

viWTA
Dossier **17**

WATERSTOF

MOTOR VAN DE TOEKOMST?

WATERSTOF MOTOR VAN DE TOEKOMST?

IN HOEVER BEPAALT WATERSTOF ONZE TOEKOMSTIGE ENERGIEVOORZIENING?

Inhoudstafel	2
1. Voorwoord	3
2. Waarom komt waterstof steeds meer in beeld?	5
3. Waterstof: wat is het wel en wat is het niet	6
4. Toepassingen voor waterstof	6
Kaderstuk: De brandstofcel en waterstofverbrandingsmotor	7
5. Energievectoren	9
a. Waterstofproductie	9
b. Elektriciteitsproductie	12
c. Biobrandstofproductie	12
6. Waterstofopslag	14
7. Waterstofdistributie	15
8. Waterstof in Vlaanderen	17
Kaderstuk: Hoe kan een waterstofeconomie eruit zien? Het ideaalbeeld	20
9. De visie van de Europese Commissie	21
10. Wat doen Azië en de Verenigde Staten ?	23
11. Lager energiegebruik en minder broeikasgassen?	25
a. Energie-efficiënt?	25
b. Klimaatvriendelijk?	27
12. Maatschappelijke aspecten	28
a. Hoe (on)veilig is waterstof?	28
b. Wat is de perceptie door de burger?	30
c. Investeren in onderzoek en industriële ontwikkeling?	31
13. Besluiten	33
a. Sterke punten en mogelijkheden van waterstof	33
b. Zwakke punten en hindernissen van waterstof	33
c. Mogelijkheden en hindernissen voor waterstof in Vlaanderen/België	34
14. Beleidsvragen	35
15. Meer informatie	39
16. Afkortingenlijst	40
Bijlage: Feiten en cijfers	41
17. Dankwoord	42
18. Colofon	43

1 | Voorwoord

De rol van waterstof binnen een toekomstig energiesysteem is nog steeds onbeslist. Voorstanders vinden waterstof inzetbaar voor bijna alle toepassingen. Tegenstanders benadrukken de beperkingen van deze energiedrager. Welke verwachtingen kan waterstof waarmaken binnen een toekomstig energiesysteem?

Dit dossier gaat na wat de stand van de technologische ontwikkeling van waterstof is, maar houdt ook rekening met de grote diversiteit qua productie en opslag, distributie en transport, aanwending en verdeelnet. Het beschrijft ook het maatschappelijk draagvlak. Maatschappelijk bestaat er nogal wat weerstand tegenover de introductie van waterstof.

Intussen staat waterstof ook niet alleen met een claim als toeleverancier van de 'toekomstige economie'. Hoe verhoudt die optie zich tegenover de even grote ambities van de sector van de biobrandstoffen? Waarop baseren zich beide claims? Wordt het slechts één van beide dan wel de beide?

Met dit dossier wil viWTA - Samenleving & Technologie het Vlaams Parlement informeren over de maatschappelijke impact van deze ontwikkelingen en de discussiepunten errond. Intussen is de forse vraag naar meer middelen voor het onderzoek naar waterstoftechnologie voelbaar.

Uiteraard is en blijft waterstof inzetbaar in nichemarkten. Nu reeds staat het nut als tussentijds opslagmiddel buiten kijf, bijvoorbeeld bij de introductie van energiebronnen met sterk wisselende opbrengst zoals windparken of fotovoltaïsche zonnecentrales. Welke hiaten moeten dan nog worden gedicht? En wat komt eerst aan bod?

Er blijft nog een belangrijk vraagstuk inzake de onderlinge afstemming tussen vraag en aanbod. De aanbieders wachten met hun ontwikkelingen op een voldoende afzetmarkt, terwijl de vraag uitblijft in afwezigheid van een volwaardig aanbod. Wie is aan zet en via welke aanpak kan deze patstelling worden doorbroken?

Een grootschalige introductie realiseren van waterstof als energiedrager binnen het energiesysteem vergt een heel specifieke dynamiek. Er bestaat weinig kans dat dit spontaan tot een goed resultaat zal komen. De beleidsvraag die zich bijgevolg aandient is: in welke mate is er behoefte aan sturing en overheidsinitiatieven?

Robby Berloznik
Directeur viWTA

WATERSTOF MOTOR VAN DE TOEKOMST?



2 | Waarom komt waterstof steeds meer in beeld?

Waterstof fascineert de mens reeds enkele eeuwen, maar de laatste jaren is de interesse voor waterstof binnen de energievoorziening sterk gegroeid. De "waterstofeconomie" wordt door sommigen zelfs aangehaald als de ultieme oplossing voor de problemen rond energie en milieu.

Die toenemende belangstelling wordt ingegeven doordat steeds duidelijker wordt dat energie een noodzakelijke bouwsteen is voor economische ontwikkeling, maar dat de huidige energievoorziening meer en meer geconfronteerd wordt met de beperkte beschikbaarheid van fossiele energiebronnen. Tachtig procent van de energiebevoorrading in de wereld is afkomstig van fossiele brandstoffen (aardolie, aardgas, steenkool). Deze situatie is op lange termijn onhoudbaar omdat de reserves niet onuitputtelijk zijn. Bovendien zijn deze bronnen geografisch ongelijk verdeeld. Twee derden van de gekende oliereserves zijn bijvoorbeeld gesitueerd in het Midden-Oosten.

Zonder bijzondere maatregelen zal de vraag naar conventionele olie bovendien nog toenemen en leiden tot een verdere stijging van de prijzen. Ook de productie van "niet-conventionele" olie (en aardgas), afkomstig van minder toegankelijke of minder kwalitatieve reserves zal toenemen en/of alternatieve brandstoffen zullen aangewend moeten worden. Voor aardgas geldt een gelijkaardige analyse, met een verschuiving van 10 tot 20 jaar ten opzichte van aardolie.

Naast de afhankelijkheid van energie is er ook het toenemend besef van de noodzaak om het broeikaseffect onder

controle te houden. Om de opwarming van de aarde onder de 2°C te houden, moeten de geïndustrialiseerde landen hun uitstoot tegen 2020 verminderen met 30% en tegen 2050 zelfs met 80%.

De opdracht voor de toekomstige duurzame energievoorziening moet dus zijn dat slechts minimaal gebruik gemaakt wordt van eindige energiebronnen. Ze moet milieuvriendelijk zijn en zo efficiënt mogelijk de energiebronnen omzetten naar de eindgebruikers.

Waterstof biedt het perspectief om uit een brede waaier van energiebronnen via efficiënte technieken energie bij de mensen te brengen, met aanzienlijk minder milieubelastende effecten. Daarom bestaat een steeds grotere belangstelling voor deze technologie.

Waterstof wordt algemeen beschouwd als een mogelijke optie in ons toekomstige energiesysteem omdat het een duurzame, propere en transporteerbare energiedrager kan zijn. Indien waterstof geproduceerd wordt door propere en duurzame processen, in plaats van fossiele brandstoffen, zullen aanzienlijk minder broeikasgassen en andere pollutanten uitgestoten worden.

Waterstof is in feite één van de mogelijke kandidaten om in een koolstofarme brandstof of energiedrager te voorzien. Andere zijn biobrandstoffen (vnl. bio-ethanol, biodiesel, methanol en pure plantaardige olie (PPO)) en hernieuwbare elektriciteit. Elk van deze energiedragers zal in de toekomst een rol gaan spelen. De vraag stelt zich welke energiedrager voor welke toepassing het best kan worden ingezet.

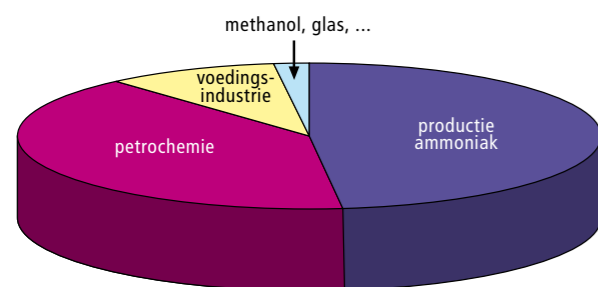
WATERSTOF MOTOR VAN DE TOEKOMST?

3 | Waterstof: wat is het wel en wat is het niet

Waterstof is het lichtste chemische element (H₂) op aarde en het meest verspreide in het heelal. Het komt in de natuur echter niet in zuivere vorm voor, maar wordt enkel gevonden in combinatie met andere elementen, voornamelijk met zuurstof (in water) en met koolstof, stikstof en zuurstof (in levende materialen en fossiele brandstoffen). Belangrijk is dat waterstof niet gelijkgesteld kan worden aan winbare brandstoffen, zoals aardgas, steenkool, aardolie, uranium, enz., maar dat waterstof geproduceerd moet worden. **Waterstof is bijgevolg geen energiebron, maar een energiedrager.** Er is dus energie nodig om zuivere waterstof aan te maken. De bekomen waterstof kan vervolgens als brandstof aangewend worden in diverse toepassingen.

4 | Toepassingen voor waterstof

Op dit moment wordt waterstof bijna uitsluitend gebruikt als een chemische grondstof. De huidige toepassingen



Figuur 1: Huidige toepassingen van waterstof en procentuele verdeling op wereldvlak.

van waterstof worden weergegeven in figuur 1. Op wereldniveau worden momenteel jaarlijks circa 500 miljard m³ aan waterstof verbruikt.

De toekomstige toepassingen van waterstof als energiedrager kunnen onderverdeeld worden in draagbare, stationaire en transporttoepassingen.

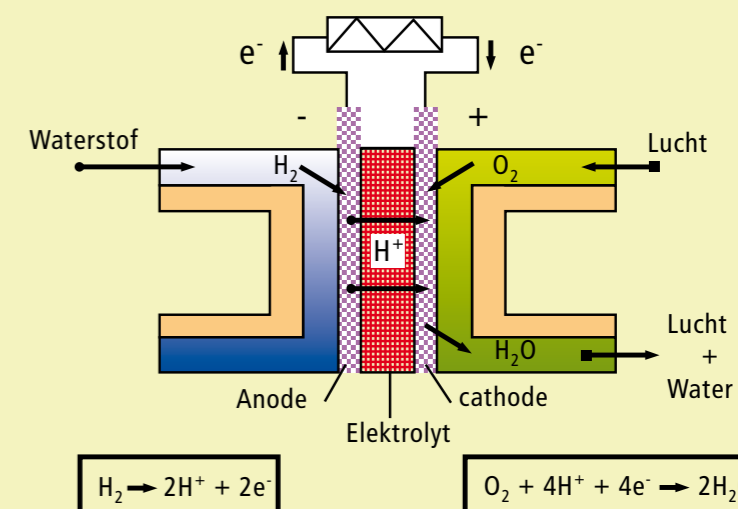
Draagbare brandstofcellen (vermogen van 1 tot 20 W) worden beschouwd als de interessantste markt op korte termijn. Ze kunnen gebruikt worden in tal van elektronische toestellen (laptop, camera, GSM, militaire toepassingen, enz.). Draagbare generatoren (tot 10 kW) kunnen energie voorzien voor bv. back-upvermogen en gespecialiseerde voertuigen.

In het segment van de *stationaire* energiesystemen bestaan twee beloftevolle toepassingen: brandstofcellen met warmtekrachtkoppeling in kleine residentiële en commerciële energiesystemen en grootschalige energiesystemen voor de industrie.

Wereldwijd gaat de meeste aandacht op het vlak van onderzoek, ontwikkeling en demonstratie echter naar het gebruik van waterstof in *transporttoepassingen*. Waterstof kan hierbij gebruikt worden in een verbrandingsmotor, vergelijkbaar met de gangbare benzinemotor, of in een brandstofcel.

De brandstofcel en waterstofverbrandingsmotor

Brandstofcellen leveren elektrische energie via een elektrochemische reactie. Een brandstofcel kan gebruik maken van pure waterstof of van waterstof die, door middel van een omvormer ('reformer'), bekomen wordt uit producten met een hoog waterstofgehalte, zoals methanol, aardgas of zelfs gewone benzine. Binnenin de brandstofcel (zie figuur 2) wordt de waterstof via een elektrolyt gecombineerd met zuurstof uit de lucht. Wanneer de twee gasen met elkaar reageren ontstaan waterdamp, elektriciteit en warmte. De elektriciteit kan worden gebruikt voor de voeding van een elektrisch apparaat, een elektromotor (in een voertuig) of van het elektriciteitsnet. De waterdamp kan eenvoudig afgevoerd worden, bijvoorbeeld via de uitlaat van het voertuig. In een aantal toepassingen (bv. warmtekrachtkoppeling) kan de geproduceerde warmte benut worden.



Figuur 2: Werking van een PEM-brandstofcel (Bron: wikipedia).

De brandstofcel heeft in vergelijking met verbrandingsmotoren een hoger rendement. Brandstofcellen zijn door het ontbreken van bewegende delen bovendien stiller en vereisen minder onderhoud.

Het principe van de brandstofcel is al meer dan 100 jaar gekend, maar om het commercieel interessant te maken dienen de betrouwbaarheid en de levensduur te verbeteren en de kostprijs te dalen, zeker voor bepaalde toepassingen, zoals het gebruik in voertuigen.

Er bestaan verschillende soorten brandstofcellen. Brandstofcellen worden vaak genoemd naar de gebruikte elektrolyt en ze worden onderverdeeld in twee types: laagtemperatuurontwerpen, die werken onder de 200 °C, en hogetemperatuurbrandstofcellen (meestal tussen 600 en 1000 °C). De vijf belangrijkste types zijn weergegeven in tabel 1.

Waterstof kan in voertuigen niet alleen in een brandstofcel gebruikt worden, maar kan ook verbrand worden in een verbrandingsmotor. Door beperkte aanpassingen aan te brengen aan een benzineauto kan deze geschikt gemaakt worden om te rijden op waterstof of op waterstof-aardgasmengsels. Door de specifieke eigenschappen van waterstof is het rendement van de motor hoger dan met andere brandstoffen. Wanneer gebruik gemaakt

WATERSTOF MOTOR VAN DE TOEKOMST?

