

Technologische en economische haalbaarheid van waterstofmotoren

Stijn REMELS

promotor :
Prof. dr. Lode VEREECK

Voorwoord

Het document dat voor u ligt is het sluitstuk van mijn studies Toegepaste Economische Wetenschappen aan de Universiteit Hasselt.

Het onderwerp ‘de technologische en economische haalbaarheid van waterstofmotoren’ was voor mij een uitgelezen kans om mij via mijn studies verder te verdiepen in de evoluties in de automobielsector, welke ik altijd met veel interesse heb gevolgd.

Voor over te gaan tot de kern van deze eindverhandeling, zou ik graag nog enkele woorden van dank richten tot de personen die me hebben bijgestaan in het schrijven ervan. Mijn dank gaat in de eerste plaats uit naar mijn promotor prof. dr. L. Vereeck, die mij gedurende het schrijven van deze thesis heeft bijgestaan met goede raad en opbouwende kritiek. Daarnaast wil ik ook mijn ouders en mijn broer bedanken, die gedurende mijn hele opleiding achter me gestaan hebben. Ten slotte bedank ik ook mijn vrienden voor de steun en de leuke studententijd.

Stijn Remels

Samenvatting

Nu het einde van het olietijdperk in zicht komt, wordt er volop gezocht naar alternatieve manieren om energie op te wekken. Steeds meer aandacht gaat er naar het onderzoek naar waterstof als schone en duurzame brandstof. Vooral de toepassing van waterstof als brandstof voor auto's wordt de laatste jaren druk onderzocht. Deze thesis geeft op basis van een uitvoerige literatuurstudie een overzicht van de huidige stand van zaken van dit onderzoek. Er wordt aangegeven waarom men op zoek is naar een alternatief voor olie, waarom waterstof gezien wordt als een interessante alternatieve brandstof en wat de betekenis is van het begrip waterstofeconomie. In het technische gedeelte worden de soorten brandstofcellen, de opslagmethodes, de productie van waterstof en enkele andere knelpunten uitvoerig belicht. In de ecologische analyse wordt de invloed op het milieu van het gebruik van waterstof als brandstof bekeken. De economische analyse geeft aan welke kosten er gepaard gaan met het gebruik van waterstof als brandstof voor voertuigen en geeft informatie over hoe de overstap naar een waterstofeconomie begeleid kan worden. Daarna wordt er een overzicht gegeven van bedrijven die via hun activiteiten te maken hebben met waterstof en ter afronding wordt er een algemeen besluit getrokken.

Het oliegebruik stijgt de laatste jaren sneller dan ooit. De EIA verwacht dat tegen 2025 de vraag naar olie met 52,5% zal stijgen. De transportsector is momenteel verantwoordelijk voor meer dan de helft van het oliegebruik en hun aandeel zal in de toekomst nog verder toenemen. Over de voorraad olie die nog rest, zijn de meningen verdeeld, maar verwacht wordt dat de olieproductie haar piek zal bereiken tussen 2010 en 2040, wat kan resulteren in een nieuwe oliecrisis.

Naast de uitputting van de olievoorraden is er nog een ander probleem dat minstens evenveel aandacht verdient: de invloed van de energieconsumptie op het milieu, meer bepaald het broeikas-effect. Er wordt verwacht dat onder de invloed van schadelijke emissies er een radicalisering van de neerslag zal plaatsvinden en een

verhoging van de temperatuur op de continenten. Beide veranderingen zullen grote gevolgen hebben voor het leefmilieu. De transportsector is met 24% de tweede grootste verantwoordelijke voor de uitstoot van CO₂. 75% hiervan is te wijten aan het wegverkeer. Een correcte uitvoering van het Kyoto-protocol heeft weinig of geen invloed op de globale klimaatseffecten. Het is dus nodig dat er uitgekeken wordt naar andere mogelijke manieren om de uitstoot van broeikasgassen terug te dringen.

De overschakeling naar een waterstofeconomie zou een mogelijke oplossing kunnen zijn. Zowat het hele energiesysteem dat nu gebaseerd is op fossiele brandstoffen zou kunnen omgeschakeld worden tot een op waterstof gebaseerde energievoorziening. Het gebruik van waterstof en brandstofcellen blijft niet beperkt tot de automobielsector: er is de mogelijkheid tot het opzetten van een systeem van decentrale elektriciteitsopwekking, waarbij stationaire brandstofcellen of de wagen gebruikt kunnen worden als energiecentrale. Zowel de Europese als de Amerikaanse overheid geloven in een overschakeling naar een waterstofeconomie.

Op het vlak van de technologie is er echter nog heel wat onderzoek nodig voor waterstof als brandstof gebruikt kan worden. De minder efficiënte waterstof-vonkontstekingsmotor is bijna klaar voor productie, maar de techniek van de veel efficiëntere brandstofcel staat nog niet op punt. Momenteel wordt de Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) beschouwd als meest geschikt om in auto's te gebruiken. Ook andere types van brandstofcellen worden ontwikkeld. De meest voorkomende knelpunten bij het onderzoek zijn de hoge kosten van onderdelen (zoals de platina katalysator), een lage energie-efficiëntie, een korte levensduur en een hoge gevoeligheid voor onzuiverheden in de gebruikte waterstof. De opslag van waterstof vormt ook een probleem. Zowel de opslag in gasvorm, de cryogene opslag en de opslag in vaste vorm zijn niet in staat de vooropgestelde doelen te behalen. De kosten van opslagtanks voor wagens worden momenteel geschat op 600 tot 800 USD/kg H₂, terwijl de targetprijs van het US-DOE 67 USD/kg H₂ bedraagt. De opstarttijd van brandstofcellen moet verbeterd worden en het gebruik van een reformer in voertuigen moet ontmoedigd worden, gezien de hoge kost en de lage efficiëntie.

Het is belangrijk het gebruik van waterstof als brandstof te zien over de hele cyclus. Een well-to-wheel beschouwing van de hele cyclus geeft het belang aan van de productiemethode van waterstof. Het is immers de productiewijze die bepaalt in hoeverre het gebruik van waterstof duurzaam genoemd kan worden. Waterstof kan geproduceerd worden met fossiele brandstoffen, via reforming van aardgas en de vergassing van steenkool. Wanneer deze methodes gebruikt worden, wordt er echter nog steeds CO₂ uitgestoten bij de productie van waterstof. Deze dient opgevangen en opgeslagen te worden. Elektrolyse van water is een schone maar dure manier om waterstof te produceren, maar moet nog verder geperfectioneerd worden. Foto-elektrolyse en fotobiologische elektrolyse zijn naast decompositie op hoge temperatuur en waterstof uit biomassa andere manieren om waterstof te produceren. Deze methodes staan technisch echter nog niet op punt en zullen pas op langere termijn toegepast kunnen worden. Reforming van aardgas en elektrolyse op kleine schaal vormen de methodes die op korte termijn gebruikt zullen worden.

In het economische gedeelte wordt uitgelegd dat men verwacht dat de prijzen van waterstofwagens zullen dalen in de toekomst, terwijl de kosten van conventionele voertuigen zullen stijgen. De kost van de fuel cell stack is voor een groot stuk verantwoordelijk voor de hoge kost van brandstofcelwagens. Verwacht wordt dat deze kost kan dalen naar 100 USD/kW in plaats van 1.800 USD/kW vandaag. De 'balance of plant'-kosten en de opslag van waterstof zijn de andere grote kostendrijvers van een FCV. De richtprijzen voor opslag lopen uiteen van 67 USD/kg H₂ tot 600 USD/kg H₂. Men verwacht dat een FCV tegen 2030 tussen de 2.500 en 7.625 USD meer zal kosten dan een conventioneel benzinevoertuig. De kostprijs en de prijs van de distributie van waterstof wordt verwacht hoger te zullen liggen dan die van benzine, wat betekent dat de overheden maatregelen zullen moeten treffen om waterstof concurrentieel te maken tegenover benzine of andere brandstoffen, bijvoorbeeld in de vorm van een gunstig belastingsregime voor waterstof. In het Snapshot 2020 scenario geeft Europa weer hoe ze de transitie naar een waterstofeconomie ziet verlopen en welke stappen er belangrijk zijn. Hierin wordt aangenomen dat tegen de periode 2030-2040 brandstofcellen helemaal doorgebroken zullen zijn als brandstof voor

transporttoepassingen. De Amerikaanse overheid beschouwt 2015 als belangrijke datum. Op dat ogenblik zullen ze de beslissing nemen om waterstof te commercialiseren of niet. De overheden kunnen een belangrijke rol spelen in het slagen van de overstap naar een waterstofeconomie. CO₂-reducerende maatregelen kunnen hier als nuttig instrument gebruikt worden. Een maatregel ter waarde van 50 USD/t CO₂ kan de uitstoot koolstofdioxide halveren in vergelijking met het ontbreken van dergelijke maatregelen.

De hoge efficiëntie van brandstofcellen zorgt ervoor dat er grote ecologische voordelen voortkomen uit het gebruik van brandstofcellen in combinatie met de productie van waterstof op basis van hernieuwbare energiebronnen zoals biomassa en windenergie. Ook het gebruik van aardgasreforming gecombineerd met brandstofcellen kan de uitstoot van broeikasgassen tot 30% verminderen. Wanneer het effect van het gebruik van waterstof vergeleken wordt met dat van andere alternatieve brandstoffen, is te merken dat waterstof tegen 2050 een netto-vermindering van 5% in de CO₂-emissies kan veroorzaken en een netto-vermindering van 2% in het oliegebruik.

Als besluit kan er gesteld worden dat waterstof als brandstof voor wagens kan doorbreken op twee voorwaarden. Ten eerste moet de technologie verder groeien om alsnog de vereiste doelstellingen te halen met betrekking tot prestaties en kosten. Daarnaast is een kader van beleidsmaatregelen onontbeerlijk om de waterstofeconomie een succes te laten worden. Als deze twee voorwaarden vervuld zijn, is de kans groot dat waterstof als één van de nieuwe alternatieve brandstoffen kan bijdragen tot het terugdringen van de CO₂-emissies en de afhankelijkheid van olie.

Inhoudsopgave

VOORWOORD

SAMENVATTING

HOOFDSTUK I: INLEIDING EN PROBLEEMSTELLING 10

1.1	PROBLEEMSTELLING	10
1.2	ONDERZOEKSDOEL	11
1.3	CENTRALE ONDERZOEKSVRAAG	11
1.4	DEELVRAGEN.....	11
1.5	KEUZE EN VERANTWOORDING ONDERZOEKSTRATEGIE	12

HOOFDSTUK II: HET EINDE VAN DE FOSSIELE BRANDSTOFFEN 14

2.1	ENERGIECONSUMPTIE	14
2.2	OLIEVOORRADEN.....	16
2.3	AANDEEL VAN DE TRANSPORTSECTOR.....	18

HOOFDSTUK III: HET BROEIKASEFFECT EN HET KYOTO-PROTOCOL..... 20

3.1	DE WERKING VAN HET BROEIKASEFFECT	20
3.2	DE BROEIKASGASSEN.....	21
3.3	TE VERWACHTEN EFFECTEN.....	24
3.4	ROL VAN DE TRANSPORTSECTOR.....	29
3.5	HET KYOTO-PROTOCOL	31

HOOFDSTUK IV: DE WATERSTOFECONOMIE..... 35

4.1	WATERSTOF ALS ENERGIEDRAGER.....	35
4.2	DECENTRALE ELEKTRICITEITSOPWEKKING	35
4.3	DE AUTO, DE ELEKTRICITEITSCENTRALE VAN DE TOEKOMST	38
4.4	EUROPA EN DE WATERSTOFECONOMIE.....	40

HOOFDSTUK V: WATERSTOFMOTOREN..... 44

5.1	SOORTEN MOTOREN GEBRUIKT IN DE AUTOMOBIELSECTOR	44
5.1.1	<i>Benzinemotor</i>	44
5.1.2	<i>LPG-vonkontstekingsmotor</i>	45

5.1.3	<i>Aardgas-vonkontstekingsmotor</i>	46
5.1.4	<i>Dieselmotor</i>	46
5.1.5	<i>Biodieselmotor</i>	47
5.1.6	<i>Alcoholen</i>	47
5.1.7	<i>Elektromotor met batterij</i>	48
5.1.8	<i>Hybride</i>	48
5.1.9	<i>Waterstof-vonkontstekingsmotor</i>	49
5.1.10	<i>Brandstofcel</i>	51
5.2	VERSCHILLENDE TYPES BRANDSTOFCELLEN	54
5.2.1	<i>Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC)</i>	54
5.2.2	<i>Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFC)</i>	56
5.2.3	<i>Direct Alcohol Fuel Cells (DAFC)</i>	57
5.2.4	<i>Alkaline Fuel Cells (AFC)</i>	58
5.2.5	<i>Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC)</i>	59
5.2.6	<i>Solid Oxide Fuel Cells (SOFC)</i>	60
5.2.7	<i>Andere types brandstofcellen</i>	61
5.3	PRAKTISCHE PROBLEMEN BIJ HET GEBRUIK VAN WATERSTOF ALS BRANDSTOF.....	64
5.3.1	<i>Opslag van waterstof</i>	64
5.3.1.1	Opslag van waterstof in gasvorm	66
5.3.1.2	Opslag van waterstof in vloeibare vorm.....	68
5.3.1.3	Opslag van waterstof in vaste vorm	70
5.3.1.4	Algemeen besluit opslag waterstof.....	72
5.3.2	<i>Is waterstof gevaarlijk?</i>	73
5.3.3	<i>Opstarttijd</i>	75
5.3.4	<i>Reformer</i>	75
5.3.5	<i>Standaarden</i>	76

HOOFDSTUK VI: HOE WATERSTOF PRODUCEREN? 80

6.1	WATERSTOF UIT FOSSIELE BRANDSTOFFEN	81
6.1.1	<i>Waterstof uit aardgas</i>	81
6.1.2	<i>Waterstof uit steenkool</i>	82
6.1.3	<i>Opvang en opslag van CO₂</i>	83
6.2	WATERSTOF VIA HET SPLITSEN VAN WATER	84
6.2.1	<i>Elektrolyse van water</i>	84
6.2.2	<i>Foto-elektrolyse</i>	85
6.2.3	<i>Fotobiologische elektrolyse</i>	85
6.2.4	<i>Decompositie op hoge temperatuur</i>	86

6.3	WATERSTOF UIT BIOMASSA.....	86
6.4	WATERSTOF OP BASIS VAN HERNIEUWBARE ENERGIE	87
6.5	GECENTRALISEERDE OF GEDECENTRALISEERDE PRODUCTIE.....	88
HOOFDSTUK VII: ECONOMISCHE ANALYSE.....		90
7.1	DEMONSTRATIEPROJECTEN.....	92
7.2	KOST VAN EEN BRANDSTOFCELSYSTEEM	94
7.2.1	<i>Kost van een fuel cell stack.....</i>	<i>94</i>
7.2.2	<i>Kost van balance of plant.....</i>	<i>98</i>
7.2.3	<i>Kost van de opslag van waterstof.....</i>	<i>99</i>
7.2.4	<i>Totale kost van een FCV.....</i>	<i>100</i>
7.3	DE KOSTPRIJS VAN DE PRODUCTIE VAN WATERSTOF	105
7.4	KOSTPRIJS VAN DE DISTRIBUTIE VAN WATERSTOF	108
7.5	SCENARIO-ANALYSES	111
7.6	POTENTIËLE BARRIÈRES VOOR DE INVOERING VAN WATERSTOF	118
7.6.1	<i>Het belang van de introductie</i>	<i>119</i>
7.6.2	<i>Het belang van de beschikbaarheid van de materialen.....</i>	<i>120</i>
7.6.3	<i>Het belang van de belastingen op brandstoffen.....</i>	<i>120</i>
7.6.4	<i>Het dilemma van de korte termijn versus de lange termijn investeringen.....</i>	<i>122</i>
7.7	ROL VAN DE OVERHEDEN.....	124
7.7.1	<i>CO₂-reducerende maatregelen.....</i>	<i>126</i>
HOOFDSTUK VIII: ECOLOGISCHE ANALYSE.....		131
8.1	DE EFFICIËNTIE VAN FUEL CELL VEHICLES	131
8.2	WELL-TO-WHEEL UITSTOOT VAN CO ₂	134
8.3	RIJDEN OP WATERSTOF ALS OPLOSSING VOOR DE CO ₂ -UITSTOOT	137
HOOFDSTUK IX: PROTAGONISTEN VAN DE WATERSTOFECONOMIE.....		140
HOOFDSTUK X: ALGEMEEN BESLUIT		142
LIJST VAN GERAADPLEEGDE WERKEN		
BIJLAGEN		

Hoofdstuk I: Inleiding en probleemstelling

1.1 Probleemstelling

Nu mensen over de wereld stilaan tot het besef komen dat het einde van het olietijdperk in zicht komt, wordt er koortsachtig gezocht naar alternatieve manieren om energie op te wekken. Fossiele brandstoffen ruimen baan voor hernieuwbare energiebronnen zoals zonne-energie, windenergie, hydro-elektrische energie en geothermische energie. Steeds vaker wordt waterstof naar voren geschoven als dé brandstof van de toekomst. Het onderzoek naar alternatieven voor olie heeft sinds 11 september 2001 een vlucht genomen. Vooral in de auto-industrie zijn het turbulente tijden: steeds meer autoconstructeurs komen met prototypes en testvoertuigen die rijden op waterstof.¹

Ook de consument vangt meer en meer berichten op over waterstof. Er wordt gezegd dat waterstof een schone, veilige en eerlijke energiebron is, die een ware revolutie zou kunnen betekenen voor de wereld zoals we die nu kennen. Het gebruik van waterstof is schoon, omdat er geen afvalstoffen geproduceerd worden, enkel water. Het is veilig, omdat de overvloedige beschikbaarheid ons minder afhankelijk maakt van de olieleveranciers. Bovendien is het eerlijk, omdat waterstof het meest voorkomende element op deze wereld is. Dit betekent dat het voor iedereen beschikbaar zal zijn. Overal ter wereld zullen mensen de mogelijkheid hebben om zelf energie op te wekken en te bewaren.²

Voordat deze beloftes voor waarheid aangenomen kunnen worden, dient er echter nog heel wat onderzoek te gebeuren naar het gebruik van waterstof. Hoewel men de laatste

¹ Falter, R., 20 januari 2005, *Auto van toekomst vergt vooral tijd*, De TIJD, p. 13.

² Rifkin, J., 2004, *De waterstofeconomie: schone en duurzame energie voor iedereen*, Lemniscaat, Rotterdam, p. 9-21.

jaren al enorme vorderingen heeft gemaakt op dit vlak, staat het op grote schaal invoeren van waterstof in de automobielsector volgens vele bronnen pas gepland voor over tien tot vijftien jaar. Andere bronnen spreken over een langere termijn of weigeren een jaartal te plakken op de invoer van de waterstofmotor. Hoe ver staat het ondertussen met het onderzoek, wat zijn de knelpunten die overwonnen moeten worden en is waterstof überhaupt dé brandstof van de toekomst?

1.2 Onderzoeksdoel

Het doel van deze thesis is een duidelijk en zo volledig mogelijk overzicht te geven van de huidige stand van zaken op het vlak van het inschakelen van waterstofmotoren in de automobielsector. Deze eindverhandeling moet aangeven waarom waterstof aanzien wordt als de brandstof van de toekomst, wat de voordelen en de nadelen zijn, zowel op het vlak van technologie, milieu, als economie. Daarnaast probeert deze thesis de lezer een zicht op de toekomst te bieden. Wanneer zullen auto's op waterstof werkelijk in het straatbeeld verschijnen, wanneer zal er de nodige infrastructuur voorhanden zijn enz.?

1.3 Centrale onderzoeksvraag

Is de implementatie van waterstofmotoren in de automobielsector technologisch en economisch haalbaar?

1.4 Deelvragen

Uit de centrale onderzoeksvraag zijn de volgende deelvragen af te leiden.

- Hoe ver staan de autoconstructeurs op dit moment in het onderzoek en implementatie van waterstofmotoren in de automobielsector?

- Waarom wordt waterstof de brandstof van de toekomst genoemd?
- Wat zijn de voordelen van waterstof ten opzichte van conventionele brandstoffen als benzine, diesel en LPG (op het vlak van verbruik, uitstoot, kostprijs...)?
- Hoe werkt een auto op waterstof technisch gezien? (waterstofvonkontstekingsmotor, brandstofcel)
- Welke zijn de voorwaarden die moeten vervuld worden om over te schakelen naar waterstof als brandstof voor auto's? (distributienetwerken, industriestandaarden...)
- Welke rol speelt de overheid in de overschakeling naar waterstofmotoren? (voorlichting van consumenten, subsidies...)
- Wie werkt er op dit moment aan onderzoek en ontwikkeling op het gebied van waterstofmotoren?
- Hoe kan de invoering van waterstof als voorname bron van energie een verandering in de samenleving veroorzaken? (onafhankelijkheid in energievoorziening, nieuwe wereldwijde politieke machtsverhoudingen...)

1.5 Keuze en verantwoording onderzoeksstrategie

Het onderzoek voor deze thesis verloopt voornamelijk via literatuuronderzoek. Daarnaast wordt er ook informatie gebruikt van lezingen en persoonlijke correspondentie met personen uit de automobielsector. Het opzet is zoveel mogelijk de laatste nieuwe beschikbare informatie op te nemen in deze eindeverhandeling. Dit

is nodig om zo goed mogelijk de huidige toestand te schetsen. De evoluties volgen elkaar in hoog tempo op en informatie veroudert bijgevolg snel in dit onderzoeksgebied. Er zal dan ook meermaals gebruik gemaakt worden van internetbronnen, welke de mogelijkheid geven te werken met up-to-date gegevens, zonder hierbij de wetenschappelijke betrouwbaarheid van de informatie uit het oog te verliezen. Door de uitgebreide bronvermelding krijgt de lezer de kans om op elk moment in de tekst de bronnen zelf te raadplegen voor extra informatie. Voor zoveel mogelijk documenten is er dan ook een URL voorhanden, welke rechtstreeks verwijst naar de elektronische versie van de bron.

Hoofdstuk II: Het einde van de fossiele brandstoffen

Om het nut van waterstof als brandstof te kunnen begrijpen, is het nodig eerst van naderbij te bekijken hoe het gesteld is met de energiebronnen op dit ogenblik. In dit hoofdstuk worden de voorraden fossiele brandstoffen in de wereld besproken. Er wordt nagegaan in hoeverre deze al opgebruikt zijn en hoe de toekomst eruit ziet met het oog op de steeds groeiende vraag naar energie. De klemtoon wordt hier gelegd op de voorraden aardolie, omdat deze van het grootste belang zijn voor de transportsector, en voor de automobielsector in het bijzonder.

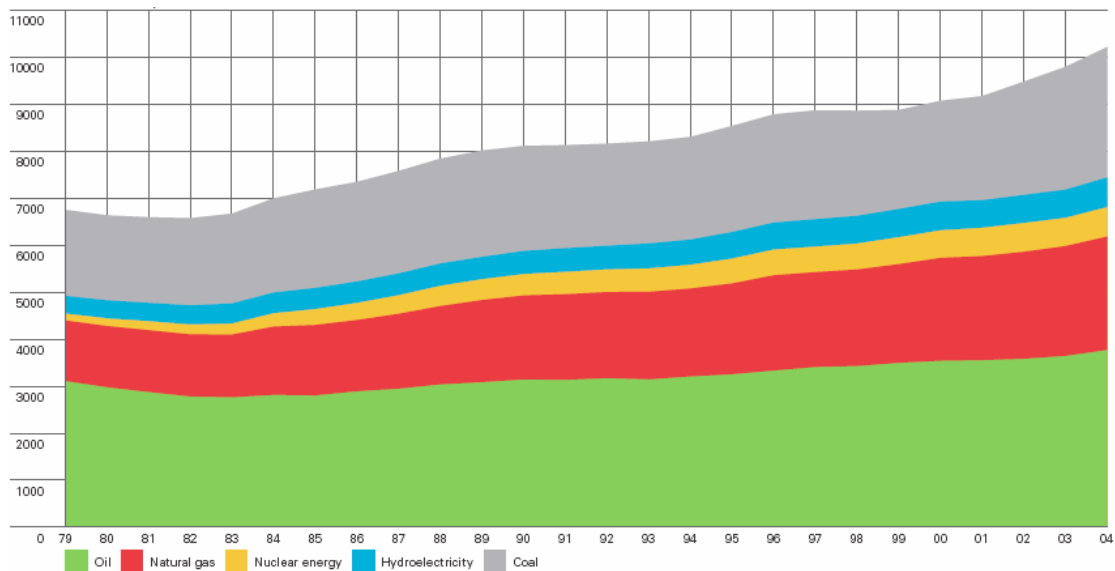
2.1 Energieconsumptie

Over energieconsumptie en energievoorraden zijn vele cijfers terug te vinden. Wanneer deze data met elkaar vergeleken worden, blijkt echter al gauw dat tussen de cijfers heel wat verschillen zitten. Het is dan ook belangrijk elk onderzoek in zijn juiste context te plaatsen. Vele onderzoeken worden immers uitgevoerd in opdracht van ondernemingen met rijke petroleumvoorraden, andere gebeuren bijvoorbeeld in het kader van een lange termijn strategiebepaling voor overheden. Het spreekt voor zich dat er voor al deze partijen op politiek en commercieel vlak andere belangen spelen en dat onderzoeksresultaten door middel van ‘creatief geologisch boekhouden’ in een bepaalde richting gestuurd kunnen worden.³ De cijfers in deze thesis zijn voornamelijk gebaseerd op het ‘Statistical Review of World Energy’ van de energiemaatschappij BP, gepubliceerd in juni 2005. Dit document wordt al meer dan vijftig jaar gepubliceerd en wordt door het merendeel van de onderzoekers aanzien als een bron van gedetailleerde, objectieve en consistente data over de energiemarkten.

³ Rifkin, J., 2004, *De waterstofeconomie: schone en duurzame energie voor iedereen*, Lemniscaat, Rotterdam, p. 24-30.

Figuur 2.1 geeft de wereldconsumptie van energie weer van 1979 tot 2004. De eenheid die hier gebruikt wordt is Ton Olie Equivalent (toe). De grafiek geeft een duidelijke verdeling van de verschillende energiebronnen. Het groene gedeelte geeft het verbruik van olie weer. Het valt op dat olie met een totaal verbruik van 3.767,1 miljoen ton de meest gebruikte bron van energie is. Bovendien is er het verontrustende signaal dat de globale primaire energieconsumptie in 2004 met 4,3% gestegen is ten opzichte van 2003. Voor olie bedraagt deze stijging 3,4%, de hoogst gemeten groei sinds 1978.⁴

Figuur 2.1: Wereldconsumptie van verschillende energiebronnen in miljoen ton olie equivalent



Bron:

http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/publications/energy_reviews_2005/STAGING/local_assets/downloads/pdf/statistical_review_of_world_energy_full_report_2005.pdf BP, 2005, Statistical Review of World Energy, BP, Londen, p. 39.

4

http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/publications/energy_reviews_2005/STAGING/local_assets/downloads/pdf/statistical_review_of_world_energy_full_report_2005.pdf BP, 2005, *Statistical Review of World Energy*, BP, Londen, p. 37-39.

Een groot stuk van de groei in het verbruik van energie op wereldvlak is te wijten aan de snelgroeiende economieën in landen zoals China en India. De landen maken een industriële revolutie door en proberen dezelfde levensstandaard te bereiken als de rijke westerse landen. Om deze economische en industriële opmars aan te houden, is er in deze landen een sterk stijgende vraag naar olie waar te nemen. Dat deze situatie de nodige problemen zal opleveren, blijkt uit cijfers van de Energy Information Administration (EIA). Volgens de resultaten van onderzoek van deze instelling zal wereldwijd de vraag naar olie stijgen van 78 miljoen vaten per dag in 2002 naar 119 miljoen vaten per dag in 2025. Dit komt neer op een stijging van 52,5% procent in een periode van drieëntwintig jaar.⁵ Hoe deze schok opgevangen moet worden, is nog maar de vraag.

2.2 Olievoorraden

Het Statistical Review of World Energy van BP geeft aan dat er op het eind van 2004 zicht was op een totale aangetoonde oliereserve⁶ van 1.188,6 miljard vaten, wat gelijk staat aan 161,9 miljard ton olie. Om te weten hoe lang de reserves aan de huidige productie kunnen voldoen, berekent men de ratio bewezen reserves/productie. Deze bedraagt op dit moment 40,5 jaar, wat betekent dat de huidige gekende en beschikbare voorraden na die periode uitgeput zullen zijn.⁷

Op dit ogenblik is het merendeel van de olie afkomstig van 1.500 olievelden van over de hele wereld. Deze velden vertegenwoordigen 94% van de totale hoeveelheid ruwe olie die bekend is. Ondertussen is zowat heel de wereld onderzocht en wordt de kans dat men een nieuw groot olieveld ontdekt steeds kleiner. De Amerikaanse

⁵ [http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484\(2005\).pdf](http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484(2005).pdf) EIA, 2005, *International Energy Outlook 2005*, EIA, Washington, DC, p. 25-28.

⁶ Aangetoonde reserves: dit zijn de gekende lagen die technisch en op een economisch verantwoorde manier ontgind kunnen worden met de huidige technologie.

⁷

http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/publications/energy_reviews_2005/STAGING/local_assets/downloads/pdf/statistical_review_of_world_energy_full_report_2005.pdf BP, 2005, *Statistical Review of World Energy*, BP, Londen, p. 4.

Geologische Dienst bevestigt dit en meldt dat het aantal ontdekkingen van nieuwe olievelden wereldwijd in 1962 al zijn hoogtepunt heeft bereikt en sindsdien dalende is. Dit neemt niet weg dat er nog kleine velden gevonden zullen worden, maar deze zullen niet voldoende zijn om de stijgende vraag op te vangen.⁸

Op het vlak van de nog te ontdekken olievoorraden is er echter heel wat onenigheid. Hetzelfde geldt voor het moment waarop de olieproductie haar piek zal bereiken. Zowel pessimistische visies als erg optimistische meningen worden hierover verspreid. Veel hangt af van de manier waarop men rekening houdt met de economische groei van landen als China en India, de technologische vooruitgang op het vlak van olieboringen, de prijsevolutie van ruwe olie enz. Sommige onderzoekers zien de toekomst niet al te somber. Zij voorspellen dat de wereldwijde olieproductie pas zal pieken tussen 2030 en 2040.⁹ Anderen schatten de totale winbare reserves veel lager in, omdat ze van mening zijn dat de olieproducerende landen, met name de OPEC-landen en Rusland, de grootte van de reserves om politieke redenen overdreven hebben. Zij zijn van mening dat de wereldwijde olieproductie ergens tussen 2010 en 2020 zal pieken. Sommige onderzoeken resulteren in een schatting dat de piek zelfs voor 2010 zal plaatsvinden.¹⁰

Het tijdstip waarop de piek in de olieproductie bereikt zal worden, blijft dus stof tot discussie. Dat de piek er komt, is echter een vaststaand feit. Op dat moment zal de helft van alle winbare oliereserves geproduceerd zijn. Sommige onderzoekers verwachten dat eens deze piek bereikt is, de olieprijsen onvermijdelijk zullen gaan stijgen en dat landen, ondernemingen en consumenten met elkaar zullen moeten wedijveren om de resterende olie te bemachtigen. Na de oliecrisis in de jaren zeventig

⁸ Rifkin, J., 2004, *De waterstofeconomie: schone en duurzame energie voor iedereen*, Lemniscaat, Rotterdam, p. 30-43.

⁹ Rifkin, J., 2004, *De waterstofeconomie: schone en duurzame energie voor iedereen*, Lemniscaat, Rotterdam, p. 30-43.

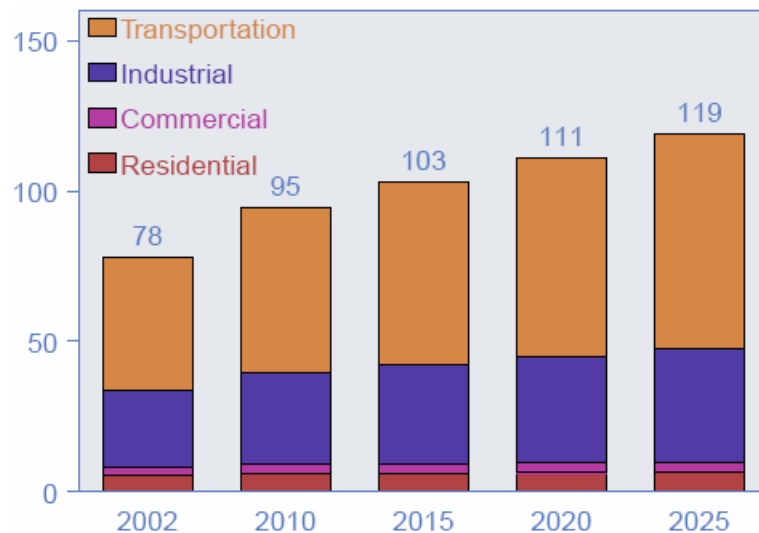
¹⁰ http://pubs.wri.org/pubs_content_text.cfm?ContentID=2239 MacKenzie, J. J., 2000, *Oil as a finite resource: When is global production likely to peak?*, World Resources Institute.

en tachtig, zou er een nieuwe grote crisis kunnen volgen. In dit geval zal de crisis niet op politiek gebaseerd zijn, maar op een daadwerkelijk tekort.¹¹

2.3 Aandeel van de transportsector

Figuur 2.2 geeft een overzicht van het wereldwijde olieconsumptie per sector. Zo zien we dat in 2002 meer dan de helft van de wereldwijd geproduceerde olie verbruikt werd door de transportsector. De industrie stond in voor ongeveer één derde en de rest van de olie werd geconsumeerd voor commerciële en residentiële doeleinden.

Figuur 2.2: Globale olieconsumptie per eindgebruikersgroep in miljoen vaten per dag



Bron: [http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484\(2005\).pdf](http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484(2005).pdf) EIA, 2005, International Energy Outlook 2005, EIA, Washington, DC, p. 27.

De EIA verwacht dat in de toekomst de transportsector verantwoordelijk zal zijn voor 61% van de toename van het wereldwijde olieconsumptie. Deze stijging in de

¹¹ Rifkin, J., 2004, *De waterstofeconomie: schone en duurzame energie voor iedereen*, Lemniscaat, Rotterdam, p. 43-48.

transportsector zal vooral te wijten zijn aan landen als China en India en andere nieuwe economieën. Men verwacht dat het oliegebruik voor transport in West-Europa en Canada de komende jaren licht zal dalen.¹²

¹² [http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484\(2005\).pdf](http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484(2005).pdf) EIA, 2005, *International Energy Outlook 2005*, EIA, Washington, DC, p. 25-28.

Hoofdstuk III: Het broeikaseffect en het Kyoto-protocol

De uitputting van de energievoorraden (zie Hoofdstuk II) is op zich al een reden om uit te kijken naar maatregelen om het energieverbruik in de wereld te veranderen. Maar naast de eindigheid van de fossiele brandstoffen is er nog een ander probleem, dat minstens evenveel aandacht verdient: de invloed van de energieconsumptie op het milieu. In dit hoofdstuk wordt een link gelegd tussen het broeikaseffect en het energieverbruik in de wereld. Daarnaast worden de te verwachten effecten van de opwarming van de aarde belicht en wordt de rol van de transportsector in deze problematiek verduidelijkt. Ten slotte worden de bestaansredenen, de doelstellingen en de vooruitzichten van het Kyoto-protocol uit de doeken gedaan.

3.1 De werking van het broeikaseffect

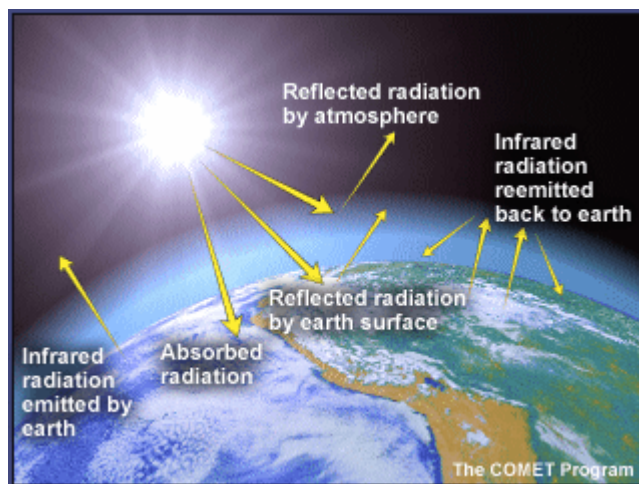
Om de werking van het broeikaseffect te begrijpen kan men de werking van de atmosfeer vergelijken met de werking van een glazen serre. De aarde wordt verwarmd door de stralen van de zon. De straling van de zon die de aarde bereikt, wordt voor ongeveer 30% door de wolken en de aarde meteen teruggekaatst. 20% van de stralen wordt geabsorbeerd door watermoleculen, ozon en stof. De resterende 50% van de ingestraalde zonne-energie wordt opgenomen door het aardoppervlak (zee, bodem, planten...).¹³

Elk voorwerp zendt stralen uit, dus ook de aarde. De straling die de aarde uitzendt, is in de vorm van infrarode golven. Deze infrarode straling wordt voor het grootste gedeelte geabsorbeerd door de wolken. De wolken stralen op hun beurt hun infrarode golven alle richtingen uit: zowel terug naar de aarde, als naar het heelal. Deze laatste uitgestraalde energie zorgt ervoor dat de aarde afkoelt.

¹³ <http://www.klimaat.be/nl/broeikasEffect.html> Staatssecretariaat voor Energie en Duurzame Ontwikkeling, 2006.

In de atmosfeer zijn er echter van nature uit een aantal gassen die het infrarode licht niet doorlaten, maar het absorberen. Dit zijn de zogenaamde broeikasgassen: waterdamp, distikstofoxide, koolstofdioxide, methaan, ozon, CFK's enz. De energie die ze absorberen, stralen ze nadien weer uit in alle richtingen, waardoor ze ook de aarde weer verwarmen (zie figuur 3.1). Zonder dit natuurlijke broeikaseffect zou de temperatuur op aarde ongeveer 30° Celsius lager zijn dan de gemiddelde temperatuur van 15° Celsius vandaag.¹⁴

Figuur 3.1: De werking van het broeikaseffect



Bron: <http://www.ucar.edu/learn/images/gheffect.gif> University Corporation for Atmospheric Research, 2006.

3.2 De broeikasgassen

Het broeikaseffect is dus natuurlijk van aard. Het probleem is echter dat de werking van het broeikaseffect toeneemt door de uitstoot van extra broeikasgassen en hierdoor loopt de temperatuur van de aarde hoger op dan normaal.¹⁵ De studies van het

¹⁴ <http://www.iupac.org/didac/Didac%20Ned/Didac03/Content/L06.htm> International Union of Pure and Applied Chemistry, 2006.

¹⁵ https://portal.health.fgov.be/portal/page?_pageid=56,512629&_dad=portal&_schema=PORTAL Federale Overheidsdienst Volksgezondheid, Veiligheid van de voedselketen en Leefmilieu, 2006.

International Panel on Climate Change (IPCC) tonen aan dat sinds de Industriële Revolutie (1750) de hoeveelheid broeikasgassen in de atmosfeer sterk is opgelopen. Zo vermelden deze studies dat de CO₂-uitstoot sinds 1750 is toegenomen met wel 31%. Drievierde van deze uitstoot is het gevolg van verbranding van fossiele brandstoffen en een vierde is het gevolg van veranderend landgebruik, voornamelijk ontbossing.¹⁶ Dit alles veroorzaakte een versterkt broeikaseffect en zorgde ervoor dat gedurende de 20^{ste} eeuw de temperatuur op aarde toenam met 0,3° tot 0,6° Celsius en de zeespiegel steeg met 10 tot 20 cm.^{17 18}

Er zijn twee soorten broeikasgassen:¹⁹

- De gasen die op **natuurlijke** wijze aanwezig zijn in de atmosfeer. Dit zijn onder andere waterdamp (H₂O), koolstofdioxide (CO₂), methaan (CH₄) distikstofoxide (N₂O), ook wel lachgas genoemd, ozon (O₃) enz.
- De **artificiële** broeikasgassen, die door de menselijke (industriële) activiteiten in de atmosfeer terecht komen. De bekendste artificiële broeikasgassen zijn de chloorfluorkoolwaterstoffen (CFK's).

CO₂ komt vrij bij de verbranding van fossiele brandstoffen (olie, kolen en gas) en van hout (bijvoorbeeld bij ontbossing). CH₄ komt in de atmosfeer via landbouwactiviteiten (bijvoorbeeld via veeteelt en rijstvelden), vuilstorten en afvalwater. Distikstofoxide is vooral afkomstig van bepaalde industriële processen en landbouwactiviteiten (zoals de productie en het gebruik van kunstmest).²⁰ CFK's en vergelijkbare stoffen, én de

¹⁶ <http://www.ipcc.ch/pub/un/syren/spm.pdf> IPCC, 2001, *Climate Change 2001: synthesis Rapport*, IPCC, Genève, p. 4-8.

¹⁷ <http://www.iupac.org/didac/Didac%20Ned/Didac03/Content/L06.htm> International Union of Pure and Applied Chemistry, 2006.

¹⁸ [http://www.ipcc.ch/pub/sa\(E\).pdf](http://www.ipcc.ch/pub/sa(E).pdf) IPCC, 1995, *Second Assessment Climate Change 1995*, IPCC, Genève, p. 22-24.

¹⁹ <http://www.klimaat.be/nl/broeikasGas.html> Staatssecretariaat voor Energie en Duurzame Ontwikkeling, 2006.

²⁰ https://portal.health.fgov.be/portal/page?_pageid=56,512629&_dad=portal&_schema=PORTAL Federale Overheidsdienst Volksgezondheid, Veiligheid van de voedselketen en Leefmilieu, 2006.

vervangproducten (HFK's en PFK's) worden gebruikt als koelmiddel, als drijfgas voor spuitbussen en voor de productie van kunststoffen. De ozon die in de atmosfeer terechtkomt, wordt als dusdanig niet uitgestoten, maar ontstaat door een aantal scheikundige reacties van stikstofoxiden (NO_x), koolstofmonoxide (CO) en vluchtige organische stoffen. Deze drie stoffen worden vooral uitgestoten door de transportsector en de industrie.²¹

De levensduur van de broeikasgassen is onderling sterk verschillend. In Tabel 3.1 wordt per soort de geschatte levensduur aangegeven. De CO_2 bijvoorbeeld die vandaag uitgestoten wordt, blijft nog lange tijd invloed hebben op de werking van het broeikas effect. Naast de groei in de uitstoot van de broeikasgassen, is het cumulatieve effect van de opstapeling van broeikasgassen in de atmosfeer belangrijk een punt om rekening mee te houden.²²

Tabel 3.1: Geschatte levensduur van broeikasgassen

Koolstofdioxide (CO_2)	50 tot 200 jaar
Methaan (CH_4)	± 15 jaar
Distikstofoxide of lachgas (N_2O)	± 120 jaar
Ozon (O_3)	enkele weken tot maanden
CFK's	50 (CFK 11) tot 500 jaar (CFK 115)
HCFK's	1,7 (HCFK 123) tot 22 jaar (HCFK 142b)
Halonen	12 (Halon 1211) tot 110 jaar (Halon 1301)

Bron: <http://www.ipcc.ch> Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006.

