



Vrije Universiteit Brussel

FACULTEIT GENEESKUNDE EN FARMACIE  
Vakgroep Menselijke Ecologie

# Waterstof onderweg

## Milieu-impact van waterstof in personenwagens

Eindwerk voorgelegd voor het behalen van de graad van Master  
Duurzame Ontwikkeling en Menselijke Ecologie door

**Toon Lambrechts**

Academiejaar 2007-2008

Promotor: Prof. Dr. ir. Joeri Van Mierlo  
Co-promotor: ir. Nele Sergeant



## **Woord vooraf**

Er bestaat een sterke band tussen menselijke activiteiten en de degradatie van het (globale) leefmilieu. De wereldbevolking groeit exponentieel, steeds meer landen bereiken de industrialisatiefase, de consumptie van natuurlijke grondstoffen neemt dramatische vormen aan en de vervuiling en belasting van ons leefmilieu heeft op sommige vlakken haar limiet al bereikt. Hoog tijd dus om alternatieven te bedenken voor onze ongebreidelde expansie en vervuiling. Naast een collectieve mentaliteitsverandering en een groter bewustzijn aangaande deze problematiek kunnen ook technologische ontwikkelingen bijdragen aan een globale economie die meer in evenwicht is met onze ecologische omgeving. Het gebruik van waterstof als energiedrager zou ons hierbij op weg kunnen helpen. Aangezien een aanzienlijk deel van de broeikasgassen afkomstig is van gemotoriseerd vervoer zou het gebruik van waterstof hier een positieve evolutie kunnen zijn. Het is dus zeker de moeite om te onderzoeken of dit effectief zo zou zijn. Als student in duurzame ontwikkeling en menselijke ecologie is dit een uitgelezen kans om een steentje bij te dragen tot een betere kennis met betrekking tot potentiële alternatieven voor onze vervuilende activiteiten.

Alvorens van start te gaan met de eigenlijke thesis zou ik enkele mensen willen bedanken voor hun hulp en geduld. In de eerste plaats zou ik mijn dank willen betuigen aan mijn co-promotor Nele Sergeant. Zij heeft mij steeds in de mate van het mogelijke bijgestaan met raad en daad. Verder wil ik ook mijn moeder bedanken voor de financiële steun (voorschot computer) en de facilitaire ondersteuning. Verder nog een woord van dank aan alle mensen die mij in levende lijve of via mail en telefoon hebben geholpen. Mijn dankbaarheid gaat ook uit naar aan alle mensen die in laatste instantie nog de moeite hebben gedaan om de tekst door te nemen en op fouten te wijzen of suggesties te doen. Speciale dank gaat hierbij uit naar Arne Brasseur. Veel leesplezier.

## **Samenvatting**

In het kader van de opwarming van de aarde en de uitstoot van broeikasgassen wordt er in de auto-industrie gezocht naar alternatieve brandstoffen. Die zouden er voor moeten zorgen dat onze behoefte aan geïndividualiseerd transport bevredigd zou kunnen worden zonder een grootschalige milieu-impact te veroorzaken. Waterstof is één van de mogelijke alternatieven. Er wordt hier onderzocht in welke mate het gebruik van waterstof als brandstof een invloed zou hebben op de milieu-impact van het personentransport over de weg.

Er bestaan veel manieren om waterstof te produceren, op te slaan, te transporteren en te gebruiken. In het eerste deel worden zij besproken aan de hand van een literatuurstudie. In het tweede deel worden zij gebruikt om verschillende configuraties te genereren. Hierbij worden reële en fictieve pathways uitgedacht waarbij verschillende methoden om waterstof te produceren, op te slaan en te transporteren gecombineerd worden met voertuigen met interne verbrandingsmotor en voertuigen met brandstofcellen. Zo werd een databank met emissiegegevens aangelegd. Aan de hand daarvan werden de Ecoscores berekend. Dit is een maat die de milieu-impact van voertuigen weergeeft. Op basis van die Ecoscores kan vastgesteld worden dat de brandstofcelvoertuigen ecologisch veel aantrekkelijker zijn dan de voertuigen die gebruik maken van waterstof in een verbrandingsmotor. Dit is te wijten aan het hogere verbruik en dus de lagere efficiëntie van de waterstof verbrandingsmotoren. De extra emissies die vrijkomen bij de verbranding zijn minimaal en spelen dus geen belangrijke rol. Bij het bekijken van de gegevens wordt ook duidelijk dat batterij-elektrische voertuigen nog beter scoren dan de brandstofcelvoertuigen. Vooral het energieverlies bij de omzetting van waterstof naar elektriciteit zou hier het verschil kunnen verklaren. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat bij het berekenen van de Ecoscore van de batterij-elektrische voertuigen de emissies van de ontginning van de grondstoffen voor de elektriciteitsproductie niet mee in rekening worden gebracht.

In vergelijking met voertuigen die gebruik maken van traditionele fossiele brandstoffen scoren de brandstofcelvoertuigen zeer goed. Enkel de hybrides en de voertuigen die rijden op aardgas halen Ecoscores die in de buurt komen van die van de brandstofcelvoertuigen.

Het gebruik van waterstof in brandstofcellen is dus volgens de Ecoscore-

methodologie ecologisch aantrekkelijk. Zeker wanneer hiervoor gebruik kan gemaakt worden van hernieuwbare energie. Verder onderzoek zal moeten uitwijzen of het ook economische aantrekkelijk is. Ook de ecologische impact van de productie van brandstofcellen dient grondig onderzocht te worden. Sommige auteurs wijzen erop dat dit, in tegenstelling tot de productie van een verbrandingsmotor, een aanzienlijke milieu-impact heeft ten opzichte van de gehele levenscyclus.

## **Abstract**

The global warming and the emissions of greenhouse gases move the car industry towards alternative fuels. These should make it possible to fulfill our individual transport needs without a major impact on the environment. Hydrogen is one of the possible alternatives. This study tries to reveal what the effect on the environment would be if we use hydrogen as the fuel for our individualized road transport.

There are many ways to produce, conserve, transport and use hydrogen. In the first part all these options will be discussed on the hand of a literature review. In the second part these will be used to create different configurations. By the creation of the different pathways we will combine these modes of production, conservation and transport with cars with internal combustion engines and with fuel cells. An extensive databank will be created. The data will be used to calculate the Ecoscore for the different pathways. There will be a calculation of existing pathways as well as fictitious ones. Ecoscore is a scale that represents the environmental impact of a certain vehicle. On the base of these calculations there can be concluded that cars with a fuel cell are ecological much more attractive than cars that use hydrogen in an internal combustion engine. This is in large part due to the lower efficiency of the engines and hence the higher fuel consumption. The extra emissions that are released by the burning process are not of great impact on the environment. After examination of the data it becomes clear that the electric vehicles with batteries still perform better than the fuel cell vehicles. This is due to the energy loss by the conversion from hydrogen to electricity. It is noteworthy though that with the calculation of the Ecoscore of the battery-cars there were no emissions included concerning the extraction and the transport of the fossil fuels used to generate the electricity.

The fuel cell vehicles score very well in comparison to the cars that use traditional fossil fuels. Only the hybrid vehicles and cars that use compressed natural gas as fuel have Ecoscores that are comparable with those of the fuel cell vehicles.

The use of hydrogen in fuel cell-vehicles is thus ecological attractive according to the Ecoscore scale. Especially when renewable energy is used to produce the hydrogen. Further research is required to investigate the economical attractiveness.

Some researchers point to the importance of the ecological impact of the fuel cell production. This is not included in the study and it is possible that this impact is much greater than that of the production of spark ignition motor. Further research is needed to clear this out.

## Lijst met afkortingen

AFC	Alkaline Fuel Cell
Bel	Belgische elektriciteitsmix
BTU	British Thermal Unit
CCS	Carbon Capture and Storage
CH <sub>2</sub>	Compressed Hydrogen of gecompresseerd waterstof
CO	Koolstofmonoxide
CO <sub>2</sub>	Koolstofdioxide
DBFC	Direct Borohydride Fuel Cell
EI	EcoInvent databank
EPA	Environmental Protection Agency
FC	Fuel Cell of brandstofcel
Flohea	Vakgroep Flow, Heat end Combustion Mechanics van de Universiteit Gent
Gas	Gasificatie van steenkool
GEMIS	Global Emission Model for Integrated Systems
GFR	Gas Cooled Fast Reactor
GWP	Global Warming Potential
Her	Hernieuwbare energie
ICE	Internal Combustion Engine of Verbrandingsmotor
IEA	International Energy Agency
H <sub>2</sub>	Waterstof
kWh	Kilowattuur: is gelijk aan 3 600 000 J of 3,6 MJ (Mega Joule)
LCA	Levenscyclus Analyse of Life Cycle Assessment
LH <sub>2</sub>	Liquid Hydrogen of vloeibaar waterstof (cryogeen waterstof)
LHV	Lower Heating Value
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
MHFC	Metal Hydride Fuel Cell
MJ	Mega joule
mpg	Miles per gallon
N <sub>2</sub> O	Stikstofoxide of lachgas
NO <sub>x</sub>	Stikstofoxiden
NRC	National Research Council

NREL	National Renewable Energy Laboratory
P	Waterstoftransport met behulp van pijpleidingen
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
PCFC	Protonic Ceramic Fuel Cell
PEC	Photo-elektro-chemisch
PEM	Proton Exchange Membrane (Fuel Cell)
PM	Particulate matter of fijn stof
RBACAS	Royal Belgian Academy Council of Applied Science
SMR	Steam Methane Reforming of stoomomvorming van aardgas
SMRL	Stoomomvorming aardgas, gegevens uit Little, 1996
SO <sub>2</sub>	Zwavel dioxide
SO <sub>x</sub>	Zwavel dioxide
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
TTW	Tank-to-Wheel
u	Atomaire massa-eenheid, ook wel Dalton (Da) genaamd
ULB	Université Libre de Bruxelles
VHTR	Very High Temperature Reactor
VITO	Vlaamse instelling voor technologisch onderzoek
W	Waterstoftransport over de weg
WKK	Warmte-kracht koppeling
WTT	Well-to-Tank
WTW	Well-to-Wheel



# Inhoudsopgave

## Deel 1

1. Inleiding .....	1
2. Wat is waterstof .....	1
2.1. Geschiedenis .....	2
2.2. Feiten en gegevens .....	4
3. Productie van waterstof .....	5
3.1. Inleiding .....	5
3.2. Stoomomvorming van natuurlijk gas .....	7
3.3. Gedeeltelijke oxidatie .....	8
3.4. Steenkool vergassing .....	9
3.5. Omzetting van water naar waterstof en zuurstof .....	10
3.6. Waterstof uit biomassa .....	20
3.7. Waterstof als bijproduct van bepaalde chemische processen .....	21
4. Koolstof captatie en opslag .....	21
5. Transport en distributie .....	24
5.1. Pijpleidingen .....	25
5.2. Wegtransport .....	26
6. Opslag van waterstof .....	27
6.1. Gas-compressietanken .....	27
6.2. Vloeibaar waterstof .....	29
6.3. Metaalhydride .....	29
6.4. Chemische hydrides .....	30
6.5. Sludge-waterstof .....	31
6.6. Koolstof nano-tubes .....	31
7. Gebruik .....	32
7.1. Draagbare toepassingen .....	33
7.2. Stationaire toepassingen .....	34
7.3. Transport toepassingen .....	35
8. Brandstofcellen .....	38
8.1. Lage temperatuur brandstofcellen .....	40
8.2. Hoge temperatuur brandstofcellen .....	43
8.3. Toekomst .....	47

## Deel 2

9. Methodologie .....	49
9.1. Levens Cyclus Analyse (LCA) .....	49
9.2. Ecoscore .....	50
10. Data verzamelen .....	56
10.1. Waterstofproductie .....	56
10.2. Berekenen Ecoscores .....	58
10.3. Verbruik van de bestudeerde auto's .....	58
10.4. Waterstofproductie .....	63
10.5. Opslag van waterstof .....	68
10.6. Geluidshinder .....	69
10.7. Transport van waterstof .....	70
11. Resultaten .....	72
11.1. Bespreking .....	75
11.2. CO <sub>2</sub> -equivalent en Global Warming Potential .....	82

11.3. Vergelijking Ecoscore waterstof en andere brandstoffen.....	84
12. Besluit.....	86
13. Referenties .....	89
14. Bijlagen.....	98

## **Lijst van figuren**

Figuur 1: Verhouding wereldwijde waterstofproductie .....	7
Figuur 2: Logaritmische verdeling voor het berekenen van Ecoscores .....	56
Figuur 3: Gemiddelde Ecoscore per auto over de verschillende configuraties .....	75
Figuur 4: Gemiddelde Ecoscore voor voertuigen met verschillende waterstof- productiemethoden .....	77
Figuur 5: Vergelijking waterstof uit Belgische elektriciteitsmix en uit hernieuwbare elektriciteit.....	79
Figuur 6: Vergelijking vloeibaar en gecomprimeerd waterstof .....	80
Figuur 7: Deelscores van verschillende configuraties. ....	81
Figuur 8: Well-to-Wheel CO <sub>2</sub> -equivalenten.....	83
Figuur 9: Vergelijking tussen auto's met verschillende brandstoffen .....	85

## **Lijst van tabellen**

Tabel 1: Eigenschappen brandstofcellen.....	46
Tabel 2: De verschillende schadecategorieën van Ecoscore en hun gewichten .....	52
Tabel 3: Eigenschappen auto's .....	59
Tabel 4: Verbuiksgegevens van de verschillende voertuigen .....	63
Tabel 5: Emissiegegevens waterstofproductiemethoden .....	66
Tabel 6: Emissiegegevens opslag waterstof.....	69
Tabel 7: Emissiegegevens waterstoftransport over de weg .....	71
Tabel 8: Overzicht configuratiemogelijkheden .....	74
Tabel 9: Gecontacteerde bedrijven, organisaties en personen .....	98
Tabel 10: Alle berekende configuraties met de bijhorende emissies .....	99
Tabel 11: Alle berekende configuraties met de bijhorende emissies (vervolg) .....	100
Tabel 12: Verschillende configuraties met CO <sub>2</sub> -equivalenten per kilometer .....	101
Tabel 13: Basisgegevens waterstofproductie .....	102

## **Lijst van afbeeldingen**

Afbeelding 1: Toestel van Hoffman.....	11
Afbeelding 2: Basisprincipe van een brandstofcel op waterstof .....	38
Afbeelding 3: BMW 7 Hydrogen .....	61
Afbeelding 4: Ford P2000 .....	62
Afbeelding 5: Honda FCX Clarity .....	63
Afbeelding 6: Mercedes A F-Cell .....	64

# Deel I

## 1. Inleiding

Waterstof wint de laatste jaren sterk aan belangstelling. De milieubelasting door menselijke factoren neemt dramatische proporties aan en steeds meer mensen worden zich daar van bewust. De olieprijs stijgen bijna dagelijks, de opwarming van de aarde is een feit en het ecologisch bewustzijn in de samenleving groeit. Mensen beginnen te zoeken naar goedkopere en ecologisch verantwoorde alternatieven om te voorzien in hun behoeften. De persoonlijke mobiliteit is zowel financieel als ecologisch één van de centrale knelpunten.

Veel mensen zijn ervan overtuigd dat waterstof een onderdeel van de oplossing is voor de globale ecologische energiecrisis. De Vlaamse overheid heeft beslist om op basis van een ecologische graadmeter subsidies toe te kennen bij de aankoop van voertuigen die minder milieubelasting veroorzaken. De hiervoor ontwikkelde Ecoscore is een concreet beleidsinstrument dat ingezet wordt om milieuvriendelijk voertuigen voor de consument aantrekkelijker te maken. Voor bijna alle voertuigen die vandaag op de markt zijn werd deze Ecoscore al berekend. Aangezien de eerste waterstofvoertuigen wellicht binnenkort geïntroduceerd worden op de Belgische markt wordt het tijd om ook voor deze voertuigen de Ecoscore te berekenen. Op die manier kan dan de WTW milieu-impact van de verschillende voertuigen met elkaar vergeleken worden. In tegenstelling tot andere brandstoffen kan waterstof op verschillende manieren geproduceerd worden. De verschillende productie-, opslag- en transportmethoden worden met elkaar vergeleken om een volledig beeld te krijgen van de milieu-impact van waterstof bij het gebruik in personenwagens.

Het eerste deel is een samenvatting van de huidige stand van zaken in verband met waterstof. Naast een korte inleiding en een historische schets worden de verschillende manieren om waterstof te produceren, op te slaan, te transporteren en te gebruiken besproken. In het tweede deel worden verschillende configuraties van productiemethode, wijze van opslag en transport gecombineerd met verschillende voertuigen. Aan de hand van die gegevens worden dan de respectievelijke Ecoscores berekend. Tot slot worden de gegevens naast elkaar gelegd en wordt er een besluit geformuleerd

## 2. Wat is waterstof

### 2.1. Geschiedenis

Waterstof werd in 1671 voor de eerste keer beschreven door Robert Boyle (1627-1691). Hij deed experimenten met reacties tussen een zuur en een metaal, en merkte dat hierbij een gas vrijkwam. Ook de bekende Engelse wetenschapper Henry Cavendish (1731-1810) merkte in 1766 een brandbaar gas op bij soortgelijke experimenten (Norbeck *et al.*, 1996). Enkele jaren later, in 1788, bedacht Antoine Lavoisier (1743-1794) de gangbare naam Hydrogenium. Deze naam is gebaseerd op de Latijnse stammen 'hydro' en 'genes', wat respectievelijk 'water' en 'vormen of maken' of 'geboren uit' betekend. We zouden het dus vrij kunnen vertalen als 'watermaker'. Ondanks dat waterstofatomen 90% vertegenwoordigen van alle atomen en 75% van alle massa in het heelal, is het bij het grote publiek niet zo bekend (The Columbia Encyclopedia, 2001). Dit is hoofdzakelijk te wijten aan het feit dat waterstof op aarde steeds gebonden is aan andere atomen en moleculen. Eén van de eerste toepassingen van waterstof was het gebruik ervan in verkenningsluchtballonnen (Rifkin, 2002). De meeste mensen denken bij waterstof meestal aan de beruchte ramp met de Hindenburg in Lakewood, New Jersey in 1937 waarbij 36 mensen om het leven kwamen (Norbeck *et al.*, 1996). Ondanks de grote hoeveelheid waterstofgas die daarbij ontbrandde overleefde twee derde van de passagiers de ramp. Daarenboven stierven de meeste slachtoffers door de val of door brandwonden van de brandstof die gebruikt werd voor de aandrijving van de zeppelin. Daarenboven werd de explosie hoogstwaarschijnlijk veroorzaakt door het onweerachtig weer in combinatie met de hoogst brandbare stof die gebruikt werd om de zeppelin waterdicht te maken (Sørensen, 2005). Zo is er bij het grote publiek een probleem ontstaan met de beeldvorming over de veiligheid van waterstof (Norbeck, *et al.*, 1996).

Ondanks het grote potentieel verdween waterstof voor een groot stuk uit het dagelijkse leven. In de industrie werd en wordt waterstof(gas) wel nog volop gebruikt. Onder andere bij de productie van ammoniak (62,4%) en methanol (8,7%), het harden van vetten, het bewaren van voedsel, hydralkylatie, hydro-kraken van olie (24,3%), koelen van generatoren, lassen, raketbrandstof, ... (Rifkin, 2002; procentueel gebruik van alle geproduceerde waterstof uit Spath *et al.*, 2001). In tegenstelling tot wat vele mensen denken is waterstof geen energiebron maar een

energiedrager, zoals elektriciteit. Het moet dus, evenals elektriciteit, geproduceerd worden. Waterstof mag dan overal in het heelal terug te vinden zijn, toch is het op aarde zeldzaam in zuivere vorm (Rifkin, 2002). Waterstofatomen zijn zeer reactief en daardoor bijna altijd gebonden aan andere atomen (zoals in water waar de waterstofatomen gebonden zijn aan zuurstofatomen). Alvorens waterstof dus te kunnen gebruiken als energievoorzieners dienen de samengestelde moleculen gesplitst te worden. In één van de volgende hoofdstukken zal uitgelegd worden hoe dit gedaan wordt.

De brandstofcel, waarin waterstof op een efficiënte manier kan omgezet worden in elektriciteit, werd al in de 19de eeuw uitgevonden door Sir William Robert Grove (1811-1896) (website Smithsonian Institution, 2004). Hij bouwde de eerste werkende brandstofcel in 1839 (Norbeck *et al.*, 1996). Decennialang werd er wel wat geëxperimenteerd maar de eerste praktische toepassing kwam er pas na een samenwerking tussen de General Electric Company (GE) en de National Aeronautics and Space Administration (NASA). Vanaf eind jaren 50 worden er commerciële brandstofcellen geproduceerd en gebruikt (Rifkin, 2002). Tot de dag van vandaag wordt waterstof hoofdzakelijk in de industrie en als brandstof voor noodgeneratoren gebruikt. Door de vele onderzoeken en ontwikkelingen komen er ondertussen wel bijna dagelijks nieuwe waterstoftoepassingen op de markt. Ook in de ruimtevaart en de raketindustrie blijft waterstof populair omdat het van alle brandstoffen de hoogste energie/gewicht ratio heeft (Norbeck *et al.*, 1996).

De laatste jaren wordt er veel geld en tijd vrijgemaakt om de mogelijkheden van het gebruik van waterstof verder te onderzoeken. Veel mensen hebben hoge verwachtingen van de zogenaamde 'waterstofeconomie' (Ramage *et al.*, 2004). Dit zou een economie of samenleving zijn die voor haar energievoorziening hoofdzakelijk of uitsluitend gebruik zou maken van waterstof. Dit zou er voor moeten zorgen dat er gemakkelijker en meer gebruik kan gemaakt worden van hernieuwbare energie. Op die manier kunnen onder andere de broeikasgassen in de atmosfeer beperkt worden. Toch is het concreet nog onduidelijk in welke mate deze ons zou kunnen helpen in het creëren van een duurzamere wereld. Voor een deel is deze studie bedoeld om na te gaan in welke mate een waterstofeconomie, en met name dan het geïndividualiseerd personenvervoer op waterstof, milieuefficiënt is.

## **2.2. Feiten en gegevens**

We komen allemaal elke dag, bewust of onbewust, in contact met waterstof. Het is immers een hoofdbestanddeel van water. Toch is er een wereld van verschil tussen water en waterstof. Waar water bij normale druk en temperatuur een geurloze, niet-brandbare, vloeistof is, is waterstof onder dezelfde omstandigheden een hoogst brandbaar, geurloos, reukloos, smaakloos, niet-metallig, diatomisch gas (Sørensen, 2005). We spreken dan meestal ook over waterstofgas ( $H_2$ ) in plaats van waterstof (H). Dit komt doordat de waterstofatomen zo reactief zijn dat ze verbindingen aangaan met elkaar. Zo vormen ze  $H_2$ . Waterstof in zuivere vorm (H en  $H_2$ ) is dus zeldzaam op aarde maar komt elders in het universum veelvuldig voor. Onder andere in sterren, de zon en in grote gasvormige planeten is er zuiver waterstof terug te vinden (Sørensen, 2005). Het bestaan van grote moleculaire waterstofgaswolken wordt tevens in verband gebracht met het ontstaan van sterren.

Met zijn atomaire massa van 1.0079 u is waterstof het lichtste element dat we kennen. Het heeft dan ook, geheel volgens de logica van Mendelejev's indeling, atoomnummer 1 toegekend gekregen. Het behoort tot de groep van de alkalimetalen. Wat de oxidatietoestand betreft is waterstof zowel terug te vinden in verbindingen waarin het een elektron afgeeft, als in verbindingen waarin het een elektron opneemt. Het is dus gemakkelijk in staat om verbindingen aan te gaan met andere stoffen.

Waterstofgas heeft een natuurlijke dichtheid van  $0,08988 \text{ kg/m}^3$  bij één atmosfeer en  $20^\circ\text{C}$ . Het smeltpunt en het kookpunt liggen dicht bij elkaar: respectievelijk  $14,06\text{K}$  ( $-259,09^\circ\text{C}$ ) en  $20,28\text{K}$  ( $-252,87^\circ\text{C}$ ) (Sørensen, 2005). Waterstof is een zeer reactief element en komt op aarde dus niet in zuivere enkelvormige vorm voor (Rifkin, 2002). De meest gekende verbindingen waarin waterstof voorkomt zijn water ( $H_2O$ ), alle fossiele brandstoffen (koolwaterstoffen) en bijna alle organische verbindingen. Tevens speelt het een heel belangrijke rol bij zuur-base chemie waarbij er protonenuitwisseling is van oplosbare moleculen. Door zijn specifieke atomaire structuur, met slechts één elektron en één proton, heeft waterstof een belangrijke rol gespeeld bij de ontwikkeling van de theorie van de atomaire structuur, de inzichten in chemische samenstellingen en in de ontwikkeling van de kwantummechanica.

Zoals eerder gezegd is waterstofgas een hoogst brandbaar gas. Zelfs bij een oplossing van 4% in lucht is het nog steeds brandbaar. In veel gevallen zal een

mengeling van lucht en waterstofgas zeer licht ontvlambaar zijn en bestaat er ontploffingsgevaar (Ramage *et al.*, 2004). Puur waterstofgas is zelfontvlambaar vanaf een temperatuur van 585°C (Eichert *et al.*, 1986). Zuivere waterstof-zuurstof mengsels branden in het ultraviolet spectrum en zijn dus voor de mens zo goed als onzichtbaar. Daarnaast is het ook geurloos. Dit heeft als gevaar dat lekken voor mensen zeer moeilijk op te sporen zijn (Norbeck *et al.*, 1996). Doordat waterstof lichter is dan lucht hebben de vlammen gelukkig de neiging om snel te stijgen en te vervliegen. Hierdoor wordt algemeen aangenomen dat waterstof in veel gevallen veiliger is dan andere brandstoffen zoals aardgas of LPG. Deze zijn immers zwaarder dan lucht en cumuleren dus makkelijker in plaats van te vervliegen. Dit houdt veel meer gevaar in bij brand of ontploffing. Enkel in slecht verluchtte ruimtes kan waterstof voor bijkomend gevaar zorgen (Norbeck *et al.*, 1996).

Het woord 'waterstof' kan op zich verschillende dingen betekenen. Ten eerst kan het de naam van het chemische element zijn. Hierbij spreken we dan over een soort atoom.

Ten tweede kan er met de term 'waterstof' geduid worden op wat wij waterstofgas noemen. Dit is een diatomisch (twee atomen) molecule waarnaar chemici refereren als *dihydrogen* of waterstofmolecule ( $H_2$ ). Dit is de vorm van waterstof waar we het in de rest van deze paper zullen over hebben. Wanneer we spreken van waterstof bedoelen we, tenzij anders vermeld, dit gas. Daarnaast kan 'waterstof' ook nog wijzen op één van de elementen in een chemische verbinding zoals in koolwaterstoffen. Hierbij hebben de waterstofatomen verbindingen aangegaan met andere atomen en moleculen.

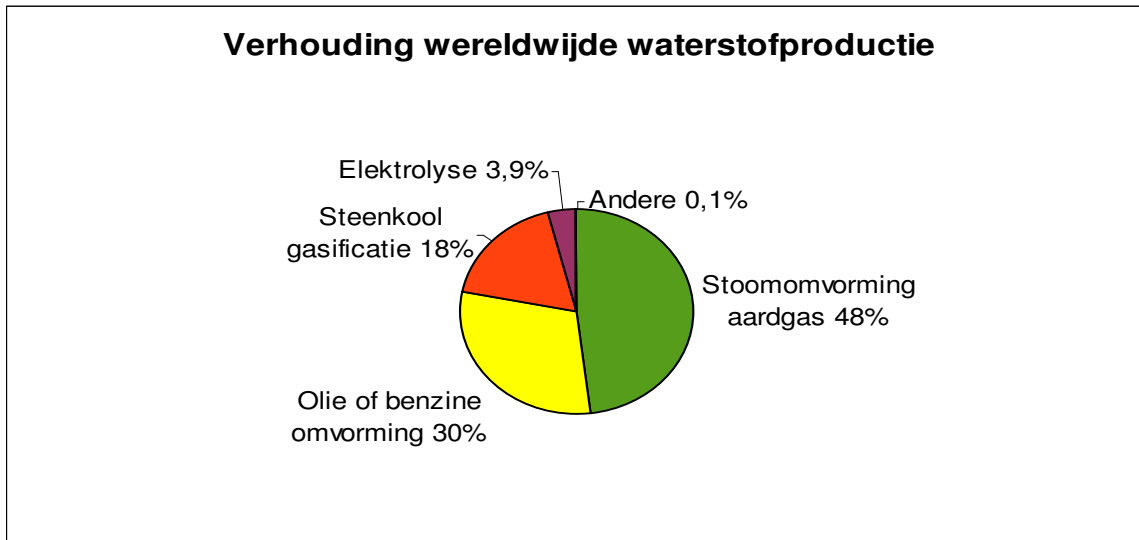
## **3. Productie van waterstof**

### ***3.1. Inleiding***

Zoals in de inleiding al aangehaald werd is waterstof geen energiebron maar een energiedrager. Dit wil dus zeggen dat het niet zomaar opgepompt of 'geoogst' kan worden om vervolgens te worden opgeslagen en te worden gebruikt. Waterstof dient geproduceerd te worden. Voor leken in het waterstofdebat is dit één van de centrale punten die vaak over het hoofd worden gezien. Want hoe proper het gebruik van waterstof ook mag zijn, de productie ervan is dat niet altijd. De vele verschillende

productiemethoden zullen in dit hoofdstuk allemaal behandeld worden. De methoden die in het tweede deel van deze paper nog gebruikt worden zullen uiteraard uitgebreider worden besproken. Bijna alle processen waarbij (zuiver) waterstof wordt aangemaakt hebben één ding gemeenschappelijk: ze verbruiken energie. En wel meer dan dat de geproduceerde waterstof uiteindelijk zal leveren. Bij de productie van elektriciteit gaat doorgaans ook ongeveer de helft van de potentiële energie verloren. Elektriciteit maken kost dus ook meer energie dan dat ze uiteindelijk levert. De productiemethoden verschillen wel in de manier waarop ze het milieu belasten of gebruiken, de snelheid waarmee waterstof wordt aangemaakt, de kosten die er aan verbonden zijn, welke primaire energiebronnen er worden gebruikt, welke chemische processen er gebruikt worden, hoe zuiver de geproduceerde waterstof is, ... Dit hoofdstuk is dus bedoeld om een uitgebreide kijk te geven op de stand van zaken wat betreft de productie van waterstof. Dit is een belangrijk hoofdstuk omdat de eigenschappen van de productieprocessen in grote mate mee bepalen hoe vervuilend het gebruik van waterstof zal zijn. Immers, hoe goedkoper en hoe properder deze processen, hoe groter de kans dat waterstof ooit een valabel alternatief zal zijn voor de energiedragers die we vandaag de dag kennen (elektriciteit, olie, gas, ...). Vandaag de dag wordt er wereldwijd jaarlijks ongeveer  $5 \times 10^{11}$  Nm<sup>3</sup> waterstof geproduceerd. Dit is goed voor 2% van de globale primaire energievraag. Hiervan wordt 96% geproduceerd met behulp van fossiele brandstoffen (Ewan *et al.*, 2005). Om te voldoen aan de wereldwijde energievraag zou er jaarlijks  $3,3 \times 10^{13}$  Nm<sup>3</sup> waterstof geproduceerd moeten worden (Züttel, 2004). Op figuur 1 op pagina 7 is te zien uit welke bronnen waterstof geproduceerd wordt.





**Figuur 1: Verhouding wereldwijde waterstofproductie**  
 Gegevens grafiek afkomstig uit Ewan, 2005

### **3.2. Stoomomvorming van natuurlijk gas**

Stoomomvorming van aardgas ( $\text{CH}_4$  of methaan) is vandaag de dag, en waarschijnlijk ook in de nabije toekomst, de goedkoopste en efficiëntste manier om waterstof te produceren uit fossiele brandstoffen (Norbeck *et al.*, 1996). Dit komt doordat aardgas enkele karakteristieken heeft die het voordeliger maken dan andere fossiele brandstoffen. Zo heeft methaan de hoogste waterstof-koolstof ratio (4:1), is het slechts in kleine mate vervuild met zwavel en reageert het beter met water dan andere koolwaterstoffen (Norbeck *et al.*, 1996). Door de makkelijke handelbaarheid en de relatief lage kosten staat stoomomvorming van aardgas dan ook in voor ongeveer de helft van de totale wereldwijde productie van waterstof (Ewan *et al.*, 2005). 'Reforming' of omvorming is een chemisch proces waarbij een koolwaterstof (o.a. aardgas) in aanwezigheid van stoom wordt omgezet in een waterstofrijk gasmengsel, ook wel reformaat genoemd (Norbeck *et al.*, 1996). Bij stoomomvorming van aardgas wordt een mengsel van aardgas, dat gezuiverd is van zwavel, en stoom over een nikkel-aluminium katalysator geleid. Dit gebeurt doorgaans bij een temperatuur tussen  $700^\circ\text{C}$  en  $1100^\circ\text{C}$  en een druk van 25 bar. Hierbij wordt koolstofmonoxide (CO) en waterstof gegenereerd. Hierna volgt doorgaans een water-gas-schiftreactie waarbij het geproduceerde CO gebruikt wordt om nog meer waterstof te produceren. Bij deze reactie wordt de CO samen met

water omgezet in CO<sub>2</sub> en H<sub>2</sub>.<sup>1</sup> Vaak worden nog katalysators zoals NiO gemixt met Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> of CaO gebruikt om de efficiëntie van het proces te vergroten (Norbeck *et al.*, 1996).

Deze techniek van omvorming van aardgas is uitermate geschikt om toe te passen op grote schaal. De grote omvormers hebben een capaciteit van 100 000 ton per jaar en kunnen een energie-efficiëntie bereiken tussen de 70 en de 80% (Gray *et al.*, 2001).

