reactie plaatsvinden.

Zo komt aan de kathode waterstofgas vrij en bij de anode is dit zuurstof. Het ratio waterstof / zuurstof bestaat hierbij uit 1/9. Het zuurstof wordt losgelaten of opgevangen en het waterstofgas wordt omgezet in **een vloeibare vorm**.



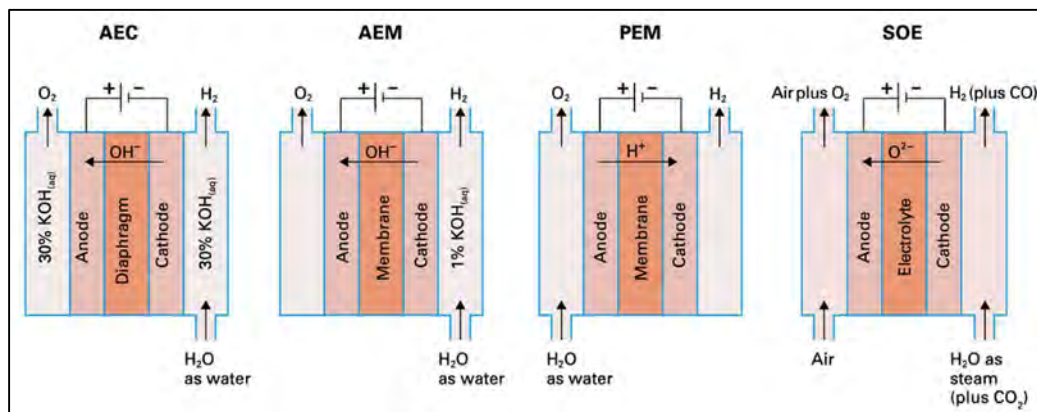
Elektrolyse met het toestel van Hofmann?
Volg de link.



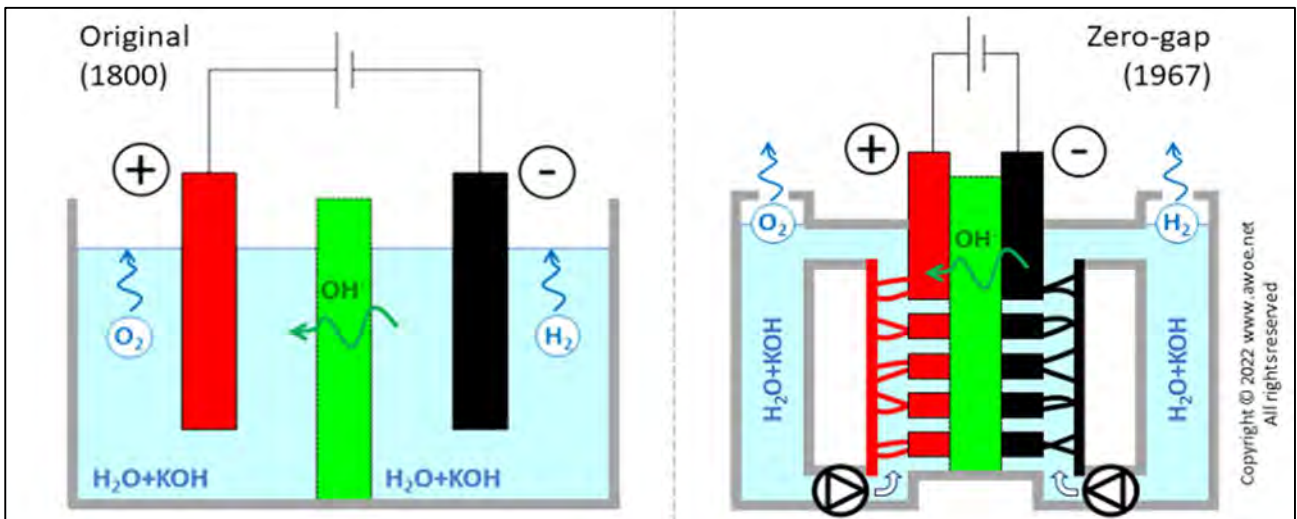
Een **membraan** voorkomt dat productgassen H_2 en O_2 mengen, maar laat de OH^- ionen door. De elektrolyzers bestaan uit individuele cellen en centrale systeem eenheden. Door het combineren van elektrolytische cellen in **een stack**, kan de waterstof productie worden aangepast aan de individuele behoeften.