²¹ https://portal.health.fgov.be/portal/page?_pageid=56,512629&_dad=portal&_schema=PORTAL
Federale Overheidsdienst Volksgezondheid, Veiligheid van de voedselketen en Leefmilieu, 2006.

²² https://portal.health.fgov.be/portal/page?_pageid=56,512629&_dad=portal&_schema=PORTAL
Federale Overheidsdienst Volksgezondheid, Veiligheid van de voedselketen en Leefmilieu, 2006.

De Federale Diensten voor Leefmilieu melden dat op wereldvlak CO₂ meer dan 50% van het broeikaseffect veroorzaakt. In ontwikkelde landen bestaat de totale uitstoot van broeikasgassen zelfs voor meer dan 80% uit CO₂.²³ Sinds 1751 is ruw geschat 290 miljard ton koolstof in de atmosfeer terecht gekomen. De helft van deze uitstoot gebeurde na midden de jaren '70. De globale fossiele brandstof CO₂-uitstoot bedraagt zo'n 6.975 miljoen ton koolstof voor 2002. Dit is een record sinds de metingen en een stijging van 2% ten opzichte van 2001.²⁴ Dit maakt CO₂ het belangrijkste broeikasgas en dus is het belangrijk dat er op zoek gegaan wordt om de uitstoot van CO₂ in te perken.

3.3 Te verwachten effecten

Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) is een door de Verenigde Naties georganiseerd forum dat wereldwijd 2.500 wetenschappers bijeen brengt. Zij hebben volgens zes mogelijke scenario's een schatting gemaakt van hoe de wereldwijde uitstoot van broeikasgassen zal evolueren tot het jaar 2100. De resultaten van de meest en de minst gunstige voorspelling zijn weergegeven in Tabel 3.2.

²³ https://portal.health.fgov.be/portal/page?_pageid=56,512629&_dad=portal&_schema=PORTAL
Federale Overheidsdienst Volksgezondheid, Veiligheid van de voedselketen en Leefmilieu, 2006.

²⁴ http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/emis/tre_glob.htm Marland, G., Boden T. A. en Andres R. J., 2005, *Global, Regional, and National CO₂ Emissions. In Trends: A Compendium of Data on Global Change.* Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US-DOE, Oak Ridge, Tennessee.

Tabel 3.2: Evolutie van de uitstoot van broeikasgassen op internationaal vlak

Gas	Huidige uitstoot	Meest gunstige scenario	Minst gunstige scenario
	(1990)	(in 2100)	(in 2100)
Koolstofdioxide (CO ₂)	27,1 Gt*	16,9 Gt	131,3 Gt
Methaan (CH ₄)	0,506 Gt	0,546 Gt	1,168 Gt
Lachgas (N ₂ O)	0,040 Gt	0,043 Gt	0,059 Gt

*Gt: gigaton = duizend miljoen ton = miljard ton = duizend miljard kilo

Opmerking: bij de voorspellingen voor CO₂ gaat het alleen om emissies van menselijke oorsprong, voor CH₄ en N₂O gaat het om natuurlijke emissies en emissies van menselijke oorsprong samen. In 1990 bedroegen de natuurlijke emissies 0,340 Gt CH₄ en 0,015 Gt N₂O

Bron: <http://www.ipcc.ch> Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006.

Uiteraard zullen de effecten van de opwarming van de aarde tussen deze scenario's verschillen. De gevolgen voor de temperatuur op aarde en het niveau van de zeespiegel zijn voor het meest gunstige en minst gunstige scenario berekend in Tabel 3.3.

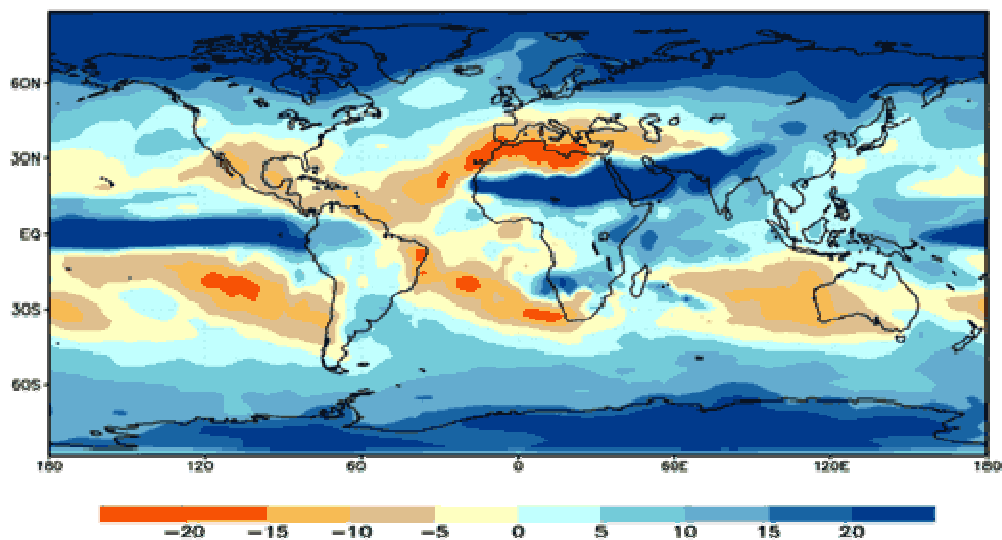
Tabel 3.3: Evolutie van temperatuur en zeespiegel 1990-2100

	Temperatuur	Zeespiegel
Gunstigste projectie voor het jaar 2100	+ 1,4 °C	+ 9 cm
Minst gunstige projectie voor 2100	+ 5,8 °C	+ 88 cm
Beste schatting	+ 2,8 °C	+ 48 cm

Bron: <http://www.ipcc.ch> Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006.

Twee belangrijke effecten zullen het gevolg zijn van het broeikas-effect. Ten eerste zal er een radicalisering van de neerslag plaatsvinden. Hierdoor zal het op droge plaatsen nog minder regenen dan nu en op plaatsen waar het nu al veel regent nog meer (zie Figuur 3.2). Ten tweede is er de algemene verhoging van de temperatuur van de continenten en een zeer duidelijke opwarming van de Noordpool (zie Figuur 3.3).²⁵

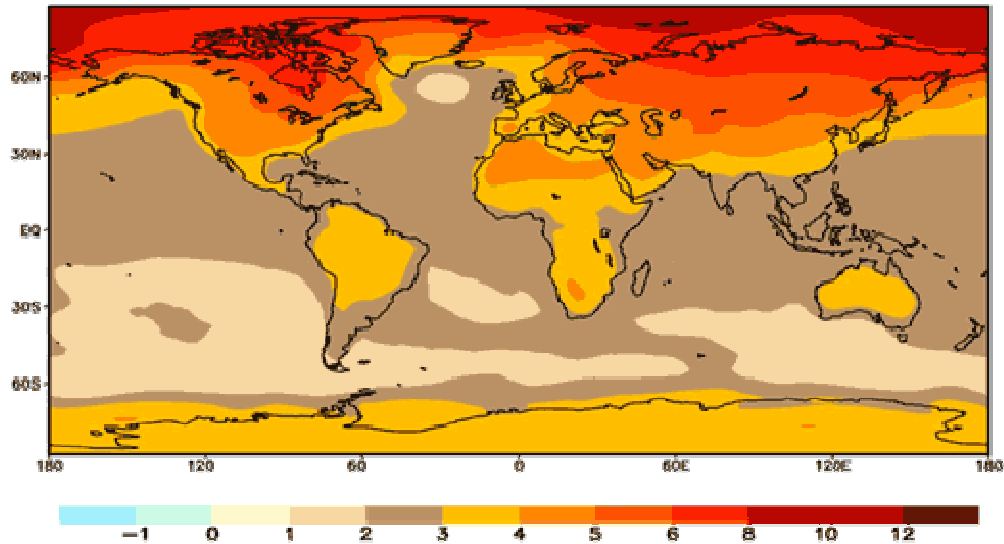
Figuur 3.2: Projectie van de evolutie van de neerslag naar 2071



Bron: <http://www.ipcc.ch> Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006.

²⁵ <http://www.klimaat.be/nl/milieu.html> Staatssecretariaat voor Energie en Duurzame Ontwikkeling, 2006.

Figuur 3.3: Projectie van de verhoging van de temperaturen naar 2085



Bron: <http://www.ipcc.ch> Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006.

Deze twee grote veranderingen in het klimaat beïnvloeden op hun beurt andere weerfenomenen zoals de windcycli en de zeestromingen. Natuurlijk is het niet mogelijk een exacte voorspelling te geven van wat de mensheid te wachten staat door al deze veranderingen in onze leefwereld, maar deskundigen verwachten zich onder andere aan:^{26 27 28}

- Een verdere stijging van de zeespiegel (in de afgelopen eeuw is het zeeniveau al met 10 tot 20 cm) gestegen. Doordat de aarde opwarmt, zet het water in de oceanen uit. Dit zogenoemde ‘chemische effect’ is goed voor 80% van de stijging. Daarnaast is er het effect van het smelten van de ijskappen en het

²⁶https://portal.health.fgov.be/portal/page?_pageid=56,512629&_dad=portal&_schema=PORTAL Federale Overheidsdienst Volksgezondheid, Veiligheid van de voedselketen en Leefmilieu, 2006.

²⁷<http://www.klimaat.be/nl/milieu.html> Staatssecretariaat voor Energie en Duurzame Ontwikkeling, 2006.

²⁸http://mineco.fgov.be/energy/climate_change/climate_change_nl_001.htm Federale Overheidsdienst Economie, KMO, Middenstand en Energie, 2006.

poolijs, wat 20% van de stijging veroorzaakt. Het dichtbevolkte Bangladesh, eilanden als de Malediven en wellicht Nederland zullen hierdoor getroffen worden.

- Door de toename van neerslag in de nu al vochtige gebieden zullen er vaker overstromingen voorkomen. Andere gebieden zullen juist te maken krijgen met een grotere droogte.
- Sommige wetenschappers verwachten dat extreme weersomstandigheden zoals orkanen, zware stormen, hevige regenval enz. nog zullen toenemen in kracht en frequentie.
- Grote klimaatzones zullen verschuiven, met onder andere het verspreiden van tropische ziektes als malaria tot gevolg.
- De landbouw zal worden verstoord doordat landbouwsystemen zullen moeten worden aangepast. Dit zal veel geld kosten, maar ook de voedselvoorziening in de ganse wereld in de war sturen.
- De zoetwatervoorraden zullen afnemen, waardoor het gebrek aan drinkwater dat nu al een mondiaal probleem is nog sneller zal toenemen.

De volledigheid gebiedt te vermelden dat er ook mogelijk positieve gevolgen zijn aan het toenemende broeikaseffect. In koude klimaten zal er bijvoorbeeld een vermindering zijn van de wintersterfte en indien de temperatuurstijging binnen de perken blijft zal in bepaalde gebieden de landbouwproductiviteit kunnen toenemen. Deze kleine voordelen zullen echter niet kunnen opwegen tegen de schade die het broeikaseffect zal aanrichten en ze mogen zeker geen aanleiding zijn om maatregelen om het broeikaseffect af te remmen of uit te stellen.²⁹

²⁹ http://mineco.fgov.be/energy/climate_change/climate_change_nl_001.htm Federale Overheidsdienst Economie, KMO, Middenstand en Energie, 2006.

3.4 Rol van de transportsector

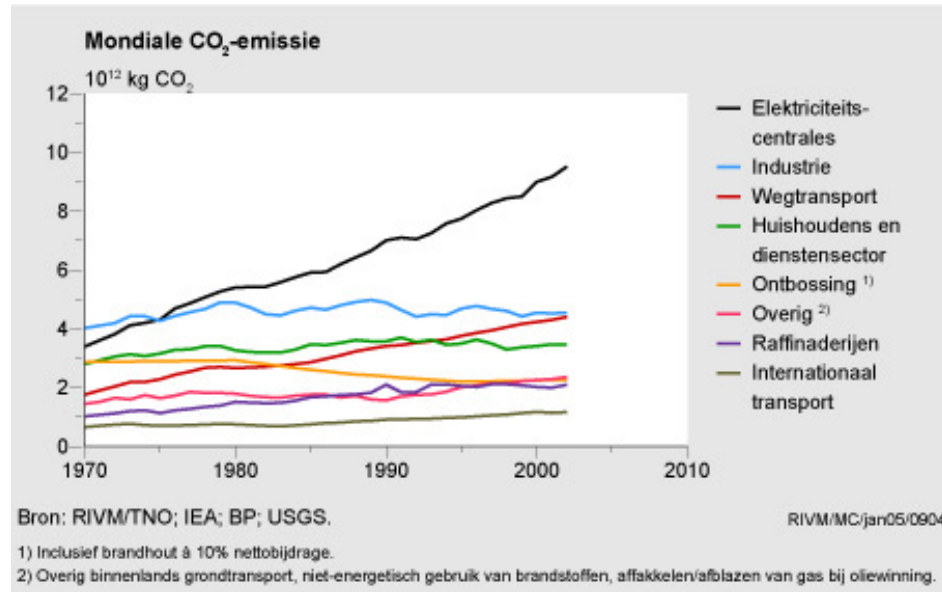
In het vorige hoofdstuk is vermeld dat transport instaat voor meer dan helft van de huidige olieconsumptie en dat men verwacht dat het verbruik in deze sector in de toekomst door de toenemende vraag nog zal stijgen. Het gevolg is dat het transport verantwoordelijk is voor een groot aandeel in de emissie van broeikasgassen.

De publieke elektriciteitsproductie levert met 35% de grootste bijdrage tot de globale CO₂-emissie. De transportsector is verantwoordelijk voor 24% van de uitstoot en is hierdoor de tweede grootste bron van CO₂-vervuiling wereldwijd. Sinds 1990 is de uitstoot via transport toegenomen met 28%, als gevolg van een steeds groter wordende vraag naar mobiliteit wereldwijd. De koolstofdioxide-emissies veroorzaakt door het wegverkeer vormden in 2002 wereldwijd 75% van de totale transportgerelateerde emissies van CO₂.³⁰ Figuur 3.4 geeft deze mondiale CO₂-emissie weer volgens sector. Hierop is duidelijk te zien dat na de elektriciteitscentrales, het wegtransport verantwoordelijk is voor de grootste stijging in de uitstoot van koolstofdioxide. In absolute getallen zijn dit de belangrijkste cijfers: in 2002 bedroeg de totale mondiale CO₂-uitstoot 30.000 miljard kg, waarvan 9.500 miljard kg door de elektriciteitscentrales en 4.400 miljard kg door het wegtransport.³¹

³⁰ <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2000/findings2005.pdf> IEA, 2005, *Findings of Recent IEA Work – 2005*, IEA, Parijs, p. 55.

³¹ <http://www.mnp.nl/mnc/i-nl-0166.html> Milieu en Natuur Planbureau, 2006.

Figuur 3.4: Mondiale CO₂-emissie van 1970 tot 2002



Bron: <http://www.mnp.nl/mnc/i-nl-0166.html> Milieu en Natuur Planbureau, 2006.

Op basis van de huidige gegevens en de trends die men waarneemt op het vlak van energieconsumptie, is men in staat een aantal voorspellingen te maken over de toekomstige evolutie van het energieverbruik in de transportsector. Aangezien de energieconsumptie en de uitstoot van broeikasgassen nauw samenhangen, zal de uitstoot van broeikasgassen en in het bijzonder de CO₂-emissie een gelijkaardige trend vertonen.

Het energieverbruik per capita voor transport stijgt gestaag, maar de toename zwakt langzaam af van 0,9% per jaar tussen 1990 en 2000 naar 0,7% per jaar in de voorspellingen na 2000. In Noord-Amerika is er een daling voorspeld in het energieverbruik voor transport na 2000. Dit is te danken aan de verwachting dat de energie-efficiëntie van de voertuigen in deze regio nog heel wat zal toenemen. Daarnaast zal de verspreiding van de voertuigen in deze regio niet meer zo sterk toenemen. In Europa zal het vraageffect op energie door de stijgende inkomens licht verminderen in het tweede deel van de voorspelling. De oorzaken hiervan zijn de verzadiging en de beperkingen in het wegverkeer door congestie, het niet meer verder

uitbreiden van de verkeersinfrastructuur en de stijgende olieprijsen. Voor de andere regio's geldt er een relatieve afname van de stijging voor de periode 2010 – 2030 ten opzichte van de periode 2000 – 2010. Maar toch moet er rekening gehouden worden met de sterke stijgingen in regio's als China en India, waar de toename in energieverbruik voor het transport geschat wordt op een 3% per jaar, wat nog erg veel is.³²

3.5 Het Kyoto-protocol

Nadat verscheidene onderzoeken herhaaldelijk gewezen hadden op de ernst van de situatie, heeft in 1992 de internationale gemeenschap de eerste grote stap gezet om de uitstoot van broeikasgassen aan banden te leggen. Dit gebeurde op de Conferentie van de Verenigde Naties inzake Klimaatveranderingen in Rio de Janeiro, waar het 'Raamverdrag inzake Klimaatverandering van de Verenigde Naties' (UNFCCC³³ Raamverdrag) werd aangenomen.³⁴ De doelstelling die werd vastgelegd is dat de industrielanden zich moesten inzetten om hun broeikasgasemissies uiterlijk in 2000 terug te brengen op het peil van 1990. Kwantitatieve doelstellingen of planning kwamen in dit verdrag nog niet ter sprake, maar toch vormde het UNFCCC Raamverdrag een eerste belangrijke stap in de bewustwording van de broeikasproblematiek.³⁵ Deze overeenkomst is op 21 maart 1994 in werking getreden en momenteel (februari 2006) onderschreven door 189 landen.³⁶

Hetgeen er in het UNFCCC werd vastgelegd in 1992, kreeg een concrete invulling in 1997, in de vorm van het Kyoto-protocol. In dit verdrag werden strengere en meer gedetailleerde afspraken gemaakt. De industrielanden (die aanzien worden als de

³² <http://www.fusie-energie.nl/artikelen/Outlook2030.pdf> Europese Commissie, 2003, *World Energy, Technology and Climate Policy Outlook 2030*, Europese Commissie, Brussel, p. 30-31.

³³ UNFCCC staat voor 'United Nations Framework Convention on Climate Change'.

³⁴ <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf> United Nations, 1992, *Raamverdrag inzake Klimaatverandering van de Verenigde Naties*, United Nations, New York, 24 p.

³⁵ https://portal.health.fgov.be/portal/page?_pageid=56,512629&_dad=portal&_schema=PORTAL Federale Overheidsdienst Volksgezondheid, Veiligheid van de voedselketen en Leefmilieu, 2006.

³⁶ http://unfccc.int/parties_and_observers/parties/items/2352.php UNFCCC, 2006.

grootste vervuilers op het vlak van broeikasgassen) moeten hun uitstoot tussen 2008 en 2012 op een niveau brengen dat 5,2% lager is dan hun uitstoot van 1990. Per land worden er exacte doelstellingen vastgelegd. De Europese Unie heeft zich ertoe verbonden de uitstoot met 8% terug te dringen (met per land een uitgewerkt streefdoel), de Verenigde Staten met 7% enz.³⁷

Het Kyoto-protocol zou in werking treden zodra 55 landen, die samen verantwoordelijk zijn voor tenminste 55% van de wereldwijde CO₂-uitstoot, het verdrag ratificeerden. President Bush kondigde in maart 2001 aan het verdrag niet te ratificeren, terwijl de Verenigde Staten verantwoordelijk zijn voor 36,1% van de globale CO₂-uitstoot.³⁸ Hierdoor lag de bal in het kamp van President Poetin. Indien Rusland immers het verdrag zou ratificeren, zou het Kyoto-protocol in werking kunnen treden, omdat de grens van 55% van de globale CO₂-emissie hierdoor gehaald zou worden. Rusland had er alle voordeel bij het verdrag te ondertekenen, aangezien het Kyoto-protocol de mogelijkheid voorziet om elders emissierechten te kopen. Rusland beschikt over veel schone lucht, wat betekent dat er heel wat extra inkomsten kunnen ontstaan voor het land door de verkoop van emissierechten.³⁹

De Europese Unie besloot niet te wachten op Rusland om haar Kyoto-doelstellingen te halen. Op 16 maart 2004 zorgde het Europese Parlement ervoor dat het Kyoto-protocol voor de Europese landen reeds in werking kon treden vanaf 1 januari 2005. Hierdoor kon Europa een voorsprong ontwikkelen op de afspraken van het verdrag en gaf het een duidelijk signaal aan de rest van de wereld dat het het terugdringen van de CO₂-uitstoot ernstig nam. Na een lange tijd van beraad en in ruil voor toetreding tot de WTO besloot Rusland op 18 november 2004 dan toch het Kyoto-protocol te onderschrijven, waardoor het Kyoto-protocol op 16 februari 2005 eindelijk helemaal

³⁷ https://portal.health.fgov.be/portal/page?_pageid=56.512629&_dad=portal&_schema=PORTAL Federale Overheidsdienst Volksgezondheid, Veiligheid van de voedselketen en Leefmilieu, 2006.

³⁸ <http://unfccc.int/resource/kpco2.pdf> UNFCCC, 2006.

³⁹ Koninckx, B., 2005, *Milieu en transport: toepassingen van verhandelbare rechten in de transportsector*, LUC, Diepenbeek, 97 p.

in werking is getreden.⁴⁰ Op dit ogenblik (februari 2006) is het Kyoto-protocol door 161 landen geratificeerd. Deze landen zijn samen goed voor 61,6% van de wereldwijde CO₂-emissies.⁴¹

Er zijn verschillende manieren voor een land om de Kyoto-norm te behalen: in eigen land, of via het buitenland. In eigen land kunnen de lidstaten ervoor opteren om de uitstoot van broeikasgassen terug te dringen. Daarnaast kan een land zijn koolstofput (of zogenaamde 'sink') uitbreiden. Hiermee bedoelt men de oppervlakte bosgebied verhogen, zodat er op een natuurlijke manier koolstofdioxide uit de lucht gehaald kan worden. Deze twee opties zijn echter voor de meeste landen onvoldoende om te kunnen voldoen aan de opgelegde norm. Daarom zijn er in het Kyoto-protocol enkele flexibiliteitsmechanismen opgenomen die de landen in staat moeten stellen om over de grenzen heen de uitstoot aan te pakken. Het komt hier op neer: een land kan het eigen niveau van emissie verlagen door te investeren in uitstootreducties in andere landen. De filosofie achter dit initiatief is dat het broeikas effect een wereldwijd probleem is en dat de inspanningen om de klimaatsverandering tegen te gaan over de hele wereld verdeeld moeten worden. Hiervoor zijn er drie flexibele mechanismen in het leven geroepen:^{42 43}

- **Gezamenlijke uitvoering (Joint Implementation):**

Dit systeem geeft een industrieland de mogelijkheid om te investeren in de emissiereductie in een ander land (waar de marginale reductiekosten uiteraard lager zijn). De gerealiseerde CO₂-reductie wordt in dit geval toegeschreven aan het land dat de investering doet.

- **Schone ontwikkelingsmechanisme (Clean Development Mechanism):**

⁴⁰ Koninckx, B., 2005, *Milieu en transport: toepassingen van verhandelbare rechten in de transportsector*, LUC, Diepenbeek, 97 p.

⁴¹ <http://unfccc.int/2860.php> UNFCCC, 2006.

⁴² http://unfccc.int/kyoto_mechanisms/items/2998.php UNFCCC, 2006.

⁴³ Corthout, K. en Renders, C., 2004, *Een analyse van kernenergie en hernieuwbare energiebronnen: is de kernuitstap verenigbaar met het Kyoto-protocol?*, LUC, Diepenbeek, p. 218-219.

Het principe van dit systeem is hetzelfde als bij gezamenlijke uitvoering. Het verschil is echter dat het hier gaat om een industrieland en een ontwikkelingsland dat geen verplichtingen heeft door het protocol. Het industrieland kan via investeringen in propere installaties in het ontwikkelingsland de CO₂-emissie verminderen, terwijl het industrieland zelf het saldo bespaarde emissie mag blijven uitstoten in eigen land.

- **Emissiehandel (Emissions Trading)**

Dit systeem stelt de lidstaten van het protocol in staat een deel van hun verplichtingen om de emissies te reduceren onderling uit te wisselen. Landen die dus niet op andere manieren hun quota zullen halen, kunnen op deze manier ‘propere lucht’ kopen (in de vorm van emissierechten) in landen die wel aan hun verplichtingen kunnen voldoen en een overschot hebben van emissiecapaciteit. Op dit flexibiliteitsmechanisme is heel wat kritiek gekomen, omdat het aan landen de mogelijkheid geeft om investeringen uit te stellen. Rusland heeft bijvoorbeeld een overschot aan emissie en kan dit verkopen aan rijke landen die hun uitstoot niet willen verlagen om hun industrie niet in gevaar te brengen.

Hoe groot de inspanningen echter ook mogen zijn om het Kyoto-protocol te laten slagen, het resultaat zal niet meer zijn dan een druppel op een hete plaat. De reductie van 5% die men met het Kyoto-protocol hoopt te verwezenlijken tegen 2010 zal slechts een verwaarloosbare impact hebben op de globale opwarming in de 21^{ste} eeuw. Men verwacht immers dat, zelfs indien het verdrag toegepast zou worden tot het einde van de 21^{ste} eeuw, dit protocol de verwachte opwarming van 1 tot 2°C tegen 2050 slechts met 0,1°C zou kunnen verminderen.⁴⁴ Reden genoeg dus om uit te kijken naar andere manieren om de uitstoot van broeikasgassen terug te dringen.

⁴⁴ Hoenraet C., 1999, *Energiebronnen en kernenergie: vergelijkende analyse en ethische reflecties*, Acco, Leuven, 169 p.

Hoofdstuk IV: De waterstofeconomie

4.1 Waterstof als energiedrager

Wanneer men overschakelt op duurzame energiebronnen⁴⁵, biedt waterstof zich aan als ideale energiedrager. Bij vele duurzame energiebronnen is het zo dat ze niet altijd evenveel energie produceren, omdat ze afhankelijk zijn van externe omgevingseffecten. Wanneer de zon niet schijnt, leveren zonnepanelen weinig of geen stroom en windturbines zijn van weinig nut als het niet waait. Bovendien stroomt de opgewekte energie weer zomaar weg wanneer ze niet gebruikt wordt. Waterstof zorgt er echter voor dat er een constante energietoevoer naar de consument mogelijk blijft. Waterstof heeft immers de interessante eigenschap dat energie erin ‘opgeslagen’ kan worden en dat het in geconcentreerde vorm kan worden bewaard en benut. Op deze manier kan waterstof een belangrijke spelen rol in de overschakeling naar duurzame energie. De vraag blijft echter hoe de energie tot bij de consument geraakt. Dit kan via een volledig vernieuwd energiedistributiesysteem, maar ook via private mini-elektriciteitscentrales in de vorm van brandstofcellen.⁴⁶ De gehele globale energievoorziening die nu vooral op fossiele brandstoffen gebaseerd is, zal een omschakeling moeten ondergaan tot een op waterstof gebaseerde energievoorziening.

4.2 Decentrale elektriciteitsopwekking

Het gebruik van brandstofcellen is niet beperkt tot de automobielsector. Vandaag al zijn er firma's die woonhuizen en bedrijven uitrusten met vaste brandstofcellen als elektriciteitscentrales. Brandstofcellen kunnen naargelang de energiebehoefte van de eindgebruiker samengesteld worden in modules. Uit een brandstofcel ter grootte van

⁴⁵ Duurzame energiebronnen zijn onder andere: zonne- en windenergie, hydro-elektrische en geothermische energie.

⁴⁶ Rifkin, J., 2004, *De waterstofeconomie: schone en duurzame energie voor iedereen*, Lemniscaat, Rotterdam, p. 222.

een koelkast kan voldoende elektriciteit gehaald worden om een woonhuis van stroom te voorzien. De units voor woonhuizen variëren van één tot vijftien kilowatt. De units in bedrijven leveren 60 tot 250 kilowatt. Ter vergelijking: een brandstofcel in een middenklasse wagen zou ongeveer 70 kilowatt sterk moeten zijn.

Wanneer in de toekomst de vaste brandstofcellen als energiecentrale betaalbaar worden voor de gewone gezinnen, zal de verspreiding ervan toenemen. Dit opent de deur naar een geheel nieuwe manier om elektriciteit bij de eindgebruiker te brengen. Distributed Generation (DG, decentrale elektriciteitsopwekking) is de term die een cruciale rol zal spelen in het nieuwe energietijdperk. Decentrale elektriciteitsopwekking is de opwekking van energie door middel van geïntegreerde of losstaande kleine energiecentrales in de buurt van of dicht bij de eindgebruiker (bijvoorbeeld fabrieken, ondernemingen, overheidsgebouwen, woonwijken en huizen).⁴⁷

Het idee achter DG is niet nieuw, integendeel, het gaat terug naar de beginperiode van de grote energiecentrales. Voordat er een groot aaneensluitend energienet was, was DG meer de regel dan de uitzondering. Pas toen de technische evolutie het toeliet om elektriciteit te transporteren over grote afstanden, werd er een distributienetwerk uitgebouwd. De schaaleconomie leidde tot een toename van de output van de centrales, een groter gebruiksgemak en een lagere eenheidsprijs voor elektrische energie. De toelevering werd op deze manier ook meer verzekerd, omdat de ene energiecentrale vanaf nu het uitvallen van een andere kon opvangen.⁴⁸

Een gelijkaardige evolutie verwacht men door de beschikbaarheid van brandstofcellen als mini-energiecentrales. In de toekomst verwacht men dat men duizenden brandstofcellen onderling gaat verbinden in virtuele elektriciteitscentrales. Deze

⁴⁷ http://www.eere.energy.gov/de/pdfs/dg_economics.pdf Arthur D. Little, 1999, *Distributed Generation: Understanding the Economics*, Arthur D. Little, p. 2.

⁴⁸ http://www.esat.kuleuven.be/electa/publications/fulltexts/pub_1297.pdf Pepermans, G. et al., 2005, Energy Policy 33, *Distributed generation: definition, benefits and issues*, Elsevier, Leuven, p. 787-798.

netwerken zouden samen evenveel elektriciteit kunnen genereren als de huidige gecentraliseerde elektriciteitscentrales. Individuele brandstofcellen zullen over het Internet gekoppeld worden via geavanceerde computersoftware, net zoals de nu bestaande peer-to-peer⁴⁹ netwerken. Dit zal de eindgebruikers toelaten niet alleen hun eigen elektriciteit te produceren, maar deze ook te delen met anderen.⁵⁰ In de toekomst zal de consument kunnen inspelen op de prijsschommelingen op de markt. Deze informatie zal via een digitaal signaal dat in de elektriciteitsstroom zelf verankerd is doorgestuurd worden naar de brandstofcel. De cel analyseert de informatie en zal zelf kunnen beslissen of het voordeliger is over te stappen op de eigen energievoorziening of niet.⁵¹

Het prijsbewust omspringen met elektriciteit is maar één van de voordelen voor de consument. Dankzij distributed generation is hij ook verzekerd van een constante energietoevoer. Naast de voordelen voor de consument, biedt een gedecentraliseerde elektriciteitsopwekking ook voordelen voor de elektriciteitsbedrijven. Het systeem van DG is immers een ideale manier om het huidige elektriciteitsnet te beschermen tegen overbelasting en bij te staan op piekmomenten, zodat stroomonderbrekingen vermeden kunnen worden. Een laatste belangrijk voordeel van decentrale elektriciteitsopwekking is het gunstige milieu-effect. Het gebruiken van brandstofcellen als privé-elektriciteitscentrale laat toe efficiënter om te springen met energie, waardoor de CO₂-uitstoot beperkt kan worden. De eindgebruiker kan immers de warmte die vrijkomt bij het opwekken van elektriciteit zelf gebruiken om zijn huis te verwarmen, water te verwarmen of om meer elektriciteit op te wekken. De elektriciteit en de thermische energie moeten op deze manier niet meer afzonderlijk geproduceerd en getransporteerd worden. Doordat deze zogenaamde 'co-generation'

⁴⁹ Peer-to-peer: ook wel P2P, een computernetwerk dat geen vaste werkstations en servers heeft, maar een aantal aansluitingen die samen tegelijkertijd functioneren als server en werkstation voor de andere aansluitingen in het netwerk, voornamelijk gebruikt om bestanden uit te wisselen.

⁵⁰ <http://www.emagazine.com/view/?171> Rifkin, J., 2003, *The Hydrogen Economy: After Oil, Clean Energy From a Fuel-Cell-Driven Global Hydrogen Web*, E/The Environmental Magazine, Vol. XIV, nr. 1.

⁵¹ Rifkin, J., 2004, *De waterstofeconomie: schone en duurzame energie voor iedereen*, Lemniscaat, Rotterdam, p. 222-239.

het brandstofverbruik met 50% kan verminderen, kan ook de CO₂-uitstoot met 50% gereduceerd worden.^{52 53}

4.3 De auto, de elektriciteitscentrale van de toekomst

Het verhaal van de decentrale energieopwekking op zich is al veelbelovend, maar het wordt pas echt interessant wanneer de link wordt gelegd met de auto's met brandstofcelaandrijving. Het DG-systeem zal zich sneller kunnen ontwikkelen wanneer de auto's op waterstof wijder verspreid worden. Men ziet namelijk de auto van de toekomst als een rijdende elektriciteitscentrale. De gemiddelde wagen staat vandaag 96% van de tijd stil en wordt dus het grootste deel van de tijd niet benut. Een auto met brandstofcellen zal, wanneer hij niet gebruikt wordt als vervoermiddel, in de toekomst echter aangesloten kunnen worden op het huis, het kantoor of het interactieve elektriciteitsnetwerk, zodat de energie die de wagen opwekt, kan terugstromen naar het netwerk. Deze energie kan terug aan het netwerk verkocht worden of voor eigen gebruik benut worden.⁵⁴

Deze denkoefening lijkt abstract, maar berekeningen tonen aan dat dit project een haalbare kaart is. Wanneer een klein percentage van de auto's aangesloten kan worden op het energienetwerk, zou dit al voldoende zijn om een groot deel van de elektriciteitscentrales uit te kunnen schakelen. Tweehonderd miljoen brandstofcelauto's kunnen al vier keer zoveel energie opwekken als momenteel door het netwerk van de Verenigde Staten stroomt. De hoeveelheid energie die dus opgewekt zou kunnen worden door de brandstofcellen van wagens aan te sluiten op het energienetwerk is enorm. Om een voorbeeld te geven: de totale capaciteit van alle

⁵² Rifkin, J., 2004, *De waterstofeconomie: schone en duurzame energie voor iedereen*, Lemniscaat, Rotterdam, p. 229-232.

⁵³ <http://books.google.com/books?ie=UTF-8&hl=nl&vid=ISBN0878147896&id=tslVzJ0h6KoC&pg=PA1&lpg=PA1&dq=chambers+Distributed+Generation&sig=wY8Vp6SVtjgEQ3B0zazq1dmxSXk> Chambers, A., Schnoor, B., Hamilton, S., 2001, *Distributed Generation: A Nontechnical Guide*, PennWell Books, Tulsa, p. 5-6.

⁵⁴ Rifkin, J., 2004, *De waterstofeconomie: schone en duurzame energie voor iedereen*, Lemniscaat, Rotterdam, p. 239-241.

nieuwe auto's die jaarlijks geproduceerd worden, is groter dan de geschatte totale capaciteit van alle elektriciteitscentrales in de wereld.⁵⁵

Op deze manier kan de auto, die momenteel de tweede grootste uitgave is voor een gezin, zich opwerken tot een bron van inkomsten, in plaats van een bron van uitgaven. Veronderstel dat de brandstofcel van twintig kilowatt vijftien uren per dag als mobiele energiecentrale kan werken (65% van de tijd dat de wagen stilstaat en dus niet gebruikt wordt als vervoersmiddel). Stel dat per kilowatt opgewekte energie netto 2 dollarcent opbrengst verkregen wordt, dan levert dit de eigenaar van de brandstofcel 2.190 dollar per jaar op aan inkomsten. Een lichter voertuig met een grotere brandstofcel zou zelfs het dubbele kunnen opbrengen.⁵⁶

Stationaire brandstofcellen kunnen mogelijk het gat dichten tussen grootschalige centrales voor warmte en elektriciteit en kleine boilers. Grote gebouwen zouden uitgerust kunnen worden met hun eigen gecombineerde energiecentrale die zowel warmte als elektriciteit levert. Om een brandstofcel enkel voor energievoorziening te gebruiken, ligt de efficiëntie nog te laag ten opzichte van de beschikbare alternatieven. Maar wanneer men de stationaire brandstofcel zowel voor warmte als voor elektriciteit zou inschakelen, dan kan men een algemene energie-efficiëntie rond 90% bereiken. De kost van een stationaire brandstofcel wordt geacht in de toekomst vijf keer kleiner te zijn, waardoor stationaire brandstofcellen door massaproductie commercieel wel interessant zullen worden.⁵⁷

Om dit alles te kunnen realiseren moet er echter nog heel wat technologische vooruitgang geboekt worden. De brandstofcel moet hiervoor immers een veel langere levensduur krijgen dan normaal is voor huidige wagens. Dit probleem is niet onoverkomelijk, op voorwaarde dat erg zuivere waterstof als brandstof verkregen kan

⁵⁵ <http://www.pur.com/pubs/3664.cfm> Lovins, A. B. en Williams, B. D., 15 februari 2001, *From Fuel Cells to a Hydrogen-based Economy*, Public Utilities Fortnightly, Deel 139, nr. 4. 15.

⁵⁶ <http://www.pur.com/pubs/3664.cfm> Lovins, A. B. en Williams, B. D., 15 februari 2001, *From Fuel Cells to a Hydrogen-based Economy*, Public Utilities Fortnightly, Deel 139, nr. 4. 15.

⁵⁷ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 80.

worden. De technologie om waterstof puur genoeg te maken is momenteel al voorhanden, maar nog niet commercieel beschikbaar. De marginale kosten om dit te realiseren, zullen alleszins gedekt worden door de extra waarde die gecreëerd wordt.⁵⁸

4.4 Europa en de waterstofeconomie

In maart 2000 hebben de verschillende regeringsleiders van de Europese Unie een verdrag ondertekend waarin ze het vooruitstrevende karakter van de Europese Unie op papier vastlegden. Het verdrag kreeg de naam 'Lissabon-strategie' (of Verdrag van Lissabon) en de doelstellingen waren duidelijk: tegen 2010 zou Europa de meest competitieve en dynamische kenniseconomie ter wereld zijn, zonder echter de sociale welvaart en de duurzame ontwikkeling uit het oog te verliezen. Om de vooropgestelde doelstellingen te halen, werden er vele uiteenlopende R&D-projecten opgezet.⁵⁹

Romano Prodi uitte in oktober 2002 als voorzitter van de Europese Commissie de wil om van Europa de eerste op duurzame waterstofenergie gebaseerde grootmacht van de eenentwintigste eeuw te maken. Een overstap van fossiele brandstoffen naar duurzame energie wordt sowieso onvermijdelijk. De toenmalige voorzitter van de Europese Unie realiseerde zich dat Engeland in de negentiende eeuw een economische grootmacht is geworden door steenkool te gaan gebruiken als brandstof voor stoommachines. Op dezelfde manier zijn de Verenigde Staten de belangrijkste economische macht ter wereld geworden in de twintigste eeuw door olie te gebruiken als brandstof voor de verbrandingsmotor. Romano Prodi ziet nu de kans voor Europa om de economische grootmacht van de eeuw te worden door het gebruik van waterstof en brandstofcellen, op voorwaarde dat Europa tijdig in staat zal zijn deze nieuwe technologieën te implementeren.⁶⁰

⁵⁸ <http://www.pur.com/pubs/3664.cfm> Lovins, A. B. en Williams, B. D., 15 februari 2001, *From Fuel Cells to a Hydrogen-based Economy*, Public Utilities Fortnightly, Deel 139, nr. 4. 15

⁵⁹ http://europa.eu.int/growthandjobs/index_en.htm Europese Commissie, 2006.

⁶⁰ Rifkin, J., 2004, *De waterstofeconomie: schone en duurzame energie voor iedereen*, Lemniscaat, Rotterdam, p. 250.

Deze toekomstvisie voor de EU werd vertaald naar één hoofddoelstelling: in 2010 moet 22% van alle elektriciteit en 12% van alle energie in de EU geproduceerd worden door middel van duurzame energiebronnen. Deze cijfers zouden alleen haalbaar zijn wanneer men waterstof zou gebruiken als opslagmedium voor energie. Ondertussen blijkt uit de Green Paper⁶¹ van 8 maart 2006 dat deze doelstelling eerder optimistisch dan realistisch was. Momenteel bedraagt het aandeel van hernieuwbare energiebronnen slechts 6% van de totale Europese energieconsumptie. Het lijkt er dus niet op dat de norm tegen 2010 gehaald zal worden, maar de doelstellingen vormen in ieder geval een aanzet om extra te investeren in het onderzoek naar hernieuwbare energiebronnen.⁶²

Om alles in goede banen te leiden heeft Europese Commissie een aantal organen in het leven geroepen. Zo is er de 'High Level Group on Hydrogen and Fuel Cells', welke in 2002 in Brussel opgestart is. Hier komt een brede groep stakeholders vanuit heel Europa bij elkaar om de rol van waterstof te definiëren in het streven naar een samenleving gebaseerd op duurzame energie.⁶³ ⁶⁴ Een andere instelling is het 'European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform'⁶⁵. Dit multidisciplinaire orgaan biedt een forum voor vertegenwoordigers uit de industrie en uit diverse wetenschapskringen, waar zij hun kennis kunnen samenbrengen om het pad uit te

⁶¹ *Green Paper*: een document opgesteld door de Europese Commissie als handleiding in het overleg dat start op 25 maart 2006 om te komen tot een Europees energiebeleid gericht op veilige, competitieve en duurzame energie. Meer info: http://europa.eu.int/comm/energy/green-paper-energy/index_en.htm

⁶² http://europa.eu.int/comm/energy_transport/doc-technique/doctechlv-en.pdf Europese Commissie, 2006, *Green Paper – Towards a European Strategy for the security of energy supply*, Europese Commissie, Brussel, p. 42-47.

⁶³ http://europa.eu.int/comm/research/energy/nn/nn_rt/nn_rt_hlg/article_1146_en.htm Europese Commissie, 2006.