### **3.3. Gedeeltelijke oxidatie**

In het proces van gedeeltelijke oxidatie wordt aardgas (of een ander vloeibaar of gasvormig koolwaterstof) samen met zuurstof geïnjecteerd in een hogedrukreactor. Hierbij is het belangrijk dat de verhouding tussen koolstof en zuurstof juist is. Deze verhouding heeft immers invloed op de omzettingsefficiëntie naar CO en H<sub>2</sub>, en beïnvloedt de temperatuur van het katalytische bed waarboven deze omzettingsreactie plaatsvindt (Pukrushpan *et al.*, 2003). De warmte die gegenereerd wordt door de oxidatiereactie wordt afgevoerd, de CO wordt met behulp van water in de water-gas-schiftreactie omgezet in CO<sub>2</sub> en deze kan eventueel opgevangen worden.

Gedeeltelijke oxidatie verschilt op een paar belangrijke punten van stoomomvorming. Bij het proces van gedeeltelijke oxidatie is geen externe warmte nodig maar wel een aanzienlijke hoeveelheid pure zuurstof. Om deze zuurstof te bekomen dient de lucht eerst gefilterd te worden van de aanwezige stikstof omdat deze anders in het waterstof terecht komt (Norbeck *et al.*, 1996)<sup>2</sup>. De afwezigheid van een externe warmtebron zorgt, ondanks het zuiveren van de zuurstof, voor een aanzienlijke kosten- en plaatsbesparing. Een installatie voor gedeeltelijke oxidatie kan dus compacter gebouwd worden dan een installatie voor stoomomvorming. Dit zorgt er tevens voor dat het een flexibeler systeem is, in die zin dat het makkelijker opgestart en stilgelegd kan worden. Het nadeel is echter wel dat het minder energie-efficiënt is dan stoomomvorming (Pukrushpan *et al.*, 2003). Door gebruik te maken

---

1 CH<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>O + warmte --> CO + 3H<sub>2</sub>  
CO + H<sub>2</sub>O --> CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> + warmte  
Bron: IEA, 2006

2 CH<sub>4</sub> + ½ O<sub>2</sub> --> CO + 2H<sub>2</sub> + warmte  
Bron: IEA, 2006

van katalysators en een hoge druk kan de operatietemperatuur gereduceerd worden van 1150-1315°C tot 590°C. Vandaag de dag is het economisch niet aantrekkelijk om op industriële schaal gebruik te maken van gedeeltelijke oxidatie om waterstof uit methaan te halen. Op zich is de gedeeltelijke oxidatiereactor goedkoper dan de stoomomvormer. Door de bijkomende kosten van zuivering en zuurstofproductie zijn de effectieve kosten voor waterstofproductie echter groter. Deze techniek wordt vooral gebruikt voor zwaardere koolwaterstoffen omdat de installatie beter bestand is tegen vervuiling door CO en CO<sub>2</sub>. Door dit te doen verkrijgt men dan wel minder zuiver waterstof (Norbeck *et al.*, 1996). 30% van alle waterstof die wereldwijd jaarlijks geproduceerd wordt, wordt opgewekt met behulp van gedeeltelijke oxidatie.

### **3.4. Steenkool vergassing**

Net zoals aardgas is ook steenkool (zoals alle fossiele brandstoffen) een koolwaterstof en dus geschikt voor de productie van waterstof. Vooral de productie op grote schaal is aantrekkelijk. Door het hoge gehalte aan koolstof in steenkool is de uitstoot van koolstofdioxide bij de productie van waterstof groter dan bij het gebruik van andere fossiele brandstoffen. Wil men dus op grote schaal gebruik blijven maken van steenkool zonder het milieu te zwaar te belasten, dan is het belangrijk dat men gebruik maakt van de technieken om koolstofdioxide te vangen en op te slagen. Deze technieken zijn momenteel volop in ontwikkeling. Ze worden besproken in hoofdstuk 4.

Natuurlijk kan steenkool gebruikt worden om elektriciteit op te wekken die op zijn beurt dan gebruikt kan worden voor de productie van waterstof door middel van elektrolyse. De vergassing van steenkool is echter een efficiëntere manier om waterstof te maken uit steenkool. Het chemische proces waarmee dit gedaan wordt is gelijkaardig aan dat van de gedeeltelijke oxidatie. In dit proces wordt de steenkool gedeeltelijk geoxideerd door het samen met zuurstof en stoom te mengen in een reactor onder hoge druk en hoge temperatuur. Het resultaat is dan een gasmengeling, ook wel 'syngas' genaamd, dat bestaat uit CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> en stoom. Een deel van dit gas wordt gebruikt voor de distillatie van lucht om de nodige zuurstof te hebben en een deel voor de productie van de nodige stoom. Door de water-gas-schiftreactie kan met de rest van het syngas de H<sub>2</sub> opbrengst nog vergroot worden. Bij deze omzettingsreactie wordt vandaag de dag een energie-efficiëntie bereikt van

64% . Indien men gebruik zou maken van CO<sub>2</sub> captatie zou dit dalen tot 59% (Gray *et al.*, 2001). Het gebruik van zuurstof bij hoge druk en temperatuur zorgt ervoor dat er een minimale hoeveelheid stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>) aangemaakt wordt als bijproduct van de reactie. De overschotten en de assen die na de reactie overblijven op de bodem van de reactor bevatten zware metalen. Ze worden 'gevangen' in een inert, glasachtig materiaal en worden dan gebruikt als vulling voor wegen (road filler).

Vandaag de dag zijn de kosten voor de productie van waterstof door vergassing van steenkool (op grote schaal) hoger dan die van stoomomvorming van aardgas. Dit is deels te wijten aan het feit dat deze techniek nog niet zo verregaand is ontwikkeld als die van de gasomvorming. Daarnaast is er ook nog een verschil in de kostenspreiding. De koolstofreactoren zijn per eenheid duurder dan die voor waterstofproductie met andere fossiele brandstoffen, maar dit wordt gedeeltelijk gecompenseerd door een lagere kost voor de basisgrondstof. De verschillende vormen waaronder steenkool kan voorkomen zorgen voor extra complicaties en kosten bij de verwerking ervan (Norbeck *et al.*, 1996). Dit zorgt ervoor dat steenkool vandaag de dag de duurste fossiele brandstof is om om te zetten naar waterstof (Norbeck *et al.*, 1996). Toch heeft de Verenigde Staten in 2006 een uitgebreid programma opgestart om onderzoek te doen naar het gebruik van steenkool om waterstof te produceren. Op die manier willen ze zelf kunnen voorzien in hun (waterstof)energiebehoeften (National Energy Technology Laboratory, 2007). Er wordt verwacht dat in de toekomst, met behulp van geavanceerde technieken, de energie-efficiëntie van de omzetting van steenkool naar waterstof kan stijgen tot 75% (Gray *et al.*, 2001).

### **3.5. Omzetting van water naar waterstof en zuurstof**

Eén van de meest logische en voor de hand liggende manieren om aan waterstof te geraken is door omzetting van water. Hierbij worden de watermoleculen (H<sub>2</sub>O) gesplitst in waterstof (H<sub>2</sub>) en zuurstof (O<sub>2</sub>). De energie die gebruikt wordt om deze omzetting te volbrengen kan van verschillende bronnen komen. Ondanks dat het splitsen van water een logische manier lijkt om aan waterstof te komen is het om verschillende redenen niet de meest efficiënte. Toch heeft deze productiewijze ook enkele belangrijke voordelen die verderop worden besproken. Slechts vier procent van alle waterstof die wereldwijd jaarlijks wordt geproduceerd, wordt verkregen via de

elektrolyse van water (Rifkin, 2002).

### 3.5.1. Elektrolyse

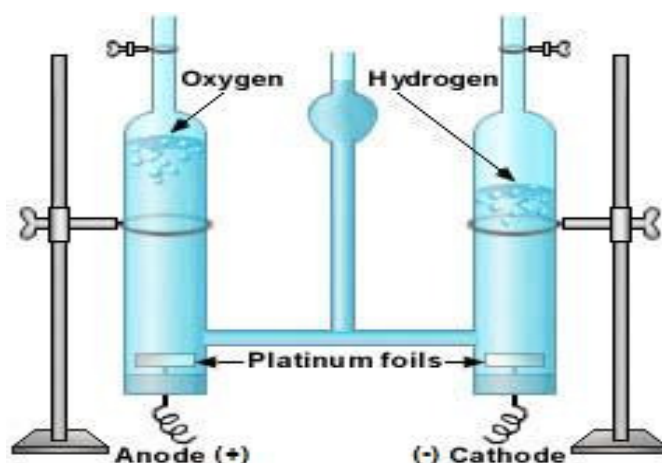
Elektrolyse is de meest voor de hand liggende methode om water te splitsen. De techniek om stoffen te splitsen, die we vandaag de dag elektrolyse noemen, werd in 1832 uitgevonden door de Britse autodidactische natuur- en scheikundige Michael Faraday (1791-1867). Hij ontdekte dat een potentiaal tussen twee elektroden (een katode en een anode) er voor zorgt dat de positief geladen deeltjes (kationen) zich naar de katode bewegen en dat de negatief geladen partikels (anionen) zich aangetrokken voelen tot de anode. Aan de katode vindt een reductiereactie plaats, dit wil zeggen dat de katode elektronen afstaat aan de oplossing waardoor de positief geladen delen zich aangetrokken voelen. Aan de anode vindt een omgekeerde reactie plaats die we oxidatiereactie noemen. Hierbij worden elektronen onttrokken aan de oplossing. In het geval van elektrolyse van water ontstaat er waterstofgas aan de katode en zuurstofgas aan de anode.

Elektrolyse is een behoorlijk efficiënt scheikundig proces. Doorgaans wordt bij deze omzetting van elektriciteit naar waterstof een efficiëntie behaald tussen de 70 en de 90% (Rifkin, 2002; Gray *et al.*, 2001; GEMIS, 2002; Züttel, 2004). Deze efficiëntie neemt doorgaans nog toe bij een stijgende druk (Koroneos *et al.*, 2004). De efficiëntie van onze elektriciteitscentrales, waar de gebruikte elektriciteit geproduceerd wordt, ligt echter veel lager. De meeste hebben een efficiëntie, afhankelijk van de gebruikte brandstof, tussen 30 en 50%. In de omzettingsprocessen van basisgrondstof (uranium, gas, steenkool, ...) tot waterstof, met behulp van water en elektriciteit, gaat dus veel energie verloren. Over de hele cyclus kunnen we spreken van een energie-efficiëntie van rond de 25% (Walters *et al.*, 2002). Over de gehele cyclus wordt dus slechts één vierde van de gebruikte energie daadwerkelijk omgezet in waterstof.

Alvorens een vergelijkende studie te kunnen maken van de verschillende manieren om waterstof te produceren met behulp van elektrolyse is het belangrijk dat ook de verschillende manieren van elektriciteitsproductie onder de loep worden genomen. Enkel op die manier kunnen we een realistisch beeld krijgen van onder

andere de kostprijs en de milieu-impact. Aangezien vooral het gevaar van CO<sub>2</sub> en de andere broeikasgassen naar voor wordt geschoven als argument om over te schakelen naar waterstof als energiedrager, zullen vooral de meer CO<sub>2</sub>-neutrale manieren van waterstofproductie hier nadrukkelijk besproken worden. Hieronder worden dan ook van enkele elektriciteitsproductieprocessen de voor- en nadelen besproken.

Alvorens we water kunnen splitsen door middel van elektrolyse hebben we



**Afbeelding 1: Toestel van Hoffman**

Bron: Wikipedia, 2008

natuurlijk een elektrolysetoestel nodig. Dit toestel bestaat uit watertoevoer, zuurstoftoevoer, elektriciteitsbron, de nodige elektronica en twee elektroden. Het elektrolyseproces kan simpel uitgelegd worden aan de hand van het toestel van Hoffman (1818-1892, Duitsland) zoals weergegeven in afbeelding 1. Door het water geleidend te maken met behulp van bijvoorbeeld kaliumnitraat (KNO<sub>3</sub>) en vervolgens onder stroom te zetten met behulp van de elektroden wordt het water gesplitst in waterstofgas (H<sub>2</sub>) en zuurstofgas (O). De elektrolysetoestellen die vandaag de dag gebruikt worden zijn complexer en geavanceerder (en duurder) dan deze op de afbeelding. Onder druk wordt er namelijk een betere efficiëntie bereikt van het elektrolyseproces.

Een dergelijk elektrolysetoestel is beslist niet goedkoop en voor een goede efficiëntie is het belangrijk dat alle onderdelen nauwkeurig afgesteld worden. Het elektrolysetoestel draagt voor een aanzienlijk deel bij aan de totale kost van het geproduceerde waterstof.

Een voordeel van waterstofproductie met behulp van elektrolyse is dat de

waterstof die geproduceerd wordt zeer zuiver is, veel zuiverder dan de productie van waterstof met behulp van bijvoorbeeld stoomomvorming. Daar men voor sommige industriële toepassingen behoefte heeft aan zeer zuiver waterstof wordt er, ondanks de lage efficiëntie en hoge kosten, toch gebruik gemaakt van waterelektrolyse.

### **3.5.1.1. Kernenergie**

De elektriciteitsproductie in België is voor 55% afkomstig van kerncentrales (7 reactoren), gevolgd door aardgas met 25% van de geleverde elektriciteit. Aardgas wint de laatste jaren wel terrein op andere fossiele brandstoffen maar de verhouding tussen fossiele brandstoffen en kernenergie blijft nagenoeg ongewijzigd (Informatieblad Energiemix, 2005). De polemiek rond kernenergie is de meeste onder ons wel bekend. Vooral de ontginning van het uranium, de veiligheid en het afval zorgen voor heel wat controverses en onzekerheden in verband met de impact (sociaal, economisch, milieu) op middellange en lange termijn. Het berekenen van de exacte milieu-impact is problematisch omdat de effecten van het afval op het milieu moeilijk te kwantificeren zijn. Dit komt mede door de ontginning van het uranium en het afvalprobleem. Zoals eerder gesteld halen de kernreactoren die vandaag de dag in gebruik zijn slechts een rendement van rond de 33%. Dit wil zeggen dat slechts 33% van de energie die aanwezig is in het uranium ook effectief wordt omgezet in elektriciteit. De omzetting van water naar waterstof met behulp van elektriciteit is wel efficiënt (maximaal ongeveer 85%). De elektrolyse van water met elektriciteit uit kernenergie wordt doorgaans enkel gebruikt op dalmomenten. Dit zijn de momenten dat de vraag naar elektriciteit relatief laag is en waar men anders met een overschot aan geproduceerde elektriciteit zit. Gasvormig waterstof wordt hier dus gebruikt om de overproductie tijdelijk op te slaan. In België wordt echter nog niet op grote schaal gebruik gemaakt van waterstof voor de opslag van energie.

De nieuwste generaties kernreactoren, zoals de gasgekoelde snelle reactor (GFR of Gas-cooled Fast Reactor) en heel hoge temperatuur reactor (Very-high Temperature Reactor of VHTR) bieden goede vooruitzichten (Brown *et al.*, 2003). Deze hebben een grotere efficiëntie op het gebied van elektriciteitsproductie. Daarenboven werken ze met hogere stoomtemperaturen. Aangezien de totale energie-efficiëntie van elektrolyse stijgt met de temperatuur van de stoom, tot een bepaalde limiet, wordt ook dit proces vergemakkelijkt (Norbeck *et al.*, 1996). Vanaf

een bepaalde temperatuur (boven de 700°C) spreekt men van hoge-temperatuur elektrolyse. Hierbij wordt een deel van de energie toegevoegd in de vorm van warmte in plaats van elektriciteit. De chemische reactie die plaatsvindt bij elektrolyse verloopt gemakkelijker bij hoge temperaturen. Indien dus de elektrolyse direct (tijdens het elektriciteitsproductieproces) plaatsvindt in de nieuwste soorten reactoren, die werken met een veel hogere uitstoot temperatuur (ongeveer 950°C in plaats van 350°C), kan men een vele hogere efficiëntie bereiken. Er is een gecombineerde energiewinst van waterstof en elektriciteit mogelijk van wel 35% (Utgikar *et al.*, 2006). Vanaf 2500°C is er zelfs geen elektriciteit meer nodig om water te splitsen. In dat geval spreken we dan ook van thermolyse in plaats van elektrolyse (Norbeck *et al.*, 1996). Dit is slechts in uitzonderlijke gevallen haalbaar. Dit wordt verderop in paragraaf 3.5.4. nog kort besproken.

Indien we op korte termijn willen overschakelen op grootschalige productie en consumptie van waterstof zonder gebruik te maken van fossiele brandstoffen en zonder veel uitstoot van broeikasgassen is kernenergie één van de meest haalbare opties. Zowel de hoge-temperatuur elektrolyse als de thermo-chemische splitsing (zie paragraaf 3.5.5.) bieden, in combinatie met de nieuwste generatie kernreactoren, in dit opzicht goede vooruitzichten (Brown, *et al.*, 2003) (Utgikar *et al.*, 2006). Er zal dan wel nog verder onderzoek gedaan moeten worden naar geschikte materialen die bestand zijn tegen deze hoge temperaturen (Turner, 2004). Daarenboven werkt de nieuwste generatie van kernreactoren met het meer voorkomende uranium-238, in plaats van het eerder zeldzame uranium-235. Er wordt momenteel ook gewerkt aan reactoren die gebruik kunnen maken van gerecycleerde brandstof. Door deze optie verder uit te werken zou de efficiëntie verbeterd kunnen worden met een factor 60 (NEA, 2000). Voor een deel is er dus de mogelijkheid om de grondstofschaarste en het afvalprobleem in te perken. Natuurlijk verandert er niets aan de basisproblematiek van het kernafval. Het radioactieve materiaal dat overblijft, blijft nog honderden of duizenden jaren actief. Dit is een gevaarlijke erfenis die we meegeven aan de volgende generaties.

### **3.5.1.2. Windenergie**

Van alle hernieuwbare energiebronnen biedt windenergie waarschijnlijk het grootste potentieel, zowel financieel als qua praktische haalbaarheid, voor het



aanmaken van waterstof door middel van elektrolyse (Colela *et al.*, 2005). Op de lange termijn kan de waterstofproductie met behulp van windenergie gezien worden als het doel van een volwaardige waterstofeconomie (Turner, 1999). Vandaag de dag gebeurt de elektriciteitsproductie uit windenergie met een efficiëntie tussen 12% en 25%, afhankelijk van de plaats waar de windgenerator staat (Granovskii *et al.*, 2006). De omzettingsefficiëntie van elektriciteit uit windenergie tot waterstof ligt ergens tussen de 70% en de 90% (Rifkin, 2002; Gray *et al.*, 2001; GEMIS, 2002; Züttel, 2004; Spath *et al.*, 2004). Alvorens de weg van wind-elektriciteit-elektrolyse-waterstof-opslag echt rendabel en competitief kan zijn met andere energievectoren dienen er op bepaalde punten nog enkele belangrijke technologische doorbraken te komen. Vandaag de dag zijn de windturbines en de elektrolysetoestellen nog veel te duur. Toch is het de meest kostenefficiënte vorm van duurzame energie om elektriciteit en waterstof te produceren (Rifkin, 2002). Ook aan de opslagsystemen kan nog veel verbeterd worden (de problematiek van de opslag wordt in hoofdstuk 3 uitgebreid behandeld). Wanneer de prijs van elektriciteit afkomstig van een windturbine verder daalt naar 0,015\$ per kilowattuur, dan zal elektrisch gegenereerde waterstof, geproduceerd met behulp van windenergie, kunnen concurreren met benzine (Hoffmann, 2001). Er wordt verwacht dat dit prijsverschil tussen waterstof uit aardgas en waterstof uit windenergie in de nabije toekomst nog zal dalen door schaalvergroting en verder onderzoek en ontwikkeling (RBACAS, 2006).

De combinatie van windturbines en de productie van waterstof biedt wel enkele praktische voordelen ten opzichte van meer gecentraliseerde grootschalige waterstofproductie. Vooreerst is er door gebruik te maken van windturbines een gedecentraliseerde productie van waterstof mogelijk. Op afgelegen plaatsen zal het dan ook mogelijk zijn om op een milieuvriendelijke manier waterstof te produceren (Ramage *et al.*, 2004). Ook in dichter bevolkte gebieden kunnen windenergie en waterstof handig zijn. Indien de elektrolysetoestellen verwerkt worden in de windturbines kunnen bepaalde elektronische onderdelen, zoals de transformatoren tussen wissel- en gelijkstroom, gedeeld worden gebruikt (dus zowel voor de elektrolyse als voor de omzetting van generator naar elektriciteitsnet) (Ramage *et al.*, 2004). Dit zou resulteren in een aanzienlijke kostenverlaging. Daarenboven kan met enkele kleine aanpassingen de mast van de windmolens gebruikt worden om de geproduceerde waterstof in op te slagen. Zodoende kan er steeds gezocht worden

naar de optimale verhouding tussen elektriciteits- en waterstofproductie. Zo kan er, met de nodige controle en monitoring, steeds ingespeeld worden op de veranderingen in elektriciteitsvraag en hoeveelheid wind (Fingersh, 2003). Op die manier kan er dus transporteerbare brandstof geproduceerd worden op momenten dat de vraag naar elektriciteit laag is, of kan de opgeslagen waterstof omgezet worden naar elektriciteit met behulp van een brandstofcel op momenten van piekverbruik (met weinig wind). Op die manier kunnen windturbines gezien worden als locale, flexibele energieleveranciers. De variërende hoeveelheid wind is ook het grote nadeel van windenergie. Op momenten van piekverbruik is er niet noodzakelijk ook meer wind. Dit kan deels misschien wel opgevangen worden door waterstof op te slaan op momenten met minder verbruik of meer wind (Royal Belgian Academy Council of Applied Science, 2006). Windenergie biedt, van alle hernieuwbare energiebronnen, het grootste potentieel. Er wordt verwacht dat de omzettingsprocessen van wind naar waterstof nog zullen verbeteren en dat de kosten verder zullen dalen (Ramage *et al.*, 2004). De meeste mensen verwachten dat windenergie een belangrijke rol zal spelen in de waterstofeconomie.

### **3.5.1.3. Zonnecellen**

Ook zonnecellen hebben een groot potentieel op het vlak van elektriciteits- en waterstofproductie. Het grote nadeel is dat de grondstoffen en de productiemethoden om de zonnecellen aan te maken nog zeer duur zijn. Vandaag de dag is de kost van waterstof geproduceerd met behulp van photo-voltaïsche elektriciteit tot 25 maal duurder dan waterstof die geproduceerd wordt in een kool- of gascentrale (door vergassing of stoomomvorming). Door de verdere ontwikkelingen, een grotere productiecapaciteit en het goedkoper worden van de elektrolysetoestellen wordt verwacht dat de huidige meerkost in de toekomst nog aanzienlijk kan dalen (Hoffmann, 2001). Net zoals met de windturbines is er ook hier het voordeel van de mogelijkheid tot gedecentraliseerde productie. Van de hernieuwbare energiebronnen zijn de zonnecellen waarschijnlijk het meest geschikt om te concurreren met windenergie. De huidige fotonvoltaïsche cellen hebben een omzettingsefficiëntie van 15%. In sommige onderzoeken werden al wel efficiënties bereikt van 25% (Ewan *et al.*, 2005). Eén van de grote nadelen van de photo-voltaïsche cellen is hun grote milieu-impact. Volgens Koroneos zorgt deze manier van waterstofproductie voor de

grootste milieuschade van alle waterstofproductiemethoden (Koroneos *et al.*, 2004). Daarenboven zou er met een efficiëntie van 15% 380 000 km<sup>2</sup> zonnepanelen nodig zijn om te voorzien in de huidige wereldwijde energiebehoefte (Züttel, 2004).

#### **3.5.1.4. Hydro-elektrische energie**

Hydro-energie staat momenteel wereldwijd in voor 19% van de totale elektriciteitsproductie (Hoffmann, 2001). Net zoals bij de windturbines is het ook hier mogelijk om steeds het economische optimum tussen elektriciteit en waterstof te produceren naargelang de vraag en de beschikbaarheid van water. Er wordt verondersteld dat de opslag van de energie in waterstof efficiënter is dan bijvoorbeeld het terug omhoog pompen van water.

Verder kan men ook nog biomassa en geothermische energie gebruiken om elektriciteit op te wekken. Deze technieken zijn nog volop in ontwikkeling maar de consensus is dat ze beide veel potentieel hebben. De toekomst zal moeten uitwijzen of deze technieken ook effectief toegepast gaan worden.

#### **3.5.2. Foto-elektrochemische omzetting**

Fotolyse is de splitsing van bepaalde stoffen onder invloed van licht. In de natuur vormt fotolyse van water een onderdeel van de ons alom bekende en levensnoodzakelijke fotosynthese. In de fotovoltaïsche industrie wordt volop onderzoek gedaan naar cellen en membranen die voldoende voltage kunnen leveren om onder invloed van zonlicht water te splitsen en die stabiel zijn in een water-elektrolyt omgeving. Als het neerkomt op productiekost zou het wel eens kunnen dat een fotochemisch toestel, waarin alle functies van fotoabsorptie en watersplitsing gecombineerd worden, het meeste potentieel biedt om duurzaam waterstof te produceren. Wetenschappers zijn er in proefopstellingen al in geslaagd om een zonlicht-waterstof omzetting te bereiken met een efficiëntie van 12%. Het grote voordeel van deze foto-elektrochemische omzetting is de verkorte cyclus. In vergelijking met de foto-elektrolyse cyclus wordt de elektrolyse tussenstap hier weggelaten en is er dus een stijging van efficiëntie. Door het combineren van de fotovoltaïsche cellen en het elektrolysetoestel in één kan er bespaard worden op de

wijze van elektrolyse, de halfgeleider verwerking, de verbindingen en de bekabeling. Er wordt geschat dat dit een efficiëntiestijging van 30% met zich meebrengt (NREL, 2004). Volgens verschillende onderzoeken is dit binnen afzienbare tijd haalbaar (Ewan *et al.*, 2005). Het principe van zo een foto-elektrochemische cyclus is relatief simpel. Een PEC (photo-electrochemisch) toestel bestaat uit twee elektroden: een halfgeleider elektrode en een platina metaal elektrode die beide ondergedompeld worden in een waterig elektrolyt. In plaats van externe elektriciteit te gebruiken absorbeert de halfgeleider zonlicht en genereert zo de nodige stroom. Zo wordt waterstof geproduceerd aan het oppervlak van de halfgeleider en zuurstof aan de metaalelektrode. De moeilijkheid bestaat er nu in om een halfgeleider te vinden die de juiste elektrische eigenschappen vertoont en die stabiel is in een aquatisch milieu. Wetenschappers van over heel de wereld zijn volop bezig met het zoeken naar allerhande oplossingen voor deze problematiek. Veelbelovende halfgeleiders die nu onderzocht worden zijn galliumnitrides en amorfe silicone. Op de lange termijn wordt er veel verwacht van foto-elektrochemische omzetting van water. Samen met de fotobiologie vormen ze de grote hoop van veel waterstofwetenschappers (Khaselev *et al.*, 1998).

### **3.5.3. Fotobiologie**

Sommige fotosynthetische microben en microalgen produceren waterstof uit water in hun metabolisch gebruik van licht. De zuurstof, die een bijproduct is van deze waterstofproductie, zorgt echter voor problemen. Zuurstof onderdrukt de werking van de enzymen die instaan voor het vrijgeven van waterstof. Dit wil zeggen dat onder normale omstandigheden deze micro-organismen slechts voor een beperkte duur in staat zijn om waterstof te produceren. Wetenschappers zijn dan ook op zoek naar microben of genetisch gewijzigde vormen die beter bestand zijn tegen zuurstof. De laatste jaren zijn er veelbelovende studies aan de gang met hydrofiele algen. Met behulp van allerlei technieken wordt nu geprobeerd om de productie van waterstof en zuurstof te scheiden, hetzij fysiek, hetzij temporeel (Ghirardi, s.d.). Er zijn al rapporten gepubliceerd die gewag maken van efficiënties van 10% (NRC, 2004).

### 3.5.4. Thermolyse

Deze techniek werd al even aangehaald bij de bespreking van hoge-temperatuur elektrolyse met behulp van elektriciteit opgewekt door kernenergie. Zoals gezegd treedt er bij een temperatuur van 2500°C een automatische (onstabiele) ontbinding op van water (Norbeck *et al.*, 1996). Het is echter zo dat het bereiken van deze temperatuur veel energie vraagt en een extreme belasting is voor de gebruikte materialen. Daarom wordt thermolyse van water in de praktijk niet doelbewust toegepast. Toch is het theoretisch mogelijk om zelfs met zonne-energie een dergelijk hoge temperatuur te bereiken.

### 3.5.5. Thermo-chemische splitsing

Er zijn ook thermo-chemische cycli die geen gebruik maken van elektrolyse. Met behulp van katalysatoren wordt het water gesplitst onder invloed van de warmte. Met behulp van een thermo-chemische reactie die gebruik maakt van katalysatoren kan dit proces plaatsvinden bij een temperatuur van ten minste 850°C. Theoretisch zouden deze waterstofproductiereacties een efficiëntie kunnen bereiken van tussen 50 en 80 % (Yürüm, 1994). Eén van de meest veelbelovende katalytische reacties is de zwavel-jodium cyclus (Brown, 2003). Hierbij wordt jodium samen met zwaveldioxide gemengd in water. Hierbij worden waterstofjodide en zwavelzuur geproduceerd in een exothermische reactie. Het zwavelzuur (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) kan ontbonden worden bij een temperatuur van 850°C in zwaveloxide, water en zuurstof. Het zwaveloxide kan daarna hergebruikt worden. Het waterstofjodide (HI) kan bij een temperatuur van 400°C gesplitst worden in waterstof en jodium (Sørensen, 2005)<sup>3</sup>. Bij een temperatuur van 1000°C heeft deze reactie een efficiëntie van ongeveer 55%. Andere thermo-chemische cyclussen halen efficiënties van 40 tot 50% (Schultz, 2003).

De nieuwste generatie nucleaire reactoren is dus uitermate geschikt om naast elektriciteit ook waterstof te produceren. Andere veelbelovende cycli die nog in hun onderzoeksfase zitten zijn Cu-Cl cyclus, Ce-Cl cyclus en de calciumbromide-ijzer (UT-3) cyclus (Brown *et al.*, 2003). Bij alle thermo-chemische reacties worden alle

---

<sup>3</sup> (850°C): H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> → SO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O + ½ O<sub>2</sub>  
(120°C): I<sub>2</sub> + SO<sub>2</sub> + 2H<sub>2</sub>O → H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 2HI  
(450°C): 2HI → I<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>  
Bron: IEA, 2006

gebruikte chemicaliën terug opgevangen en hergebruikt.

### **3.6. Waterstof uit biomassa**

Biomassa en afgeleide brandstoffen zijn hernieuwbare energiebronnen die gebruikt kunnen worden om waterstof te produceren. Deze vorm van energiegebruik is in theorie CO<sub>2</sub>-neutraal aangezien de koolstofdioxide die vrijkomt bij oxidatie van de biomassa eerder al werd opgenomen tijdens de groei van de planten (NRC, 2004). De gebruikte biomassa kan van verschillende bronnen komen: hout, landbouwafval, consumentenafval of van gewassen die speciaal voor dit doel worden gekweekt. De processen die hoofdzakelijk worden gebruikt bij de omzetting van biomassa naar waterstof zijn indirecte-warmte gasificatie, zuurstofgeblazen (oxygen-blown) gasificatie, pyrolyse en anaerobe fermentatie (NRC, 2004).

Vandaag de dag is het, door het ophalen en transporteren van de biomassa, verschrikkelijk duur (in vergelijking met andere manieren om waterstof te produceren) om biomassa op grote schaal om te zetten in waterstof. Het is wel een zeer geschikte manier om groenafval, dat anders verloren zou gaan, op een propere manier om te zetten in zuiver en bruikbaar waterstof (NRC, 2004). Het kweken van specifieke gewassen met het oog op de omzetting ervan naar waterstof lijkt niet echt haalbaar. Het zou te veel belasting leggen op de natuurlijke grondstoffen en zou te veel beslag leggen op kostbaar land.

De meest bruikbare technieken om waterstof te produceren uit biomassa zijn gasificatie en pyrolyse (IEA, 2006). Het gasificatieproces bestaat uit twee delen. Eerst worden de vluchtige stoffen in de biomassa geïmpregneerd door een reeks complexe reacties. Dit gebeurt bij een temperatuur onder de 600°C. Het resultaat is een mix van CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O en teer. De overgebleven kolen worden dan vergast met zuurstof, waterstof en stoom. Het resultaat is dan een mix van CO, CO<sub>2</sub> en H<sub>2</sub>. De gehele reactie kan bondig samengevat worden als:

biomassa + O<sub>2</sub> → CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>” (Knoef, s. d.).

Pyrolyse gebeurt in de afwezigheid van zuurstof bij temperaturen tussen 500 en 800°C. Het proces kan omschreven worden als:

biomassa + energie → gassen + kool + bio-olie.

De verhoudingen tussen deze producten hangen af van de specifieke pyrolysemethode, de karakteristieken van de biomassa en de condities waaronder de

reactie plaatsvindt. Ondanks de voordelen, zoals de recyclage van resten die anders verloren zouden gaan, heeft de omzetting van biomassa slechts een efficiëntie van 0,5-1%.

Naast het gebruik van traditionele biomassa wordt er ook onderzoek gedaan naar het gebruik van textiel, bepaalde vetten, gemixte plastics, ... voor de productie van waterstof. Het onderzoek is nog lopende maar de verwachtingen zijn hoog gespannen. Ook wordt er nog steeds gezocht naar katalysators die beter bestand zijn tegen de condities waarin de pyrolyse plaatsvindt. (Milne *et al.*, 2001).

### ***3.7. Waterstof als bijproduct van bepaalde chemische processen***

In de chemische en petrochemische industrie zijn er bepaalde processen waarbij waterstof als bijproduct vrijkomt. Onder andere bij het aanmaken van chloor, één van de meest geproduceerde chemicaliën in de wereld, komt waterstof vrij. Deze ontstaat na elektrolyse van NaCl (natriumchloride) of KCl (kaliumchloride). In de petrochemische industrie komt waterstof voor als bijproduct van de katalytische omvorming van benzine om het octaangehalte te verbeteren. Ook bij het stoomkraken van koolwaterstoffen voor de productie van ethyleen komt waterstof vrij. Alle waterstof die als bijproduct uit een reactie komt dient voor verder gebruik eerst nog gezuiverd te worden.