Op deze manier bestaan er verschillende vormen van elektrolyzers:

Alkaline Electrolysis Cell	AEC of AEL
Anion Exchange Membrane of Alkaline Electrolyte Membrane	AEM
Polymer Electrolyte Membrane of Proton Exchange Membrane	PEM of PEMEL
Solid Oxide Electrolysis Cell	SOE of SOEC



De meest voorkomende zijn **AEC** en **PEM**. Beiden hebben net iets andere **specificaties** en hebben dan ook zo hun eigen voor- en nadelen.

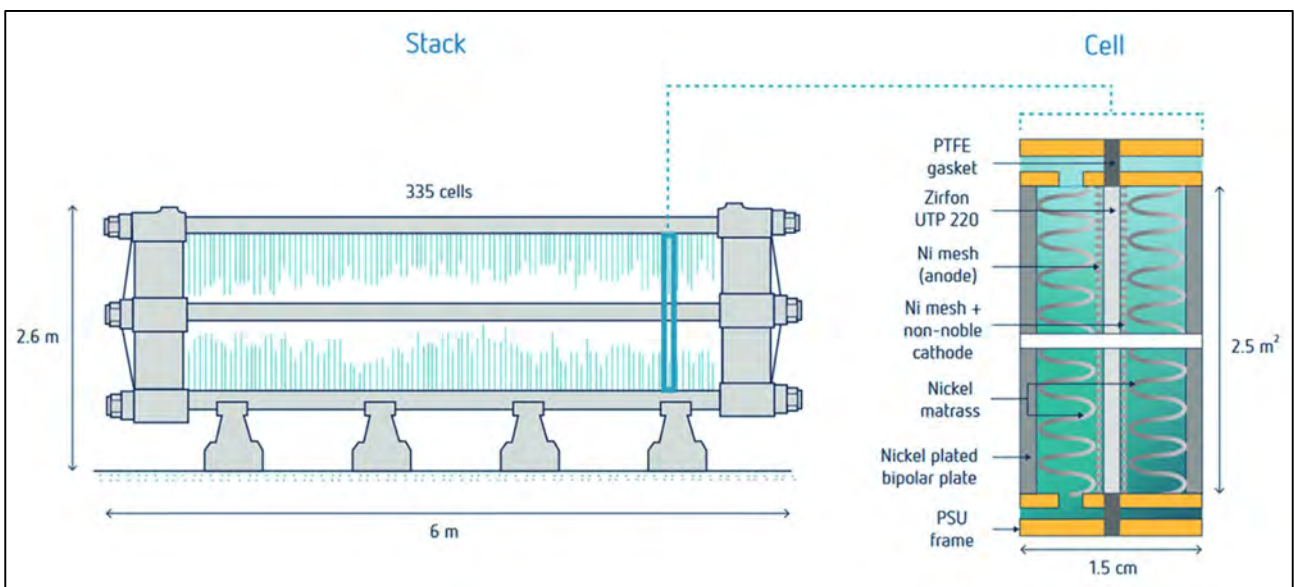


De evolutie bij een AEC tussen 1800 en 1967.

De **alkaline electrolyzer** (AEC of AEL) gebruikt een vloeibaar alkalisch elektrolyt om water te splitsen in waterstof en hydroxide-ionen bij de kathode. Deze ionen reageren bij de anode tot water en zuurstof. De totale reactie is: $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$. Voor deze reactie is ongeveer 285 kJ/mol duurzame energie nodig, bestaande uit warmte en elektriciteit. De elektrolyse vindt plaats bij temperaturen tussen 40 en 90 °C.

Hoewel electrolyzers met een vloeibaar alkalische oplossing van natrium- of kaliumhydroxide als elektrolyt al lange tijd beschikbaar zijn en succesvol zijn in de productie van waterstof, zijn er enkele **nadelen**:

- een lage stroomdichtheid van de cellen.
- de beperking dat ze niet onder hoge druk kunnen werken, waardoor ze relatief groot in omvang zijn. Dit maakt de onderstaande afbeelding duidelijk.