⁶⁴ http://europa.eu.int/comm/research/transport/tran_trends/hydrogen_en.html Europese Commissie, 2006.

⁶⁵ <http://forum.europa.eu.int/Public/irc/rtd/eurhydrofuelcellplat/home> European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform, 2006.

stippen dat Europa moet volgen om de overschakeling te maken tot waterstofeconomie.⁶⁶

Op 18 maart 2004 heeft toenmalig Europees Commissaris voor Onderzoek Philippe Busquin de Europese inspanningen om over te schakelen op een waterstofgebaseerde economie opgevoerd. 100 miljoen euro aan EU-financiering en 100 miljoen euro privé-investeringen waren reeds toegekend aan onderzoeks- en demonstratieprojecten binnen de Europese Unie na aandringen van het 'Sixth Framework Programme'⁶⁷. Hier bovenop kwamen in 2004 nieuwe voorstellen voor onderzoek en ontwikkeling, dit zijn publieke en private investeringen ter waarde van 300 miljoen euro, waarvan de EU 150 miljoen euro voor haar rekening neemt. Deze projecten luiden de start in van het in 2003 op grote schaal georganiseerde Quick Start initiatief. Dit initiatief werd door Europa genomen om de ontwikkelingen in productie en consumptie van waterstof te versnellen. Het doel is publiek-private partnerships aan te moedigen tussen de industrie, onderzoekscellen en andere partijen, zoals de Europese Investeringsbank. Van de deelstaten van de Europese Unie wordt ook verwacht dat ze hun steentje bijdragen. De Commissie heeft een budget van 2,8 miljard euro voorzien tussen 2004 en 2014 voor onderzoek naar waterstof- en brandstofcelgerelateerde technologieën. Hiermee hoopt men de ambitieuze visie van de European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform te kunnen realiseren.⁶⁸

Nadat ze het voorbeeld van Europa gezien hadden, zijn ook de Amerikaanse bedrijven in 2002 contact gaan zoeken om samen te werken met de overheid. Het energieprogramma dat het Witte Huis hierop uitgewerkt heeft, verschilde echter fundamenteel van dat van Europa. De bedoeling van de regering Bush was namelijk een budget van 1,7 miljard dollar beschikbaar te stellen om onderzoek te financieren

⁶⁶ http://europa.eu.int/comm/enterprise/library/enterprise-europe/issue16/pdf/ee16_nl.pdf Europese Commissie, juli-september 2004, *Onderneming Europa*, Europese Commissie, Brussel, p. 7-9.

⁶⁷ *Sixth Framework Programme (FP6)*: Werkkader van de Europese Unie voor onderzoek, technologische ontwikkeling en de demonstratie ervan. Het is een verzameling van alle activiteiten van de Europese Unie om onderzoek te promoten en te financieren. Meer info: http://europa.eu.int/comm/research/fp6/pdf/fp6-in-brief_en.pdf

⁶⁸ http://europa.eu.int/comm/research/transport/news/article_955_en.html Europese Commissie, 2006.

om waterstof te onttrekken uit steenkool, aardgas en kernenergie. Het onderzoek naar methodes om waterstof uit hernieuwbare energiebronnen te puren werd daarentegen stiefmoederlijk behandeld. Critici en milieuactivisten verweten de regering dat ze probeerde de belangen van haar vrienden in de fossiele brandstoffenindustrie en nucleaire industrie te beschermen.⁶⁹

In zijn jongste State of the Union (31 januari 2006) leek President Bush zich toch meer bewust van de problematiek dan in 2002 en bekende hij dat de Verenigde Staten verslaafd zijn aan olie. Hij kondigde het Advanced Energy Initiative aan, waardoor het onderzoek naar schone energie zou moeten verhogen met 22%. Dit gebeurt via twee kanalen. Enerzijds zijn er investeringen met betrekking tot de energievoorziening van huizen en kantoren. Hier zal gefocust worden op zero-emissie koolcentrales, zonne- en windenergie en propere en veilige kernenergie. Anderzijds moet de manier waarop auto's aangedreven worden veranderen. Extra middelen gaan er naar onderzoek naar betere batterijen voor hybride en elektrische wagens en waterstofauto's. Ook de productiemethodes van ethanol op basis van onder andere graan en houtschilfers worden verder onderzocht, met als doel deze nieuwe vorm van ethanol op een competitieve manier op de markt te brengen binnen zes jaar. Wat de Verenigde Staten voornamelijk wensen te bereiken met de steun in dit onderzoek naar alternatieve energie is meer dan 75% van de olie-import vanuit het Midden-Oosten te vervangen tegen 2025.⁷⁰ Hiermee willen ze, net als Europa overigens, afstappen van hun afhankelijkheid van het Midden-Oosten. Ondertussen voelen ze ook de hete adem van Europa in hun nek, dat geen inspanning schuwt om de economische grootmacht van de eenentwintigste eeuw te worden.

⁶⁹ Rifkin, J., 2004, *De waterstofeconomie: schone en duurzame energie voor iedereen*, Lemniscaat, Rotterdam, p. 250-251.

⁷⁰ <http://www.whitehouse.gov/stateoftheunion/2006/index.html> The State of the Union, 31 januari 2006.

Hoofdstuk V: Waterstofmotoren

Hieronder volgt een overzicht van de verschillende soorten motoren die een auto kunnen aandrijven. Buiten de conventionele benzine- en dieselmotoren, zijn er nog vele andere mogelijkheden om een auto van energie te voorzien. Wagens op LPG zijn ondertussen al vertrouwd in het straatbeeld, maar ook andere brandstoffen worden steeds meer aangewend. Zo zijn er ook auto's die rijden op biodiesel, elektriciteit, alcohol, water enz. Wanneer deze verschillende aandrijfsystemen gecombineerd worden, spreekt men van hybridevoertuigen.

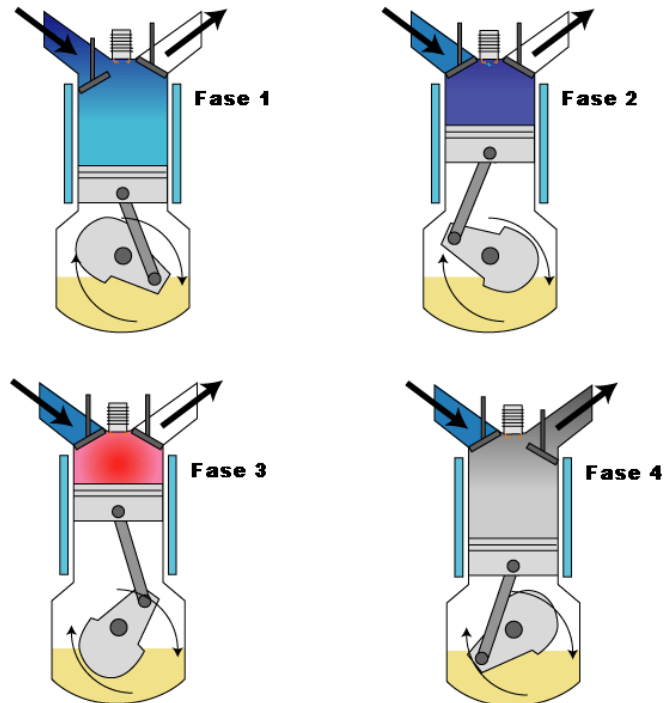
5.1 Soorten motoren gebruikt in de automobielsector

5.1.1 *Benzinemotor*

De benzinemotor zoals men hem aantreft in auto's, grasmaaiers enz., is een vonkontstekingsmotor. Het type van benzinemotor dat het vaakst in personenwagens gebruikt wordt, is de viertaktmotor. Deze naam wijst op de vier fasen die de motor in zijn werking doorloopt (zie Figuur 5.1). De eerste fase is de **inlaatslag**. Tijdens deze fase gaat de zuiger naar beneden en komt er een mengsel van lucht en brandstof in de cilinder. De tweede fase is de **compressieslag**, waarbij de zuiger omhoog gaat en het mengsel samenperst. Tijdens de derde fase, de **arbeidslag**, veroorzaakt een vonk van de ontstekingskaars een ontploffing. Deze explosie duwt de zuiger naar beneden, waardoor de krukas aangedreven wordt. In de laatste fase beweegt de zuiger weer naar boven en worden de uitlaatgassen uit de zuiger geduwd. Deze fase noemt men de **uitlaatslag**. Als de hele cyclus van vier slagen voltooid is, begint alles weer opnieuw.⁷¹

⁷¹ <http://www.emis.vito.be> Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek, 2006.

Figuur 5.1: Werking van de benzinemotor



Bron: www.emis.vito.be Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek, 2006.

5.1.2 LPG-vonkontstekingsmotor

Slechts enkele autoconstructeurs bieden in hun gamma LPG-wagens aan. Het merendeel van de LPG-voertuigen zijn dan ook omgebouwde gewone wagens. In het geval van personenwagens zijn het benzinevoertuigen waarbij de LPG-installatie meestal wordt geïnstalleerd naast het oorspronkelijke brandstofsysteem. Dit noemt men 'bi-fuel'. In vrachtwagens worden de conventionele (diesel)brandstofsysteem meestal helemaal vervangen. Er zijn geen universele LPG-installaties, bijgevolg

moeten per autotype een specifieke sturing en inbouwmaten gebruikt worden. LPG wordt onder een relatief lage druk (ongeveer 8 bar) opgeslagen in een tank.⁷²

5.1.3 Aardgas-vonkontstekingsmotor

Ook aardgas kan gebruikt worden in een vonkontstekingsmotor. Net zoals bij LPG-wagens zijn er systemen die zowel aardgas als benzine verbruiken ('bi-fuel') of enkel aardgas nodig hebben ('dedicated vehicles'). Om aardgas op te slaan maakt men gebruik van speciale opslagtanks, waarin het gas gestockeerd wordt onder een druk van 200 bar. Tussen de tank en de motor bevindt zich een drukregelaar die de druk vermindert tot 8 bar, om de motor zonder problemen te laten functioneren. Om optimale resultaten te verkrijgen, dient het motormanagementsysteem van de benzinemotor nog aangepast te worden, omdat aardgas meer volume inneemt in de verbrandingskamer dan benzine.⁷³

5.1.4 Dieselmotor

De werking van dieselmotoren is grotendeels dezelfde als die van de benzinemotor. Het grote verschil ligt in het ontbreken van de ontploffingskaarsen. Het verbrandingsproces start doordat de temperatuur in de verbrandingskamer zo hoog wordt opgevoerd dat de brandstof spontaan ontbrandt. De hoge temperatuur ontstaat door het samenpersen van het brandstofmengsel. Daarom spreekt men ook wel van compressieontstekingsmotoren. Enkel bij het starten van een dieselmotor is de verbrandingskamer nog te koud voor spontane ontbranding. Daarom wordt bij het starten van een diesel de verbrandingskamer voorgegloeid. Eens de motor draait, is de temperatuur hoog genoeg om zonder hulp van de gloeiplug te werken.⁷⁴

⁷² <http://www.emis.vito.be> Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek, 2006.

⁷³ <http://www.emis.vito.be> Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek, 2006.

⁷⁴ <http://www.emis.vito.be> Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek, 2006.

5.1.5 Biodieselmotor

Deze brandstof wordt aangemaakt uit hernieuwbare producten, meer bepaald plantaardige oliën en dierlijke vetten en vertoont qua eigenschappen grote overeenkomsten met gewone dieselbrandstof. Meestal wordt voor de productie van biodiesel gebruik gemaakt van koolzaadolie, zonnebloemolie, palmolie of sojaolie. Om ze echt geschikt te maken als brandstof, ondergaan deze oliën nog een chemische behandeling met methanol, waardoor ze een betere kwaliteit verkrijgen.⁷⁵

5.1.6 Alcoholen

Zowel ethanol als methanol kan gebruikt worden als brandstof voor voertuigen. Beide worden in vonkontstekingsmotoren gebruikt, maar meestal in een mengvorm met benzine. Ook bestaan er 'Fuel Flexible Vehicles', deze kunnen zowel op pure alcohol, als op benzine rijden. Methanol kan gewonnen worden uit aardgas, biomassa of steenkool, terwijl ethanol voornamelijk geproduceerd wordt uit biomassa (vandaar de naam bio-ethanol). In landen als Brazilië, de Verenigde Staten of Zweden is het gebruik van alcoholen als brandstof al veel meer ingeburgerd dan in ons land. Methanol wordt nog zelden gebruikt in verbrandingsmotoren, maar momenteel is men bezig met de ontwikkeling van een brandstofcel die op methanol werkt. Wanneer men tot 15% alcohol mengt in de benzine moeten er geen grote aanpassingen gebeuren aan de wagen, behalve het vervangen van kunststoffen die niet alcoholbestendig zijn (Europa legt de grens voorlopig op 5%). Bij hogere mengverhoudingen zijn er meer aanpassingen nodig. Een veelgebruikt mengsel is E85, dit is een mengeling van 85% ethanol met 15% benzine. Door kleine hoeveelheden alcohol toe te voegen (tot 22%) aan benzine bekomt men een betere verbranding, met een schonere uitstoot als gevolg. Voor 100% bio-ethanol bedraagt de netto-reductie van de uitstaat aan broeikasgassen zo'n 50 tot 60%. Een nadeel is wel dat ethanol een lagere energiedichtheid heeft dan

⁷⁵ <http://www.emis.vito.be> Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek, 2006.

benzine, waardoor er tot 30% meer verbruikt wordt in vergelijking met benzine.⁷⁶ In Zweden bieden Saab, Volvo en Ford modellen aan die op ethanol rijden. Deze modellen zullen in de toekomst ook in andere landen worden aangeboden. Saab test ondertussen de mogelijkheid van een hybridevoertuig aangedreven door een motor op bio-ethanol en twee elektromotoren.

5.1.7 Elektromotor met batterij

Over het algemeen bestaat het aandrijfsysteem van een elektrische auto uit de volgende elementen: batterijen, een batterijlader, een elektrische motor met elektronische regeling, een transmissie en een overbrenging op de wielen. Er zijn meerdere types van motoren die gebruikt worden om auto's aan te drijven. Deze elektrische motoren zijn veel efficiënter dan gewone verbrandingsmotoren en beschikken over een hoger koppel bij de lage toeren, wat een beter rijcomfort in de hand werkt. Dit hoge koppel in de lage toeren is meteen ook één van de redenen waarom constructeurs zich tegenwoordig toespitsen op hybridewagens.⁷⁷

5.1.8 Hybride

Een hybride is een wagen waarin verschillende aandrijfvormen gecombineerd worden. Meestal zijn dit een benzinemotor en een elektromotor met batterij. Ook andere vormen zijn mogelijk, zoals een dieselmotor gekoppeld aan een elektrische motor, wat binnenkort op de markt gebracht zal worden. Conventionele voertuigen hebben gemiddeld genomen tijdens tweederde van de rit niet meer dan 50% van het piekvermogen van de motor nodig. Voor het grootste deel van de rit volstaat dus een minder krachtige motor. In de meeste gevallen gebruiken de hybridevoertuigen de verbrandingsmotor voor constante snelheden en levert de elektrische motor extra

⁷⁶ <http://www.emis.vito.be> Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek, 2006.

⁷⁷ <http://www.emis.vito.be> Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek, 2006.

vermogen bij het optrekken en versnellen. De elektrische motor haalt zijn energie uit een grote accu, die tijdens het rijden opgeladen kan worden door remenergie terug te winnen.⁷⁸ De voordelen van hybridevoertuigen zijn legio: de verbrandingsmotor kan verkleind worden, wat een hogere globale efficiëntie als gevolg heeft (een rendement van 35% tot 40% tegen 18% voor een gewone benzinemotor), een lager verbruik voor betere prestaties, lagere emissies van broeikasgassen enz. Omdat twee aandrijfsystemen met elkaar gekoppeld moeten worden, ligt de aanschafprijs van een hybridewagen echter hoger dan die van een conventionele auto.⁷⁹

5.1.9 Waterstof-vonkontstekingsmotor

Net als LPG kan waterstof gebruikt worden in een vonkontstekingsmotor. Omdat de zelfontbrandingstemperatuur van waterstof erg hoog is, moet net als bij een benzinemotor de ontbranding gebeuren met behulp van een ontsteking. Een belangrijk verschil is dat waterstof alleen gasvormig geïnjecteerd kan worden. Om een verbrandingsmotor op waterstof te laten werken, moeten er een aantal aanpassingen gebeuren aan de motor ten opzichte van een gewone verbrandingsmotor op diesel, benzine of LPG. Deze aanpassingen zijn op de dag van vandaag al perfect uitvoerbaar, en zijn bovendien niet van die aard dat ze het gebruik van een andere brandstof beletten. BMW plant voor ten laatste 2008 de beperkte serieproductie van een auto met een waterstof-vonkontstekingsmotor (zie Figuur 5.2). Deze motor is een aangepaste benzinemotor en heeft een aparte waterstoftank en benzinetank, waardoor hij in staat is deze twee soorten brandstof te gebruiken.

⁷⁸ www.osiris.tudelft.nl/main/documents/waterstof.pdf OSIRIS, 2006.

⁷⁹ <http://www.emis.vito.be> Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek, 2006.

Figuur 5.2: BMW 745h met waterstof-vonkontstekingsmotor



Bron: www.bmwgroup.com BMW Group, 2006.

Waterstof heeft een breed ontstekingsgebied, wat betekent dat het verbrand kan worden in een breed gebied van brandstof/luchtmengsels. Er moet wel opgemerkt worden dat er bij de verbranding van waterstof in een vonkontstekingsmotor stikstofoxiden (NO_x) vrijkomen. De hoeveelheid NO_x die uitgestoten wordt, is weliswaar tot 90% lager dan bij een vonkontstekingsmotor op benzine. Een mager mengsel (weinig waterstof, veel lucht) levert een lager verbruik en een lagere dosis NO_x (stikstofoxiden) in de uitstoot, maar ook een lager vermogen. Bij rijke mengsels (veel waterstof, weinig lucht) is het vermogen hoger, maar ook het verbruik en de uitstoot van NO_x . Er is geen CO_2 -uitstoot bij verbranding van waterstof, al kan een kleine hoeveelheid CO_2 wel uitgestoten worden als gevolg van het verbranden van motorolie.^{80 81}

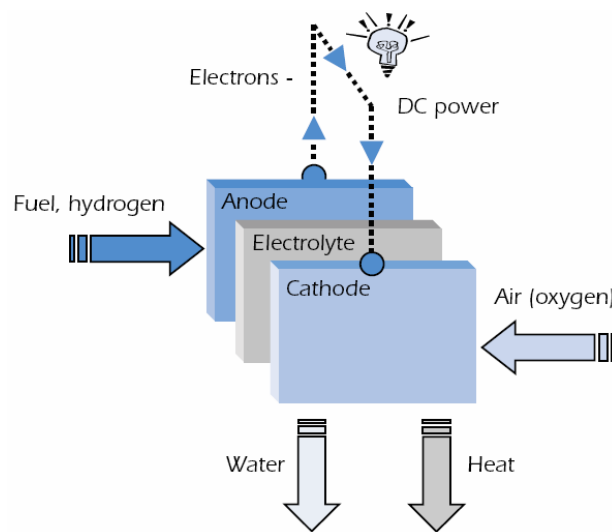
⁸⁰ www.emis.vito.be Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek, 2006.

⁸¹ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 95.

5.1.10 Brandstofcel

Een brandstofcel (of 'fuel cell') is een elektrochemisch apparaat dat chemische energie omzet in elektrische energie. Ze bestaat uit twee elektrodes⁸²: een negatieve anode en een positieve kathode, met daartussen een elektrolyt⁸³. In Figuur 5.3 wordt een vereenvoudigd schema gegeven van de binnenkant van een brandstofcel.

Figuur 5.3: Schematische weergave van een brandstofcel



Bron: IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 81.

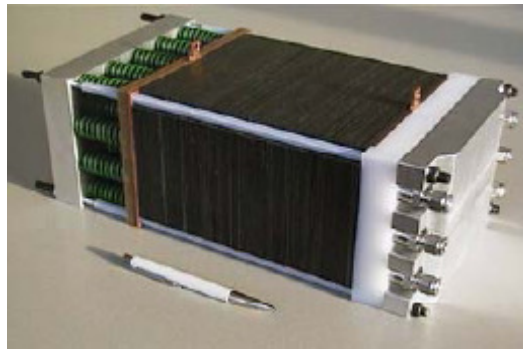
Eenvoudig gesteld werkt een brandstofcel als volgt. De brandstof (meestal waterstof, of een andere brandstof rijk aan waterstof) wordt toegevoegd aan een anode. Zuurstof wordt toegevoegd aan de kathode. Vervolgens vindt een chemische reactie plaats, namelijk elektrolyse. Hierbij splitsen de waterstofatomen zich in protonen en elektronen, welke beide een verschillende weg volgen naar de kathode. De elektronen gaan via een extern circuit naar de kathode en creëren hierdoor de beoogde elektrische stroom. De protonen bewegen doorheen het elektrolyt naar de kathode en komen daar

⁸² *Elektrode*: een stroomgeleider (meestal een metalen draadje of plaatje) in een elektrolyt.

⁸³ *Elektrolyt*: de stof die in waterige oplossing de elektrische stroom geleid tussen de anode en de kathode en die daarbij gesplitst wordt.

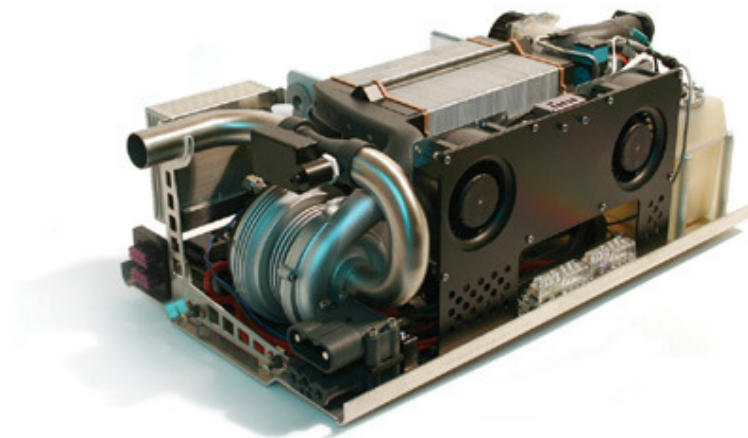
weer samen met de elektronen. De protonen en elektronen verbinden zich daar met de zuurstof en vormen zo warmte en water.^{84 85} Afzonderlijke brandstofcellen worden samengevoegd tot een ‘fuel cell stack’ om zo tot het gewenste vermogen te komen (zie Figuur 5.4). Figuur 5.5 is een foto van een volledige fuel cell stack van het type PEM met een vermogen van 10 kW, geproduceerd door Intelligent Energy en klaar om in te bouwen, inclusief inlaten voor lucht en waterstof.

Figuur 5.4: PEM fuel cell stack van 2,5 kW



Bron: www.ecn.nl Energy research Centre of the Netherlands, 2006.

Figuur 5.5: PEM fuel cell stack van Intelligent Energy



Bron: www.intelligent-energy.com Intelligent Energy, 2006.

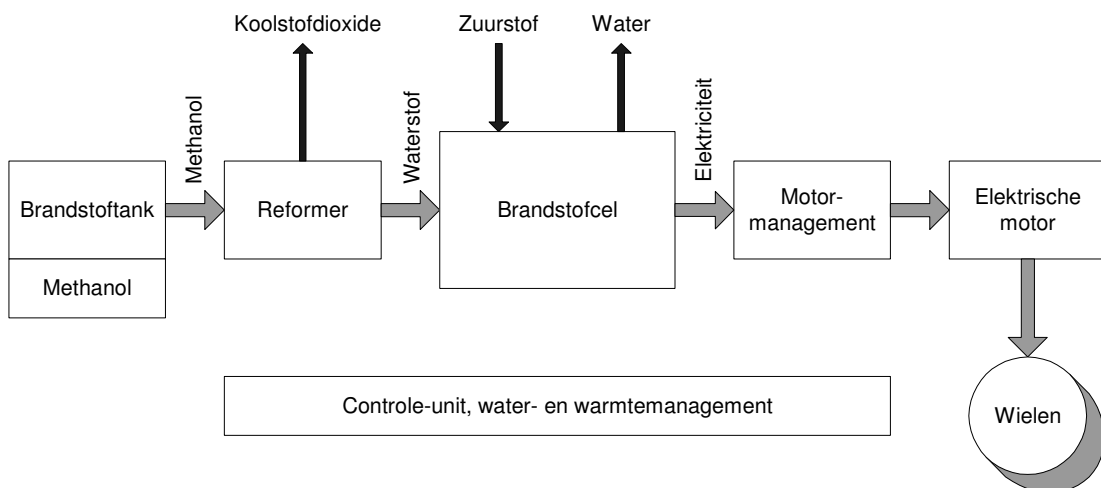
⁸⁴ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 81.

⁸⁵ <http://www.emis.vito.be> Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek.

Het is mogelijk brandstofcellen te laten werken op andere stoffen dan waterstof, bijvoorbeeld methanol of aardgas. Het is echter zo dat de voordelen van de brandstofcel het grootst zijn wanneer er gebruik wordt gemaakt van waterstof. Wanneer men de hele energicyclus beschouwt van bron tot wiel, is de energie-efficiëntie het hoogst en de uitstoot van schadelijke stoffen zoals CO₂ het laagst wanneer men waterstof als brandstof gebruikt voor de brandstofcel.⁸⁶ Meer hierover volgt in punt 5.2.

Een andere mogelijkheid is dat de brandstofcel van de wagen op waterstof werkt, maar dat er toch een andere brandstof getankt kan worden. Een nadeel is dan wel dat hiervoor een 'reformer' nodig is, om de waterstof aan boord van het voertuig te splitsen van de getankte brandstof. De rol van de reformer wordt duidelijk weergegeven in onderstaand schema (Figuur 5.6).

Figuur 5.6: Reformer in een brandstofcelsysteem met methanol als brandstof



Bron: www.emis.vito.be Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek, 2006.

⁸⁶ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 80.

Een reden om te kiezen voor het tanken van een andere brandstof dan waterstof, is dat hierdoor het probleem van het opslaan van waterstof uit de weg gegaan wordt. Waterstof heeft immers een lage energiedensiteit en doordat er slechts een beperkte hoeveelheid waterstof opgeslagen kan worden, is er slechts een beperkt rijbereik mogelijk. Wanneer aan boord van de wagen waterstof uit een andere brandstof met een hogere energiedichtheid (en die bovendien gemakkelijker opgeslagen kan worden) gehaald kan worden, kan een groter rijbereik gerealiseerd worden.

Een aandrijfsysteem met een brandstofcel bestaat doorgaans uit vier componenten: een opslagtank voor waterstof, een brandstofcel, een elektromotor en eventueel een batterij. Wanneer zoals hierboven vermeld een andere brandstof gebruikt wordt, dan is een reformer nodig. De batterij is er om eventueel de brandstofcel op te starten en om overtollige energie op te vangen en op te slaan.⁸⁷

5.2 Verschillende types brandstofcellen

Momenteel wordt er volop onderzoek gevoerd naar verschillende soorten brandstofcellen. De ontwikkeling van de ene brandstofcel staat al wat verder dan de andere. Bovendien heeft elke soort brandstofcel specifieke kenmerken, dus ook eigen voor- en nadelen. Hieronder wordt een overzicht gegeven van de zes meest besproken soorten brandstofcellen.

5.2.1 Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC)

De Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC's), ook wel Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC's) of Polymer Electrolyte Fuel Cells (PEFC's) genoemd, worden vandaag beschouwd als de meest beloftevolle brandstofceltechnologie. Ze leveren een hoge krachtdensiteit, gecombineerd met een

⁸⁷ www.emis.vito.be Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek, 2006.

laag gewicht en volume in vergelijking met andere brandstofcellen. Doordat hun werkingstemperatuur relatief laag is (80°C), is de opstarttijd van de PEMFC kort. Er is immers maar een korte opwarmtijd nodig. Hierdoor zijn ze voornamelijk geschikt om te gebruiken in auto's of bussen. Een nadelig gevolg van die lage werkingstemperatuur is wel dat brandstofcel van een goede koeling moet worden voorzien, om oververhitting te vermijden.^{88 89}

De PEMFC maakt gebruik van zuurstof uit de buitenlucht en pure waterstof. De katalysator die deel uitmaakt van deze brandstofcel, moet vervaardigd zijn uit edelmetaal (meestal platina). Dit zorgt ervoor dat de kostprijs van dit soort brandstofcel hoog is. Bovendien is dit onderdeel erg gevoelig voor onzuiverheden (de aanwezigheid van CO) die optreden wanneer de waterstof aan boord van de wagen gevormd wordt door een reformer. Hierdoor daalt het vermogen van de brandstofcel. Om dit probleem te omzeilen kan men een filter installeren om ervoor te zorgen dat de waterstof extra gezuiverd wordt van CO, maar dit verhoogt natuurlijk ook de kostprijs van de brandstofcel.^{90 91}

Wereldwijd wordt er via verschillende projecten onderzoek gedaan naar het optimaliseren van de PEMFC. Momenteel focust het onderzoek zich onder andere op een ander elektrolyt (platina-ruthenium) en op een membraan dat beter bestand is tegen onzuiverheden in de waterstof, om het gebruik van een reformer mogelijk te maken zonder vermogensverlies. Wetenschappers in België proberen het design van de brandstofcel te verbeteren en onderzoeken in het kader van het ACCEPT-onderzoeksprogramma de mogelijkheid om PEMFC's te laten werken op ammoniak, om PEMFC's met een reformer te kunnen gebruiken in auto's.^{92 93 94}

⁸⁸ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 82.

⁸⁹ <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/hydrogen.pdf> IEA, 2004, *Hydrogen & Fuel Cells, Review of National R&D Programs*, IEA/OECD, Parijs, p. 24-25.

⁹⁰ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 82.

⁹¹ <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/hydrogen.pdf> IEA, 2004, *Hydrogen & Fuel Cells, Review of National R&D Programs*, IEA/OECD, Parijs, p. 24-25.

⁹² IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 82.

5.2.2 Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFC)

Deze brandstofcellen danken hun naam aan het gebruik van vloeibaar fosforzuur als elektrolyt. De PAFC wordt beschouwd als de brandstofcel van de eerste generatie en is al gecommmercialiseerd: zo'n 250 exemplaren zijn ervan verkocht door het bedrijf United Technologies Corporation. Dit type van brandstofcel wordt gebruikt als energiecentrale, maar is ook geschikt om in te bouwen in grotere voertuigen, zoals bussen.^{95 96}

PAFC's zijn niet zo gevoelig voor onzuiverheden in de gereformeerde brandstof zoals PEMFC's. Ze zijn 85% efficiënt wanneer men ze gebruikt voor de co-generatie van warmte en elektriciteit, maar deze efficiëntie zwakt af tot 37 à 42% wanneer ze enkel gebruikt worden als elektriciteitscentrale. Hiermee doen ze maar net beter dan krachtcentrales gebaseerd op een ontstekingsmotor (33 tot 35% energie-efficiëntie).⁹⁷ Vergeleken met de andere soorten brandstofcellen, zijn ze minder krachtig voor hetzelfde gewicht en volume. Dit is ook de reden waarom deze PAFC's zwaar en groot zijn. Net als de PEMFC's hebben ze een katalysator van platina, wat zwaar doorweegt op de kostprijs van deze brandstofcel. De kostprijs van een PAFC bedraagt vandaag 4.000 tot 4.500 dollar per kilowatt.^{98 99}

De technologie van de PAFC staat vandaag op punt, maar biedt geen uitzicht meer op verdere innovaties. Het is daarom ook dat bovengenoemd bedrijf gestopt is met de

⁹³ <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/hydrogen.pdf> IEA, 2004, *Hydrogen & Fuel Cells, Review of National R&D Programs*, IEA/OECD, Parijs, p. 31-32.

⁹⁴ http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html

⁹⁵ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 82-83.

⁹⁶ <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/hydrogen.pdf> IEA, 2004, *Hydrogen & Fuel Cells, Review of National R&D Programs*, IEA/OECD, Parijs, p. 25.

⁹⁷ http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html US-DOE.

⁹⁸ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 82-83.

⁹⁹ <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/hydrogen.pdf> IEA, 2004, *Hydrogen & Fuel Cells, Review of National R&D Programs*, IEA/OECD, Parijs, p. 25.

productie van de PAFC en overgeschakeld is op de PEMFC, die veel meer potentieel biedt om in de toekomst op productiekosten te kunnen besparen.^{100 101}

5.2.3 *Direct Alcohol Fuel Cells (DAFC)*

Onder deze noemer vallen zowel de Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) als de Direct Ethanol Fuel Cell (DEFC). De DMFC verbruikt in tegenstelling tot de andere brandstofcellen geen zuivere waterstof, maar methanol. Methanol moet dus niet eerst door een reformer gesplitst worden, maar wordt direct gebruikt. Omdat methanol een hogere energiedensiteit heeft dan waterstof, is ook het opslaan van de brandstof eenvoudiger dan voor waterstof. Ook het transporteren en distribueren van methanol verloopt eenvoudig, omdat het, bijvoorbeeld net als benzine, vloeibaar is.^{102 103}

De technologie van de DMFC is relatief jong en het onderzoek loopt drie tot vier jaar achter op de andere brandstofcellen. De efficiëntie van deze brandstofcel bedraagt momenteel slechts 15 tot 20%, maar men verwacht een efficiëntie van 40% te kunnen bereiken. Hoewel de lage efficiëntie een domper is, is er toch een markt voor deze brandstofcellen, vooral omdat methanol voor dagelijks gebruik een praktische brandstof is. Men verwacht dat de DMFC vooral succes zal hebben als vervanging van batterijen in draagbare toestellen zoals gsm's en laptops. In deze vorm zijn ze reeds beschikbaar.^{104 105}

Net zoals methanol is ook ethanol geschikt om brandstofcellen aan te drijven (DEFC's). De laatste jaren is het onderzoek naar dit type brandstofcel wat afgenomen,

¹⁰⁰ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 82-83.

¹⁰¹ <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/hydrogen.pdf> IEA, 2004, *Hydrogen & Fuel Cells, Review of National R&D Programs*, IEA/OECD, Parijs, p. 25.

¹⁰² IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 83.

¹⁰³ <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/hydrogen.pdf> IEA, 2004, *Hydrogen & Fuel Cells, Review of National R&D Programs*, IEA/OECD, Parijs, p. 25.

¹⁰⁴ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 83.

¹⁰⁵ <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/hydrogen.pdf> IEA, 2004, *Hydrogen & Fuel Cells, Review of National R&D Programs*, IEA/OECD, Parijs, p. 25.

wegens de minder gunstige eigenschappen van ethanol. Recent onderzoek toont echter aan dat deze problemen overwonnen kunnen worden en wijzen in de richting van een efficiëntie van 42 tot 45%. Als deze resultaten bevestigd worden, dan zal het onderzoek naar DEFC's opnieuw een vlucht nemen, want in dat geval komen deze brandstofcellen in aanmerking om gebruikt te worden in auto's.¹⁰⁶

5.2.4 Alkaline Fuel Cells (AFC)

De Alkaline Fuel Cell is één van de eerste types brandstofcellen die ontworpen zijn en deze zijn door de NASA vaak gebruikt om elektriciteit en water te produceren in de ruimte. Deze brandstofcellen gebruiken geen duur edelmetaal als katalysator en hebben gewoonlijk een werkingstemperatuur van tussen 100 en 250°C. Voor recente versies ligt deze temperatuur tussen 23 en 70°C. Ze behalen een energie-efficiëntie tot 60%, maar ze zijn erg gevoelig voor CO₂-vervuiling. Hierdoor is het haast onmogelijk AFC's te gebruiken in voertuigen, omdat zelfs de kleinste hoeveelheid CO₂ in de lucht de werking en de levensduur van de cel kan beïnvloeden. Om een goede werking te garanderen, moeten waterstof en zuurstof gezuiverd worden, maar uiteraard verhoogt dit de kost van het systeem.^{107 108}

Voor de NASA is de kost niet de doorslaggevende factor, maar de prijs is wel belangrijk met het oog op commercialisering. Dit type brandstofcel heeft daarnaast een levensduur van 8.000 uren, wat ver onder het streefgetal van 40.000 uren ligt dat nodig is om commercieel te kunnen overleven. Wegens de hoge kost en de korte levensduur is deze brandstofcel dus geen commercieel succes. Het onderzoek op dit soort brandstofcel is de laatste jaren dan ook stevig teruggeschoefd.^{109 110 111}

¹⁰⁶ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 83.

¹⁰⁷ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 84.

¹⁰⁸ <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/hydrogen.pdf> IEA, 2004, *Hydrogen & Fuel Cells, Review of National R&D Programs*, IEA/OECD, Parijs, p. 26.

¹⁰⁹ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 84.

¹¹⁰ <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/hydrogen.pdf> IEA, 2004, *Hydrogen & Fuel Cells, Review of National R&D Programs*, IEA/OECD, Parijs, p. 26.

5.2.5 Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC)

MCFC's worden in hoofdzaak ontwikkeld om elektriciteit op te wekken in aardgas- of steenkoolcentrales en voor industriële en militaire doeleinden. Ze functioneren op een erg hoge temperatuur van 650°C en meer, waardoor er gebruik gemaakt kan worden van goedkope metalen als katalysator. Ze bereiken een efficiëntie van 60%, wat aanzienlijk meer is dan de 37 tot 42% efficiëntie van de PAFC's. Wanneer ook de warmte opgevangen en gebruikt wordt (co-generation), bedraagt de efficiëntie zelfs 85%.^{112 113}

MCFC's werken niet op waterstof, maar wel op aardgas. Door de hoge werkingstemperatuur is het niet nodig een externe reformer te gebruiken. De brandstof wordt immers door de hoge temperatuur in de cel zelf omgezet in waterstof. Dit wordt internal reforming genoemd. Het kunnen weglaten van een reformer heeft een positieve invloed op de kostprijs. Het grootste nadeel van de MCFC is de duurzaamheid van de brandstofcel. De hoge werkingstemperatuur en de kwetsbaarheid van de elektrolyt liggen aan de basis van de beperkte levensduur.^{114 115}

Hoewel ze niet zo gevoelig zijn als andere brandstofcellen voor onzuiverheden in de brandstof, onderzoeken wetenschappers momenteel toch nog hoe ze de MCFC bestendig kunnen maken tegen de onzuiverheden afkomstig van steenkool. Daarnaast zijn ze ook op zoek naar een minder kwetsbaar materiaal om te gebruiken als elektrolyt, waarmee ze de levensduur van de cel kunnen verlengen, zonder de prestaties te beïnvloeden.^{116 117}

¹¹¹ <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/hydrogen.pdf> IEA, 2004, *Hydrogen & Fuel Cells, Review of National R&D Programs*, IEA/OECD, Parijs, p. 35.

¹¹² IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 84-85.

¹¹³ <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/hydrogen.pdf> IEA, 2004, *Hydrogen & Fuel Cells, Review of National R&D Programs*, IEA/OECD, Parijs, p. 27.

¹¹⁴ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 84-85.

¹¹⁵ <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/hydrogen.pdf> IEA, 2004, *Hydrogen & Fuel Cells, Review of National R&D Programs*, IEA/OECD, Parijs, p. 27.

¹¹⁶ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 84-85.

5.2.6 *Solid Oxide Fuel Cells (SOFC)*

Solid Oxide Fuel Cells gebruiken een hard materiaal als elektrolyt en moeten daarom niet in de typische platenstructuur gebouwd worden. Ze worden beschouwd als de meest belovende brandstofcellen voor het gebruik als energiecentrale. In het omzetten van brandstof naar elektriciteit zijn SOFC's tot 70% efficiënt. De efficiëntie kan oplopen tot 80-85% wanneer er 'co-generation'¹¹⁸ wordt toegepast. Dit type brandstofcel heeft een erg hoge werkingstemperatuur van 800 tot 1000°C, wat verschillende voordelen heeft. Zo kan er gebruik worden gemaakt van een niet te duur metaal als elektrolyt en is er geen reden om een reformer te gebruiken, want door de hoge temperatuur wordt brandstof intern in de brandstofcel omgezet naar waterstof ('internal reforming'). Dit zorgt ervoor dat de kostprijs van de SOFC gedrukt kan worden. Ze zijn meer bestand tegen solfer dan andere cellen en zijn resistent tegen carbon monoxide (wat zelfs als brandstof gebruikt kan worden). Hierdoor kunnen SOFC's gas afkomstig van steenkool als brandstof gebruiken.^{119 120}

De hoge temperatuur heeft echter ook nadelen: de brandstofcel lijdt onder een lange opstarttijd en moet voldoende afgeschermd worden wegens de hitte. Hierdoor is deze brandstofcel niet geschikt om te gebruiken in voertuigen, maar wel als energiecentrale. Bovendien heeft de hoge werkingstemperatuur een negatief effect op de levensduur van de brandstofcel.^{121 122}

Het ontwikkelen van goedkopere en meer duurzame materialen krijgt momenteel de aandacht van onderzoekers. Ze hopen ook de werkingstemperatuur van de SOFC naar

¹¹⁷ <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/hydrogen.pdf> IEA, 2004, *Hydrogen & Fuel Cells, Review of National R&D Programs*, IEA/OECD, Parijs, p. 27.

¹¹⁸ *Co-generation*: het gezamenlijk opwekken van warmte en elektriciteit.

¹¹⁹ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 85.

¹²⁰ <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/hydrogen.pdf> IEA, 2004, *Hydrogen & Fuel Cells, Review of National R&D Programs*, IEA/OECD, Parijs, p. 28.

¹²¹ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 85.

¹²² <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/hydrogen.pdf> IEA, 2004, *Hydrogen & Fuel Cells, Review of National R&D Programs*, IEA/OECD, Parijs, p. 28.

beneden te brengen tot 800°C om de levensduur te verlengen. Bij een lagere temperatuur neemt het vermogen echter af en er is voorlopig nog geen materiaal gevonden om de cel te laten werken met deze lagere temperatuur.¹²³

5.2.7 Andere types brandstofcellen

Het onderzoek naar brandstofcellen staat duidelijk niet stil. Al deze inspanningen zorgen er niet alleen voor dat de bestaande brandstofcellen alsmear beter worden, maar resulteren ook in het ontstaan van volledig nieuwe types van brandstofcellen. Twee recente types waarvan het onderzoek nog in de kinderschoenen staat, zijn de Hydrogen Membrane Fuel Cells en de Regenerative Fuel Cells.