Type brandstofcel	Afkorting	Werkings-temperatuur	Toepassingen	Ontwikkelings-stadium
Alkaline Fuel Cell	AFC	±80°C	ruimtevaart	ruimtevaart toepassingen
			militaire toepassingen	
Proton Exchange Membrane Fuel Cell	PEMFC	±80°C	transport	vroege prototypes
			grootschalige energieopwekking	
			WKK	
			draagbare energie	
Phosphoric Acid Fuel Cell	PAFC	±200°C	lichte industriële toepassingen	vroege commerciële toepassingen
			kleinschalige energieopwekking	
			zware voertuigen	
Molten Carbonate Fuel Cell	MCFC	±650°C	zwaardere industriële toepassingen	demonstraties in praktijk
			grootschalige energieopwekking	
			WKK	
Solid Oxide Fuel Cell	SOFC	±600-1000°C	zwaardere industriële toepassingen	demonstraties in laboratorium
			grootschalige energieopwekking	
			WKK	
Direct Methanol Fuel Cell	DMFC	±80-150°C	transport	vroege prototypes
			draagbare en kleine toepassingen	

Tabel 1: Overzicht van de belangrijkste types brandstofcellen en hun eigenschappen.

(WKK = installatie voor warmtekrachtkoppeling)

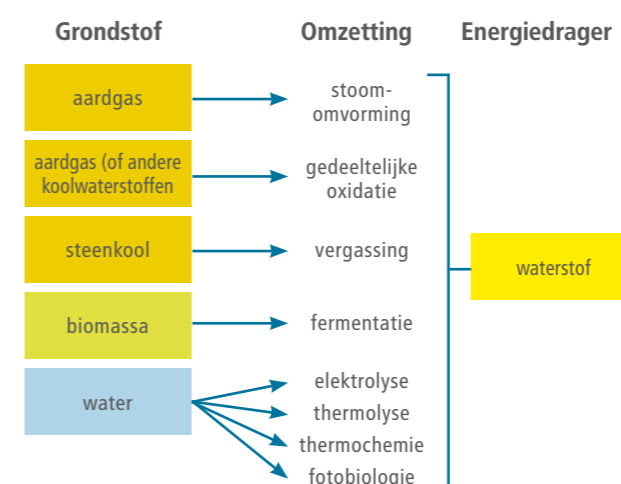
wordt van zuivere waterstof, ontstaat bij de verbranding enkel waterdamp. Er komen echter ook stikstofoxides vrij, die katalytisch kunnen verwijderd worden.

Het gebruik van verbrandingsmotoren op waterstof maakt het mogelijk om ervaring op te doen met de infrastructuur voor de opslag en het tanken van waterstof, in afwachting van de eventuele introductie van brandstofcellen op langere termijn. Inmiddels zijn de eerste auto's ontwikkeld, waarvan de motor zowel gebruik kan maken van benzine als van waterstof, de zogenaamde "bi-fuels" (vb. BMW Hydrogen 7).

5 | Energievectoren

a. Waterstofproductie

Waterstof kan op verschillende manieren geproduceerd worden (zie figuur 3). Het merendeel van de productie gebeurt momenteel echter op basis van fossiele brandstoffen. Stoomomvorming of 'reforming' van *aardgas* is op dit moment de goedkoopste methode die wereldwijd wordt gebruikt voor meer dan 90 % van de waterstofproductie. Hierbij wordt aardgas in aanwezigheid van stoom en/of zuurstof en eventueel een katalysator omgezet in een waterstofrijk gasmengsel. De efficiëntie van dit proces is ongeveer 90 %, dus ongeveer 10 % van de energie-inhoud van het aardgas gaat verloren.



Figuur 3: Overzicht van de verschillende primaire energiebronnen en omzettingsreacties voor waterstofproductie.

Andere productiemethodes vanaf fossiele brandstoffen zijn gedeeltelijke oxidatie van aardgas en vergassing van *kolen*. Bij gedeeltelijke oxidatie reageert aardgas (of andere koolwaterstoffen) samen met zuurstof onder hoge

druk tot H_2 en CO dat dan verder reageert met stoom tot CO_2 . Deze techniek vereist geen extra verwarming, hetgeen een aanzienlijke kostenbesparing betekent. De methode is echter minder energie-efficiënt dan stoomreforming. Qua kosten is deze productiemethode één van de goedkoopste (exclusief de kost van zuurstof). Anderzijds zorgt het hoge koolstofgehalte hier voor veel emissies van CO_2 , dat een broeikasgas is. Hetzelfde geldt voor de steenkoolvergassing: daar reageert de steenkool met waterdamp en zuurstof op hoge temperatuur en wordt een gasmengsel bekomen dat bestaat uit H_2 en CO . Vroeger werd op deze manier stadsgas bereid.

Het gebruik van deze technologieën op grote schaal zou dus gepaard moeten gaan met CO_2 -opslag om de gevolgen voor het klimaat te beperken. Dat houdt in dat CO_2 wordt opgevangen en opgeslagen in holten in de bodem van de aarde. Die techniek staat echter nog in zijn kinderschoenen en wordt voorlopig alleen experimenteel toegepast. Hij is bovendien duur. Er moet ook voldoende opslagcapaciteit in de bodem beschikbaar zijn en het risico bestaat dat deze gassen op termijn opnieuw vrijkomen, waarbij ze een sterke impact op het klimaat zouden kunnen hebben. Een bijkomend nadeel van waterstofproductie met CO_2 -opslag is dat het een schaafeffect heeft, waardoor zeer grote installaties vereist zijn (rond 500 MW), om de kosten omlaag te brengen.

Waterstof kan eveneens geproduceerd worden vanuit *biomassa* (houtige biomassa en biogas), waardoor mogelijk minder CO_2 vrijkomt, in vergelijking met fossiele brandstoffen. Het is echter onwaarschijnlijk dat deze technologie in staat zal zijn waterstof op grote schaal te produceren.

WATERSTOF MOTOR VAN DE TOEKOMST?

Bovendien zal het telen van dergelijke energiegewassen een zware druk uitoefenen op de natuurlijke bronnen en op de beperkt beschikbare landbouwoppervlakte in de wereld. Een nadeel van biomassa is dat die maximaal in 20 % van de energiebehoefte van de Europese Unie kan voorzien, zelfs al zou het hele landbouwareaal in de EU voor de productie van brandstoffen worden gebruikt.

Een andere mogelijkheid is de productie van waterstof door elektrolyse van water. Dit proces is de inverse cyclus van de brandstofcel. Deze methode wordt momenteel gebruikt voor 4 % van de totale waterstofproductie, vooral als de waterstof extreem zuiver moet zijn. Hierbij wordt water door middel van *elektriciteit* gesplitst in zuurstof en waterstof. De benodigde elektriciteit kan geproduceerd worden met klassieke centrales, nucleaire centrales of op een duurzame manier, door middel van waterkracht, windenergie of zonnecellen. Bij waterelektrolyse wordt meer energie verbruikt dan bij de processen die gebruik maken van fossiele brandstoffen: momenteel wordt een rendement van ongeveer 75 % bereikt. Het biedt echter het voordeel dat waterstof lokaal geproduceerd kan worden (bv. in tankstations of thuis) en bovendien bestaat de mogelijkheid om waterstof te produceren vanaf hernieuwbare energiebronnen. Deze techniek staat echter in concurrentie met het rechtstreeks gebruik van elektriciteit.

Water kan eveneens thermochemisch (bij hoge temperatuur) gesplitst worden (thermolyse) in waterstof en zuurstof. De vereiste temperaturen (min. 900 °C) kunnen bereikt worden in *nucleaire* reactoren of door gebruik van geconcentreerde *zonnwarmte*.

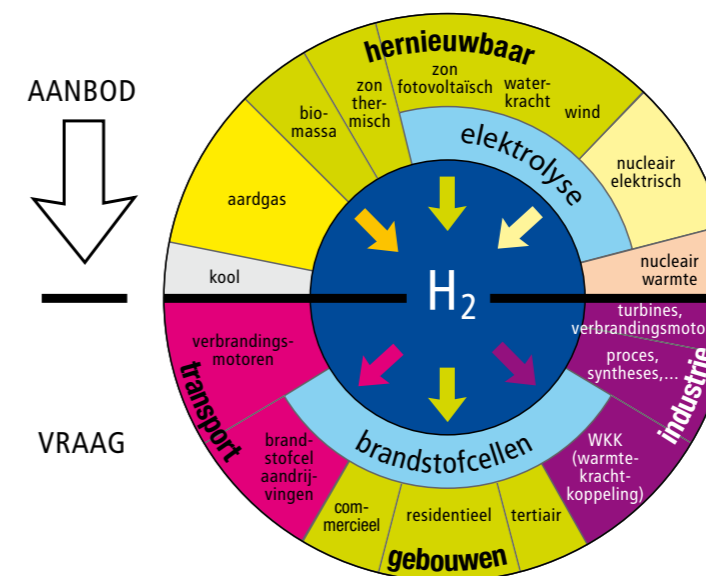
Tot slot kan waterstof geproduceerd worden, door gebruik te maken van fotochemische energie, waarbij *zonlicht* gebruikt wordt, in plaats van de zonnwarmte. Sommige fotosynthetische microben maken bovendien gebruik van licht om waterstof uit water te produceren. Deze fotobiologische technologie is veelbelovend, maar staat nog in de kinderschoenen. Er wordt dan ook uitvoerig onderzoek naar verricht.

Een andere indeling van deze productieprocessen is mogelijk op basis van de lokatie en omvang van de productie. Een centrale en grootschalige productie is ideaal voor CO₂-opslag, maar impliceert grote transportafstanden van waterstof naar de tankstations. Een andere mogelijkheid is het gebruik van kleine productie-eenheden, verspreid over het land. De transportafstanden voor de waterstof distributie zijn dan kleiner.

Op dit moment zijn 'stoomreforming' en in mindere mate elektrolyse de meest gebruikte productiemethoden. De andere aangehaalde productiemethoden zijn nog in ontwikkeling.

Indien waterstofgas geproduceerd wordt aan de hand van hernieuwbare energiebronnen, zoals biomassa, zonne- of windenergie, in plaats van fossiele energie, is het mogelijk om met waterstof een milieuvriendelijke energiedrager te creëren.

Een overzicht van de verschillende energiebronnen waaruit waterstof kan geproduceerd worden en van de mogelijke toepassingen wordt gegeven in figuur 4.



Figuur 4: Primaire energiebronnen, energieomzetters en toepassingen van waterstof (Bron: EC - Hydrogen Energy and Fuel Cells - A vision of our future).

Energiebron	Productie	Distributie	Opslag	Eindgebruik
Aardgas	Stoomreforming	Pijplijn	Metalen vaten	Transport (brandstofcel)
Aardolie	Partiële oxidatie	Tankwagens (onder druk)	Kunststof vaten	Stationair (brandstofcel)
Steenkool	Vergassing	Tankers (vloeibaar)	Metaalhydriden	Draagbaar (brandstofcel)
Biomassa	Elektrolyse	Schip	Chemische hydriden	Verbrandingsmotor
Kernenergie	Thermolyse	Spoor	Koolstof tubes	Bijmenging met gas
Zon	Fotolyse			
Wind	Bioconversie			

Tabel 2: Overzicht van de verschillende energiebronnen, productiepaden, distributie- en opslagmogelijkheden en eindgebruik voor waterstof.

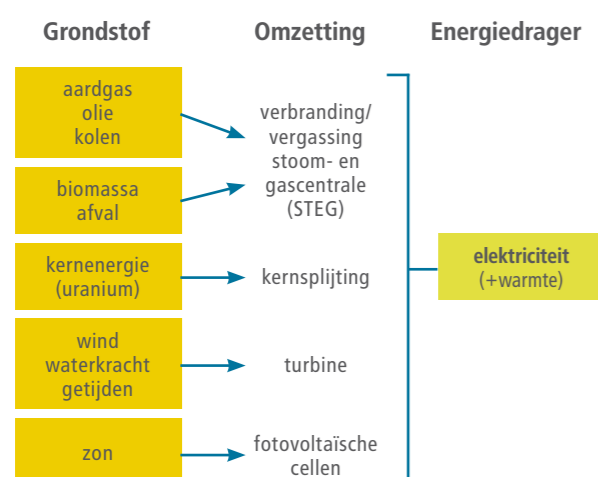
In tabel 2 wordt het 'energiesysteem' van waterstof weergegeven. Het gebruik van waterstof als energiedrager vereist immers de ontwikkeling van een hele keten,

gaande van de productie uit verschillende energiebronnen, de distributie en opslag, tot het finale gebruik ervan.

WATERSTOF MOTOR VAN DE TOEKOMST?

b. Elektriciteitsproductie

Waterstof als energievecteur kan vergeleken worden met elektriciteit. Elektriciteit kan eveneens op verschillende manieren en uit verschillende bronnen opgewekt worden, zoals in figuur 5 is weergegeven.



Figuur 5: Overzicht van de verschillende energiebronnen voor elektriciteitsproductie.

In de meeste elektriciteitscentrales wordt energie opgewekt door het verbranden van (fossiele) brandstoffen om daarmee water te verwarmen. Het water wordt omgezet in stoom die een turbine aandrijft, waarmee dan via een generator elektriciteit wordt geproduceerd. Mogelijke brandstoffen hiervoor zijn olie, steenkool, aardgas, biomassa en afval. Door deze grondstoffen te vergassen, kan eveneens waterstof geproduceerd worden. Daarnaast kan de warmte ook verkregen worden door middel van een kernreactor. Aardgas is ook bruikbaar voor de productie van elektriciteit in een stoom- en gascentrale (STEG).

Wanneer bij de productie van elektriciteit ook de restwarmte gebruikt wordt, spreekt men van 'warmtekrachtkoppeling' (WKK). Er zijn ook centrales die op een andere manier werken, zoals wind-, waterkracht- en getijdencentrales, die rechtstreeks turbines aandrijven, of fotovoltaïsche cellen die gebruik maken van zonlicht om elektriciteit te produceren.

Elektriciteit kan een quasi koolstofneutrale energiedrager zijn, op voorwaarde dat het gegenereerd wordt vanaf een hernieuwbare primaire energiebron, zoals windkracht, zonne-energie of waterkracht. Soms wordt ook kernenergie daartoe gerekend, al is de opwerkingscyclus van kernafval niet koolstofneutraal.

c. Biobrandstofproductie

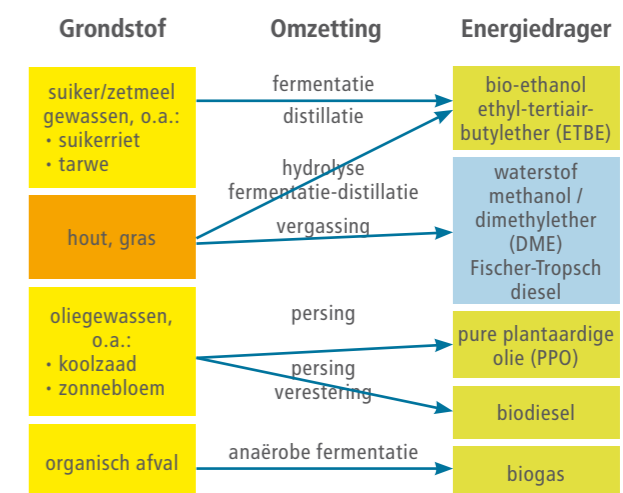
Naast elektriciteit wordt verwacht dat ook biobrandstoffen in de toekomst een belangrijke rol gaan spelen. Biobrandstoffen zijn theoretisch koolstofneutraal, omdat de gewassen waarvan ze afgeleid zijn voor hun groei dezelfde hoeveelheid koolstof uit de lucht opnemen als wordt uitgestoten bij de verbranding. Daarbij moet echter opgemerkt worden dat de teelt en de verwerking van deze gewassen energie-intensief zijn en meststoffen vergen, waardoor de koolstofneutraliteit niet meer opgaat. Daarenboven brengen biobrandstoffen andere problemen met zich mee, zoals concurrentie met voedingsgewassen, druk op landgebruik en bedreiging van waardevolle ecosystemen (vnl. in tropische gebieden). Milieuvoordelen van biobrandstoffen zijn dat ze biologisch afbreekbaar en niet giftig zijn en dat ze weinig zwavel en aromaten bevatten. Op het vlak van de

veiligheid, vertonen de verschillende biobrandstoffen elk hun specifieke kenmerken. Biodiesel wordt bijvoorbeeld als 'ongevaarlijk' geclassificeerd, terwijl bio-ethanol door zijn vluchtigheid als 'zeer licht ontvlambaar' wordt beschouwd (zie bijlage Feiten en Cijfers op pag 41). Net als waterstof, kunnen biobrandstoffen centraal of decentraal geproduceerd worden. Bij een centrale productie treden schaalvoordelen op die mogelijk economische en ecologische voordelen hebben, maar waardoor de transportafstanden vergroten. Wanneer biobrandstoffen lokaal geproduceerd worden, kan dit economische voordelen hebben voor de plaatselijke landbouwer en worden de transportafstanden in principe gereduceerd.

Op dit moment zijn enkel biobrandstoffen van de **eerste generatie** in zekere mate beschikbaar. Het gaat hierbij om biodiesel, bio-ethanol en pure plantaardige olie (PPO) (zie figuur 6). PPO wordt gemaakt uit oliehoudende gewassen, zoals koolzaad, zonnebloem of soja, waarbij de olie uit de zaden geperst wordt. Voor de productie van

biodiesel wordt hierbij nog een chemische stap uitgevoerd, namelijk een verestering, waardoor de olie minder visceus wordt en daardoor beter geschikt is voor gebruik in dieselmotoren. Bio-ethanol, die gebruikt wordt in benzinemotoren, wordt geproduceerd uit gewassen die fermenteerbare suikers of zetmeel bevatten, zoals suikerriet of maïs. Een afgeleide van bio-ethanol, namelijk ETBE (ethyl-tertiair-butylether), kan ook gebruikt worden als additief in benzine.

Tot de **tweede generatie** biobrandstoffen behoren Fischer-Tropsch biodiesel, dimethylether (DME) en methanol. Deze worden gemaakt door vergassing van biomassa, waarbij houtafval, zaagsel en stro als grondstof kunnen gebruikt worden. Bio-ethanol afkomstig van de fermentatie van cellulose uit houtafval en stro, is eveneens een biobrandstof van de tweede generatie. De enige gasvormige biobrandstof is biogas, dat geproduceerd wordt door anaërobe fermentatie van organisch afval, mest of zelfs rioolslib.



Figuur 6: Overzicht van de verschillende biobrandstoffen en hun productiepaden (eerste generatie biobrandstoffen weergegeven in geel/groen, tweede generatie in oranje/blauw).

WATERSTOF MOTOR VAN DE TOEKOMST?

6 | Waterstofopslag

Een belangrijke voorwaarde voor het gebruik van waterstof als energiedrager is de uitbouw van efficiënte opslag- en distributiesystemen. Opslag is nodig voor het gebruik van waterstof in mobiele toepassingen, maar kan ook fungeren als energiebuffer bij elektriciteitsproductie uit hernieuwbare energiebronnen. Windmolens genereren bijvoorbeeld elektriciteit, ook wanneer er geen vraag naar is. Deze elektriciteit kan omgezet worden tot waterstof en vervolgens opgeslagen. Zodra er weer meer vraag is naar elektriciteit, kan deze waterstof dan opnieuw omgezet worden in elektriciteit met behulp van een brandstofcel. Waterstof heeft een hoge energiedichtheid: 1 kilogram waterstof bevat ruim drie keer zoveel energie als 1 kilogram benzine of aardgas. Op basis van volume evenwel, heeft waterstof slechts ongeveer een derde van de energie-inhoud van aardgas en een kwart van die van benzine. Daardoor is het moeilijk om waterstof op een kostenefficiënte manier in kleine volumes op te slaan. Bij omgevingstemperatuur en -druk is waterstof een gas, maar het kan opgeslagen worden als een gas, vloeistof of in een vaste stof.

Als een *gas* kan waterstof opgeslagen worden onder druk. Het gas moet hiervoor samengeperst worden onder hoge druk met speciale compressoren en opgeslagen worden in stalen tanks (zwaar, voor stationaire toepassingen) of composiet tanks (lichter, voor voertuigen). De opslagdruk in deze tanks loopt tegenwoordig op tot 350 en zelfs 700 bar. In tegenstelling tot het vloeibaar maken van waterstof,

vereist de compressie relatief kleine hoeveelheden energie (15 tot 25 % van de energie-inhoud van de waterstof).

Waterstof kan ook als *vloeistof* opgeslagen worden in een supergeïsoleerde tank bij een combinatie van lage temperatuur en druk. Dat koelen kost een aanzienlijke hoeveelheid energie (23 tot 40 % van de energie-inhoud) en een gedeelte van de energie-inhoud gaat continu verloren door verdampingsverliezen (2 tot 4 %). Opslag als vloeistof maakt dat in een klein volume veel energie kan worden opgeslagen maar vereist ook een aantal belangrijke technische maatregelen. Deze vorm is interessant voor transport over lange afstand en wordt ook toegepast in de ruimtevaart.

Bepaalde metalen of metaallegeringen kunnen eveneens waterstof opnemen bij een bepaalde druk en temperatuur. De zogenaamde *metaalhydrides* die ontstaan kunnen de waterstof terug vrijgeven door verwarming. Een metaalhydride-tank wordt als zeer veilig beschouwd. De opslag onder deze vorm vereist veel minder energie dan opslag door compressie of als vloeistof. Nadeel is echter het grotere gewicht.

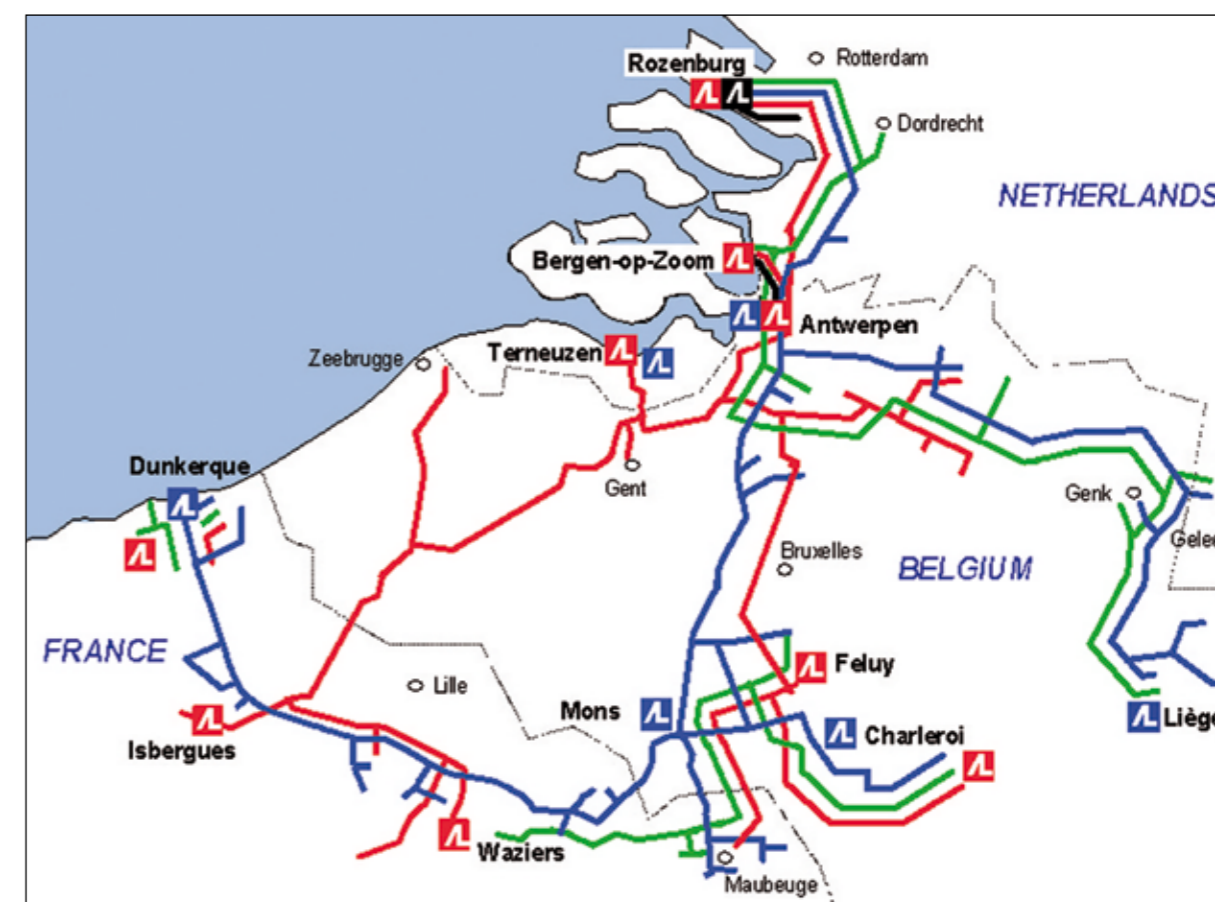
Voor mobiele toepassingen wordt eveneens de mogelijkheid onderzocht om waterstof op te slaan in koolstofnanobuisjes, glazen microsferen en andere chemische verbindingen. Voor stationaire toepassingen is ook de opslag van gasvormig waterstof in ondergrondse holten mogelijk. Dat is zelfs de meest economische oplossing voor grote hoeveelheden, maar de geschikte geologische formaties moeten gevonden worden en de veiligheid dient gegarandeerd, hetgeen door de kleine waterstofmoleculen niet evident is.

7 | Waterstofdistributie

De distributie van waterstof kan georganiseerd worden via pijpleidingen of met vrachtwagens. In de VS bestaat een leidingennetwerk van ruim 700 km, in Europa zelfs 1.500 km. Dankzij de uitgebreide chemische industrie in België, loopt een groot deel van dit netwerk door ons land (zie figuur 7). Over grote afstanden is dit een interessante oplossing. Het Europese NaturalHy project onderzoekt momenteel in hoeverre het aardgasnetwerk in aanmerking komt voor

transport van een combinatie van waterstof en aardgas. Het onderzoeksthema hierbij is vooral in welke mate de materialen gebruikt in de huidige aardgasnetten geschikt zijn voor transport van waterstof (vooral in verband met lekken, aangezien waterstof een veel kleinere molecule is dan aardgas (methaan)).

Waterstof kan ook getransporteerd worden in speciale tankwagens, hetzij in vloeibare, hetzij in samengeperste toestand. Om samengeperste waterstof te transporteren



Figuur 7: Gasdistributienetwerk van Air Liquide in Noord-Europa. Rood = waterstof; Blauw = zuurstof; Groen = stikstof; Zwart = koolstofmonoxide en/of syngas (Bron: www.airliquide.be).

WATERSTOF MOTOR VAN DE TOEKOMST?

over een afstand van 500 km wordt echter ongeveer 30 % van zijn energie-inhoud verbruikt. Voor het transport van vloeibare waterstof is dat ongeveer 5 % maar bij diesel bijvoorbeeld slechts 2,5 %.

Een andere mogelijkheid om waterstof in tankstations aan te bieden, is het ter plaatse ('on-site') produceren ervan, door elektrolyse van water of door 'reforming' op basis van aardgas. De waterstof kan vervolgens samengeperst worden om getankt te worden.

Voor de ontwikkeling van een waterstofinfrastructuur zit-

ten we dus met een typische "kip en ei" discussie. Aan de ene kant argumenteren de autoconstructeurs dat ze geen brandstofcelvoertuigen op waterstof kunnen produceren als er geen tankinfrastructuur voor waterstof aanwezig is. Aan de andere kant staan de waterstofproducenten die beweren dat ze de vereiste waterstof niet kunnen leveren als er niet voldoende brandstofcelvoertuigen zijn om waterstof te tanken. Waterstofverbrandingsmotoren kunnen hier mogelijk een rol spelen, aangezien ze in ontwikkeling minder duur zijn dan brandstofcelvoertuigen. Zo kunnen ze een eerste aanbod in de markt vormen waarbij alvast gebruik gemaakt wordt van de uit te bouwen infrastructuur.



Figuur 8: Brandstofcelbus op waterstof van Van Hool (Bron: Van Hool).

De overheid kan een belangrijke rol spelen, onder meer door het opzetten van demonstratieprojecten (bv. met een vloot overheidsvoertuigen voor de stadsdiensten, openbaar vervoer,...), waarbij zowel productie als gebruik van waterstof geïllustreerd worden.

8 | Waterstof in Vlaanderen

Hoewel het gebruik van waterstof als energiedrager nog in zijn kinderschoenen staat, is het gebruik van waterstof als chemische grondstof goed gekend in de chemische industrie en wordt in Vlaanderen al decennia lang waterstof geproduceerd en verbruikt. Concreet betekent dit dat bij een aantal chemische bedrijven continu waterstof als bijproduct wordt gemaakt (bv. chloorelektrolyse), terwijl andere bedrijven (bv. raffinaderijen) continu een waterstofbehoefte hebben voor hun processen. Die situatie van vraag en aanbod in de industrie zorgt ervoor dat nu reeds op tamelijk grote schaal waterstof getransporteerd wordt. Daarom heeft waterstofleverancier Air Liquide in de jaren '60 besloten om een uitgebreid ondergronds waterstofnet aan te leggen. Dat ondergrondse netwerk van pijpleidingen is bijna 900 km lang en vormt het grootste leidingennetwerk voor waterstof ter wereld. Het zorgt dan ook voor het transport van waterstof naar bedrijven van Noord-Frankrijk tot Zuid-Nederland (zie figuur 7). De industriegebieden rond Antwerpen en Rotterdam vormen immers één van de grootste chemische en petrochemische clusters ter wereld, en vertegenwoordigen 12 % van de totale Europese raffinagecapaciteit. Naast Air Liquide, zijn natuurlijk ook de andere spelers op het vlak van waterstof distributie actief

op de Vlaamse markt (Linde, Air Products, Praxair,...). Hoewel waterstof- en brandstofceltechnologie nog in volle ontwikkeling zijn, dient een aantal eindgebruikers zich aan als actieve 'co-ontwikkelaars'. Sinds juni 2007 rijdt tussen Lier en Antwerpen een brandstofcelbus van Van Hool op waterstof (figuur 8). De bus wordt getest in samenwerking met De Lijn en zal ingezet worden gedurende een demonstratieperiode van 6 maanden. Dat ontwikkelings- en demonstratieproject is een voorbeeld van een publiek-private samenwerking. Het wordt door de Vlaamse overheid ondersteund en kost in totaal 3,3 miljoen euro. In 2007 werd in Brussel een tijdelijk testprogramma opgesteld door Total, BMW en Linde. Een eerste waterstof tankstation werd geïnstalleerd waarbij de waterstof wordt opgeslagen en verdeeld in vloeibare vorm, als brandstof voor de waterstofvoertuigen van BMW. In het uiteindelijke tankstation zal eveneens gasvormige waterstof kunnen getankt worden voor o.a. bussen. De eerste BMW-wagen met een waterstofverbrandingsmotor werd in mei 2007 overhandigd aan de Europese Commissie.

Om in Vlaanderen maximaal te profiteren van deze buitenlandse ontwikkelingen en deze ontwikkelingen zo veel mogelijk in Vlaanderen te laten integreren ondersteunt het IWT sinds 2002 de vzw 'Vlaams Samenwerkingsverband Waterstof en Brandstofcellen' (VSWB). Dat samenwerkingsverband telt onder voorzitterschap van Umicore en met coördinator VITO momenteel 35 leden die interesse hebben en/of actief zijn in het domein van de waterstof- en brandstofceltechnologie. De bedrijven en onderzoeksgroepen die op dit moment lid zijn van VSWB zijn opgenomen

WATERSTOF MOTOR VAN DE TOEKOMST?

in tabel op pagina 42. Naast deze bedrijven en instellingen zijn er in Vlaanderen echter nog anderen die bezig zijn met het thema waterstof en brandstofcellen.

Op het vlak van stationaire systemen heeft het Vlaamse Intensys begin 2007 bij "Living Tomorrow" in Vilvoorde (figuur 9) een warmtekrachtkoppelingssysteem (WKK) geïnstalleerd op basis van de alkalische brandstofceltechnologie. Er bevinden zich in België/Vlaanderen nog andere technologische ontwikkelaars van brandstofcellen, zoals Umicore en Solvay, die in 2006 een joint-venture hebben

opgericht onder de naam Solvicore. Op het vlak van water-elektrolyseurs (met name alkalische technologie) bevindt zich in Vlaanderen een belangrijk Europees zwaartepunt van productie en onderzoek bij Hydrogenics Europe. De technologie is oorspronkelijk ontwikkeld als een spin-off van een onderzoeksprogramma in het Studiecentrum voor Kernenergie (SCK) te Mol.

Ook op onderzoeksvlak heeft Vlaanderen een erkende expertise uitgebouwd. Zo heeft VITO een testfaciliteit voor

brandstofcellen en is het betrokken bij twee Europese projecten rond waterstof (ACCEPT en PREMIA). Ook de Vrije Universiteit Brussel is reeds jaren actief op het gebied van elektrische, hybride en brandstofcelvoertuigen en is betrokken bij vier Europese onderzoeksprojecten (SUBAT, HyHeels, Intellicon en HarmonHy). Aan de Universiteit

Gent wordt dan weer actief onderzoek verricht naar waterstofverbrandingsmotoren. De UGent participeerde in het Europese ZEMBUS project. De KULeuven analyseert de economische gevolgen van het mengen van waterstof in het aardgasnetwerk en de KHLim is actief in demonstratieprojecten van brandstofcellen.



Figuur 9: Stationaire brandstofcel PIII van Intensys bij Living Tomorrow in Vilvoorde (Bron: VITO).

Europese onderzoeksprojecten aan Vlaamse universiteiten

EU Project	Betrokken Vlaamse Universiteit	Onderzoeksdomein	Website
SUBAT	Vrije Universiteit Brussel (Prof. Van Mierlo)	Batterijen voor hybride en brandstofcelvoertuigen	www.battery-electric.com
HyHeels	Vrije Universiteit Brussel (Prof. Van Mierlo)	Energieopslag voor hybride en brandstofcelvoertuigen	www.vito.be/hyheels
Intellicon	Vrije Universiteit Brussel (Prof. Van Mierlo)	Ontwikkeling van brandstofcel-hybride aandrijvingen	www.intellicon.info
HarmonHy	Vrije Universiteit Brussel (Prof. Van Mierlo)	Regelgeving omtrent waterstof- en brandstofceltechnologieën	www.harmonhy.com
ZEMBUS	Universiteit Gent (Prof. Sierens)	Zero Emission Bus - Demonstratieproject waterstof-bus met verbrandingsmotor	www.floheacom.ugent.be/Transport/transp_res_demo_en.htm

Tabel 3: Europese onderzoeksprojecten aan Vlaamse universiteiten

WATERSTOF MOTOR VAN DE TOEKOMST?

Hoe kan een waterstofeconomie eruit zien? Het ideaalbeeld.

Onder een waterstofeconomie verstaat men een samenleving waarin het energiegebruik op grote schaal gebruik maakt van waterstof als energiedrager. Een geïdealiseerd beeld van een dergelijke economie wordt geschetst in figuur 10. Een typisch kenmerk is dat het vervoer gebruik maakt van waterstof als brandstof, doorgaans met behulp van brandstofcellen. De elektriciteit wordt ook decentraal opgewekt in de vorm van warmtekrachtkoppeling, op het niveau van woningen en kantoren. Energiegebruik in het vervoer en in huis kunnen ook op een slimme manier gecombineerd worden. De auto kan thuis volgetankt worden met de daar beschikbare waterstof, maar de auto kan omgekeerd ook zelf elektriciteit leveren voor de woning. Waterstof zou bovendien kunnen gemaakt worden uit wind- en zonne-energie, maar ook uit fossiele brandstoffen waarbij CO₂ wordt opgeslagen. Dit is natuurlijk een idealistisch beeld, waaraan een aantal belangrijke technisch-economisch-organisatorische aandachtspunten kleven.

De eerste, zeer voorzichtige stapjes worden momenteel gezet in het testen van de haalbaarheid van waterstof als energiedrager en de toekomst zal leren in hoeverre waterstof op bepaalde deelgebieden een echte rol van betekenis zal kunnen gaan spelen.

De overgang van de fossiele-brandstofeconomie zoals we ze vandaag kennen naar een volwaardige waterstofeconomie zal niet in één stap gebeuren. Als waterstof als energiedrager even belangrijk zou worden als elektriciteit, moet de nodige infrastructuur ontwikkeld worden. Daarin moeten waterstofproductie en -opslagfaciliteiten opgenomen zijn, alsook distributie en levering van waterstof. Afhankelijk van de bron waaruit waterstof geproduceerd wordt en de vorm waarin het geleverd wordt, kunnen veel alternatieve infrastructuren beschouwd worden.

Een stapsgewijze introductie van de waterstofinfrastructuur zou er als volgt kunnen uitzien:

1. Gebruik van waterstof dat als afvalproduct vrijkomt bij industriële processen, getransporteerd door tankwagens;
2. Een aardgasnetwerk met waterstofproductie d.m.v. plaatselijke 'aardgasreformers' zonder CO₂-opslag (tankstation en/of woonwijk met brandstofcelnetwerk voor verwarming en stroom);
3. Centrale waterstofproductie met grote 'aardgasreformers' of kolenvergassers met CO₂-afvang en -opslag en een pijpleidingnetwerk.



Figuur 10: Voorbeeld van een waterstofeconomie (Bron: www.Gll.com).

9 | De visie van de Europese Commissie

In 2002 werd een strategische oefening gehouden door enkele toonaangevende bedrijven en onderzoekers (*High Level Group on Hydrogen and Fuel Cells*). Bij dit select gezelschap van 19 experts waren twee Belgische bedrijven vertegenwoordigd: Solvay en Vandenborre Technologies (nu Hydrogenics). Op basis van hun analyse vormde de Europese Commissie zich een visie op waterstof- en brandstofceltechnologie. Hieruit ontstond in 2004 een samenwerkingsverband onder de naam *European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform (HFP)*.

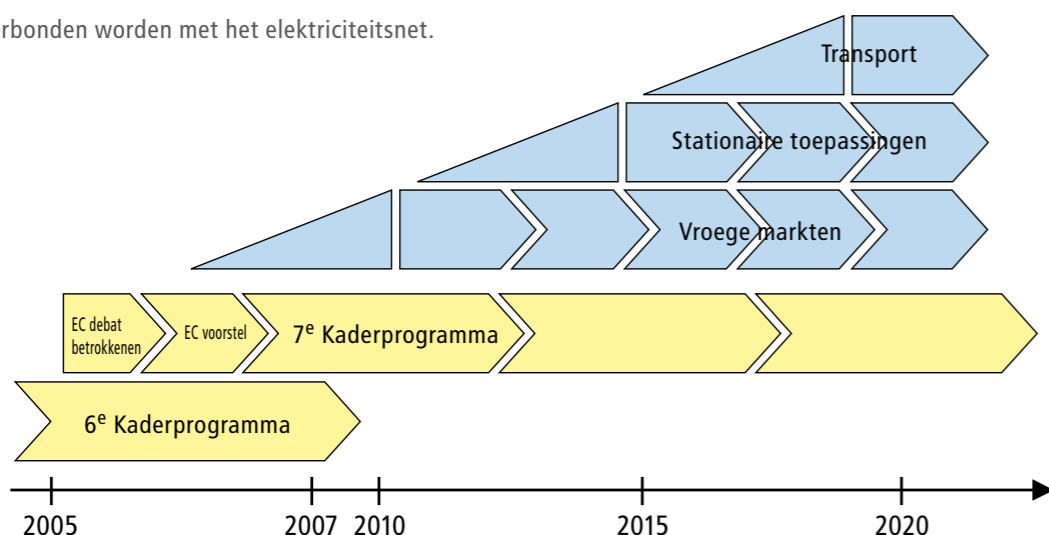
Dat HFP heeft in 2005 een 'deployment strategy' ontwikkeld (zie figuur 11), waarbij in grote lijnen geschetst wordt hoe de overgang naar waterstof en brandstofcellen zou moeten gebeuren. Op korte termijn (tot 2010) zal de brandstofceltechnologie geïntroduceerd worden in nichemarkten, vooral gericht op stationaire systemen, maar ook op bv. stadsbussen, rolstoelen of vorkheftrucks. Hiervoor is immers geen uitgebreide infrastructuur of brandstofbevoorrading nodig. In die eerste fase kan aan de maatschappelijke aanvaarding van de nieuwe technologie gewerkt worden, zodat markten kunnen gestimuleerd worden. Om de technologie op grote schaal te kunnen toepassen is eveneens onderzoek vereist naar o.a. performante, goedkope brandstofcellen. In een volgende fase (tot 2020) kan gestart worden met de introductie van de brandstofceltechnologie in voertuigen en grote stationaire energiesystemen.

Een belangrijk 'ijkpunt' hierin zijn de concrete ambities voor het jaar 2020 (of 'snapshot 2020'). De markt voor draagbare brandstofcellen (in kleine elektronische toestellen, vb. computers) is potentieel zeer groot. De Europese Unie verwacht een verkoop van ongeveer 250 miljoen stuks per jaar vanaf 2020. De toegang op de markt zou eenvoudiger moeten zijn dan voor andere brandstofceltoepassingen, aangezien weinig overheidssteun nodig is en de markt die introductie kan sturen. Draagbare generatoren (doorgaans tot 10 kWe) zouden tegen 2010 te koop moeten zijn. Er wordt tegen 2020 een potentiële omzet van zo'n 100.000 stuks per jaar verwacht. Voor stationaire energiesystemen zou het zelfs mogelijk moeten zijn jaarlijks tot 200.000 systemen te verkopen. De massale invoering van waterstof als energiedrager in de transportsector zal volgens de verwachtingen trager verlopen dan bij de stationaire systemen. Een optimistische schatting verwacht dat vanaf 2020 in de EU jaarlijks tussen 0,4 en 1,8 miljoen voertuigen op waterstof zouden verkocht worden. Deze zouden dan slechts enkele procenten uitmaken van het totale wagenpark. Bovendien vergen ze enkele duizenden waterstoftankstations en een hele waterstofinfrastructuur.

Waterstof wordt tot 2020 nog steeds geproduceerd uit fossiele brandstoffen, maar zal geleidelijk overgaan naar hernieuwbare energiebronnen. Grote demonstratieprojecten dienen eveneens opgestart te worden voor de opslag van CO₂. Op lange termijn (na 2020) wordt verwacht dat fossiele brandstoffen gedeeltelijk zullen vervangen zijn door een mix van hernieuwbare energie en kernenergie.

WATERSTOF MOTOR VAN DE TOEKOMST?

gie. Het waterstofnetwerk zal snel uitbreiden en grotendeels verbonden worden met het elektriciteitsnet.



Figuur 11: Schema van de marktontwikkeling (blauw) en R&D (geel) in de 'Deployment strategy on Hydrogen & Fuel Cells' van de Europese Commissie.

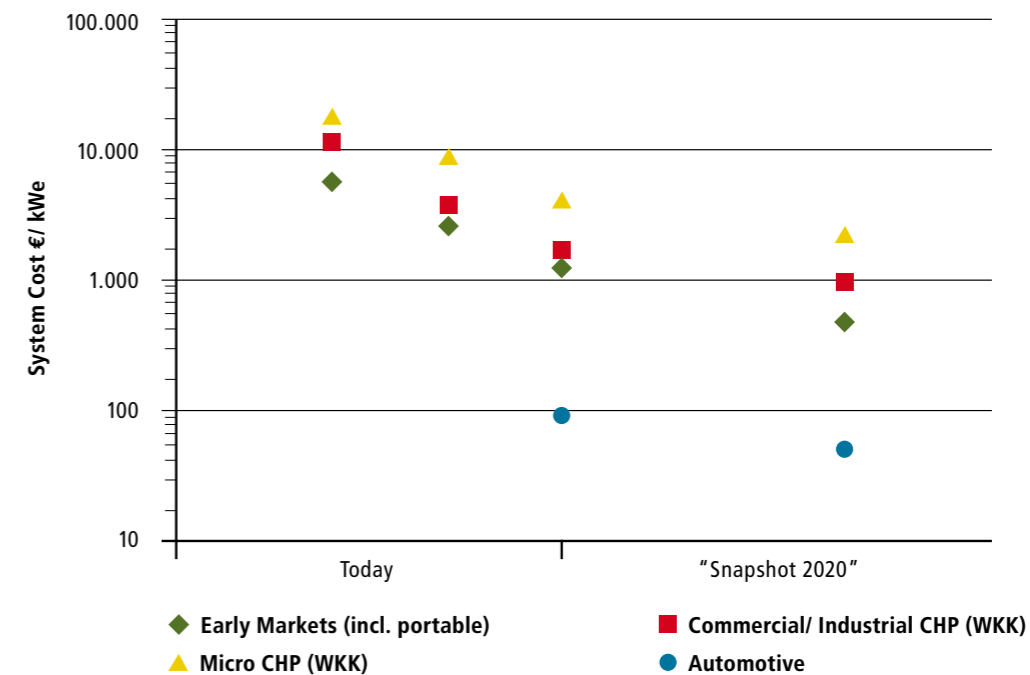
Om deze ambities te bereiken, is een behoorlijke daling nodig van de kost van brandstofcellen (zie figuur 12), evenals een significante verbetering van hun levensduur. Vandaag kosten brandstofcellen systemen, ongeacht hun toepassing, ongeveer 5.000 - 10.000 €/kW. Deze prijs wordt beïnvloed door de beschikbare technologieën en in het bijzonder door de beperkte productievolumes. De kostprijdoelstellingen voor brandstofcellen tegen 2020, evenals de doelstellingen voor de levensduur, zijn weergegeven in tabel 4. De doelstelling voor brandstofcellen in voertuigen (< 100 €/kW) is bepaald om te kunnen concurreren met de kostprijs voor een verbrandingsmotor (50 €/kW), rekening houdend met het lager brandstofverbruik van een brandstofcel. Om deze richtprijzen te kunnen halen, is nog veel onderzoek nodig. Groot-scha-

lige demonstratie- en proefprojecten zijn eveneens essentieel, om investeringen te stimuleren in de productie van grote volumes aan lage kosten.

	Kostprijs ¹ (€/kW)	Levensduur ² (uur)	Meest geschikte type BC
Draagbare BC	1000-2000	> 1000-5000	PEMFC, AFC, Sommige SOFC
Draagbare generatoren	500	n.a.	PEMFC, DMFC
Stationaire BC	1000-2000	> 30.000-50.000	PEMFC, SOFC
Voertuig BC	< 100	> 5000	PEMFC, AFC, Sommige SOFC

Tabel 4: Europese kostprijs- en levensduurdoelstellingen voor verschillende types brandstofcellen (BC).

¹ Doelstellingen voor 2020
² Doelstellingen voor 2015



Figuur 12: Timing en kostencurve van de brandstofcelmarkten, waarbij geïllustreerd wordt hoe vroege markten kunnen zorgen voor een vermindering van de kost voor waterstof- en brandstofceltechnologieën (Bron: HFP Deployment Strategy, augustus 2005).

Een dergelijke steun kan op Europees vlak gebeuren, in het kader van het Zevende Kaderprogramma. Hierbij wordt vooral ingegaan op de oprichting van een Joint Technology Initiative (JTI), waarbij de belangen van de publieke en private sector samengebracht worden, om een programma rond onderzoek, technologische ontwikkeling en demonstratie te verwezenlijken. In het verleden werden reeds demonstratieprogramma's gefinancierd, zoals het Europese CUTE-project, waarbij 33 waterstofbussen getest worden in 9 Europese steden.

10 | Wat doen Azië en de Verenigde Staten ?

Zowel in Azië als in Noord-Amerika, zien we een toename van de inspanningen op het vlak van ontwikkeling en toepassing van waterstoftechnologie. Interessant hierbij is op te merken dat de drijfveren voor waterstoftechnologie in deze gebieden verschillen.

In de Verenigde Staten zijn de belangrijkste drijfveren het verzekeren van de energievoorziening en een verminderde afhankelijkheid van olie als energiebron. Voor Canada, met enkele belangrijke Canadese technologie-

WATERSTOF MOTOR VAN DE TOEKOMST?

bedrijven, is de belangrijkste drijfveer de ondersteuning van deze technologie.

In Japan en Korea wordt waterstoftechnologie in het streven naar energievoorzieningszekerheid ook een belangrijk thema, maar wordt waterstof vooral gezien als belangrijke innovatie voor Japanse en Koreaanse technologie (automobielenindustrie, draagbare toepassingen, ...). In India en China, waar nog grootschalige energie-infrastructuren moeten worden opgebouwd, wordt waterstoftechnologie beschouwd als een belangrijke stap in de ontwikkeling van een duurzame energievoorziening.



Vergelijkbare cijfers over onderzoeksbudgetten in de verschillende continenten zijn niet beschikbaar, maar indicatief kan gesteld worden dat de overheden in Europa, de Verenigde Staten en Japan elk ongeveer 250 à 300 miljoen euro per jaar beschikbaar stellen: op wereldniveau gaat vanuit de overheden jaarlijks ongeveer 1 miljard euro naar waterstofonderzoek¹. Daarnaast investeert de private sector ook in onderzoek en ontwikkeling op het vlak van waterstoftechnologie: het Internationaal Ener-

gie Agentschap (IEA) raamt de private inspanningen op circa 3 miljard euro per jaar².

In de Verenigde Staten gaan de meeste inspanningen naar het ontwikkelen van voertuigen en tankinfrastructuur, waarbij Californië de hoofdrol speelt. Ook gaat hier recent meer en meer belangstelling uit naar het efficiënt gebruik van steenkool als energiebron voor waterstoftechnologie.

In Japan is ook de autosector erg belangrijk, maar men beschouwt er, vanuit de gasector, ook kleinschalige stationaire brandstofcellen (1 kW) als warmtekracht-systemen voor huizen als een interessant segment. Van deze stationaire systemen zijn momenteel meer dan 1.000 systemen "on-site" geïnstalleerd en in testfase.

Elk land werkt momenteel zijn eigen "roadmap" voor waterstofontwikkeling en -toepassing uit. Zoals de Europese doelstellingen, zijn ook de doelstellingen in de andere werelddelen meestal erg ambitieus.

De voortdurend toenemende inzet van industrieel aangestuurde R&D maakt dat technologische vorderingen elkaar sneller opvolgen en dat de meeste toepassingsdomeinen voor waterstoftechnologie zich in de prototypefase bevinden.

Belangrijke open vraag blijft hoe snel de prototypefase kan overgaan in een "pre-commerciële fase".



11 | Lager energiegebruik en minder broeikasgassen?

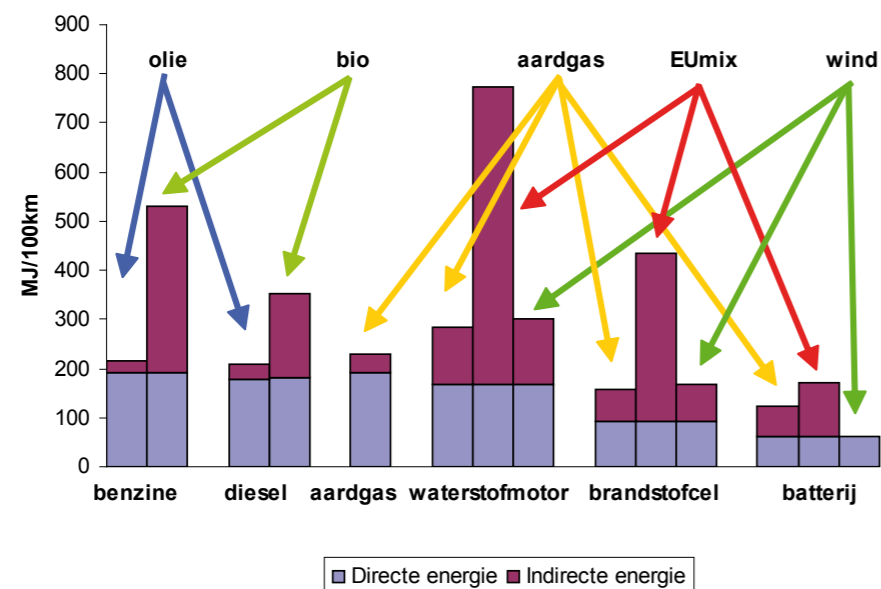
Waterstof kan uit verschillende energiebronnen opgewekt worden (zie hoofdstuk 5): fossiele energiebronnen, nucleaire energie en alternatieve energiebronnen (wind, waterkracht, zonnecellen, enz.). Welke productiepaden uiteindelijk gekozen zullen worden voor productie op grote schaal is nog niet duidelijk. De keuze van deze paden zal een doorslaggevende invloed hebben op de totale energie-efficiëntie en op de productie van broeikasgassen. Om dit te illustreren, wordt hieronder een vergelijking gemaakt voor het gebruik van waterstof bij personenauto's.

a. Energie-efficiënt?

Onderstaande analyse, gebaseerd op gegevens van EUCAR (het R&D-netwerk van de Europese automobielensector), geeft een projectie van het *well-to-wheel* energieverbruik van personenwagens in 2010 en dit voor verschillende brandstoffen en productietechnieken. Daarbij wordt zowel het directe energieverbruik tijdens het gebruik van het voertuig bekeken, als het indirecte verbruik tijdens de productie van de brandstof of energiedrager. De resultaten zijn weergegeven in figuur 13.

Voor diesel en benzine wordt een extrapolatie gemaakt naar de verwachte technologie in 2010. Deze wordt ver-

WATERSTOF MOTOR VAN DE TOEKOMST?

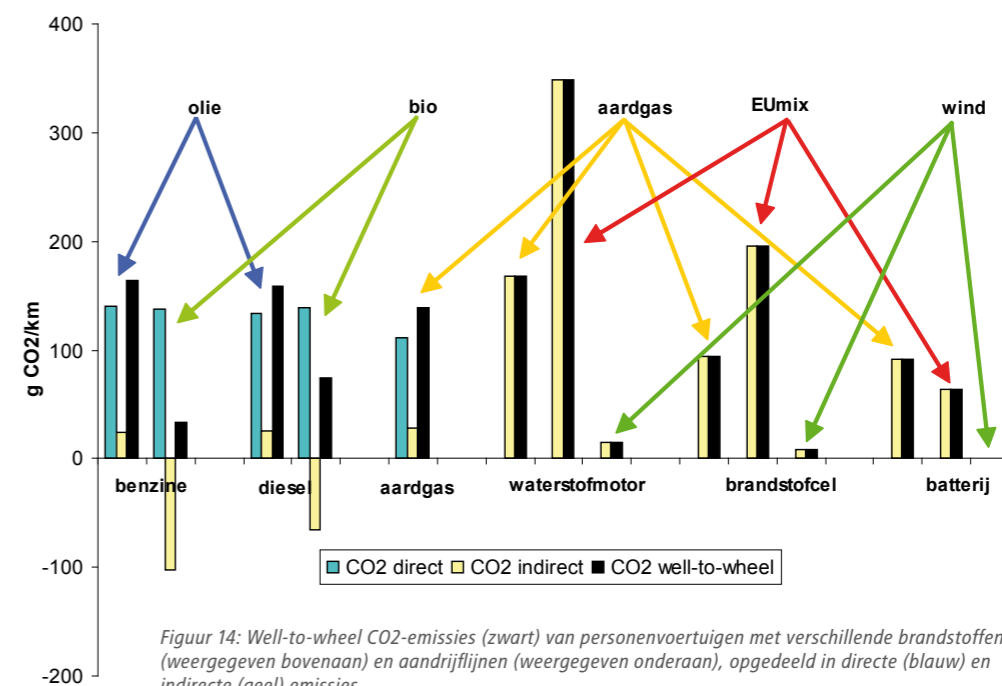


Figuur 13: Projectie van het well-to-wheel energiegebruik van personenauto's met verschillende energiedragers en aandrijflijnen in 2010, opgesplitst in direct (tank-to-wheel of TTW) en indirect (well-to-tank of WTT) energiegebruik. De verschillende energiedragers zijn bovenaan weergegeven, de mogelijke aandrijflijnen onderaan.

geleken met bio-ethanol en biodiesel (sojamethylester of SME). Daarbij zijn de diesellootvoertuigen uitgerust met een roetfilter. Voorts wordt gekeken naar het gebruik van aardgas in een verbrandingsmotor. Een onderscheid wordt gemaakt tussen het gebruik van waterstof in een verbrandingsmotor of in een brandstofcel. Waterstof kan opgewekt worden op basis van aardgas (*Aardgas*), elektriciteit overeenstemmend met de Europese mix (*EU-mix*) of elektriciteit opgewekt op basis van windenergie (*Wind*). De elektriciteit kan ook rechtstreeks gebruikt worden in een batterij-elektrisch voertuig. Hierbij wordt ook een onderscheid gemaakt naar de productie van de elektriciteit uit windkracht of de Europese mix.

Uit de figuur blijkt dat het voordeel van waterstof vooral zit in het lager direct of *tank-to-wheel* energiegebruik, wanneer gebruik gemaakt wordt van een brandstofcel,

maar dat zulks ten koste gaat van de indirecte of *well-to-tank* energie die nodig is voor de productie van waterstof. Niettegenstaande het hogere rendement van een waterstofverbrandingsmotor ten opzichte van een benzine-motor, blijkt een waterstofverbrandingsmotor tot 2010 qua energiegebruik geen alternatief voor benzine en diesel te zijn. De reductie van het verbruik in het voertuig is onvoldoende om te compenseren voor de hogere energie die vereist is voor de productie van waterstof. Het gebruik van waterstof in een brandstofcel-elektrisch voertuig kan wel een alternatief vormen, op voorwaarde dat de waterstof niet geproduceerd wordt met de EU-mix, maar op basis van aardgas of windkracht. Uit deze analyse blijkt ook dat men bijna drie keer meer energiecentrales (bv. windmolens) moet bouwen, wanneer waterstof wordt gebruikt als energiedrager voor een brandstofcel-elektrisch voertuig, dan wanneer men de geproduceerde elektriciteit rechtstreeks



Figuur 14: Well-to-wheel CO₂-emissies (zwart) van personenauto's met verschillende brandstoffen (weergegeven bovenaan) en aandrijflijnen (weergegeven onderaan), opgedeeld in directe (blauw) en indirecte (geel) emissies.

zou gebruiken in een batterij-elektrisch voertuig. Het batterij-elektrisch voertuig waarbij elektriciteit gegenereerd wordt op basis van windenergie blijkt uit deze studie de meest energie-efficiënte optie te zijn. Een concurrentieslag tussen beide technologieën kan verwacht worden.

De verbrandingsmotorvoertuigen en brandstofcelvoertuigen kunnen gehybridiseerd worden, door gebruik te maken van een batterij. Hierdoor zal het energiegebruik weergegeven in figuur 13 dalen met 15 tot 30%.

b. Klimaatvriendelijk?

Doordat waterstof zelf geen koolstof bevat, vindt bij de omzetting ervan geen emissie van koolstofdioxide (CO₂) plaats. Het zijn de primaire energiebronnen waaruit de waterstof wordt gemaakt en het rendement van de gehele keten van bron tot eindgebruik ('well-to-wheel') die bepalen hoeveel

CO₂ uiteindelijk vrijkomt. In het begin zal waterstof waarschijnlijk grotendeels geproduceerd worden op basis van fossiele brandstoffen, zoals aardgas en steenkool. Zulke processen stoten vaak meer CO₂ uit dan wanneer fossiele brandstoffen rechtstreeks gebruikt worden in een verbrandingsproces (zie figuur 14). Echter, wanneer waterstof geproduceerd wordt in een gecentraliseerde fabriek, zal het eventueel mogelijk zijn om de CO₂ te vangen en op te slaan, waardoor deze waterstof toch klimaatneutraal kan zijn.

Indien waterstof geproduceerd moet worden met zeer geringe CO₂-uitstoot, is het noodzakelijk om waterstof te produceren uit kernenergie of uit hernieuwbare energiebronnen, zoals biomassa, wind-, water- of zonne-energie, of eventueel uit fossiele brandstoffen, indien de CO₂ kan worden opgeslagen. Waterstof uit kernenergie is nagenoeg klimaatneutraal, maar gaat wel gepaard met

WATERSTOF MOTOR VAN DE TOEKOMST?

de productie van radioactief afval. Uit figuur 14 blijkt bovendien dat het gebruik van waterstof de minste CO₂-uitstoot genereert, wanneer het geproduceerd wordt uit windenergie en gebruikt wordt in zowel een brandstofcel-elektrisch voertuig als in een verbrandingsmotor. Ook uit deze analyse blijken batterij-elektrische voertuigen, rekening houdende met de productie van elektriciteit, minder CO₂-emissies voor gevolg te hebben dan brandstofcelvoertuigen. Ook biobrandstofvoertuigen kunnen interessant zijn voor het klimaat.

Er zijn echter nog andere milieueffecten die in beschouwing dienen genomen te worden.

De atmosfeer bevat ongeveer 0.5 ppmv (deeltjes per miljoen in volume) waterstof. Volgens een studie van Risø³ is een toename van 3 % mogelijk wanneer een waterstofeconomie op wereldschaal tot stand zou komen. Waterstof zelf veroorzaakt effecten in onze atmosfeer. Zo zorgt een toename van waterstof voor een afname van de capaciteit van de atmosfeer om broeikasgassen en andere pollutanten, zoals methaan en CFK's, af te breken. Meer waterstof zorgt er ook voor dat er meer waterdamp in de atmosfeer is, hetgeen gevolgen heeft voor de wolkenvorming, de temperatuur van de hogere atmosfeer en de afbraak van de ozonlaag. Waterstof wordt uit de atmosfeer verwijderd door middel van opname door micro-organismen in de bodem. Wanneer deze opnamecapaciteit echter zou overschreden worden, zullen de waterstofconcentraties in de atmosfeer toenemen en de eerder beschreven effecten versterkt worden.

In het Risø-rapport concludeert men dat er geen grote milieurisico's verbonden zijn aan deze energiedrager. Het

potentieel om wereldwijd de luchtkwaliteit te verbeteren is groot, op voorwaarde dat een aantal regels worden gerespecteerd. Waterstof mag niet geproduceerd worden met elektriciteit gegenereerd uit fossiele brandstoffen. Aardgas of steenkoolreforming moeten gebruikt worden in een eerste stap, om vervolgens zo snel mogelijk vervangen te worden door hernieuwbare energiebronnen. CO₂-opslag zou zeker moeten overwogen worden. Waterstof moet bovendien hoofdzakelijk gebruikt worden op de grond, eerder dan in vliegtuigen, aangezien het effect op het klimaat daarbij sterker is. Bovendien is het gebruik van waterstof in brandstofcellen te verkiezen boven dat in verbrandingsmotoren.

12 | Maatschappelijke aspecten

a. Hoe (on)veilig is waterstof?

Waterstof komt bij omgevingsdruk en -temperatuur voor als een kleur- en reukloos en zeer licht ontvlambaar gas (zie bijlage Feiten en cijfers). Het grootste risico verbonden met het gebruik van waterstof is het explosiegevaar. Bij lekkage ontstaat vrij snel een explosief mengsel, waarbij slechts een beperkte energietoevoer nodig is om een explosieve verbrandingsreactie te doen ontstaan. Om dit in perspectief te plaatsen: de vonkjes die ontstaan bij het uittrekken van een kunststof trui hebben een energie van ca. 0,1 mJ; waterstofgas ontsteekt reeds bij 0,02 mJ. De kans op ontsteking wordt ook verhoogd ten opzichte van andere ontvlambare gassen doordat het waterstofmolecule zo klein is dat het makkelijk door kleine openingen kan stromen. Hierdoor is het belangrijk dat installaties voldoende beveiligd worden tegen lekken. Lekvrije opslagsystemen zijn noodzakelijk alsook de aanwezigheid van detectoren.

Waterstof heeft eveneens de eigenschap om zich snel te verspreiden wanneer het met lucht gemengd wordt (4 keer sneller dan aardgas). Dit is een mogelijk nadeel in afgesloten, slecht verluchte ruimten. In open lucht is de kans dat waterstof ontsteekt echter zeer klein, aangezien het zich heel snel vermengt met lucht. Waterstof is het lichtste gas (14 keer lichter dan lucht), waardoor het snel stijgt bij lekken, hetgeen de veiligheid bevordert. LPG heeft deze eigenschap bijvoorbeeld niet, waardoor het ter hoogte van de grond blijft hangen en zo een hogere kans op explosie veroorzaakt. Brandstoffen zijn echter per definitie explosief en ontvlambaar. Verschillende brandstoffen hebben verschillende eigenschappen en moeten als dusdanig verschillend behandeld worden. Er bestaat geen totaal veilige brandstof, maar het risico kan sterk gereduceerd worden door een gepaste opslag, behandeling en transport. Veiligheid speelt dus een rol in de gehele keten.

Figuur 15 toont een vergelijking tussen een brand met waterstof (wagen links) en met benzine (wagen rechts). De benzinewagen brandt helemaal uit. Bij het waterstofvoertuig daarentegen ontstaat een kortstondige steekvlam die het interieur van de wagen nauwelijks verhit.



Figuur 15: Vergelijking van een brand met waterstof (wagen links) en benzine (wagen rechts). Foto links: 3 seconden na ontsteking; foto rechts: 60 seconden na ontsteking (Bron: Swain, 2001).

WATERSTOF MOTOR VAN DE TOEKOMST?

die het "veiliger" maken, het is immers niet giftig of kankerwekkend. Nadeel is echter dat de moleculen kleiner zijn en de afdichtingen van tanks en leidingen dus kritischer zijn, wat van ventilatie en detectie belangrijke elementen maakt. Dat is in het bijzonder van belang bij de opslag en het transport van waterstof. Het is eveneens essentieel dat waterstofgebruikers grondig ingelicht zijn over een veilige omgang met waterstof, zeker wanneer die decentraal opgewekt en gebruikt zou worden.

b. Wat is de perceptie door de burger?

Een opiniepeiling uit 2006, uitgevoerd door de Europese Commissie (Eurobarometer⁴), toont aan dat burgers van de Europese Unie het thema energie (14 %) minder belangrijk inschatten dan werkloosheid (64 %), misdaad

(36 %) en gezondheidszorg (30 %), die meer gerelateerd zijn met hun dagelijkse leven, economische stabiliteit, veiligheid en gezondheid. Wanneer de focus gelegd wordt op energie, vindt 54 % van de Europeanen het heel belangrijk dat het energieverbruik in hun land daalt en 60 % vindt dat energie-gerelateerd onderzoek in de EU een hoge prioriteit verdient. De belangrijkste factor hiervoor blijken de energieprijzen te zijn. Immers, één derde (33 %) van de Europeanen associeert energie spontaan met prijzen.

Op het eerste gezicht blijken Europeanen redelijk vertrouwd te zijn met nieuwe energietechnologieën. Meer dan de helft beweert reeds gehoord te hebben van kernfusie (58 %) en waterstof als energiedrager en brandstof voor voertuigen (53 %), en meer dan 2 op 5 respondenten



(Bron: SolviCore, joint venture van Umicore en Solvay)

⁴ De Eurobarometer is een onderzoek dat al sinds 1973 door de Europese Commissie gevoerd wordt naar de publieke opinie in de Europese Unie rond onderwerpen zoals de uitbreiding van de EU, de sociale situatie, gezondheid, cultuur, informatica, milieu, de Euro, enz.

heeft gehoord van geothermische energie (44 %), oceaanenergie (43 %) en brandstofcellen (41 %). EU-burgers staan zeer positief tegenover hernieuwbare energiebronnen: 80 % steunt het gebruik van zonne-energie, 71 % windenergie, 65 % hydroëlektrische energie, 60 % oceaanenergie en 55 % energie uit biomassa. Slechts een marginaal aantal respondenten verzet zich tegen deze energiebronnen. Wat fossiele brandstoffen betreft, blijkt 42 % van de EU-burgers voorstander te zijn van het gebruik van aardgas, en ongeveer een kwart aanvaardt het gebruik van aardolie (27 %) en steenkool (26 %). Nucleaire energie verdeelt de publieke opinie, 37 % zegt tegen die energiebron te zijn. Ondanks de tegenstand, wordt verwacht dat kernenergie een significant deel zal vormen van de toekomstige energiemix (34 % rangschikt het als een van de drie meest gebruikte energiebronnen binnen 30 jaar).

Het AcceptH2 project, in het kader van het 5^{de} Kaderprogramma van de Europese Commissie, bestudeerde de houding van het publiek tegenover het gebruik van waterstof in brandstofcelbussen in vijf verschillende steden en landen. Hieruit blijkt dat het publiek weinig bezorgd is over waterstof. Toch bestond onder experts en beleidsmakers lang de idee dat het publiek nieuwe waterstoftechnologieën zou afwijzen, omwille van negatieve connotaties met bv. de ramp met de zeppelin de Hindenburg en het Challenger ruimteveer of met de waterstofbom. Uit de bevestigingen bleek echter een grote steun voor waterstof en brandstofcellen. Er waren nauwelijks bezwaren tegen die technologieën, evenmin bij toepassingen in voertuigen. Toch bleek een belangrijk deel van

de mensen behoefte te hebben aan verdere informatie. De positieve respons bleek gelinkt te zijn aan positieve berichten in de media, voornamelijk omtrent de milieuaspecten. Wanneer een demonstratieproject met bussen van het openbaar vervoer had plaatsgevonden, bleken de bekendheid van waterstof en de positieve perceptie nog toe te nemen.

c. Investeren in onderzoek en industriële ontwikkeling?

Uit bovenstaande beschrijving blijkt duidelijk dat nog een lange weg af te leggen is, alvorens waterstof en brandstofcellen op een grote schaal beschikbaar zullen zijn. Bovendien dienen hierbij de juiste keuzes gemaakt te worden, zodat de aanwending van waterstof op een energie-efficiënte en milieuvriendelijke manier zou gebeuren.

Zowel voor waterstof als elektriciteit kunnen enorme technologische vernieuwingen plaatsgrijpen. Europa, en België/Vlaanderen in het bijzonder, hebben, door de sterke versnippering over de verschillende landen en instituten, inzake waterstof en brandstofcellen, tot nu toe een technologische achterstand, in vergelijking met Japan en de VS. Aangezien meer en meer duidelijk wordt dat in West-Europa vooral werkgelegenheid gecreëerd wordt op het vlak van hoogtechnologische en innovatieve producten met voldoende toegevoegde waarde, kan ondersteuning van deze beginnende technologie belangrijke perspectieven bieden voor de toekomst.

WATERSTOF MOTOR VAN DE TOEKOMST?

In Vlaanderen blijken reeds enkele bedrijven en onderzoeksinstituten een internationale rol te spelen op het vlak van brandstofcel- en waterstoftechnologie. Ondersteuning van deze bedrijven zou een verdere groei van die industrie in Vlaanderen kunnen bewerkstelligen. Het is ook belangrijk om het industriële weefsel rond deze bedrijven in Vlaanderen te versterken, door toeleveranciers van kennis en technologie erbij te betrekken.

De aanwezigheid van een uitgebreid waterstofnetwerk geeft aan Vlaanderen een belangrijke troef voor het opstarten van projecten. Die projecten helpen bovendien de ontwikkelaars om hun producten te optimaliseren en een praktisch inzicht te geven rond vergunningen en veiligheid en ze zijn belangrijk om een draagvlak te creëren bij het brede publiek.

Ook universiteiten en onderzoeksinstituten kunnen een belangrijke rol spelen bij die ontwikkelingen en demonstraties. Daarenboven besteden sommige instellingen in hun onderwijsprogramma's steeds meer aandacht aan deze technologieën. Hierdoor kunnen bedrijven en onderzoekscentra in de toekomst beter scoren op het vlak van internationaal onderzoek en ontwikkeling.

Ook kunnen demonstratieprojecten gerealiseerd worden in een privaat/publiek samenwerkingsverband, zodat de in Vlaanderen ontwikkelde technologie internationale zichtbaarheid kan genieten. Enkele voorbeelden van dergelijke demonstratieprojecten zijn: toeristenbussen en -boten op waterstof, kleine toepassingen, zoals rolstoelen op waterstof of brandstofcellen in kleine, draagbare toestellen, live shows over waterstof in bv. Technopolis, enz.

13 | Besluiten

a. Sterke punten en mogelijkheden van waterstof

Waterstof is een energiedrager. Net zoals elektriciteit kan het opgewekt worden uit verschillende energiebronnen (fossiel, nucleair, hernieuwbaar), waardoor het flexibel is, en transporteerbaar naar de plaats waar deze energie nuttig gebruikt kan worden. Dat maakt waterstof aantrekkelijk, want net zoals bij elektriciteit, kunnen we ons minder afhankelijk maken van de import en het gebruik van eindige fossiele brandstoffen.

Er is de mogelijkheid om de uitstoot aan broeikasgassen te reduceren, door gebruik te maken van waterstof via kernenergie en hernieuwbare energie (biobrandstoffen, off shore wind, ...). Ondergrondse CO₂-opslag is noodzakelijk indien voor de productie van waterstof fossiele brandstoffen (aardgas, steenkool) gebruikt worden.

Naast de reductie van de broeikasgassen kunnen waterstofvoertuigen lokaal de luchtkwaliteit verbeteren. Waterstofvoertuigen kunnen de milieu-impact in stedelijke omgevingen grondig verbeteren, doordat ze enkel waterdamp uitstoten.

Waterstof is gemakkelijker op te slaan dan elektriciteit, maar wel moeilijker dan vloeibare brandstoffen, zoals benzine en diesel. Waterstof als opslagmogelijkheid kan mogelijk resulteren in een economischer gebruik van hernieuwbare energie, in het bijzonder voor de opslag van energie tijdens de pieken in de elektriciteitsproductie.

b. Zwakte punten en hindernissen van waterstof

Waterstof kan geproduceerd worden uit tal van hernieuwbare energiebronnen. De vraag stelt zich echter of deze hernieuwbare energiebronnen het beste benut kunnen worden voor de productie van waterstof of dat deze nuttiger aangewend kunnen worden voor andere toepassingen. Indien men daarbij rekening houdt met de verliezen die gepaard gaan met de productie en het gebruik van waterstof, dan is het efficiënter en goedkoper om deze hernieuwbare energie reeds rechtstreeks te gebruiken voor elektrische toepassingen. Het gebruik van kernenergie wordt soms naar voren gebracht als een valabele optie voor de productie van waterstof, maar brengt problemen met zich mee, op het vlak van publieke aanvaarding en kernafval. De milieubeweging ziet geen heil in deze methode en staat eveneens sceptisch tegenover het gebruik van "schone" steenkool, in combinatie met CO₂-opslag. De betrouwbaarheid en veiligheid van deze technologie moeten immers nog bewezen worden.

In de beginperiode van het gebruik van waterstof als energiedrager, zal waterstof waarschijnlijk voornamelijk geproduceerd worden uit aardgas, hetgeen dus gepaard gaat met de uitstoot van broeikasgassen.

Op het gebied van veiligheid, maakt waterstof metalen broos, waardoor lekken kunnen ontstaan. Waterstof is geur- en kleurloos, waardoor lekken en vlammen onzichtbaar zijn. Bovendien heeft waterstof een laag ontstekingspunt, 20 keer lager dan benzine. Bij de ontwikkeling van opslagtanks en detectiesystemen zijn bijzondere beschermingsmaatregelen nodig en die zijn technologisch





WATERSTOF MOTOR VAN DE TOEKOMST?

perfect mogelijk. Ze leiden echter tot extra gewicht voor de opslagtanks en verhogen de kost voor het gebruik van waterstof in verschillende toepassingen.

De kosten voor de productie, opslag en toepassingen (bv. brandstofcel) van waterstof zijn nog steeds zeer hoog. De prijs van brandstofcellen reduceren is één van de belangrijkste uitdagingen. De technologie moet met een factor 10 goedkoper worden, wil men competitief worden met bijvoorbeeld diesel- en benzinevoertuigen.

In het bijzonder voor de transportsector, dient nog een grote vooruitgang geboekt te worden in de ontwikkeling van brandstofcellen, opslagsystemen en distributie-infrastructuur. Verscheidene technische barrières moeten overwonnen worden, zoals het gewicht van de waterstoftank in voertuigen, de levensduur van brandstofcellen, enz. Het gebruik van waterstofverbrandingsmotoren kan de introductie van waterstof vergemakkelijken, maar deze technologie gaat gepaard met een beperktere energie-efficiëntie.

De uitbouw van waterstofinfrastructuren zal eveneens zeer duur en ingrijpend zijn.

Om de prijs te kunnen doen dalen, is het noodzakelijk een voldoende grote schaal te bereiken. Om waterstof echter op grote schaal te kunnen maken, moet de prijs aantrekkelijk zijn. Overheidsinitiatieven zijn noodzakelijk om dit "cyclisch" probleem te kunnen doorbreken.

De aanvaarding door het publiek en de industrie is cruciaal. Om aanvaard te worden in de huishoudens, moet

waterstof even gebruiksvriendelijk zijn als aardgas. Communicatiecampagnes zijn essentieel om het publiek met waterstof vertrouwd te maken.

c. Mogelijkheden en hindernissen voor waterstof in Vlaanderen/België

In België bevindt zich een uitgebreid industrieel distributienetwerk voor waterstof en aardgas, voor grote industriële verbruikers, waardoor bij bedrijven en instanties kennis over waterstofinfrastructuur aanwezig is. De specifieke eigenschappen van Vlaanderen (klein, dense populatie en uitgebreid wegennetwerk) resulteren in lagere kosten voor distributie naar de eindgebruikers. Dat maakt het extra aantrekkelijk om er demonstratieprojecten op te starten.

België beschikt over ervaring en kennis omtrent waterstof. Er zijn belangrijke waterstof- en brandstofcelontwikkelaars en enkele onderzoeksinstellingen hebben expertise in specifieke deelaspecten. In de chemische industrie bestaat reeds een brede ervaring met de omvorming van aardgas naar waterstof en het gebruik van waterstof in processen.

Waterstof kan geproduceerd worden uit tal van hernieuwbare energiebronnen, die in Vlaanderen elk op zich echter maar beperkt te benutten zijn.

14 | Beleidsvragen

De ontwikkeling van waterstoftechnologie heeft een internationaal karakter, waarbij de vraag zich stelt hoe Vlaanderen zich ten opzichte van deze ontwikkeling opstelt. In een aantal landen zien we dat overheden zeer actief zijn in het ondersteunen van onderzoek en ontwikkeling in "hun" bedrijven en bereid zijn om ondersteuning te geven aan projecten. Andere landen nemen dan weer een eerder afwachtende houding aan, in afwachting van de marktrijpheid van waterstofsysteem.

In dit hoofdstuk wordt een aantal beleidsvragen gekaderd, op basis van gesprekken die binnen het project gevoerd werden met een aantal Vlaamse stakeholders inzake waterstof.

Welke verwachtingen zou waterstof binnen een toekomstig energiesysteem kunnen waarmaken ?

Waterstof werd een decennium geleden vaak opgevoerd als dé oplossing voor het energieprobleem. Achteraf blijkt dat de verwachtingen toen veel te hoog gesteld waren. Industrieel onderzoek en ontwikkeling bij grote bedrijven zijn ondertussen toegenomen, maar nu gecombineerd met meer realisme op het vlak van de vereiste technische doorbraken, de economische haalbaarheid en de tijdlijn voor de implementatie van de technologie.

Over de toekomst van waterstof op lange termijn (30 – 50 jaar) worden tal van studies uitgevoerd, met uit-

eenlopende resultaten. De focus bij de beleidsmakers ligt voor waterstof momenteel op het jaar 2020. De Europese Commissie heeft enkele jaren geleden gesteld dat in Europa in 2020 jaarlijks meer dan 400.000 auto's op waterstof verkocht zullen worden en meer dan 100.000 WKK-systemen op waterstof geïnstalleerd.

Op internationaal niveau profileert de automobielenindustrie zich duidelijk als de trekker van de ontwikkelingen op het vlak van waterstoftechnologie. Ook bedrijven die zich traditioneel beperkten tot levering van waterstof aan de industrie, gaan zich meer en meer als energiebedrijven profileren.

Uit navraag bij Vlaamse experts blijkt dat sommigen de Europese verwachtingen conservatief vinden, terwijl anderen zeggen dat die ambitie past in de traditie dat de grootschalige introductie van waterstof steeds 15 jaar verder in de toekomst ligt.

Het idee dat waterstof "de enige oplossing is voor het energieprobleem" is verlaten: om aan de toekomstige energiebehoefte te kunnen voldoen, dienen alle energiedragers en energiebronnen maximaal ontwikkeld te worden. Algemeen wordt gesteld dat de maatschappij onvermijdelijk steeds verder gedreven wordt naar het gebruik van energiebronnen die "onbegrensd" aanwezig zijn en die een "minimale belasting van het milieu" impliceren.

Ongeacht het tijdspad van implementatie van waterstof als energiedrager, is het noodzakelijk om vanuit Vlaanderen de ontwikkelingen te volgen.



WATERSTOF MOTOR VAN DE TOEKOMST?

In de toekomst zullen immers op het vlak van energievoorziening investeringskeuzen gemaakt moeten worden, grotendeels gebaseerd op technisch-economische mogelijkheden en publieke steun. Afwezigheid van een langetermijnvisie en ontwikkelingsstrategie leidt tot het risico dat de investeringen, vakkennis en uiteindelijk ook de economische voordelen naar elders zullen migreren.

Hoe duurzaam is waterstof ?

Aangezien waterstof geproduceerd moet worden, is de duurzaamheid van waterstof rechtstreeks gekoppeld aan de productiewijze ervan. Een aantal Vlaamse deskundigen voorziet dat in de komende decennia aardgas als grondstof zal dienen voor waterstof. Anderen merken op dat Vlaanderen zich, vanwege de hier aanwezige technologie, best meteen zou richten op waterstofproductie op basis van hernieuwbare energie, waardoor echt duurzame waterstof wordt verkregen. Sommigen zien productie van waterstof op basis van nucleaire energie en steenkool op termijn als perspectief, terwijl de milieubeweging deze productiewijzen ontoelaatbaar vindt.

Wat kan de Vlaamse industrie betekenen op het vlak van onderzoek?

Een aantal bedrijven in Vlaanderen speelt ook internationaal een rol op het vlak van de ontwikkeling van waterstoftechnologie: het betreft zowel grote bedrijven als KMO's. Daarnaast ligt in Vlaanderen het hart van een ondergronds leidingennetwerk dat industriële waterstof tussen bedrijven transporteert.

Vlaanderen heeft dus industriële troeven in handen om ten minste op Europees niveau een rol te spelen. Daartoe is het noodzakelijk dat deze bedrijven ondersteuning kunnen krijgen, vanuit het Vlaamse innovatiebeleid, dat kan zorgen voor ondersteuning van vernieuwend wetenschappelijk onderzoek, technologieoptimalisatie en demonstratieprojecten.

Het meest praktische voor Vlaanderen zou zijn om het innovatiebeleid parallel te laten lopen met de Europese doelstellingen en de corresponderende inspanningen, die in detail geformuleerd zijn.

Vlaanderen moet door voldoende steun aan onderzoek en ontwikkeling vermijden om in een volgersrol verzeild te geraken. Het mag echter niet de illusie hebben om een globale leider te zijn, maar moet zijn troeven op het vlak van innovatie, onderzoek en werkgelegenheid zeker benutten. Er zijn weinig grote bedrijven in Vlaanderen op waterstofgebied, maar toch moet geprobeerd worden om op het Europese vlak mee te spelen. Vlaanderen moet trachten meer aanwezig te zijn op het internationale toneel.

Manifesteert de waterstofeconomie zich als een aanbod- of vraaggedreven economie?

Technisch en economisch is de "koolstofeconomie" momenteel volledig ontwikkeld, maar steeds duidelijker komen de grenzen van dit type van energievoorziening in beeld (milieubelastende effecten, hogere prijzen, vragen over zekerheid van energievoorziening, ...). Zolang de fossiele brandstoffen voor de consument beschikbaar zijn, is deze niet meteen vragende partij voor nieuwe

technologieën. Ze moeten hem aangeboden worden, zodat hij ze zou kunnen selecteren. De vraag naar fossiele brandstoffen kan gereduceerd worden door ook een aantal alternatieven aan te bieden, waaronder waterstof. Waterstof wordt dus eerder als een aanbodgedreven product beschouwd, waarbij de automobiellindustrie een belangrijke voortrekkersrol vervult. Het beleid mag het aanbod sturen en kan op korte termijn als katalysator werken. Op langere termijn moet de markt het echter kunnen overnemen.

Welke acties kan de Vlaamse overheid ondernemen?

Op dit moment leven we in een gestructureerde samenleving die gebaseerd is op fossiele brandstoffen. De olie- en gasvoorraden dreigen echter schaarser en dus duurder te worden of zelfs uitgeput te geraken, waarna zal moeten afgestapt worden van de koolstofeconomie. Daarom moet de Vlaamse overheid een duidelijk energiebeleid uitstippelen dat rekening houdt met dat probleem en waarin een strategie gekozen wordt. Vlaanderen mag voor zijn toekomstige energievoorziening niet op één paard wedden. Het budget zou moeten verdeeld worden over verschillende technologieën en toepassingen, waarbij prioritair geïnvesteerd wordt in hernieuwbare energiebronnen. Alle wegen die leiden naar een lagere CO₂-uitstoot moeten open gehouden worden. Vlaanderen moet wel zijn sterke punten en troeven uitspelen. Voor de korte termijn kan waterstof gesteund worden vanuit innovatief en technisch oogpunt (ondersteuning technologiebedrijven), eerder dan vanuit de energieproblematiek. De bedrijfswereeld verwacht dat de overheid niet alleen



WATERSTOF MOTOR VAN DE TOEKOMST?

projecten en onderzoek steunt, maar dat ze vooral de rol opneemt van facilitator en het werk van de industrie vereenvoudigt, door de organisatorische hinderpalen tot een minimum te herleiden. Het is essentieel dat er een harmonisatie komt van de regionale en federale inspanningen omtrent wetgeving en licenties, veiligheidsvoorschriften, opleiding brandweerkorpsen, enz., om de introductie van nieuwe technologieën of infrastructuur (bv. waterstoftankstations) te vereenvoudigen. Financiële ondersteuning via het IWT, innovatief investeren, publiek-private samenwerking, enz. zijn beschikbaar en moeten door de industrie meer aangesproken worden.