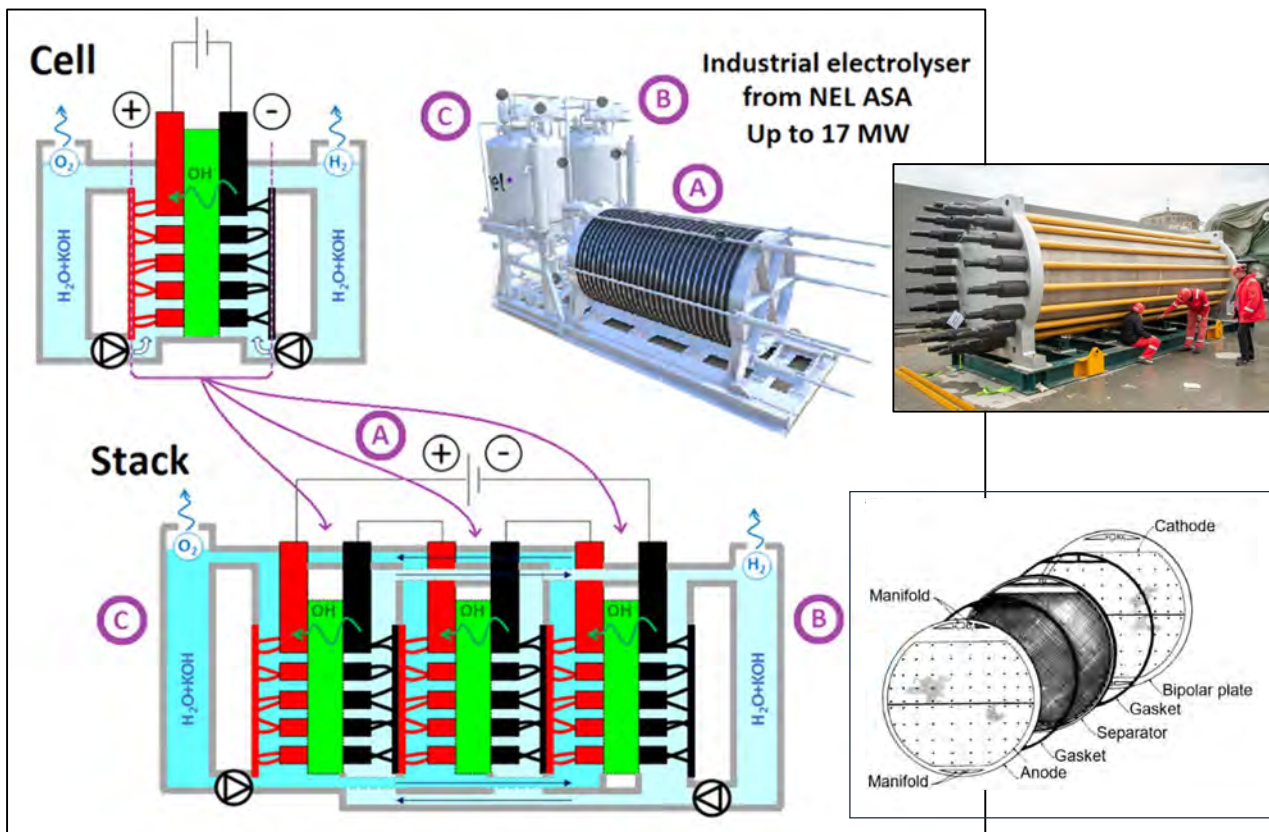


Een stack bestaat uit verschillende cellen.

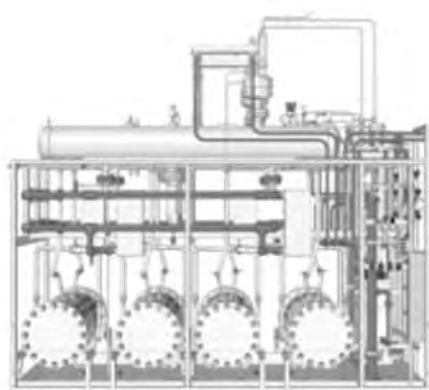
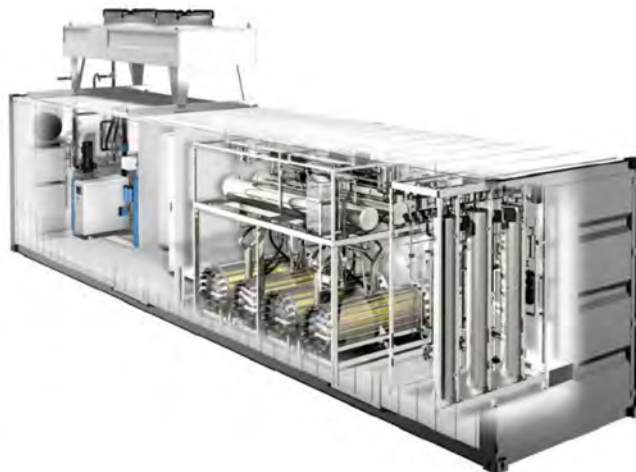