De Hydrogen Membrane Fuel Cells (HMFC's) zijn ontwikkeld door Toyota om later gebruikt te kunnen worden in auto's. Ze hebben een werkingstemperatuur van om en bij de 500°C, zijn slechts 1 tot 1,5mm dik en hebben geen platina katalysator. Men hoopt met behulp van een reformer koolwaterstoffen, alcohol of dimethyl ether als brandstof te kunnen gebruiken. Door de hoge temperatuur is er geen nood aan een CO-vernietiger, maar heeft de brandstofcel wel een lange opstarttijd nodig.¹²⁴

Regenerative Fuel Cells produceren zoals een normale brandstofcel elektriciteit van waterstof en zuurstof, met als bijproducten warmte en water. Zij zijn echter in staat om via zonne-energie (of een andere soort energie) het vrijgekomen water weer om te zetten in waterstof en zuurstof via elektrolyse. Deze relatief jonge brandstofcel is momenteel in ontwikkeling bij de NASA.¹²⁵

¹²³ <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/hydrogen.pdf> IEA, 2004, *Hydrogen & Fuel Cells, Review of National R&D Programs*, IEA/OECD, Parijs, p. 28.

¹²⁴ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 83.

¹²⁵ http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html US-DOE, 2006.

Tabel 5.1 biedt een overzicht van de belangrijkste brandstofcellen. In deze tabel staan per soort brandstofcel de efficiëntie, de werkingstemperatuur, de gebruiksmogelijkheden, de voordelen en de nadelen vermeld.

Tabel 5.1: Vergelijkingstabel belangrijkste types brandstofcellen

Brandstofceltype	Efficiëntie	Werkings-temperatuur	Gebruiksmogelijkheden	Voordelen	Nadelen
<i>Polymer Electrolyte Membrane (PEMFC)</i>	45%	80 – 100°C	<ul style="list-style-type: none"> • Transport • Energiecentrale • Draagbare toepassingen 	<ul style="list-style-type: none"> • Laag gewicht, klein volume • Lage temperatuur • Korte opstarttijd 	<ul style="list-style-type: none"> • Koeling nodig • Dure katalysator • Gevoelig voor onzuiverheden
<i>Phosphoric Acid (PAFC)</i>	37 – 42% (co-generation: 85%)	175 – 200°C	<ul style="list-style-type: none"> • Energiecentrale • Transport 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoge efficiëntie als energiecentrale • Kan onzuivere H₂ gebruiken als brandstof 	<ul style="list-style-type: none"> • Groot en zwaar • Dure katalysator • Geen verbetering meer mogelijk
<i>Direct Alcohol (DAFC)</i>	DMFC: 15 – 20% (40%) DEFC: 42 – 45%	50 – 100°C	DMFC: <ul style="list-style-type: none"> • Draagbare toepassingen DEFC: <ul style="list-style-type: none"> • Transport 	<ul style="list-style-type: none"> • Gebruikt methanol zonder reformer • Praktische brandstof 	<ul style="list-style-type: none"> • Lage efficiëntie
<i>Alkaline (AFC)</i>	60%	100 – 250°C (23 – 70°C)	<ul style="list-style-type: none"> • Ruimtevaart • Militair 	<ul style="list-style-type: none"> • Goedkope katalysator • Goede efficiëntie 	<ul style="list-style-type: none"> • Erg gevoelig voor onzuiverheden • Dure filtering CO₂ • Korte levensduur
<i>Molten Carbonate (MCFC)</i>	60% (co-generation: 85%)	600 – 1.000°C	<ul style="list-style-type: none"> • Energiecentrale 	<ul style="list-style-type: none"> • Goedkope katalysator • Goede efficiëntie • Brandstofflexibiliteit, zonder reformer 	<ul style="list-style-type: none"> • Korte levensduur
<i>Solid Oxide (SOFC)</i>	70% (co-generation: 85%)	800 – 1.000°C	<ul style="list-style-type: none"> • Energiecentrale 	<ul style="list-style-type: none"> • Goede efficiëntie • Goedkoop elektrolyt • Geen reformer nodig • Niet gevoelig voor onzuiverheden 	<ul style="list-style-type: none"> • Lange Opstarttijd • Afscherming tegen hitte nodig • Korte levensduur

5.3 Praktische problemen bij het gebruik van waterstof als brandstof

Het gebruik van waterstof als brandstof voor auto's is zoals eerder gesteld een veelbelovend alternatief voor de huidige fossiele brandstoffen. Maar voor het zover is, dienen eerst nog een aantal praktische problemen opgelost te worden. Het opslaan van waterstof blijft immers een heikel punt. Naast de technische moeilijkheid van het opslaan, zorgt het voor praktische problemen bij het inbouwen van tanks in wagens, en heeft gevolgen voor het tanken. Bovendien staat waterstof bij de mensen bekend als een zeer gevaarlijk product. En hoe kunnen wereldwijde standaarden ontwikkeld worden? Hieronder een overzicht van de belangrijkste knelpunten.

5.3.1 Opslag van waterstof

Het opslaan van waterstof vormt al van in het begin van het onderzoek naar waterstof als brandstof één van de grootste problemen. De oorzaak hiervan is de lage energiedichtheid van waterstof. Dit zorgt ervoor dat waterstof op een speciale manier opgeslagen moet worden. In Tabel 5.2 hieronder wordt het equivalent aan waterstof weergegeven dat opgeslagen moet worden om dezelfde verbrandingswaarde van één liter benzine te verkrijgen.

Tabel 5.2: Equivalent waterstof voor één liter benzine

Opslagvolume voor H ₂	Tankvolume equivalent 1 liter benzine
Gasvormig H ₂ bij 200 bar	~ 22 l
Gasvormig H ₂ bij 700 bar	~ 10 l
Vloeibaar H ₂	~ 4 l
H ₂ in hydride (vaste vorm)	~ 11 l

Bron: http://www.floheacom.ugent.be/H2/h2_storage_en.htm Universiteit Gent
Hydrogen mini-site, 2006.

Men kan hieruit opmaken dat theoretisch gezien de opslag in vloeibare toestand de beste verhouding tussen autonomie en ingenomen tankvolume geeft.¹²⁶

De lage dichtheid is bovendien de reden waarom een verbrandingsmotor op waterstof minder aandacht krijgt dan brandstofcellen. Om voldoende vermogen te halen uit een verbrandingsmotor op waterstof, moet men immers veel waterstof verbruiken. Wanneer men dan ook nog een aanvaardbaar rijbereik nastreeft, is het nodig een grote hoeveelheid waterstof te kunnen tanken. En hier wringt het schoentje. De brandstofefficiëntie van een auto met brandstofcellen ligt twee tot drie keer hoger dan die van wagen met een verbrandingsmotor op waterstof. Hierdoor moet er minder waterstof opgeslagen worden in een wagen met brandstofcellen om hetzelfde rijbereik te verkrijgen als een wagen met een waterstofverbrandingsmotor.¹²⁷

Alles in overweging genomen is de brandstofcel op waterstof dus het alternatief dat het meeste potentieel in zich draagt. Hoewel er minder waterstof verbruikt wordt om een zelfde vermogen uit een brandstofcel te halen dan uit een waterstofvonkontstekingsmotor, blijft de opslag van waterstof aan boord van een voertuig een probleem.

Vanuit commercieel en praktisch oogpunt hanteert het International Energy Agency (IEA) volgende doelen om te kunnen spreken van een commercieel bruikbaar systeem. De tank moet een voldoende laag gewicht en volume hebben, maar tegelijk genoeg waterstof kunnen opslaan ($> 5-6 \text{ wt } \% \text{ H}_2$)¹²⁸. De waterstof moet onder lage druk opgeslagen kunnen worden, bij een temperatuur die geschikt is om de tank te kunnen koppelen aan de waterstofmotor (80-150°C) en de waterstof moet meteen kunnen vrijkomen uit de tank. Het vullen moet snel genoeg kunnen gebeuren (binnen

¹²⁶ <http://www.emis.vito.be> Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek, 2006.

¹²⁷ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 95.

¹²⁸ *wt% H₂*: weight percent oftewel gravimetric density: een efficiëntieparameter die staat voor de massa waterstof die gebruikt kan worden voor energielevering gedeeld door de massa van het totale systeem (totale massa van de tank + totale massa van het waterstof + eventuele andere massa, b.v. nevenproducten van reacties).

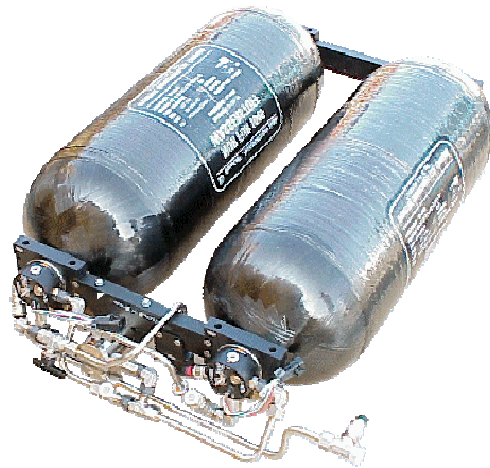
drie minuten) en niet te veel energie verbruiken. Tot slot mogen de kosten van de tank niet te hoog zijn (max. 150 USD per kg) en moet er 5kg waterstof opgeslagen kunnen worden zodat een rijbereik van tussen de 460 en 580km haalbaar wordt.^{129 130}

Er zijn verschillende manieren om waterstof op te slaan aan boord van een voertuig. Hieronder wordt een overzicht gegeven van de opslagmethodes die momenteel de meeste aandacht krijgen van onderzoekers. Per methode worden enkele technische kenmerken gegeven, worden voor- en nadelen toegelicht en wordt er aangeduid waar het verdere onderzoek op gericht is.

5.3.1.1 Opslag van waterstof in gasvorm

In gasvorm kan waterstof opgeslagen worden in gewone metalen tanks of in lichtgewicht hoge druk tanks van carbonvezel onder een druk van 200 tot 700 bar (zie Figuur 5.7). De carbontanks hebben als voordeel hun lage gewicht en zijn reeds gecertificeerd en commercieel beschikbaar tot 350 bar. Ze worden vooral gebruikt in bussen, maar om in personenwagens gebruikt te worden zou de druk nog verder verhoogd moeten kunnen worden. Hoe hoger immers de druk, hoe kleiner de tank gemaakt kan worden. Momenteel zitten deze tanks nog in de ontwikkelingsfase. Eén op de tien testvoertuigen met een brandstofcel in 2004 en 2005 waren uitgerust met zulk een opslagsysteem van 700 bar.^{131 132}

Figuur 5.7: Carbonvezel opslagtank



Bron: <http://www.micro-vett.it>, 2006

¹²⁹ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 78.

¹³⁰ <http://www.iea.org/Textbase/papers/2006/hydrogen.pdf> IEA, 2006, *Hydrogen Production and Storage - R&D Priorities and Gaps*, IEA/OECD, Parijs, p. 19.

Voor een aantal punten moet nog een oplossing gevonden worden, alvorens men kan denken aan commercialisering van het opslaan van waterstof onder hoge druk. Zo heeft de levensduur van de tank te lijden onder het vullen en het contact met waterstof. Daarnaast is de cilindervorm (die nodig is om de hoge druk te weerstaan) niet gemakkelijk in te bouwen in auto's. Maar de belangrijkste problemen zijn de hoge kost van de tank en de energie die nodig is voor de compressie van de waterstof bij het vullen. De US-DOE¹³³ stelt een prijs voorop van 67 USD/kg H₂ tegen 2015 voor een hoge druk opslagsysteem met tanks van composietmateriaal. De huidige prijs ligt echter minstens 36 keer zo hoog. 40 tot 80% van deze kost, wordt gevormd door de carbonvezel. Het probleem hier is dat het productieproces van carbonvezels nog moeilijk verder verbeterd kan worden en dat hierop dus bijna geen kosten meer bespaard zullen kunnen worden. Het IEA schat dat massaproductie de prijs kan verlagen tot USD 500-600/kg H₂. Dit ligt dus nog ver van de targetprijs van de US-DOE. Bovendien aanziet het publiek waterstofgas onder hoge druk in de auto als erg gevaarlijk. Ook dit mag niet uit het oog verloren worden.¹³⁴

Er is nog een manier om waterstof in gasvorm op te slaan aan boord van een voertuig, namelijk door middel van erg kleine holle glazen bolletjes. Het systeem verloopt in drie stappen: laden, vullen en ontladen. Eerst worden de bolletjes onder hoge druk (350-700 bar) en hoge temperatuur (300°C) in een hoge druk tank gevuld met waterstof. Daarna worden ze afgekoeld tot kamertemperatuur en overgeheveld naar de lage druk tank in het voertuig. De bolletjes worden verwarmd tot 200-300°C om hun waterstof weer vrij te geven. De grote voordelen zijn de eenvoudige tank in de wagen, de veiligheid en de opslagcapaciteit van 5,4 wt% H₂. Op dit moment is het nog te vroeg om de kosten van dit systeem te schatten, evenals de commerciële haalbaarheid.

131

http://www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/FCTFiles/FCTArticleFiles/Article_967_FuelCellVehcileSurvey2005.pdf Adamson, K.-A., 2005, *Fuel Cell Today Market Survey: Light Duty Vehicles*, Fuel Cell Today, maart 2005

¹³² IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 72-73.

¹³³ US-DOE: United States – Department Of Energy

¹³⁴ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 72-73.

Alleszins is er nog heel wat onderzoek nodig voor het zover is. Om het systeem te kunnen koppelen aan een PEM brandstofcel met een werkingstemperatuur van 80 tot 100°C, moet de waterstof opnieuw afgekoeld worden. Daarnaast lekt de waterstof uit de glazen bolletjes, de bolletjes breken enz.¹³⁵

5.3.1.2 *Opslag van waterstof in vloeibare vorm*

De meest voor de hand liggende manier om waterstof vloeibaar op te slaan, is door het af te koelen tot -253°C (de zogenaamde cryogene temperatuur), waardoor waterstof vloeibaar wordt. Een andere mogelijkheid is de waterstof op te slaan in andere vloeistoffen. De technieken die de meeste toekomstperspectieven bieden komen hieronder aan bod.

LH₂ of Liquid Hydrogen (vloeibaar waterstof) heeft een theoretische dichtheid van 100%, maar voorlopig is 20 wt% H₂ de hoogste waarde die in de praktijk gehaald kan worden. Dit is een veel betere dichtheid dan wat bekomen kan worden door het gasvormig opslaan van waterstof, zoals hierboven aangehaald. Er moet wel rekening mee gehouden worden dat voor elke Gigajoule LH₂ die gemaakt wordt, er 0,3 tot 0,7 Gigajoule aan energie nodig is om deze te maken. Dit is dan ook een groot nadeel van deze opslagmethode. Er treedt ook verdamping op van waterstof in de tank, waardoor er brandstof verloren gaat, ondanks sterke isolatie. Het grote voordeel van deze opslagwijze is de grote dichtheid die men heeft bij lage druk. Verder onderzoek moet er onder andere voor zorgen dat de verdampte waterstof weer opgevangen kan worden, dat de waterstof op een energie-efficiëntere wijze vloeibaar gemaakt kan worden en dat de kosten omlaag gaan. BMW gelooft sterk in deze methode en past ze toe in zijn testvoertuigen.^{136 137}

¹³⁵ <http://www.iea.org/Textbase/papers/2006/hydrogen.pdf> IEA, 2006, *Hydrogen Production and Storage - R&D Priorities and Gaps*, IEA/OECD, Parijs, p. 22-23.

¹³⁶ <http://www.iea.org/Textbase/papers/2006/hydrogen.pdf> IEA, 2006, *Hydrogen Production and Storage - R&D Priorities and Gaps*, IEA/OECD, Parijs, p. 24.

¹³⁷ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 74.

Een andere manier om waterstof vloeibaar op te slaan is via een borohydride (NaBH_4) oplossing. Via een eenvoudige reactie kan de waterstof aan boord van het voertuig weer losgemaakt worden uit deze oplossing. Hiermee wordt een theoretische opslagcapaciteit van 10,9 wt% waterstof behaald. Het voordeel is dat deze methode een veilige en goed controleerbare manier is om waterstof aan boord om te vormen. Het grootste nadeel is het feit dat het bijproduct van de reactie (NaBO_2) opgevangen moet worden en buitenboord weer omgezet moet worden naar NaBH_4 . Dit proces kost vandaag nog 50 USD/kg en zou gereduceerd moeten kunnen worden tot 1 USD/kg, al lijkt dit niet haalbaar. Misschien kan in de toekomst een NaBH_4 -brandstofcel ontwikkeld worden, die NaBH_4 direct als brandstof gebruikt, maar voorlopig lijkt deze toepassing geen toekomst te hebben in de automobielsector.^{138 139}

Een derde manier om waterstof op te slaan in vloeibare vorm is via herlaadbare organische vloeistoffen. Bij dit proces wordt een vloeistof telkens opnieuw geladen met waterstof. Dit verloopt in drie stappen. Eerst wordt aan boord van het voertuig waterstof onttrokken aan de vloeistof. Vervolgens wordt de waterstofarme vloeistof overgepompt in het 'tankstation', waar tegelijk het voertuig geladen wordt met een 'verse' waterstofrijke organische vloeistof. Ten slotte wordt in dat tankstation de waterstofarme vloeistof opnieuw verrijkt met waterstof zodat deze weer gebruikt kan worden in een volgend voertuig. Hiermee kan een waterstofopslag worden bereikt van 6,1% van het eigen gewicht (6,1 wt% H_2), maar de waterstof wordt wel op een hoge temperatuur vrijgegeven (zo'n 300 tot 400°C). De organische vloeistoffen die op dit ogenblik hiervoor gebruikt worden, zijn echter erg gevaarlijke stoffen en moeten dus met de nodige voorzichtigheid behandeld worden. Verdere studie van dit alternatief is

¹³⁸ <http://www.iea.org/Textbase/papers/2006/hydrogen.pdf> IEA, 2006, *Hydrogen Production and Storage - R&D Priorities and Gaps*, IEA/OECD, Parijs, p. 24.

¹³⁹ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 74.

dus nog aangewezen, zeker met het oog op de veiligheid. Het is ook nog te vroeg om een kostencalculatie te kunnen maken.¹⁴⁰

Het is ondertussen duidelijk dat het in vloeibare vorm opslaan van waterstof gevaren met zich meebrengt: er moet gewerkt worden met hoog giftige chemicaliën, licht ontvlambare stoffen en hoge temperaturen. Het is dus aangewezen het transport van deze stoffen tot een minimum te beperken. De productie van vloeibare waterstof (of in het geval van herlaadbare organische vloeistoffen het 'opnieuw opladen') zou dus best gedecentraliseerd gebeuren.¹⁴¹

5.3.1.3 Opslag van waterstof in vaste vorm

Waterstof kan opgeslagen worden in verschillende soorten vaste materialen. Deze manier van opslaan belooft een veilige en efficiënte methode te zijn om waterstof aan boord van een wagen of voor stationaire doeleinden op te slaan. Er zijn vier grote groepen materialen die hiervoor in aanmerking komen: carbon en andere materialen met een grote oppervlakte, herlaadbare hydriden¹⁴², chemische hydriden die met water reageren en thermische chemische hydriden. Omdat dit een erg technische kwestie is, worden hieronder slechts de belangrijkste kenmerken toegelicht.

De hoge opslagcapaciteit (30 tot 60 wt%) die enkele jaren geleden toegewezen werden aan op carbon gebaseerde materialen, bleken onjuist te zijn. Vandaag slaagt men er met moeite in om tot 8 wt% te komen, onder een temperatuur van 400°C. Betaalbare carbonmaterialen die geschikt zijn voor het opslaan van H₂ moeten nog ontwikkeld worden, en het is nog maar zeer de vraag of deze methode commercieel

¹⁴⁰ <http://www.iea.org/Textbase/papers/2006/hydrogen.pdf> IEA, 2006, *Hydrogen Production and Storage - R&D Priorities and Gaps*, IEA/OECD, Parijs, p. 25.

¹⁴¹ <http://www.iea.org/Textbase/papers/2006/hydrogen.pdf> IEA, 2006, *Hydrogen Production and Storage - R&D Priorities and Gaps*, IEA/OECD, Parijs, p. 25.

¹⁴² *Hydriden*: legeringen van metalen die waterstof kunnen absorberen, ongeveer zoals een spons water kan absorberen. Als de waterstofmoleculen in contact komen met de oppervlakte van de hydride ontstaat er een chemische reactie waardoor waterstof een atomische verandering ondergaat en geabsorbeerd wordt door het hybridemateriaal. Door deze reactie is het waterstof nu een vaste stof.

gezien een toekomst heeft. Er zijn ook andere HSA-materialen ('High Surface Materials') die zich lenen om waterstof in op te slaan, maar ook deze vereisen nog heel wat onderzoek. Wetenschappers bestuderen nu of het mogelijk is om herhaaldelijk waterstof erin op te slaan onder kamertemperatuur.^{143 144}

Herlaadbare hydriden zijn de voorbije jaren intensief bestudeerd. Uit deze studie blijkt dat hier de complexe hydriden de hoop voor de toekomst zijn. De types die de meeste aandacht krijgen zijn boorhydriden, alanaten¹⁴⁵ en amides¹⁴⁶. Hieronder zijn vele verschillende verbindingen terug te brengen, maar geen van deze verbindingen staat echt op punt. Voor het alanaat NaAlH_4 bijvoorbeeld zijn de nadelen de lage opslagcapaciteit van 4 tot 5 wt% H_2 en de hoge kosten. Boorhydrides blijken erg stabiel, waardoor ze de waterstof moeilijk vrijgeven. Het onderzoek naar deze stoffen is nog volop bezig en het is erg vroeg om uitsluitsel te geven over het feit of ze in de toekomst effectief gebruikt zullen kunnen worden.¹⁴⁷

Chemische hydriden kunnen ook opgeslagen worden in half-vloeibare vorm, bijvoorbeeld in een dikke olie. Door hier water aan toe te voegen kan waterstof via een hydrolysereactie gewonnen worden uit de olie. In theorie bedraagt de opslagcapaciteit voor deze systemen zo'n 5 tot 8 wt% H_2 . Verder onderzoek is er nu op gericht om de kosten van een dergelijk systeem naar beneden te brengen. Men twijfelt eraan of men de kosten laag genoeg zal krijgen om het systeem te kunnen gebruiken in voertuigen.¹⁴⁸

¹⁴³ <http://www.iea.org/Textbase/papers/2006/hydrogen.pdf> IEA, 2006, *Hydrogen Production and Storage - R&D Priorities and Gaps*, IEA/OECD, Parijs, p. 26-27.

¹⁴⁴ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 75.

¹⁴⁵ Alanaten: aluminium-natrium hydriden

¹⁴⁶ Amides: functionele groepen gevormd door de reactie van een carbonzuur met een primair amine waarbij er een watermolecuul vrij komt.

¹⁴⁷ <http://www.iea.org/Textbase/papers/2006/hydrogen.pdf> IEA, 2006, *Hydrogen Production and Storage - R&D Priorities and Gaps*, IEA/OECD, Parijs, p. 28-30.

¹⁴⁸ <http://www.iea.org/Textbase/papers/2006/hydrogen.pdf> IEA, 2006, *Hydrogen Production and Storage - R&D Priorities and Gaps*, IEA/OECD, Parijs, p. 30.

Tot slot kan men ook waterstof in vaste vorm opslaan met behulp van chemische hydriden die reageren door warmtetoevoeging. Deze reacties zijn echter niet omkeerbaar, zodat er restproducten ontstaan en het herladen met waterstof buiten boord moet gebeuren. Naar deze opslagmethode wordt volop onderzoek gedaan met betrekking tot veiligheid, efficiëntie en kosten.¹⁴⁹

5.3.1.4 *Algemeen besluit opslag waterstof*

De gasvormige en vloeibare opslag van waterstof zijn vandaag technisch en economisch gezien de beste opties. De opslagmethodes die op dit moment commercieel beschikbaar zijn, zijn de carbonvezel hoge druk tanks en de cryogene vloeibare opslag onder -253°C . Deze systemen zijn echter niet efficiënt genoeg en zeker qua kosten moet er nog een flinke stap vooruit gemaakt worden. Momenteel schat men de kosten van opslagtanks voor wagens op 600 tot 800 USD/kg H_2 , terwijl de targetprijs van de US-DOE 67 USD/kg H_2 bedraagt.

Onderzoekers verwachten veel van de opslagmethodes om waterstof in vaste vorm op te slaan, zoals metaalhydrides. Deze methode biedt in vergelijking met vaste en vloeibare opslag uitzicht op de volgende voordelen: een lager volume, een lagere druk en een zuivere H_2 output. Het is momenteel echter nog te vroeg om nu al resoluut voor deze techniek te kiezen, aangezien de systemen nog heel wat onderzoek vergen.

De keuze voor de juiste on-board opslagtechniek is erg belangrijk. Het bepaalt immers in grote mate de keuze voor de rest van de waterstofinfrastructuur, zoals de productie en distributie van waterstof en de tankinstallaties. Het is dan ook aangewezen dat het onderzoek zo goed mogelijk ondersteund en aangemoedigd wordt.¹⁵⁰

¹⁴⁹ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 77.

¹⁵⁰ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 78.

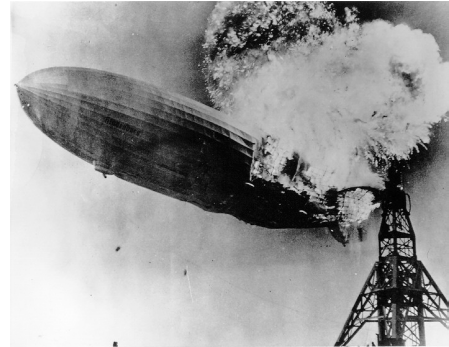
5.3.2 *Is waterstof gevaarlijk?*

Waterstofproductie en -gebruik zijn niet nieuw: al meer dan 40 jaar wordt waterstof in grote hoeveelheden aangemaakt, gedistribueerd en verbruikt. Er is dus een jarenlange expertise in het omgaan met waterstof. Waterstof wordt echter vaak aanzien als erg gevaarlijk. Deze perceptie is deels te wijten aan de associatie met de waterstofbom en de ramp met de Hindenburg, de Duitse zeppelin in die in 1937 het leven kostte aan 36 mensen (Figuur 5.8). Het verband met de waterstofbom is ver gezocht:

buiten de naam hebben de reacties van een waterstofbom en een waterstofmotor of brandstofcel quasi niets gemeen. Sommige bronnen schuiven de schuld van de ramp met de Hindenburg op het gebruik van waterstof in plaats van helium in de ballon. De laatste jaren krijgt een andere theorie echter steeds meer bijval. Deze stelt dat de brand ontstaan zou zijn door statische elektriciteit en dat de initiële brandstof voor de brand in feite de verf was waarmee het luchtschip geverfd was. Deze verf was gemaakt met ingrediënten die ook als raketbrandstof gebruikt worden. De waterstof zou pas na enige tijd zijn gaan branden, nadat de stof van de ballon scheurde.¹⁵¹

Natuurlijk is de perceptie van waterstof als erg gevaarlijk product ook deels terecht. Waterstof is reukloos, smaakloos en kleurloos. Dit maakt het moeilijk om waterstof op te kunnen sporen in het geval van een lek. De industrie maakt hiervoor gebruik van speciale waterstofdetectoren. Er is op dit moment nog geen geurstof gekend die men zou kunnen toevoegen zoals men met aardgas doet, maar hier wordt onderzoek naar gevoerd. In tegenstelling tot vele andere brandstoffen is waterstof niet toxisch. Andere

Figuur 5.8 : De Hindenburg



Bron : <http://www.lakehurst.navy.mil/nlweb/images/1213d.gif> , 2006.

¹⁵¹ <http://spot.colorado.edu/~dziadeck/zf/LZ129fire.htm> John Dziadecki, 2006.

kenmerkende eigenschappen van waterstof zijn dat het zich erg snel verspreid en doordat het lichter is dan lucht stijgt het snel naar boven. Dit in tegenstelling tot benzine, waarvan de gassen naar de grond zakken. Hierdoor is bijvoorbeeld een lek in een waterstoftank veiliger dan een lek in een benzinetank. De waterstof zal in een steekvlam verbranden, terwijl benzine zal exploderen (zie Figuur 5.9).

Figuur 5.9: Gevolg van een lek in de brandstoftank



Bron: http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/h2_safety_fsheets.pdf US-DOE, 2006.

De schade aan een waterstofvoertuig (links op de figuur) zal in dit geval veel kleiner zijn dan de schade aan een benzinewagen (rechts op de figuur). Deze laatste zal volledig vernield zijn. Bovendien is de stralingswarmte van een waterstofvlam opmerkelijk kleiner dan die van een brandstof op basis van koolwaterstoffen, zoals benzine of gas. Dit maakt het bestrijden van het vuur ook gemakkelijker. Als nadeel heeft waterstof wel dat het mengsel van waterstof en lucht dat ontvlambaar is breder is dan dat van brandstoffen als benzine.¹⁵²

Uiteraard moet er met de nodige voorzichtigheid met waterstof omgesprongen worden. Dit geldt echter voor alle brandstoffen. Wanneer er goed mee omgegaan wordt, hoeft waterstof niet gevaarlijker te zijn dan andere brandstoffen. Waterstof vraagt enkel om andere veiligheidsmaatregelen dan de brandstoffen die nu gebruikt worden. Om ervoor te zorgen dat er goed wordt omgegaan met waterstof, worden er codes en standaarden ontwikkeld.

¹⁵² http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/h2_safety_fsheets.pdf US-DOE, 2006.

5.3.3 Opstarttijd

Van de auto's van vandaag verwachten men dat ze meteen starten zodra de sleutel omgedraaid wordt. Zelfs de voorverwarmtijd van dieselwagens is te verwaarlozen. Dit direct starten vormt momenteel voor wagens op brandstofcellen nog een probleem. Molten Carbonate Fuel Cells en Solid Oxide Fuel Cells bijvoorbeeld hebben een erg hoge werkingstemperatuur. Hoe hoger deze werkingstemperatuur van de brandstofcel, hoe langer de brandstofcel moet opwarmen vooraleer ze elektriciteit zal kunnen genereren. De US-DOE had in haar richtlijnen voor 2004 als doel een tijd van minder dan één minuut vooropgesteld. Deze doelstelling heeft ze in 2004 moeten verwerpen, omdat ze binnen de termijn die vooropgesteld was niet haalbaar bleken: de opstarttijd bedroeg toen 600 seconden. De US-DOE heeft voor 2015 opnieuw een streefcijfer vooropgesteld, dit maal moet de opstarttijd minder dan 30 seconden bedragen. Deze tijden gelden voor een omgevingstemperatuur van 20°C, maar nog meer moeilijkheden zijn er uiteraard wanneer er gestart moet worden bij vriestemperaturen.^{153 154}

5.3.4 Reformer

Zoals hierboven reeds vermeld is, bestaat er de mogelijkheid om via een reformer aan boord van een auto andere brandstoffen om te zetten in waterstof. Eén van de redenen om dit te doen is om de overstap naar de kant-en-klare waterstofauto's te vergemakkelijken. Het idee hierachter is het feit dat op deze manier men meer tijd heeft om een degelijk distributie- en productiesysteem voor pure waterstof op poten te zetten. Het Hydrogen Technical Advisory Panel van het Amerikaanse ministerie van Energiezaken waarschuwt echter voor de nadelige effecten van deze strategie. Op deze manier zou het nog vele jaren langer duren voor er wagens die direct waterstof

¹⁵³ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 37.

¹⁵⁴ <http://www.fuelcellseminar.com/pdf/2004/531%20Ho.pdf> US-DOE, 2 november 2004, *Future Directions for DOE - Fuel Processing R&D*, US-DOE, Washington, DC, 15 p.

tanken op de markt zouden komen. En dus zou men tot dan niet kunnen genieten van de echte voordelen die rijden op waterstof biedt (geen schadelijke uitstoot meer en een verminderde afhankelijkheid van olie uit het buitenland).¹⁵⁵ Daarenboven is het reformen technisch niet zo eenvoudig. De hoeveelheid CO₂ die door de reformer uitgestoten wordt, is lager dan de hoeveelheid CO₂ die in de lucht terecht komt bij een gewone verbrandingsmotor.¹⁵⁶

Het US-DOE onderzocht sinds 1990 de mogelijkheid van on-board reforming. In 2004 hebben ze de onderzoeksresultaten kritisch bekeken en hebben ze besloten in een zogenaamde 'No-Go' beslissing om het onderzoek naar reformers stop te zetten. Geen enkele van de in 2004 beschikbare reformertechnologieën kon aan alle vooropgestelde criteria voldoen. Bovendien blijkt dat HEV's¹⁵⁷ van vandaag een hogere brandstofefficiëntie hebben dan een auto met reformer die aan alle criteria zou voldoen. De US-DOE verwacht ook niet dat deze rollen tegen 2015 omgekeerd zullen zijn.¹⁵⁸ Dit betekent echter niet dat alle onderzoek naar het gebruik van reformers volledig stopgezet wordt. Op verschillende plaatsen in de wereld worden de mogelijkheden van de reformer nog volop bestudeerd, in de hoop de technologie verder op punt te kunnen stellen en de kosten terug te kunnen dringen.

5.3.5 Standaarden

Waterstof wordt al jaren in grote hoeveelheden gebruikt in allerlei industrieën. Hiervoor is door de jaren heen een duidelijke regelgeving opgezet die regelt hoe waterstof gehanteerd moet worden. Het gebruik van waterstof als energiedrager op grote schaal is echter een nieuwe invalshoek en nog niet grondig beschreven in de nu

¹⁵⁵ <http://www.hydrogenassociation.org/newsletter/ad43fcev.htm> Nahmias, D., 1999, *Fuel Choice for Fuel Cell Vehicles*, National Hydrogen Association.

¹⁵⁶ http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_systems.html US-DOE, 2006.

¹⁵⁷ HEV: Hybrid Electric Vehicle: Hybridewagen met een verbrandingsmotor en elektromotoren met batterijen (bijvoorbeeld de Toyota Prius en de Lexus RX 400h)

¹⁵⁸ <http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/> US-DOE, 2006.

bestaande regels. Een ontwikkeling van een juist kader van codes¹⁵⁹ en standaarden¹⁶⁰ is essentieel om te komen tot een veilige en kwalitatief hoogstaande behandeling van alles wat met de nieuwe toepassingen met waterstof te maken heeft.¹⁶¹ De standaardisatie van de interfaces tussen de verschillende modules en de wijze waarop de prestatie- en veiligheidsniveaus gemeten worden, is essentieel om de comptabiliteit en de veiligheid te verzekeren. Hiervoor moet een eensluidende terminologie en gestandaardiseerde infrastructuur opgezet worden, zodat de ontwikkelingen toegankelijker worden voor het grote publiek en de industrie en dat de componenten uit verschillende landen in combinatie met elkaar gebruikt kunnen worden. Bovendien zal dit de kosten van productie en opslag aanzienlijk verlagen.¹⁶²

Het opstellen van internationale codes en standaarden voor het gebruik van waterstof en brandstofcellen in het transport is echter geen sinecure. Het opstellen hiervan gebeurt immers door organisaties die tegen elkaar concurreren. Zo is er bijvoorbeeld de International Organization for Standardization (ISO), bekend om de wereldwijd gehanteerde ISO-standaarden, die zich bezig houdt met het opstellen van industriële en commerciële standaarden in verband met waterstof. ISO is een niet-gouvernementele organisatie, maar de ISO-standaarden worden vaak door overheden overgenomen. Een andere instelling is International Electrotechnical Commission (IEC), die internationale normen ontwikkelt voor de veiligheid van elektrische componenten en apparatuur. In het verleden heeft de IEC reeds samengewerkt met de ISO. Het proces wordt nog moeilijker gemaakt door de verschillen in wetgeving tussen de verschillende landen. Gelukkig zijn de overheden die geloven in de voordelen van waterstof zich ervan bewust dat zij ervoor moeten zorgen dat het

¹⁵⁹ *Codes*: Richtlijnen voor de omgeving (gebouwen en installaties) die te maken krijgt met waterstof. Codes worden meestal overgenomen door de lokale overheden, waardoor ze kracht van wet krijgen. In codes wordt vaak verwezen naar gebruikte standaarden.

¹⁶⁰ *Standaarden*: Regels, richtlijnen, voorwaarden en kenmerken voor producten die te maken hebben met waterstof. Standaarden krijgen hun kracht doordat ze vermeld worden in codes die door overheden gehanteerd worden.

¹⁶¹ <http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/codes/> US-DOE, 2006.

¹⁶² http://europa.eu.int/comm/enterprise/library/enterprise-europe/issue16/pdf/ee16_nl.pdf Europese Commissie, juli-september 2004, *Onderneming Europa*, Europese Commissie, Brussel, p. 7-9.

opstellen van codes en standaarden vlot moet kunnen verlopen. Europa, de Verenigde Staten en Japan nemen hierin het voortouw.¹⁶³

Er zijn dus verschillende instellingen die gericht zijn op het opstellen van codes en standaards. In de Verenigde Staten alleen al zijn er veertien instanties bevoegd voor het ontwerpen van codes en standaarden, elk binnen hun eigen specialisatie. Deze organisaties worden onder leiding van het Office of Energy Efficiency and Renewable Energy in hun werkzaamheden bijgestaan door het US-DOE, die in de positie van tussenpersoon probeert de beschikbare informatie voor iedereen beschikbaar te stellen. In de praktijk komt dit bijvoorbeeld tot uiting via de website www.fuelcellstandards.com, een forum voor alle belanghebbenden, waar alle up-to-date informatie over codes en standaarden over waterstof gecentraliseerd wordt, zodat deze gemakkelijk geraadpleegd kan worden.¹⁶⁴

In Europa is er het European Hydrogen And Fuel Cell Technology Platform¹⁶⁵ opgericht, dat bedoeld is om alle belangrijke stakeholders van de waterstofeconomie in Europa samen te brengen. Een onderdeel van dit platform is de Regulations, Codes & Standards Initiative Group (RCS). Deze instelling bestaat uit 35 afgevaardigden van bedrijven of organisaties en een aantal observators. De taak van de RCS is het verzamelen en structureren van alle relevante beschikbare informatie uit EU-projecten. De RCS moet het aanspreekpunt zijn binnen de EU op het vlak van codes, standaarden en regulering, waar men informatie kan verkrijgen over de wereldwijde ontwikkelingen op dit vlak. Hierdoor moet vermeden worden dat er dubbel werk wordt geleverd en probeert men zoveel mogelijk bestaande codes of standaards van UN, ISO en IEC te integreren. De RCS wijst erop dat ze graag wat meer geld ter beschikking zou hebben, om de RCS-activiteiten van de Verenigde Staten en Japan bij

¹⁶³ https://www.hfpeurope.org/uploads/677/687/HFP_DS_Report_AUG2005.pdf HFP, 2005, *Deployment Strategy*, Europese Commissie, Brussel, p. 64-67.

¹⁶⁴ <http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/codes/> US-DOE, 2006.

¹⁶⁵ <https://www.hfpeurope.org/> European Hydrogen & Fuel Cell Technology Platform, 2006.

te kunnen benen. Ook zegt de RCS dat de Europese regulering voor waterstof in het wegtransport best wat meer coördinatie kan gebruiken.¹⁶⁶

¹⁶⁶ https://www.hfpeurope.org/uploads/702/819/5_Regulations_Codes_Standards.pdf European Hydrogen & Fuel Cell Technology Platform, 2006, *Regulations, Codes and Standards – Positioning Europe in the international arena*, .Europese HFP, Brussel, 10 p.

Hoofdstuk VI: Hoe waterstof produceren?

Waterstof is een energiedrager, geen energiebron. Dit betekent dat men via waterstof energie kan opslaan en afleveren in bruikbare vorm. Waterstof komt bijna niet in vrije vorm voor in de natuur en daarom moet het onttrokken worden aan andere stoffen die het bevatten. In dit hoofdstuk volgt een overzicht van de mogelijke manieren om waterstof te produceren. Er wordt kort uitgelegd wat de kenmerken zijn van elk productieproces, hoever het onderzoek staat en wat de perspectieven zijn voor de toekomst.¹⁶⁷

Waterstof wordt vandaag ook al geproduceerd. 40% hiervan wordt gebruikt voor chemische processen, 40% in raffinaderijen en de resterende 20% voor nog een aantal andere doeleinden. In 2003 werd 48% van de wereldwijd verbruikte waterstof geproduceerd via aardgas, 30% was afkomstig van olie en werd opgevangen in raffinaderijen of andere chemische toepassingen, 18% was afkomstig van steenkool en 4% van elektrolyse.¹⁶⁸

Het gebruik van waterstof als brandstof voor voertuigen zou de uitstoot van CO₂ en andere schadelijke stoffen aanzienlijk kunnen doen dalen. Het is echter niet alleen de uitstoot van de wagens die in rekening gebracht moet worden. Er worden ook schadelijke stoffen uitgestoten bij het aanmaken van de waterstof die nodig is als brandstof voor de wagens. Hoe hoog deze uitstoot van de primaire energiebron is, hangt af van de soort energiebron en de productiewijze. Wanneer waterstof geproduceerd wordt met fossiele brandstoffen, bijvoorbeeld via ‘stoomreforming’ of vergassing van steenkool, kan de hele cyclus quasi CO₂-vrij zijn, indien de uitgestoten koolstofdioxide opgevangen en opgeslagen wordt. De huidige methodes om waterstof te produceren moeten nog heel wat verbeterd worden om zowel technisch als

¹⁶⁷ http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/doe_h2_production.pdf US-DOE, maart 2006, *Hydrogen Production*, US-DOE, Washington, DC, 2 p.

¹⁶⁸ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 43.

economisch aan de vooropgestelde doelen te voldoen. Op dit ogenblik is in de meeste regio's de energieproductie zonder CO₂-uitstoot beperkt en dus ook de mogelijkheid om waterstof te produceren zonder schadelijke emissies. De optie om waterstof te produceren via hernieuwbare energie en andere methodes worden momenteel druk onderzocht.¹⁶⁹

6.1 Waterstof uit fossiele brandstoffen

Aardgasreforming en de vergassing van steenkool zijn momenteel de twee methodes die technisch op punt staan en gebruikt worden om waterstof te produceren. Hierbij komt er wel een aanzienlijke hoeveelheid CO₂ vrij. Fossiele brandstoffen zijn immers koolstofverbindingen. Wanneer dus waterstof aan de fossiele brandstof onttrokken wordt, komt ook koolstof vrij. Om van een emissievrije productie van waterstof te kunnen spreken, is het dus nodig dat deze uitgestoten CO₂ opgevangen en opgeslagen wordt.¹⁷⁰

6.1.1 Waterstof uit aardgas

Op dit ogenblik kan waterstof op drie manieren onttrokken worden van aardgas. De eerste manier is via **stoomreforming van methaan** (SMR). In dit proces reageert methaan (CH₄) met waterdamp en wordt er waterstof en koolstofmonoxide geproduceerd. Via een extra reactie wordt deze koolstofmonoxide omgezet in CO₂ en H₂. Deze reactie is endotherm, er moet dus warmte aan toegevoegd worden om de reactie gaande te houden. Wanneer deze methode gebruikt wordt in grote installaties, kan een efficiëntie van 85% bereikt worden, met daarbij relatief lage emissies en een lage kost.¹⁷¹ De tweede productiemethode is **partiële oxidatie** (POX). Bij deze

¹⁶⁹ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 34.