Voor een mogelijk ingrijpende technologie als waterstof is het noodzakelijk dat Vlaanderen een consequent beleid voert en dat er duidelijkheid komt over de lange-termijnvisie van de beleidsmakers, zodat een gunstig investeringsklimaat kan geschapen worden. Investeren in risicovolle sectoren zijn wars van onbekende of onbetrouwbare factoren. Dergelijke dossiers hebben een lange looptijd, dus is het aangewezen dat alle factoren zo goed mogelijk kunnen ingeschat worden bij de berekening van de rentabiliteit. Duidelijkheid en stabiliteit betekenen geenszins onveranderlijkheid, alleen moet dit pad duidelijk zijn op voorhand.

Er is voor de bedrijfs wereld een minimale zekerheid nodig voor een voldoende lange looptijd, waarbij afspraken bindend moeten zijn, ook al wisselen de regeringen. Momenteel is die visie er enkel op Europees, maar vooralsnog niet op Vlaams/Belgisch niveau.

Welke rol heeft de overheid te spelen in de perceptie en de aanvaarding van waterstof door de burger?

Er heerst een sterke hype rond waterstof, voornamelijk rond transporttoepassingen, waarbij waterstof vaak voorgesteld wordt als dé oplossing voor alle energie- en milieuproblemen. Daarbij wordt waterstof ook vaak verkeerdelijk weergegeven als een hernieuwbare energiebron in plaats van een energiedrager. Media, wetenschappers en beleidsmakers spelen een belangrijke rol in het beeld dat het publiek krijgt over waterstof. Het publiek staat in het algemeen zeer positief tegenover de waterstoftechnologie, maar krijgt vaak onvoldoende en te weinig objectieve informatie. De nadruk ligt ook vaker op het woord 'water', dat met milieuvriendelijkheid wordt geassocieerd, dan op het woord 'gas', dat vaak angst inboezemt. Angstgevoelens zouden kunnen weggerukt worden, zodra waterstof meer zichtbaar wordt, bijvoorbeeld door toepassingen in nichemarkten (bv. laptops) en demonstratieprojecten, zoals stadsbussen op waterstof. Voor bedrijven is het belangrijk dat hun demonstratieprojecten de nodige aandacht krijgen, waardoor investeringen gestimuleerd worden. Demonstratieprojecten zijn voor de overheid voornamelijk interessant als ze fungeren als een leerproces om de technologie en het product bij te schaven.

Een mogelijke suggestie voor de overheid is de integratie van het thema waterstof in het onderwijsprogramma, in een ruim kader rond 'technologie en milieu', zodat ook jongeren geïnformeerd worden.

15 | Meer informatie

- *Hydrogen as an energy carrier*, KVAB (Koninklijke Vlaamse Academie van België voor Wetenschappen en Kunsten), BACAS (Royal Belgian Academy Council of Applied Sciences) en CAWET (Comité van de Academie voor Wetenschappen en Techniek), Joeri Van Mierlo, Gaston Maggetto, *et al.*, juli 2005, 42 pp.
- *Witboek "Waterstof- en Brandstofceltechnologie in Vlaanderen"*, VSB, Adwin Martens, *et al.*, november 2006
- *Which Energy Source for Road Transport in the Future? A Comparison of Battery, Hybrid and Fuel Cell Vehicles*, Energy Conversion & Management, 47 (2006) 2748-2760, journal, Elsevier, ECM-D-05-00636, Joeri Van Mierlo, Gaston Maggetto & Philippe Lataire, 2006
- *European Hydrogen & Fuel Cell Technology Platform – Strategic Research Agenda*, HFP Europe, juli 2005
- *European Hydrogen & Fuel Cell Technology Platform – Deployment strategy report*, HFP Europe, augustus 2005
- *Noodzaken en beperkingen van de evolutie van het transport in Europa en in België in het eerste kwart van de 21e Eeuw, 'Energie in België morgen - Het in overweging nemen van het broeikaseffect - Aanbevelingen'*, KVAB - BACAS - CAWET, Gaston Maggetto, Joeri Van Mierlo, *et al.*, 2002, 18 pp.
- *Energie vandaag en morgen – Beschouwingen over energievoorzieningen en –gebruik*, ACCO, TI-KVIV, William D'haeseleer, 2005
- *Rapport Commissie Energie 2030*, William D'haeseleer, 2007
- *Energy [r]evolution A Sustainable World Energy Outlook*, Greenpeace, januari 2007
- *GROENBOEK Een Europese strategie voor duurzame, concurrerende en continu geleverde energie voor Europa*, Europese Commissie, maart 2006
- *Hydrogen & Fuel Cells, Review of National R&D Programs*, International Energy Agency, december 2004
- *An Energy Policy for Europe (COM(2007)1)*, januari 2007
- *Towards a European Strategic Energy Technology Plan (SET-Plan) (COM (2006) 847)*, januari 2007
- *Is Hydrogen the Only Solution for Road Transport in the Future?*, Gaston Maggetto, Joeri Van Mierlo & Philippe Lataire, 12th International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems (ICENES 2005), Brussel, augustus 2005.
- *State-of-the-art studie: Brandstofcellen voor tractie*, Novem, Utrecht, 2002
- *The Hydrogen Economy – Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs*, National Research Council and National Academy of Engineering, Michael P. Ramage *et al.*, The National Academies Press, Washington D.C., 2004, 240 pp.
- *Risø Energy Report 3 – Hydrogen and its competitors*, Risø National Laboratory, Ed. Hans Larsen, Robert Feidenhans'1 and Leif Sönderberg Petersen, november 2004, 72 pp.
- *The Hydrogen 'illusion'*, Cogeneration and on-site Power Production, Ulf Bossel, 2004, p.55-59
- *The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak?*, 2003 Fuel Cell Seminar, Ulf Bossel, Baldur Eliasson & Gordon Taylor, 2003
- *The Hydrogen Economy: Clean Energy for this Century*, Proceedings of the International Symposium, Brussel, Eds. J. Kretschmar en A. Van Cauwenberghe, juni 2006
- *Technologie en innovatie in Vlaanderen: Prioriteiten*, Studiereeks Vlaamse Raad voor Wetenschapsbeleid (VRWB), E. Smits, E. Ratinckx, V. Thoen, november 2006, 309 pp.
- *Hydrogen and Fuel Cells: Emerging technologies and applications*, Bent Sörensen, Elsevier Academic Press, 2005, 450 pp.
- *Carrying the Energy Future – Comparing Hydrogen and Electricity for Transmission, Storage and Transportation*, Institute for Lifecycle Environmental Assessment, Patrick Mazza & Roel Hammerschlag, 2004
- *Development of tools to evaluate the potential of sustainable hydrogen in Belgium*, SPSDII project, A. Martens, A. Germain, S. Proost, G. Palmers, oktober 2006
- *De Waterstofeconomie*, Jeremy Rifkin, Uitgeverij Lemniscaat, 2004, ISBN 9056375830, 327 pp.
- *Public perception related to a hydrogen hybrid internal combustion engine transit bus demonstration and hydrogen fuel*, Hickson, Philips & Morales, Energy Policy 35, 2006, p. 2249-2255.
- *AcceptH2: Public acceptance and economic preferences related to hydrogen transport technologies in five countries*, EC 5de Kaderprogramma project, 2003-2005, www.accepth2.com
- *The hype about hydrogen. Fact and fiction in the race to save the climate*. Joseph J. Romm, Island Press, 2005, 256 pp.

WATERSTOF MOTOR VAN DE TOEKOMST?

16 | Afkortingenlijst

AFC	Alkaline Fuel Cell
CO ₂	Koolstofdioxide
DME	Dimethylether
ETBE	Ethyl-tertiair-butylether
EU	Europese Unie
H ₂	Waterstofgas
HFP	European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform
IWT	Instituut voor de aanmoediging van innovatie door Wetenschap en Technologie in Vlaanderen
JTI	Joint Technology Initiative
KMO	Kleine of Middelgrote Onderneming
LPG	Liquefied Petroleum Gas
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
NOx	Stikstofoxides
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
PEM	Proton Exchange Membrane
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
PPO	Pure Plantaardige Olie
R&D	Onderzoek & Ontwikkeling
RME	Rapeseed Methyl Esther
SCK	Studiecentrum voor Kernenergie
SME	Soja Methyl Esther
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
STEG	Stoom- en gascentrale
TTW	Tank-to-Wheel
VITO	Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek
VS	Verenigde Staten
VSWB	Vlaams Samenwerkingsverband Waterstof en Brandstofcellen
WKK	Warmtekrachtkoppeling (in het engels CHP)
WTT	Well-to-Tank
WTW	Well-to-Wheel

Feiten en cijfers

	Waterstof	Benzine	Ethanol	Diesel	Biodiesel (RME)	LPG	Aardgas
smeltpunt (atm. druk) [°C]	-259	<-20	-114	<0	-1	-160	-183
kookpunt (atm. druk) [°C]	-253	38-205	78,3	180-370	315-350	-20	-161
relatieve dichtheid gas (lucht=1)	0,07	4		7		1,8	0,6
relatieve dichtheid vloeistof (water=1)	0,07	0,7-0,8	0,7	0,8-0,9	0,7	0,5-0,6	0,5
lagere verbrandingswaarde [MJ/kg]	120	46	21,2	43	37,2-37,3	46,6	50
hogere verbrandingswaarde [MJ/kg]	142	48,1	29,8	45,9	39,8	50,1	55,5
energie-inhoud [kWh/kg]	33,3 (vl en gas)	12,7		11,6		12,9 (vl)	13,9
energie-inhoud [kWh/l]	2,36 (vl)	8,76		9,7		7,5 (vl)	5,8 (vl)
	0,53 (20 MPa)						2,58 (20Mpa)
	3,18 (metaalhydride)						
zelfontbrandings-temperatuur [°C]	560	>220	234-454	>220		400	540
ontploffingsgrenzen [vol% in lucht]	13-59	0,6-8		0,6-6,5		1,5-10	6,3-14
min. ontstekingsenergie [mJ]	0,02	0,24				0,25	0,29
gevaarsaanduidingen	Zeer licht ontvlambaar	Zeer licht ontvlambaar Giftig	Zeer licht ontvlambaar	Schadelijk	Ongevaarlijk	Zeer licht ontvlambaar	Zeer licht ontvlambaar
		 					

Tabel 4: Overzicht van enkele fysico-chemische eigenschappen van waterstof, benzine, (bio)-ethanol, diesel, biodiesel (RME), LPG en aardgas.

WATERSTOF MOTOR VAN DE TOEKOMST?

17 | Dankwoord

Tenslotte willen we volgende personen bedanken die een actieve bijdrage hebben geleverd aan de realisatie van dit document.



Naam	Bedrijf/Instelling
Jean-Philippe Linart	Air Liquide Belgium
Laurent Laduron	Air Liquide Belgium
Vincent Hecquet	Air Liquide Belgium
Emile De Decker	BASF Antwerpen
Luc Haelterman	BMW
Marc Lambrechts	Capricorn Cleantech Fund
Tom Verstraelen	DHL Express Belux
Jan Vande Putte	Greenpeace
André Beerts	HydroThane
Erwin Vandenberghe	HydroThane
Marc Pecqueur	Karel de Grote Hogeschool
André Olaerts	Katholieke Hogeschool Limburg
Fred Hage	Linde Gas Benelux
Pascal Meyvaert	Linde Gas Benelux
Wilfried Coppens	Tech2Bizz Consulting

Naam	Bedrijf/Instelling
Jan Vliegen	Umicore
Dries Verstraete	Université Libre de Bruxelles
Roger Sierens	Universiteit Gent
Sebastian Verhelst	Universiteit Gent
Wim Soetaert	Universiteit Gent
Hugo Vandenborre	Vandenborre Hydrogen Integrator
Wim Lameire	Vlaams Energie Agentschap
Bram De Brabander	Vlaams Instituut voor Mobiliteit
Bart Laethem	Vlaamse Overheid, Departement Economie, Wetenschap en Innovatie
Stefan Aerts	VOKA
Jacques De Ruyck	Vrije Universiteit Brussel

18 | Colofon

Auteurs dossier

Nele Sergeant m.m.v. Julien Matheys, o.l.v.
Joeri Van Mierlo (Vrije Universiteit Brussel-ETEC)
met inbreng van Adwin Martens en
Gilbert Van Bogaert (VSWB)

Projectmanagement

Donaat Cosaert, onderzoeker viWTA

Taaladvies

Luk Van Respaille

Lay-out

B.Ad

Druk

Parys Printing

Verantwoordelijke uitgever

Robby Berloznik
directeur viWTA
Vlaams Parlement
1011 Brussel

Samenstelling Raad van Bestuur

De heer Robert Voorhamme is voorzitter van de
Raad van Bestuur van het viWTA.
Mevrouw Monica Van Kerrebroeck en
de heer Jean-Jacques Cassiman zijn de ondervoorzitters.

De Raad van Bestuur van het viWTA bestaat uit:

De heer Jaak Gabriels;
De heer Eloi Glorieux;
Mevrouw Kathleen Helsen;
De heer Jan Peumans;
De heer Erik Tack;
Mevrouw Monica Van Kerrebroeck;
Mevrouw Marleen Van den Eynde;
De heer Robert Voorhamme
als Vlaams Volksvertegenwoordigers;

De heer Paul Berckmans;
De heer Jean-Jacques Cassiman;
De heer Stefan Gijssels;
Mevrouw Ilse Loots;
De heer Harry Martens;
De heer Freddy Mortier;
De heer Nicolas van Larebeke-Arschodt;
Mevrouw Irèna Veretennicoff
als vertegenwoordigers van de Vlaamse wetenschappelijke
en technologische wereld

Vlaams Instituut voor Wetenschappelijk en
Technologisch Aspectenonderzoek – viWTA
Directeur: Robby Berloznik
Vlaams Parlement – 1011 Brussel
Tel: +32 (0)2 552 40 50
Fax: +32 (0)2 552 44 50
viwta@vlaamsparlement.be
website: www.viwta.be

Het Vlaams Instituut voor Wetenschappelijk en Technologisch Aspectenonderzoek

Het Vlaams Instituut voor Wetenschappelijk en Technologisch Aspectenonderzoek is een onafhankelijke en autonome instelling verbonden aan het Vlaams Parlement, die de maatschappelijke aspecten van wetenschappelijke en technologische ontwikkelingen onderzoekt. Dit gebeurt op basis van studie, analyse en het structureren en stimuleren van het maatschappelijke debat. Het viWTA observeert wetenschappelijke en technologische ontwikkelingen in binnen- en buitenland en verricht prospectief onderzoek over deze ontwikkelingen. Op basis van deze activiteiten informeert het viWTA doelgroepen en verleent het advies aan het Vlaams Parlement. Op die manier wil het viWTA bijdragen tot het verhogen van de kwaliteit van het maatschappelijk debat en tot een beter onderbouwd besluitvormingsproces.