Een belangrijk onderdeel bij een AEC - electrolyzer is het membraan. Volg de link voor meer informatie over het Zirfon – membraan van het Antwerpse bedrijf AGFA.

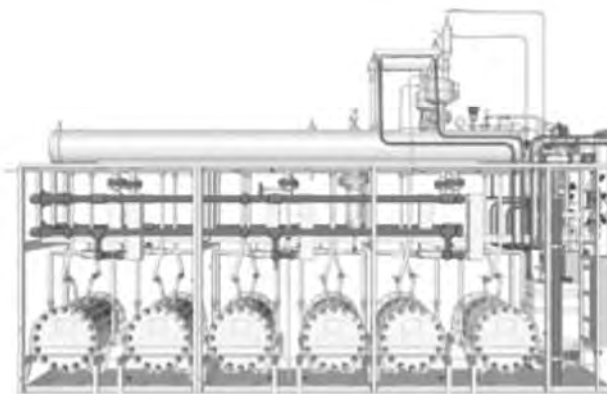




Schematische voorstelling van een industriële AEC – stack.



4 cell stacks = 70 Nm³/h



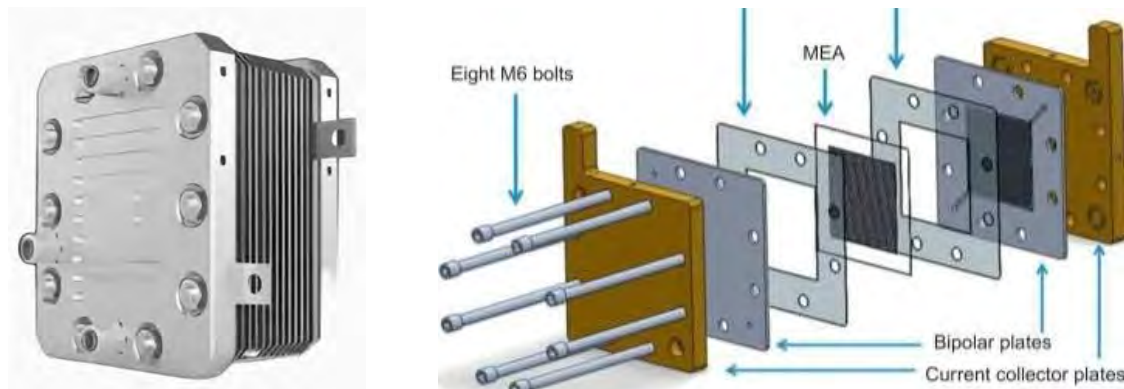
6 cell stacks = 100 Nm³/h

Een **PEM electrolyser** (men spreekt soms ook over PEMEL) gebruikt een polymeer membraan (MEA = Membrane Electrode Assembly) dat alleen waterstofionen doorlaat. Het membraan zorgt ervoor dat water bij de anode wordt gesplitst in zuurstof, waterstofionen en elektronen, waarna de waterstofionen en elektronen de kathode bereiken en worden omgezet in waterstof.

Zowel bij de anode als de kathode vinden chemische reacties plaats:

- Anode: $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{e}^-$
- Kathode: $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$

De PEM electrolyser heeft als voordeel ten opzichte van de alkaline electrolyser dat hij onder druk kan werken en daardoor compacter kan zijn. Er zijn echter ook nadelen, zoals de noodzaak om onder zeer zure omstandigheden te werken, wat speciale eisen aan het systeem stelt.