¹⁷⁰ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 49.

¹⁷¹ <http://www.iea.org/Textbase/papers/2006/hydrogen.pdf> IEA, 2006, *Hydrogen Production and Storage - R&D Priorities and Gaps*, IEA/OECD, Parijs, p. 7-8.

methode reageert methaan met zuurstof en dit levert waterstof en koolstofmonoxide op. De bekomen koolstofmonoxide reageert vervolgens met stoom en hieruit komt H₂ en CO₂ voort. Partiële oxidatie is een exotherm proces: dit betekent dat het warmte afgeeft. Dit productieproces is sneller dan SMR en er is een kleinere installatie voor nodig. Het nadeel is wel dat het in vergelijking met SMR minder waterstof oplevert voor dezelfde input.^{172 173} De derde manier om waterstof uit aardgas te halen is via **autothermische reforming** (ATR). Deze productietechnologie is een combinatie van SMR en POX. Ook bij deze reactie komt er warmte vrij.¹⁷⁴

Als er in de toekomst op grote schaal overgeschakeld wordt naar waterstof als brandstof, zal de vraag naar aardgas (om H₂ te produceren) sterk toenemen. Een probleem ontstaat dan wanneer de aardgasproductie piekt. Volgens sommige onderzoeken zal dit al in 2020 gebeuren. Het Amerikaanse Electric Power Research Institute (EPRI) verklaart in een eigen onderzoek dat er mogelijk niet genoeg goedkoop aardgas gevonden kan worden om in de toekomst te voldoen aan de verwachte vraagstijging bij de elektriciteitscentrales. Het gebruik van aardgas voor de productie van waterstof is hier nog niet eens meegerekend. In dit opzicht lijkt het niet erg logisch aardgas te beschouwen als voornaamste bron voor de productie van waterstof. Het is in dit opzicht aangewezen ook te zoeken naar andere productiemethodes van waterstof.¹⁷⁵

6.1.2 Waterstof uit steenkool

Waterstof kan geproduceerd worden met steenkool via een endotherme vergassingsreactie. Naast waterstof is het bijproduct van deze reactie relatief zuivere

¹⁷² <http://www.iea.org/Textbase/papers/2006/hydrogen.pdf> IEA, 2006, *Hydrogen Production and Storage - R&D Priorities and Gaps*, IEA/OECD, Parijs, p. 7-8.

¹⁷³ http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/production/natural_gas.html, US-DOE, 2006.

¹⁷⁴ <http://www.iea.org/Textbase/papers/2006/hydrogen.pdf> IEA, 2006, *Hydrogen Production and Storage - R&D Priorities and Gaps*, IEA/OECD, Parijs, p. 7-8.

¹⁷⁵ Rifkin, J., 2004, *De waterstofeconomie: schone en duurzame energie voor iedereen*, Lemniscaat, Rotterdam, p. 215-216.

koolstofdioxide. Hierdoor kan deze CO₂ makkelijker verzameld en opgeslagen worden. De waterstof die geproduceerd wordt, bevat echter nog een kleine hoeveelheid CO. Dit maakt dat de waterstof nog verder behandeld moet worden om geschikt te zijn voor het gebruik in de gevoelige PEM brandstofcellen.^{176 177}

Het vergassen van steenkool is een technologie die vandaag reeds gebruikt wordt. De geproduceerde waterstof is echter duurder dan de waterstof afkomstig van aardgasreforming. Als de prijs van gas stijgt in de toekomst zal deze productiemethode beter kunnen concurreren met aardgasreforming. Men maakt bij het vergassen van steenkool gebruik van zuivere zuurstof, wat op dit ogenblik een duur product is. Er wordt verwacht dat de kost van zuurstof zal dalen in de toekomst door een hogere efficiëntie in de productie. Dit zal ook een positief effect hebben op de kost van waterstof die geproduceerd wordt via steenkool. De productie van waterstof via de vergassing van steenkool is niet geschikt voor decentrale productie, omdat de schaalvoordelen hierdoor verloren gaan en het opvangen en opslaan van koolstofdioxide duur en moeilijk is bij kleine systemen.¹⁷⁸

6.1.3 Opvang en opslag van CO₂

Bij alle productiemethodes van waterstof die gebruik maken van fossiele brandstoffen komt CO₂ vrij. De hoeveelheid CO₂ varieert naargelang de productiemethode en de gebruikte energiebron. Om te komen tot een duurzame productie van waterstof is het nodig dat de geproduceerde koolstofdioxide opgevangen en opgeborgen wordt. Hoe men de opgevangen CO₂ zal opslaan, staat nog niet vast. Het kan onder andere opgeslagen worden in gasvelden, olievelden, of in poreuze aardlagen. Ook de keuze voor een transportsysteem van CO₂ is nog niet gemaakt, deze hangt uiteraard samen

¹⁷⁶ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 51-52.

¹⁷⁷ http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/production/coal_gasification.html, US-DOE, 2006.

¹⁷⁸ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 51-52.

met de plaats waar de productie van waterstof plaatsvindt en de gekozen opslagplaats.¹⁷⁹

6.2 Waterstof via het splitsen van water

Waterstof kan geproduceerd worden door het splitsen van water (H₂O). Om dit te doen zijn er een aantal mogelijke technieken. Hieronder worden elektrolyse, foto-elektrolyse, fotobiologische elektrolyse en de decompositie van water op hoge temperatuur besproken.

6.2.1 Elektrolyse van water

Bij elektrolyse wordt een elektrische stroom door water gestuurd, waardoor het water zich opsplijt in waterstof en zuurstof. Elektrolysetoestellen zijn erg geschikt om op kleine schaal waterstof te produceren. Momenteel wordt ook de mogelijkheid onderzocht om waterstof te produceren via elektrolyse in grote productiesites, gekoppeld aan hernieuwbare energiebronnen. Hierdoor wordt het mogelijk waterstof te produceren terwijl er in de hele productiecyclus quasi geen schadelijke stoffen uitgestoten worden.¹⁸⁰

Net zoals brandstofcellen bestaan elektrolysetoestellen uit een anode en een kathode, met daartussen een elektrolyt. Er zijn drie belangrijke soorten van elektrolyse. **Alkaline elektrolyse** wordt vandaag veel gebruikt in de industrie, maar een hogere efficiëntie en een lagere kost zijn wenselijk. De technologie van **Polymer Elektrolyte Membrane (PEM) elektrolyse** is nog niet zo ver gevorderd als alkaline elektrolyse. Dit resulteert in een hoge kost, een lage capaciteit, een lage efficiëntie en een korte

¹⁷⁹ <http://www.iea.org/Textbase/papers/2006/hydrogen.pdf> IEA, 2006, *Hydrogen Production and Storage - R&D Priorities and Gaps*, IEA/OECD, Parijs, p. 9.

¹⁸⁰ http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/production/electro_processes.html, US-DOE, 2006.

levensduur. Er wordt echter verwacht dat deze technologie in de komende jaren nog verbeterd kan worden. Een derde methode is **elektrolyse op hoge temperatuur**, met als belangrijkste soort de techniek die gebaseerd is op de SOFC. Door het gebruik van warmte (afkomstig uit verschillende bronnen, waaronder zonne-energie, aardgas of nucleaire energie) kan het verbruik van elektrische energie in het elektrolyseproces sterk verminderd worden. Hierdoor is de totale efficiëntie van deze elektrolysetechniek hoger dan die van de andere (lage temperatuur) technologieën.¹⁸¹

6.2.2 Foto-elektrolyse

Deze milieuvriendelijke technologie om waterstof te produceren maakt gebruik van fotonvoltatische cellen (zonnecellen). Op dit moment is deze techniek commercieel beschikbaar, maar door de hoge kost van de gebruikte zonnepanelen wordt er nog niet veel gebruik van gemaakt. Ook binnen deze techniek zijn er meerdere soorten onder te brengen, die momenteel nog druk onderzocht worden, met als doel de kosten te verlagen en de efficiëntie en de stabiliteit te verbeteren.¹⁸²

6.2.3 Fotobiologische elektrolyse

Fotobiologische elektrolyse is een productiemethode van waterstof die zich nog in een heel vroeg onderzoeksstadium bevindt. In dit proces wordt waterstof geproduceerd met behulp van micro-organismen zoals groene algen. Net zoals planten zuurstof produceren via fotosynthese, zo produceren deze micro-organismen waterstof. Op dit ogenblik staat deze technologie nog lang niet op punt: het proces verloopt veel te traag om gebruikt te kunnen worden voor het commercieel produceren van waterstof. Onderzoekers zijn nu op zoek naar manieren om de micro-organismen te manipuleren

¹⁸¹ <http://www.iea.org/Textbase/papers/2006/hydrogen.pdf> IEA, 2006, *Hydrogen Production and Storage - R&D Priorities and Gaps*, IEA/OECD, Parijs, p. 11-12.

¹⁸² <http://www.iea.org/Textbase/papers/2006/hydrogen.pdf> IEA, 2006, *Hydrogen Production and Storage - R&D Priorities and Gaps*, IEA/OECD, Parijs, p. 12-13.

en naar andere soorten organismen die beter geschikt zijn voor de productie van waterstof. Deze productiemethode biedt de mogelijkheid om op lange termijn waterstof te produceren op een duurzame manier, met een erg kleine impact op het milieu.¹⁸³

6.2.4 Decompositie op hoge temperatuur

Het splitsen van water gebeurt onder een temperatuur van ongeveer 3000°C. Tien procent van het water kan gesplitst worden, de rest wordt gerecycleerd. Binnen deze productiemethode zijn er een aantal verschillende technieken te onderscheiden. Het wordt verwacht dat een efficiëntie van 50% bereikt kan worden en dat de productiekosten sterk verlaagd kunnen worden. Om dit te bereiken, dienen echter eerst een aantal technische problemen opgelost te worden. Zo zijn de gebruikte materialen gevoelig aan corrosie en zorgt de hoge temperatuur voor extra moeilijkheden (b.v. op het vlak van veiligheid).¹⁸⁴

6.3 Waterstof uit biomassa

Biomassa kan omgezet worden tot waterstof via een aantal biologische en thermo-chemische processen. Over het algemeen zijn de biologische processen een stuk trager dan de thermo-chemische processen. Tot op heden is er nog geen commerciële toepassing van de productie van waterstof uit biomassa. De meeste aandacht van de onderzoekers gaat uit naar vergassing van biomassa. Dit proces is vergelijkbaar met het vergassen van steenkool. Deze methode zal eerder geschikt zijn voor productie op kleine schaal, omdat de transportkosten voor biomassa snel kunnen oplopen bij productie op grote schaal. De kost van de verschillende soorten biomassa varieert sterk, maar meestal is ze minstens twee maal zo hoog als de kost van steenkool.

¹⁸³ <http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/production/photobiological.html>, US-DOE, 2006.

¹⁸⁴ <http://www.iea.org/Textbase/papers/2006/hydrogen.pdf> IEA, 2006, *Hydrogen Production and Storage - R&D Priorities and Gaps*, IEA/OECD, Parijs, p. 13-14.

Hierdoor - en door de hoge investeringskost – zal de vergassing van biomassa op kostengebied niet kunnen concurreren met de vergassing van steenkool. In bepaalde niches kan het vergassen van biomassa echter wel een interessant alternatief vormen.¹⁸⁵

Biomassa-energie is koolstofneutraal. Dit betekent dat de CO₂ die vrijkomt bij de vergassing van biomassa vervolgens door nieuwe plantengroei weer geabsorbeerd wordt. Een probleem is echter de kwaliteit van de aangeboden biomassa. De kwaliteit van biomassa varieert sterk naargelang de soort van het gewas, de locatie en het klimaat. Er is dan ook nood aan het ontwikkelen van een soort kwaliteitsstandaard om homogenere en kwaliteitsvollere biomassa te verkrijgen. De productie op grote schaal is het best geschikt voor het produceren van goedkopere brandstoffen van lagere kwaliteit. Kleinere installaties zullen gemakkelijker homogenere brandstoffen van hogere kwaliteit produceren, maar als gevolg van de kleinschaligheid van de productie zal de kost hiervan hoger liggen.^{186 187}

6.4 Waterstof op basis van hernieuwbare energie

Zoals hierboven al aangehaald is, zou het ideaal zijn om al de waterstof te produceren op basis van hernieuwbare energiebronnen. Op deze manier wordt de uitstoot van schadelijke stoffen in het milieu tot het uiterste minimum beperkt. De elektrolyse van water is een productiemethode die gemakkelijk gebruik kan maken van elektriciteit die opgewekt is via hernieuwbare energiebronnen. Deze elektriciteit kan dan opgewekt worden op basis van windenergie, fotonvoltaïsche zonne-energie, thermische zonne-energie, biomassa, waterkracht, geothermische energie en energie uit getijden of golfslag. Enkele technologieën zitten echter nog in de ontwikkelingsfase en zijn

¹⁸⁵ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 57-58.

¹⁸⁶ Rifkin, J., 2004, *De waterstofeconomie: schone en duurzame energie voor iedereen*, Lemniscaat, Rotterdam, p. 221.

¹⁸⁷ <http://www.iea.org/Textbase/papers/2006/hydrogen.pdf> IEA, 2006, *Hydrogen Production and Storage - R&D Priorities and Gaps*, IEA/OECD, Parijs, p. 15-16.

nog niet geschikt om gecommmercialiseerd te worden. Om het potentieel van de hernieuwbare energiebronnen in te kunnen schatten, wordt hieronder de situatie van België even bekeken.¹⁸⁸

België zal enkel gebruik kunnen maken van volgende productiemethodes om elektriciteit op te wekken: windenergie, fotovoltaïsche energie, waterkracht en biomassa. De overige methodes leveren slechts een verwaarloosbaar potentieel op. Verschillende studies tonen aan dat hernieuwbare energiebronnen op lange termijn (2020) ongeveer 10% van de totale elektriciteitsproductie zal kunnen voorzien in België. Hierin is de elektriciteit nodig voor de productie van waterstof nog niet eens meegerekend.¹⁸⁹ Het is dus wat voorbarig om enkel te rekenen op hernieuwbare energiebronnen om een schone en duurzame waterstofproductie te garanderen. Om aan de totale vraag te kunnen voldoen, zullen ook fossiele brandstoffen zoals aardgas en steenkool aangewend moeten worden bij de productie van waterstof.

6.5 Gecentraliseerde of gedecentraliseerde productie

Bij de bespreking van de verschillende productiemethodes is al enkele malen aangehaald dat waterstof geproduceerd kan worden in grote en in kleine productie-units. De decentrale productiefaciliteit levert dan waterstof aan één of enkele tankstations. Dit soort van 'on-site'-productie kan gebeuren via aardgasreforming, het vergassen van biomassa en elektrolyse. Het voordeel van grote productie-units is dat ze efficiënter werken, het nadeel is dat de transport- en distributiekosten hierdoor hoger oplopen. De geproduceerde waterstof moet dan immers naar de tankstations vervoerd worden in gasvorm via pijpleidingen en vrachtwagens met hoge druk tanks, of in vloeibare vorm (over de weg of over het water) in cryogene tanks. Het

¹⁸⁸ Corthout, K. en Renders, C., 2004, *Een analyse van kernenergie en hernieuwbare energiebronnen: is de kernuutstap verenigbaar met het Kyoto-protocol?*, LUC, Diepenbeek, p. 135-137.

¹⁸⁹ http://mineco.fgov.be/energy/ampere_commission/ExSum_nl.pdf Commissie voor de Analyse van de Productiemiddelen van Elektriciteit en de Reöorientatie van de Energievectoren (AMPERE), 2000, *Syntheserapport van de commissie*, AMPERE, Brussel, p. 86-92.

ontwikkelen van een netwerk van waterstofpijpleidingen is een dure aangelegenheid en vergt een internationale coördinatie. Voor de distributie van kleine hoeveelheden waterstof is het transporteren van waterstof in gasvorm via vrachtwagens een mogelijkheid, maar de hoeveelheid waterstof die per vrachtwagen vervoerd kan worden, ligt eerder laag. Er zijn zo'n negentien vrachtwagens nodig om dezelfde hoeveelheid energie te vervoeren als één vrachtwagen met benzine.¹⁹⁰

Bij een gemiddelde vraag naar waterstof kan de decentrale productie van waterstof via aardgas goedkoper zijn dan gecentraliseerde productie, omdat er bij decentrale productie bespaard kan worden op transport- en distributiekosten. Een nadeel is echter dat het opvangen van CO₂ erg duur is voor een kleine productiesite. De investeringskost voor een gedecentraliseerde productie-eenheid kan tot tien keer zo hoog liggen als de investeringskost voor een gecentraliseerde productie-eenheid.^{191 192}

In België is in oktober 2003 op de site van BASF-Antwerpen door Air Liquide een waterstofproductiefaciliteit met een capaciteit van 100.000 Nm³/h geopend. Deze waterstofproductiefaciliteit is één van de grootste ter wereld.¹⁹³

¹⁹⁰ http://www.energy.ca.gov/bioenergy_action_plan/documents/2006-03-09_workshop/WTW_STUDY_2005.PDF CONCAWE, EUCAR, JRC, 2005, *Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context, WELL-to-WHEELS Report Version 2a*, december 2005, p. 47-48.

¹⁹¹ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 49-51.

¹⁹² IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 59-60.

¹⁹³ <http://www.vsb-vzw.be/default.asp?WebpageId=18>, Vlaams Samenwerkingsverband Brandstofcellen vzw, 2006.

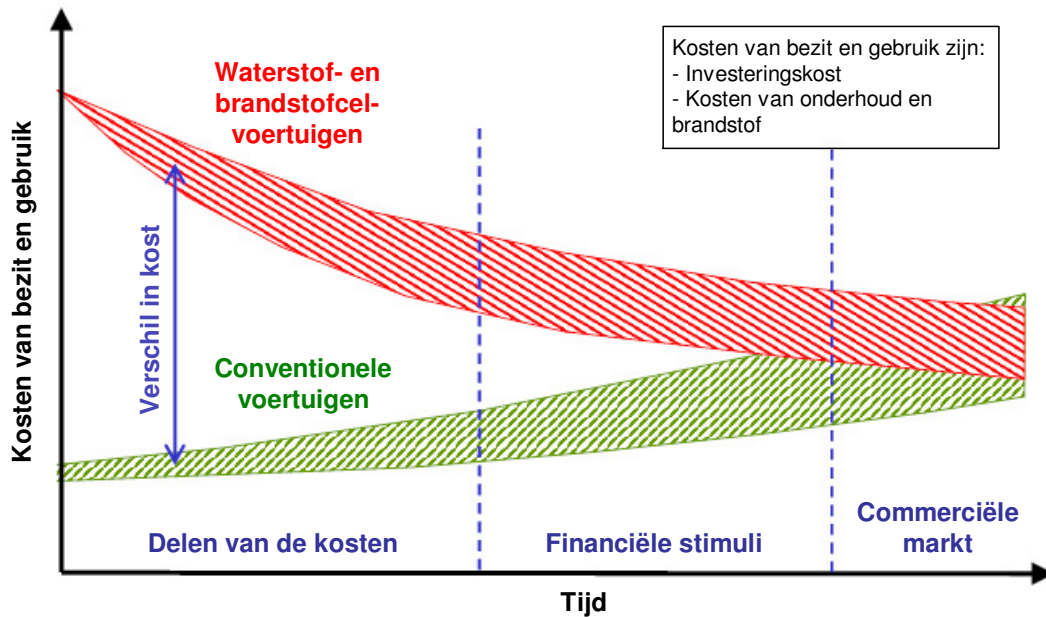
Hoofdstuk VII: Economische analyse

De waterstoftechnologie staat nog niet helemaal op punt, maar belooft vele voordelen te kunnen bieden in de toekomst. Om ten volle te kunnen profiteren van deze potentiële voordelen is het echter noodzakelijk waterstof te kunnen toepassen op grote schaal. Bovendien zou waterstof dan ook commercieel moeten kunnen concurreren met de andere brandstoffen. Om het eenvoudig te stellen: waterstof moet een betaalbaar alternatief vormen voor de gewone brandstoffen. De betaalbaarheid van het gebruik waterstof als energiedrager wordt bepaald door vele factoren: de kostprijs van de brandstofcel, de totale kostprijs van een waterstofauto, de productie van waterstof, de distributie van waterstof, het beleid van de overheden enz. Hieronder wordt per factor nagegaan wat de invloed is op de totale kost van het gebruik van waterstof.

Het is belangrijk er rekening mee te houden dat de waterstoftechnologie momenteel nog in volle ontwikkeling is. Vele brandstofcellsystemen zijn momenteel slechts als prototype in gebruik, op enkele uitzonderingen na. Dit houdt in dat de gebruikte technologie momenteel erg duur is en dat de kosten van het gebruik van waterstof als brandstof op dit moment erg hoog zijn. Figuur 7.1 geeft de evolutie weer van het verschil tussen de kost van een conventioneel voertuig en een waterstof- of brandstofcelvoertuig. Men vertrekt van de kosten van conventionele voertuigen die nu verkocht worden en waterstof- en brandstofcelvoertuigen die momenteel enkel in demonstratieprojecten gebruikt worden. De kosten waarmee rekening gehouden worden, zijn de investering bij de aanschaf en de kosten voor verbruik en onderhoud.¹⁹⁴

¹⁹⁴ https://www.hfpeurope.org/uploads/677/1349/DS_Progress_Report_2005_final.pdf HFP, 2005, *Deployment Strategy Progress Report 2005*, Europese Commissie, Brussel, p. 7-8.

Figuur 7.1: Kost van het bezit en het gebruik van een voertuig



Bron:

https://www.hfpeurope.org/uploads/677/1349/DS_Progress_Report_2005_final.pdf

HFP, 2005, *Deployment Strategy Progress Report 2005*, Europese Commissie, Brussel, p. 8.

Het Deployment Strategy Progress Report 2005 voorspelt twee trends die in de toekomst zullen leiden tot een verkleining van het verschil in kosten. Enerzijds zullen de kosten van een conventioneel voertuig toenemen door:

- de complexe technologie die nodig is om de brandstofefficiëntie te verhogen en de uitstoot van schadelijke stoffen te verlagen
- een strengere regulering van de uitstoot
- de stijgende olieprijs

Anderzijds zullen de kosten voor waterstof- en brandstofcelvoertuigen dalen door:

- een verbetering van de technologie, wat leidt tot minder complexe systemen

- het ontstaan van schaalvoordelen voor waterstof- en brandstofcelvoertuigen
- een hogere efficiëntie van het aandrijfgeheel, wat leidt tot een lagere energieconsumptie.

De enkele waterstof- en brandstofcelvoertuigen die vandaag in het straatbeeld te zien zijn, maken deel uit van demonstratieprojecten. Door de hoge kosten van deze voertuigen rijden ze enkel rond dankzij grote private en publieke investeringen. Ook voor de volgende generatie van waterstof- en brandstofcelvoertuigen zal dit nog het geval zijn, aangezien de kosten nog niet laag genoeg zijn om door de gewone consument gedragen te worden. Eens de kosten voldoende gezakt zijn, kan er gebruik gemaakt worden van andere financiële instrumenten (zoals subsidies) om de aankoop en het gebruik van een waterstof- of brandstofcelvoertuig te stimuleren. Vanaf het moment dat de kosten van een auto op waterstof het zelfde niveau bereiken als die van een conventioneel voertuig, spelen de wetten van de vrije markteconomie.¹⁹⁵

De ramingen van kosten die hieronder aan bod zullen komen, zijn gebaseerd op berekeningen en schattingen die gebeuren op basis van de huidige beschikbare informatie. Het grootste deel van de beschikbare informatie is afkomstig van de vele demonstratieprojecten die overal ter wereld lopen. Ze zijn een uiterst belangrijke manier om goede informatie te krijgen.

7.1 Demonstratieprojecten

Demonstratieprojecten met waterstofvoertuigen (dikwijls ook *Lighthouse Projects* genoemd) hebben een meervoudig doel. Enerzijds zijn ze van het grootste belang om aan informatie te komen over de daadwerkelijke stand van zaken van de gebruikte technologie en over praktische zaken zoals vergunningen en keuringen. Anderzijds hoopt men via de demonstratieprojecten de kiem te leggen voor het ontstaan van een

¹⁹⁵ https://www.hfpeurope.org/uploads/677/1349/DS_Progress_Report_2005_final.pdf HFP, 2005, *Deployment Strategy Progress Report 2005*, Europese Commissie, Brussel, p. 7-8.

groter waterstofnetwerk. De initiatiefnemers hopen de investeringen in nieuwe infrastructuur aan te moedigen. Daarnaast probeert men de consument vertrouwd te maken met de nieuwe brandstof en de interesse te wekken bij het publiek.

Eén van de meest in het oog springende projecten van de laatste jaren is Clean Urban Transport for Europe (CUTE) dat startte in 2001. Dit was een initiatief van de Europese Unie, waarbij gedurende twee jaren in negen grote Europese steden¹⁹⁶ drie bussen aangedreven door brandstofcellen rondreden (zie Figuur 7.2: opvallend is de uitstoot van waterdamp achteraan de bus).

Figuur 7.2: De waterstofbus van lijn 35 in Amsterdam Noord



Bron: <http://www.gvb.nl/overgvb/projecten/downloads/0326-m.jpg> GVB, 2006.

In dit project werd onder andere geëxperimenteerd met de verschillende manieren van waterstof distributie, in warme en koude klimaten, met vlakke en steile wegen enz. Het CUTE-project werd wegens succes vervolgd onder de nieuwe naam 'HyFleet: CUTE'. In totaal bleven 21 bussen een jaar langer op de weg in zeven Europese grootsteden. De bussen hebben samen al meer dan één miljoen kilometer gereden. Op een congres

¹⁹⁶ Deze steden waren Amsterdam, Barcelona, Hamburg, Londen, Luxemburg, Madrid, Oporto, Stockholm en Stuttgart.

op 10 en 11 mei 2006 in Hamburg worden de resultaten van het CUTE demonstratieproject bekend gemaakt. De eerste signalen zijn alvast positief.^{197 198 199}

7.2 Kost van een brandstofcelsysteem

Hieronder zullen de kosten van de onderdelen worden besproken die een grote invloed hebben op de totale kostprijs van een brandstofcelauto. Deze onderdelen zijn de brandstofcellen zelf (fuel cell stack), de ‘balance of plant’-kosten²⁰⁰ en de kost van de opslag van waterstof aan boord van het voertuig. De totale kost van een brandstofcelvoertuig zal daarna vergeleken worden met de kost van een conventioneel voertuig.

7.2.1 Kost van een fuel cell stack

De kosten van een fuel cell stack die hier hier besproken worden, hebben betrekking op brandstofcellen van het type PEMFC, omdat deze soort brandstofcellen geacht worden te zullen worden gebruikt in auto's. Bovendien is het onderzoek naar deze soort brandstofcellen al ver gevorderd, waardoor er gefundeerde kostenvoorspellingen gedaan kunnen worden.

De totale kost van een PEM brandstofcel is de som van de kosten van het membraan, de elektroden, de bipolaire plaat, de platina katalysator en de montagekosten. Hoe de kosten van de onderdelen verdeeld zijn, is te zien in Figuur 7.3. De totale kost van de

¹⁹⁷ <http://www.cute-hamburg.de> HFP, 2006.

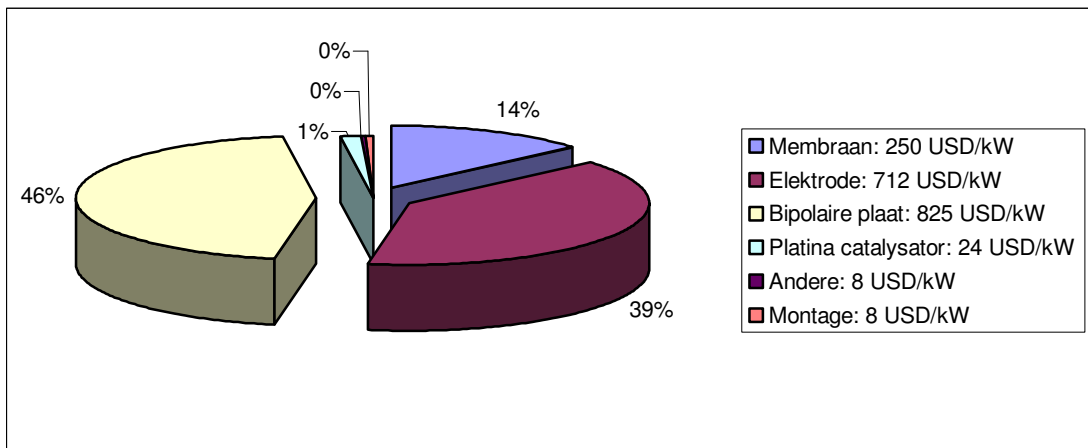
¹⁹⁸ <http://www.evobus.com/inter-evobus/0-674-399759-1-555603-1-0-0-0-0-1-6990-0-0-0-0-0-0-0-0.html> Evobus, 2006.

¹⁹⁹ <http://www.fuel-cell-bus-club.com> Fuel Cell Bus Club, 2006.

²⁰⁰ *Balance of plant (BOP)*: dit zijn de ondersteunende onderdelen die nodig zijn om een brandstofcel een auto te laten aandrijven, zoals een stroomconverter, de elektromotoren, batterijen, in- en uitlaatstukken voor waterstof en lucht, pompen, elektronische chips... (In sommige onderzoeken worden de kosten van de elektromotoren apart behandeld, dus niet als onderdeel van de BOP-kosten.)

PEM brandstofcel uit dit voorbeeld heeft het IEA na onderzoek vastgesteld op 1.826 USD.

Figuur 7.3: Kostenaandeel van de verschillende onderdelen van een huidige PEMFC



De kosten van een brandstofcel worden doorgaans uitgedrukt in USD per kW. Momenteel schommelen de totale kosten van een PEMFC voor een voertuig rond de 1.800 USD/kW. De grote kostendrijvers zijn de bipolaire plaat en de elektroden. Verwacht wordt dat de kost van deze componenten nog sterk kan dalen dankzij massaproductie. De onderdelen die nu geproduceerd worden, zijn unieke onderdelen en worden met de hand gemaakt. Wanneer men overgaat tot massaproductie van deze componenten, kunnen deze kosten sterk verminderd worden. Het IEA spreekt in zijn publicaties over een richtgetal van 500.000 geproduceerde voertuigen per jaar om te kunnen spreken van massaproductie. De evoluties gaan nu echter zo snel dat berekeningen van enkele jaren oud niet meer relevant zijn.²⁰¹

Over hoeveel een fuel cell stack nu daadwerkelijk zal moeten kosten wanneer ze op grote schaal geproduceerd wordt, zijn er erg uiteenlopende cijfers beschikbaar, die al dan niet overeenstemmen met de vooropgestelde richtprijzen. De oorzaak hiervan zijn

²⁰¹ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 87-88.

de verschillende veronderstellingen die gemaakt worden. Toyota beweert vandaag fuel cell stacks te kunnen bouwen tegen een relatief lage kost van 500 USD/kW. Een studie van Arthur D. Little in 2000 gaat uit van een geoptimaliseerde brandstofefficiëntie van de brandstofcel en komt terecht bij een kost van 140 USD/kW. De brandstofcellenproducent Ballard stelt dat zijn fuel cell stacks vandaag 103 USD/kW zouden kosten, indien er 500.000 eenheden per jaar geproduceerd konden worden. Bovendien beweren ze hun prijs tegen 2010 tot 30 USD/kW te kunnen laten zakken. Hiermee zou Ballard het US-DOE richtgetal van 2015 halen (30 USD/kW, dit is ook de kost van de aandrijving van een huidig conventioneel voertuig).^{202 203}

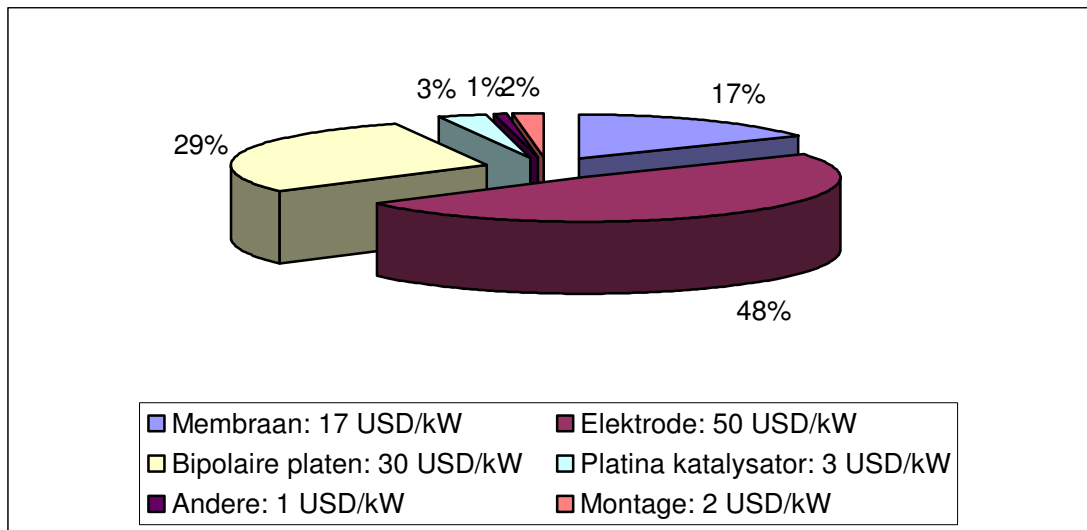
Het IEA is van mening dat een kost van 100 USD/kW een haalbare kaart is. In zijn *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells* van 2005 worden de nodige veranderingen aangegeven die de prijs van een PEMFC laten dalen van 1.800 USD/kW tot 100 USD/kW. Wanneer deze aanpassingen met succes doorgevoerd kunnen worden, ziet de verdeling van de kosten over de componenten er als volgt uit (zie Figuur 7.4). De totale kosten van de fuel cell stack bedragen in dit geval 103 USD/kW.²⁰⁴

²⁰² IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 87-104.

²⁰³ http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen_posture_plan.pdf US-DOE, 2004, *Hydrogen Posture Plan*, US-DOE, Washington, DC, p 21.

²⁰⁴ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 91.

Figuur 7.4: Kostenaandeel van de verschillende onderdelen van een toekomstige PEMFC, gebaseerd op de verwachte aanpassingen



Eens te meer moet er op gewezen worden dat het onderzoek naar verbeteringen aan de PEMFC-technologie nog vele kanten uitkan en uiteraard hangt het reduceren van de kostprijs hier sterk van af. Maar het terugdringen van de kosten van een PEMFC tot 50 USD/kW of minder, zoals het US-DOE vooropstelt, is volgens het IEA niet haalbaar via stapsgewijze verbeteringen van de huidige technieken. Hiervoor is nieuwe technologie vereist waarover men vandaag nog niet beschikt, maar die er wellicht in de toekomst wel zal komen.^{205 206}

²⁰⁵ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 91.

²⁰⁶ http://www.tiaxllc.com/aboutus/pdfs/nrel_fnlrpt_093005.pdf Carlson, E. J. et al, 30 september 2005, *Cost Analysis of PEM Fuel Cell Systems for Transportation*, National Renewable Energy Laboratory, Cambridge/Massachusetts, p. 102-106.

7.2.2 *Kost van balance of plant*

Een brandstofcel op zich doet geen auto rijden. De onderdelen die ervoor zorgen dat de energie van de brandstofcel de auto in beweging zet, worden ‘balance of plant’ of kortweg BOP genoemd. Hieronder vallen ondermeer stroomconverters, elektromotoren, batterijen, het koelingssysteem, een controlesysteem enz. De elektromotoren zijn verantwoordelijk voor het grootste deel van de BOP-kost, op de voet gevolgd door de stroomconverters. De meest logische keuze van elektromotor is het type dat vandaag al gebruikt wordt in elektrische en hybridewagens. Men verwacht dat de kost van dit type motoren zal dalen van 2.000 USD naar 1.200 USD (van 25 USD/kW naar 15 USD/kW). De NiMH-batterijen²⁰⁷ die momenteel in hybridewagens gebruikt worden, zijn ook geschikt voor hybride waterstofvoertuigen. Ze maken dus niet standaard deel uit van gewone brandstofcelvoertuigen. Deze batterijen kosten rond de 2.500 USD. De nieuwe generatie batterijen, waaronder Li-ion-batterijen²⁰⁸, zullen naar verwachting de prijzen verder naar beneden halen.²⁰⁹

Momenteel bedraagt de totale BOP-kost zo’n 1.000 tot 1.500 USD/kW. Deze kost zou drastisch verlaagd worden eens de onderdelen op grote schaal geproduceerd kunnen worden. Zo voorspelt het IEA een daling van de totale BOP-kosten van ongeveer 4.500 USD per wagen tot 1.350 USD per wagen (of van 56 USD/kW tot 17 USD/kW). Op dit ogenblik worden onderdelen gebruikt die vaak niet specifiek ontworpen zijn voor het gebruik in een brandstofcelsysteem en deze onderdelen worden ook vaak door de constructeur van het waterstofvoertuig geproduceerd. De producenten zijn soms bang teveel informatie vrij te geven aan andere spelers, want ze willen de know-how niet doorspelen aan concurrenten. Het gevolg is dat men voorlopig nog niet kan spreken van gestandaardiseerde designs en systemen. Het belang van de BOP-onderdelen mag niet onderschat worden, want vaak zijn zij de

²⁰⁷ NiMH: Nickel Metaal Hydride

²⁰⁸ Li-ion: Lithium Ion

²⁰⁹ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 92.

oorzaak van het falen van de tests met brandstofcellen. Het is nog wat vroeg om een goed zicht te krijgen op de gevolgen van een gestandaardiseerde massaproductie, maar de evolutie in die richting is wel al ingezet.^{210 211}

7.2.3 Kost van de opslag van waterstof

In Hoofdstuk 5 is al vermeld dat de kosten van een opslagsysteem voor waterstof momenteel nog erg hoog zijn en dat het onderzoek naar een optimaal systeem nog volop aan de gang is. Voor gasvormige opslag onder hoge druk in tanks van composietmateriaal schommelen de kosten momenteel tussen 2.400 en 3.300 USD/kg H₂. Het IEA hoopt deze kost via massaproductie terug te kunnen brengen tot 500 – 600 USD/kg H₂. De richtprijs van 67 USD/kg H₂ van het US-DOE wordt door de IEA als onrealistisch beschouwd, omdat de huidige composietmateriaaltechnologie nog maar weinig kan verbeterd worden, waardoor de kosten niet meer zo sterk zullen kunnen zakken. De dure composietmaterialen zijn immers verantwoordelijk voor 40 tot 80% van de kost van een dergelijk opslagsysteem. In een aantal van haar analyses hanteert het IEA een prijs van 225 USD/kg H₂ voor de opslag van waterstof.^{212 213 214}

Voor andere vormen van opslag zijn weinig objectieve cijfergegevens beschikbaar, omdat er enerzijds nog vele verschillende mogelijkheden zijn en er geen standaardsysteem is en anderzijds deze vormen nog in volle ontwikkeling zijn.

²¹⁰ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 92.

²¹¹ http://www.hydrogenassociation.org/newsletter/nhaNews_autumn05_suppliers.asp, The National Hydrogen Association, 2006.

²¹² IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 71-78.

²¹³ <http://www.iea.org/Textbase/papers/2006/hydrogen.pdf> IEA, 2006, *Hydrogen Production and Storage - R&D Priorities and Gaps*, IEA/OECD, Parijs, p. 19-32.

²¹⁴ http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/tiax_cost_analysis_pres.pdf TIAX, 20 oktober 2004, *Cost Analysis of Fuel Cell Systems for Transportation, Compresses Hydrogen and PEM Fuel Cell System*, Fuel Cell Technical Team FreedomCar, Detroit, p. 12-19.

7.2.4 Totale kost van een FCV

De totale kost van een FCV (Fuel Cell Vehicle) wordt gevormd door de fuel cell stack, BOP-kosten (inclusief de elektrische motoren), het opslagsysteem, de batterij (voor een hybride FCV) en eventueel de reformer. Het is wel duidelijk dat auto's aangedreven door brandstofcellen met deze techniek aan boord vandaag de dag nog veel duurder zijn dan conventionele auto's met een vonkontstekingsmotor (ICEV²¹⁵). Over de werkelijke kost van de prototypes zijn niet alle bronnen het eens. Afgaande op de leasingkosten die Toyota in 2002 hanteerde voor haar semi-commerciële demonstratievoertuigen, komt men uit op een kost van 300.000 USD per voertuig. Of hiermee alle kosten gedekt waren, is echter de vraag. Een prototype van een Opel Zafira uitgerust met brandstofcellen en een opslagsysteem voor vloeibare waterstof kostte volgens de fabrikant zo'n 1.000.000 dollar. Uiteraard zijn deze kosten sterk afhankelijk van de gebruikte technologieën. Bovendien is de levensduur van de huidige brandstofcellen nog niet zo lang, waardoor ze tot twee of drie keer vervangen zullen moeten worden tijdens de levensduur van het voertuig. De hoge kostprijs zal in de toekomst echter snel zakken, door massaproductie en de verbetering van de technologie. Ook de levensduur van de brandstofcel zal toenemen.²¹⁶

De R&D-programma's die op dit moment lopen en nog gepland zijn in de toekomst, zullen ervoor zorgen dat de kost van een fuel cell stack zal zakken tot enkele honderden dollars. Om commercieel de strijd aan te gaan tegen de ICEV's zal een nog grotere prijsdaling echter noodzakelijk zijn. Extra inspanningen zijn dus nodig. Deze kunnen komen in de vorm van overheidssubsidies, om de verkoop in het begin te stimuleren. Hoe dan ook, als de kosten niet snel genoeg en niet diep genoeg zakken, zullen er erg hoge subsidies nodig zijn om de verkoop van waterstofvoertuigen op gang te helpen. Meer over de rol van de overheid is er te lezen in punt 7.7. Gelukkig zijn er in het verleden vele voorbeelden van een snelle groei in bepaalde

²¹⁵ ICEV: Internal Combustion Engine Vehicle = een wagen met vonkontstekingsmotor

²¹⁶ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 100-104.

technologieën, zodat de industrie en onderzoekers er vertrouwen in hebben dat deze kostenverlaging er snel zal komen. Toch blijft het moeilijk om een termijn te plakken op zulke evoluties en is enige voorzichtigheid raadzaam.^{217 218}

Het IEA heeft de kost berekend voor het jaar 2030 van een FCV van 80kW met gasvormige opslag van 4kg waterstof onder een druk van 700 bar. Voor de berekening maakte men gebruik van drie mogelijke scenario's, gekoppeld aan de snelheid van de doorbraken in het technologische onderzoek. Deze heeft betrekking op alle onderdelen van het brandstofcelsysteem. Een eerste scenario is het optimistische scenario, waar men uitgaat van een snelle kostenverlaging van de brandstofcellen tot 35 USD/kW tussen 2025 en 2040. Het tweede scenario is een scenario met tragere technologische vooruitgang, waar de kost van de fuel cell stack vastgelegd is op 65 USD/kW. Het derde model gaat uit van een toekomstige kost van 75 USD/kW voor een fuel cell stack. Het eindresultaat is dat het optimistische scenario in 2030 voor een 80kW FCV een prijs oplevert van 21.950 USD. In het trage optimistische scenario wordt dit 25.150 USD en het pessimistische scenario geeft 27.025 USD als resultaat. Het IEA gaat ervan uit dat een vergelijkbare conventionele ICEV in 2030 zo'n 19.450 USD gaat kosten. Wanneer deze gegevens met elkaar vergeleken worden, geeft dit aan dat een FCV in 2030 tussen de 2.500 en 7.625 USD meer gaat kosten dan een ICEV. Een overzicht van de belangrijkste gegevens is terug te vinden in Tabel 7.1.