## **4. Koolstof captatie en opslag**

Zoals eerder al gezegd komen er bij de productie van waterstof of elektriciteit uit fossiele brandstoffen schadelijke stoffen vrij. Door het groeiend algemeen bewustzijn van de druk die we hiermee op het milieu leggen ligt de nadruk de laatste jaren vooral op het broeikasgas CO<sub>2</sub>. In het kader van de Kyoto-doelstellingen en de opwarming van de aarde is het belangrijk dat we hier met voldoende zorg mee omspringen. Er wordt dan ook veel onderzoek gedaan naar manieren waarop deze koolstofdioxide in pure vorm verzameld en opgeslagen kan worden. Een eerste inspanning die in veel landen al wordt toegepast is een omschakeling van elektriciteitscentrales op steenkool naar centrales die werken op het duurdere aardgas (methaan). Methaan bevat immers minder koolstof (en dus potentiële CO<sub>2</sub>)

per hoeveelheid energie dan steenkool (Steinberg, 1983). Wat de collectie van deze koolstofdioxide betreft is het voordeliger om te produceren op grote schaal. De transportsector, die toch één van de grootste CO<sub>2</sub> vervuilers is, zal het, indien ze gebruik blijven maken van fossiele brandstoffen, zeer moeilijk hebben om hun CO<sub>2</sub> uitstoot te verminderen. Voor hen zijn de opties zuinigere auto's maken of overschakelen op auto's die gebruik maken van elektriciteit of waterstof. Bij CO<sub>2</sub>-filtering op grote schaal wordt het uitfilteren, zuiveren of absorberen van de CO<sub>2</sub> relatief gezien voordeliger. De methode die in de chemische en petrochemische industrie voor dit doel wordt gebruikt is gebaseerd op het gebruik van alkylamines voor de absorptie of desorptie (van geabsorbeerde staat overgaan naar een gasvormige of vloeibare vorm) van CO<sub>2</sub>. Dit is echter een duur proces. De waterstof- en elektriciteitsproductieprocessen die geen gebruik maken van extra zuurstof hebben het voordeel dat de CO<sub>2</sub> die vrijkomt vrij geconcentreerd is. Dit zal in de (nabije) toekomst zeker een (economisch en ecologisch) voordeel zijn ten opzichte van de oude verbrandingsprocessen die gebruikt worden voor de productie van elektriciteit. Er wordt geschat dat de CO<sub>2</sub> captatie en opslag de kosten van elektriciteitsproductie met 10 tot 40% zouden doen stijgen (Damen *et al.*, 2007).

Voor de opslag zijn er verschillende opties. Onderzoek moet nog uitwijzen welke methode in welke situatie het meest geschikt en meest haalbaar is. De meest haalbare en realistische opties, op het gebied van kosten en duurzaamheid, zijn op dit moment de injectie in oliebronnen, absorptie in niet-economische steenkoollagen, injectie in uitgeputte olie- of gasreserves, opslag als vloeistof in de diepzee en vaste opslag door CO<sub>2</sub> te laten reageren met een metaaloxide om zo stabiele carbonaten te vormen (RBACAS, 2006; Damen *et al.*, 2005).

Veel praktijkvoorbeelden zijn er nog niet maar er zijn wel enkele grootschalige proefprojecten. Onder andere in de Noordzee, de Barentszee en in Algerije zijn gasvelden te vinden waar een deel van de onttrokken CO<sub>2</sub> terug in het ondergrondse bassin wordt geïnjecteerd (NRC, 2004). In Canada is er een grootschalig project waar CO<sub>2</sub> afkomstig van een steenkoolvergassingscentrale wordt gebruikt om de olieopbrengsten uit het plaatselijke olieveld te verhogen. Opgeteld gaat het in deze vier proefprojecten jaarlijks om ongeveer 4,4 miljoen ton CO<sub>2</sub> (NRC, 2004).

Tot op heden is er echter geen enkele elektriciteitscentrale die werkt met een volledige captatie van CO<sub>2</sub>. In de VS. heeft de overheid recentelijk wel haar goedkeuring gegeven voor de eerste CCS elektriciteitscentrale met steenkool



(Futuregen, 2008). Dit is deels te wijten aan de techniek die nog maar in zijn kinderschoenen staat en aan de hoge kosten die er aan verbonden zijn. De opvang, zuivering, compressie en opslag van koolstofdioxide zou zorgen voor een stijging van het energieverbruik (in de productiecentra) tussen de 10 en de 40%. De energiekost zou, bij het in gebruik nemen van een nieuwe elektriciteits- of waterstofcentrale in de buurt van een opslagplaats, stijgen met minstens 20%. Het Intergouvernemental Panel on Climate Change (IPCC) schat dat het economische potentieel van CCS 10% tot 55% zou kunnen bedragen van de totale vermindering van CO<sub>2</sub>-uitstoot tot 2100 (IPCC, 2005).

De invloed van CCS op het milieu is niet eenzijdig positief. Ten eerste is er meer energie nodig. Dit leidt dus tot meer oppompen of ontginnen van fossiele brandstoffen, met de bijhorende negatieve impact op het milieu, de betreffende ecosystemen en de luchtkwaliteit door uitstoot van allerlei schadelijke stoffen die gebruikt worden bij ontginning, transport en opslag (of door gebruik te maken van hernieuwbare energie). Ten tweede is ook de invloed op de uitstoot van de productiecentra niet eenzijdig positief. Ondanks een drastische daling in de uitstoot van koolstofdioxide wordt er door het grotere debiet van brandstof, afhankelijk van de gebruikte productiemethoden, meer stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>), zwaveloxiden (SO<sub>x</sub>) en/of ammoniak geproduceerd. De hoeveelheid hiervan is natuurlijk afhankelijk van de waterstofproductiemethode. Daar komt nog bij dat de captatie van CO<sub>2</sub> nooit 100% is. Er blijft dus steeds nog een deel, afhankelijk van welke methode gebruikt wordt, CO<sub>2</sub> achter. Daarnaast is er voor CO<sub>2</sub>-captatie ook een complexere installatie nodig. In het geval van waterstofproductie door stoomomvorming van aardgas of gedeeltelijke vergassing van steenkool zijn deze echter al grotendeels aanwezig. In het geval van elektriciteitsproductie zou dit echter wel een aanzienlijke meerkost met zich meebrengen (NRC, 2004).

Om de koolstofdioxide te capteren zijn, vandaag de dag, drie soorten technologieën in gebruik. De eerste en simpelste manier bestaat erin om de CO<sub>2</sub> na de verbranding te capteren (post-combustion). Deze techniek staat al op punt en wordt in sommige sectoren al gebruikt (IEA, 2006). In België wordt deze techniek nog niet op grote schaal toegepast.

Bij de tweede wijze wordt de CO<sub>2</sub> 'gevangen' voor er verbranding plaatsvindt (pre-combustion). Deze techniek wordt gebruikt bij meststoffen, chemische producten,

gasvormige brandstoffen en bij de productie van elektriciteit. Dit proces kan gemakkelijk toegepast worden bij gedeeltelijke oxidatie en vergassing van steenkool. Het derde proces wordt oxyfuel-verbranding genoemd. Dit is een verbranding waarbij er zuivere zuurstof gebruikt wordt in plaats van lucht. Om de temperatuur in de verbrandingskamer onder controle te houden wordt uitgestoten gas gekoeld en terug geïnjecteerd in de verbrandingskamer. De uitstoot hiervan bestaat bijna uitsluitend uit CO<sub>2</sub> en stoom. Door afkoeling condenseert de stoom tot water en blijft er enkel nog een CO<sub>2</sub> stroom over (IEA, 2006). Een klein deel van het geproduceerde CO<sub>2</sub> wordt echter wel opgenomen door het water. Centrales die deze techniek gebruiken worden vaak 'zero emission' centrales genoemd omdat de opgevangen CO<sub>2</sub> geen onderdeel is van de uitstoot maar de enige uitstoot is. Indien deze uitstoot volledig gecapteerd en opgeslagen wordt, en het water, waarin een deel van de CO<sub>2</sub> zit, wordt gezuiverd zouden we effectief kunnen spreken van 'zero emission'. In Nederland wordt er in 2009 gestart met de bouw van een 'zero emission centrale'.

Naast deze methodes wordt er natuurlijk ook nog verder gezocht naar bruikbare alternatieven. Wetenschappers zijn ook bezig met het zoeken naar manieren om CO<sub>2</sub> rechtstreeks uit de lucht te halen. Ook de mogelijkheid om algen CO<sub>2</sub> te laten capteren lijkt een optie (Greenfuel online, 2008). Hopelijk zal verder onderzoek nog efficiëntere en goedkopere alternatieven aan het licht brengen.

## 5. Transport en distributie

Net zoals elektriciteit, en elke andere energiedrager, dient waterstof getransporteerd te worden. Elektriciteit wordt gedistribueerd door hoogspanningsleidingen, olie in pijpleidingen, vrachtwagens of grote olietankers, aardgas wordt dan weer hoofdzakelijk verdeeld met behulp van ondergrondse pijpleidingen. Elke energiedrager heeft zo zijn eigen optimale distributiesysteem. In dit hoofdstuk wordt uitgezocht hoe en onder welke vorm waterstof transporteerbaar is.

Alvorens te beginnen dromen van een waterstofeconomie is het noodzakelijk dat er nagedacht wordt over de manieren om waterstof daar te krijgen of te produceren waar ze nodig is. Men maakt doorgaans het onderscheid tussen enerzijds kleinschalige, lokale, gedecentraliseerde waterstofproductie die gebaseerd

is op elektrolyse (met elektriciteit uit verschillende bronnen) of gasomvorming en waarbij dus gebruik kan gemaakt worden van de huidige distributie-infrastructuur. Anderzijds is er de grootschalige, gecentraliseerde waterstofproductie in 'waterstoffabrieken' of bestaande elektriciteitscentrales. Hierbij zou dan gebruik worden gemaakt van vrachtwagens en pijpleidingen om het waterstof ter plaatse te krijgen. Beide manieren hebben zo hun eigen voor- en nadelen. Ze worden hier even verduidelijkt.

Het grootste voordeel van een gedecentraliseerde waterstofproductie is ongetwijfeld de kost. Men moet geen geheel nieuwe infrastructuur uitbreiden maar enkel het bestaande distributienetwerk verder uitbouwen zodat dit aan de grotere vraag kan voldoen. Dit wil zeggen: een grotere elektriciteitsproductie en een upgrading van de bestaande distributienetwerken. Indien we de waterstofeconomie milieuvriendelijker willen maken dan de huidige economie, die bijna volledig draait op fossiele brandstoffen, zal daarnaast procentueel een groter deel van de elektriciteit uit hernieuwbare energie moeten komen. Langs de andere kant zal het onmogelijk of zeer duur zijn om milieuvriendelijke technieken zoals CCS toe te passen. Deze zijn enkel rendabel wanneer ze op grote schaal toegepast worden (Damen, 2007).

Ook gecentraliseerde productie van waterstof heeft enkele voordelen. Zo kan men meer verschillende productiewijzen gebruiken en is het makkelijker en doorgaans goedkoper om milieuvriendelijke technieken toe te passen. Op die manier kan men ook makkelijker de 'afval'warmte uit elektriciteits- en kerncentrales gebruiken om, via thermolyse, efficiëntere elektrolyse of thermo-chemische waterstofproductie, goedkoper en gemakkelijker waterstof te produceren.

Door de specifieke eigenschappen van waterstof worden er specifieke eisen gesteld aan de wijzen van transport. Vooral de vluchtigheid, de lage dichtheid en grote brandbaarheid moeten hier mee in rekening gebracht worden. Om waterstof te transporteren zijn er verschillende opties. Ze worden hieronder kort besproken.

## ***5.1. Pijpleidingen***

Zoals voor de distributie van de meeste gassen zouden pijpleidingen ook geschikt zijn om waterstof efficiënt te transporteren. In sommige industriegebieden met een hoge dichtheid, waaronder het gebied tussen Zuid-Nederland en Noord-

Frankrijk, bestaat er zo een geprivatiseerd industrieel netwerk van waterstofpijpleidingen van ongeveer 400 km (Norbeck, 1996). Aan de uitbouw van een distributienet op grote schaal is echter een zeer grote investeringskost verbonden. Het is dus enkel aantrekkelijk in gebieden waar er een grote en regelmatige vraag is naar waterstof (Yang *et al.*, 2006). Een alternatief zou er uit bestaan om het bestaande gasnet om te bouwen tot een waterstofnet. Deze werken zouden echter ook een serieus prijskaartje met zich meebrengen aangezien waterstof andere fysische eigenschappen heeft dan aardgas. Er worden dus andere eisen gesteld aan de leidingen. Eén van de grote problemen is de aantasting van de gebruikte metalen door waterstof. Door het hoge reactievermogen gaat het verbindingen aan en dit kan leiden tot scheuren en breuken in de leidingen (Norbeck, 1996). Daarenboven moet er om dezelfde hoeveelheid energie te transporteren drie keer zoveel waterstof door de leidingen gepompt worden. Dit komt door de lagere volume energie. Hiervoor zijn dus ook extra pompen en compressoren nodig (Norbeck, 1996). Er wordt geschat dat de kosten voor het transport van waterstof ongeveer 30 tot 50% meer zijn dan voor dezelfde energiehoeveelheid in aardgas (Damen *et al.*, 2005). Daarnaast wordt er nog gerekend op een extra energiegebruik van 3-4% voor de compressie (Yang *et al.*, 2006; Züttel, 2004).

## **5.2. Wegtransport**

Vrachtwagentransport van waterstof in compressietanken is vrij beperkt. Dit is enkel voordelig wanneer het gaat om korte afstanden en kleine hoeveelheden voor onregelmatige gebruikers (Yang *et al.*, 2006). Dit komt door de lage energieopslagdensiteit waardoor een vrachtwagen van 30 ton slechts 200 tot 530 kg waterstof vervoert (Srinivasa Murthy, s. d.). Dit is dus niet echt economisch of ecologisch rendabel. Het vervoer van vloeibaar waterstof kan hier uitkomst brengen. Op deze manier heeft waterstof een veel grotere dichtheid en kan één truck tot wel 10 maal meer waterstof vervoeren (Yang *et al.*, 2006). Het nadeel is wel dat dit veel duurder en energie-intensiever is. Meer hierover is terug te vinden in hoofdstuk 6. De voor- en nadelen moeten dus tegen elkaar worden afgewogen. Doorgaans wordt aangenomen dat het vervoer over lange afstanden best gebeurt in vloeibare vorm (Yang *et al.*, 2006). Voor het gebruik van waterstof voor auto's moeten nog andere aspecten mee in rekening gebracht worden. Zo zijn de pompen voor vloeibaar

waterstof goedkoper dan compressoren voor gasvormig waterstof. Ook de grootschalige opslag van waterstof in gasvorm is duurder (Yang *et al.*, 2006).

Verder wordt waterstof ook nog vervoerd per trein. Dit gebeurt dan in vloeibare vorm. Er wordt ook onderzoek gedaan naar de mogelijkheid om vloeibaar waterstof te transporteren over zee. Er wordt vooral gezocht naar manieren om het energieverlies te beperken (Norbeck, 1996).

## 6. Opslag van waterstof

Nadat waterstof geproduceerd is moet ze natuurlijk ook worden opgeslagen. Elektriciteit wordt soms opgeslagen in batterijen, olie wordt opgeslagen in vaten, hout wordt opgeslagen in de schuur, ... Bij waterstof ligt dit allemaal iets complexer. Waterstof kan onder veranderende druk en temperatuur verschillende vormen aannemen, en kan dus ook onder verschillende vormen worden opgeslagen. Zoals we zullen zien is de opslag niet zonder problemen. Toch wordt doorgaans aangenomen dat de opslag van waterstof gemakkelijker, efficiënter en goedkoper is dan de opslag van elektriciteit. Onderzoek en ontwikkeling moet er voor zorgen dat de bestaande technieken op punt worden gesteld en dat er verder gezocht wordt naar betere, efficiëntere en goedkopere methoden om waterstof op te slaan.

### 6.1. Gas-compressietanken

Waterstof is een gas en dus is het evident om het op te slaan in compressietanken. Dit zijn we immers gewend. Het probleem hierbij is dat gasvormig waterstof een zeer kleine dichtheid heeft, namelijk  $0,090 \text{ kg/Nm}^3$ . Het is dan ook 14 maal lichter dan lucht. Dit wil zeggen dat er veel plaats nodig is om een kleine hoeveelheid waterstof op te slaan. Voor een deel wordt deze lage dichtheid gecompenseerd door een energie-inhoud van  $120 \text{ MJ/kg}$  (LHV). Deze is twee tot bijna drie keer zo groot als die van methaan (aardgas) ( $50 \text{ MJ/kg}$ ) of benzine ( $46 \text{ MJ/kg}$ ). Anders gezegd:  $1 \text{ kg}$  waterstof bevat evenveel energie als  $2,4 \text{ kg}$  methaan of  $2,6 \text{ kg}$  benzine. Op basis van gewicht ( $120 \text{ MJ/kg}$ ) is waterstof dus aantrekkelijker dan de gangbare alternatieven maar op basis van volume ( $10,8 \text{ MJ/Nm}^3$  voor waterstof ten opzichte van  $36 \text{ MJ/Nm}^3$  voor aardgas) heeft het een grote achterstand. Voor een

deel kunnen we het dichtheidsprobleem verhelpen door waterstof op te slaan onder druk. De compressie van waterstof brengt echter extra energieverlies met zich mee. Hoe groter de compressie, hoe meer energie er nodig is. Vandaag de dag wordt er onderzoek gedaan naar compressietanks die waterstof kunnen opslaan onder een druk van 700 a 800 bar. Een grotere druk is door de eigenschappen van waterstof fysisch niet mogelijk. Onder een druk van 800 bar kan er een volumedensiteit bereikt worden van  $36\text{kg/m}^3$ . Dit is de helft van de volumedensiteit van cryogeen waterstof (=vloeibaar) (Züttel, 2004).

Voor stationaire toepassingen is het gebruik van compressietanken voor de opslag van waterstof niet echt een groot probleem. Meestal is er immers genoeg plaats om grote opslagtanks te installeren. Voor tijdelijke opslag, zoals bij de productie van waterstof uit hernieuwbare energie, en stationaire systemen worden doorgaans opslagtanks van staal gebruikt. Doorgaans wordt hierbij een druk van ongeveer 200 bar gebruikt. Bij mobiele toepassingen ligt dit anders. Deze zijn immers beperkt qua volume en gewicht. Wil men gebruik maken van gasvormig waterstof voor auto's is het belangrijk dat er veel hogere druk gebruikt wordt. Enkel op die manier kan men voldoende waterstof opslaan om een rijbereik te halen dat vergelijkbaar is met de standaarden die we gewoon zijn. Tot de dag van vandaag maken de meeste prototypes gebruik van vloeibaar waterstof. Voor het vloeibaar maken van waterstof is echter veel energie nodig.

Daarnaast zijn er nog de speciale eigenschappen van waterstof die er voor zorgen dat niet alle materialen geschikt zijn om opslagcontainers van te maken. Waterstof heeft de eigenschap om sommige metalen broos en breekbaar te maken. Daarom worden de tanks doorgaans gemaakt van composietmaterialen. Meestal worden supersterke koolstofvezels gebruikt die langs de binnenkant bezet worden met een laag polyethyleen of metaal. Typische opslagdensiteiten zijn 2-4 MJ/liter en 3-7 % in gewicht. Dit komt overeen met een druk tussen de 350 en de 700 bar. Met de modernste tanks uit composietmaterialen (koolstofvezels, ondoordringbare voering en impact bestendig schild) zijn opslagefficiënties bereikt van 11% in gewicht. (Srinivasa Murthy, s. d.). De intense compressie van waterstof verbruikt natuurlijk ook energie. Verschillende studies spreken over energievereisten van 8% tot 15% van de opgeslagen energie-inhoud (Ogden *et al.*, 1998; Ewan *et al.*, 2005; GM *et al.*, 2002).

## **6.2. Vloeibaar waterstof**

Waterstof dat extreem gekoeld wordt tot een temperatuur van  $-253^{\circ}\text{C}$  wordt vloeibaar. In deze vorm heeft waterstof een grotere dichtheid van  $70,8 \text{ kg/m}^3$  (Züttel, 2004). Voor het transport van waterstof over spoor, weg of zee is dit dus al wel aantrekkelijker. Het grote nadeel van deze methode is de grote hoeveelheid energie die nodig is om de waterstof af te koelen. Gemiddeld gaat het hier om ongeveer 30% van de energie-inhoud van het gekoelde waterstof ( $0.347 \text{ MJ/MJ}$  volgens GEMIS, 2001; Yang *et al.*, 2006). Bij opslag voor langere duur gaat ook nog energie verloren door de onvolledige isolatie. Daarenboven moeten er ook hier speciale dure superisolerende stoffen gebruikt worden voor de opslagtanks. Deze systemen moeten daarenboven open zijn. Door de opwarming en de bijhorende boil-off (verdamping door opwarming) blijft de druk niet constant. Er moet dus een mogelijkheid van ventilatie ingebouwd worden. Verbetering van de afkoelings- en opslagmethodes is vandaag de dag dan ook een belangrijk onderzoeksonderwerp.

## **6.3. Metaalhydride**

Een derde gangbare vorm om waterstof op te slaan, die voor een gedeelte nog in de onderzoeksfase zit, is die van de metaalhydrides. Hierbij wordt waterstof gebonden aan de atomen van een metaal volgens het sponsprincipe. De metalen zijn in staat om waterstof op te nemen (waarbij warmte vrijkomt) en af te geven bij verhoogde temperatuur. Metaalhydrides kunnen, dankzij hun bijzondere waterstof-opname en -vrijgave, gebruikt worden in zeer veel verschillende toepassingen. Dit kan gaan van waterstofopslag, waterstofzuivering, elektrodes voor Nikkel-hydride batterijen over ijskasten, airconditioning, waterstofcompressors tot neutronen moderators en de opslag van warmte-energie (Srinivasa Murthy, s.d.). Meestal worden voor het vormen van metaalhydrides legeringen gebruikt die bestaan uit Magnesium (Mg), Nikkel (Ni), IJzer (Fe), Titanium (Ti) en Lathanum (La). De meest gebruikte hydrides zijn  $\text{MgH}_2$ ,  $\text{Mg}_2\text{NiH}_4$ ,  $\text{FeTiH}_2$  en  $\text{LaNi}_5\text{H}_6$ . Sommige van deze legeringen zijn zelfs in staat om meer waterstof op te nemen dan waterstof in pure vorm (Becker, 2001). Het procentuele gewicht van waterstof in de hydrides varieert van 1% tot 8%. De legeringen die gebruikt worden moeten aan enkele belangrijke eigenschappen voldoen om in aanmerking te komen voor praktische waterstofopslag. Zo moeten ze hun eigen structuur behouden, moeten ze stabiel blijven na vele malen

gebruik, ze moeten selectief zijn (enkel waterstof binden en geen andere elementen) en natuurlijk moeten ze in staat zijn om grote hoeveelheden waterstof op te nemen en af te geven. Doorgaans is het zo dat hoe meer waterstof een legering kan opnemen, hoe meer (warmte)energie er nodig is om die waterstof terug vrij te geven (Srinivasa Murthy, s. d.).

Momenteel wordt er volop onderzoek gedaan naar manieren om de opslagcapaciteit van de legeringen te verbeteren en opname en vrijgave van waterstof te verbeteren. In dit licht worden veel nieuwe legeringen gemaakt en getest. Onder meer het onderzoek naar het synthetiseren van legeringen is veelbelovend. Door het mechanisch produceren van legeringen (mechanical alloying) kunnen amorfe, kristallijne of nano-gestructureerde materialen gemaakt worden die beter in staat zijn om andere elementen in de legering op te nemen of het opnameoppervlak meer geschikt te maken voor de opname van waterstof (Becker, 2001).

Vandaag de dag worden metaalhydrides vooral gebruikt in de vorm van batterijen. Dit zijn de zogenaamde Ni-MH-batterijen (nikkel-metaalhydride-batterijen) die onder andere gebruikt worden in laptops, gsm's, draagbaar gereedschap en hybride voertuigen. De mechanismen zijn vergelijkbaar met die van de Ni-Cd-batterijen die wij dagelijks gebruiken maar de Ni-MH-batterijen hebben een elektrische lading die tot 40% hoger is.

Ondanks de relatief lage gewicht/waterstof verhouding is de methode van de metaalhydrides veelbelovend. Het grote voordeel ten opzichte van andere technieken is dat ze zeer zuiver waterstof kan leveren bij constante druk. Volgens Züttel heeft deze opslagmethode de hoogste volumedensiteit (Züttel, 2004). Toch staat deze techniek nog maar in zijn kinderschoenen. Er is dus nog hoop op nieuwe en betere technieken. Door het grote gewicht van de metaalhydrides zijn ze, ondanks hun hoge volumedensiteit, niet echt geschikt voor transporttoepassingen. Daar zorgt een hoger gewicht immers ook voor meer verbruik. Voor stationaire toepassingen zou deze techniek in de toekomst wel belangrijk kunnen zijn.

#### **6.4. Chemische hydrides**

Naast metaalhydrides kunnen ook hydrides gevormd worden met andere chemische stoffen. Zoals eerder vermeld komt waterstof overal in grote aantallen



voor maar zelden in pure vorm. Het is steeds gebonden aan andere stoffen. Sommige van deze samenstellingen kunnen door chemische processen geproduceerd worden. Door deze processen daarna weer om te keren kan men dan waterstof vrijmaken. Op die manier kunnen de problemen die verbonden zijn aan de opslag van zuiver waterstof omzeild worden. Enkele voorbeelden zijn het kraken van ammoniak, het kraken van methanol en de dehydrogenatie van cyclohexaan in benzeen.

Eén van de meest veelbelovende chemische hydrides is natrium-borohydride ( $\text{NaBH}_4$ ). Het is aantrekkelijker dan andere chemische hydrides, zoals  $\text{LiBH}_4$  en  $\text{MgH}_2$ , omdat de energie die nodig is om de stof na gebruik terug 'op te laden' in vergelijking zeer laag is. In een mengeling met water ontstaat er een niet-brandbare brandstof, die bij kamertemperatuur en normale druk een waterstofopslagcapaciteit heeft die vergelijkbaar is met opslag van puur waterstof bij een druk van 700 bar (Wu, 2003). Daarnaast komt nog dat de waterstof die vrijkomt, onder invloed van een katalysator, zeer zuiver is (geen zwavel en CO), en al bevochtigd is door de stoom die geproduceerd wordt door de warmte. Ze kan zonder verdere bewerking gebruikt worden. Er worden hierbij verder geen schadelijke bijproducten gegenereerd. De grootste obstakels die nog overwonnen moeten worden zijn de hoge productiekost voor natrium borohydride (dus ook die van het terug 'opladen' of rehydrogeneren van het  $\text{NaBO}_2$ ) en de brandstofbehandeling.

### ***6.5. Sludge-waterstof***

Sludge-waterstof is een mengeling van vast en vloeibaar waterstof. Dit wordt bereikt door het gas af te koelen tot een temperatuur van  $-259^\circ\text{C}$  (14K). Deze techniek is nog niet echt wijd verspreid maar wordt al wel toegepast in de ruimtevaarttechnologie en wordt nog verder onderzocht (Sørensen, 2005).

### ***6.6. Koolstof nano-tubes***

De hierboven besproken methodes hebben allemaal hun eigen voor- en nadelen. Ze hebben echter één ding allemaal gemeen: ze voldoen (nog) niet aan de hoge eisen van de auto-industrie. Alvorens waterstof zou kunnen gebruikt worden in de auto-industrie moet aan een aantal voorwaarden voldaan worden. Zo mag er, met

het in gebruik nemen van een nieuwe brandstof, niet ingeboet worden op het vlak van comfort, rijbereik, ruimte in de auto, veiligheid en de kosten. Vooral rijbereik en in beslagname van ruimte zijn aspecten die in gevaar komen als we het hebben over het gebruik van waterstof in auto's. De al besproken technieken zijn allen te zwaar, te volumineus of hebben een te kleine opslagcapaciteit. Een techniek die hier in de toekomst misschien soelaas kan brengen is die van de nano-tubes. Hierbij wordt gebruik gemaakt van koolstofstructuren die op nano-niveau (één miljardste van een meter) worden opgebouwd. Deze hebben een zeer hoog oppervlakte-volume verhouding, unieke vormspecifieke eigenschappen en zijn in staat om zeer efficiënt en snel waterstof op te nemen en af te geven. Daarenboven is het basismechanisme (gas-op-vaste-stof-opslag) al langer bekend als een veilige en potentieel zeer goedkope manier om waterstof op te slaan. De tot hertoe geproduceerde koolstof opslagsystemen konden echter nooit voldoende waterstof opnemen bij kamertemperatuur. De moderne nano-technologie biedt hier nieuwe perspectieven. Hiermee kunnen nano-tubes gemaakt worden die slecht enkele waterstofatomen breed zijn en die zodanig zijn opgebouwd dat ze een maximale hoeveelheid waterstof kunnen opnemen. Er is nog veel onderzoek nodig vooraleer deze techniek praktisch toegepast zal kunnen worden. Toch zijn de eerste testresultaten hoopgevend (NREL, 2004). Sommige onderzoekers hebben twijfels bij de haalbaarheid van deze techniek omdat het zeer duur en energie-intensief om dingen op zulke minuscule schaal te produceren.

Verder zijn er nog ontelbaar veel onderzoeken aan de gang naar allerlei nieuwe materialen die gebruikt kunnen worden voor de opslag van waterstof. Zo wordt er ook gesproken over glasmicrosferen, metaalgedecoreerde polymeren, phosphonium boraat, imidazonium ionische vloeistoffen, amine boraan complexen, metaal-organische raamwerken en gesynthetiseerde koolwaterstoffen. De toekomst zal moeten uitwijzen welke van deze technieken haalbaar zijn qua techniek en kosten (NREL, 2004).

## **7. Gebruik**

Waterstof kan op veel manieren en in veel verschillende toepassingen gebruikt worden. Doorgaans onderscheidt men op het gebied van toepassingen drie

categorieën: draagbare toepassingen, stationaire toepassingen en toepassingen voor transport. Aangezien we in het tweede deel van deze paper dieper in zullen gaan op het gebruik van waterstof in het wegtransport zal dit aspect uitgebreider behandeld worden.

## **7.1. Draagbare toepassingen**

Dit is op het gebied van waterstof de interessantste markt op de korte termijn. Het gaat hierbij om toepassingen met een vermogen tussen 1 en 100 Watt. We spreken dan hoofdzakelijk over fototoestellen, mobiele telefoons, laptops en kleine generatoren zoals in elektrische rolstoelen en noodgeneratoren (hierbij kan men gaan tot maximum 5kW omwille van het gewicht). Deze draagbare toepassingen stellen andere eisen aan de waterstof-elektriciteit omzetting dan de stationaire of transporttoepassingen. Zo moeten ze een klein gewicht hebben, ze moeten een even lange of langere levensduur hebben dan de moderne batterijen, ze moeten werken bij lage temperaturen en ze moeten gemakkelijk te herladen zijn. Dit zijn bijna allemaal aspecten waar de meerderheid van de onderzoeken, die zich hoofdzakelijk toespitsen op transporttoepassingen, zich niet mee bezighouden. Het basisuitgangspunt bij het gebruik van waterstof in draagbare toepassingen is het vervangen en/of verbeteren van de huidige batterijen. In dit opzicht kunnen waterstofsysteem meer energie per volume of per gewicht leveren, maar ze hebben een lager voltage en reageren minder snel op veranderingen (af-aan). Toch zijn er al enkele bedrijven die batterijvervangende waterstofsysteem commercialiseren. Ook vanuit militaire hoek is er veel belangstelling voor deze toepassingen.

Wat betreft het hervullen van de cartridges waarin waterstof zit opgeslagen zijn er verschillende opties afhankelijk van het waterstofdistributiesysteem dat gehanteerd wordt. Er gaan ook stemmen op om gebruik te maken van wegwerp cartridges. Tenzij deze volledig recycleerbaar zijn is dit vanuit ecologisch standpunt niet zo aantrekkelijk.

Bij het produceren van elektriciteit uit waterstof komt er ook water vrij. Bij draagbare toepassingen gaat het om zeer kleine hoeveelheden maar toch moet hier bij het ontwerp rekening mee gehouden worden.

Op het gebied van brandstof voor deze draagbare toepassingen zal waterstof (in zuivere vorm) moeten concurreren met onder ander methanol en gassen die rijk

zijn aan waterstof zoals de gereformeerde koolwaterstoffen of alcohol. Vooral methanol is hier in het voordeel omdat het een hogere volume-energiedensiteit heeft en omdat het makkelijker op te slaan is dan waterstof. Het nadeel is echter dat deze techniek niet zo 'proper' en 'zuiver' is. Om waterstof succesvol en competitief te maken zal er vooral onderzoek moeten worden gedaan naar de katalysators die in de brandstofcellen worden gebruikt en de manieren om waterstof in relatief kleine hoeveelheden op te slaan. De meeste brandstofcellen die werken op waterstof maken gebruik van heel hoge temperaturen om waterstof om te zetten in elektriciteit. Dit stelt hoge eisen aan de materialen die gebruikt worden en zorgt voor potentieel gevaar. Ook dit is een moeilijkheid die moet overwonnen worden wil men brandstofcellen integreren in kleine draagbare toepassingen. Zoals we zullen zien zijn er ook wel brandstofcellen die werken bij lage temperatuur.