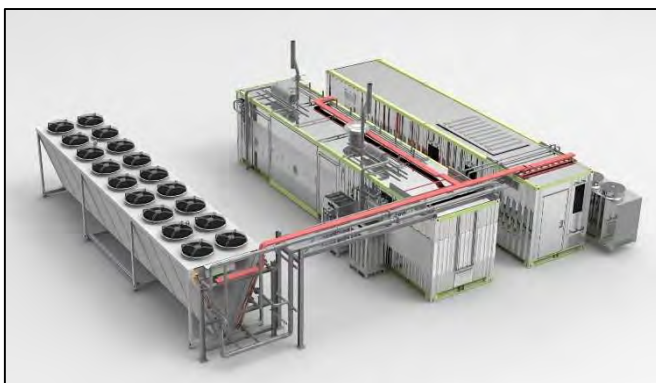
Schematische voorstelling van een PEM electrolyser.



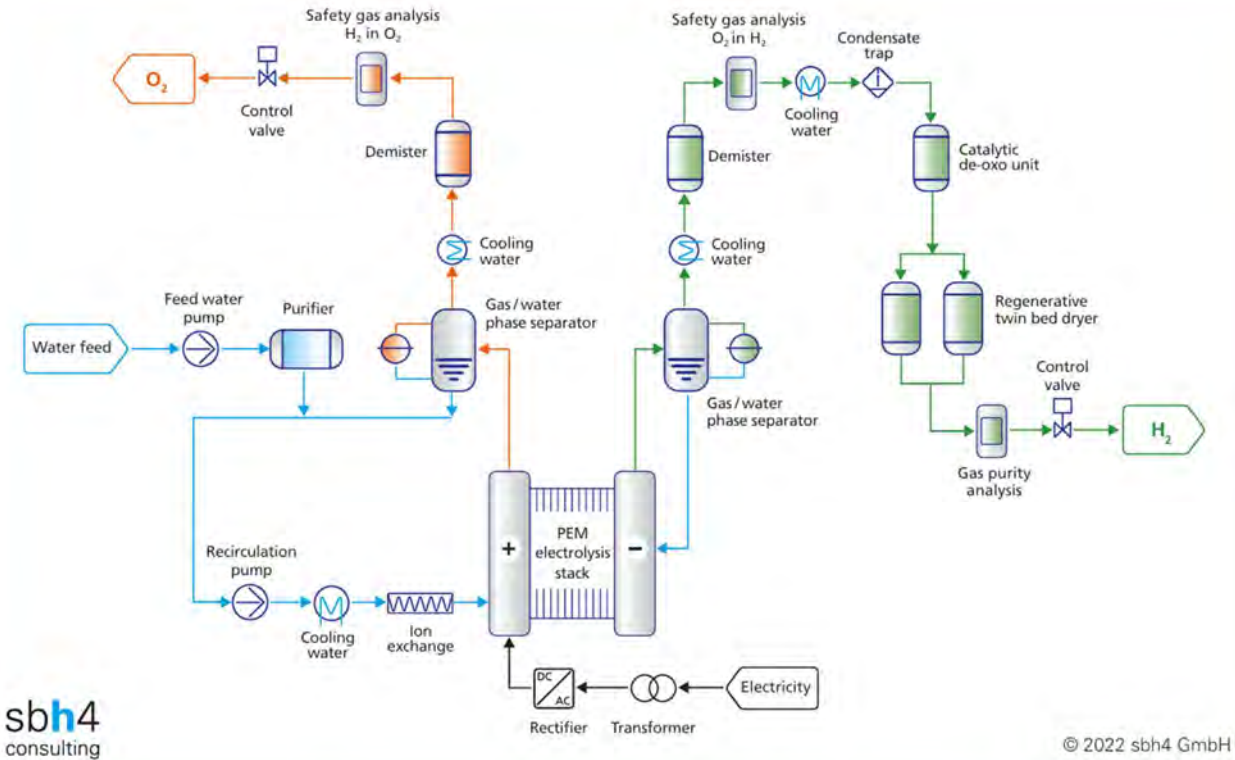
Een PEM electrolyser ontmantelen? Volg de link voor meer informatie.



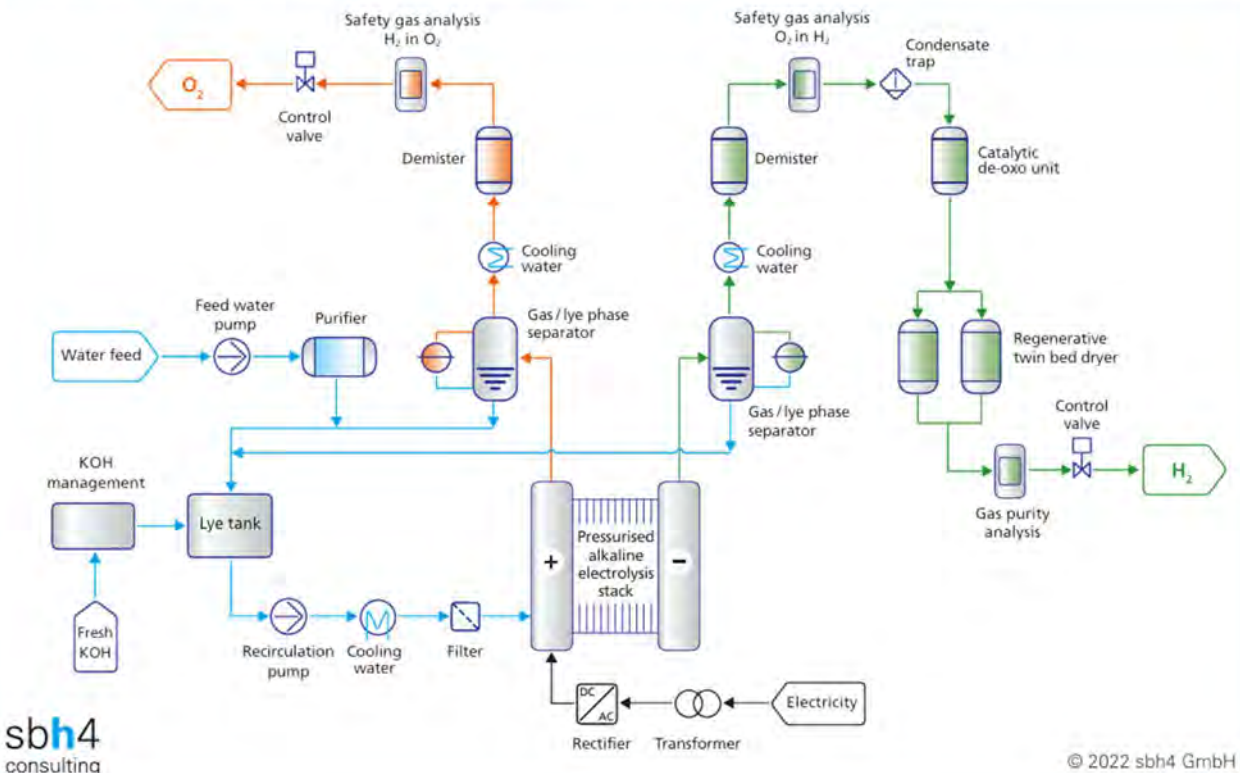
Een industriële installatie waarbij PEM electrolyzers toepast bestaat uit verschillende onderdelen zoals een process container, powercontainer, koelingen,... Vooraleer men iets praktisch realiseert zal men steeds een 3D – ontwerp maken, zoals bij het onderstaande voorbeeld. Deze geïmplementeerde opstelling produceert 864 kg waterstof per dag.



Pressurised PEM electrolysis process



Pressurised alkaline electrolysis process



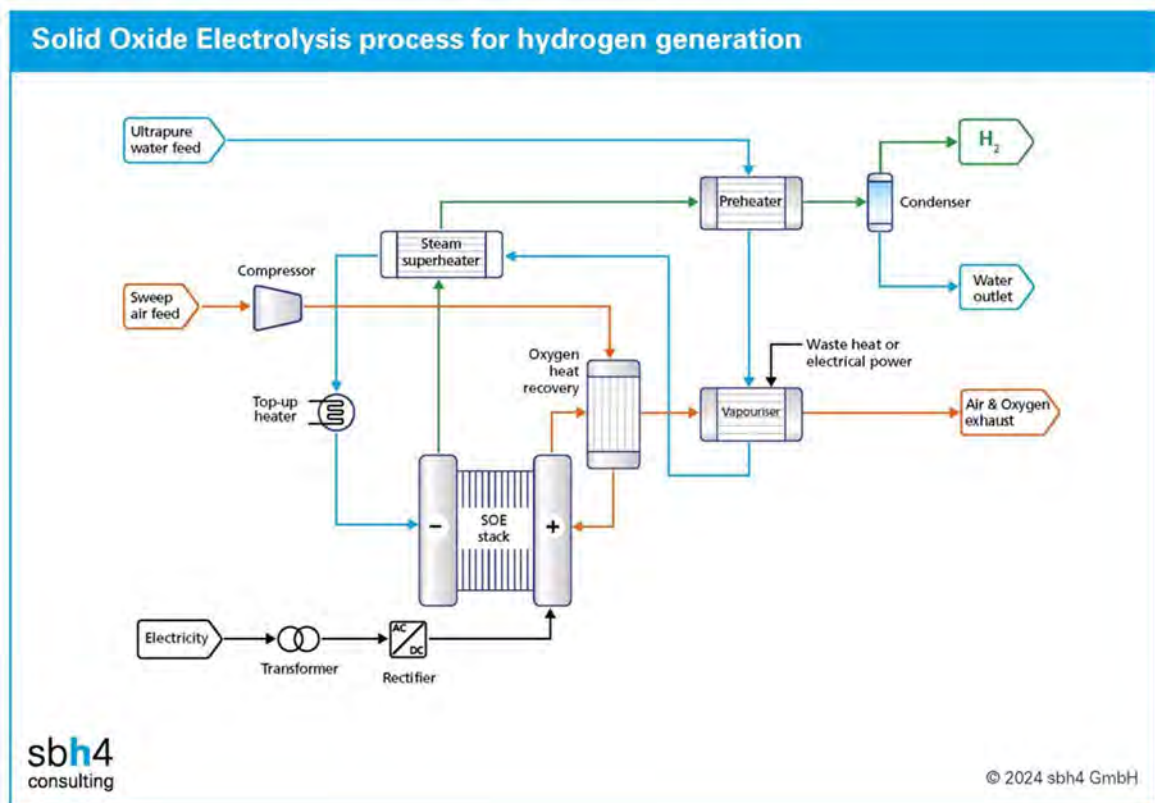
Het **rendement** dat een elektrolyser heeft is van groot belang met betrekking tot het kostenplaatje. Waterstofgas is een energiebron, maar er moet ook energie ingestoken worden om het te produceren.

Een kg waterstof bevat 39,4 kWh aan energie, in een standaard elektrolysesysteem kost het 52,5 kWh aan energie om dit kilo te produceren. Dit betekent dat er een gemiddeld rendement van 75% is. Ongeveer een kwart van de energie gaat hierbij verloren.

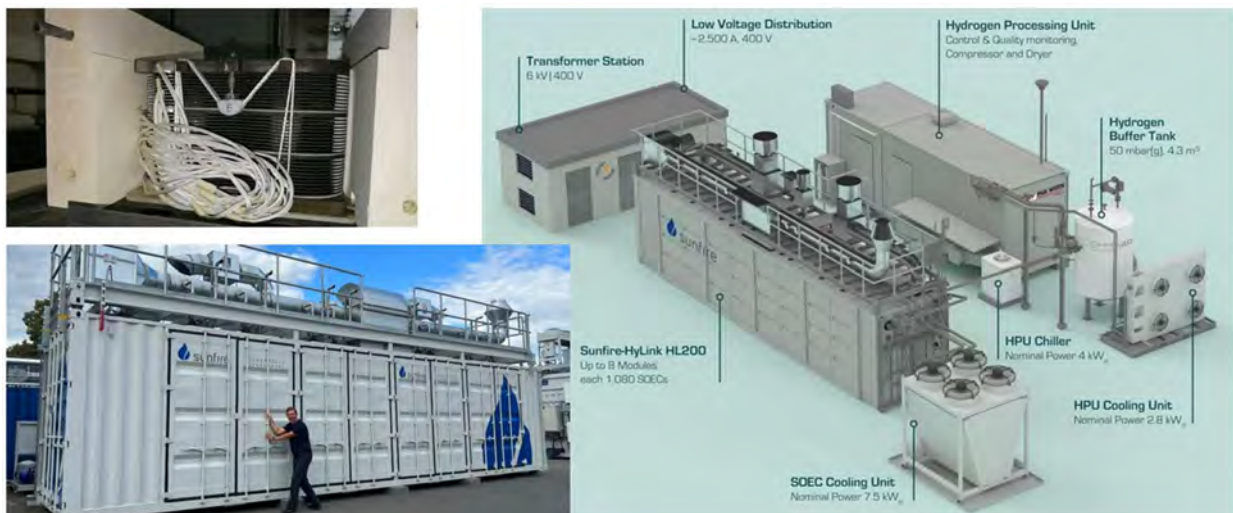
Bij een lage stroom zijn er minder stromingsweerstand van de ionen door het elektrolyt en bij een hoge temperatuur verlopen de reacties sneller. Kort samengevat: hoe lager de stroom en hoe hoger de temperatuur = beter rendement.

Elektrolyten worden gekenmerkt door de temperatuur waarop ze worden gebruikt. Bij een lage temperatuur elektrolyse (**LTE**) spreekt men over AEC en PEM.

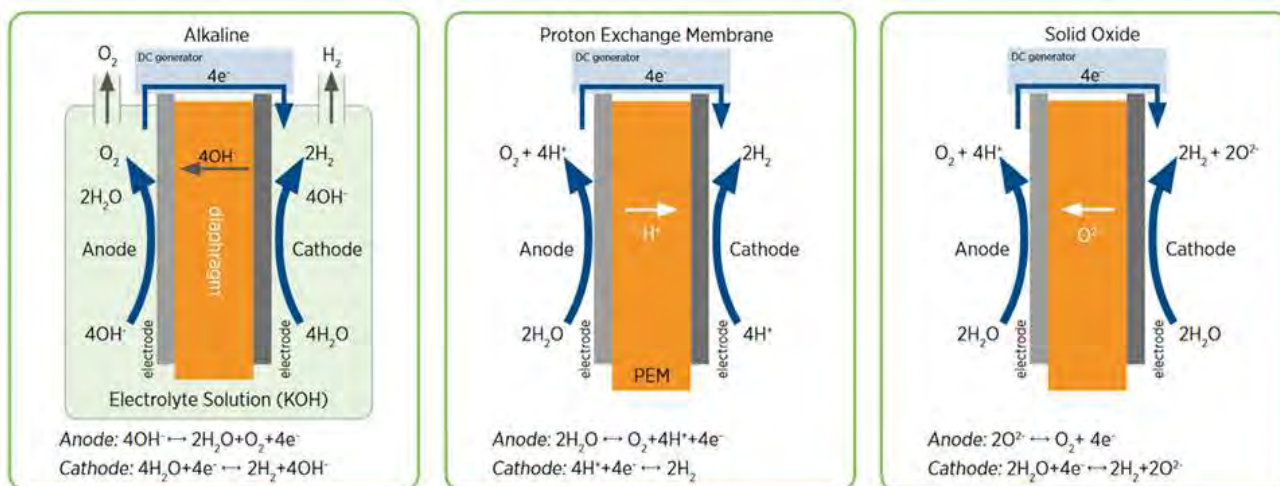
Er bestaat ook **HTE** = hoge temperatuur elektrolyse. Hierbij spreekt men over vaste oxide elektrolyse of **SOE**. Voorlopig is dit nog steeds in een geavanceerd R&D stadium en producten zijn nog niet commercieel beschikbaar. De voordelen zijn naar verwachting een verhoogde conversie – efficiëntie en de mogelijkheid van het produceren van een syngas rechtstreeks van stoom en CO₂, voor gebruik in verschillende toepassingen zoals synthetische vloeibare brandstoffen.



Proces van SOE – electrolyse.



Hoge temperatuur elektrolyse is bijzonder interessant wanneer er een warmtebron is naast de elektrolyse. Het is dan economische efficiënter dan de lage temperatuur elektrolyse. Een deel van de energie wordt nu geleverd als warmte, die is ofwel gratis of goedkoper dan elektriciteit, en daarnaast is de elektrolyse reactie efficiënter bij hogere temperaturen.



Schematische voorstelling van AEC – PEM – SOE.



Plaats de juiste naam bij de onderstaande voorstellingen: PEM – AEC – SOE.
 Wat is het verschil van onderdelen, materialen, werking,...?
 Tip: extra informatie is terug te vinden op het internet.