²¹⁷ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 100-104.

²¹⁸ <http://www.wbcd.org/DocRoot/f13llMAvneJpUcnLgSeN/mobility-full.pdf> World Business Council for Sustainable Development, 2004, *Mobility 2030: Meeting the challenges to sustainability – The Sustainable Mobility Project, Full Report 2004*, WBCSD, p. 67-80.

Tabel 7.1: Geschatte kost van een 80kW FCV in 2030

	2030 Optimistisch scenario	2030 Optimistisch, maar trager scenario	2030 Pessimistisch scenario
PEM fuel cell stack (USD/kW)	35	65	75
Gasvormige opslag van H₂ (700 bar) (USD/kg)	225	375	500
Fuel Cell Stack (USD)	2.800	5.200	6.000
Elektrische motor (USD)	1.200	1.400	2.025
Totale kost FCV (USD)	21.950	25.150	27.075

Bron: IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 100-104.

Ook de mogelijkheid van on-board reforming is in de schatting van het IEA opgenomen. Uit de berekeningen blijkt dat dit soort FCV heel wat duurder is en blijft. In het optimistische scenario bedraagt de kost 27.750 USD. In het trage optimistische scenario is de kost 31.150 USD en voor het pessimistische scenario is het eindresultaat een kostenplaatje van 32.575 USD. Deze kosten liggen dus een heel stuk hoger dan de kosten voor een normale FCV. Dit verklaart voor een deel de negatieve beslissing van het US-DOE met betrekking tot verder onderzoek naar de reformertechnologieën, zoals besproken in punt 5.3.4.²¹⁹

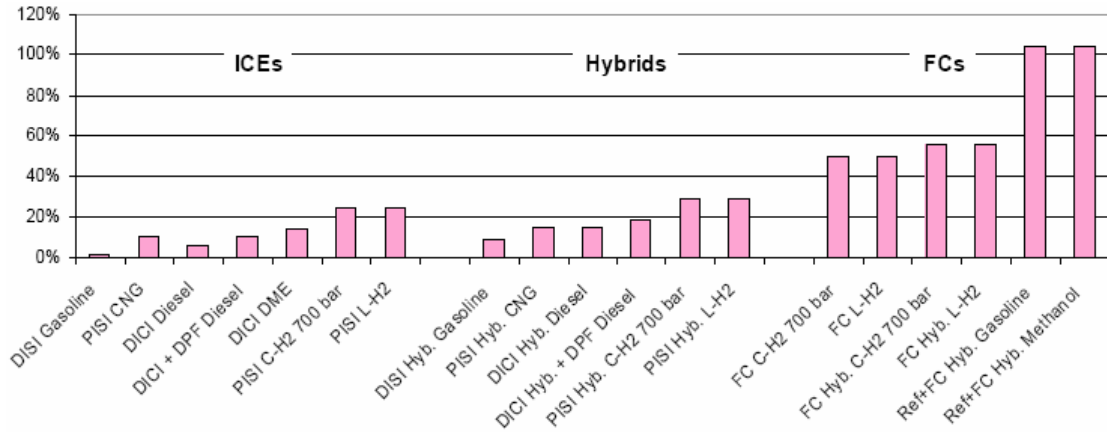
²¹⁹ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 100-102.

Een andere benadering is het berekenen van de incrementele kost. De cumulatieve incrementele kost van FCV's zal in het optimistische scenario tegen 2050 964,9 miljard dollar bedragen, terwijl deze kost in het pessimistische scenario zal oplopen tot 2.264,2 miljard dollar. De kostenreducties spelen een sleutelrol in deze cumulatieve incrementele kosten. Het is gewenst dat de incrementele kost per voertuig snel en ver genoeg zakt. Stel dat bijvoorbeeld de incrementele kost per voertuig van 40.000 USD (in 2010) snel zakt tot 5.000 USD, maar niet meer verder naar beneden gaat, dan zullen de cumulatieve kosten ondanks de snelle daling nog steeds erg hoog oplopen. Hoe lager de kosten van een FCV gebracht kunnen worden door R&D, hoe minder nood er is aan het terugdringen van de kosten tijdens de commercialisering en hoe groter de kans op succes wordt. Het is langs de andere kant naïef te geloven dat enkel R&D de kosten van een FCV laag genoeg kan brengen zodat de FCV's gecommmercialiseerd kunnen worden. Als de kosten niet laag genoeg zijn, wordt de introductie van FCV's op de markt vertraagd en dit zet de deuren open voor de opkomst van hybriden, wagens op biobrandstoffen en andere alternatieven, die de slaagkansen van auto's op waterstof zullen verminderen.²²⁰

In het Well-to-Wheels rapport van EUCAR (European Council for Automotive R&D) van het jaar 2004 wordt de procentuele meerkost voor de verschillende soorten aandrijvingen in vergelijking met een conventionele benzinewagen uit 2010 op een rij gezet. De gegevens geven een beeld van de verkoopprijzen zoals ze nu voor het jaar 2010 (of later, afhankelijk van de technologische evoluties) geschat worden. Figuur 7.5 geeft een overzicht. De bedoeling van deze data is vooral de relatieve verhoudingen weer te geven in plaats van absolute cijfers te verschaffen.

²²⁰ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 100-102.

Figuur 7.5: De geschatte procentuele meerprijs van een voertuig met alternatieve aandrijving (in vergelijking met een conventionele benzinewagen in 2010)



Bron: http://www.enpc.fr/fr/formations/dea_masters/tradd/documents/Welltowheelear2004.pdf CONCAWE, EUCAR, JRC, 2004, *Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context*, *WELL-to-WHEELS Report Version 1b*, januari 2004, p. 17.

De prijs van een voertuig in de toekomst wordt berekend door de prijs van de verbrandingsmotor af te trekken van de totaal kost van het conventionele voertuig en er de geschatte prijs van een andere soort aandrijving bij op te tellen. De kosten van opslag van brandstof en van batterijen e.d. zijn ook in de berekeningen opgenomen. Meteen valt op dat de prijsverschillen het hoogst zullen zijn voor brandstofcelvoertuigen. Het gebruik van een reformer jaagt de prijs nog eens extra de hoogte in. De prijs van een voertuig met brandstofcellen en een tank voor cryogene opslag van H₂ onder een druk van 700 bar (FC C-H2 700 bar) zal 50% hoger liggen dan de prijs van een conventioneel voertuig. Hetzelfde geldt voor een voertuig met brandstofcellen dat gebruik maakt van vloeibare waterstof (FC L-H2). De hybridevoertuigen met brandstofcellen worden geschat 55% duurder te zijn dan een conventioneel voertuig (FC Hyb. C-H2 700 bar en FC Hyb. L-H2). Een hybride met verbrandingsmotor die zowel benzine als waterstof als brandstof kan gebruiken

(PISI²²¹ Hyb. C-H2 700 bar en PISI Hyb. L-H2) zal zo'n 30% extra kosten ten opzichte van een gewoon benzinemodel. De prijs van een wagen met een verbrandingsmotor die enkel waterstof als brandstof kan gebruiken, zal ongeveer 25% hoger liggen dan de prijs van een vergelijkbaar conventioneel benzine voertuig.²²²

7.3 De kostprijs van de productie van waterstof

De productiemethodes die men wil aanwenden om in de toekomst waterstof te produceren om te gebruiken als brandstof voor voertuigen hebben allemaal nog nood aan verbetering. De kapitaalkost moet omlaag, de efficiëntie omhoog en de flexibiliteit van het productieproces moet verbeterd worden. Het gecentraliseerd produceren van waterstof via stoomreforming van aardgas of vergassing van steenkool kan vandaag tegen een kost tussen de 7 en de 10 USD/GJ H₂, afhankelijk van de productiemethode en het al dan niet opvangen van de uitgestoten CO₂. Deze kost kan in middellange tot lange termijn nog wat naar beneden gebracht worden. Het gedecentraliseerd produceren van waterstof kost op dit ogenblik nog meer dan 50 USD/GJ H₂. Decentrale Elektrolyse blijft relatief duur met een kost van 20 USD/GJ H₂ tegen het jaar 2030. Met decentrale stoomreforming van aardgas kan men een kost bereiken die lager ligt dan 15 USD/GJ H₂. De decentrale vergassing van steenkool met het opvangen van CO₂ levert een kost op van 10 USD/GJ H₂ en de decentrale splitsing van water kost 10 USD/GJ H₂ wanneer men gebruikt maakt van kernenergie en 20 USD/GJ H₂ via zonnewarmte. De andere productiemethodes staan technisch nog niet op punt en leveren momenteel kosten op die nog hoger liggen.^{223 224} Een overzicht van deze kosten staat in Tabel 7.2.

²²¹ PISI: een ICE met de 'Port Injection Spark Ignition' technologie

²²² http://www.enpc.fr/fr/formations/dea_masters/tradd/documents/Welltowheeleucar2004.pdf
CONCAWE, EUCAR, JRC, 2004, *Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context*, WELL-to-WHEELS Report Version 1b, January 2004, p. 16-17.

²²³ <http://www.iea.org/Textbase/papers/2006/hydrogen.pdf> IEA, 2006, *Hydrogen Production and Storage - R&D Priorities and Gaps*, IEA/OECD, Parijs, p. 5-18 en p. 60.

²²⁴ <http://darwin.nap.edu/books/0309091632/html> National Academy of Engineering en Board on Energy and Environmental Systems, 2004, *The Hydrogen Economy - Opportunities, Costs, Barriers and R&D Needs*, The National Academies Press, Washington, DC, p. 37-63 en p. 91-105.

Tabel 7.2: De voorspelde decentrale productiekosten van waterstof volgens productiemethode

	USD / GJ H ₂	USD / kg H ₂
Aardgas	15	1,81
Elektrolyse	20	2,41
Steenkool	10	1,20
Kernenergie	10	1,20
Zonne-energie	20	2,41

(1 GJ H₂ = 8,3 kg H₂)

Bron: <http://darwin.nap.edu/books/0309091632/html> National Academy of Engineering en Board on Energy and Environmental Systems, 2004, *The Hydrogen Economy - Opportunities, Costs, Barriers and R&D Needs*, The National Academies Press, Washington, DC, p. 37-63 en p. 91-105.

Deze voorspellingen zijn evenwel niet bindend, want ze zijn afhankelijk van de evoluties van de prijzen van elektriciteit en aardgas, ze kunnen verschillen per regio en ze variëren onder invloed van de kost van de technologische ontwikkelingen (zoals zonne-energie, het opvangen en opslaan van CO₂ enz.). Omdat stoomreforming van aardgas zeker in de beginfase de belangrijkste productiemethode van waterstof wordt, zal de prijs van aardgas een groot effect hebben op de productiekost van waterstof. Over hoe de kostprijs van aardgas gaat evolueren, is niet iedereen het eens. De Energy Information Administration van het US-DOE voorspelt in haar Annual Energy Outlook 2006 dat de prijs van het gas tot 2016 opnieuw zal dalen door een groter aanbod en een kleiner wordende vraag. Na 2016 zou de prijs echter weer stijgen, door de kosten die gemaakt moeten worden om de overblijvende gasreserve aan te spreken.²²⁵ Tegenstanders beweren dan weer dat de prijs van aardgas de voorbije 30

²²⁵ [http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/pdf/0383\(2006\).pdf](http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/pdf/0383(2006).pdf) EIA, 2006, *Annual Energy Outlook 2006*, US-DOE, Washington, DC, p. 87.

jaar met factor tien is toegenomen en ze zien geen aanwijsbare redenen waarom de prijs plots sterk zou moeten beginnen dalen.²²⁶

Stoomreforming van aardgas op kleine schaal en elektrolyse van water zijn de twee productiemethodes die in de korte termijn geschikt zijn om waterstof te produceren. Het onderzoek naar het omvormen van aardgas op kleine schaal is nog niet helemaal afgerond, maar wordt druk getest. Op lange termijn zal waterstof gecentraliseerd geproduceerd kunnen worden door middel van fossiele brandstoffen, waarbij de CO₂ opgevangen wordt. Dit opvangen en opslaan van CO₂ staat technisch momenteel nog niet op punt is zeker commercieel gezien geen optie voor de korte termijn.²²⁷

In de toekomst moeten ook andere productiemethodes op basis van duurzame en koolstofvrije energie aan belang winnen. Om te kunnen concurreren met aardgas zal de kost van het gebruik van duurzame energie echter nog een heel stuk moeten dalen, maar experts denken dat dit zeker mogelijk is. Zo zullen naar verwachting de kosten van elektrolyse met behulp van fotovoltaïsche energie en windenergie in korte tijd een flink stuk zakken (tegen 2010 zouden de kosten de helft bedragen van de kosten in 2000). Momenteel is windenergie op het vlak van kosten de meest effectieve vorm van duurzame energie. Volgens de American Wind Energy Association kost een kilowatt/uur windenergie tegenwoordig minder dan vijf dollarcent en in sommige regio's slechts 3 dollarcent. Hierdoor kan windenergie concurreren met gasgestookte elektriciteitscentrales. Als de prijs van windenergie in de toekomst zakt tot anderhalve dollarcent per kilowatt/uur, dan zal waterstof dat geproduceerd wordt door elektrolyse via deze duurzame energie kunnen concurreren met benzine. De kost van het vergassen van biomassa zou volgens het US-DOE binnen enkele jaren nog slechts 4,5 dollarcent per kilowatt/uur kosten.²²⁸

²²⁶ www.dotynmr.com/PDF/Doty_H2Price.pdf Doty, F. D., 11 maart 2004, *A Realistic Look at Hydrogen Price Projections*.

²²⁷ <http://www.iea.org/Textbase/papers/2006/hydrogen.pdf> IEA, 2006, *Hydrogen Production and Storage - R&D Priorities and Gaps*, IEA/OECD, Parijs, p. 5-18.

²²⁸ Rifkin, J., 2004, *De waterstofeconomie: schone en duurzame energie voor iedereen*, Lemniscaat, Rotterdam, p. 216-222.

Dat met het voorspellen van de toekomstige kosten van waterstof voorzichtig te werk gegaan moet worden, blijkt uit een nieuwsbericht van 14 juli 2005 van het US-DOE. Hierin liet het Energiedepartement weten dat het genoodzaakt was de vooropgestelde toekomstige kost van waterstof bij te stellen. In plaats van de verwachte kost van 1,50 USD per gallon benzine equivalent (of 1,50 USD/kg H₂) die in 2002 berekend was op basis van het hervormen van aardgas, werd de nieuwe richtprijs vastgelegd op 2,00 tot 3,00 USD/kg H₂. Deze bijsturing werd deels verantwoord door de beperktheid van de olievoorraden en de globale stijging in de vraag naar olie.²²⁹

7.4 Kostprijs van de distributie van waterstof

Vandaag de dag wordt waterstof meestal geproduceerd dichtbij of op de plaats waar het verwerkt wordt. Dit betekent dat er nog geen echt uitgebreid waterstofdistributienetwerk bestaat. Voor een waterstofeconomie kan bestaan, moeten er dus eerst een infrastructuur voor de distributie van waterstof gebouwd worden. Pijpleidingen zijn de goedkoopste manier om grote hoeveelheden waterstof te transporteren. Zoals gezegd is er echter momenteel nog geen wijd verspreid netwerk van waterstofpijpleidingen. Het transporteren van waterstof via pijpleidingen zou een kost 1 tot 2 USD/GJ H₂ (0,12 tot 0,24 USD/kg H₂) toevoegen aan de productiekosten. Een andere manier om het te transporteren is gasvormig onder hoge druk in vrachtwagens. Dit is vooral geschikt voor kortere afstanden. Het US-DOE stelt dat deze methode economisch gezien niet interessant is voor afstanden langer dan 320 km. Waterstof kan ook in vloeibare vorm getransporteerd worden in tankwagens, wat toelaat een grotere hoeveelheid in één keer te transporteren. Dit transporteren in cryogene tanks geeft een extra kost van 7 tot 10 USD/GJ H₂ (0,84 tot 1,20 USD/kg H₂). Het vloeibaar maken vraagt immers heel wat energie. Aangezien er nog geen netwerk is van pijpleidingen, zal het transporteren in tanks in de toekomst ook aan

²²⁹ http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/news_cost_goal.html US-DOE, 2006.

belang winnen.²³⁰ ²³¹ Ook hier weer moet de bemerking gemaakt worden dat deze kosten vaak verschillen in onderzoeken.

Belangrijk genoeg om even te belichten is de bevoorrechte positie waarin België zich bevindt. Momenteel is er immers in ons land al een relatief uitgebreid net van waterstofpijpleidingen ter beschikking dankzij de aanwezigheid van het bedrijf Air Liquide. Dit bedrijf baat een ondergronds netwerk uit waarmee het naast waterstof ook stikstof, zuurstof en koolstofmonoxide transporteert. Het totale netwerk beslaat 834 km. De verspreiding ervan is te zien op Figuur 7.6. De waterstofleidingen zijn aangegeven als rode lijnen op de kaart.²³²

Figuur 7.6: De waterstofleidingen van Air Liquide in België



Bron: <http://www.vsb-vzw.be/default.asp?WebpageId=20> Vlaams Samenwerkingsverband Brandstofcellen vzw, 2006.

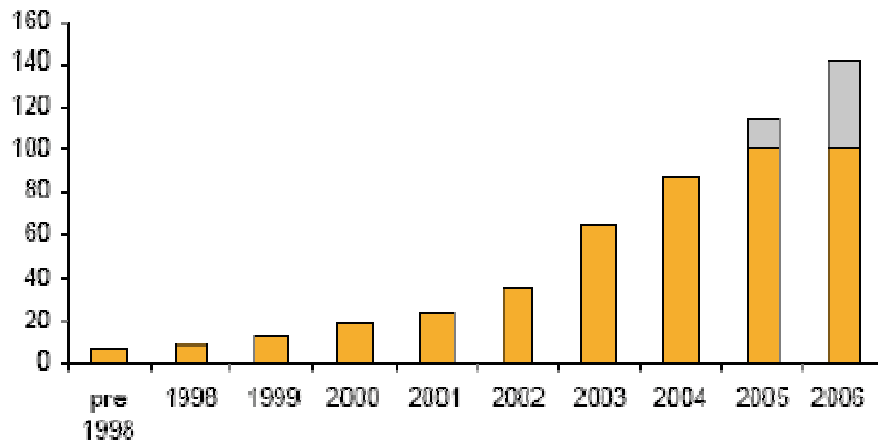
²³⁰ http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/doe_h2_delivery.pdf US-DOE, maart 2006, *Hydrogen Distribution and Delivery Infrastructure*, US-DOE, Washington, DC, 2 p.

²³¹ <http://darwin.nap.edu/books/0309091632/html> National Academy of Engineering en Board on Energy and Environmental Systems, 2004, *The Hydrogen Economy - Opportunities, Costs, Barriers and R&D Needs*, The National Academies Press, Washington, DC, p. 45-63.

²³² <http://www.vsb-vzw.be/default.asp?WebpageId=20> Vlaams Samenwerkingsverband Brandstofcellen vzw, 2006.

In Figuur 7.7 wordt het aantal tankstations weergegeven dat momenteel wereldwijd gebouwd is. De oranje kleur duidt op het aantal effectief gebouwde tankstations, de grijze kleur geven de voorspellingen voor 2005 en 2006 aan.

Figuur 7.7: Aantal waterstoftankstations wereldwijd (cumulatief)



Bron: http://www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/FCTFiles/FCTArticleFiles/Article_1068_2005%20Global%20Survey.pdf Fuel Cell Today, 2006 Worldwide Survey 2005, Fuel Cell Today, p. 7.

Waar deze waterstoftankstations precies gelegen zijn, wat voor waterstof er getankt kan worden en nog meer details zijn terug te vinden op www.h2stations.org. Deze website houdt een wereldkaart bij met daarop alle tankstations die operationeel, gepland en opgedoekt zijn. Momenteel staat de teller van de database op 227 tankstations (waaronder dus ook de geplande en gesloten tankstations). In de beginfase, wanneer waterstof vooral via tankwagens zal getransporteerd worden, zal men aan de pomp zo'n 1,20 tot 2,42 USD/kg H₂ extra betalen bovenop de productieprijs als kost van de distributie. Dit betekent dat de helft (tot bijna 70%) van wat men in een tankstation zal betalen voor waterstof toe te schrijven is aan de kost van de distributie. Ter vergelijking: de huidige distributiekost van benzine bedraagt 0,19 USD per gallon (vergelijkbaar met USD/kg H₂). Dit verschil is voor een groot gedeelte te verklaren

doordat het minder kost om een vloeistof (zoals benzine) te vervoeren dan een gas.²³³

234

7.5 Scenario-analyses

In januari 2004 heeft de Europese Commissie op aangeven van de High Level Group het European Hydrogen and Fuel Cell Platform (HFP) opgericht. Het doel was een strategie te ontwikkelen om te komen tot een waterstofeconomie. Het Deployment Strategy Steering Panel (DSP) werd als orgaan aangeduid om een programma en aanbevelingen op te stellen die het beleidskader vormen om te komen tot commercieel verantwoorde waterstoftoepassingen en geschikte infrastructuur. Zij hebben daarom lange termijn doelstellingen opgesteld (lopende tot het jaar 2050, zoals opgelegd door de High Level Group), maar ook een aantal tussentijdse mijlpalen, waaronder het ‘Snapshot 2020’ en de hieruit afgeleide R&D-doelstellingen voor 2015. Het DSP is als volgt te werk gegaan om te komen tot haar aanbevelingen.²³⁵

1. De tussentijdse mijlpalen (Snapshot 2020) uitgewerkt.
2. De Strategic Research Agenda (SRA) referentiepunten opgesteld voor 2015 om tot een grootschalige marktintroductie te komen ten laatste in 2020.
3. De technologie en de markt geanalyseerd (incl. waterstof- en brandstofceltechnologie, productie, opslag en distributie).
4. De sociale en politieke aspecten onderzocht.
5. Een ‘Deployment Strategy’ voorgesteld.
6. Deze Deployment Strategy afgestemd op de doelen en de timing van de SRA.

²³³ <http://darwin.nap.edu/books/0309091632/html> National Academy of Engineering en Board on Energy and Environmental Systems, 2004, *The Hydrogen Economy - Opportunities, Costs, Barriers and R&D Needs*, The National Academies Press, Washington, D.C., p. 40.

²³⁴ www.iea.org IEA, 2006.

²³⁵ https://www.hfpeurope.org/uploads/677/687/HFP_DS_Report_AUG2005.pdf HFP, 2005, *Deployment Strategy*, Europese Commissie, Brussel, p. 5-8.

Het jaar 2020 is gekozen vanwege het uitdagende karakter van de doelstellingen die op deze relatief korte termijn gesteld worden. 2015 is als extra mijlpaal gekozen, zodat er nog vijf jaar de tijd is om serieproductie en commerciële activiteiten op te starten. Wat precies de doelstellingen zijn van de Snapshot 2020 is te lezen in Tabel 7.3. Deze mijlpalen zijn uiteraard niet enkel opgesteld voor de transportsector, maar ook voor de draagbare toepassingen van brandstofcellen, de draagbare generators en vroege markttoepassingen en de stationaire brandstofcellen (als warmte- en energiecentrale).²³⁶

Tabel 7.3: Verwachtingen in het Snapshot 2020 scenario

	Draagbare FC's	Draagbare generators en vroege markttoepassingen	Stationaire FC's	Wegtransport
# FC's verkocht per jaar in 2020 (EU)	~ 250 miljoen	~ 100.000	100.000 tot 200.000	400.000 tot 1.800.000
Cumulatief # FC's verkocht tot 2020 (EU)	Onbekend	~ 600.000	400.000 tot 800.000	1.000.000 tot 5.000.000
Verwachte marktstatus (EU)	Gevestigde markt	Gevestigde markt	Groei	Grootschalige marktintroductie
Gemiddelde kracht FC	15 kW	10 kW	< 100 kW (klein) > 100 kW (industrieel)	80 kW
FC kost doelstelling	1,27 tot 2,54 USD/W	635 USD/kW	2.545 USD/kW (klein) 1.275 tot 1.900 USD/kW (industrieel)	< 127 USD/kW (voor 150.000 eenheden per jaar)

Bron: https://www.hfpeurope.org/uploads/677/687/HFP_DS_Report_AUG2005.pdf
HFP, 2005, *Deployment Strategy*, Europese Commissie, Brussel, p.7

²³⁶ https://www.hfpeurope.org/uploads/677/687/HFP_DS_Report_AUG2005.pdf HFP, 2005, *Deployment Strategy*, Europese Commissie, Brussel, p. 5-8.

Het wordt verwacht dat een grootschalig aanbod van waterstoftechnologie in voertuigen wat langer op zich laat wachten dan andere waterstoftechnologieën. In 2020 zal het aantal voertuigen dat rijdt op waterstof slechts een kleine fractie zijn van het totale Europese wagenpark. Momenteel zijn er ongeveer 215 miljoen wagens in Europa, waaronder 190 miljoen personenwagens. In het beste geval zullen er in Europa in 2020 zo'n 400.000 tot 1.800.000 waterstofauto's verkocht worden per jaar. De belangrijkste bekommernis is dan ook tegen 2020 een voldoende groot aanbod aan waterstofauto's te kunnen voorzien en een de nodige infrastructuur (zoals tankstations) klaar te hebben.²³⁷

De transitiestappen voor de transportsector beschreven door de High Level Group worden hieronder in detail bekeken. Belangrijk is op te merken dat voor het kunnen verwezenlijken van deze stappen het verder ontwikkelen van de technologieën noodzakelijk is.²³⁸

- **Stap 1 (vandaag tot 2010):** demonstratieprojecten van FCV's in gecontroleerde vloot (b.v. CUTE, en andere Lighthouse Projects)
- **Stap 2 (> 2010):** serieproductie van wagens met brandstofcellen voor vloot (b.v. stadsbussen, taxi's, enz.) met aan boord opslagtechnologie van de eerste generatie
- **Stap 3 (> 2020):** serieproductie van wagens met brandstofcellen voor algemeen gebruik met aan boord opslagtechnologie van de tweede generatie en met brandstofcellen die werken op hoge temperatuur en tegen lage kost
- **Stap 4 (> 2030 – 2040):** brandstofcellen wordt de dominante technologie in het transport

²³⁷ https://www.hfpeurope.org/uploads/677/687/HFP_DS_Report_AUG2005.pdf HFP, 2005, *Deployment Strategy*, Europese Commissie, Brussel, p. 21-26 en p. 44-46.

²³⁸ https://www.hfpeurope.org/uploads/677/687/HFP_DS_Report_AUG2005.pdf HFP, 2005, *Deployment Strategy*, Europese Commissie, Brussel, p. 21-26 en p. 44.

Binnen de mijlpalen van Snapshot 2020 is opgenomen dat tegen 2020 waterstof geproduceerd zal worden door middel van een reeks verschillende productiemethodes en dat deze productie CO₂-reducerend zal zijn. De mogelijkheden voor waterstofproductie zullen zijn:

- op basis van koolstofarme elektriciteit, afkomstig van bijvoorbeeld hernieuwbare energiebronnen (windenergie, kernenergie, fossiele brandstoffen met CO₂-opvang, enz.)
- via vergassing van steenkool of stoomreforming van aardgas, met CO₂-opvang
- via vergassing van biomassa, wat technisch haalbaar wordt vanaf 2020
- aan de tankstations zal er waterstof gegenereerd worden via elektriciteit van het net .

De twee belangrijkste productiemethodes zullen elektrolyse (erg efficiënt en lage kost) en vergassing zijn, al kan nu nog niet met zekerheid gezegd worden welke productiemethode (en distributiemethode) de bovenhand zal halen in 2020. Daarvoor zijn er voorlopig nog te veel onzekerheden waarmee rekening gehouden moet worden.²³⁹

Om de voortgang van het Snapshot 2020-scenario binnen de transportsector te analyseren, zijn een aantal ‘key performance indicators’ opgesteld. Op basis van deze parameters kan nagegaan worden in hoeverre de doelstellingen gehaald worden (vooral door ze te toetsen aan de Lighthouse Projects) en kunnen nieuwe veronderstellingen gemaakt worden over de toekomstige evoluties. Deze parameters zijn: het aantal wagens, het aantal tankstations, de hoeveelheid waterstof die per tankstation verhandeld wordt, de totale well-to-tank kost, de betrouwbaarheid van de technologie (vooral het aantal werkingsuren), het aantal en de aard van ongelukken,

²³⁹ https://www.hfpeurope.org/uploads/677/687/HFP_DS_Report_AUG2005.pdf HFP, 2005, *Deployment Strategy*, Europese Commissie, Brussel, p. 23-24.

de emissiereductie (zowel well-to-tank als well-to-wheel), de break-even tijd en de tevredenheid van de consument.²⁴⁰

In Bijlage 1 is het hele transitieproces - zoals het door Europa gezien wordt - in schemavorm weergegeven. Het is interessant om de plannen van Europa te vergelijken met de plannen van de andere concurrerende regio's, namelijk Japan en de Verenigde Staten. Een vergelijking met Japan is enkel mogelijk voor stationaire systemen en transporttoepassingen. Het commercialiseringsplan van Japan bevat drie fases. De eerste fase (de R&D-fase, van 2002 tot 2005) richt zich op demonstratieprojecten, het ontwikkelen van codes en standaarden en op het aanvatten van de infrastructuurwerken. Tijdens de tweede fase (de introductiefase, van 2005 tot 2010) wordt alle aandacht gericht op het ontwikkelen van een bevoorradingsstelsel van waterstof en de versnelde introductie van FCV's. In de derde fase (de verspreidingsfase, van 2011 tot 2020) wordt de waterstofmarkt geacht zelfstandig verder te kunnen groeien om in 2020 te kunnen spreken van een volgroeide markt. Deze ambitieuze plannen maken een doorgedreven onderzoek naar nieuwe technologieën noodzakelijk.^{241 242}

Het Ministerie van Economische Handel en Industrie van Japan verwacht dat er tegen 2010 ongeveer 50.000 FCV's zullen rondrijden op de Japanse wegen en hoopt daarnaast op 2,2 GW aan stationaire brandstofcellen. Tegen 2020 zouden er vijf miljoen waterstofauto's moeten rondrijden in Japan en zouden de geïnstalleerde stationaire systemen samen goed moeten zijn voor ongeveer 10 GW. Er wordt geschat dat er in 2030 ongeveer 15 miljoen FCV's zullen zijn in Japan en dat de stationaire brandstofcellen goed zullen zijn voor 12,5 GW aan energie. Het doel is om in 2020 een FCV beschikbaar te hebben met een rijbereik van 800 km (hiervoor is de opslag

²⁴⁰ https://www.hfpeurope.org/uploads/677/1349/DS_Progress_Report_2005_final.pdf HFP, 2005, *Deployment Strategy Progress Report 2005*, Europese Commissie, Brussel, p. 23-24.

²⁴¹ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 36.

²⁴²

<http://www.iphe.net/IPHErestrictedarea/5th%20IPHE%20SC%20mtg/Final%20Presentations/IPHE/TUES%20AM/IPHEJapan.pdf> Miyagawa, T., maart 2006, *Japan's Approach to Commercialization of Fuel Cell / Hydrogen Technology*, IPHE Steering Committee, p. 1-2.

van 7 kg H₂ nodig) en een kost van 35 USD/kW. Men hoopt de productieprijs van waterstof tegen dan ook terug te kunnen brengen tot 34 USD/GJ (zonder belastingen), wat overeenkomt met de benzineprijs met belastingen.^{243 244}

Deze cijfers zijn vergelijkbaar met deze die Europa vooropstelt. De grote Japanse autofabrikanten Honda en Nissan vinden deze doelstellingen echter te optimistisch. Het is vooral Nissan dat een inhaalbeweging moet maken. Daarom heeft het in 2002 besloten technologie te gaan kopen bij Toyota. Het Onderzoeksinstituut voor Systeemtechnologie van Japan berekent de kostprijs voor brandstofcellen bij een productie van 50.000 eenheden per jaar op 213 USD/kW en bij een productie van 5.000.000 op 48,5 USD/kW. Een brandstofcelunit voor een FCV van 80kW zou dan in 2010 ongeveer 17.000 USD kosten en in 2020 zo'n 3.900 USD.²⁴⁵

De strategie van Amerika wijkt wat af van die van Europa en Japan. Het US-DOE werkt toe naar het jaar 2015. In dat jaar zal er een beslissing over commercialisering genomen worden. Tijdens de jaren die vooraf gaan zal er volop verder worden onderzocht, worden er demonstratieprojecten opgezet en probeert men zo de technologische en economische doelen te halen. Een overzicht van de fases die het pad vormen naar de Amerikaanse waterstofeconomie is gegeven in Figuur 7.8.²⁴⁶

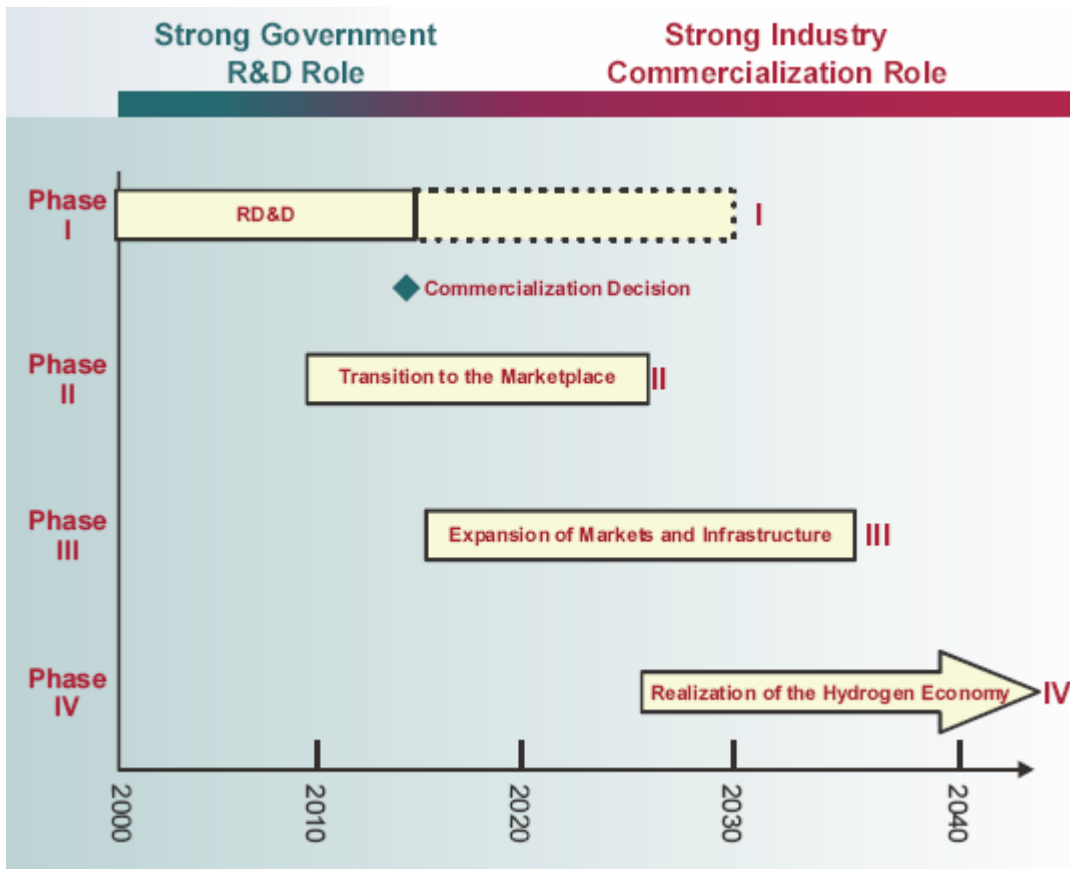
²⁴³ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 36.

²⁴⁴ <http://www.iphe.net/IPHErestrictedarea/5th%20IPHE%20SC%20mtg/Final%20Presentations/IPHE/TUES%20AM/IPHEJapan.pdf> Miyagawa, T., maart 2006, *Japan's Approach to Commercialization of Fuel Cell / Hydrogen Technology*, IPHE Steering Committee, p. 1-2.

²⁴⁵ <http://www.twanetwerk.nl/default.ashx?DocumentID=1538> TWANETWERK, 2006.

²⁴⁶ https://www.hfpeurope.org/uploads/677/687/HFP_DS_Report_AUG2005.pdf HFP, 2005, *Deployment Strategy*, Europese Commissie, Brussel, p. 8.

Figuur 7.8: De fases in de Amerikaanse transitie naar een waterstofeconomie



Bron: http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen_posture_plan.pdf US-DOE, 2004, *Hydrogen Posture Plan*, US-DOE, Washington, DC, p.10.

De eerste fase van het Amerikaanse transitie-model loopt van 2000 tot 2015. Tijdens deze fase gaat alle aandacht naar het onderzoek om de vooropgestelde technische doelen te halen en worden de eerste stappen gezet om de commercialiseringsbeslissing in te leiden. De grafiek toont dat het onderzoek niet stopt in 2015, maar verder blijft lopen tot 2030 (en in feite nooit stopt). De tweede fase van 2010 tot 2025 is de fase waarin de marktpenetratie van waterstof zal beginnen. Draagbare en stationaire toepassingen zijn commercieel beschikbaar en de infrastructuurwerken nemen hun aanvang. De derde fase loopt van 2015 tot 2035. In deze fase gebeuren de grote investeringen in de infrastructuur. Tijdens deze derde fase worden krachtcentrales en transportsystemen op waterstof commercieel beschikbaar. In de vierde en laatste fase

die begint in 2025 (en doorloopt tot een onbepaald tijdstip) kan er gesproken worden van een volwassen waterstofeconomie, waar de infrastructuur en de toepassingen in alle regio's beschikbaar en operationeel zijn.²⁴⁷ Een meer gedetailleerde uiteenzetting van de technische doelstellingen in deze fasen is terug te vinden op de US-DOE-website <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/mission.html>.

7.6 Potentiële barrières voor de invoering van waterstof

In het Deployment Strategy Progress Report 2005 worden voor Europa de potentiële barrières omschreven die een transitie naar een waterstofeconomie zouden kunnen tegenhouden of vertragen. De meeste van deze obstakels kunnen veralgemeend worden voor de andere landen die werken aan een waterstofeconomie. Hieronder volgt een overzicht van de belangrijkste bedreigingen.²⁴⁸

- Politieke en sociologische barrières:
 - een slechte afstemming van de verschillende beleidsmaatregelen
 - onvoldoende steun van de overheden
 - een slechte balans tussen de publieke en industriële belangen

- Moeilijkheden bij de organisatie:
 - te veel bureaucratie
 - te weinig ondersteuning door het management van de industrie
 - te weinig flexibiliteit van de verschillende stakeholders
 - het ontwerpen van een wettelijk kader en de nodige regulering

²⁴⁷ http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen_posture_plan.pdf US-DOE, 2004, *Hydrogen Posture Plan*, US-DOE, Washington, DC, p. 7-11.

²⁴⁸ https://www.hfpeurope.org/uploads/677/1349/DS_Progress_Report_2005_final.pdf HFP, 2005, *Deployment Strategy Progress Report 2005*, Europese Commissie, Brussel, p. 5-6.

- Financiële barrières:
 - te weinig investeringen uit de publieke sector en van de overheden
 - te weinig investeringen door de industrie

7.6.1 Het belang van de introductie

Het is misschien interessant eerst even terug te kijken in de tijd om lessen te trekken uit vergelijkbare (r)evoluties in de automobielsector. Zo is de elektrische wagen nooit echt doorgebroken nadat hij in 1997 op de markt werd gebracht. Een ander voorbeeld is de hybride. In 1997 was er de introductie van de Toyota Prius ('de eerste echte hybride') in Japan en later in 2000 was er de start van de verkoop in Europa en de Verenigde Staten. Ook Honda sprong gretig mee op de kar van de hybridetechniek en lanceerde twee hybridemodellen in drie jaar tijd. Studies verwachten dat tien jaar na de komst van de eerste hybride er ongeveer 700.000 soortgelijke voertuigen in de VS. rond zullen rijden. En de verkoop stijgt nog steeds. Ondanks de jaarlijks groeiende verkoopsaantallen en de federale belastingsaftrek van 2.000 USD, blijft het aantal hybrides vergeleken met het totale aantal wagens in de VS marginaal. Ongeveer 3% van alle auto's is een hybride. Een vergelijkbaar scenario ziet men ook in Europa, waar de dieselmotor echter de populairste aandrijving blijkt te zijn en te blijven. De oorzaak hiervan ligt misschien bij de manier waarop dit soort wagen gepromoot wordt bij de consument. Er wordt momenteel weinig nadruk gelegd op de voordelen aan de pomp en voor het milieu. In plaats daarvan probeert men het verantwoordelijkheidsgevoel en het schuldbesef van de mensen aan te spreken. En dit is misschien niet de juiste methode.