## ***7.2. Stationaire toepassingen***

Op het gebied van stationaire toepassingen zijn er zeer veel verschillende mogelijkheden. In principe kunnen alle branders die werken op aardgas, mits enkele kleine aanpassingen, ook werken op waterstof. Indien de waterstof die hiervoor gebruikt wordt via hernieuwbare energie wordt aangemaakt, zou dit een stap vooruit zijn op het gebied van duurzaamheid. Daarnaast kan een mengsel van aardgas met 5% (volume) waterstof zonder enig probleem gebruikt worden in branders. In principe zou dus een deel van het gas waar we op koken of onze huizen mee verwarmen kunnen bestaan uit waterstof. Dit zou een eerste stap kunnen betekenen naar een meer duurzame (waterstof)economie.

De belangrijkste stationaire toepassing van waterstof is echter elektriciteitsproductie. Het grote voordeel van elektriciteitsproductie met behulp van een brandstofcel is dat men niet afhankelijk is van het elektriciteitsnet. Daarnaast spelen ook nog voordelen zoals geluidsoverlast, betrouwbaarheid, omzettingsefficiëntie en vervuiling in het voordeel van brandstofcellen ten opzichte van fossiele brandstoffen. Met behulp van brandstofcellen kan een omzettingsefficiëntie bereikt worden van 90%. Hierbij moet dan ook wel de warmte, die een bijproduct is van elektriciteitsproductie in een brandstofcel, gebruikt worden. Dit dubbele gebruik (warmte en elektriciteit) noemt men co-generatie. De verschillende types brandstofcellen worden in het volgende hoofdstuk behandeld.

Een groot deel van het onderzoek dat gedaan wordt, wordt gesubsidieerd vanuit de auto-industrie. Gelukkig kunnen ook andere spelers op de markt profiteren van de vooruitgang die in de sector geboekt wordt. Zo zijn er bedrijven die grote noodgeneratoren hebben gecommmercialiseerd. Deze worden onder andere gebruikt door ziekenhuizen, militaire installaties en grote computer servers (Ballard, 2008).

### ***7.3. Transport toepassingen***

Zoals eerder gezegd is het gebruik van waterstof in het wegtransport één van de paradepaardjes van de hele waterstofindustrie. Er worden zeer veel fondsen en tijd vrijgemaakt om zo snel mogelijk tot praktisch en economisch haalbare toepassingen te komen. Het is dan ook een zeer levendige niche waarin bijna dagelijks nieuwe resultaten en prototypes worden voorgesteld. Het is dan ook praktisch onmogelijk om een up-to-date stand van zaken te geven. De bespreking wordt hier noodgedwongen een beetje beperkt tot de recente kennis die algemeen aanvaardt wordt.

Wanneer er gesproken wordt over toepassingen voor het wegtransport wordt hoofdzakelijk verwezen naar het gebruik van waterstof in brandstofcellen. De elektriciteit die op die manier geproduceerd wordt, wordt dan gebruikt om een elektromotor aan te drijven. Het is echter ook mogelijk om een verbrandingsmotor (Internal Combustion Engine of ICE) te laten werken op waterstof.

#### **7.3.1. Waterstof en de verbrandingsmotor**

Het gebruik van waterstof in een verbrandingsmotor zou een mogelijke tussenstap kunnen zijn op weg naar de waterstofeconomie. Het is immers mogelijk om bi-fuelvoertuigen te maken. Dit zijn auto's die zowel op benzine als op waterstof kunnen rijden. Wanneer er vertrokken wordt van een standaard benzinemotor moet het mengproces van de brandstoftoevoer aangepast worden. Men moet ervoor zorgen dat de  $H_2$  inlaat goed afgesteld is. Het gebruik van waterstof in een verbrandingsmotor maakt meestal gebruik van 'arme' verbranding (lean combustion). Dit is een verbranding waarbij de ratio lucht/brandstof zeer hoog is en waarbij de (schadelijke) uitstoot aanzienlijk gereduceerd wordt. De extra lucht in de verbrandingskamer zorgt ervoor dat de vlamtemperatuur niet boven het kritieke punt

van ongecontroleerde ontsteking komt. De stikstofuitstoot kan nog wel een probleem vormen omdat deze afhankelijk is van de verbrandingstemperatuur. Over het algemeen geldt: hoe magerder de verbranding, hoe beter. Het is immers zo dat de verbranding van waterstof vollediger is wanneer er veel zuurstof aanwezig is. Er blijven dan minder restanten over en er worden minder schadelijke stoffen uitgestoten.

Aangezien waterstof kan verbranden in de aanwezigheid van veel zuurstof, dit in tegenstelling tot benzine, en omdat grote variaties in de magerheid van de verbranding accepteerbaar zijn, kan de krachtontwikkeling van de motor gecontroleerd worden door de brandstoftoevoer in de motor te regelen, net zoals bij dieselmotoren. Op die manier kan een geoptimaliseerde waterstof verbrandingsmotor bijna dezelfde efficiënties halen als een dieselmotor. Er worden door Bayerische Motor Werke (BMW) en in de literatuur efficiënties vermeld gaande van 35% tot zelfs 50%. Bij vergelijking van deze gegevens met die van een brandstofcel moet er rekening mee gehouden worden dat de efficiëntie van een ICE afhankelijk is van de belasting en die van een brandstofcel niet. Wat het verbruik betreft zijn de hoeveelheden ongeveer gelijk aan die van een dieselmotor. General Motors (GM) heeft aangekondigd dat ze een H<sub>2</sub>-ICE hebben ontwikkeld die een benzine-equivalent verbruik heeft dat 17% lager ligt dan dat van een benzine auto. Met behulp van hulpmiddelen zoals een turbo en een intercooler kunnen deze motoren dezelfde prestaties leveren als hun benzine- of diesel-soortgenoten. Vooral de autobouwers Ford en BMW houden zich bezig met het onderzoek naar dit type motoren. Ze hebben al verschillende prototypes gebouwd en getest.

Ondanks de relatief gematigde extra kost die verbonden is aan de H<sub>2</sub>-ICE moet deze technologie toch vooral gezien worden als een tussenstap naar een volwaardiger gebruik van waterstof in transporttoepassingen. Door gebruik te maken van de H<sub>2</sub>-ICE zou de vraag naar waterstof stijgen. Dit zou de installatie van waterstof distributie- en tanksystemen rechtvaardigen. Op de langere termijn zouden dan brandstofcellen kunnen geïntegreerd worden. Deze hebben immers een betere efficiëntie. Langs de andere kant moet er wel rekening mee gehouden worden dat de totale well-to-wheel energie-efficiëntie van de H-ICE lager is dan deze van klassieke benzine-ICE .

Een mengsel van aard gas en 20% volume waterstof (hythane genaamd) kan ook gebruikt worden in een verbrandingsmotor. Met kleine veranderingen kan een

normale aardgasmotor aangepast worden. Het resultaat is een motor met een iets kleinere milieu-impact door een lagere CO<sub>2</sub>-uitstoot. Deze verlaging van CO<sub>2</sub> is proportioneel tot de hoeveelheid waterstof. Het grote voordeel van het gebruik van hythane (zoals dit mengsel wordt genoemd) zit echter in de infrastructuur. Men zou gewoon waterstof kunnen injecteren in het bestaande gasnetwerk (mits de nodige aanpassingen te doen). In Beijing hebben ze meer dan duizend dieselbussen omgebouwd om te rijden op hythane. Zo willen ze proberen de luchtkwaliteit in de stad te verbeteren tijdens de Olympische Spelen (Green Car Congress, 2004).

### **7.3.2. Waterstof en brandstofcellen**

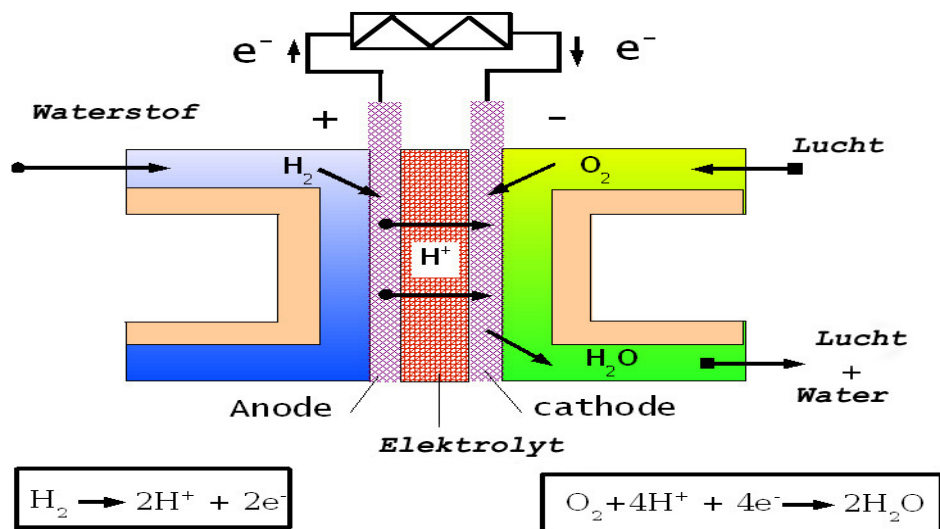
Brandstofcellen op waterstof worden door velen gezien als de redding van de automobiellindustrie (en onze planeet). Dit is te danken aan hun efficiëntie. De meeste halen bij hun omzetting van waterstof naar elektriciteit een efficiëntie van rond de 60% (Norbeck *et al*, 1996). Veel grote automerken hebben onderzoeksprogramma's lopen en hebben zelfs al prototypes ontwikkeld en tentoongesteld. Toch wordt de introductie op grote schaal en serieproductie niet verwacht in de nabije toekomst. De fase van testen en demonstreren is nog volop aan de gang. De meeste analisten verwachten dat deze fase tot ergens rond 2010-2020 zal duren. Daarna kan er begonnen worden met de uitbouw van de nodige infrastructuur en de introductie van de eerste modellen. Ook deze fase zal vermoedelijk een vijftal jaar in beslag nemen. Pas daarna (dus rond 2015-2020) kan er begonnen worden met productie op grote schaal. Meer pessimistische analisten houden het hier, gelet op de hoge kosten verbonden aan brandstofcellen en de uitbouw van een degelijk distributienetwerk, liever op 2025. De EU high Level Group ziet 2020 als een hypothetisch vertrekpunt (High Level Group, 2003).

Het grote voordeel van de brandstofceltechnologie is dat ze de eigenschappen van elektrisch rijden, zoals nul emissies van schadelijke stoffen (tijdens het rijden) en weinig geluidshinder, kan benutten zonder de beperkingen van de batterijtechnologie. De technologie van elektrisch aangedreven auto's bestaat al. Die technologie moet dus, in tegenstelling tot de brandstofceltechnologie, niet meer ontwikkeld worden. Er wordt binnen de EU zelfs gedacht aan onderzoeksprogramma's naar hybride batterij-brandstofcel-auto's. De efficiëntiewinst zou hierbij wel niet zo groot zijn als bij de nu gekende batterij-ICE hybrides

## 8. Brandstofcellen

De brandstofcel is een apparaat dat zorgt voor de elektrochemische omzetting van energie. Het is een toestel dat de chemische energie die ingevoerd wordt als brandstof omzet in elektrische energie (EG&G Services, 2000). Als de brandstofcel ook in staat is om de omgekeerde reactie te doen, namelijk het omzetten van water in waterstof en zuurstof, spreken we van een 'reversible fuel cell' (Sørensen, 2005). Het principe van de brandstofcel werd al in 1838 uitgedacht door William Robert Grove. Hij was ook de eerste die de theorie omzette naar de praktijk. Dat gebeurde in 1839. Met behulp van chemici van General Electric en later de NASA, werd vanaf de jaren '50 gewerkt aan verdere toepassingen en de commercialisering van de brandstofcel.

Een brandstofcel bestaat uit twee elektroden die van elkaar gescheiden worden door een elektrolyt. Aan de anode-zijde wordt de brandstof toegevoegd. De katode wordt gevoed met een oxidant. Een elektrokatalyst, die in de elektrode zit, zorgt ervoor dat er aan de brandstofzijde een oxidatiereactie plaatsvindt. Aan de



**Afbeelding 2: Basisprincipe van een brandstofcel op waterstof**

Bron: Wikipedia, 2008-07-18

zijde van de oxidant vindt er een reductiereactie plaats. De elektronen die hierbij vrijkomen worden met behulp van een elektrische geleider getransporteerd van de



anode naar de katode. Het is deze stroom van elektronen die elektriciteit opwekt (Norbeck, *et al.*, 1996) ( EG&G Services, 2000). De vrijgekomen protonen worden met behulp van het ionen- of protonen-geleidend elektrolyt vervoerd van de anode naar de katode. De katode gebruikt de aangekomen elektronen (samen met de protonen) om het bijproduct te produceren (Hoffmann, 2001). Daarenboven heeft een brandstofcel geen bewegende delen, maakt het geen geluid en komt er enkel water, warmte en elektriciteit uit, en in sommige gevallen zijn ze zelfs 2,5 keer zo efficiënt als een interne verbrandingsmotor (Hoffmann, 2001). Afbeelding 2 op pagina 38 is een schematische weergave van de werking van een brandstofcel op waterstof

Het basisprincipe van de brandstofcel is dus vrij simpel. De praktische uitwerking ervan is echter iets gecompliceerder. Zo kunnen er verschillende brandstoffen gebruikt worden. Naast waterstof kunnen ook methaan, methanol, alcoholen of zelfs benzine gebruikt worden. Ook wat betreft de oxidanten zijn er verschillende opties. Naast lucht kan men in sommige gevallen ook gebruik maken van chloor of chloor-dioxide. Daarenboven zijn er ook verschillende elektrolyten met verschillende eigenschappen. De elektroden worden doorgaans gemaakt van metaal, nikkel of koolstof nano-tubes. Deze worden doorgaans nog bezet met een katalysator zoals platinum, nano-ijzerpoeder of palladium. Deze moeten er voor zorgen dat de ontbinding van de brandstof in elektronen en protonen makkelijker verloopt.

Afhankelijk van de eigenschappen van de verschillende gebruikte stoffen wordt doorgaans een onderscheid gemaakt tussen hoge temperatuur (hoger dan 250°C) en lage temperatuur brandstofcellen (minder dan 250°C). Er zijn belangrijke verschillen tussen de brandstofcellen die werken op hoge temperatuur en diegene die werken op lage temperatuur. Ten eerste is er natuurlijk het verschil in werkingstemperatuur. In de brandstofcellen die werken met hoge temperaturen zou er eventueel gebruik kunnen gemaakt worden van interne omvorming. Dit is de omvorming van aardgas in de brandstofcel zelf (EG&G Services, 2000). Ten tweede, en voor sommigen niet van minder belang, zijn er de kosten die er aan verbonden zijn. De kosten die verbonden zijn aan de productie van een brandstofcel zijn voor een groot deel afhankelijk van de grondstoffen die gebruikt worden. Ook wat betreft de milieu-impact is dit van belang. Het is immers zo dat hoe zeldzamer een grondstof is, hoe duurder en hoe groter de milieu-impact is van de ontginning.

Hieronder worden de verschillende waterstof-brandstofcellen besproken. De

technische aspecten worden kort belicht en de voor- en nadelen worden aangehaald. Aan het einde van dit hoofdstuk zal ook een blik geworpen worden op de toekomst. We zullen het onderscheid tussen hoge en lage temperatuur brandstofcellen aanhouden. De lage temperatuur brandstofcellen zullen eerst behandeld worden. Deze zijn immers de brandstofcellen die het makkelijkst te gebruiken zijn in draagbare toestellen en in transporttoepassingen. In Tabel 1 op pagina 46 is een overzicht weergegeven van de voornaamste eigenschappen van de brandstofcellen

Bij de bespreking van de verschillende brandstofcellen moet men in het achterhoofd houden dat het hier steeds gaat over het gebruik van waterstof. Er bestaan nog andere combinaties van elektrolyten, elektroden en katalysators die kunnen resulteren in een bruikbare brandstofcel. Deze zijn echter niet geschikt om waterstof om te zetten in elektriciteit. Voor andere brandstoffen zijn ze misschien wel geschikt, maar voor deze studie zijn ze dus niet van belang.

De naam van de brandstofcel is afhankelijk van het gebruikte elektrolyt. Dit is het medium dat zorgt voor het transport van de vrijgekomen ionen. Het zorgt er dus voor dat de reactie efficiënt kan verlopen en dat er aan het einde van de rit water en elektriciteit kan geproduceerd worden.

## ***8.1. Lage temperatuur brandstofcellen***

### **8.1.1. Proton Exchange Membrane (PEM) of vaste polymeer brandstofcel**

Vandaag de dag is de PEM de meest gebruikte brandstofcel in auto's. Hierbij wordt het elektrolyt gebruikt om waterstofionen te geleiden van de anode naar de katode. Dit elektrolyt bestaat uit een vaste polymeerfilm (membraan), meestal wordt hiervoor gebruik gemaakt van polyperfluorozwavelzuur (Sørensen, 2005). Als katalysator voor de ionisatie van waterstof wordt gebruik gemaakt van het dure Platina of Platina-Ruthenium. De PEM brandstofcellen werken efficiënt bij een temperatuur tussen 60°C en 90°C en een druk van 1-2 bar. Ten opzichte van andere brandstofcellen heeft de PEM enkele belangrijke voordelen. Naast de lage werkingstemperatuur en druk hebben ze ook een grote vermogensdichtheid, een grote tolerantie voor CO<sub>2</sub> en

een efficiëntie van meer dan 40% (EG&G Services, 2000). Door de grote CO<sub>2</sub>-tolerantie kan er (onzuivere) lucht gebruikt worden in plaats van pure zuurstof. Natuurlijk zijn er ook nadelen. De PEM brandstofcellen zijn dan weer gevoelig voor CO onzuiverheden (max 50 ppm) en zwavel (slecht enkele ppm). Daarnaast moeten de reagerende gassen ook bevochtigd worden. Naast het gebruik van zeer zuiver waterstof wordt ook de complexiteit van het systeem beïnvloed door de bevochtiging van de gassen. De waterhuishouding in de brandstofcel is van groot belang omdat anders het gevaar bestaat dat de cel uitdroogt (EG&G Services, 2000).

Volgens een Europese studie zijn de huidige kosten van een volwaardig PEM-aandrijfsysteem voor personenwagens slechts een beetje hoger dan de kosten voor een ICE (Altman *et al.*, 2004). Om de kosten nog verder te doen dalen wordt er vooral gezocht naar manieren om de hoeveelheid platina te beperken. Dit zou moeten gereduceerd worden tot slecht enkele gram per auto. Bij het gebruik van deze brandstofcellen in auto's is de milieu-impact van de productie ervan aanzienlijk. Onderzoek wijst uit dat het bij gebruik in auto's kan gaan tot één vierde van de totale milieu-impact op LCA-basis. Indien deze brandstofcellen gerecycleerd zouden worden zou dit aandeel natuurlijk lager liggen (Pehnt, 2001). Recyclage van de brandstofcellen, en dus de gebruikte katalysatoren, wordt op termijn haalbaar geacht.

### **8.1.2. Alkaline Fuel Cell (AFC)**

Deze brandstofcel, die ook wel Baconbrandstofcel genoemd wordt naar zijn uitvinder Thomas Francis Bacon, is één van de brandstofceltechnieken die het verst ontwikkeld is. Deze technologie werd onder meer gebruikt in Apollo-missies en de Space Shuttle. De NASA heeft zich vanaf midden jaren '60 bezig gehouden met deze techniek (Norbeck, *et al.*, 1996).

De twee elektroden worden van elkaar gescheiden door een poreuze matrix die gevuld is met een basische oplossing, zoals kaliumhydroxide (KOH). Er zijn twee verschillende versies van de AFC.

De ene maakt gebruik van een vloeibaar alkalyt. Dit alkalyt is echter corrosief en zorgt vaak voor behandelingsproblemen. In deze AFC kan ook gebruik gemaakt worden van niet-edelmetalen. Dit heeft dan wel een negatieve invloed op de efficiëntie en het volume.

Bij de AFC met vast elektrolyt wordt er gebruik gemaakt van een dikke pasta

en een poreus ondersteunende matrix. Het ionentransport vindt plaats met behulp van hydroxide-ionen. De alkaline brandstofcellen werken bij een temperatuur tussen 65 en 220 °C en een druk van 1 bar. Als katalysator voor de ionisatie van waterstof wordt doorgaans Platina of Kobalt gebruikt. Ook veel andere stoffen kunnen dienst doen als katalysator. In tegenstelling tot de PEMFC zijn de AFC's wel gevoelig voor CO<sub>2</sub> (maximum 300ppm) en CO. Het hydroxide alkalyt wordt 'vergiftigd' door de CO<sub>2</sub>. Hierbij wordt kalium hydroxide omgezet in kalium carbonaat. Deze moleculen blokkeren de poriën van de katode en hierdoor daalt de efficiëntie (EG&G Services, 2000). Er wordt echter nog onderzoek gevoerd naar de omkeerbaarheid van deze 'vergiftiging'. Om een goede en langdurige werking te garanderen is het dus belangrijk dat er gebruik wordt gemaakt van pure zuurstof of op zijn minst gezuiverde lucht. Volgens sommige verslagen zouden er ook AFC's met vloeibaar alkalyt zijn die langdurig werken met gewone lucht. Het gebruik van gezuiverd zuurstof zorgt er echter voor dat AFC's duur zijn in gebruik. De productie daarentegen is één van de goedkoopste van alle brandstofcellen omdat er niet per se gebruik dient gemaakt te worden van edelmetalen.

Door de lage temperatuur kan een AFC snel opgestart worden. Ze hebben een laag gewicht en een klein volume. Daarenboven kan er een efficiëntie gehaald worden van 70%. Ze hebben naast hun gevoeligheid voor CO<sub>2</sub> en CO ook nog het nadeel dat ze een lagere vermogensdichtheid hebben.

Als afgeleide van de AFC zijn er ook brandstofcellen ontwikkeld die werken met metaalhydrides (Metal Hydride Fuel Cell) of door direct gebruik te maken van borohydride (Direct Borohydride Fuel Cell). Deze zijn beide nog in ontwikkeling maar hebben potentieel het voordeel dat ze in staat zouden zijn om waterstof op te slaan in de brandstofcel.

### **8.1.3. Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)**

In fosforzuurbrandstofcellen wordt vloeibaar fosforzuur gebruikt als elektrolyt. De elektroden worden gemaakt van koolstofpapier dat bedekt wordt met een weinig verspreid platina. Dit zorgt er voor dat de productie van deze cellen behoorlijk duur is. De PAFC's hebben een zeer hoge tolerantie voor CO<sub>2</sub> (max. 30%). Ook voor CO zijn ze, in vergelijking met andere brandstofcellen, redelijk ongevoelig. Ze tolereren 1 tot 2 % CO. Voor zwavel zijn ze echter wel gevoelig (50ppm). Ze werken in een

temperatuurgebied tussen 150 en 220°C, bij een druk van 1 bar. Vanaf een temperatuur lager dan 40°C begint het fosforzuur echter te stollen. Hierdoor is er een lange opstarttijd en is dit type brandstofcel meer geschikt voor doorlopend gebruik. Daarenboven is het elektrolyt dat gebruikt wordt hoogst corrosief. Dit zorgt voor degradatie van de materialen en voor problemen bij de behandeling van de elektrolyt-vloeistof (EG&G Services, 2000).

Ondanks de nadelen is de PAFC één van de meest gecommmercialiseerde brandstofcellen. Dit is hoofdzakelijk te danken aan hun hoge tolerantie voor CO<sub>2</sub>. Doorgaans halen ze een efficiëntie tussen 37 en 42%. Wanneer gebruik wordt gemaakt van co-generatie (het gebruik van zowel de elektriciteit als de warmte) kan de totale efficiëntie toenemen tot 80% (EG&G Services, 2000). Door hun hoge gewicht en lange opstarttijden worden ze enkel gebruikt in stationaire toepassingen. Voor het gebruik in transporttoepassingen zijn ze hierdoor dus niet echt geschikt.

## ***8.2. Hoge temperatuur brandstofcellen***

### **8.2.1. Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)**

De brandstofcellen die werken met zuurstof maken gebruik van keramiek (of zuivere zuurstof) als elektrolyt. Door de werking op hoge temperatuur (tussen 700 en 1000°C) is er geen nood aan dure katalysators zoals bijvoorbeeld bij PAMFC's. Bij SOFC's wordt als katalysator meestal Perovskiet gebruikt.

Wat de opbouw betreft kunnen SOFC's verschillende vormen aannemen. De meest ontwikkelde hebben ofwel een klassieke brandstofcelstructuur, ofwel een buisstructuur. Bij de klassieke vorm zit het elektrolyt ingesloten tussen de elektroden. Deze is dan laagsgewijs opgebouwd: anode-elektrolyt-katode. Bij een buisvormige SOFC wordt één gas (brandstof of lucht) langs de binnenkant van de buis geïnjecteerd. Het andere gas stroomt langs de buitenkant van de buis. Deze laatste vorm heeft het voordeel dat het makkelijker af te dichten is en dat de twee gassen gemakkelijker gescheiden kunnen gehouden worden. Het laagjesmodel is wel efficiënter door de lagere weerstand. Ook allerlei tussenvormen zijn mogelijk. Men doet nu onderzoek naar vormen waarin de voordelen van de twee systemen kunnen

gecombineerd worden.

Net zoals alle andere brandstofcellen heeft deze ook enkele bepalende voor- en nadelen. Wat zowel een voor- als een nadeel is, is de hoge werkingstemperatuur. Die zorgt er immers voor dat er dure hittebestendige materialen moeten gebruikt worden. Door de uitzetting bij verhitting dient de brandstofcel bij opstarten langzaam en in zijn geheel verwarmd te worden. Dit kan wel tot 8 uur in beslag nemen. De SOFC met microbuisjes zouden een veel minder lange opstarttijd hebben. Langs de andere kant zorgt de hoge temperatuur er wel voor dat er een grote verscheidenheid aan brandstoffen kan gebruikt worden. Dit komt doordat de hoge temperatuur er voor zorgt dat het elektrolyt niet vervuild of 'vergiftigd' wordt. De SOFC's werken onder andere op methaan, propaan, butaan, fermentatiegas, gas uit biomassa en zelfs vergassen. De brandstoffen moeten wel steeds gezuiverd worden van zwavel maar dit kan simpel opgelost worden door gebruik te maken van een bed van geactiveerde koolstof of een zinkabsorbent.

SOFC's kunnen bij het gelijktijdig gebruiken van de geproduceerde warmte en elektriciteit een efficiëntie bereiken van wel 90%. Bij enkelvoudige omzetting naar elektriciteit wordt er een efficiëntie bereikt van 60% (Gray *et al.*, 2001). Meestal worden ze gebruikt in stationaire toepassingen met een vermogen tussen 100W en 2MW.

Aangezien de hoge werkingstemperatuur hoge eisen stelt aan de gebruikte materialen wordt er gezocht naar manieren om de SOFC te laten werken op lagere temperaturen. Dit zijn dan de zogenaamde Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cells (ITSOFC's). Zij zouden werken op een temperatuur tussen 600 en 800°C. Men zoekt nu specifiek naar manieren om de efficiëntie van deze ITSOFC's even hoog te krijgen als die van de gewone SOFC's. De SOFC's van vandaag de dag hebben een efficiëntie die ligt tussen 37 en 42% (EG&G Services, 2000).

### **8.2.2. Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)**

De elektrolyt van een MCFC bestaat uit een gesmolten mengsel van lithium en kaliumcarbonaat in een chemische, inerte, ceramische dragende matrix van beta-alumina solid elektrolyt (BASE). Als katalysator voor de ionisatie van waterstof wordt nikkel of nikkeloxyde gebruikt. Het elektrolyt geleidt carbonaationen ( $\text{CO}_3$ ) van de katode naar de anode. Dit type van brandstofcel werkt op een temperatuur van 600

tot 650°C bij een druk van 1 tot 10 bar. Ook hier is het door de hoge temperatuur mogelijk om lichte koolwaterstoffen intern om te vormen. Deze temperaturen stellen natuurlijk ook de nodige eisen aan de gebruikte materialen (EG&G Services, 2000).

MCFC's hebben een efficiëntie van 60% (bij interne omvorming van aardgas) (EG&G Services, 2000). Als deze elektriciteitsproductie nog gecombineerd wordt met een energiewinning uit de vrijkomende warmte kan er een efficiëntie bereikt worden van wel 85%. Ze zijn dus op het gebied van kosten en efficiëntie te verkiezen boven de SOFC's.

MCFC's zijn zelfs in grotere mate ongevoelig voor 'vergiftiging' door CO en CO<sub>2</sub>. Ze kunnen zelfs koolstofdioxides gebruiken als brandstof. Er wordt zelfs verwacht dat, indien ze immuun gemaakt kunnen worden voor zwavel en omvormingspartikels, ze in staat zouden zijn tot de interne omvorming van steenkool.

Het grote nadeel van de MCFC's is hun beperkte levensduur. Door de hoge temperaturen en het corrosieve elektrolyt hebben de gebruikte materialen maar een beperkte levensduur. Wetenschappers zijn bezig met onderzoek naar alternatieve materialen en vormen om de levensduur van deze brandstofcellen te verlengen (EG&G Services, 2000).

Voor de duidelijkheid worden in tabel 1 op pagina 46 de voornaamste kenmerken en eigenschappen van de verschillende brandstofcellen weergegeven.

**Tabel 1: Eigenschappen brandstofcellen**

<u>NAAM</u>	<u>AFKORTING</u>	<u>WERKINGS I</u>	<u>ELEKTROLYT</u>	<u>KATALYSATOR</u>	<u>DRUK</u>	<u>CO- TOLERANT</u>	<u>CO<sub>2</sub>- TOLERANT</u>	<u>ZWAVEL TOLERANT</u>	<u>VOORDEEL</u>	<u>NADEEL</u>	<u>GEBRUIK</u>	<u>EFFICIENTIE %</u>
Proton Exchange Membrane FC	PEMFC	60 °C-90 °C	Ion uitwisseling membraan	Platina	1-2 bar	nee	ja	nee	CO <sub>2</sub> -tolerant	complex en waterhuishouding	Transport, grootschalige stationaire elektriciteitsopwekking en mobiele toepassingen	34-36
Alaline FC	AFC	65 °C-220 °C	Kalium hydroxide	Platina	1 bar	nee	nee	ja	goedkoop	gevoeligheid voor CO en CO <sub>2</sub> en lage vermogensdichtheid	Ruimtevaart en transport	60
Phosphoric Acid FC	PAFC	150 °C-220 °C	Vloeibaar fosforzuur	Platina	1 bar	ja	ja	nee	grote tolerantie CO <sub>2</sub>	Lange opstarttijd en corrosie materialen	Stationair	40
Solid Oxide FC	SOFC	1000 °C	Ceramisch	Perovskiet	/	ja	ja	nee	extreme tolerantie CO <sub>2</sub>	Lange opstarttijd en corrosie materialen	Stationair	45-65
Molten Carbonate FC	MCFC	650 °C	Vloeibaar gesmolten carbonaat	Nikkel	1-10 bar	ja	ja	nee	ongevoelig voor CO en CO <sub>2</sub>	Korte levensduur	Stationair	60 met WKK

Bron: EG&G, 2000; Sørensen, 2005



## **8.3. Toekomst**

### **8.3.1. Direct Borohydride Fuel Cell (DBFC)**

De DBFC's zijn een afgeleide van de eerder besproken alkaline brandstofcel (AFC). In plaats van zuiver waterstof maken zij gebruik van natrium borohydride. Zoals in het hoofdstuk over waterstofopslag besproken werd is borohydride een aantrekkelijke en potentieel bruikbare manier om waterstof op te slaan. Met de DBFC is het echter mogelijk om de tussenstap, waarbij er eerst terug waterstof wordt gehaald uit de borohydride, over te slaan. Dit brengt naast een afname van de complexiteit ook een stijging van de efficiëntie met zich mee. Met het gebruik van borohydride als brandstof wordt vooral de vervuiling van de brandstofcel door CO<sub>2</sub> in de lucht tegengegaan. Daarnaast is de productie van een DBFC goedkoper dan de productie van een klassieke alkaline brandstofcel omdat er geen dure platina kalysator aan te pas komt. Ook de geproduceerde stroomdichtheid is hoger dan die van de AFC. Het afvalproduct van de directe omzetting van borohydride is borax (NaBO<sub>2</sub>). Dit is een vrij veelvoorkomend detergent en zeepadditief. Het kan ook terug gerehydrogeneerd worden tot natrium borohydride met niets anders dan water en elektriciteit of warmte. Dit zou de kosten van natrium borohydride, die redelijk hoog zijn (50\$/kg), op termijn kunnen doen dalen met een factor 50 (1\$/kg).

### **8.3.2. Metal Hydride Fuel Cell (MHFC)**

Ook dit is een variant op de klassieke alkaline brandstofcel. Het enige verschil is dat hierbij waterstof gebruikt wordt die vrijkomt uit metaalhydrides. Dit is een bepaalde manier om waterstof op te slaan (zie hoofdstuk 6 over de opslag van waterstof).

### **8.3.3. Protonic Ceramic Fuel Cell (PCFC)**

Het principe van de PCFC is gebaseerd op een keramisch elektrolyt dat een verhoogde protongeleiding vertoont bij een verhoogde temperatuur. Ze werken efficiënt bij een hoge temperatuur (700°C) en hebben dan ook dezelfde voordelen als de andere hoge temperatuur brandstofcellen. Ze weten deze echter te combineren met sommige voordelen van lage temperatuur brandstofcellen. Door de hoge

temperatuur zijn de PCFC's in staat om fossiele brandstoffen direct te oxideren bij de anode. Op die manier kan dus het kostelijke omvormingsproces omzeild worden. Het grote nadeel van de PCFC's is dat, zoals altijd bij het gebruik van fossiele brandstoffen, er CO<sub>2</sub> vrijkomt bij de elektriciteitsproductie. PCFC's bezitten een vast elektrolyt. Het membraan kan dus niet uisdrogen zoals bij PEMFC's, en het kan niet beginnen lekken zoals PAFC's. Dit type brandstofcel is nog in volle ontwikkeling. De hoge werkingstemperatuur en het gebruik van fossiele brandstoffen zorgen er echter voor dat de kansen van PAFC's in de transportsector eerder beperkt zullen zijn.

Voor alle hierboven besproken brandstofcellen geldt dat het output voltage van een enkele cel niet hoger is dan 1 V gelijkstroom. Om substantiële elektrische stromen op te wekken worden verschillende cellen in serie aan elkaar geschakeld. Dit wordt een brandstofcel 'stack' genoemd. Voor een degelijke werking van een brandstofcelstack zijn er nog allerlei systemen nodig voor ondersteuning en controle van de processen. Naast de aanwezigheid van brandstof, oxidant en koeling zijn er ook mechanismen nodig die instaan voor de regulering van de samenstelling, de druk en het debiet van deze stromen. Om dit allemaal in goede banen te leiden heeft men behoefte aan heel wat secundaire toestellen en elektronica. Daarnaast heeft men voor het overbrengen van de geproduceerde elektriciteit naar de specifieke toepassing ook nog eens de juiste hulpmiddelen nodig.

# Deel II

## 9. Beschrijving van de gebruikte methodologie

In dit deel wordt het eigenlijke onderzoek uitgevoerd. Eerst zullen de technieken die gebruikt worden besproken worden. Er zal aangehaald worden waarom deze gebruikt worden en hoe ze ten opzichte van elkaar gezien kunnen worden. Vervolgens wordt besproken hoe de gegevens verzameld werden en hoe ze werden gebruikt om tot vergelijkbare resultaten te komen. Ten slotte worden de resultaten naast elkaar gelegd en worden ze uitvoerig besproken en vergeleken. Van hieruit wordt dan een conclusie getrokken. De gegevens zullen in de eerste plaats gebruikt worden om Ecoscores te berekenen. Op basis hiervan kan de milieu-impact van verschillende productieprocessen en aandrijfsystemen met elkaar vergeleken worden. Daarnaast zal er ook gekeken worden naar de totale Well-to-Wheel CO<sub>2</sub>-uitstoot.

Voor we beginnen met de bespreking van de eigenlijke methodologie moeten er een paar begrippen uitgelegd worden. Deze zijn belangrijk om de verschillende stappen in de methodologie te begrijpen.

### **9.1. Levens Cyclus Analyse (LCA)**

LCA is de studie en de waardering van de milieu-impact van de volledige levensloop van een bepaald product of dienst. Dit gaat van de ontginning van de grondstoffen, over de energie die gebruikt wordt in de productiecentra, het vervoer, verpakking, gebruik, ... tot recyclage en afval op het einde van de levensloop. De meest gebruikte impactcategorieën bij LCA zijn opwarming van de aarde (broeikasgassen), schade aan ozonlaag, toxicologie voor ecosystemen en mensen, landgebruik en gebruik van natuurlijke grondstoffen. De procedures die gevolgd moeten worden voor een valabele LCA zijn vastgelegd in de ISO 14000 milieumanagement standaarden. Om een beter begrip te krijgen van wat een LCA exact inhoud worden hier de verschillende stappen kort opgesomd en uitgelegd.

De eerste stap bestaat uit een zorgvuldige planning. Hierbij worden onder

meer de doelen geselecteerd en afgebakend, de onderzochte producten en hun alternatieven worden gedefinieerd, de parameters worden gekozen en de wijze van data verzamelen en verwerken worden vastgelegd. Pas wanneer men deze domeinen goed heeft afgebakend kan men overgaan naar de volgende fase. Die bestaat uit een screening van de haalbaarheid van de objectieven. Indien nodig wordt het plan aangepast om een haalbare LCA te kunnen uitvoeren.

De derde stap bestaat uit het verzamelen van de nodige gegevens en de organisatie ervan. De compleetheid en overzichtelijkheid van de gegevens is zeer belangrijk om later een eventuele reproductie van de studie te kunnen doen. Daarenboven moet duidelijk zijn welke bewerkingen met welke gegevens werden gedaan.

De vierde stap bestaat uit de evaluatie van de resultaten. De verschillende impactcategorieën worden met elkaar in relatie gebracht en genormaliseerd. Op die manier krijgt men een overzichtelijk beeld van de verschillende factoren en hun invloed ten opzichte van het geheel.

Als laatste stap wordt er doorgaans nog een verbeteringsstudie uitgevoerd. Hierbij worden gevoeligheidsanalyses uitgevoerd om na te gaan of bepaalde aspecten niet over- of onderbelicht worden. Indien nodig worden er verbeteringen aangebracht.

## **9.2. Ecoscore**

Ecoscore is een milieuscore voor voertuigen die aan de Vrije Universiteit Brussel ontwikkeld werd samen met de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO) en de Université Libre de Bruxelles (ULB). Ze is ontwikkeld als beleidsinstrument voor de Vlaamse overheid. De Ecoscore is een maat voor de milieuvriendelijkheid van een voertuig die gebaseerd is op twee eerder ontworpen milieumeetsystemen, namelijk 'Clean Vehicles' en 'Cleaner Drive' (Timmermans *et al.*, 2006). Verschillende aspecten van milieubelasting worden mee in rekening gebracht. Zo wordt er naast broeikasgassen ook rekening gehouden met de luchtkwaliteit op zowel volksgezondheid als op ecosystemen. Ook de hinder die veroorzaakt wordt door geluid wordt mee opgenomen in de berekeningen. Deze impactcategorieën hebben elk een gewichtscoefficiënt toegekend gekregen. Op die manier tracht men de milieu-impact op een omvattende manier te kwantificeren. De

gewichten werden toegekend op basis van vergaderingen die werden gehouden tussen de verschillende belanghebbende groepen.

De Ecoscore is een well-to-whole analyse. Zowel de directe uitstoot, die gemeten kan worden aan de uitlaat van de auto (tank-to-wheel), als de indirecte uitstoot (well-to-tank) worden in rekening gebracht. Zoals eerder gezegd heeft de indirecte uitstoot betrekking op het ontginnen of oppompen, aanmaken, opslag en transport van de gebruikte brandstof. De materialen, energie en de bijhorende emissies die gebruikt worden en vrijkomen bij de productie van de wagen worden niet mee in rekening gebracht. Ook de end-of-life emissies die vrijkomen bij de desablage of recyclage van het voertuig worden niet mee in rekening gebracht. Ten eerste zou dit de berekening veel te complex maken omdat deze gegevens lang niet voor alle auto's beschikbaar zijn. Ten tweede veroorzaakt de gebruiksfase van een auto veruit de meeste milieubelasting in de gehele levenscyclus van de auto. De productiefactoren spelen navenant een kleine rol in de totale milieubelasting en zijn daarenboven voor de meeste auto's nogal gelijklopend (Timmermans *et al.*, 2005).

De berekening van de Ecoscore gebeurt aan de hand van directe en indirecte emissiegegevens. Naast de gereguleerde emissies zoals CO, koolwaterstoffen, NO<sub>x</sub>, en stofdeeltjes worden ook andere emissies zoals CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O en CH<sub>4</sub> mee in rekening gebracht. De verschillende verontreinigende factoren worden onderverdeeld in drie groepen: globale opwarming van de aarde, luchtkwaliteit en geluidshinder. In de categorie van de luchtkwaliteit wordt nog een onderscheid gemaakt tussen luchtkwaliteit voor de menselijke gezondheid en luchtkwaliteit voor ecosystemen. In tabel 2 op pagina 52 staat een overzicht van de verschillende impactcategorieën met hun respectievelijke pollutanten en coëfficiënten.

**Tabel 2: De verschillende schadecategorieën van Ecoscore en hun gewichten**

Classificatie	Weging	Inventarisatie	Eenheid	Karakterisatie		Indirect/direct
				Landelijk	Stedelijk	<sup>(1)</sup> ind
1) Broeikaseffect	50%	CO <sub>2</sub>	GWP	1	1	1
		CH <sub>4</sub>	GWP	23	23	1
		N <sub>2</sub> O	GWP	296	296	1
2) Luchtkwaliteit	(40%)	-	-	-	-	-
2a) Menselijke Gezondheid	20%	KWS	Euro/kg	3	3	1
		CO	Euro/kg	0.0008	0.0032	0.25
		PM10	Euro/kg	103.49	418.61	0.247
		NO <sub>x</sub>	Euro/kg	1.152	1.483	0.777
		SO <sub>2</sub>	Euro/kg	6.267	14.788	0.424
2b) Ecosystemen	20%	NO <sub>x</sub>	Euro/kg	0.176	0.176	1
		SO <sub>2</sub>	Euro/kg	0.113	0.113	1
3) Geluidshinder	10%	Geluidsemmissie	dB(A)	-	-	nvt

Bron: Timmermans et al., 2005

De polluenten die opgenomen worden in de schadecategorie broeikaseffect worden uitgedrukt in Global Warming Potential. Dit is een maat die weergeeft in welke mate een polluent bijdraagt aan de opwarming van de aarde. We zien hier dat eenzelfde hoeveelheid methaan (CH<sub>4</sub>) en N<sub>2</sub>O respectievelijk 23 en 296 keer schadelijker zijn voor de opwarming van de aarde dan CO<sub>2</sub>.

Bij de andere impactcategorieën zien we dat de waarden worden uitgedrukt in Euro per kilogram. Deze waarde geeft de externe kosten weer die verbonden zijn aan het verspreiden van deze polluenten. De externe kosten moeten gezien worden als alle kosten die niet weerspiegeld worden in de prijs. De bepaling van deze externe kosten gebeurt op basis van marktprijzen voor het 'opruimen' van de vervuiling en enquêtes. Voor elke polluent die opgenomen is in de Ecoscore werd op die manier de impact op de gezondheid en het milieu bepaald om er zo een externe kost aan te verbinden (Timmermans *et al.*, 2005).

Zoals eerder gesteld, wordt binnen de berekening van Ecoscore het onderscheid aangehouden tussen directe (TTW) en indirecte emissies (WTT). Een deel van de directe emissies is vastgelegd in Europese richtlijnen en zijn dan ook terug te vinden in de homologatiegegevens van het voertuig. Deze Euronormen hebben betrekking op koolstofmonoxide, fijn stof, stikstofoxiden en koolwaterstoffen. De overige directe emissies zijn afhankelijk van het brandstofgebruik van het voertuig

in combinatie met de gebruikte technologie.

De berekening van de indirecte emissies is complexer. De formule [1] die hiervoor gebruikt wordt is:

$$E_{ij, indirect} = \frac{1}{3,6 \cdot 10^{11}} F_j \cdot \rho \cdot EC \cdot FC [g / km] \quad [1]$$

waarbij:

- $E_{i,j, indirect}$ : de indirecte emissies van elke pollutant j op een categorie i
- $F_j$ : de indirecte emissie factor voor pollutant j, uitgedrukt in milligram per kilowatt uur
- $\rho$ : dichtheid van de brandstof in gram per liter
- EC: energie-inhoud van de brandstof, uitgedrukt in kilojoule per kilogram
- FC: brandstofverbruik van het voertuig, uitgedrukt in liter per 100 kilometer
- De factor  $1/3,6 \cdot 10^{11}$  is een conversiefactor.

De totale emissies van een pollutant [2] worden berekend door de som te maken tussen de indirecte [1] en de directie emissies (Timmermans *et al.*, 2005):

$$E_{totaal} = E_{indirect} + E_{direct} \quad [2]$$

Bij de Ecoscore methodologie worden de verschillende schadelijke effecten voor mens en milieu mee in rekening gebracht. Het werd ontwikkeld om zowel in een stedelijke als in een landelijke omgeving te worden toegepast. Er werden verschillende impactten gebruikt om de schade van de verschillende pollutanten te karakteriseren. De berekening van de schade van elke pollutant [3] gaat als volgt (Timmermans *et al.*, 2006):

$$D_{i,j} = \delta_{i,j, indirect} * E_{j, indirect} + \delta_{i,j, direct} * E_{j, direct} \quad [3]$$

waarbij:

- $D_{i,j}$  de gedeeltelijke schade van pollutant j tot de categorie i
- $\delta_{i,j}$  de impactfactor van pollutant j tot de categorie i

$E_j$  de totale bijdrage van emissies van pollutant  $j$  tot de categorie  $i$

In tabel 2 is een overzicht weergegeven van de verschillende schadecategorieën en hun respectievelijke wegingcoëfficiënten.

Elk van de pollutanten werd gekoppeld aan een bepaalde schadecategorie. De totale schade van elke schadecategorie kan bekomen worden door de gedeeltelijke schade van de verschillende schadecategorieën op te tellen. Er bestaan drie grote schadecategorieën. De eerste categorie bevat de pollutanten die mede verantwoordelijk zijn voor het broeikas-effect, namelijk  $CO_2$ ,  $N_2O$  en  $CH_4$ . Een tweede categorie betreft de luchtvervuiling. Deze categorie is onderverdeeld in de deelcategorie gezondheid en de deelcategorie ecosystemen. Er werd bepaald dat de deelcategorie gezondheid gekoppeld is aan KWS, CO,  $PM_{10}$ ,  $NO_x$  en  $SO_2$ . Bij de schadecategorie ecosystemen horen de pollutanten  $NO_x$  en  $SO_2$ . Een derde en laatste categorie omvat de schadelijke effecten teweeggebracht door de geluidsemissies. Er werden verschillende impacten gebruikt om de schade van de verschillende pollutanten te karakteriseren. De impactfactoren [4] kunnen berekend worden als een gewogen gemiddelde van stedelijke en landelijke specifieke externe kosten (SEC) (Timmermans *et al.*, 2006):

$$\begin{aligned}\delta_{i,j, indirect} &= SEC_{i,j, rural} \text{ and} \\ \delta_{i,j, direct} &= \sigma_{urban} * SEC_{i,j, urban} + \sigma_{rural} * SEC_{i,j, rural}\end{aligned}\quad [4]$$

waarbij:

$\delta_{i,j}$  de impactfactor van pollutant  $j$  tot de categorie  $i$   
 $\sigma_{urban/rural}$  stedelijk/landelijk (25/75%) percentage van verdeling afgelegde afstand  
 $SEC_{i,j,urban/rural}$  stedelijk/landelijk specifieke externe kosten van pollutant  $j$  tot categorie  $i$

Nu volgt er nog een normalisatie tegenover een referentievoertuig [5] om de relatieve schade van elke categorie te kwantificeren. De schade tot een theoretisch voertuig werd als referentiepunt genomen (Timmermans *et al.*, 2006):



$$q_i = \frac{Q_i}{Q_{i,ref}} \quad [5]$$

waarbij:

- $q_i$  de genormaliseerde schade aan categorie i
- $Q_i$  de totale schade van het geanalyseerde voertuig aan categorie i
- $Q_{i,ref}$  de totale schade van het referentievoertuig aan categorie i

Tenslotte worden de verschillende schadecategorieën gewogen [6], om zo te komen tot een totale impact (TI) van het geanalyseerde voertuig (Timmermans *et al.*, 2006):

$$TI = \sum_i \alpha_i \cdot q_i \quad \text{met} \quad \sum_i \alpha_i = 1 \quad [6]$$

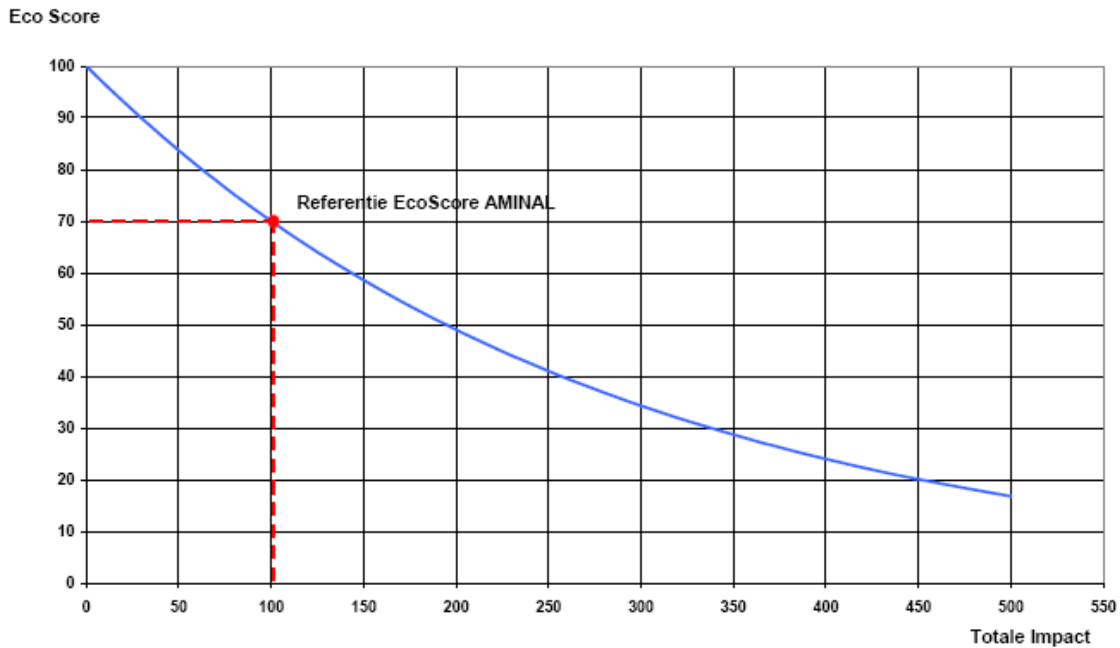
waarbij:

- $TI$  de totale impact van het geanalyseerde voertuig
- $\alpha_i$  de wegingsfactor van schadecategorie i
- $q_i$  de genormaliseerde schade van categorie i

Als de totale impact van een voertuig gekend is, kan de uiteindelijke Ecoscore opgesteld worden. Dit is een score tussen de 0 en 100, en dus voor het brede publiek gemakkelijk interpreteerbaar. Hierbij komt een Ecoscore van 100 overeen met een emissieloze wagen en een Ecoscore van 0 komt overeen met een oneindig vervuilende wagen. De omschaling [7] gebeurt als volgt (Timmermans *et al.*, 2006):

$$\text{Ecoscore} = 100 e^{(-0.00357 TI)}$$

Figuur 2 op pagina 56 geeft de logaritmische verdeling weer die gebruikt wordt bij de herschaling van de waarden. Uit de afbeelding kunnen we ook afleiden dat de waarden van het referentievoertuig leiden tot een Ecoscore van 70.



**Figuur 2: Logaritmische verdeling voor het berekenen van Ecoscores**

Bron: Timmermans *et al.*, 2005

Door gebruik te maken van deze methodologie wordt het dus mogelijk om verschillende voertuigen, en dus ook brandstoffen en aandrijfsystemen, met elkaar te vergelijken.

## 10. Data verzamelen

### 10.1. Waterstofproductie

Om de Ecoscore van voertuigen op waterstof te berekenen is het belangrijk dat we over de juiste gegevens beschikken. Aangezien brandstofcellen enkel waterdamp uitstoten werd er dus gezocht naar de emissiegegevens van de waterstofproductieprocessen. Ondanks dat waterstof op relatief grote schaal geproduceerd wordt zijn de emissiegegevens niet gemakkelijk te vinden. Over omvorming van aardgas, de rendabelste en meest gebruikte manier om waterstof te produceren, is in de literatuur slechts één betrouwbare bron terug te vinden. Ook de grote LCA databank van Ecoinvent bevat weinig bruikbare gegevens voor dit onderzoek (Ecoinvent, 2007). Dit is waarschijnlijk te wijten aan het feit dat in de waterstofproducties centrales vaak ook andere gassen dan waterstof worden

geproduceerd. Het is dus zeer moeilijk, zo niet onmogelijk, om specifiek emissies toe te schrijven aan de productie van waterstof. Ook voor de andere productieprocessen zijn er bijna geen specifieke gegevens te vinden. Om toch voldoende up-to-date informatie te verkrijgen werd elektronisch en telefonisch contact opgenomen met verschillende instanties en bedrijven. In tabel 9 in de bijlage op pagina 98 is een overzicht opgenomen van alle bedrijven, organisaties en personen die gecontacteerd werden. De meesten leverden echter geen bruikbare informatie op. Naast informatie uit persoonlijke communicatie met onderzoekers wordt dus hoofdzakelijk data uit de literatuur gebruikt. Deze is echter niet altijd even up-to-date. Daarom dient men in het achterhoofd te houden dat deze technieken vandaag de dag reeds geperfectioneerd kunnen zijn en dus potentieel minder schadelijk zijn dan dat ze hier voorgesteld worden.

Voor de gegevens in verband met waterstof in een verbrandingsmotor werd meervoudig gecommuniceerd met leden van de Vakgroep Mechanica van Strooming, Warmte en Verbranding - Vervoertechniek (Flohea) van de Universiteit Gent<sup>4</sup>. Zij doen onderzoek naar waterstof in verbrandingsmotoren en zijn zeer hulpvaardig geweest voor dit onderzoek.

Voor de emissiegegevens van elektriciteitsproductie, die gebruikt wordt om waterstof te produceren met behulp van elektrolyse, werd gebruik gemaakt van de emissiegegevens van de elektriciteitsmix in 2007, zoals ze verstrekt werden door Electrabel (Electrabel, 2008). De gegevens in verband met elektrische voertuigen uit de bestaande Ecoscore databank werden geactualiseerd om correcte vergelijkingen te kunnen maken met voertuigen die gebruik maken van waterstof dat geproduceerd werd met behulp van elektriciteit.

De gegevens die gebruikt worden om de efficiëntie van vervoer en opslag te berekenen komen van verschillende literatuurbronnen. Daar waar er geen consensus bestaat over de exacte energiekost van deze processen, wordt het gemiddelde van de verschillende bronnen genomen. Op die manier wordt getracht een zo representatief mogelijk beeld te creëren. Er zal tevens steeds vermeld worden uit welke bronnen de gegevens komen.

---

4 Ir. Sebastian Verhelst en Prof. dr. ir. Roger Sierens

## **10.2. Berekenen Ecoscores**

De opzet van dit onderzoek bestaat erin om enerzijds een vergelijking te maken tussen verschillende waterstofproductie- en distributiemethoden en aandrijfsystemen op basis van waterstof. Anderzijds is het de bedoeling dat deze gegevens vergeleken kunnen worden met gegevens over auto's die gebruik maken van andere brandstoffen en andere aandrijfsystemen. De gegevens die nodig zijn voor het berekenen van de Ecoscores zullen zoveel mogelijk gepresenteerd worden in overzichtelijke tabellen.

## **10.3. Verbruik van de bestudeerde auto's**

Om de Ecoscore van de auto's te berekenen werd begonnen met het opzoeken van hun exacte verbruik. Dit is nodig om de uitstoot per kilometer te kunnen berekenen. Voor de brandstofcelauto's zijn echter nog maar weinig gegevens beschikbaar. Er zijn nog maar weinig testen uitgevoerd met deze auto's en vaak zijn de gegevens dan ook afkomstig van de producent. Voor de studie was het meestal noodzakelijk om een omzetting te doen van mijl per kilogram naar kilometer per kilogram, of van mijl per gallon naar kilometer per kilogram. De gegevens zijn terug te vinden in Tabel 3 op pagina 59. Er wordt een kort overzicht gegeven van de auto's die opgenomen zijn in het onderzoek. Tevens worden ook de verschillende bronnen vermeld.

Tabel 3: Eigenschappen auto's

	<u>Aandrijving</u>	<u>Verbruik</u> (kg H <sub>2</sub> /km)	<u>Vermogen</u> <u>motor</u>	<u>Waterstofopslag</u>	<u>Energieopslag</u>	<u>Rijbereik</u>	<u>NO<sub>x</sub>-</u> <u>emissie</u> (g/km)	<u>CO-</u> <u>emissie</u> (g/km)	<u>CO<sub>2</sub>-</u> <u>emissie</u> (g/km)
<b><u>BMW 7 Hydrogen*</u></b>	ICE	0,0312	194kW	7,8 kg vloeibaar waterstof	nee	200 km	0,0497	0,0186	0
<b><u>Ford P2000**</u></b>	ICE	0,0196	?	1,5 kg bij 248,2 bar	nee	89 km	0,4598	0,0052	0,8699
<b><u>Mercedes A F-Cell***</u></b>	Brandstofcel	0,0108	65 kW	2 kg bij 350 bar	200V NiMH batterij	177 km	0	0	0
<b><u>Honda FCX Clarity****</u></b>	Brandstofcel	0,0093	100 kW	4,1 kg bij 345 bar	288V Lithium- ion batterij	450 km	0	0	0

\* Bron: [www.bmw.com](http://www.bmw.com), 2008

\*\* Bron: Szwabowski, 2002

\*\*\* Bron: [www.fueleconomy.gov](http://www.fueleconomy.gov), 2007

\*\*\*\* Bron: <http://automobiles.honda.com/fcx-clarity/>, 2008

### 10.3.1. BMW 7 Hydrogen bi-fuel/mono-fuel



**Afbeelding 3: BMW 7 Hydrogen**

Bron: Autoweek, 2006

De BMW 7 is de grootste en zwaarste auto die in het onderzoek is opgenomen. Het betreft hier een auto met een interne verbrandingsmotor. Voor de opslag van waterstof wordt gebruik gemaakt van vloeibaar waterstof. De gegevens werden verkregen via de website van BMW, persoonlijke communicatie met verantwoordelijken van BMW Benelux<sup>5</sup> en persoonlijke communicatie met leden van de vakgroep Flow, Heat and Combustion Mechanics (Flohea) van de Universiteit Gent<sup>6</sup>. De emissiedata zijn afkomstig van Argonne National Laboratory<sup>7</sup>. Voor deze auto zijn enkel algemene verbruiksgegevens beschikbaar. Er werden nog geen gestandaardiseerde verbruikstesten afgenomen met deze auto. De verbruiksgegevens zijn dan ook gebaseerd op schattingen en ervaringen. Er dient hier opgemerkt te worden dat de verbruiksgegevens berekend werden op basis van een rijcyclus met de bi-fuel versie van de BMW 7 Hydrogen die enkel gebruik maakt van waterstof. Dit is een wagen die in staat is om zowel op waterstof als op benzine te rijden. De emissiegegevens werden echter verkregen door testen te doen met dezelfde wagen die echter geoptimaliseerd is om te rijden op waterstof (bepaalde onderdelen die enkel nodig zijn voor het rijden op benzine werden verwijderd). Er is dus een verschil in gewicht tussen deze twee versies. Na overleg met Mr. Verhelst van de vakgroep Flohea van de Universiteit Gent werd beslist om dit kleine verschil (in verbruik en emissies) niet in rekening te brengen. De verschillen zouden verwaarloosbaar klein zijn. De BMW 7 Hydrogen is op beperkte schaal commercieel

---

<sup>5</sup> Luc Haelterman

<sup>6</sup> Ir. Sebastian Verhelst

<sup>7</sup> Deze gegevens werden ook verkregen via Sebastian Verhelst

beschikbaar. Onder andere in België loopt een proefproject waarbij enkele voertuigen worden geleased.

### 10.3.2. Ford P2000 Hydrogen



*Afbeelding 4: Ford P2000*

Bron: Machinedesign, 2003

Ook deze auto maakt gebruik van een interne verbrandingsmotor op waterstof (ICE of Internal Combustion Engine). In tegenstelling tot de BMW 7 Hydrogen maakt deze wagen gebruik van gecompresseerd waterstof ( $\text{CH}_2$ ). Deze wagen werd gebouwd als prototype en zal niet gecommmercialiseerd worden. Het is de eerste auto die in de VS. gemaakt werd die volledig aangedreven wordt door een  $\text{H}_2$ -ICE. Voor deze auto werden, ondanks het onafgewerkte onderzoeksprogramma, toch enkele standaardtests afgenomen door het Environmental Protection Agency (EPA). De gegevens over deze auto zijn afkomstig uit Szwabowski (2002).

### 10.3.4. Honda FCX Clarity



*Afbeelding 5: Honda FCX Clarity*

Bron: Honda website, 2008

Deze auto is het eerste brandstofcelvoertuig dat goedgekeurd is door de EPA. Honda heeft een intensief onderzoeksprogramma uitgevoerd naar het gebruik van brandstofcellen op waterstof. Ze worden door velen gezien als één van de marktleiders in dit segment. Door hun intensieve onderzoek hebben ze de laatste jaren enkele belangrijke doorbraken kunnen bereiken op het vlak van efficiëntie en compactheid van de waterstofopslag en de brandstofcel. De FCX Clarity zal de eerste brandstofcelauto zijn die op grote schaal gecommmercialiseerd wordt. Aanvankelijk zal echter alleen gewerkt worden met leaseprogramma's. De auto maakt gebruik van gecomprimeerd gasvormig waterstof voor de opslag. De omzetting van waterstof naar elektriciteit gebeurt door middel van een PEM brandstofcel. De Honda FCX Clarity is zoals de meeste brandstofcelvoertuigen een hybride. Dit wil zeggen dat er een batterij gebruikt wordt om onder andere de energie die vrijkomt tijdens het remmen te kunnen recupereren. Deze techniek van een assisterende batterij wordt ook toegepast bij traditionele verbrandingsmotoren. Het bekendste en meest gecommmercialiseerde voorbeeld van deze techniek is de Toyota Prius. De gegevens die gebruikt worden zijn afkomstig van de producent via hun website (Honda website, 2008). Dit voertuig heeft een gewicht van 1642 kg.



### 10.3.5. Mercedes A F-Cell



Afbeelding 6: Mercedes A F-Cell

Bron: USDEEERE, 2008

Deze Mercedes is een kleinere auto die uitgerust werd met een tank voor gasvormige opslag van waterstof en een PEM brandstofcel. Ook deze auto is enkel een prototype en zal niet gecommmercialiseerd worden. De gebruikte informatie is afkomstig van de website van United States Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy. (USDEEERE, 2008).

Voor de duidelijkheid wordt in tabel 4 een overzicht weergegeven van het verbruik van alle voertuigen die in deze studie zijn opgenomen. Om deze gegevens gemakkelijk te kunnen vergelijken worden de verbruiksgegevens zowel weergegeven in kg waterstof per kilometer als in kWh per kilometer.

Tabel 4: Verbruiksgegevens van de verschillende voertuigen

Voertuig	Verbruik in kg H <sub>2</sub> /km*	Verbruik in kWh/km*
BMW 7 Hydrogen	0,0312	1,067
Ford P2000	0,0169	0,563
Honda FCX Clarity	0,0093	0,31
Mercedes A F-Cell	0,0108	0,36
Volkswagen Golf Elektrisch	0,009**	0,3
Citroën Berlingo Elektrisch	0,0075**	0,25

\*: Voor de omzetting van kg H<sub>2</sub>/km naar kWh/km wordt uitgegaan van een LHV van waterstof van 120 MJ per kilogram

\*\* : Dit cijfer is een hypothetisch verbruik. Dit voertuig rijdt niet op waterstof maar het cijfer werd berekend om de vergelijking te vergemakkelijken.

## 10.4. Waterstofproductie

Zoals eerder vermeld zijn er verschillende manieren om waterstof te produceren. In deze studie wordt een vergelijking gemaakt tussen productie van

waterstof met behulp van elektrolyse (zowel uit windenergie als uit de Belgische elektriciteitsmix), stoomomvorming van aardgas en vergassing van steenkool. Er wordt ook gebruik gemaakt van gegevens uit de Ecoinvent databank. Deze emissiegegevens zijn een gemiddelde van 17 Europese waterstofproductiecentrales die gebruik maken van fossiele brandstoffen. De emissiegegevens van deze productiemethoden zijn terug te vinden in tabel 5 op pagina 66. De gegevens in deze tabel bevatten de gegevens van de ontginning van de grondstof (fossiele brandstof), transport naar de productiecentrale, omvorming naar waterstof en opslag. De gegevens in verband met de distributie worden apart behandeld omdat er verschillende configuraties van productie-, distributie- en opslagmethoden en aandrijfsystemen zullen vergeleken worden.

#### **10.4.1. Elektrolyse met elektriciteit uit Belgische elektriciteitsmix**

Voor de berekening van de milieu-impact van waterstofproductie met behulp van elektriciteit uit het Belgische elektriciteitsnet werd gebruik gemaakt van gegevens die verstrekt werden door Electrabel (Electrabel, 2008). In België wordt meer dan de helft van alle elektriciteit opgewekt met behulp van kernenergie. Verder hebben gas- en steenkoolcentrales een belangrijk aandeel. Hernieuwbare energie staat in België slechts in voor 2% van de totale energieproductie (European Commission, 2007). In de gegevens van Electrabel zijn de emissies die verbonden zijn aan de extractie van de grondstoffen en het transport ervan niet mee inbegrepen. In vergelijking met de andere waterstofproductiemethoden is dit een vereenvoudiging en een tekortkoming. Bij het interpreteren van de resultaten dient hier zeker rekening mee gehouden te worden. Voor een vollediger studie zou voor elke elektriciteitsproductiewijze een LCA moeten uitgevoerd worden. De gegevens uit al deze afzonderlijke studies zouden dan, naar rato van hun aandeel in de elektriciteitsproductie, opgeteld moeten worden. Enkel op die manier zouden de gegevens op een objectieve manier kunnen vergeleken worden. In het kader van deze studie was het echter niet mogelijk om al deze gegevens te verzamelen.

Voor de omzettingsefficiëntie van water naar waterstof (en zuurstof) via elektrolyse worden in de literatuur verschillende cijfers vermeld. De omzettingsefficiënties van elektrolyse variëren tussen 70 en 90% (Rifkin, 2002; Gray *et al.*, 2001; GEMIS, 2002; Züttel, 2004; Ewan *et al.*, 2005). Dit is waarschijnlijk te

wijten aan het gebruik van verschillende methoden van elektrolyse. Zo kunnen er verschillende katalysatoren gebruikt worden. Daarenboven neemt de efficiëntie van elektrolyse toe met een stijgende druk. Een combinatie van deze factoren zou deze verschillen kunnen verklaren. Voor de berekening van de Ecoscores wordt gewerkt met een elektrolyse-efficiëntie van 75%. Dit wil zeggen dat 75% van de energie die aanwezig is in de elektriciteit ook daadwerkelijk terug te vinden is in het geproduceerde waterstof. Wat betreft de energie-efficiëntie dient men te onthouden dat deze elektrolyse efficiëntie dient vermenigvuldigd te worden met de efficiëntie van de elektriciteitscentrales. De totale energie-efficiëntie voor de productie van waterstof met behulp van elektriciteit van het Belgische elektriciteitsnet ligt dus rond 30%, indien er uitgegaan wordt van een efficiëntie van elektriciteitsproductie van 40%.

Er werd geopteerd om gebruik te maken van een elektrolyse-efficiëntie van 75%. In de eerste plaats werd dit gedaan om geen te rooskleurig beeld te creëren. In veel gevallen zal de efficiëntie hoger liggen. Vooral bij de elektrolyse in grootschalige elektrolyzers kan men gemakkelijk een betere efficiëntie bereiken. Bij het gebruik van thuis-elektrolyzers, zoals Honda er ter beschikking wil stellen van eigenaars van een brandstofcelvoertuig, zal de efficiëntie echter niet hoger liggen dan 75%.

#### **10.4.2. Stoomomvorming van aardgas**

Zoals eerder gesteld is de stoomomvorming van aardgas vandaag de dag de meest gebruikte en meest efficiënte manier om waterstof te produceren. De helft van alle waterstof wereldwijd wordt geproduceerd door middel van stoomomvorming. Het verkrijgen van de emissiegegevens in verband met dit proces is echter niet evident. In bijna alle gevallen wordt de installatie ook nog voor andere scheikundige processen gebruikt. Het is dus zeer moeilijk of onmogelijk om specifieke emissies toe te kennen aan de productie van waterstof. Talloze mails en telefoons naar waterstofproducenten leverden niets op. In tabel 9 op pagina 98 in de bijlage is een opsomming gegeven van alle bedrijven en personen die gecontacteerd werden. De emissiegegevens die in dit onderzoek gebruikt worden zijn afkomstig van een LCA die uitgevoerd werd door Spath en Mann (2001). Zij onderzochten de gegevens voor een stoomomvormer met een capaciteit van 1.5 miljoen Nm<sup>3</sup>/dag. In tabel 5 op pagina 66 zijn de gegevens van de verschillende productiemethoden opgenomen die gebruikt worden voor het berekenen van de Ecoscores.

**Tabel 5: Emissiegegevens waterstofproductiemethoden**

<b>Productiemethode\Emissie g/kg H<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>NOx</b>	<b>N<sub>2</sub>O</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>KWS</b>	<b>PM10</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>
<b>SMR*</b>	5,59	10578,1	12,08	0,037	59,80	16,51	0,71	8,2175
<b>SMRL**</b>	2,41	8,8	9,99	0,000	11,50	2,55	0,64	2,6592
<b>steenkol gasificatie**</b>	1,69	18,2	11,41	0,000	60,99	0,60	1,89	10,9176
<b>elektriciteitsmix België***</b>	0,88	10361,6	10,41	0,071	0,18	0,17	0,24	10,4200
<b>Ecoinvent****</b>	2,45	1229,5	2,11	0,000	17,40	2,00	0,47	2,1074

\* Gegevens afkomstig uit Spath *et al.*, 2001

\*\* Gegevens afkomstig uit Little, 1996

\*\*\* Gegevens afkomstig Electrabel, 2008

\*\*\*\* Gegevens afkomstig uit Ecoinvent databank, 2007

Mogelijk zijn ze lichtjes verouderd maar de techniek van stoomomvorming is in grote mate hetzelfde gebleven. Er worden dus geen substantiële verschillen verwacht tussen de techniek in 2001 en de technieken die vandaag de dag gebruikt worden. Ewan *et al.* (2005) maakt voor de stoomomvorming van methaan melding van een energie-efficiëntie van 76%.

Om een duidelijker beeld te krijgen van de impact van de omvorming van aardgas en om betere vergelijkingen te kunnen maken werden ook oudere gegevens van Little gebruikt (1996). De concrete gegevens over de veronderstellingen die hij maakt zijn niet vrijgegeven, maar omdat hij in zijn studie ook de emissiegegevens aanhaalt van gasificatie van steenkool (die in de volgende paragraaf 10.4.3 worden besproken) werden ook deze gegevens over stoomomvorming van aardgas opgenomen. Op die manier wordt het mogelijk om vergelijkingen te maken op basis van gegevens die werden verkregen met behulp van dezelfde veronderstellingen. Little maakt in zijn studie de veronderstelling dat het waterstof vervoerd wordt over een afstand van 1600 kilometer met behulp van pijpleidingen. De emissies die hiermee gepaard gaan konden er niet worden uitgefilterd aangezien ze niet afzonderlijk vermeld worden in het onderzoek. Men dient dit steeds in het achterhoofd te houden bij de interpretatie van de resultaten. Deze gegevens zijn ook terug te vinden in tabel 5 op pagina 66.

In de resultaten is, ondanks dat ze over dezelfde productiewijze gaan, een duidelijk verschil te zien tussen de resultaten die verkregen werden met behulp van Little (1996) en de gegevens uit Spath *et al.* (Spath *et al.*, 2001). Aan wat deze

verschillen te wijten zijn kon niet achterhaald worden door een gebrek aan bronmateriaal uit het artikel van Little. De gegevens uit Little in verband met SMR werden vooral opgenomen om een gegronde vergelijking te kunnen maken met de gegevens in verband met de gasificatie van steenkool.

#### **10.4.3. Gasificatie van steenkool**

De techniek van de gasificatie van steenkool is minder aantrekkelijk dan die van stoomomvorming van methaan. Deze techniek is duurder en zorgt voor meer uitstoot van schadelijke stoffen (zie tabel 5 op pagina 66). Ook hier was het zeer moeilijk om de juiste gegevens te vinden. Voor het onderzoek wordt gebruik gemaakt van gegevens die vermeld worden in een onderzoek van Little (1996). Deze gegevens dateren al van 1996 en zijn mogelijk meer gedateerd dan de gegevens over stoomomvorming uit Spath *et al.*, 2001. In de Verenigde Staten is men immers enkele jaren geleden een grootschalig onderzoeksprogramma gestart dat er op gericht is om de waterstofproductie uit steenkool aanzienlijk te verbeteren. Mogelijk zijn daar al doorbraken bereikt die ervoor zorgen dat de gasificatie van steenkool inmiddels goedkoper en milieuvriendelijker is geworden.

#### **10.4.4. Gemiddelde emissies van waterstofproductie uit fossiele brandstoffen**

De emissiegegevens die voor deze berekening werden gebruikt zijn afkomstig uit de Ecoinvent databank, versie 2.0 uit 2007 (Ecoinvent, 2007). Dit is een grote databank die van allerhande processen de emissies beschrijft. Het gaat hierbij steeds om levenscyclusanalyses. De emissies die betrekking hebben op het ontginnen, vervoeren, omvormen, opslaan en ontmantelen worden allemaal in de databank opgenomen. Het gaat hier, in tegenstelling tot de andere gegevens die gebruikt worden om Ecoscores te berekenen, om een volledige LCA. Bij de andere gegevens in verband met de productie van waterstof werden de gegevens met betrekking tot de bouw en ontmanteling van de productie-installatie niet mee in rekening gebracht. Bij de interpretatie van deze gegevens mogen we dit dus niet uit het oog verliezen.

Ondanks dat deze gegevens dus meer bevatten dan noodzakelijk is voor de berekening van een Ecoscore werden deze gegevens toch gebruikt omdat ze up-to-

date zijn. Mogelijk kunnen ze ons dus laten zien in welke mate er vooruitgang is geboekt in de milieuvriendelijkheid van de waterstofproductieprocessen. Verder wordt er op gewezen dat de werking van de productiecentrale veruit de grootste milieukost met zich meebrengt. In vergelijking hebben de bouw en de ontmanteling slechts een minimale milieu-impact. Er wordt dus aangenomen dat de vertekening van de Ecoscores die berekend worden met deze gegevens minimaal zal zijn.

## **10.5. Opslag van waterstof**

Alvorens verder te bespreken welke gegevens hier gebruikt worden, dient opgemerkt te worden dat er bij de opslag en het transport een klein deel van het waterstof verloren gaat. Dit geldt immers voor de meeste brandstoffen. Daarom wordt hiermee, in het kader van deze studie, geen rekening mee gehouden.

### **10.5.1. Gasvormige waterstofopslag**

De meest voor de hand liggende methode om waterstof op te slaan is in gecomprimeerde vorm. Voor de berekeningen van de Ecoscore wordt uitgegaan van een compressie tot 700 bar voor het vullen van tanken. Voor het berekenen van de emissies en het energieverlies dat met deze compressie gepaard gaat wordt gebruik gemaakt van de cijfers die vermeld worden in de General Motors studie van 2002 (GM *et al.*, 2002). Zij maken gewag van een elektriciteitsverbruik van 0,021 kWh/ MJ<sub>CH<sub>2</sub></sub>. Na omzetting wordt dit 2,52 kWh/ kg H<sub>2</sub> (1kg H<sub>2</sub> is gelijk aan 120MJ LHV). Voor het berekenen van de Ecoscore worden de emissies van dit elektriciteitsverbruik berekend aan de hand van de gegevens van de Belgische elektriciteitsmix. De emissiegegevens die hiermee gepaard gaan zijn terug te vinden in tabel 6 op pagina 69. Per configuratie zal dan onderzocht worden in welke mate dit bijdraagt aan de milieu-impact van de specifieke configuratie van productieproces, transport en aandrijfsysteem.

### **10.5.2. Vloeibaar waterstofopslag (cryogeen)**

De opslag van waterstof in vloeibare vorm vergt meer energie dan de opslag

in gecomprimeerde vorm. In de literatuur is sprake van een kost voor het opslagen tussen de 30 en de 40% van de opgeslagen energie (GEMIS, 2001; GM et al, 2002; Yang *et al.*, 2006). Dit wil zeggen dat er voor het opslaan van 1MJ aan waterstof 1,3 of 1,4 MJ aan energie nodig is. Er zal in deze studie uitgaan worden van de benedengrens van deze getallen: 30%. Dit wordt gedaan omdat er nu al technieken bekend zijn waarmee deze efficiënties behaald kunnen worden. Daarenboven wordt verwacht dat deze technieken in de toekomst nog zullen verbeteren. Net zoals bij de gecomprimeerde opslag zullen er hier berekeningen gemaakt worden op basis van de Belgische elektriciteitsmix. Eerst zullen de cijfers omgezet worden naar elektriciteitsverbruik per kg H<sub>2</sub>. Dan wordt er voor het vloeibaar maken van één kilogram waterstof een energie-equivalent bekomen van 10 kWh. Vervolgens zullen per auto de extra emissies per kilometer berekend worden. In tabel 6 is een overzicht gegeven van de emissies die gebruikt werden bij de berekening van de Ecoscores.

**Tabel 6: Emissiegegevens opslag waterstof**

<u>Emissies in g/kg</u> <u>H<sub>2</sub></u>	<u>CO</u>	<u>CO<sub>2</sub></u>	<u>NO<sub>x</sub></u>	<u>N<sub>2</sub>O</u>	<u>CH<sub>4</sub></u>	<u>KWS</u>	<u>PM10</u>	<u>SO<sub>2</sub></u>
<u>Compressie</u>	0,0498	588	0,5901	0,0040	0,0101	0,0099	0,0137	0,5908
<u>Liquificatie</u>	0,1978	2331	2,3416	0,0159	0,0400	0,0391	0,0542	2,3445

Compressie: Gegevens Electrabel omgezet naar 0,021 kWh/kg H<sub>2</sub> (Electrabel, 2008)

Liquificatie: Gegevens Electrabel omgezet naar 10 kWh/kg H<sub>2</sub> (Electrabel, 2008)

## **10.6. Geluidshinder**

Ook de geluidshinder wordt mee in rekening gebracht bij de berekening van de Ecoscores. Voor de voertuigen op waterstof met een interne verbrandingsmotor (ICE) werd, na overleg met mijnheer Verhelst van de vakgroep Flohea van de Universiteit Gent beslist om hiervoor het gemiddelde te nemen van de traditionele verbrandingsmotoren. Voor de gemakkelijheid, en omdat dit nagenoeg overeenkomt met dit gemiddelde, wordt de Euro 4 norm met betrekking tot geluidshinder gehanteerd. Dit komt neer op een geluidsemisssie van 74 dB bij het voorbijrijden van het voertuig. Dit is sinds 1995 de geluidsnorm die wordt opgelegd aan alle nieuwe personenwagens.

Voor batterij elektrische en brandstofcelvoertuigen wordt dezelfde norm gehanteerd. Vermoedelijk ligt de effectieve geluidsemisssie hier iets lager doordat de motor nagenoeg geen geluid produceert. Het zijn echter vooral de rolgeluiden die

verantwoordelijk zijn voor de geluidsproductie van een voertuig. De verschillen tussen verbrandingsmotoren en elektrisch aangedreven voertuigen zullen dus klein zijn. Voor elektrische voertuigen wordt dezelfde norm, die gelijkgesteld is aan de maximale waarde voor Euro 4 voertuigen, gehanteerd omdat de exacte gegevens niet voorhanden zijn. Voor de berekening van de Ecoscores wordt voor alle voertuigen dus dezelfde geluidsbelasting gehanteerd.

## **10.7. Transport van waterstof**

### **10.7.1. Pijpleiding**

Er zijn zeer weinig gegevens over waterstoftransport met behulp van pijpleidingen bekend. In bijna alle studies worden de emissies die hieraan verbonden zijn genegeerd. Het pijpleidingtransport is vrij efficiënt en in vergelijking met de andere processen in de keten (ontginning grondstof, productie waterstof, gebruik) heeft het een minimale impact. De exacte emissies in verband met waterstoftransport met pijpleidingen werden nergens gevonden en worden daarom ook niet opgenomen in de studie. Dit zal slechts in kleine mate invloed uitoefenen op de resultaten. Toch moet men in het achterhoofd houden dat dit een lichte vertekening van de resultaten met zich meebrengt. De emissiegegevens met betrekking tot stoomomvorming en gasificatie die werden overgenomen van Little gaan wel uit van een waterstoftransport met behulp van pijpleidingen over een afstand van 1600 kilometer (1996).

### **10.7.2 Waterstoftransport over de weg**

Voor het waterstoftransport over de weg worden wel emissies mee in rekening gebracht. Hiervoor zullen de TTW emissies van een vrachtwagen, die voldoet aan de Euro 4 normen, gebruikt worden. We veronderstellen dat de vrachtwagen gemiddeld 300km aflegt tussen het waterstofproductiecentrale en het bevoorradingsstation voor de auto's. De gegevens zijn afkomstig uit de GM-studie en werden verder aangevuld met de limietwaarden van de Euro 4-norm (GM *et al.*, 2002). Op die manier kan er berekend worden hoeveel emissies dit met zich meebrengt per kilometer en per kg



waterstof. Op die manier kunnen deze gegevens mee opgenomen worden in de berekeningen van de Ecoscores. Voor de exacte berekening van de emissies voor het waterstoftransport worden de emissies per kilometer vermenigvuldigd met 300. Dit wordt dan gedeeld door het aantal kilogram waterstof dat de vrachtwagen vervoert. Op die manier bekomen we dan de uitstoot in kilogram H<sub>2</sub> per kilometer.

Bij het transport van gecompresseerd waterstof wordt er uitgegaan van een totale capaciteit van de trailer van 500kg. Dit komt ongeveer overeen met een druk van 300 bar. Waarschijnlijk is het in toekomst mogelijk om waterstof te transporteren onder grotere druk maar momenteel is dit wettelijk niet toegestaan (Yang *et al.*, 2007). Voor het transport van vloeibaar waterstof wordt uitgegaan van een laadvermogen van 4000 kg waterstof. Dit grote verschil is te wijten aan het verschil in dichtheid. Voor het berekenen van de uitstoot van de vrachtwagen zal de uitstoot per kilometer gedeeld worden door het aantal vervoerde kilogram waterstof. Op die manier bekomen we een uitstoot per kg waterstof. De verschillen in belasting van de vrachtwagen werden niet in rekening gebracht. Dit zou de berekening te complex maken en daarenboven zouden deze verschillen minimaal zijn. De verschillen in gewicht van de lading zijn immers klein in verhouding tot het totale gewicht van de vrachtwagen en de trailer. De gegevens die gebruikt werden zijn terug te vinden in tabel 7.

**Tabel 7: Emissiegegevens waterstoftransport over de weg**

	<u>CO</u>	<u>CO<sub>2</sub></u>	<u>NO<sub>x</sub></u>	<u>N<sub>2</sub>O</u>	<u>CH<sub>4</sub></u>	<u>KWS</u>	<u>PM10</u>	<u>SO<sub>2</sub></u>
<u>Transport over weg 300 km</u>	1575,00	281400	3750,00	0	19,5000	483,00	21,000	0
<u>Transport over weg (g/km)</u>	5,25	938	12,25	0	0,0650	1,61	0,070	0
<u>LH<sub>2</sub> g/kg *</u>	0,39	70	0,94	0	0,0049	0,12	0,005	0
<u>CH<sub>2</sub> g/kg **</u>	3,15	563	7,50	0	0,0390	0,97	0,042	0

\* 4000 kg over 300 km

\*\* 500 kg over 300km

LH: Vloeibaar waterstof

CH: Gecompresseerd waterstof

## 11. Resultaten

Voor de berekening van Ecoscores van de verschillende pathways maken we gebruik van de gegevens uit het vorige hoofdstuk. Wat de productieprocessen betreft zullen we gebruik maken van vier verschillende methoden: stoomomvorming van methaan, gasificatie van steenkool, elektrolyse met behulp van hernieuwbare energie en elektrolyse met behulp van elektriciteit van het Belgische stroomnet. Voor de berekening van de Ecoscores door middel van stoomomvorming zal gebruik gemaakt worden van twee verschillende bronnen. Op die manier kunnen de gegevens van Little (1996) vergeleken worden met de gegevens van Spath *et al.*. De specifieke emissies (per geproduceerde kilogram waterstof) zijn terug te vinden in Tabel 5 op pagina 66. Afhankelijk van het type auto en de configuratie die gebruikt wordt om de Ecoscore te berekenen wordt gebruik gemaakt van de gegevens met betrekking tot vloeibare of gasvormige opslag. In tabel 8 op pagina 74 is eenvoudig te zien welke configuraties er mogelijk zijn. Om een duidelijker beeld te krijgen op de invloed van de verschillende methoden van opslag en distributie zal ook de Ecoscore van enkele fictieve configuraties berekend worden.

Wat betreft de auto's wordt er een onderscheid gemaakt tussen interne verbrandingsmotoren en auto's die gebruik maken van brandstofcellen. We zullen dus veel verschillende configuraties van productieprocessen, opslagmethoden, transportmethoden en aandrijfsystemen bespreken. Helaas valt het niet binnen het kader van deze studie om alle mogelijke configuraties te berekenen. In de mate van het mogelijke wordt getracht om een zo breed mogelijk beeld te scheppen op het gebruik van waterstof voor het wegtransport. In de eerste plaats zullen de meest logische of voor de hand liggende configuraties besproken worden. Bij de verdere selectie van de verschillende configuraties zal er ook gelet worden op de vergelijkbaarheid met andere Ecoscores. Het is immers de bedoeling om aan het einde van de rit conclusies te kunnen trekken in vergelijking met andere brandstoffen en andere aandrijfsystemen. In tabellen 10 en 11 op pagina's 99 en 100 in de bijlage wordt een overzicht gegevens van de verschillende pathways die berekend werden.

Bij de bespreking van de resultaten zal hoofdzakelijk gekeken worden naar de twee auto's die het dichtste staan bij effectieve commercialisering, met name de BMW 7 Hydrogen (ICE) en de Honda FCX Clarity (FC). Beide worden reeds in serie geproduceerd. Deze wagens hebben daarenboven een vergelijkbare grootte en

gewicht.

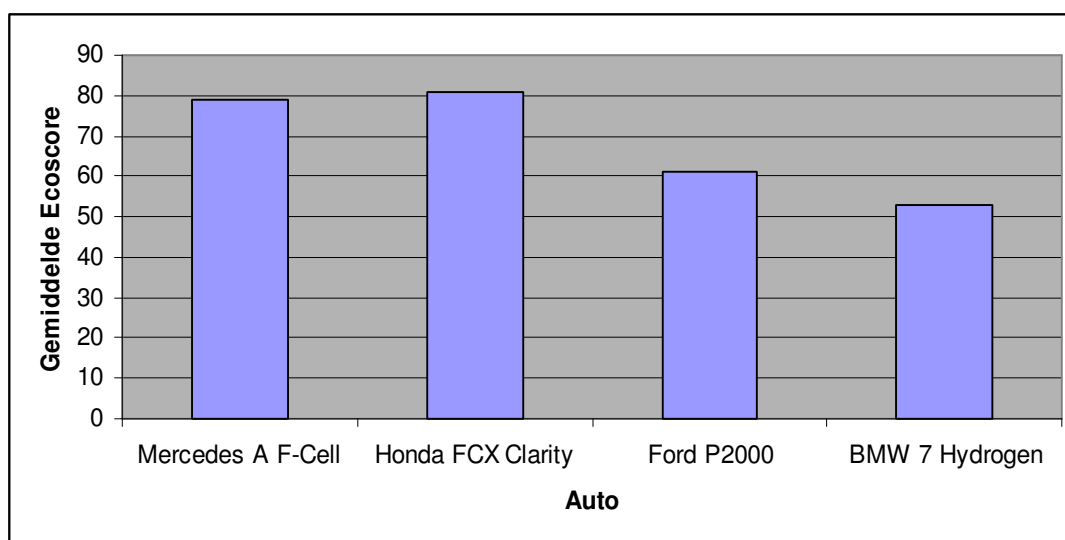
Tabel 8: Overzicht configuratiemogelijkheden

<b><u>Productiemethoden</u></b>	<b><u>Afkorting</u></b>	<b><u>Distributie- methode</u></b>	<b><u>Opslagmethode</u></b>	<b><u>Auto's</u></b>
Stoomomvorming van aardgas (Gegevens afkomstig uit Spath en Mann, 2001)	SMR	Wegtransport (W)	Vloeibaar waterstof (LH)	BMW 7 Hydrogen (ICE)
Stoomomvorming van aardgas (Gegevens afkomstig uit Little, 1996)	SMRL			Ford P2000 (ICE)
Gasificatie van steenkool (Gegevens afkomstig uit Little, 1996)	Gas			
Hernieuwbare energie (Geen emissiegegevens)	Her	Pijpleiding (P)	Gecomprimeerd waterstof (CH)	Honda FCX Clarity (FC)
Elektrolyse met elektriciteit van het Belgische net (Gegevens Electrabel, 2007)	Bel			Mercedes A F-Cell (FC)
Gemiddelde productiecentrales met fossiele brandstof (Gegevens EcoInvent, 2007)	EI			

## 11.1. Bespreking

### 11.1.1. Algemeen

Als we de uitkomsten van de Ecoscores van de verschillende configuraties bestuderen (zie Tabel 10 en 11 op pagina's 99 en 100 in de bijlage) valt meteen op dat de auto's met brandstofcellen aanzienlijk beter scoren dan de auto's met verbrandingsmotor op waterstof. Om dit te verduidelijken worden de gemiddelde Ecoscores van de vier verschillende auto's over de verschillende configuraties in Figuur 3 naast elkaar weergegeven.



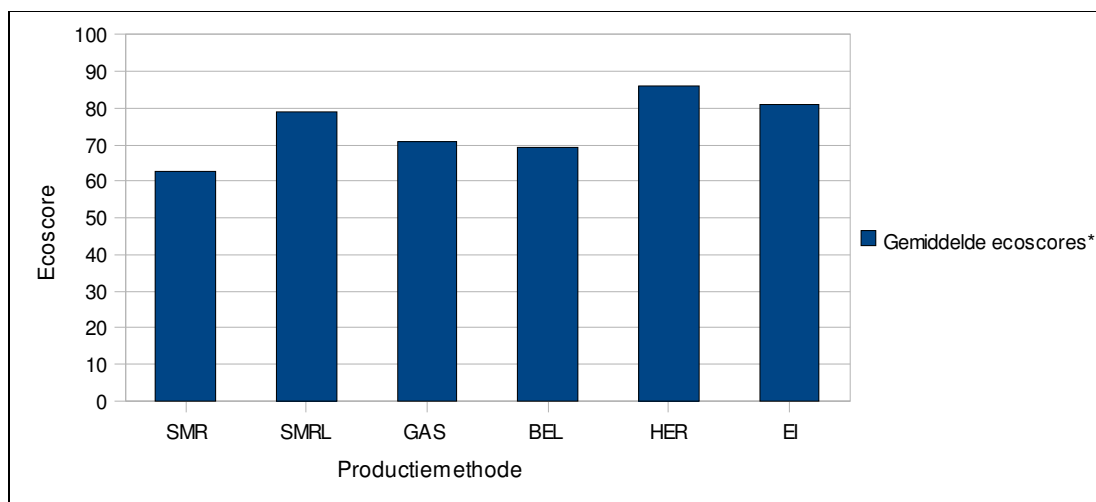
**Figuur 3: Gemiddelde Ecoscore per auto over de verschillende configuraties**

Aangezien de waterstofproductieprocessen hetzelfde zijn en de directe emissies van de interne verbrandingsmotoren zeer laag zijn is het verschil grotendeels te wijten aan het hogere verbruik (en dus lagere efficiëntie) van de ICE's. Onafhankelijk van de gebruikte productieprocessen of wijze van opslag en transport scoren de verschillende pathways met brandstofcellen op twee na allemaal zeer hoog. Bij de voertuigen met verbrandingsmotor zien we dat enkel bij de waterstofproductie met behulp van elektriciteit uit hernieuwbare energie een Ecoscore van meer dan 70 behaald wordt. Dit is niet verwonderlijk aangezien er voor deze wijze van waterstofproductie geen emissies in rekening worden gebracht. Enkel de wijze van opslag en transport, en de (minimale) directe emissies hebben hier een impact op de Ecoscore. De gemiddelde Ecoscore van de verschillende pathways van de

brandstofcelauto's is echter nog steeds groter dan deze beste score voor de ICE. Dit verschil is dus volledig te wijten aan de grote brandstofconsumptie. Dit is niet verwonderlijk aangezien het verbruik van de BMW 7 Hydrogen en de Ford P2000, die beide gebruik maken van een verbrandingsmotor, respectievelijk 3 tot 1,6 maal zo groot is dan het verbruik van de brandstofcelvoertuigen. De relatief lage efficiëntie van de interne verbrandingsmotoren speelt hier dus een belangrijke rol.

### **11.1.2. Waterstofproductie**

Als de Ecoscores gerangschikt worden aan de hand van de waterstofproductiemethode kunnen er gemakkelijk enkele conclusies getrokken worden. Voor de gemakkelijker wordt overal hetzelfde opslag- en transportsysteem gebruikt. Om het overzichtelijk te houden wordt uitgegaan van gecomprimeerd waterstof dat over de weg getransporteerd wordt. Op die manier wordt het effect van de productiemethode geïsoleerd. Figuur 4 op pagina 77 geeft de gemiddelde Ecoscores weer van de verschillende productiemethoden. De Ecoscores van de BMW 7 Hydrogen zijn hier niet bij opgenomen omdat deze wagen gebruik maakt van vloeibaar waterstof. Niet alle configuraties werden voor deze wagen berekend en het gebruik van de enkele Ecoscores die wel berekend werden zouden het resultaat van de grafiek vertekenen. Meteen valt op dat de voertuigen die gebruik maken van elektrolyse waarbij hernieuwbare elektriciteit gebruikt wordt veruit het beste scoren. Dit is een logisch resultaat aangezien bij deze configuratie enkel de emissies in rekening worden gebracht die te maken hebben met de opslag en het transport. De tweede beste Ecoscores worden behaald met de productiegegevens afkomstig uit de Ecolnvent databank. Dit is een verrassend resultaat aangezien het hier gaat over een gemiddelde van 17 waterstofproductiecentrales die allen gebruik maken van fossiele brandstoffen. Doorgaans wordt aangenomen dat stoomomvorming van aardgas de milieuvriendelijkste methode is om waterstof te produceren uit fossiele brandstof. Het is verrassend dat dit gemiddelde cijfer hogere Ecoscores oplevert dan de Ecoscores die berekend worden aan de hand van de gegevens van enkel stoomomvorming. Mogelijk is dit te wijten aan recentere gegevens. Een verbetering van de verschillende technieken zou kunnen leiden tot betere Ecoscores.



**Figuur 4: Gemiddelde Ecoscore voor voertuigen met verschillende waterstofproductiemethoden**

\* Berekend voor Ford P2000 (ICE), Mercedes A F-Cell (brandstofcel) en Honda FCX Clarity (brandstofcel)

SMR: Stoomomvorming van aardgas, gegevens afkomstig uit Spath *et al.*, 2001

SMRL: Stoomomvorming van aardgas, gegevens afkomstig uit Little, 1996

GAS: Gasificatie van steenkool, gegevens afkomstig uit Little, 1996

BEL: Elektrolyse met elektriciteit van het Belgische net, gegevens van Belgacom, 2008

HER: Elektrolyse met elektriciteit via hernieuwbare energie

EI: Gemiddelde van 17 waterstofproductiecentrales die gebruik maken van fossiele energie, gegevens uit Ecoinvent databank, 2007

De derde beste Ecoscores worden behaald met de emissiegegevens van stoomomvorming van aardgas. Er wordt wel duidelijk dat er een groot verschil is tussen de emissiewaarden van Little (1996) en Spath *et al.* (2001). De emissiegegevens van Little in verband met gasificatie van steenkool scoren zelfs beter dan de Ecoscores aan de hand van stoomomvorming volgen Spath *et al.* (2001). De reden van deze grote verschillen kon niet achterhaald worden aangezien de exacte bronnen en assumpties van Little niet vrijgegeven zijn.

Ook elektrolyse met elektriciteit van het Belgische elektriciteitsnet scoort beter dan de stoomomvorming van aardgas volgens Spath (*et al.* 2001). Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat bij de emissiegegevens van Electrabel enkel de directe emissies in rekening worden gebracht. De ontginning van de grondstoffen en het transport ervan zijn dus niet opgenomen in de emissiewaarden. Bij alle andere waterstofproductiemethoden is dit wel het geval.

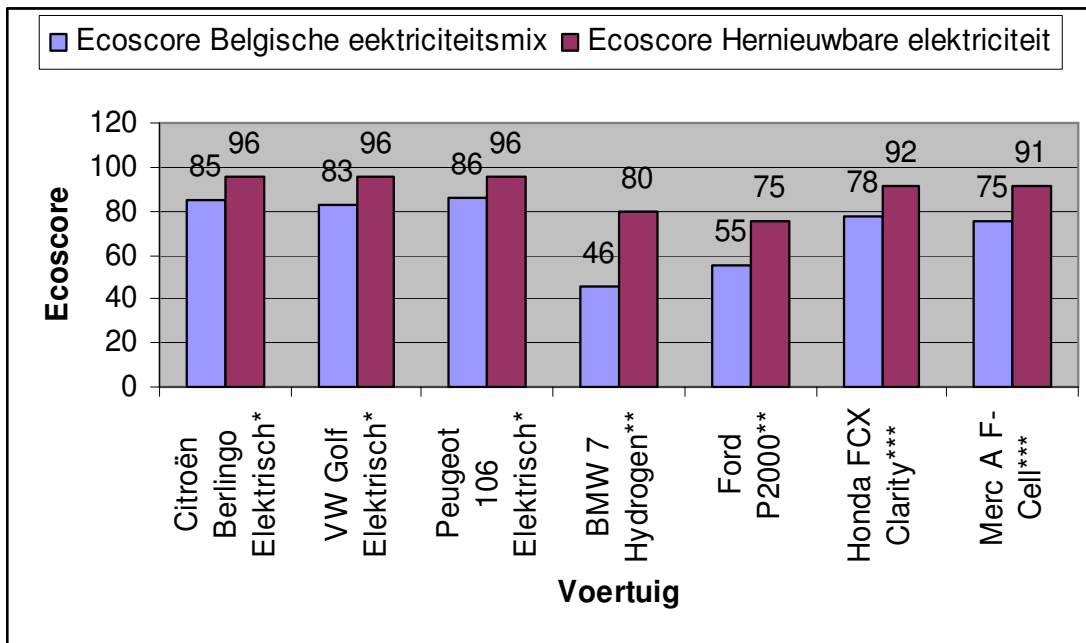
Bij een vergelijking van de Ecoscores van de brandstofcelauto's en de batterij elektrische voertuigen in tabel 11 op pagina 100 in de bijlage zien we dat de batterij

elektrische voertuigen zeer goed scoren. Enkel wanneer gebruik gemaakt wordt van de emissiegegevens van waterstofproductie met behulp van stoomomvorming van aardgas afkomstig van Little (1996) en bij het gebruik van de gegevens uit de Ecolnvent databank (2007) scoren de brandstofcelvoertuigen beter dan de elektrische voertuigen die gebruik maken van elektriciteit van het Belgische elektriciteitsnet (2007). Ook hier wordt weer duidelijk dat er een significant verschil is tussen de gegevens van Spath *et al.* (2001) en de gegevens van Little (1996). Waaraan deze verschillen te wijten zijn kon niet achterhaald worden aangezien de exacte bronnen van Little niet vrijgegeven zijn.

Wanneer er gekeken wordt naar het gebruik van hernieuwbare elektriciteit zien we dat de elektrische voertuigen beter scoren dan de brandstofcelvoertuigen. Dit is vermoedelijk te wijten aan de omzetting die moet gebeuren in het geval van waterstof. Ten eerste moet elektriciteit omgezet worden in waterstof. Aangezien we hier gebruik maken van hernieuwbare elektriciteit, en er dus geen emissies in rekening worden gebracht, kan dit de Ecoscores niet beïnvloeden. Ten tweede is er de omzetting van waterstof naar elektriciteit. Hierbij gaat ten minste 20% van de aanwezige energie verloren. Deze omzetting zou het verschil in de Ecoscores kunnen verklaren.

Bij de interpretatie van de gegevens in figuur 5 op pagina 79 moet er rekening mee gehouden worden dat niet alle voertuigen hetzelfde gewicht en volume hebben. De BMW 7 Hydrogen en de Honda FCX Clarity zijn beide ruime berlines die gelijkaardige karakteristieken hebben. De Mercedes A F-Cell en de VW Golf zijn kleinere wagens maar zijn onderling ook vergelijkbaar. De Ford P2000 moet ergens tussen de twee types geplaatst worden.





**Figuur 5: Vergelijking waterstof uit Belgische elektriciteitsmix en uit hernieuwbare elektriciteit**

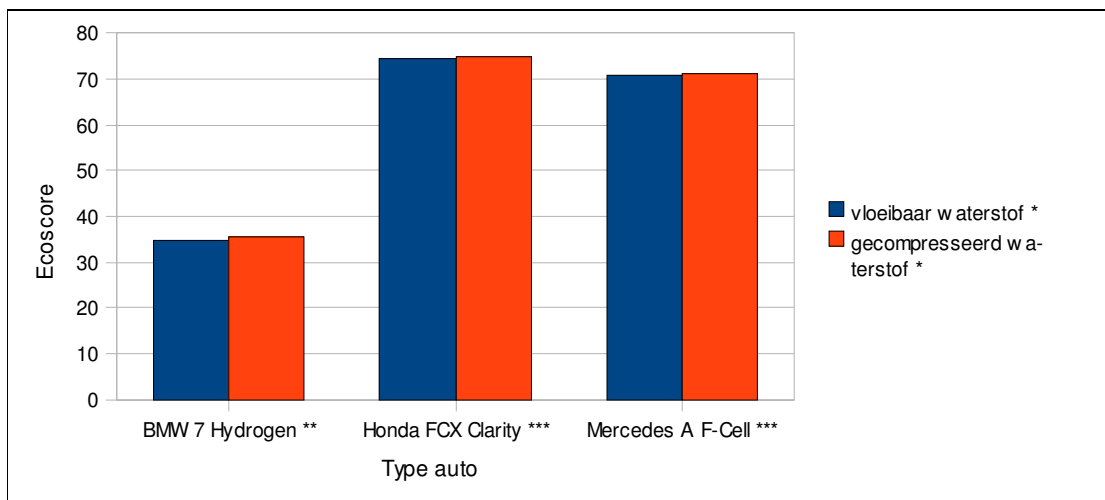
\*: Elektrische auto, gegevens afkomstig van [www.ecoscore.be](http://www.ecoscore.be) bijgewerkt met emissiegegevens van Electrabel, 2007

\*\* : Maakt gebruik van verbrandingsmotor op waterstof

\*\*\*: Maakt gebruik van brandstofcel op waterstof

### 11.1.3. Waterstof opslag en transport

Naast de productiemethode hebben natuurlijk ook de opslag- en transportmethode van waterstof een invloed op de Ecoscore. Bij het waterstoftransport met behulp van pijpleidingen werden geen emissies in rekening gebracht omdat exacte gegevens ontbreken en omdat dit slechts in zeer beperkte mate invloed zou hebben op de Ecoscores. Bij de opslagmethodes zou er wel een aanzienlijk verschil kunnen zijn aangezien het vloeibaar maken van waterstof veel meer energie vergt dan compressie. Om een duidelijk beeld te krijgen wordt voor de verschillende wagens steeds een pathway met compressie naast een pathway met vloeibaar waterstof geplaatst. Natuurlijk wordt hierbij wel steeds dezelfde waterstofproductiemethode gebruikt. Op die manier kan visueel worden nagegaan of dit grote verschillen in de Ecoscore met zich meebrengt. Dit is te zien in Figuur 6 op pagina 80.



**Figuur 6: Vergelijking vloeibaar en gecompresseerd waterstof**

\* Waterstof getransporteerd over een afstand van 300 km

\*\* Verbrandingsmotor

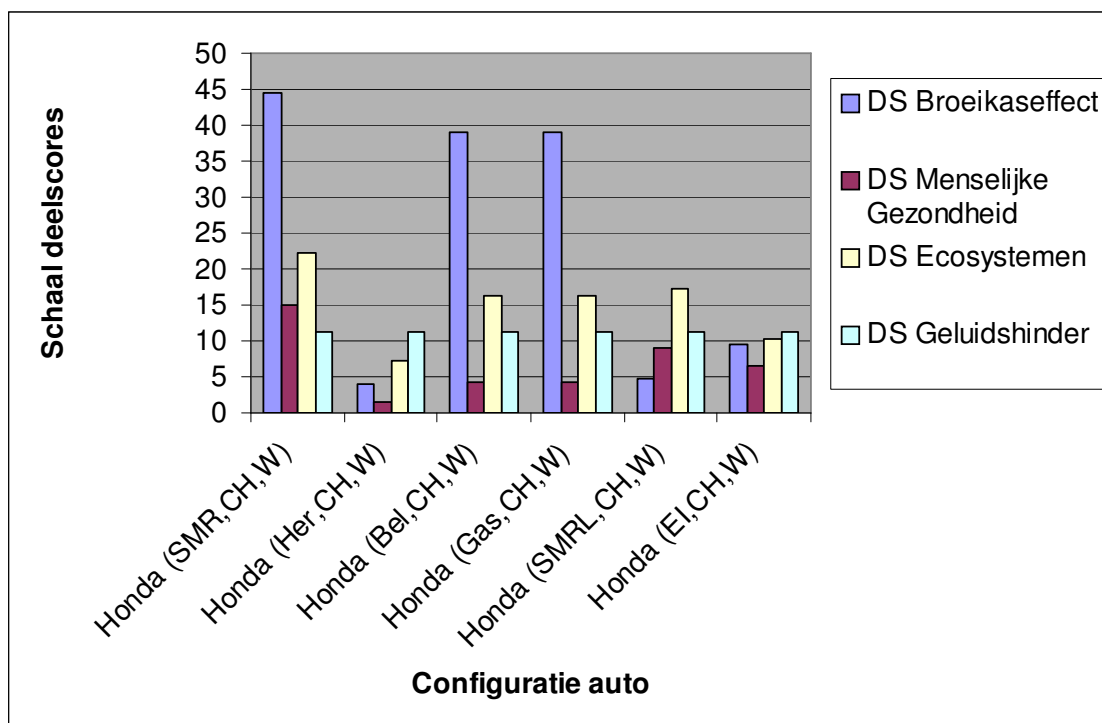
\*\*\* Brandstofcel

Uit Figuur 6 valt af te leiden dat de voertuigen die gebruik maken van gecompresseerd waterstof een iets hogere Ecoscore hebben dan de voertuigen die gebruik maken van vloeibaar waterstof. Vermoedelijk wordt dit effect versterkt indien er een kortere afstand over de weg wordt afgelegd. Bij gecompresseerd waterstof kan er immers maar een kleine hoeveelheid per vrachtwagen vervoerd worden. De emissies nemen dus sterk toe per afgelegde kilometer. Bij vloeibaar waterstof is het vooral het afkoelen van waterstof die veel energie vergt. Eenmaal dit gebeurd is, is er een veel kleinere extra emissie per afgelegde kilometer. Indien het transporttraject verlengd zou worden zou dit voordeel van gecompresseerd waterstof over vloeibaar waterstof afnemen. Omgekeerd zou een inkorting van het traject tot gevolg hebben dat dit voordeel wordt vergroot. Aangezien er enkel berekeningen gedaan werden bij transport over 300 km is het moeilijk in te schatten hoe groot deze impact exact is.

#### 11.1.4. Deelscores

Eén van de voordelen van Ecoscore is dat het kan opgedeeld worden in verschillende deelscores. De verschillende deelscores zijn broeikasemissie, luchtkwaliteit voor ecosystemen, luchtkwaliteit voor de menselijke gezondheid en

geluidshinder. Om een beeld te krijgen van de verhoudingen van deze deelscores ten opzichte van de uiteindelijke Ecoscore worden hier enkele pathways voorgesteld met hun respectievelijke deelscores. Er zal gekeken worden naar de deelscores van verschillende configuraties van de Honda FCX Clarity. Deze nadruk wordt gelegd omdat is gebleken dat de waterstofverbrandingsmotoren niet goed scoren op de Ecoscore-schaal en dus als niet ecologisch kunnen beschouwd worden. Deze beperking van focus wordt ook ingevoerd om het geheel een beetje overzichtelijk te houden.



**Figuur 7: Deelscores van verschillende configuraties**

SMR: Stoomomvorming van aardgas, gegevens uit Spath *et al.*, 2001  
 Her: Elektrolyse met elektriciteit uit hernieuwbare energie  
 Bel: Elektrolyse met elektriciteit van het Belgische net, Electrabel, 2008  
 Gas: Gasificatie van steenkool uit Little, 1996  
 SMRL: Stoomomvorming van aardgas, gegevens uit Little, 1996  
 EI: Waterstof uit fossiele brandstof, gegevens uit Ecoinvent databank, 2007  
 CH: Gecomprimeerd waterstof  
 W: Waterstoftransport over de weg

Figuur 7 laat duidelijk zien dat er grote verschillen zijn in de deelscores. Zoals verwacht is de deelscore van de geluidshinder bij de verschillende configuraties hetzelfde. De deelscore broeikasewffect vertoont de grootste fluctuaties. Vooral bij de stoomomvorming van aardgas met de gegevens van Spath *et al.* zien we dat de broeikasgassen voor een groot deel het resultaat van de Ecoscore bepalen. Aangezien de broeikasgassen instaan voor 50% van de Ecoscore is dit niet

verwonderlijk. Mogelijk kan met behulp van CCS deze invloedsfactor wel verkleind worden.

De deelscore die de luchtkwaliteit voor ecosystemen weergeeft vertoont ook relatief weinig fluctuaties. Enkel bij stoomomvorming volgens Spath *et al.* en bij het gebruik van hernieuwbare energie zien we uitschieters. Bij de deelscore luchtkwaliteit voor de menselijke gezondheid wordt een gelijkaardige trend waargenomen.

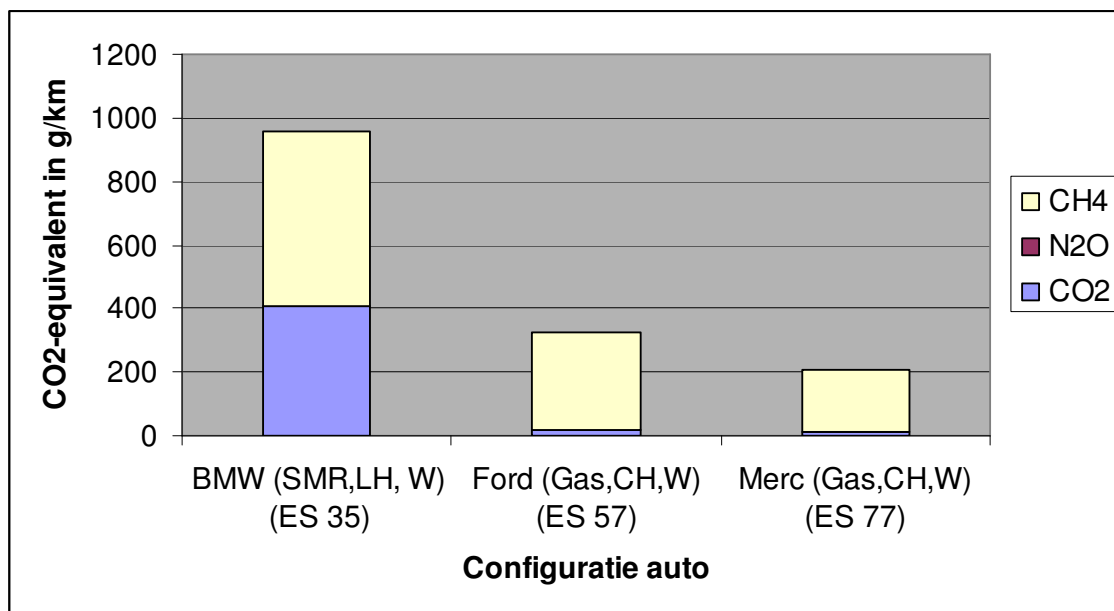
Om echt de totale milieu-impact te berekenen is het nodig om een totale levenscyclus analyse te doen. Hierbij zouden dan ook de grondstoffen, en de bijhorende emissies, die nodig zijn voor de bouw van de verwerkings- en productiecentra en de materialen die nodig zijn voor de assemblage van de auto en de brandstofcel mee in rekening worden gebracht. Het is niet de bedoeling van deze studie om zo een uitgebreide LCA te doen. We beperken ons tot de Ecoscore die wel de gehele brandstofcyclus mee in rekening brengt maar de bouw van de nodige installaties en voertuigen buiten beschouwing laat. Bij het opstellen van de Ecoscore werd immers geadviseerd dat de gebruiksfase van voertuigen veruit de grootste milieu-impact heeft in vergelijking met de productiefase. Toch zijn er enkele LCA studies bekend die er op wijzen dat bij de productie van brandstofcellen de productiefase wel een aanzienlijke impact veroorzaken in verhouding tot de impact gezien over de hele levenscyclus. Wat betreft het GWP en het gebruik van niet hernieuwbare grondstoffen is sprake van een uitstoot en gebruik die gelijk is aan één vierde van de uitstoot van de gebruiksfase. Op het vlak van acidificatie zou de productie van de brandstofcel evenveel schade veroorzaken dan de gebruiksfase (productie, transport en opslag waterstof) (Pehnt, 2001). Dit geldt wel enkel voor de eerste generatie van die brandstofcellen. Op termijn zou de recyclage van de brandstofcellen hier wel een oplossing kunnen bieden (Pehnt, 2001).

## **11.2. CO<sub>2</sub>-equivalent en Global Warming Potential**

Om een meer specifiek beeld te krijgen van de milieu-impact van de verschillende configuraties wordt er gekeken naar de specifieke impact op het vlak van broeikasgassen. CO<sub>2</sub>-equivalent of GWP is een geïntegreerde maat die het potentiële effect van bepaalde gassen op de opwarming van de aarde beschrijft. Om gemakkelijk vergelijkingen te kunnen maken tussen de verschillende broeikasgassen

wordt het resultaat doorgaans uitgedrukt in CO<sub>2</sub>-equivalent. De referentiewaarde is dus het effect van 1 gram CO<sub>2</sub>. Eén gram methaan (CH<sub>4</sub>) wordt doorgaans gelijk gesteld aan 23 gram CO<sub>2</sub>. Dit wil dus zeggen dat het effect van 1 gram methaan in de atmosfeer op de opwarming van de aarde 23 keer groter is dan het effect van 1 gram CO<sub>2</sub>. Ook N<sub>2</sub>O (lachgas) is een belangrijk broeikasgas. Voor de berekening van het totale CO<sub>2</sub>-equivalent wordt de invloed van lachgas gelijkgesteld aan 296 maal de invloed van CO<sub>2</sub>. Voor de berekening van het totale WTW CO<sub>2</sub>-equivalent worden de broeikasgasemissiewaarden van de verschillende pathways vermenigvuldigd met hun respectievelijke invloedsfactor en daarna opgeteld. Op die manier kunnen we dan de broeikasgasuitstoot van de verschillende voertuigen vergelijken op een CO<sub>2</sub>-equivalent per kilometerbasis.

Wanneer de Ecoscores en de CO<sub>2</sub>-equivalenten naast elkaar worden gelegd kan men zien dat er een omgekeerd verband bestaat. Pathways die een hoge Ecoscore hebben, hebben doorgaans een laag CO<sub>2</sub>-equivalent. Ook het omgekeerde is waar: configuraties met een lage Ecoscore hebben doorgaans een hoog CO<sub>2</sub>-equivalent. Om dit te verduidelijken worden in Figuur 8 enkele willekeurige voorbeelden gegeven.



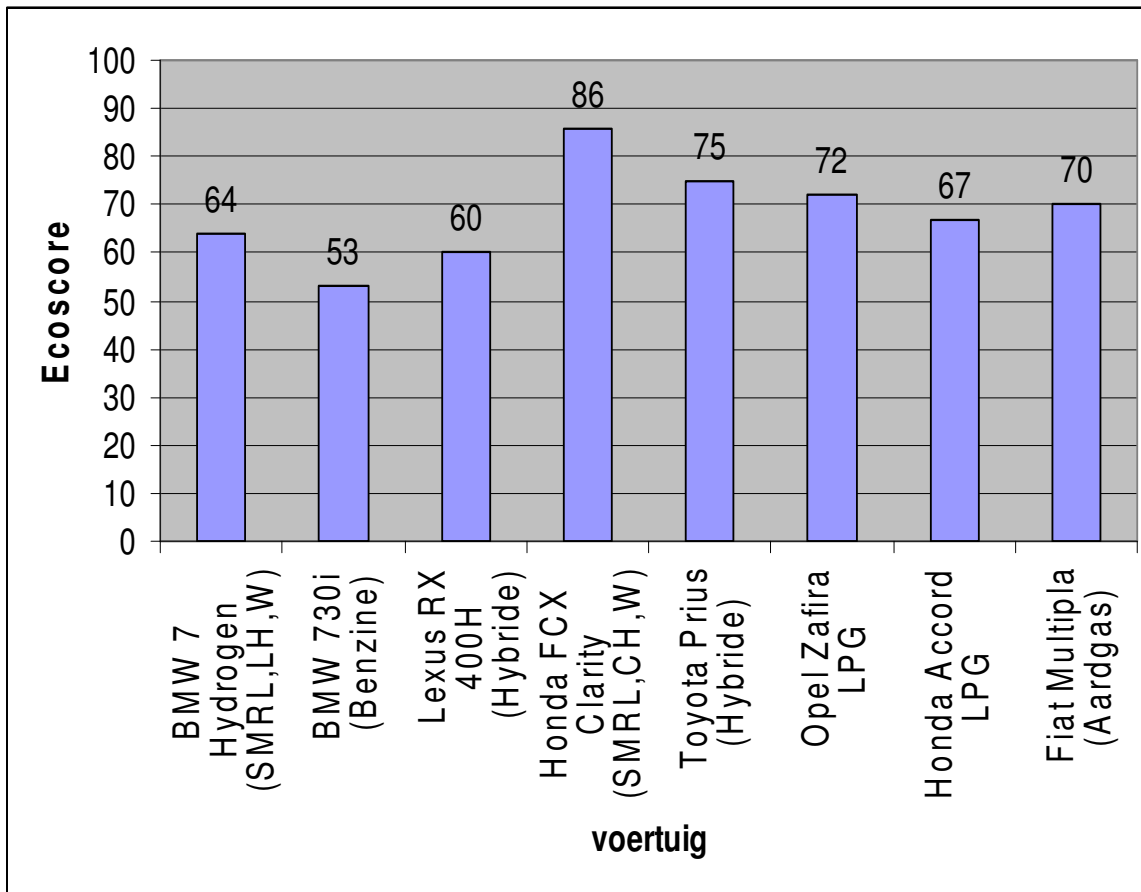
**Figuur 8: Well-to-Wheel CO<sub>2</sub>-equivalenten**

SMR: Stoomomvorming aardgas, gegevens uit Spath en Mann, 2001  
 GAS: Gasificatie van steenkool, gegevens uit Little, 1996  
 LH: Vloeibaar waterstof  
 CH: Gecomprimeerd waterstof  
 W: Waterstof getransporteerd over de weg  
 ES: Ecoscore

Uit afbeelding 8 kan ook afgeleid worden dat N<sub>2</sub>O slechts in zeer beperkte mate een rol speelt in het totale CO<sub>2</sub>-equivalent. Methaan (CH<sub>4</sub>) speelt daarentegen een heel grote rol. Als de gegevens aandachtig bestudeerd worden valt op dat configuraties die rechtstreeks gebruik maken van fossiele brandstoffen, dus niet via elektriciteit en elektrolyse, hoge CH<sub>4</sub>-waarden hebben. Vermoedelijk zou dit ook zo zijn bij elektrolyse met elektriciteit van het Belgische elektriciteitsnet maar zoals eerder vermeld worden daar de indirecte emissies niet in rekening gebracht. In tabel 12 op pagina 101 in de bijlagen is een overzicht te zien van al de verschillende configuraties en hun CO<sub>2</sub>-equivalent emissies.

### ***11.3. Vergelijking Ecoscore waterstof en andere brandstoffen***

Om het beeld van de voertuigen op waterstof te verduidelijken zal, in beperkte mate, een vergelijking gedaan worden tussen waterstofvoertuigen en voertuigen die gebruik maken van andere brandstoffen. Om het overzichtelijk te houden zal vooral gekeken worden naar voertuigen die qua gewicht en/of vermogen vergelijkbaar zijn met de BMW 7 Hydrogen (ICE) en de Honda FCX Clarity (FC). De gegevens die hier gebruikt worden zijn afkomstig van de website van Ecoscore (2008). Als standaardconfiguratie wordt bij de BMW gekozen voor stoomomvorming (Little, 1996) waarbij gebruik gemaakt wordt van vloeibaar waterstof dat met vrachtwagens wordt getransporteerd. De Ecoscore van deze configuratie bedraagt 64. In het geval van de Honda gaan we uit van dezelfde waterstofproductiemethode, maar hier wordt gecompresseerd waterstof gebruik dat eveneens over de weg wordt getransporteerd. In dit geval bedraagt de Ecoscore 86. Dit grote verschil is te wijten aan het grotere verbruik van de BMW, het gebruik van vloeibaar waterstof in de plaats van gecompresseerd waterstof en de extra emissies die vrijkomen bij het gebruik van waterstof in een verbrandingsmotor. Daarnaast dient hier ook opgemerkt te worden dat de gegevens van Little met betrekking tot stoomomvorming van aardgas gemiddeld zeer hoge Ecoscores oplevert. Een volledige lijst met alle configuraties en hun Ecoscore is terug te vinden in tabellen 10 en 11 op pagina's 99 en 100 in de bijlagen.



**Figuur 9: Vergelijking tussen auto's met verschillende brandstoffen**

SMRL: Stoomomvorming van aardgas, gegevens uit Little, 1996

LH: Vloeibaar waterstof

CH: Gecomprimeerd waterstof

W: Waterstoftransport over de weg

Gegevens afkomstig van [www.ecoscore.be](http://www.ecoscore.be) behalve BMW 7 Hydrogen en Honda FCX Clarity

De BMW 730i benzine heeft een Ecoscore van 53. Dit is dezelfde auto als de BMW 7 Hydrogen met een gelijkaardig vermogen van 258 pk (ten opzichte van 260 van de BMW 7 Hydrogen). De waterstofversie scoort hier dus beter dan de traditionele benzine verbrandingsmotor. Wanneer er gekeken wordt naar andere waterstofproductieprocessen zien we dat alleen de hernieuwbare energie en de gegevens van de Ecolnvent databank betere Ecoscores opleveren. In dit geval kan besloten worden dat het gebruik van waterstof in sommige gevallen te verkiezen is boven het gebruik van benzine. Er moet wel op gewezen worden dat deze wagen, ongeacht de gebruikte brandstof, een lage Ecoscore heeft. Deze is geheel te wijten aan het grote vermogen van de motor en het hoge gewicht van de wagen.

Wanneer de BMW 7 Hydrogen vergeleken wordt met een hybride van ongeveer dezelfde gewichtsklasse kan men zien dat de waterstofauto niet zo slecht

scoort. De Lexus RX 400H is een hybridewagen waarin een verbrandingsmotor op benzine gecombineerd wordt met een batterij. Hij heeft een vermogen van 211 pk en zijn Ecoscore bedraagt 60. Er kan geconcludeerd worden dat in dit segment van voertuigen met een dergelijk hoog vermogen geen enkele wagen een goede Ecoscore behaalt. De alternatieve aandrijfsystemen (hybride en waterstofverbrandingsmotor) doen het echter wel beter dan de traditionele benzineverbrandingsmotoren. Dit geldt echter niet voor alle manieren om waterstof te produceren.

De Honda FCX Clarity is een wagen met een brandstofcel op waterstof. Hij heeft een veel lager vermogen (100 kW of 134 pk ten opzichte van 260 pk bij de BMW 7 Hydrogen). Zijn Ecoscore bedraagt 86 bij een configuratie met stoomomvorming van aardgas (gegevens uit Little, 1996) dat over de weg werd getransporteerd in gecomprimeerde toestand. Dit is een zeer hoge score. Wanneer de andere waterstofproductieprocessen en de verschillende configuraties mee in rekening worden genomen kan vastgesteld worden dat hij steeds Ecoscores behaalt van meer dan 70. Dit is zeer uitzonderlijk voor een auto met een dergelijk vermogen. Enkel de hybride Toyota Prius met een vermogen van 78 pk en de Opel Zafira op LPG met een vermogen van 125 pk scoren met respectievelijk 75 en 72 ook hoger dan 70. Ook de Fiat Multipla 1.6 met een vermogen van 103 pk die gebruik maakt van aardgas behaalt een Ecoscore van 70. De Honda Accord 1.9 LPG, die exact hetzelfde vermogen en een gelijkaardig gewicht heeft, behaalt een Ecoscore van 67. Hier kan uit geconcludeerd worden dat voertuigen die gebruik maken van waterstof in een brandstofcel ecologisch minstens even aantrekkelijk zijn dan hun tegenhangers die gebruik maken van andere aandrijfsystemen. De batterijelektrische voertuigen scoren ook goed met een Ecoscore van respectievelijk 83 en 85 voor de Citroën Berlingo en de Volkswagen Golf maar hierbij dient dan nogmaals opgemerkt te worden dat de delving en het transport van de grondstof die gebruikt wordt voor de opwekking van de elektriciteit hier niet mee in rekening worden gebracht. In welke mate dit een invloed zou hebben op de Ecoscores moet nog verder onderzocht worden.

## 12. Besluit

De data die gebruikt werden om de Ecoscores voor de verschillende



configuraties te berekenen zijn afkomstig van verschillende bronnen en verschillen onderling nogal sterk. Zo geeft het gemiddelde van 17 waterstofproductiecentrales die gebruik maken van fossiele brandstoffen betere Ecoscores dan de beste score voor stoomomvorming van aardgas. Dit zijn rare resultaten aangezien doorgaans aangenomen wordt dat stoomomvorming de meest milieuvriendelijke wijze is om waterstof te produceren uit fossiele brandstoffen. Het is dus praktisch onmogelijk om algemeen geldende conclusies te trekken in verband met de waterstofproductieprocessen.

Wat de opslagvormen van waterstof betreft kunnen wel enkele conclusies getrokken worden. Gecomprimeerd waterstof vergt minder energie dan vloeibaar waterstof. Wanneer het waterstof over de weg wordt getransporteerd gaat dit voordeel deels verloren. Door de hogere dichtheid van vloeibaar waterstof is dit bij transport over grote afstanden voordeliger. De afstand van 300km toont nog een klein voordeel voor gecomprimeerd waterstof. Bij grotere afstanden zou dit voordeel kunnen ombuigen in een nadeel.

Wanneer de verschillende Ecoscores naast elkaar worden gelegd valt direct op dat de voertuigen met een brandstofcel opvallend beter scoren dan de voertuigen die gebruik maken van een verbrandingsmotor. Dit is te wijten aan de hogere efficiëntie van een brandstofcel ten opzichte van de verbrandingsmotor. Verder kan vastgesteld worden dat het gebruik van hernieuwbare energie om waterstof te produceren met voorsprong de meest milieuvriendelijke manier is om ons gemotoriseerd te verplaatsen met behulp van waterstof. Elektrische voertuigen die gebruik maken van batterijen scoren echter nog altijd een beetje beter dan de brandstofcelvoertuigen.

Verbrandingsmotoren die gebruik maken van waterstof zijn ecologisch minder aantrekkelijk. Toch scoren zij vaak even goed (afhankelijk van welk productieproces er gebruikt wordt voor waterstof) als hun tegenhangers op benzine. Algemene conclusies zijn moeilijk te trekken door de grote variatie in de gegevens die gebruikt werden.

Wat de invloed van de broeikasgassen betreft is het besluit redelijk eenduidig. De waterstofproductieprocessen waarbij veel koolstofdioxide vrijkomt, behalen doorgaans een lage Ecoscore. De andere broeikasgassen spelen een minder belangrijke rol in het tot stand komen van de Ecoscores.

Het is aangewezen om op verschillende vlakken verder onderzoek te verrichten. Onder andere de onverwachte resultaten van de verschillende productiemethoden zouden moeten verklaard worden. Veel gegevens zijn gedateerd en sommige verschillen zijn zo opvallend dat ze verder onderzocht moeten worden. Daarenboven zouden natuurlijk ook de verdere ontwikkelingen op de voet gevolgd moeten worden.

Verder moet er ook onderzocht worden wat de effectieve milieu-impact is van de productie van brandstofcellen. Bij het opstellen van de Ecoscore methodologie werd immers geargumenteed dat de milieu-impact van de productie van de motoren klein was in vergelijking tot de gehele levenscyclusemissies. Voor brandstofcellen zou dit wel eens niet zo kunnen zijn. Men maakt hierbij immers onder andere gebruik van zeldzame en moeilijk te delven grondstoffen.

## 13. Referenties

Altman, M., Schmidt, P., Wurster, R., Zerta, M., Zittel, W. *“Potential for hydrogen as a Fuel for transport in the Long Term (2020-2030)- Full Background Report”*, IPTS, EUR 21090 EN, March 2004, <ftp://ftp.jrc.es/pub/EURdoceur21090en.pdf>

Appleby, A. John. *“Fuel Cell Handbook”*. New York: Van Reinhold Co., 1989

Autoweek, 2006. Elektronisch beschikbaar op <http://www.autoweek.nl/newsdisp.php?cache=no&ID=5574> Laatst geconsulteerd op 15/7/2008

Ballard, 2008. Ballard Power Systems. Website beschikbaar op [www.ballard.com](http://www.ballard.com) Laatst geconsulteerd op 20/5/2008.

Becker, Laura., 2001. *“Hydrogen Storage”*. Overview artikel. Elektronisch beschikbaar op [www.csa.com/discoveryguides/hydrogen/overview.php](http://www.csa.com/discoveryguides/hydrogen/overview.php) Laatst geconsulteerd op 15/4/2008

Brown, L.C., Besenbruch, G.E., Lentsch, R.D., Schultz, K.R., Funk, J.F., Pickard, P.S., Marshall, A.C. And Showalter, S.K. 2003. *“High Efficiency Generation of Hydrogen Fuels Using Nuclear Power”*. Final technical report for the period august1, 1999 through September 30, 2002. Produced by General Atomics for Nuclear Energy Research Initiative (NERI) Program under the U.S. Department of Energy

Colela, W.G., Jacobson, M.Z., Golden, D.M., 2005. *“Switching to a U.S. hydrogen fuel cell vehicle fleet: The resultant change in emissions, energy use, and greenhouse gases”*, Journal of Power Sources 150 (2005) 150–181

Damen, Kay., van Troost, Martijn., Faaij, André., Turkenburg, Wim. 2007. *“A Comparison of Electricity and Hydrogen Production Systems with CO<sub>2</sub> Capture and Storage – Part B: Chain Analysis of Promising CCS Options”*, Progress in Energy

and Combustion Science 33 (2007) 580–609

Ecoinvent, 2007. Ecoinvent databank, versie 2.0, 2007. Informatie elektronisch beschikbaar op [www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch).

Ecoscore, 2008. Website Ecoscore elektronisch beschikbaar op [www.ecoscore.be](http://www.ecoscore.be)  
Laatst geconsulteerd op 10/6/2008.

EG&G Services, 2000. *Fuel Cell Handbook*. Parsons, Inc. Science Applications International Corporation. U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, Morgan, West Virginia

Eichert, H and Fischer, M., 1984, *Hydrogen Safety in Energy Application Compared with Natural Gas*, in *Hydrogen Energy Progress V*, Pergamon Press, Elmsford, NY, p. 1869

Electrabel, 2008. Persoonlijke communicatie met Gwen Huyghe van Electrabel op 2 april, 2008.

European Commission, 2007. *Directorates Generale: Energy and Transport*, Elektronisch beschikbaar op [http://ec.europa.eu/energy/index\\_en.html](http://ec.europa.eu/energy/index_en.html)

Europese Commissie, 2007. *Informatieblad Energiemix* verstrekt door de Europese Unie. Elektronisch beschikbaar op: [http://ec.europa.eu/energy/energy\\_policy/doc/factsheets/country/be/be\\_nl/mix\\_be\\_nl.pdf](http://ec.europa.eu/energy/energy_policy/doc/factsheets/country/be/be_nl/mix_be_nl.pdf). Laatst geconsulteerd op 16/4/2008

Ewan, B.C.R, Allen, R.W.K., 2005. *A Figure of Merit Assessment of the Routes to Hydrogen*, International Journal of Hydrogen Energy 30, 809-819

Fingersh, L.J., 2003. *Optimized hydrogen and electricity generation from wind*. National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-500-34364

Futuregen, 2008. <http://www.futuregenalliance.org/>. Laatst geconsulteerd op [20/3/2008](http://www.futuregenalliance.org/)

Ghirardi, Maria and Seibert, Michael, s.d.. *“Algal Hydrogen Photoproduction”*, NREL; New horizons for Hydrogen, NREL

GEMIS: Global Emission Model for Integrated Systems (GEMIS) database, 2002. Sko-Institut, Gesamthochschule Kasse, September

GM, LBST, bp, ExxonMobil, Shell, TotalFinaElf., 2002. *“Well-to-Wheel Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems - A European Study”*. Elektronisch beschikbaar op: [http://www.lbst.de/index\\_\\_e.html](http://www.lbst.de/index__e.html)[http://www.lbst.de/publications/studies\\_\\_e/2002gmw\\_tw\\_\\_e.html](http://www.lbst.de/publications/studies__e/2002gmw_tw__e.html)

Granovskii, Mikhail., Dincer, Ibrahim., Rosen, Marc A., 2005. *“Environmental and economic aspects of hydrogen production and utilization in fuel cell vehicles”* Journal of Power Sources 157 (2006) 411–421

Granovskii, Mikhail., Dincer, Ibrahim., Rosen, Marc A., 2006. *“Life cycle assessment of hydrogen fuel cell and gasoline vehicles”*, International Journal of Hydrogen Energy 31 (2006) 337 – 352

Granovskii, Mikhail., Dincer, Ibrahim., Rosen, Marc A., 2007. *“Exergetic life cycle assessment of hydrogen production from renewables”*, Journal of Power Sources 167 (2007) 461–471

Gray, D., Tomlinson, G. 2001. *“Hydrogen from Coal”* Mitretek Technical Paper, Mitretek Systems in opdracht van U.S. Department of Energy: National Energy Technology Laboratory

Green Car Congress, 2004. *“10 000 Hythane Buses for Beijing”*, Elektronisch beschikbaar op [http://www.greencarcongress.com/2004/10/10000\\_hythane\\_b.html](http://www.greencarcongress.com/2004/10/10000_hythane_b.html) . Laatst geconsulteerd op 15/5/2008.

Greenfuel online, 2008. [www.greenfuelonline.com/](http://www.greenfuelonline.com/) Laatst geconsulteerd op 5/2/2008

High Level Group, 2003. *“Hydrogen Energy and Fuel Cells: A Vision of our Future”*, Final report of the High Level Group of the European Commission. Elektronisch beschikbaar op [http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/hlg\\_vision\\_report\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/hlg_vision_report_en.pdf). Laatst geconsulteerd op 10/3/2008.

Hoffmann, Peter. *“Tomorrow's Energy: Hydrogen, Fuel Cells, and the Prospect for a Cleaner Planet”*. Cambridge, MA: MIT Press, 2001.

Honda website <http://automobiles.honda.com/fcx-clarity/> Laatst geconsulteerd op 25/5/2008

Hussain, M. M., Dincer, I. 2007. "A Preliminary Life Cycle Assessment of PEM Fuel Cell Powered Automobiles", Applied Thermal Engineering 27 (2007) 2294–2299

IEA (International Energy Agency), 2006. "Hydrogen Production and Storage: R&D Priorities and Gaps", Hydrogen Co-ordination Group

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2005. "Carbon Dioxide Capture and Storage", Special Reports of IPCC. Elektronische beschikbaar op <http://www.ipcc.ch/ipccreports/srccs.htm>

Khaselev, O.. Turner, J.A. "A Monolithic Photovoltaic-Photoelectrochemical Device for Hydrogen Production via Water Splitting." Science; Vol. 280, april 17, 1998; pp. 425–427

Knoef, Harrie. s. d.. "Biomassa Vergassing: Stand van Zaken", Biomass Technologie Group. Beschikbaar op <http://www.btgworld.com/>

Koroneos, C., Dompros, A., Roumbas, G., Moussiopoulos, N.. 2004. "Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes", International Journal of Hydrogen Energy 29 (2004) 1443 – 1450

Little, A.D., "Energy efficiency and emissions of transportation fuel chain", Phase 1 technical report to Ford company, 1996. In: Martens, A., Germain, A. et. al, "Development of tools to evaluate the potential of sustainable hydrogen in Belgium", Belgian science policy, pp. 106-107, 2006.

Machinedesign, 2003. Elektronisch beschikbaar op <http://machinedesign.com/ContentItem/63028/ACloserLookatHydrogen.aspx> Laatst geconsulteerd op 15/7/2008

MacLean, Heather L., Lave, Lester B.. 2002. "Evaluating automobile fuel/propulsion

*system technologies*”, Progress in Energy and Combustion Science 29 (2003) 1–69

Milne, T.A., Elam, C.C., Evans, R.J. “*Hydrogen from Biomass: State of the Art and Research Challenges.*” IEA/H2/TR-02/001. International Energy Agency, 2001

National Energy Technology Laboratory, 2007. “*Hydrogen from Coal Program: Research, Development, and Demonstration Plan*” U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy (schema H2 productie uit steenkool, verhoudingen samenstelling syngas)

National Petroleum Council, 2007. *Electric Generation Efficiency: Working Document of the NPC Global Oil & Gas Study*“ Power Generation Efficiency Subgroup of the Demand Task Group of the NPC Committee on Global Oil and Gas

NREL, National Renewable Energy Laboratory, 2004. “*New horizons for Hydrogen*”, elektronisch beschikbaar op [http://www.nrel.gov/research\\_review/pdfs/2003/36178b.pdf](http://www.nrel.gov/research_review/pdfs/2003/36178b.pdf) Laatst geconsulteerd op 4/5/2008.

NRC, 2004. National Research Council. Elektronisch beschikbaar op <http://sites.nationalacademies.org/nrc/index.htm> Laatst geconsulteerd op 20/4/2008

Norbeck, Joseph M., Heffel, James W., Durbin, Thomas D., Tabbara, Bassam, Bowden, John M. and Montana, Michelle C., 1996, “*Hydrogen Fuel for Surface Transportation*” Society of Automotive Engineers, Inc. Warrendale, PA, USA. ISBN 1-56091-684-2

Nuclear Energy Agency (NEA), part of the Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), 2000 ‘*Nuclear Energy in a Sustainable Development Perspective*’ OECD Publications. Paris, France.

Ogden, Joan m., Steinbugler, Margaret M., Kreutz, Thomas G., 1998. “*A Comparison of Hydrogen, Methanol and Gasoline as Fuels for Fuel Cell Vehicles: Implications for Vehicle Design and Infrastructure Development*”, Journal of Power

Sources 791999.143–168. Center for Energy and Environmental Studies, Olden ST., P.O. Box CN 5236, Princeton University, Princeton, NJ 08544-5263, USA

Pehnt, Martin. 2001. “*Life-cycle assessment of fuel cell stacks*”, International Journal of Hydrogen Energy 26 (2001) 91-101

Pukrushpan, Jay T., Stefanpoulou, Anne G., Varigonda, Dubbaro, Pedersen, Lars M., Ghosh, Shubro and Peng Huei. 2003 “*Control of Natural Gas Catalytic Partial Oxidation for Hydrogen Generation in Fuel Cell Applications*”, IEEE transaction on control system technology, vol. XX, No. Y, 2003

Ramage, Michael P. *et al.* National Research Council and National Academy of Engineering of the national academies, 2004, “*The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers and R&D Needs*” The National Academy Press, Washington, D.C. ISBN: 0-309-09163-2

Rifkin, Jeremy. 2002, “*De Waterstofeconomie: Schone en Duurzame energie voor iedereen*”, Vertaald uit het Engels in 2004. Originele titel: “*The Hydrogen Economy: The Creation of the World-Wide Energy Web and the Redistribution of Power on Earth*”, Lemniscaat b.v., Rotterdam

RBACAS. Royal Belgian Academy Council of Applied Science, 2006. “*Hydrogen as an energy carrier*”.

Schultz, Ken. 2003. ‘*Thermochemical Production of Hydrogen from solar and Nuclear Energy*’. Presentation to the Stanford Global Climate and Energy Project. General Atomics, San Diego, CA

Smithsonian Institution, 2004. “*Fuel Cells Origins: 1840-1890*”. Elektronisch beschikbaar op: <http://americanhistory.si.edu/fuelcells/origins/origins.htm>. Laatst geconsulteerd op 5/4/2008

Sørensen, Bent, 2005, “*Hydrogen and Fuel Cells*” Elsevier Academic Press. London, UK. ISBN: 0-12-655281



Spath, Pamela L., Mann, Margaret K. 2001. *“Life Cycle Assessment of Hydrogen Production via Natural Gas Steam Reforming”*, National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy Laboratory. NREL/TP-570-27637. Golden, Colorado

Spath, P.L., Mann, M.K., 2004. *“Life Cycle Assessment of Renewable Hydrogen Production via Wind/Electrolysis”*, Report No. NREL/MP-560-35404, National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy, 2004.

Srinivasa Murthy, S. s. d.. *“Hydrogen storage for mobile and stationary applications”*, Refrigeration and Air-conditioning Laboratory. Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, Madras. Chennai – 600036

Steinberg, M., 1983. *“An Analysis of Concepts for Controlling Atmospheric Carbon Dioxide”*, DOE/CH/00016-1 TR007 U.S. Dept. Of Energy, Carbon Dioxide Research Division, Washington, D.C.

Szwabowski, Steven J., Hashemi, Siamak., Stockhausen, William F., Natkin, Robert J., Reams, Lowell., Kabat, Daniel M., Potts, Curtis. 2002. *“Ford Hydrogen Engine Powered P2000 Vehicle”*, SAE Technical Paper Series, Ford Motor Co., SAE 2002 World Congress, Detroit, Michigan.

The Columbia Encyclopedia, 2001. *“Hydrogen”*. Columbia University Press, Columbia, zesde editie

Timmermans J.M., Van Mierlo J., *“Taak 1: Eenduidige methode voor de bepaling van de Ecoscore van voertuigen”*, 2005

Timmermans, Van Mierlo, J., J., Matheys, J., Lataire, P., 2006. *“Environmental rating of vehicles with different alternative fuels and drive trains: a univocal and applicable methodology”*, EJTI, 6, no. 4 (2006), pp. 313-334

Turner, J. in National Research Council and National Academy of Engineering of the national academies, 2004, *“The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers*

and R&D Needs” The National Academy Press, Washington, D.C. ISBN: 0-309-09163-2

Turner, John A., 2004. “*Sustainable Hydrogen Production*”. Science, 13 august 2004. Vol.305 (System efficiencies of commercial electrolyzers range from 60 to 73%, so one argument often used to discount electrolysis is its perceived low efficiency p3;

USDEEERE, 2008. United States Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy. [http://www.fueleconomy.gov/feg/fcv\\_sbs.shtm](http://www.fueleconomy.gov/feg/fcv_sbs.shtm)

Laatst geconsulteerd op 15/7/2008

Utgikar, V., Thiesen, T. 2006. “*Life cycle assessment of high temperature electrolysis for hydrogen production via nuclear energy*”. International Journal of Hydrogen Energy 31 (2006) 939 – 944,

Van Mierlo, J., Timmermans, J., Maggetto, G., Van Den Bossche, P., Meyer, S., Hecq, W., Govaerts, L., Verlaak, J. 2004. “*Environmental rating of vehicles with different alternative fuels and drive trains: a comparison of two approaches*” Transportation Research Part D 9 (2004) 387–399

Walters, L., Wade, D. and Lewis, D., 2002. “*Transition to a Nuclear/Hydrogen Energy System*”. Annual Symposium of the World Nuclear Association, 2002.

Wang, Guihua., Ogden, Joan M. and Nicholas, Michael A. 2007. “*Lifecycle impacts of natural gas to hydrogen pathways on urban air quality*”, International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007) 2731 – 2742

Wu, Ying., 2003. “*Hydrogen Storage via Sodium Borohydride*”, Stanford University, 2003)

Yang, Christopher., Ogden, Joan., 2006. “*Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode*”, International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007) 268 L – 286

Young, R. C., Chao, B., Myasnikov, V., Huang, B., Ovshinsky, S. R., 2004. “*A Hydrogen ICE Vehicle Powered by Ovonic Metal Hydride Storage*”, Texaco Ovonic

Hydrogen Systems, SAE International.

Yürüm, Yuda, 1995, "*Hydrogen Energy Systems: Production and Utilization of Hydrogen and Future Aspects*" Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands. ISBN: 0-7923-3601-1

Zamel, Nada., Li, Xianguo. 2005. "*Life cycle analysis of vehicles powered by a fuel cell and*", *Journal of Power Sources* 155 (2006) 297–310

Züttel, Andreas. 2004. "*Hydrogen Storage Methods*", *Naturwissenschaften* (2004) 91:157–172

## 14. Bijlagen

*Tabel 9: Gecontacteerde bedrijven, organisaties en personen*

Air Liquide Benelux: Geen reactie
Air Products: Pim Meyboom
Argonne National Laboratory: Angela Y. Hardin
BMW Benelux: Luc Haelterman
CB&I: Geen reactie
Energieonderzoek Centrum Nederland: Annelies Jansen
Haldor Topsoe: Sandra Winter Madsen
Hydrogenics: Geen reactie
Linde Gas: Hoofdkantoor Niel
Mahler AGS: Geen reactie
NATCO: Geen reactie
National Energy Technology Laboratory: Daniel Cicero and Bryan Morreale
Nederlandse Waterstofvereniging: Sytze B. van der Molen
Shell: Pascale Bicque
Technip: Geen reactie
VITO: Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek: Gilbert Van Bogaert
VSWB: Vlaams Samenwerkingsverband Waterstof en Brandstofcellen: Adwin Martens en Gilbert Van Bogaert

Tabel 10: Alle berekende configuraties met de bijhorende emissies

Auto	Benaming	Waterstofproductie	Transport	Opslag	CO <sub>2</sub>			N <sub>2</sub> O			CH <sub>4</sub>		
					WTT	TTW	WTW	WTT	TTW	WTW	WTT	TTW	WTW
<b>BMW 7 Hydrogen (ICE)</b>	BMW (SMR,LH, W)	SMR	Weg	Cryogeen	404,9706	0	404,97	0,0017	0	0,001654	1,8672	0	1,8672
<b>BMW 7 Hydrogen (ICE)</b>	BMW (Her,LH,W)	Hernieuwbare elektriciteit	Weg	Cryogeen	74,9334	0	74,93	0,0005	0	0,000496	0,0014	0	0,0014
<b>BMW 7 Hydrogen (ICE)</b>	BMW (Bel, LH,W)	Belgische elektriciteitsmix	Weg	Cryogeen	398,2149	0	398,21	0,0027	0	0,002700	0,0069	0	0,0069
<b>BMW 7 Hydrogen (ICE)</b>	BMW (Gas,LH,W)	Gasificatie van steenkool	Weg	Cryogeen	75,5011	0	75,50	0,0005	0	0,000496	1,9044	0	1,9044
<b>BMW 7 Hydrogen (ICE)</b>	BMW (SMR,CH,W)	SMR	Weg	Gecomprimeerd	365,9267	0	365,93	0,0013	0	0,001282	1,8673	0	1,8673
<b>BMW 7 Hydrogen (ICE)</b>	BMW (SMR,CH,P)	SMR	Pijpleiding	Gecomprimeerd	348,3673	0	348,37	0,0013	0	0,001282	1,8661	0	1,8661
<b>BMW 7 Hydrogen (ICE)</b>	BMW (SMRL,LH,W)	SMRL	Weg	Cryogeen	75,2075	0	75,21	0,0005	0	0,000496	0,3603	0	0,3603
<b>BMW 7 Hydrogen (ICE)</b>	BMW (SMRL,CH,W)	SMRL	Weg	Gecomprimeerd	36,1636	0	36,16	0,0001	0	0,000125	0,3604	0	0,3604
<b>BMW 7 Hydrogen (ICE)</b>	BMW (EI,LH,W)	EI	Weg	Cryogeen	113,2940	0	113,29	0,0005	0	0,000496	0,5443	0	0,5443
<b>Ford P2000 (ICE)</b>	Ford (SMR,CH,W)	SMR	Weg	Gecomprimeerd	198,2103	0,89	199,08	0,0007	0	0,000695	1,0114	0	1,0114
<b>Ford P2000 (ICE)</b>	Ford (Her,CH,W)	Hernieuwbare elektriciteit	Weg	Gecomprimeerd	19,4401	0,89	20,31	0,0001	0	0,000068	0,0008	0	0,0008
<b>Ford P2000 (ICE)</b>	Ford (Bel,CH,W)	Belgische elektriciteitsmix	Weg	Gecomprimeerd	194,5510	0,89	195,42	0,0013	0	0,001300	0,0038	0	0,0038
<b>Ford P2000 (ICE)</b>	Ford (Gas,CH,W)	Gasificatie van steenkool	Weg	Gecomprimeerd	19,7477	0,89	20,62	0,0001	0	0,000068	1,0316	0	1,0316
<b>Ford P2000 (ICE)</b>	Ford (SMR,CH,P)	SMR	Pijpleiding	Gecomprimeerd	188,6990	0,89	189,57	0,0007	0	0,000695	1,0108	0	1,0108
<b>Ford P2000 (ICE)</b>	Ford (SMRL,CH,W)	SMRL	Weg	Gecomprimeerd	19,5886	0,89	20,46	0,0001	0	0,000068	0,1952	0	0,1952
<b>Ford P2000 (ICE)</b>	Ford (SMRL,CH,P)	SMRL	Weg	Gecomprimeerd	10,0773	0,89	10,95	0,0001	0	0,000068	0,1946	0	0,1946
<b>Ford P2000 (ICE)</b>	Ford (EI,CH,W)	EI	Weg	Gecomprimeerd	40,2188	0,89	41,09	0,0001	0	0,000068	0,2949	0	0,2949
<b>Honda FCX Clarity (FC)</b>	Honda (SMR,CH,W)	SMR	Weg	Gecomprimeerd	109,0743	0	109,07	0,0004	0	0,000382	0,5566	0	0,5566
<b>Honda FCX Clarity (FC)</b>	Honda (Her,CH,W)	Hernieuwbare elektriciteit	Weg	Gecomprimeerd	10,6978	0	10,70	0,0000	0	0,000037	0,0005	0	0,0005
<b>Honda FCX Clarity (FC)</b>	Honda (Bel,CH,W)	Belgische elektriciteitsmix	Weg	Gecomprimeerd	107,0606	0	107,06	0,0007	0	0,000700	0,0021	0	0,0021
<b>Honda FCX Clarity (FC)</b>	Honda (SMR,CH,P)	SMR	Pijpleiding	Gecomprimeerd	103,8403	0	103,84	0,0004	0	0,000382	0,5562	0	0,5562
<b>Honda FCX Clarity (FC)</b>	Honda (Gas,CH,W)	Gasificatie van steenkool	Weg	Gecomprimeerd	107,0606	0	107,06	0,0007	0	0,000700	0,0021	0	0,0021
<b>Honda FCX Clarity (FC)</b>	Honda (SMR,LH,W)	SMR	Weg	Cryogeen	120,7124	0	120,71	0,0005	0	0,000500	0,5566	0	0,5566
<b>Honda FCX Clarity (FC)</b>	Honda(SMRL,CH,W)	SMRL	Weg	Gecomprimeerd	10,7795	0	10,78	0,0000	0	0,000037	0,1074	0	0,1074
<b>Honda FCX Clarity (FC)</b>	Honda (SMRL,CH,P)	SMRL	Pijpleiding	Gecomprimeerd	5,5455	0	5,55	0,0000	0	0,000037	0,1071	0	0,1071
<b>Honda FCX Clarity (FC)</b>	Honda (EI,CH,W)	EI	Weg	Gecomprimeerd	22,1322	0	22,13	0,0000	0	0,000037	0,1623	0	0,1623
<b>Mercedes A F-Cell (FC)</b>	Merc (SMR,CH,W)	SMR	Weg	Gecomprimeerd	126,6669	0	126,67	0,0004	0	0,000444	0,6464	0	0,6464
<b>Mercedes A F-Cell (FC)</b>	Merc (SMR,CH,P)	SMR	Pijpleiding	Gecomprimeerd	120,5887	0	120,59	0,0004	0	0,000444	0,6459	0	0,6459
<b>Mercedes A F-Cell (FC)</b>	Merc (SMR,LH,W)	SMR	Weg	Cryogeen	140,1821	0	140,18	0,0006	0	0,000572	0,6463	0	0,6463
<b>Mercedes A F-Cell (FC)</b>	Merc (Her,CH,W)	Hernieuwbare elektriciteit	Weg	Gecomprimeerd	12,4233	0	12,42	0,0000	0	0,000043	0,0005	0	0,0005
<b>Mercedes A F-Cell (FC)</b>	Merc (Bel,CH,W)	Belgische elektriciteitsmix	Weg	Gecomprimeerd	124,3284	0	124,33	0,0008	0	0,000800	0,0025	0	0,0025
<b>Mercedes A F-Cell (FC)</b>	Merc (Gas,CH,W)	Gasificatie van steenkool	Weg	Gecomprimeerd	12,6198	0	12,62	0,0000	0	0,000043	0,6593	0	0,6593
<b>Mercedes A F-Cell (FC)</b>	Merc (SMRL,CH,W)	SMRL	Weg	Gecomprimeerd	12,5182	0	12,52	0,0000	0	0,000043	0,1248	0	0,1248
<b>Mercedes A F-Cell (FC)</b>	Merc (SMRL,CH,P)	SMRL	Pijpleiding	Gecomprimeerd	6,4399	0	6,44	0,0000	0	0,000043	0,1243	0	0,1243
<b>Mercedes A F-Cell (FC)</b>	Merc (EI,CH,W)	EI	Weg	Gecomprimeerd	25,7019	0	25,70	0,0000	0	0,000043	0,1885	0	0,1885
<b>Berlingo elektrisch</b>	Citroën Berl Elek	Belgische elektriciteitsmix			58,2840	0	58,28	0,0004	0	0,000400	0,0010	0	0,0010
<b>Berlingo Hernieuw</b>	Citroën Berl Her	Hernieuwbare elektriciteit			0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Golf Elektrisch</b>	VW Golf Elek	Belgische elektriciteitsmix			69,9408	0	69,94	0,0005	0	0,000500	0,0012	0	0,0012
<b>Golf Hernieuw</b>	VW Golf Her	Hernieuwbare elektriciteit			0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabel 11: Alle berekende configuraties met de bijhorende emissies (vervolg)

Auto	KWS			CO			PM10			NO <sub>x</sub>			SO <sub>2</sub>			Geluid	Ecoscore
	WTT	TTW	WTW	WTT	TTW	WTW	WTT	TTW	WTW	WTT	TTW	WTW	WTT	TTW	WTW		
BMW 7 Hydrogen (ICE)	0,5202	0	0,5202	0,1927	0,01860	0,2113	0,0240	0	0,0240	0,4792	0,04970	0,5289	0,3295	0	0,3295	74	34,9
BMW 7 Hydrogen (ICE)	0,0050	0	0,0050	0,0185	0,01860	0,0371	0,0019	0	0,0019	0,1023	0,04970	0,1520	0,0731	0	0,0731	74	79,7
BMW 7 Hydrogen (ICE)	0,0104	0	0,0104	0,0459	0,01860	0,0645	0,0094	0	0,0094	0,4270	0,04970	0,4767	0,0731	0	0,0731	74	45,5
BMW 7 Hydrogen (ICE)	0,0237	0	0,0237	0,0711	0,01860	0,0897	0,0608	0	0,0608	0,4584	0,04970	0,5081	0,4138	0	0,4138	74	49,0
BMW 7 Hydrogen (ICE)	0,5457	0	0,5457	0,2741	0,01860	0,2927	0,0239	0	0,0239	0,6293	0,04970	0,6790	0,2748	0	0,2748	74	35,5
BMW 7 Hydrogen (ICE)	0,5156	0	0,5156	0,1758	0,01860	0,1944	0,0226	0	0,0226	0,3953	0,04970	0,4450	0,2748	0	0,2748	74	39,7
BMW 7 Hydrogen (ICE)	0,0846	0	0,0846	0,0937	0,01860	0,1123	0,0218	0	0,0218	0,4141	0,04970	0,4638	0,1561	0	0,1561	74	64,0
BMW 7 Hydrogen (ICE)	0,1100	0	0,1100	0,1751	0,01860	0,1937	0,0217	0	0,0217	0,5642	0,04970	0,6139	0,1014	0	0,1014	74	65,0
BMW 7 Hydrogen (ICE)	0,0674	0	0,0674	0,0950	0,01860	0,1136	0,0165	0	0,0165	0,1681	0,04970	0,2178	0,1389	0	0,1389	74	67,8
Ford P2000 (ICE)	0,2956	0,0047	0,3003	0,1485	0,00520	0,1537	0,0129	0	0,0129	0,3409	0,45980	0,8007	0,1489	0	0,1489	74	47,8
Ford P2000 (ICE)	0,0165	0,0047	0,0212	0,0541	0,0052	0,0593	0,0009	0	0,0009	0,1367	0,4598	0,5965	0,0100	0	0,0100	74	74,7
Ford P2000 (ICE)	0,0194	0,0047	0,0241	0,0689	0,0052	0,0741	0,0050	0	0,0050	0,3126	0,4598	0,7724	0,0100	0	0,0100	74	55,1
Ford P2000 (ICE)	0,0266	0,0047	0,0313	0,0826	0,0052	0,0878	0,0329	0	0,0329	0,3296	0,4598	0,7894	0,1945	0	0,1945	74	57,3
Ford P2000 (ICE)	0,2793	0,0047	0,2840	0,0952	0,0052	0,1004	0,0122	0	0,0122	0,2141	0,4598	0,6739	0,1489	0	0,1489	74	50,8
Ford P2000 (ICE)	0,0596	0,0047	0,0643	0,0949	0,0052	0,1001	0,0117	0	0,0117	0,3056	0,4598	0,7654	0,0549	0	0,0549	74	66,3
Ford P2000 (ICE)	0,0433	0,0047	0,0480	0,0416	0,0052	0,0468	0,0110	0	0,0110	0,1789	0,4598	0,6387	0,0549	0	0,0549	74	70,5
Ford P2000 (ICE)	0,0503	0,0047	0,0550	0,0955	0,0052	0,1007	0,0089	0	0,0089	0,1723	0,4598	0,6321	0,0456	0	0,0456	74	68,4
Honda FCX Clarity (FC)	0,1627	0	0,1627	0,0817	0	0,0817	0,0071	0	0,0071	0,1876	0	0,1876	0,0819	0	0,0819	74	71,8
Honda FCX Clarity (FC)	0,0091	0	0,0091	0,0298	0	0,0298	0,0005	0	0,0005	0,0752	0	0,0752	0,0055	0	0,0055	74	91,8
Honda FCX Clarity (FC)	0,0107	0	0,0107	0,0379	0	0,0379	0,0028	0	0,0028	0,1720	0	0,1720	0,0055	0	0,0055	74	77,7
Honda FCX Clarity (FC)	0,1537	0	0,1537	0,0524	0	0,0524	0,0067	0	0,0067	0,1178	0	0,1178	0,0819	0	0,0819	74	74,2
Honda FCX Clarity (FC)	0,0107	0	0,0107	0,0379	0	0,0379	0,0028	0	0,0028	0,1720	0	0,1720	0,0055	0	0,0055	74	77,7
Honda FCX Clarity (FC)	0,1551	0	0,1551	0,0575	0	0,0575	0,0072	0	0,0072	0,1428	0	0,1428	0,0982	0	0,0982	74	71,4
Honda FCX Clarity (FC)	0,0328	0	0,0328	0,0522	0	0,0522	0,0065	0	0,0065	0,1682	0	0,1682	0,0302	0	0,0302	74	86,0
Honda FCX Clarity (FC)	0,0238	0	0,0238	0,0229	0	0,0229	0,0061	0	0,0061	0,0984	0	0,0984	0,0302	0	0,0302	74	88,9
Honda FCX Clarity (FC)	0,0277	0	0,0277	0,0526	0	0,0526	0,0049	0	0,0049	0,0948	0	0,0948	0,0251	0	0,0251	74	87,4
Mercedes A F-Cell (FC)	0,1889	0	0,1889	0,0949	0	0,0949	0,0083	0	0,0083	0,2178	0	0,2178	0,0951	0	0,0951	74	68,5
Mercedes A F-Cell (FC)	0,1785	0	0,1785	0,0609	0	0,0609	0,0078	0	0,0078	0,1368	0	0,1368	0,0951	0	0,0951	74	71,2
Mercedes A F-Cell (FC)	0,1801	0	0,1801	0,0667	0	0,0667	0,0083	0	0,0083	0,1659	0	0,1659	0,1141	0	0,1141	74	68,1
Mercedes A F-Cell (FC)	0,0105	0	0,0105	0,0346	0	0,0346	0,0006	0	0,0006	0,0874	0	0,0874	0,0064	0	0,0064	74	91,1
Mercedes A F-Cell (FC)	0,0124	0	0,0124	0,0441	0	0,0441	0,0032	0	0,0032	0,1998	0	0,1998	0,0064	0	0,0064	74	75,0
Mercedes A F-Cell (FC)	0,0170	0	0,0170	0,0528	0	0,0528	0,0210	0	0,0210	0,2106	0	0,2106	0,1243	0	0,1243	74	77,0
Mercedes A F-Cell (FC)	0,0381	0	0,0381	0,0606	0	0,0606	0,0075	0	0,0075	0,1953	0	0,1953	0,0351	0	0,0351	74	84,4
Mercedes A F-Cell (FC)	0,0277	0	0,0277	0,0266	0	0,0266	0,0070	0	0,0070	0,1143	0	0,1143	0,0351	0	0,0351	74	87,8
Mercedes A F-Cell (FC)	0,0322	0	0,0322	0,0611	0	0,0611	0,0057	0	0,0057	0,1101	0	0,1101	0,0291	0	0,0291	74	86,1
Berlingo elektrisch	0,0010	0	0,0010	0,0049	0	0,0049	0,0014	0	0,0014	0,0585	0	0,0585	0,0586	0	0,0586	74	84,9
Berlingo Hernieuw	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	74	96,0
Golf Elektrisch	0,0012	0	0,0012	0,0059	0	0,0059	0,0016	0	0,0016	0,0702	0	0,0702	0,0703	0	0,0703	74	82,8
Golf Hernieuw	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	74	96,0

**Tabel 12: Verschillende configuraties met CO<sub>2</sub>-equivalenten per kilometer**

<b>Auto</b>	<b>CO<sub>2</sub> (g/km)</b>	<b>N<sub>2</sub>O in CO<sub>2</sub>- eq. (g/km)</b>	<b>CH<sub>4</sub> in CO<sub>2</sub>-eq.(g/km)</b>	<b>Totale CO<sub>2</sub>- eq. (g/km)</b>
BMW 7 Hydrogen (ICE)	404,97	0,0380	552,69	957,70
BMW 7 Hydrogen (ICE)	74,93	0,0114	0,41	75,36
BMW 7 Hydrogen (ICE)	398,21	0,0621	2,04	400,32
BMW 7 Hydrogen (ICE)	75,50	0,0114	563,70	639,21
BMW 7 Hydrogen (ICE)	365,93	0,0295	552,72	918,68
BMW 7 Hydrogen (ICE)	348,37	0,0295	552,37	900,76
BMW 7 Hydrogen (ICE)	75,21	0,0114	106,65	181,87
BMW 7 Hydrogen (ICE)	36,16	0,0029	106,69	142,85
BMW 7 Hydrogen (ICE)	113,29	0,0114	161,12	274,43
Ford P2000 (ICE)	199,08	0,0160	299,37	498,47
Ford P2000 (ICE)	20,31	0,0016	0,24	20,55
Ford P2000 (ICE)	195,42	0,0299	1,12	196,58
Ford P2000 (ICE)	20,62	0,0016	305,35	325,97
Ford P2000 (ICE)	189,57	0,0160	299,20	488,78
Ford P2000 (ICE)	20,46	0,0016	57,79	78,25
Ford P2000 (ICE)	10,95	0,0016	57,59	68,54
Ford P2000 (ICE)	41,09	0,0016	87,30	128,39
Honda FCX Clarity (FC)	109,07	0,0088	164,75	273,84
Honda FCX Clarity (FC)	10,70	0,0009	0,15	10,85
Honda FCX Clarity (FC)	107,06	0,0161	0,62	107,70
Honda FCX Clarity (FC)	103,84	0,0088	164,64	268,48
Honda FCX Clarity (FC)	107,06	0,0161	0,62	107,70
Honda FCX Clarity (FC)	120,71	0,0115	164,75	285,48
Honda FCX Clarity (FC)	10,78	0,0009	31,80	42,58
Honda FCX Clarity (FC)	5,55	0,0009	31,69	37,24
Honda FCX Clarity (FC)	22,13	0,0009	48,04	70,17
Mercedes A F-Cell (FC)	126,67	0,0102	191,33	318,01
Mercedes A F-Cell (FC)	120,59	0,0102	191,19	311,79
Mercedes A F-Cell (FC)	140,18	0,0132	191,30	331,50
Mercedes A F-Cell (FC)	12,42	0,0010	0,15	12,57
Mercedes A F-Cell (FC)	124,33	0,0184	0,74	125,09
Mercedes A F-Cell (FC)	12,62	0,0010	195,15	207,77
Mercedes A F-Cell (FC)	12,52	0,0010	36,93	49,45
Mercedes A F-Cell (FC)	6,44	0,0010	36,81	43,25
Mercedes A F-Cell (FC)	25,70	0,0010	55,79	81,49
Berlingo elektrisch	58,28	0,0092	0,30	58,59
Berlingo Hernieuw	0	0	0	0
Golf Elektrisch	69,94	0,0115	0,36	70,31
Golf Hernieuw	0	0	0	0

**Tabel 13: Basisgegevens waterstofproductie**

<b><u>Opgelet! Verschillende grootheden!</u></b>	<b><u>CO</u></b>	<b><u>CO<sub>2</sub></u></b>	<b><u>NO<sub>x</sub></u></b>	<b><u>N<sub>2</sub>O</u></b>	<b><u>CH<sub>4</sub></u></b>	<b><u>KWS</u></b>	<b><u>PM10</u></b>	<b><u>SO<sub>2</sub></u></b>
<b>Stoomomvorming aardgas Spath en Mann, 2001 (g/kg H<sub>2</sub>)</b>	<b>5,5860</b>	<b>10578,1170</b>	<b>12,0786</b>	<b>0,0371</b>	<b>59,8000</b>	<b>16,5144</b>	<b>0,7100</b>	<b>8,2175</b>
<b>Stoomomvorming aardgas Little, 1996 (g/GJ)</b>	<b>20,11</b>	<b>73,234</b>	<b>83,29</b>		<b>95,86</b>	<b>21,26</b>	<b>5,32</b>	<b>22,16</b>
<b>Gasificatie van steenkool Little, 1996 (g/GJ)</b>	<b>14,06</b>	<b>151,647</b>	<b>95,1</b>		<b>508,29</b>	<b>5</b>	<b>15,75</b>	<b>90,98</b>
<b>Belgische elektriciteitsmix Electrabel, 2007 (mg/kWh)</b>	<b>19,78</b>	<b>233136</b>	<b>234,16</b>	<b>1,59</b>	<b>4</b>	<b>3,91</b>	<b>5,42</b>	<b>234,45</b>
<b>Gemiddelde over 17 centrales, EcoInvent, 2007 (g/kg H<sub>2</sub>)</b>	<b>2,4534</b>	<b>1229,5066</b>	<b>2,1074</b>		<b>17,4019</b>	<b>2,0016</b>	<b>0,4701</b>	<b>2,1074</b>