De les die hieruit getrokken kan worden, is dat een succesvolle introductie nog geen garantie is voor een schitterend verder verloop van een project. Het blijkt immers erg moeilijk om enkele marktpercentages in te nemen, ook over langere termijn. Het is belangrijk dat er in de marketingstrategie gefocust wordt op de main selling points van een FCV. Een verder en dieper onderzoek naar de factoren die een rol spelen bij de

aankoop van een nieuwe wagen zou hier ook van grote hulp kunnen zijn om de FCV met succes aan de man te brengen.²⁴⁹

7.6.2 Het belang van de beschikbaarheid van de materialen

Een ander belangrijk punt is dat de productiecapaciteit een plotse sterke groei in vraag zou moeten aankunnen. Momenteel wordt er gebruik gemaakt van materialen zoals platina, waarvan de beschikbaarheid wel eens roet in het eten zou kunnen gooien van een snel groeiscenario. Als er niet genoeg aanbod is van deze materialen op het ogenblik dat de vraag zich voordoet, is er kans dat de FCV zijn momentum mist. Als dit zou gebeuren, is er ook het gevaar dat de hybriden als de rol van substituut gaan spelen, omdat het verschil in efficiëntie tussen een FCV en een hybride niet zo groot is als tussen een FCV en een ICEV.²⁵⁰

7.6.3 Het belang van de belastingen op brandstoffen

In de Deployment Strategy belicht het European Hydrogen & Fuel Cell Technology Platform het belang van de belastingheffing op brandstoffen. Er wordt gesteld dat puur op basis van kosten de prijs van waterstof aan de pomp niet zal kunnen concurreren met de prijs van andere brandstoffen (zie punt 7.3)²⁵¹. Het is daarom ook dat een belastingsuitzondering op waterstof een gewenste maatregel is om de introductie van waterstof als brandstof te laten slagen in de introductiefase. Let wel, er wordt duidelijk gesproken over de introductiefase (waarbij waterstof als brandstof slechts een marktniche van 5 tot 10% voor zijn rekening neemt), want wanneer waterstof als brandstof een groter marktsegment inneemt, heeft dit een negatief effect op de staatsfinanciering van de landen waarin de transitie gebeurt. Over de hele

²⁴⁹ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 122.

²⁵⁰ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 122.

²⁵¹ De toekomstige productiekosten van waterstof worden geschat tussen 10 en 20 USD/GJ, terwijl benzine ongeveer 10 USD kost per GJ.

wereld variëren de belastingen op brandstoffen van bijna 0 USD/GJ tot zo'n 30 USD/GJ in bepaalde Europese landen. De accijnzen op brandstoffen zijn gemiddeld in lidstaten van de EU goed voor 9,4% van het totale staatsinkomen. Wanneer men dit inkomen wil behouden, is het door de toenemende energie-efficiëntie nodig de belasting per eenheid energie te laten stijgen.^{252 253}

Wetende dat benzine ongeveer 10 USD/GJ kost, betekent dit dat de consument door belastingen tot het vierdubbele van de kostprijs betaalt. Dit zorgt ervoor dat het niveau van het belasten van brandstoffen een grote rol speelt bij het kiezen van de consument voor een bepaalde brandstof. Langs de andere kant is het zo dat de hoge belasting op brandstoffen de consument kan doen kiezen voor meer energie-efficiënte opties.²⁵⁴ Een analyse van het IEA wijst aan dat wanneer waterstof vrijgesteld wordt van alle belastingen, dit een toename van 38% kan betekenen in de vraag naar waterstof in 2050. Deze maatregel zou vooral effectief zijn in regio's met een hoge belasting op brandstoffen, zoals Japan en Europa. In regio's met lagere taksen op brandstoffen kan de overheid een andere strategie toepassen, namelijk het verhogen van de taksen op alle alternatieven van waterstof. Hierdoor heeft waterstof natuurlijk het comparatieve voordeel ten opzichte van de andere brandstoffen en zal de vraag naar waterstof stijgen.²⁵⁵

Wanneer men ervan uitgaat dat waterstof vanaf de introductiefase onbelast blijft (wat wenselijk is om een goede introductie in de hand te werken), zal er een probleem ontstaan wanneer de consument meer en meer waterstof als brandstof gaat gebruiken en waterstof als brandstof overgaat van haar marktniche naar de volledige markt. In dit geval nemen immers de inkomsten door belasting van andere brandstoffen voor de overheden af. Wenselijk is dat dit verlies aan inkomsten op langere termijn opgevangen kan worden door het belasten van waterstof. Het is dan ook de bedoeling

²⁵² https://www.hfpeurope.org/uploads/677/687/HFP_DS_Report_AUG2005.pdf HFP, 2005, *Deployment Strategy*, Europese Commissie, Brussel, p. 68-70.

²⁵³ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 127.

²⁵⁴ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 127.

²⁵⁵ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 149.

dat op langere termijn de prijs van de productie en distributie van waterstof wél concurrentieel is ten opzichte van andere brandstoffen.²⁵⁶

7.6.4 *Het dilemma van de korte termijn versus de lange termijn investeringen*

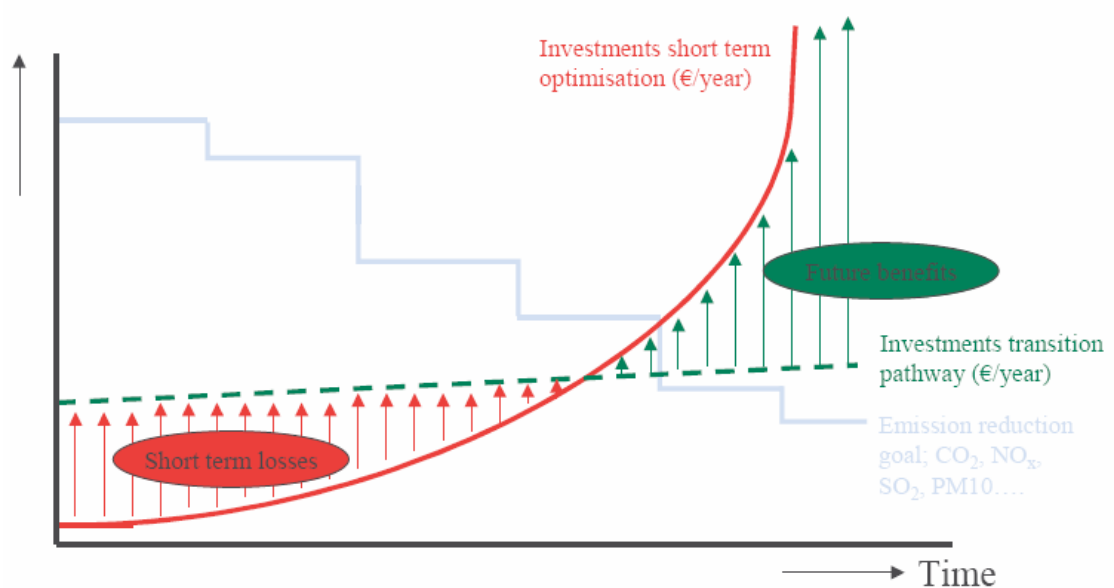
Een van de belangrijkste problemen die een transitie naar een waterstofeconomie in de weg kunnen staan is het dilemma van de korte termijn versus de lange termijn optimalisatie, gekoppeld aan de verschillende belangen van de actoren die de transitie uitvoeren. In marktstudies waarin voorspellingen worden gemaakt over duurzame energie blijkt waterstof tot 2030 niet echt een rol van betekenis te zullen spelen (behalve in de ‘backcasting’-studies²⁵⁷). De meest voor de hand liggende oorzaak hiervan is dat er altijd andere alternatieven zijn die op korte termijn voordeliger zijn dan de waterstofoptie. Toch is het niet altijd de beste keuze om voor dit korte termijn voordeel te kiezen.

Doorheen de tijd is het niveau van uitstoot van schadelijke stoffen (o.a. CO₂, NO_x,) door allerhande voertuigen en installaties gedaald dankzij steeds meer investeringen om de emissies tegen te gaan. Om de emissiedoelstellingen te halen moet er steeds meer geïnvesteerd worden. Figuur 7.9 is hier een schematische weergave van.

²⁵⁶ https://www.hfpeurope.org/uploads/677/687/HFP_DS_Report_AUG2005.pdf HFP, 2005, *Deployment Strategy*, Europese Commissie, Brussel, p. 68-70.

²⁵⁷ *Backcasting*: in plaats van huidige ontwikkelingen door te trekken naar de toekomst (forecasting of voorspellen) vertrekt men bij backcasting van een ver toekomstbeeld. Men probeert het optimale traject naar deze toekomst op te stellen via een reeks concrete suggesties voor activiteiten met een relatief korte tijdshorizon om op de duur de nodige veranderingen te realiseren. Deze werkwijze wordt vaak toegepast om de weg naar een duurzame toekomst uit te stippelen.

Figuur 7.9: Lange termijn vs. korte termijn investeringen



Bron: https://www.hfpeurope.org/uploads/677/687/HFP_DS_Report_AUG2005.pdf
HFP, 2005, *Deployment Strategy*, Europese Commissie, Brussel, p. 75.

De blauwe lijn duidt op de steeds strenger wordende emissiedoelstellingen. De rode lijn geeft de kosten aan die gemaakt worden met het oog op korte termijn optimalisatie. Na verloop van tijd stijgen deze kosten erg sterk, omdat het niet meer mogelijk is de huidige technologie te perfectioneren om de steeds strengere emissienormen te halen. Het vraagt heel wat moeite om een geheel nieuw systeem op te zetten dat wel aan de strengere normen kan voldoen. Zo duurt het door de lange levensduur van wagens minstens vijftien jaar voor alle oude wagens uit het nieuwe systeem verdwenen zijn. Door de lange levensduur van zowel de opgebouwde infrastructuur als de toepassingen van een systeem is er een lange periode nodig om het hele systeem te kunnen veranderen. Dit noemt men het 'lock in effect'. Dit lock in effect is ook de reden waarom men vaak de voorkeur geeft aan gevestigde technologie in plaats van nieuwe technologie die niet helemaal in het huidige systeem past. Het energiesysteem zal uit zichzelf niet veranderen, tot het op het punt gekomen is dat het niet langer aan de vernieuwde vraag of wensen voldoet. Op dat moment is de noodzaak van een nieuw energiesysteem duidelijk voor iedereen, maar zal de transitie

naar een dergelijk nieuw systeem veel sneller moeten gaan en zal het erg grote investeringen op korte tijd vragen.²⁵⁸

Het kan echter ook anders en dat is door een goed begeleide langzame overgang naar een waterstofeconomie. Deze wordt in Figuur 7.9 aangegeven door de groene rechte. Wanneer men bereid is de investeringen te baseren op een lange termijn visie, kunnen ook de korte termijn doelstellingen gehaald worden tegen een aanvaardbare kost door de veranderingen door te voeren op cruciale ogenblikken (bijvoorbeeld bij renovaties of het vervangen van infrastructuur). Gedurende een bepaalde periode zullen de kosten van deze lange termijn aanpak hoger zijn dan die van de investeringen gebaseerd op een korte termijn visie (dit zijn de korte termijn verliezen (short term losses) op de grafiek). Na verloop van tijd zullen echter de kosten om het huidige systeem te laten voldoen veel hoger oplopen dan de kosten die gemaakt worden in het langzame transitie-model. Vanaf dit moment begint men de vruchten te plukken van de vroegere hogere investeringen (dit zijn de toekomstige voordelen (future benefits) op de grafiek). Het is echter zo dat de toekomstige voordelen vaak onbekend zijn, wat ervoor zorgt dat lange termijn optimalisatie weinig aantrekkelijk is om in te investeren in een vrije markt. Ook al zijn alle stakeholders op de hoogte van het gunstige lange termijn effect, toch speelt het zogenaamde prisoner's dilemma, wat er dikwijls toe leidt dat niet wordt gekozen voor de optimale beslissing.²⁵⁹

7.7 Rol van de overheden

Het slagen of mislukken van de overgang naar een waterstofeconomie hangt af van vele factoren. Politieke, sociale, technologische en andere aspecten werken op elkaar in en leiden uiteindelijk tot een eindresultaat. Een belangrijke taak voor de verschillende overheden is dan ook het coördineren van alle acties die te maken

²⁵⁸ https://www.hfpeurope.org/uploads/677/687/HFP_DS_Report_AUG2005.pdf HFP, 2005, *Deployment Strategy*, Europese Commissie, Brussel, p. 73-77.

²⁵⁹ https://www.hfpeurope.org/uploads/677/687/HFP_DS_Report_AUG2005.pdf HFP, 2005, *Deployment Strategy*, Europese Commissie, Brussel, p. 73-77.

hebben met de transitie naar een waterstofeconomie. Ze moeten hiervoor een beleidskader scheppen dat de ontwikkeling van een duurzame energie als streefdoel heeft. Een overgang naar een duurzaam energiesysteem komt er immers niet zomaar. Als men de energiemarkten hun eigen gang laat gaan, zullen de marktmechanismen die gericht zijn op winstmaximalisatie op korte en middellange termijn hun werk blijven doen. Ze zullen hiervoor gebruik blijven maken van de beschikbare en meest winstgevende technologieën. Ook al leiden ze op lange termijn tot lagere uitstoot en andere voordelen, toch zullen radicale innovaties niet verkozen worden boven conventionele technologie. Bovendien dreigt het probleem van de kip en het ei de voortgang te vertragen, omdat de autosector wacht op initiatieven van de energiesector en omgekeerd. Daarom zijn er inspanningen nodig die de innovaties tegen een traag maar doeltreffend tempo in gang zetten, hierbij gericht op zowel korte als lange termijn voordelen.²⁶⁰

Het beleid dat de overheden samen opstellen, moet steunen op een lange termijn visie, zodat voor de investeerders en de industrie de risico's te overzien en niet te groot zijn. Ook is er geld nodig van de publieke sector om het onderzoek naar en de ontwikkeling van nieuwe systemen aan te moedigen en te ondersteunen. Alle acties moeten efficiënt gecoördineerd worden via samenwerking van de verschillende overheden, niet enkel binnen dezelfde regio, maar ook wereldwijd. Fiscale en wettelijke regels moeten uitgewerkt worden om de overgang naar een waterstofeconomie te begeleiden, net als codes en standaarden. Concreet zijn dit de belangrijke taken die een overheid heeft in het licht van de overstap naar een waterstofeconomie.²⁶¹

- De ondersteuning van demonstratieprojecten.
- Het doorvoeren van maatregelen m.b.t. energie-efficiëntie om de vraag naar milieuvriendelijke transportmiddelen te stimuleren.

²⁶⁰ https://www.hfpeurope.org/uploads/677/687/HFP_DS_Report_AUG2005.pdf HFP, 2005, *Deployment Strategy*, Europese Commissie, Brussel, p. 52-83.

²⁶¹ http://ec.europa.eu/comm/research/energy/pdf/hlg_vision_report_en.pdf High Level Group for Hydrogen and Fuel Cell Technologies, 2003, *Hydrogen Energy and Fuel Cells – A vision of our future*, p. 16-24.

- Het ondersteunen van de planning en opbouw van nieuwe infrastructuur.
- Het opheffen van hindernissen die de commercialisering van waterstof en brandstofcellen in de weg staan.
- Het opstellen van de nodige codes en standaarden om een commercialisering toe te staan.
- Het onderzoeken van de effectiviteit en de gevolgen van de verschillende strategieën en acties die ondernomen worden via beleidsmaatregelen, prijszettingen, het informeren van de consument enz.
- De internationale coördinatie van het beleid gevoerd door verschillende landen en hun strategieën.

7.7.1 CO₂-reducerende maatregelen

Een van de instrumenten waarmee de overheden het gebruik van waterstof kunnen sturen zijn de CO₂-reducerende maatregelen. Ze hebben hiermee een krachtig middel in handen dat kan helpen de overgang naar een waterstofeconomie te laten slagen. Twee studies van het International Energy Agency helpen om de invloed te begrijpen die CO₂-reducerende maatregelen kunnen hebben. Deze studies zijn enerzijds het BASE-scenario, waarin men de ontwikkeling van het energiesysteem onderzoekt, uitgaande van een 'business-as-usual' evolutie. Dit betekent dat men in deze studie een voorspelling maakt die weergeeft hoe de toekomst er zou uitzien indien men het energie- en klimaatbeleid dat tot midden 2004 gevoerd werd gewoon verder zou zetten. Hierin is bijvoorbeeld geen verdere verstrenging opgenomen van de emissienormen. Er zijn in deze studies dus geen beleidsmaatregelen opgenomen voor wanneer de Kyoto-overeenkomst afloopt. Het MAP-scenario is een studie waarin men op zoek gaat naar de technologieën en parameters die een sleutelrol spelen in de transitie naar een waterstofeconomie. Hierin wordt wel een wereldwijde CO₂-reducerende maatregel opgenomen van 50 USD per ton CO₂. Deze kost staat voor een set van beleidsmaatregelen die bedoeld zijn om de uitstoot van CO₂ verder te verminderen en de zekerheid van de energievoorziening te garanderen. Het MAP-

scenario moet niet gezien worden als de optimale strategie om te komen tot een waterstofeconomie, maar wel als een instrument om inzicht te krijgen in het transitieproces.²⁶²

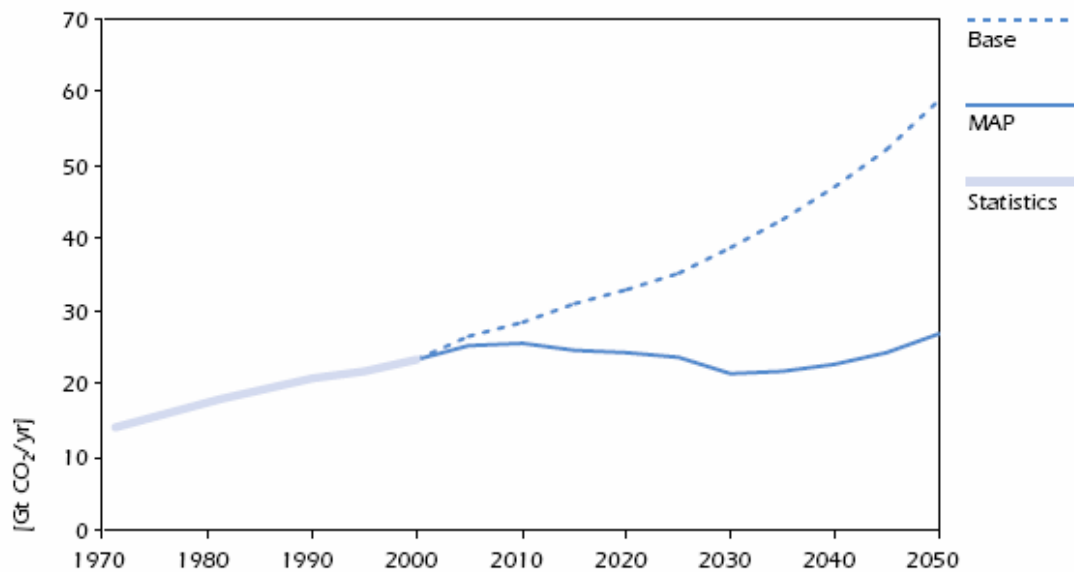
De enige factoren die in het BASE-scenario zouden kunnen aanzetten tot een meer verantwoord omspringen met energie zijn de veranderende prijzen van de basisgrondstoffen, de stijgende vraag naar energie en de technologische vooruitgang. Onder deze omstandigheden worden echter de goedkopere conventionele technologieën verkozen boven innovaties die minder vervuilend zijn, maar meer kosten. Het resultaat is dat de vraag naar energie meer dan verdubbelt in 50 jaar tijd. Bovendien blijft de wereld afhankelijk van de fossiele brandstoffen, voornamelijk steenkool en in mindere mate aardgas en olie. Steenkool wordt interessant, omdat de kost ervan relatief laag ligt en nieuwe conversietechnologieën het gebruik ervan aantrekkelijker maken. Tot overmaat van ramp stijgt de uitstoot van CO₂ tot bijna 60 Gt per jaar in 2050. Waterstof speelt niet echt een rol van betekenis in het BASE-scenario. Het merendeel van de brandstoffen voor transport is afkomstig van olieproducten, steenkool en aardgas, maar ook ethanol behoort tot de belangrijke brandstoffen.²⁶³

In het MAP-scenario is een CO₂-reducerende maatregel opgenomen die oploopt tot 50 USD/t CO₂. Zoals gezegd kan deze maatregel het best omschreven worden als een set van beleidsmaatregelen, subsidies of andere beleidsinstrumenten die emissieverlagende technologieën (waaronder waterstof en brandstofcellen) promoten. Door deze CO₂-reducerende maatregel zakt de uitstoot van koolstofdioxide tot onder de 30 Gt per jaar. Dit halveert de voorspelling van het BASE-scenario (zie Figuur 7.10).

²⁶² IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 44.

²⁶³ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 131-136.

Figuur 7.10: De globale CO₂-uitstoot voor het MAP- en BASE-scenario



Bron: IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 138.

Bij het opstellen van het MAP-scenario ging men ervan uit dat deze CO₂-reducerende maatregel in de geïndustrialiseerde landen ingevoerd werd vanaf 2005 en dat het niveau van 50 USD per ton CO₂ in 2015 gehaald wordt. Voor de ontwikkelingslanden is deze introductie pas gepland in 2020 en de maatregel zal daar de kost van 50 USD per ton CO₂ bereiken in 2030. De waarde van deze maatregel is gebaseerd op die van de huidige CO₂-emissiecertificaten. Het IEA hanteert hiervoor een waarde van 25 USD/t CO₂²⁶⁴. Het dient wel opgemerkt te worden dat deze kosten niet van toepassing zijn op sommige OECD landen, zoals de Verenigde Staten. Momenteel hebben zij geen gelijkaardige beleidsmaatregelen en ook geen plannen om ze in te voeren.²⁶⁵

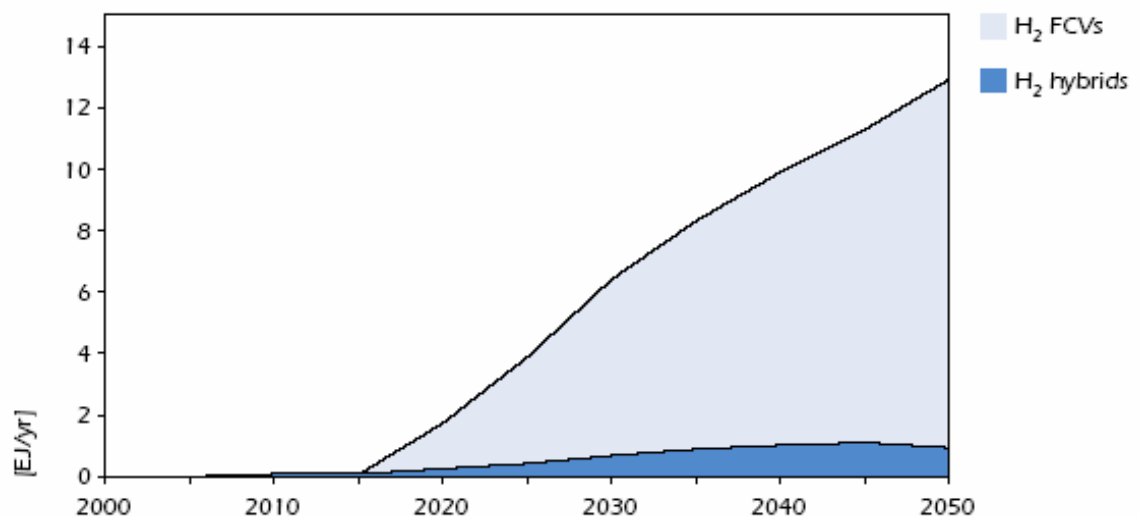
Wanneer in het BASE-scenario de vraag naar brandstof voor transport blijft stijgen, dan zullen alternatieve brandstoffen snel een groter stuk van de markt voor hun

²⁶⁴ De CO₂-emissierechten hebben de twee eerste weken van mei 2006 een prijscorrectie ondergaan, te wijten aan een overschot aan emissierechten op de Europese markt. De prijs van CO₂ is nu weer enigszins stabiel rond 19 USD/ t CO₂ en wordt tegen 2008 verwacht te stijgen tot 28 USD/t CO₂. (Bron: <http://www.emissierechten.nl/marktanalyse.htm> en <http://ec.europa.eu/environment/climat/emission.htm>)

²⁶⁵ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 131-138.

rekening nemen. De bekommernis om de zekerheid van de energievoorziening alleen blijkt dus niet genoeg om een groter verbruik van waterstof te veroorzaken. Andere brandstoffen kunnen gemakkelijk waterstof vervangen tegen een lagere kost als er geen rekening wordt gehouden met het milieu. Indien er echter wél rekening gehouden wordt met het milieu, in de vorm van de CO₂-reducerende maatregelen in het MAP-scenario, dan zullen waterstof en biobrandstoffen meer gebruikt worden (zie Figuur 7.11). 82% van het totale waterstofverbruik in 2050 wordt dan toegeschreven aan het transport. Het besluit van de MAP-analyse is dus dat CO₂-reducerende maatregelen wel degelijk een positief effect hebben op het aannemen van waterstoftechnologie.²⁶⁶

Figuur 7.11: Het verbruik van waterstof in de transportsector volgens het MAP-scenario



Bron: IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 140.

Waterstof kan sterk bijdragen tot de reductie van schadelijke uitstoot, maar het kan hierin gehinderd worden door goedkopere opties om emissies terug te dringen. Verscheidene studies tonen aan dat de kost van de schade van één ton CO₂ aan het milieu en de gezondheid van de mens lager ligt dan 50 USD per ton CO₂. Bovendien

²⁶⁶ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 131-138.

zijn er methodes om de emissie van koolstofdioxide terug te dringen tegen een lagere kost.²⁶⁷

²⁶⁷ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 144-150.

Hoofdstuk VIII: Ecologische analyse

De aandacht die waterstof krijgt als brandstof voor de toekomst is voor een groot stuk te danken aan het ecologische aspect van het verhaal. De voornaamste reden is de mogelijkheid van een volledig CO₂-vrije mobiliteit door waterstof te gebruiken als brandstof. Auto's met een verbrandingsmotor op waterstof hebben een veel lagere uitstoot van schadelijke gassen dan conventionele benzine- en dieselveertuigen, maar ze zijn dus niet volledig vrij van uitstoot. Een volledige zero-emissie kan echter wel bereikt worden wanneer men brandstofcellen gebruikt in de wagen en deze aandrijft met waterstof geproduceerd uit hernieuwbare energiebronnen.²⁶⁸

8.1 De efficiëntie van fuel cell vehicles

De brandstofefficiëntie van een voertuig uitgerust met brandstofcellen (FCV²⁶⁹) hangt af van de efficiëntie van de fuel cell stack en van het volledige aandrijfsysteem. Momenteel ligt de efficiëntie van een fuel cell stack rond de 58%, maar er wordt verwacht dat deze tegen 2020 kan stijgen tot zo'n 64%. De totale efficiëntie van een FCV zou in dezelfde periode moeten stijgen van 50% naar 60%. De efficiëntie van FCV's kan vergeleken worden met die van ICEV's²⁷⁰ en HEV's²⁷¹, als men rekening houdt met enkele belangrijke factoren:²⁷²

- de efficiëntie van een aandrijfsysteem hangt af van het rijgedrag en de gereden cyclus (lange of korte afstanden, stadsverkeer of grote wegen enz.)

²⁶⁸ <http://www.wbcsd.org/DocRoot/f131lMAvneJpUcnLgSeN/mobility-full.pdf> World Business Council for Sustainable Development, 2004, *Mobility 2030: Meeting the challenges to sustainability – The Sustainable Mobility Project, Full Report 2004*, WBCSD, p. 75-77.

²⁶⁹ FCV: Fuel Cell Vehicle: een auto uitgerust met brandstofcellen.

²⁷⁰ ICEV: Internal Combustion Engine Vehicle: een auto met een vonkontstekingsmotor.

²⁷¹ HEV: Hydrogen ICE Vehicle: een auto met een vonkontstekingsmotor op waterstof.

²⁷² IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 96-98.

- de efficiëntie van zowel FCV's als ICEV's zal nog verder toenemen in de toekomst
- een FCV kan een ander voertuigdesign hebben dan een ICEV, maar op dit ogenblik is de invloed hiervan op de efficiëntie nog niet voldoende gekend.²⁷³

Op basis van een Japans demonstratieproject met 59 FCV's, dat loopt van 2002, is men tot de volgende gegevens gekomen. De brandstofefficiëntie van de FCV's blijkt tenminste 1,8 tot 2 keer zo hoog te zijn als bij een normale ICEV. Voor enkele FCV's werden cijfers opgetekend waaruit blijkt dat ze tot drie keer zo efficiënt zijn als ICEV's. Er wordt verwacht dat in de toekomst de FCV's tot vier keer zo efficiënt zullen zijn als conventionele ICEV's. In vergelijking met HEV's zijn FCV's 1 tot 1,5 keer zo efficiënt. Deze waarden hebben echter betrekking op de optimale belasting van de motor. Het blijkt dat ICEV's bij optimale belasting een efficiëntie van 40% kunnen behalen, maar deze zakt snel zodra de motor niet optimaal belast is. De gemiddelde efficiëntie van een ICE is dan zo'n 25%. Wanneer men daarbij nog de efficiëntie van de versnellingsbak (95%) en andere invloeden rekent, komt men uiteindelijk tot een efficiëntie van 23% of minder, afhankelijk van de gebruikte technologie. De efficiëntie van een FCV is minder gevoelig voor de wisselende belasting en blijkt zeker in het stadsverkeer veel efficiënter.²⁷⁴

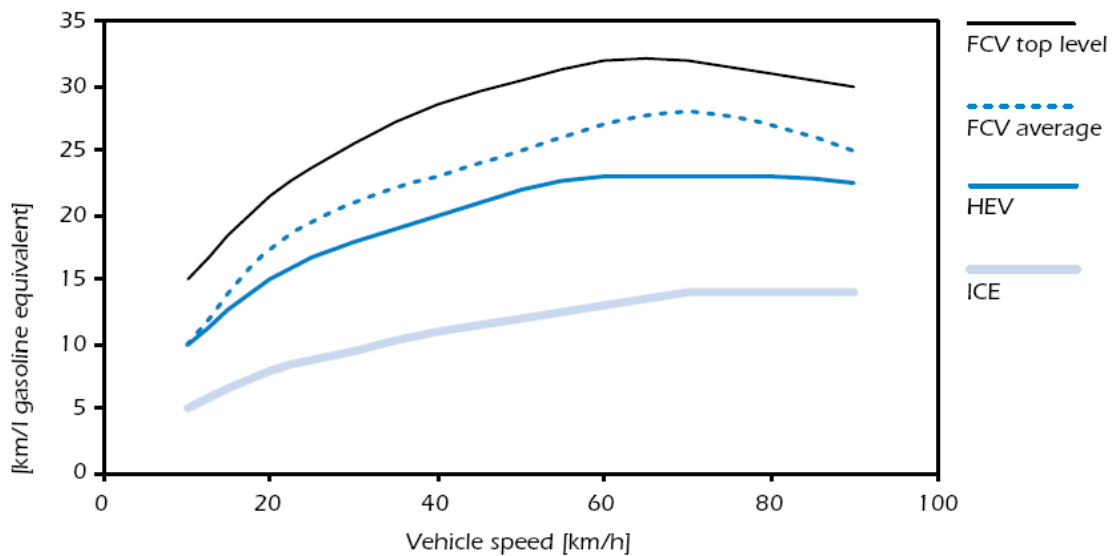
Op Figuur 8.1 is te zien hoe de efficiëntie van ICEV's, HEV's en FCV's zich tot elkaar verhouden. FCV's zijn ongeveer 2 tot 3 keer zo efficiënt als ICEV's en 1 tot 1,5 keer efficiënter dan HEV's. Een hybride FCV met een batterij om de remenergie op te vangen heeft een efficiëntie die nog 10 tot 15% hoger ligt dan die van een gewone FCV.²⁷⁵

²⁷³ Een voorbeeld van een alternatief voertuigdesign is het 'skateboard' design. Hier is de brandstofcel geïntegreerd in de bodemplaat van het voertuig en elk wiel is uitgerust met een afzonderlijke elektromotor, waardoor een transmissiesysteem overbodig wordt. Op deze manier kunnen mechanische onderdelen vervangen worden door elektronische elementen.

²⁷⁴ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 96-98.

²⁷⁵ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 96-98.

Figuur 8.1: De efficiëntie van ICEV's, HEV's, en FCV's



Bron: IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 97.

De efficiëntie van brandstofcellen hangt voor een groot stuk af van de zuiverheid van de gebruikte waterstof. Het IEA verwijst hiervoor naar een studie waaruit blijkt dat de efficiëntie van een brandstofcel zakt met 36% wanneer men overschakelt van zuivere waterstof (100% H₂) naar een synthetisch gasmengsel met 40% H₂. Wanneer men van zuiver waterstof overschakelt naar 75% H₂ op basis van een reformer, dan zakt de efficiëntie met 27%.²⁷⁶ De bussen van het CUTE-project hadden te lijden onder een efficiëntieverlies van 4% over een periode van 18 maanden bij het gebruik van waterstof via elektrolyse. Wanneer er echter gebruik gemaakt werd van een reformer aan boord van de bussen om waterstof te produceren uit aardgas, bleek de efficiëntie met 10% te zakken op 18 maanden. Onzuiverheden in de waterstof zorgen meestal voor een blijvende en onherstelbare schade aan de brandstofcel, waardoor de efficiëntie niet opnieuw stijgt wanneer men opnieuw zuivere waterstof gebruikt. Op

²⁷⁶ Thomas, C.E. en James, B.D., 2000, *Fuel Options for Fuel Cell Vehicle: Hydrogen, Methanol or Gasoline?*, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 25, p. 551-567.

dit moment heeft het weinig zin om al een standaard vast te leggen voor de zuiverheid van waterstof, omdat de brandstofcellen nog verder evolueren en meer bestand worden tegen onzuiverheden.²⁷⁷

8.2 Well-to-wheel uitstoot van CO₂

Brandstofcellen op waterstof in FCV's produceren in principe als bijproduct enkel water. Het is echter zo dat bij verschillende methodes voor het aanmaken van waterstof er wél CO₂ vrijkomt. Het effect van het gebruik van waterstof en brandstofcellen op de broeikasgassen hangt dus ook af van de productiemethodes van waterstof en de gebruikte grondstoffen voor de productie van waterstof.²⁷⁸

De methode die hieronder gebruikt wordt om het ecologische aspect van brandstoffen na te gaan, wordt de 'well-to-wheel' analyse (van bron tot wiel) genoemd. Deze analysemethode bestaat uit twee onderdelen, namelijk het gedeelte 'well-to-tank' (van bron tot tank) en het deel 'tank-to-wheel' (van tank tot wiel). De well-to-tank evaluatie bekijkt welke energie er nodig is om waterstof aan te maken en het te distribueren en welke emissie van broeikasgassen hiermee gepaard gaat. De tank-to-wheel analyse belicht het brandstofverbruik en de uitstoot van broeikasgassen door het voertuig zelf. Wanneer men deze twee analyses samenvoegt, krijgt men dus een volledig beeld van de energieconsumptie en de uitstoot van broeikasgassen die toe te schrijven zijn aan het gebruik van het voertuig. Enkel aandacht besteden aan de uitstoot van het voertuig kan een misleidend beeld geven van de totale uitstoot van broeikasgassen. De uitstoot van de productie en de distributie van de brandstof kan

²⁷⁷ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 86-87.

²⁷⁸ <http://www.wbcsd.org/DocRoot/f1311MAvneJpUcnLgSeN/mobility-full.pdf> World Business Council for Sustainable Development, 2004, *Mobility 2030: Meeting the challenges to sustainability – The Sustainable Mobility Project, Full Report 2004*, WBCSD, p. 75-77.

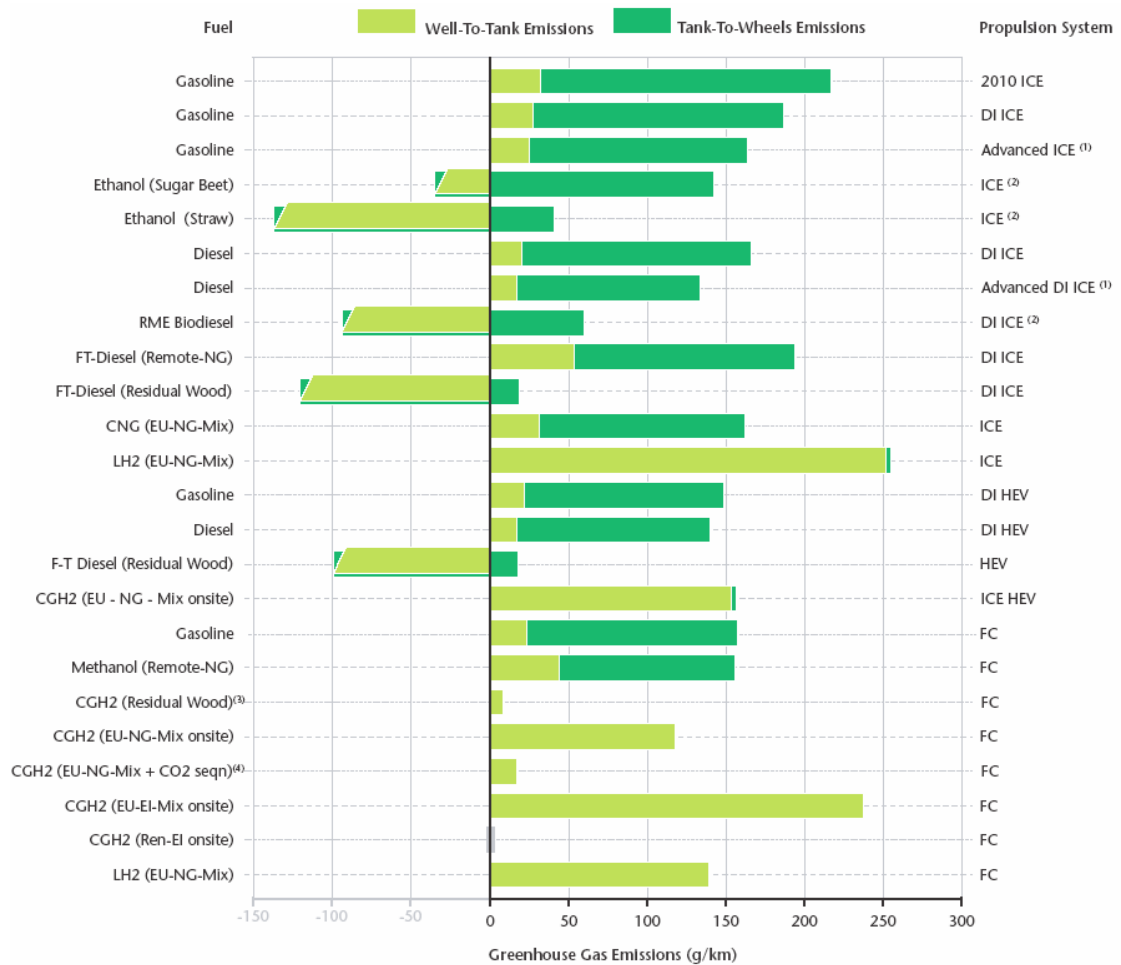
ervoor zorgen dat de totale som van uitgestoten broeikasgassen hoger ligt dan de huidige brandstoffen.²⁷⁹

Wanneer waterstof via elektrolyse aangemaakt wordt door gebruik te maken van hernieuwbare energie (zonne-energie, windenergie, waterkracht, enz.), dan kan de hele cyclus van waterstofproductie tot het verbruik van waterstof door het voertuig verlopen zonder dat er emissies van broeikasgassen zijn. Hetzelfde geldt niet helemaal voor waterstof die geproduceerd wordt met behulp van fossiele brandstoffen. Hier dient de CO₂ die vrijkomt bij het productieproces opgevangen te worden en is er lokale pollutie door de uitstoot van andere schadelijke stoffen.

Figuur 8.2 toont een overzicht van de well-to-wheel emissies van broeikasgassen van verschillende aandrijfvormen, zoals ze zo'n 10 tot 20 jaar verder in de toekomst verwacht worden. Elke combinatie is uitgesplitst in de well-to-tank en de tank-to-wheel uitstoot. De negatieve waarden bij de brandstoffen op basis van biomassa duiden op de CO₂-absorptie van de planten waarmee de waterstof geproduceerd wordt. Hierdoor zorgen zij soms voor erg lage well-to-wheel emissies. Er moet echter opgemerkt worden dat de berekening van de CO₂-emissie bij het gebruik van biobrandstoffen erg moeilijk is. Het is op dit moment niet helemaal duidelijk welke hoeveelheid CO₂-absorptie er toegeschreven mag worden aan de verschillende soorten biomassa die omgezet worden in waterstof.

²⁷⁹ http://www.enpc.fr/fr/formations/dea_masters/tradd/documents/Welltowheeuleucar2004.pdf
CONCAWE, EUCAR, JRC, 2004, *Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context*, WELL-to-WHEELS Report Version 1b, January 2004, p. 10-11.

Figuur 8.2: De well-to-wheel emissies van broeikasgassen voor verschillende aandrijfvormen



Bron: <http://www.wbcsd.org/DocRoot/fl3llMAvneJpUcnLgSeN/mobility-full.pdf> World Business Council for Sustainable Development, 2004, *Mobility 2030: Meeting the challenges to sustainability – The Sustainable Mobility Project, Full Report 2004*, WBCSD, p. 77.

Wat opvalt, is dat de voertuigen met een ICE (met of zonder directe injectie (DI)) en in feite elke aandrijfvorm die geen gebruik maakt van waterstof een relatief hoge tank-to-wheel emissie hebben. Ook is duidelijk te merken dat de well-to-wheel uitstoot van voertuigen op waterstof bijna volledig afhankelijk is van de productiemethode. Hierin zijn grote verschillen te merken, zo groot zelfs dat de well-to-wheel emissies soms die van de conventionele benzine ICEV's overtreffen. Voorbeelden hiervan zijn de

ICEV's met als brandstof vloeibare waterstof die geproduceerd is op basis van aardgas (Lh2 (EU-NG-Mix)) of de FCV's met als brandstof gasvormige waterstof die geproduceerd wordt via decentrale elektrolyse (CGH2 (EU-El-Mix onsite)). De minst vervuilende brandstoffen voor FCV's blijken de volgende te zijn: gasvormige waterstof geproduceerd op basis van dood hout (biomassa) (CGH2 (Residual Wood), gasvormige waterstof uit aardgas waarbij de CO₂ opgevangen wordt (CGH2 (EU-NG-Mix + CO₂ seqn)) en gasvormige waterstof die decentraal opgewekt wordt door elektrolyse met elektriciteit afkomstig van hernieuwbare energiebronnen (CGH2 (Ren-El onsite)).²⁸⁰

8.3 Rijden op waterstof als oplossing voor de CO₂-uitstoot

In het voorgaande hoofdstuk is uitgelegd aan welke voorwaarden voldaan moet worden om de introductie van waterstof als brandstof een succes te laten worden. Hierbij was er onder andere sprake van CO₂-reducerende maatregelen, lagere kosten en betere technologie. Het International Energy Agency heeft deze en andere factoren opgenomen in een aantal scenario-analyses om na te gaan wat het effect kan zijn van de komst van waterstof als brandstof op de globale CO₂-uitstoot.

Uit dit onderzoek blijkt dat het invoeren van de CO₂-reducerende maatregelen ervoor zorgt dat een aantal nieuwe technologieën zullen opkomen en dat deze elk een deel van de totale markt voor zich zullen nemen. Geen van deze technologieën zal echter in staat zijn om echt uit te groeien tot dé nieuwe brandstof (zoals olie vandaag). Het is door hun collectieve effect dat de uitstoot van broeikasgassen teruggedrongen zal worden. Er zal dus een diversificatie ontstaan in het energiesysteem, waarbij de combinatie van waterstof en brandstofcellen één van de nieuwe technologieën zal zijn.²⁸¹

²⁸⁰ <http://www.wbcsd.org/DocRoot/f1311MAvneJpUcnLgSeN/mobility-full.pdf> World Business Council for Sustainable Development, 2004, *Mobility 2030: Meeting the challenges to sustainability – The Sustainable Mobility Project, Full Report 2004*, WBCSD, p. 76-77.

²⁸¹ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 189-199.

Het meest optimale scenario dat in het onderzoek gebruikt wordt, houdt in dat er CO₂-reducerende maatregelen komen die doorheen de tijd oplopen tot 50 USD/t CO₂ en dat de technologische vooruitgang ervoor zorgt dat de kosten gedrukt kunnen worden. In dit scenario groeit waterstof tegen 2030 uit tot een belangrijke brandstof in de transportsector. Tegen 2050 zou zo'n 12,5 EJ waterstof als brandstof gebruikt worden, vooral voor transport. Ten opzichte van de totale hoeveelheid primaire energie van 785 EJ lijkt dit niet veel te zijn, maar toch is het voldoende om ongeveer 30% van de totale vloot passagiersvoertuigen van brandstof te voorzien in 2050. Het effect dat waterstof in deze omstandigheden zal kunnen veroorzaken, is een netto-vermindering van 5% in de CO₂-emissies (1,4 Gt CO₂) en een netto-verlaging van 2% in het oliegebruik. Het IEA komt tot deze cijfers door de resultaten van het meest gunstige scenario met en zonder waterstof en brandstofcellen met elkaar te vergelijken. In het scenario zonder waterstof wordt de plaats van waterstof ingenomen door andere milieuvriendelijke brandstofalternatieven²⁸².

Dit lijken op het eerste zicht teleurstellende cijfers, maar deze resultaten moeten opgeteld worden bij een bredere waaier van CO₂-vriendelijke brandstoffen. Samen zijn ze wel verantwoordelijk voor een merkbaar verschil in de uitstoot van CO₂, zoals beschreven staat in punt 7.7.1. De invloed van één enkele brandstof lijkt dus helemaal niet zo groot te zijn, wat er ook op duidt dat de afhankelijkheid van één bepaalde brandstof vermindert.²⁸³

In minder gunstige scenario's lijkt waterstof niet helemaal in staat om een rol van betekenis te spelen als brandstof. Andere technologieën die niet te lijden hebben onder introductiebarrières en zware technologische uitdagingen zullen een grotere rol spelen. Dit betekent echter niet dat de CO₂-uitstoot niet verminderd kan worden. Het

²⁸² Deze andere milieuvriendelijke brandstofalternatieven komen in de plaats van de 30% van de totale vloot passagiersvoertuigen die normaal op waterstof zouden rijden. 10% wordt vervangen door voertuigen op ethanol en 20% door voertuigen met een geavanceerde ICE op benzine, hybriden en voertuigen op aardgas. Deze 30% zorgt ervoor dat de totale CO₂-emissie verhoogt met 1,4 Gt per jaar.

²⁸³ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 189-199.

is bovendien ook zo dat elk scenario waar er CO₂-reducerende maatregelen genomen worden, resulteert in een vermindering van de oliehandel met 30 tot 50% in vergelijking met de situatie waarin deze CO₂-reducerende maatregelen ontbreken. De afhankelijkheid van olie zal dus ook kunnen afnemen zonder dat waterstof succesvol doorbreekt als brandstof.²⁸⁴

²⁸⁴ IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, p. 189-199.

Hoofdstuk IX: Protagonisten van de waterstofeconomie

Vele bedrijven hebben zich toegelegd op activiteiten die te maken hebben met waterstof. Er zijn de ondernemingen die waterstof produceren, er bestaan firma's die al jaren brandstofcellen aan het ontwikkelen zijn, er zijn autobouwers die de voorbije jaren aan prototypes hebben gewerkt die waterstof als brandstof gebruiken enz. Een overzicht geven van alle ondernemingen die direct of indirect betrokken zijn met de transitie naar een waterstofeconomie is bijna onmogelijk. In Bijlage 2 wordt een overzicht gegeven van de belangrijkste bedrijven die zich geëngageerd hebben om de toekomst van waterstof mee op te helpen bouwen.²⁸⁵ (De bedrijfsnamen zijn hyperlinks: door er op te klikken komt men automatisch terecht op de bedrijfswebsite.)

Hieronder staan enkele van de grote autobouwers die momenteel druk bezig zijn met het ontwikkelen van waterstofgerelateerde technologieën.

BMW: BMW's CleanEnergy project.

DaimlerChrysler: Energy for the Future.

Ford: Ford's Fuel Cells Technologies pagina.

General Motors: De website van GM over brandstofceltechnologie.

Honda: Informatie over Honda's FCX fuel cell vehicle.

Hyundai: De webpagina van Hyundai over waterstof en brandstofcellen.

²⁸⁵ <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/manufacturers.html> US-DOE, 2006.

Nissan: De brandstofceltechnologie van Nissan.

Toyota: Toyota's webstek over milieuvriendelijke technologieën.

Voor meer uitgebreide en gedetailleerde up-to-date informatie over FCV's kan men terecht op de website www.fuelcelltoday.com. In de laatste uitgave (maart 2006) van hun Market Survey: Light Duty Vehicles wordt een goed overzicht gegeven van de meest recente ontwikkelingen per constructeur. Deze publicatie is te raadplegen via www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/FCTFiles/FCTArticleFiles/Article_1083_MarketSurvey2006.pdf. Op de website www.h2mobility.org is een tijdslijn terug te vinden met daarbij extra informatie over de ontwikkelde waterstofvoertuigen.

Hoofdstuk X: Algemeen besluit

De vorige hoofdstukken hebben een gedetailleerd overzicht gegeven van de energiecontext, het milieu-aspect, de technologieën en de economische factoren die gerelateerd zijn aan de komst van waterstof als brandstof voor voertuigen. In dit hoofdstuk worden de bevindingen uit deze hoofdstukken samengevoegd om te komen tot een eindconclusie.

Dat de wereld nood heeft aan maatregelen om de milieu-effecten van een steeds toenemende energieconsumptie binnen de perken te houden, is ondertussen duidelijk geworden. Het Kyoto-protocol is een eerste georganiseerde stap in de goede richting, waarbij er internationaal tot een samenwerking is gekomen om de uitstoot van broeikasgassen te beperken. Maar deze maatregel alleen is niet genoeg. Het effect dat behaald wordt met het naleven van de Kyoto-doelstellingen is erg klein. Daarenboven zijn steeds meer regio's zich bewust van hun afhankelijkheid van de geïmporteerde fossiele energiebronnen en wensen zij hieraan iets te doen. Er is echter geen ideale oplossing, die in één beweging komaf maakt met deze twee belangrijke problemen. Geen enkele van de nieuwe brandstoffen blijkt in staat te zijn om een dominante rol aan te nemen in de energiemarkt, zoals olie op dit ogenblik.

Volgens de studies van het IEA kan het gebruik van waterstof in een gunstig scenario tegen 2050 een netto-vermindering van 5% in de CO₂-emissies veroorzaken en een netto-vermindering van 2% in het oliegebruik. Op het eerste zicht zijn dit teleurstellende cijfers, maar deze data moeten in een bredere context geïnterpreteerd worden. Alle nieuwe soorten brandstoffen samen zullen immers wel in staat zijn om de CO₂-uitstoot en de energieafhankelijkheid terug te dringen. De komst van waterstof als brandstof kan dus één van de deeloplossingen zijn, maar onder enkele belangrijke voorwaarden. Waterstof heeft enkel kans om door te breken als brandstof wanneer het

ondersteund wordt door beleidsmaatregelen en er doorbraken komen in de technologie die de kosten aanzienlijk verlagen.

Op dit ogenblik blijkt het gebruik van waterstof en brandstofcellen een nogal dure optie te zijn om de uitstoot van schadelijke stoffen af te remmen en de energieafhankelijkheid van sommige landen te verminderen. De huidige kostenpredicties laten uitschijnen dat de verwachte kostenverlagingen op basis van technologische vooruitgang en schaalvoordelen niet in staat zullen zijn om waterstof te laten concurreren tegen de conventionele brandstoffen. Waterstof belooft 'enkel' collectieve economische en sociale voordelen te bieden op lange termijn, maar geen interessante korte termijn voordelen zoals lagere kosten, betere prestaties of een betere service. Dit leidt ertoe dat andere goedkopere alternatieven de voorkeur zullen krijgen als een begeleidende set maatregelen ontbreekt. Een van de belangrijkste onderdelen van deze set maatregelen zijn de CO₂-reducerende maatregelen. Zij zorgen er trouwens niet alleen voor dat het gebruik van waterstof meer aangemoedigd wordt, maar ook het gebruik van andere milieuvriendelijke energiealternatieven. Wanneer de introductie van waterstof door het falen van de technologie geen succes wordt, zullen deze maatregelen er toch nog voor zorgen dat er voor alternatieve CO₂-reducerende brandstoffen gekozen wordt. In geen geval zijn deze maatregelen dus verloren moeite.

De tweede kritische factor die bepaalt of er overgeschakeld kan worden naar waterstof als brandstof is de technologie. Op dit ogenblik staat de technologie die nodig is om waterstof te kunnen gebruiken nog niet op punt en bovendien liggen de kosten veel te hoog. Er is dus nog heel wat onderzoek nodig om zowel de prestaties van deze technologieën te verbeteren als de kosten te laten zakken. Daarnaast is er het probleem dat enkele van de meest beloftevolle technologieën nog maar in een heel vroeg ontwikkelingsstadium zitten, waardoor het weinig zin heeft nu al kostenvoorspellingen te maken.

Zonder vernieuwende doorbraken in de technologie verwacht men dat waterstof in de introductiefase gedecentraliseerd (en dus op kleine schaal en tegen hoge kost)

geproduceerd zal worden via reforming van aardgas (zonder het opvangen van CO₂, wegens technisch moeilijk en erg duur) en via elektrolyse. Door te kiezen voor gedecentraliseerde productie van waterstof is het opbouwen van een transport- en distributiesysteem voor waterstof in de introductiefase nog niet nodig. Dit moet er echter wel komen in de latere fases. Waterstof zal in alle waarschijnlijkheid in gasvorm en onder hoge druk opgeslagen worden aan boord van het voertuig in tanks van 700 bar, hoewel deze opslagmethode momenteel niet aan de vooropgestelde wensen (prestaties en kost) voldoet. In de wagen zal de waterstof een PEMFC aandrijven die ongeveer 80kW aan vermogen levert. De kost van deze PEMFC ligt op dit moment nog veel te hoog, maar zal teruggebracht kunnen worden tot 100 USD/kW. Hiermee kan de brandstofcel op het vlak van kosten nog niet concurreren met een conventionele benzinemotor, daarvoor moeten de kosten verder zakken richting 50 USD/kW. Hier zal echter eerst nog heel wat onderzoek en ontwikkeling aan vooraf moeten gaan.

De keuze voor de productie-, distributie- en opslagsystemen en de keuze van een bepaald type brandstofcel zijn onderling van elkaar afhankelijk. Doordat er nog steeds evoluties zijn in de brandstofceltechnologie, is het voorlopig wat voorbarig om een keuze te maken voor een bepaalde waterstofinfrastructuur. Zo bepaalt de vereiste zuiverheid van de waterstof in de brandstofcel mee de keuze van het productiesysteem. Langs de andere kant is het belangrijk de keuze voor het opslagsysteem van waterstof niet te lang meer uit te stellen. Het is immers zo dat deze keuze moet vaststaan voordat de autobouwers zich zullen engageren om grote investeringen te doen richting massaproductie, net zoals er tegen die tijd de nodige codes en standaarden ontwikkeld moeten zijn. De keuze voor het opslagsysteem heeft immers ook een invloed op de keuze van de productietechnologie, de distributie enz.

Dit sluit nauw aan met het probleem van de kip en het ei: zowel de autobouwers als de energieleveranciers kijken de kat uit de boom. Zonder wagens die op waterstof rijden is de energiesector niet happig om zware investeringen te doen in een nieuwe waterstofinfrastructuur. Maar zolang er geen infrastructuur is om waterstof te leveren

aan de automobilisten, zijn autobouwers ook niet geneigd zware kosten te maken om FCV's op de markt te brengen. Voor de andere alternatieve brandstoffen is dit probleem niet zo groot, maar hun positief effect op het milieu zal dan ook minder groot zijn. De juiste begeleiding door de overheden zou dit probleem kunnen oplossen.

Hoe dan ook, op dit moment blijft er heel wat onzekerheid over waterstof. Europa en Noord-Amerika voorzien een aanvang van het gebruik van waterstof in de periode 2015-2020 en andere regio's rond 2025. De vraag is of tegen die tijd de nodige technologische vooruitgang is geboekt en de vereiste beleidsmaatregelen vorm hebben gekregen.

Lijst van de geraadpleegde werken

Gedrukte bronnen

Corthout, K. en Renders, C., 2004, *Een analyse van kernenergie en hernieuwbare energiebronnen: is de kernuitstap verenigbaar met het Kyoto-protocol?*, LUC, Diepenbeek, 245 p.

Falter, R., 20 januari 2005, *Auto van toekomst vergt vooral tijd*, De TIJD, p. 13.

Hoeraet C., 1999, *Energiebronnen en kernenergie: vergelijkende analyse en ethische reflecties*, Acco, Leuven, 169 p.

IEA, 2005, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, IEA/OECD, Parijs, 256 p.

Koninckx, B., 2005, *Milieu en transport: toepassingen van verhandelbare rechten in de transportsector*, LUC, Diepenbeek, 97 p.

Rifkin, J., 2004, *De waterstofeconomie: schone en duurzame energie voor iedereen*, Lemniscaat, Rotterdam, 327 p.

Thomas, C.E. en James, B.D., 2000, *Fuel Options for Fuel Cell Vehicle: Hydrogen, Methanol or Gasoline?*, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 25, p. 551-567.

Elektronische bronnen

(Alle elektronische bronnen zijn voor het laatst geraadpleegd op 31 mei 2006)

<http://books.google.com/books?ie=UTF-8&hl=nl&vid=ISBN0878147896&id=tslVzJ0h6KoC&pg=PA1&lpg=PA1&dq=chambers+Distributed+Generation&sig=wY8Vp6SVtjgEQ3B0zazq1dmxSXk> Chambers, A., Schnoor, B., Hamilton, S., 2001, *Distributed Generation: A Nontechnical Guide*, PennWell Books, Tulsa, 250 p.

http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/emis/tre_glob.htm Marland, G., Boden T. A. en Andres R. J., 2005, *Global, Regional, and National CO₂ Emissions. In Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US-DOE, Oak Ridge, Tennessee.

<http://darwin.nap.edu/books/0309091632/html> National Academy of Engineering en Board on Energy and Environmental Systems, 2004, *The Hydrogen Economy - Opportunities, Costs, Barriers and R&D Needs*, The National Academies Press, Washington, DC, 240 p.

http://ec.europa.eu/comm/research/energy/pdf/hlg_vision_report_en.pdf High Level Group for Hydrogen and Fuel Cell Technologies, 2003, *Hydrogen Energy and Fuel Cells – A vision of our future*, 33 p.

http://europa.eu.int/comm/energy_transport/doc-technique/doctechlv-en.pdf Europese Commissie, 2006, *Green Paper – Towards a European Strategy for the security of energy supply*, Europese Commissie, Brussel, 90 p.

http://europa.eu.int/comm/enterprise/library/enterprise-europe/issue16/pdf/ee16_nl.pdf Europese Commissie, juli-september 2004, *Onderneming Europa*, Europese Commissie, Brussel, 23 p..

http://europa.eu.int/comm/research/energy/nn/nn_rt/nn_rt_hlg/article_1146_en.htm Europese Commissie, 2006.

http://europa.eu.int/comm/research/transport/news/article_955_en.html Europese Commissie, 2006.

http://europa.eu.int/comm/research/transport/tran_trends/hydrogen_en.html Europese Commissie, 2006.

http://europa.eu.int/growthandjobs/index_en.htm Europese Commissie, 2006.

<http://forum.europa.eu.int/Public/irc/rtd/eurhydrofuelcellplat/home> European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform, 2006.

http://mineco.fgov.be/energy/ampere_commission/ExSum_nl.pdf Commissie voor de Analyse van de Productiemiddelen van Elektriciteit en de Reöorientatie van de Energievectors (AMPERE), 2000, *Syntheserapport van de commissie*, AMPERE, Brussel, 117 p.

http://mineco.fgov.be/energy/climate_change/climate_change_nl_001.htm Federale Overheidsdienst Economie, KMO, Middenstand en Energie, 2006.

http://pubs.wri.org/pubs_content_text.cfm?ContentID=2239 MacKenzie, J. J., 2000, *Oil as a finite resource: When is global production likely to peak?*, World Resources Institute.

<http://spot.colorado.edu/~dziadeck/zf/LZ129fire.htm> John Dziadecki, 2006.

<http://unfccc.int/2860.php> UNFCCC, 2006.

http://unfccc.int/parties_and_observers/parties/items/2352.php UNFCCC, 2006.

<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf> United Nations, 1992,
Raamverdrag inzake Klimaatverandering van de Verenigde Naties, United Nations,
New York, 24 p.

<http://unfccc.int/resource/kpco2.pdf> UNFCCC, 2006.

<http://www.bmwgroup.com> BMW Group, 2006.

http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/publications/energy_reviews_2005/STAGING/local_assets/downloads/pdf/statistical_review_of_world_energy_full_report_2005.pdf BP, 2005, *Statistical Review of World Energy*, BP,
Londen, 41 p.

<http://www.cute-hamburg.de> HFP, 2006.

http://www.dotynmr.com/PDF/Doty_H2Price.pdf Doty, F. D., 11 maart 2004, *A Realistic Look at Hydrogen Price Projections*, 12 p.

<http://www.ecn.nl> Energy research Centre of the Netherlands, 2006.

http://www.eere.energy.gov/de/pdfs/dg_economics.pdf Arthur D. Little, 1999,
Distributed Generation: Understanding the Economics, Arthur D. Little, 35 p.

<http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/> US-DOE, 2006.

<http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/codes/> US-DOE, 2006.

http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/h2_safety_fsheets.pdf US-DOE, 2006.

http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/production/coal_gasification.html, US-DOE, 2006.

http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/production/electro_processes.html, US-DOE, 2006.

http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/production/natural_gas.html, US-DOE, 2006.

<http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/production/photobiological.html>, US-DOE, 2006.

[http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/pdf/0383\(2006\).pdf](http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/pdf/0383(2006).pdf) EIA, 2006, *Annual Energy Outlook 2006*, US-DOE, Washington, DC, 221 p.

<http://www.emagazine.com/view/?171> Rifkin, J., 2003, *The Hydrogen Economy: After Oil, Clean Energy From a Fuel-Cell-Driven Global Hydrogen Web*, E/The Environmental Magazine, Vol. XIV, nr. 1.

<http://www.emis.vito.be> Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek, 2006.

http://www.energy.ca.gov/bioenergy_action_plan/documents/2006-03-09_workshop/WTW_STUDY_2005.PDF CONCAWE, EUCAR, JRC, 2005, *Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context, WELL-to-WHEELS Report Version 2a*, december 2005, 103 p.

http://www.enpc.fr/fr/formations/dea_masters/tradd/documents/Welltowheeucar2004.pdf CONCAWE, EUCAR, JRC, 2004, *Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context, WELL-to-WHEELS Report Version 1b*, januari 2004, 60 p.

http://www.esat.kuleuven.be/electa/publications/fulltexts/pub_1297.pdf Pepermans, G. et al., 2005, *Energy Policy* 33, *Distributed generation: definition, benefits and issues*, Elsevier, Leuven, p. 787-798.

<http://www.evobus.com/inter-evobus/0-674-399759-1-555603-1-0-0-0-0-1-6990-0-0-0-0-0-0-0.html> Evobus, 2006.

http://www.floheacom.ugent.be/H2/h2_storage_en.htm Universiteit Gent Hydrogen mini-site, 2006.

<http://www.fuel-cell-bus-club.com> Fuel Cell Bus Club, 2006.

<http://www.fuelcellseminar.com/pdf/2004/531%20Ho.pdf> US-DOE, 2 november 2004, *Future Directions for DOE - Fuel Processing R&D*, US-DOE, Washington, DC, 15 p.

http://www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/FCTFiles/FCTArticleFiles/Article_967_FuelCellVehcileSurvey2005.pdf Adamson, K.-A., 2005, *Fuel Cell Today Market Survey: Light Duty Vehicles*, Fuel Cell Today, 19 p.

http://www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/FCTFiles/FCTArticleFiles/Article_1068_2005%20Global%20Survey.pdf Fuel Cell Today, 2006 *Worldwide Survey 2005*, Fuel Cell Today, 16 p.

<http://www.fusie-energie.nl/artikelen/Outlook2030.pdf> Europese Commissie, 2003, *World Energy, Technology and Climate Policy Outlook 2030*, Europese Commissie, Brussel, 137 p.

<http://www.gvb.nl/overgvb/projecten/downloads/0326-m.jpg> GVB, 2006.

http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen_posture_plan.pdf US-DOE, 2004, *Hydrogen Posture Plan*, US-DOE, Washington, DC, 32 p.

<http://www.hydrogenassociation.org/newsletter/ad43fcev.htm> Nahmias, D., 1999, *Fuel Choice for Fuel Cell Vehicles*, National Hydrogen Association.

http://www.hydrogenassociation.org/newsletter/nhaNews_autumn05_suppliers.asp, The National Hydrogen Association, 2006.

<http://www.hydrogenics.com> Hydrogenics, 2006.

<http://www.iea.org> IEA, 2006.

<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2000/findings2005.pdf> IEA, 2005, *Findings of Recent IEA Work – 2005*, IEA, Parijs, 78 p.

<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/hydrogen.pdf> IEA, 2004, *Hydrogen & Fuel Cells, Review of National R&D Programs*, IEA/OECD, Parijs, 204 p.

<http://www.iea.org/Textbase/papers/2006/hydrogen.pdf> IEA, 2006, *Hydrogen Production and Storage - R&D Priorities and Gaps*, IEA/OECD, Parijs, 38 p.

<http://www.intelligent-energy.com> Intelligent Energy, 2006.

<http://www.ipcc.ch> Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006.

[http://www.ipcc.ch/pub/sa\(E\).pdf](http://www.ipcc.ch/pub/sa(E).pdf) IPCC, 1995, *Second Assessment Climate Change 1995*, IPCC, Genève, 63 p.

<http://www.ipcc.ch/pub/un/syrenng/spm.pdf> IPCC, 2001, *Climate Change 2001: synthesis Rapport*, IPCC, Genève, 34 p.

<http://www.iphe.net/IPHERestrictedarea/5th%20IPHE%20SC%20mtg/Final%20Presentations/IPHE/TUES%20AM/IPHEJapan.pdf> Miyagawa, T., maart 2006, *Japan's Approach to Commercialization of Fuel Cell / Hydrogen Technology*, IPHE Steering Committee, 12 p.

<http://www.iupac.org/didac/Didac%20Ned/Didac03/Content/L06.htm> International Union of Pure and Applied Chemistry, 2006.

<http://www.klimaat.be/nl/broeikasEffect.html> Staatssecretariaat voor Energie en Duurzame Ontwikkeling, 2006.

<http://www.klimaat.be/nl/broeikasGas.html> Staatssecretariaat voor Energie en Duurzame Ontwikkeling, 2006.

<http://www.klimaat.be/nl/milieu.html> Staatssecretariaat voor Energie en Duurzame Ontwikkeling, 2006.

<http://www.lakehurst.navy.mil/nlweb/images/1213d.gif> , Lakehurst navy, 2006.

<http://www.micro-vett.it> , micro-vett, 2006.

<http://www.mnp.nl/mnc/i-nl-0166.html> Milieu en Natuur Planbureau, 2006.

<http://www.osiris.tudelft.nl/main/documents/waterstof.pdf> OSIRIS, 2006.

<http://www.pur.com/pubs/3664.cfm> Lovins, A. B. en Williams, B. D., 15 februari 2001, *From Fuel Cells to a Hydrogen-based Economy*, Public Utilities Fortnightly, Deel 139, nr. 4. 15.

http://www.tiaxllc.com/aboutus/pdfs/nrel_fnlrpt_093005.pdf Carlson, E. J. et al, 30 september 2005, *Cost Analysis of PEM Fuel Cell Systems for Transportation*, National Renewable Energy Laboratory, Cambridge/Massachusetts, 113 p.

<http://www.twanetwerk.nl/default.ashx?DocumentID=1538> TWANETWERK, 2006.

<http://www.ucar.edu/learn/images/gheffect.gif> University Corporation for Atmospheric Research, 2006.

<http://www.vsb-vzw.be/default.asp?WebpageId=18>, Vlaams Samenwerkingsverband Brandstofcellen vzw, 2006.

<http://www.wbcds.org/DocRoot/f131lMAvneJpUcnLgSeN/mobility-full.pdf> World Business Council for Sustainable Development, 2004, *Mobility 2030: Meeting the challenges to sustainability – The Sustainable Mobility Project, Full Report 2004*, WBCSD, 178 p.

<http://www.whitehouse.gov/stateoftheunion/2006/index.html> The State of the Union, 31 januari 2006.

<http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/manufacturers.html> US-DOE, 2006.

http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/news_cost_goal.html US-DOE, 2006.

http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/dae_h2_delivery.pdf US-DOE, maart 2006, *Hydrogen Distribution and Delivery Infrastructure*, US-DOE, Washington, DC, 2 p.

http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/dae_h2_production.pdf US-DOE, maart 2006, *Hydrogen Production*, US-DOE, Washington, DC, 2 p.

http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/tiax_cost_analysis_pres.pdf TIAx, 20 oktober 2004, *Cost Analysis of Fuel Cell Systems for Transportation, Compresses Hydrogen and PEM Fuel Cell System*, Fuel Cell Technical Team FreedomCar, Detroit, 45 p.

https://portal.health.fgov.be/portal/page?_pageid=56,512629&_dad=portal&_schema=PORTAL Federale Overheidsdienst Volksgezondheid, Veiligheid van de voedselketen en Leefmilieu, 2006.

<https://www.hfpeurope.org/> European Hydrogen & Fuel Cell Technology Platform, 2006.

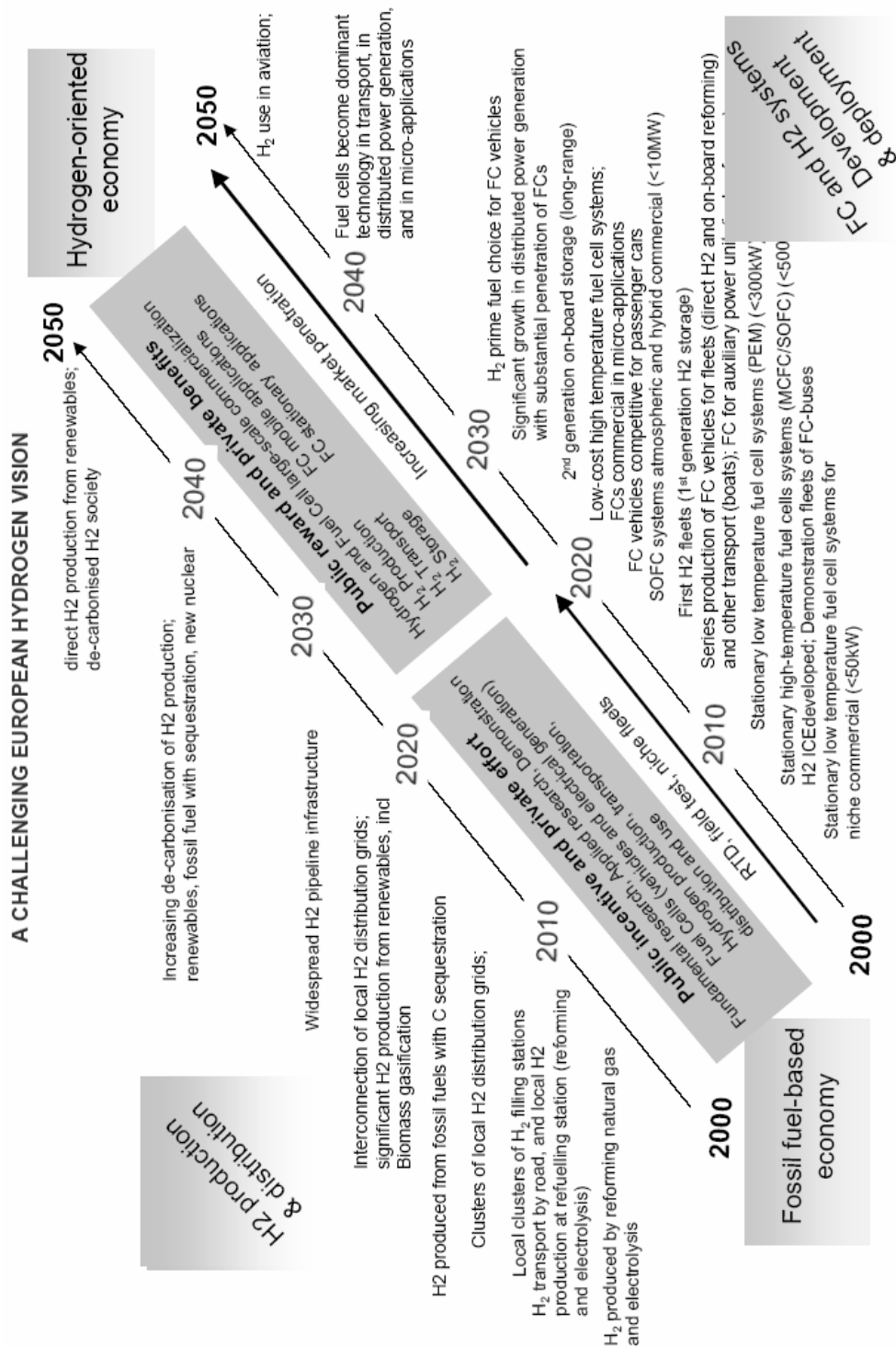
https://www.hfpeurope.org/uploads/677/1349/DS_Progress_Report_2005_final.pdf HFP, 2005, *Deployment Strategy Progress Report 2005*, Europese Commissie, Brussel, 26 p.

https://www.hfpeurope.org/uploads/677/687/HFP_DS_Report_AUG2005.pdf HFP, 2005, *Deployment Strategy*, Europese Commissie, Brussel, 112 p.

https://www.hfpeurope.org/uploads/702/819/5_Regulations_Codes_Standards.pdf European Hydrogen & Fuel Cell Technology Platform, 2006, *Regulations, Codes and Standards – Positioning Europe in the international arena*, Europese HFP, Brussel, 10 p.

Bijlagen

Bijlage 1: European Hydrogen and Fuel Cell Roadmap



Bron: http://ec.europa.eu/comm/research/energy/pdf/hlg_vision_report_en.pdf High Level Group for Hydrogen and Fuel Cell Technologies, 2003, *Hydrogen Energy and Fuel Cells – A vision of our future*, p.13.

Bijlage 2: Protagonisten van de waterstofeconomie

De productie van waterstof

[Air Liquide](#): Een Frans bedrijf dat waterstof aanbiedt aan de industrie.

[Axane Fuel Cell Systems](#): Dit bedrijf is via een joint venture met Air Liquide betrokken in de ontwikkeling van brandstofcellen en fabriceert tal van toepassingen van waterstof.

[Air Products](#): Dit Amerikaanse bedrijf produceert waterstof, ontwikkelt waterstofproductiesystemen voor bedrijven en is betrokken bij de ontwikkeling van tankstations.

[The BOC Group](#): Deze onderneming biedt totaaloplossingen aan voor de on-site productie van waterstof bij bedrijven.

[BP](#): Deze Britse energieleverancier is op vele manieren betrokken bij activiteiten die te maken hebben met waterstof.

[ChevronTexaco](#): Een Amerikaanse energieleverancier, bezig met de ontwikkeling en commercialisering van waterstofgerelateerde technologie zoals opslag en productie van waterstof voor voertuigen.

[ExxonMobil](#): Een energieproducent die betrokken is in de ontwikkeling van brandstofceltechnologie en de productie van waterstof.

[Gas Technology Institute](#): Dit bedrijf richt zich op het ontwikkelen van technologie die te maken heeft met brandstofcellen, waterstofproductie, infrastructuur en veiligheid.

[H-Tec](#): Een Duits bedrijf dat PEMFC's en elektrolyseapparaten ontwikkelt.

[Membrane Reactor Technologies](#): Dit bedrijf ontwikkelt reformers om waterstof te produceren uit aardgas.

[Millennium Cell, Inc.](#): Deze firma ontwerpt chemische methodes voor waterstofproductie- en opslagtechnologie.

[Norsk Hydro Electrolysers](#): Dit is een Noors bedrijf dat elektrolyseapparaten produceert.

[Powerball International, Inc.](#): Een onderneming die 'brandstofkorrels' ontwikkelt waarmee waterstof geproduceerd kan worden door toevoeging van water.

[Praxair](#): Een Amerikaans bedrijf gespecialiseerd in de productie van atmosferische gassen, waaronder waterstof.

[Proton Energy Systems](#): Dit bedrijf ontwikkelt regeneratieve brandstofcellen en waterstofproductiesystemen.

[Shell Hydrogen](#): Een onderdeel van de groep Shell dat op zoek gaat naar waterstofgerelateerde opportuniteiten waar Shell op in kan spelen.

[SOFCo-EFS Holdings LLC](#): Dit bedrijf ontwikkelt een speciaal type SOFC en brandstofprocessors die de waterstof leveren voor brandstofcellen.

[Teledyne Energy Systems, Inc.](#): Deze onderneming richt zich op de ontwikkeling van on-site elektrolyseapparaten, PEMFC's en testapparatuur.

De opslag en distributie van waterstof

[The BOC Group](#): Deze onderneming biedt totaaloplossingen aan voor de on-site productie van waterstof bij bedrijven.

[ChevronTexaco](#): Een Amerikaanse energieleverancier, bezig met de ontwikkeling en commercialisering van waterstofgerelateerde technologie zoals opslag en productie van waterstof voor voertuigen.

[Dynetek Industries Ltd.](#): Dit bedrijf ontwikkelt opslagsystemen zoals hoge druk tanks voor voertuigen en distributietoepassingen.

[Energy Conversion Devices, Inc.](#): Deze firma ontwikkelt regeneratieve brandstofcellen en metaalhydride opslagsystemen.

[Ergenics, Inc.](#): Dit bedrijf is gespecialiseerd in waterstofopslagtechnologie via onder andere metaalhydrides.

[HERA Hydrogen Storage Systems](#): In dit Canadese bedrijf ontwikkelt men opslagsystemen voor waterstof gebaseerd op de hydridetechnologie.

[Millennium Cell, Inc.](#) Deze firma ontwerpt chemische methodes voor waterstofproductie- en opslagtechnologie.

[Ovonic Hydrogen Solutions LLC](#): Deze joint venture tussen Energy Conversion Devices, Inc. en een eenheid van ChevronTexaco Corporation tracht metaalhydride-opslagsystemen voor waterstof te commercialiseren.

[Quantum Technologies](#): Dit bedrijf ontwikkelt opslagsystemen voor waterstof in gasvorm (onder andere hogedruktanks).

[Safe Hydrogen, LLC](#): Deze onderneming ontwikkelt opslagsystemen voor waterstof gebaseerd op chemische technologie.

De zuivering van waterstof

[OMG Corp.](#): Dit bedrijf ontwikkelt onder andere katalysatoren voor brandstofcellen, brandstofreformers, en zuiveringsapparaten voor waterstof.

[Pall Corporation](#): Hier ontwikkelt men technologieën om waterstof te zuiveren om het te kunnen gebruiken in brandstofcellen.

[Power+Energy, Inc.](#): Ook dit bedrijf ontwikkelt zuiveringsapparatuur voor waterstof.

[QuestAir](#): Dit Canadese bedrijf ontwikkelt naast zuiveringsapparaten voor waterstof ook nog tanksystemen voor reformertechnologie.

[REB Research and Consulting](#): Dit bedrijf legt zich toe op zuiveringsapparatuur voor waterstof.

Brandstofcellen

[Acumentrics](#): Dit bedrijf produceert SOFC's die aangedreven worden door aardgas en propaan voor kleine en middelgrote toepassingen.

[Axane Fuel Cell Systems](#): Dit bedrijf is via een joint venture met Air Liquide betrokken bij de ontwikkeling van brandstofcellen en fabriceert tal van toepassingen van waterstof.

[Ball Aerospace & Technologies Corp.](#): In dit bedrijf worden draagbare brandstofcellen ontwikkeld.

[Ballard](#): Dit bedrijf is een belangrijke speler in de ontwikkeling, productie en commercialisering van brandstofcellen.

[BCS Technology, Inc.](#): In dit bedrijf ontwerpt men onder andere geavanceerde fuel cell stacks.

[Ceramic Fuel Cells Limited](#): Dit is een bedrijf uit Australië dat platte SOFC's produceert.

[Electro-Chem-Technic](#): Een bedrijf uit het Verenigd Koninkrijk dat kleine brandstofcellen, toebehoren en materialen voor brandstofcellen ontwikkelt.

[ElectroChem, Inc.](#): Deze onderneming ontwikkelt en verkoopt brandstofcellen, onderdelen, testapparatuur en toebehoren.

[Element 1 Power Systems](#): Dit is een producent en verkoper van brandstofcellen, specifieke materialen, toebehoren, testsystemen enz.

[Energy Conversion Devices, Inc.](#): Deze firma ontwikkelt regeneratieve brandstofcellen en metaalhydride opslagsystemen.

[Entegris](#): Een bedrijf dat gespecialiseerd is in het ontwikkelen van speciale materialen geschikt voor hightech toepassingen, waaronder brandstofcellen.

[FuelCell Energy](#): Dit bedrijf richt zich op het ontwerpen van stationaire brandstofcellen die aangedreven worden met gas.

[Gas Technology Institute](#): Dit bedrijf richt zich op het ontwikkelen van technologie die te maken heeft met brandstofcellen, waterstofproductie, infrastructuur en veiligheid.

[GE Power Systems](#): General Electric Power Systems verkoopt onderdelen voor energiecentrales, waaronder brandstofcellen, vervangingsonderdelen en de bijbehorende service.

[GreenVolt Power Corporation](#): Dit Canadese bedrijf ontwikkelt brandstofcellen voor FCV's, huizen en kleine industriële toepassingen.

[HTceramix](#): Dit is een Zwitsers bedrijf dat SOFC's ontwikkelt en ceramische membranen.

[H-Tec](#): Een Duits bedrijf dat PEMFC's en elektrolyseapparaten ontwikkelt.

[Hydrogenics Corporation](#): Dit Canadese bedrijf bouwt onder andere PEMFC's voor in energiecentrales en voor testing. Het dochterbedrijf Hydrogenics Europe NV is gelegen in Oevel (Westerlo)²⁸⁶.

[IdaTech](#): Deze onderneming ontwikkelt PEMFC's en reformers.

[Lynntech, Inc.](#): In dit bedrijf worden ondermeer PEMFC's geproduceerd en testsystemen.

[Manhattan Scientifics Inc.](#): Hier ontwikkelt men kleine brandstofcellen voor kleine elektronica en draagbare toepassingen.

[Materials and Electrochemical Research Corporation](#): Dit bedrijf ontwikkelt PEMFC's, onderdelen van brandstofcellen en fuel cell stacks voor demonstratie- en onderzoeksdoeleinden.

[Materials and Systems Research, Inc.](#): In dit bedrijf worden platte lage temperatuur SOFC's voor energieopwekking ontwikkeld.

[Mitsubishi Heavy Industries, Inc.](#): Hier ontwikkelt men SOFC's.

[MTU Friedrichshafen GmbH](#): Dit Duitse bedrijf ontwikkelt MCFC's voor stationaire toepassingen en PEMFC's voor transporttoepassingen.

²⁸⁶ In februari 2005 verwierf het Canadese Hydrogenics de volledige controle over een ander Canadees bedrijf Stuart Energy, dat op zijn beurt sinds februari 2003 de eigenaar was van de Belgische wereldspeler op het vlak van waterstofgeneratie Vandenborre Technologies. De vestiging in Oevel (waar ongeveer 50 personen tewerkgesteld zijn) verzorgt binnen de groep het design, de productie en de service van wat genoemd wordt 'onsite generation systems' voor waterstofproductie. (Bron: <http://www.hydrogenics.com>)

[Nuvera Fuel Cells](#): Deze onderneming ontwikkelt PEM fuel cell stacks en andere systemen voor onder andere stationaire energieopwekking.

[Plug Power, Inc.](#): Dit bedrijf is betrokken in de ontwikkeling van PEMFC's voor stationaire toepassingen.

[Proton Energy Systems](#): Dit bedrijf ontwikkelt regeneratieve brandstofcellen en waterstofproductiesystemen.

[Proton Motor GmbH](#): Dit is een Duits bedrijf dat brandstofcellsystemen ontwikkelt van 1kW tot meer dan 100kW.

[ReliOn](#): Hier ontwikkelt en verkoopt men modulaire PEMFC's en verwante technologieën.

[Siemens](#): Deze grote naam is betrokken in de ontwikkeling van SOFC's.

[SOFCo-EFS Holdings LLC](#): Dit bedrijf ontwikkelt een speciaal type SOFC en brandstofprocessors die de waterstof leveren voor brandstofcellen.

[Teledyne Energy Systems, Inc.](#): Deze onderneming richt zich op de ontwikkeling van on-site elektrolyseapparaten, PEMFC's en testapparatuur.

[UTC Fuel Cells](#): Dit bedrijf is bezig met het ontwerpen, produceren en het commercialiseren van brandstofcellen.

[Ztek Corporation](#): Dit bedrijf ontwikkelt naast SOFC's ook gasturbine's op basis van de SOFC-technologie.

Bron: <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/manufacturers.html> US-DOE, 2006.

Auteursrechterlijke overeenkomst

Opdat de Universiteit Hasselt uw eindverhandeling wereldwijd kan reproduceren, vertalen en distribueren is uw akkoord voor deze overeenkomst noodzakelijk. Gelieve de tijd te nemen om deze overeenkomst door te nemen en uw akkoord te verlenen.

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:

Technologische en economische haalbaarheid van waterstofmotoren.

Richting: **Licentiaat in de toegepaste economische wetenschappen**

Jaar: **2006**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt houdt in dat ik/wij als auteur de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij kan reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

U bevestigt dat de eindverhandeling uw origineel werk is, en dat u het recht heeft om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. U verklaart tevens dat de eindverhandeling, naar uw weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

U verklaart tevens dat u voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen hebt verkregen zodat u deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal u als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze licentie

Ik ga akkoord,

Stijn REMELS

Datum: