

**CE**

**Oplossingen voor  
milieu, economie  
en technologie**

Oude Delft 180

2611 HH Delft

tel: 015 2 150 150

fax: 015 2 150 151

e-mail: ce@ce.nl

website: www.ce.nl

Besloten Vennootschap

KvK 27251086

Hogeschool **INHOLLAND**

## Op weg met Waterstof

Kansen en knelpunten  
voor waterstof als energiedrager in  
transporttoepassingen



### Rapport

Delft, 1 juni 2004

Opgesteld door: W.A. (Wouter) Hoogenraad



# Colofon

Bibliotheekgegevens rapport:

Op weg met Waterstof  
Kansen en knelpunten van waterstof als energiedrager in transport-  
toepassingen  
Delft, CE, 2004

Waterstof / Brandstoffen / Transportmiddelen / Innovatie / Onderzoek  
/ Infrastructuur / Technologie / Prognoses

Publicatienummer: 04.3000.14

Alle CE-publicaties zijn verkrijgbaar via [www.ce.nl](http://www.ce.nl)

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider  
Wouter Hoogenraad.

© copyright, CE, Delft

## **CE**

### **Oplossingen voor milieu, economie en technologie**

CE is een onafhankelijk onderzoeks- en adviesbureau, gespecialiseerd in het ontwikkelen van structurele en innovatieve oplossingen van milieuvraagstukken. Kenmerken van CE-oplossingen zijn: beleidsmatig haalbaar, technisch onderbouwd, economisch verstandig maar ook maatschappelijk rechtvaardig.

## **CE-Transform**

### **Visies voor duurzame verandering**

CE-Transform, een business unit van CE, adviseert en begeleidt bedrijven en overheden bij veranderingen gericht op duurzame ontwikkeling.

De meest actuele informatie van CE is te vinden op de website: [www.ce.nl](http://www.ce.nl)

Dit rapport is gedrukt op 100% kringlooppapier.

Afbeelding op de voorzijde is de HydroGen3, een concept brandstof-  
celvoertuig van General Motors.

## Voorwoord

De aanleiding van dit rapport is tweeledig. Enerzijds is dit een kennisvergarend project voor CE, in het kader van toekomstig werk op het gebied van waterstof. Anderzijds is dit onderzoek gedaan in het kader van mijn afstudeerproject. Dit afstudeerproject is het afsluitende onderdeel van de opleiding Milieukunde aan de Hogeschool INHolland Delft.

Mijn dank gaat uit naar mijn stagebegeleiders, Ronald Schillemans en Margret Groot voor de goede begeleiding tijdens het uitvoeren van het onderzoek. Tevens wil ik mijn collega's bij CE bedanken die tijdens het project met hun vak-kennis een bijdrage hebben geleverd aan het tot stand komen van dit rapport.



# Inhoud

Samenvatting	1
1 Inleiding	3
1.1 Aanleiding	3
1.2 Doel en afbakening	4
1.3 Leeswijzer	4
2 Context van waterstof: begrippen en definities	5
2.1 Waterstof in perspectief	5
2.1.1 Productie	5
2.1.2 Opslag en transport	6
2.1.3 Conversie	6
2.1.4 Toepassing	7
2.1.5 Transitiekrachten	7
2.2 Toepassingen van waterstof	8
2.2.1 Transport	8
2.2.2 Stationair	8
2.2.3 Mobiel	9
2.2.4 Industrieel	9
3 Technische aspecten & Kosten	11
3.1 Productie waterstof	11
3.1.1 Centrale versus decentrale productie	13
3.1.2 Thermisch	14
3.1.3 Elektrochemisch	15
3.1.4 Biologisch	15
3.1.5 Afweging productiemethodes	15
3.1.6 CO <sub>2</sub> afvang en opslag	17
3.1.7 Kosten	18
3.2 Opslag	22
3.2.1 Waterstof onder druk	23
3.2.2 Vloeibaar waterstof.	24
3.2.3 Waterstofopslag in gebonden vorm.	24
3.2.4 Afweging opslagmethodes	25
3.2.5 Kosten	26
3.3 Transport en distributie	27
3.3.1 Kosten	28
3.4 Conversie	29
3.4.1 Brandstofcellen	29
3.4.2 Verbrandingsmotor	31
3.4.3 Kosten	31

4	Beleidsmatige aspecten	35
4.1	Algemeen	35
4.2	Nationaal	35
4.3	Europese Unie	39
4.4	Internationaal	42
5	Maatschappelijke aspecten	45
5.1	Veiligheid	45
5.2	Infrastructuur	47
5.3	Milieu	49
5.4	Communicatie	50
5.4.1	Voorbeeldprojecten	50
5.4.2	Media	54
5.4.3	Risicoperceptie	54
6	Conclusies	57
6.1	Kansen	57
6.2	Knelpunten	57
6.3	Beleid	58
6.4	Toekomstmuziek	58
	Literatuurlijst	61
A	Eigenschappen van waterstof	69
B	Berekening waterstofproductie	71

# Samenvatting

Waterstof heeft de potentie een rol te spelen in de toekomstige duurzame energievoorziening. De inzet van waterstof in transporttoepassingen wordt als kansrijk beschouwd op de lange termijn, vanwege de mogelijkheid om tot een emissieloze samenleving met een onafhankelijke energievoorziening te komen.

De doelstelling van dit project is te achterhalen wat de mogelijkheden en knelpunten zijn om in de toekomst waterstof grootschalig in te voeren als energiedrager voor transporttoepassingen. Niet alleen het vinden van antwoorden, maar ook het identificeren en mogelijk invullen van kennisleemtes en onduidelijkheden vormen onderdeel van dit project.

De ontwikkeling van waterstof voor transporttoepassingen bevindt zich momenteel in de onderzoek- en ontwikkelingsfase, waarbij door de overheid en het bedrijfsleven onderzoeksprogramma's en voorbeeldprojecten worden uitgevoerd. Deze projecten vinden voornamelijk op internationaal niveau plaats, van waaruit de inspanningen worden gecoördineerd door speciaal opgerichte platforms.

Omdat waterstof onder normale omstandigheden een gas is brengt het knelpunten met zich mee met betrekking tot het opslaan van voldoende waterstof, rekening houdend met de randvoorwaarden die gelden voor transporttoepassingen. Ten tweede is het ontbreken van een waterstofinfrastructuur een knelpunt voor de transitie naar waterstof. Zonder infrastructuur zal niemand een auto op waterstof kopen en zonder vraag naar waterstof zal zich geen infrastructuur ontwikkelen. Als laatste zullen de kosten van een auto op waterstof sterk moeten dalen wil het concurrerend worden met conventionele voertuigen. Het technische probleem met betrekking tot opslag van waterstof zal door onderzoeksinspanningen moeten worden opgelost. De overige twee problemen vergen inspanningen van de overheid, en het bedrijfsleven. Een infrastructuur kan door een van beide worden aangelegd, en kostendalingen kunnen voortkomen uit massaproductie en belastingverlagingen van de overheid.

Twee grote invloeden op de ontwikkeling van waterstof voor transporttoepassingen zijn technologische ontwikkelingen en de ontwikkeling van de olieprijs. Technologische ontwikkelingen kunnen leiden tot een goedkoper, duurzamer en milieuvriendelijker eindproduct dat voldoet aan de eisen van de eindgebruiker. De ontwikkeling van de olieprijs is in die zin van invloed dat een hoge brandstofprijs de ontwikkeling van alternatieven stimuleert.

Voor het introduceren van waterstof in transporttoepassingen is een eenduidige visie noodzakelijk van de betrokken partijen, met in het achterhoofd dat de consument uiteindelijk beslist. Gezien de vele onderzoek- en ontwikkelingsinspanningen door verschillende actoren wordt waterstof momenteel gezien als een serieuze toekomstige energiedrager in transporttoepassingen.





# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Fossiele brandstoffen hebben de mensheid energie en gemak geleverd, in huishoudens, transport en de industrie. De laatste decennia is echter het besef gegroeid dat het gebruik van deze brandstoffen bijdraagt aan mondiale klimaatverandering. Naast de mondiale effecten wordt ook de lokale luchtkwaliteit negatief beïnvloed door de uitstoot van het gebruik van fossiele brandstoffen. Hierbij komen negatieve aspecten tot uiting in gezondheidsrisico's van mensen. Tevens is de voorraad fossiele brandstoffen eindig, en grotendeels in handen van een klein aantal landen.

De discussie is dan ook gaande welke weg in te slaan op het gebied van de toekomstige energievoorziening. De interesse voor de transitie naar 'De Waterstof-economie' komt voort uit het duurzame toekomstbeeld dat het uitstraalt en is gestimuleerd door recente overheidsinvesteringen. De waterstofeconomie bestaat uit de productie van moleculair waterstof met behulp van fossiele brandstoffen, kernenergie of duurzame energie (bijv. wind, zon of biomassa); het transport en de opslag van waterstof; en het eindgebruik in brandstofcellen die waterstof in combinatie met zuurstof omzetten in energie, water en warmte. Brandstofcellen zijn in ontwikkeling voor transporttoepassingen, energievoorziening in huishoudens, bedrijfspanden en industrie, en mobiele toepassingen zoals laptops en mobiele telefoons.

Waterstof biedt de mogelijkheid over te stappen op een CO<sub>2</sub>-vrije transportvoorziening indien het uit duurzame bronnen wordt geproduceerd, of door de CO<sub>2</sub> op te slaan die vrijkomt bij de productie uit fossiele brandstoffen. De productie van waterstof uit fossiele brandstoffen brengt namelijk de uitstoot van schadelijke emissies met zich mee. Visies gaan zo ver als een economie waarvan de energievoorziening geheel is gebaseerd op de energiedrager waterstof. Tussenvormen zijn tevens mogelijk, waarbij waterstof in bepaalde segmenten van de energievoorziening wordt ingezet.

Bij deze visies kunnen echter meerdere kanttekeningen worden geplaatst. Ten eerste kleven er technologische en maatschappelijke barrières aan de invoering van een waterstofeconomie. Deze manifesteren zich voornamelijk op het gebied van opslag, infrastructuur en kosten. Ten tweede heeft de voorraad aardolie een grote invloed op deze visie. Indien de voorraad aardolie afneemt zal de prijs stijgen, en kan waterstoftechnologie in een stroomversnelling raken. Als laatste is de rol van de overheid in de transitie van groot belang. De huidige infrastructuur van fossiele brandstoffen heeft grootschalige investeringen met zich meegebracht. Bij de noodzakelijke infrastructurele investeringen die de invoering van waterstof met zich meebrengt kan de bestaande 'lock-in'<sup>1</sup> rond fossiele brandstof-

---

<sup>1</sup> Lock-in zijn de investeringen die komen kijken bij de invoering van een nieuwe technologie ten opzichte van de investeringen die al zijn gedaan bij de invoering van de bestaande technologie

fen belemmerend werken. Het vertrouwen van de overheid speelt een belangrijke rol in de mate waarin ze meegaat in de transitie door onderzoek te stimuleren en de 'lock-in' rond fossiele brandstoffen wegneemt.

## **1.2 Doel en afbakening**

Het doel van dit project is als volgt:

*Achterhalen wat de kansen en knelpunten zijn om in de toekomst waterstof grootschalig in te voeren als energiedrager voor transporttoepassingen, waarbij dit onderzoek niet alleen gericht is op het vinden van antwoorden, maar tevens het identificeren en mogelijk invullen van kennisleemtes en onduidelijkheden.*

Zoals blijkt uit de doelstelling is dit onderzoek voornamelijk gericht op transporttoepassingen, omdat dit als een van de belangrijkste markten van waterstof wordt gezien. De technische aspecten van de waterstofeconomie zijn echter ook voor andere toepassingen van belang, maar zijn waar mogelijk gerelateerd aan transport. Het onderzoek is uitgevoerd door middel van een intensieve literatuurstudie, congresbezoek en interviews, waarbij bestaande kennis is gecombineerd en waar mogelijk aangevuld met eigen inzichten.

## **1.3 Leeswijzer**

Waterstof zal in hoofdstuk 2 in perspectief worden geplaatst, ter introductie van het overige deel van het rapport. Technische aspecten van waterstof voor transporttoepassingen met bijbehorende kosten komen in hoofdstuk 3 aan de orde, waarna in hoofdstuk 4 beleidsmatige aspecten worden belicht. Hoofdstuk 5 gaat in op maatschappelijke aspecten. Afgesloten wordt met de conclusies in hoofdstuk 6.

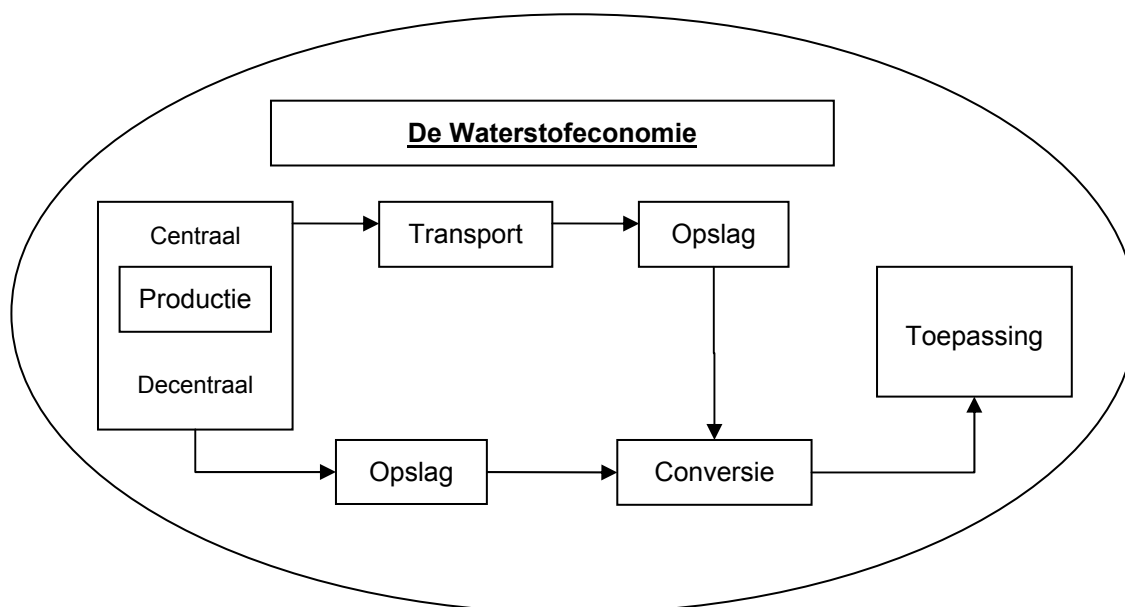
## 2 Context van waterstof: begrippen en definities

### 2.1 Waterstof in perspectief

Nadat de wetenschappelijke wereld al decennia aan onderzoek achter de rug heeft naar de mogelijkheden in combinatie met de brandstofcel krijgt nu ook de burger steeds meer te maken met het fenomeen waterstof. Naar een complete energievoorziening op basis van waterstof wordt gerefereerd als 'De Waterstof-economie'. Hiervoor zijn verschillende mogelijkheden denkbaar met elk zijn voor- en nadelen. In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van verschillende aspecten met betrekking tot de transitie naar een waterstofeconomie wat perspectief geeft aan het overige deel van het rapport.

Om te beginnen komt waterstof niet als elementaire vorm in de natuur voor en moet dus worden geproduceerd. Om van productie naar gebruiker te komen moet waterstof worden opgeslagen en gedistribueerd. Voor alle stappen in de waterstofeconomie zijn verschillende opties beschikbaar, welke in het rapport verder worden uitgewerkt. De waterstofeconomie kan worden gezien als een keten, zoals te zien in Figuur 1.

Figuur 1 De waterstofeconomie



#### 2.1.1 Productie

Momenteel zijn verschillende technieken beschikbaar voor de productie van waterstof. Dit kan gebeuren door een fossiele grondstof (koolwaterstof) om te zetten in waterstof, of door water te ontbinden in waterstof en zuurstof. Naast de productie technieken van waterstof is voornamelijk het gegeven of het centraal of

decentraal wordt geproduceerd van doorslaggevend belang bij de vormgeving van de waterstofeconomie. Een centrale productie houdt in dat waterstof groot-schalig wordt geproduceerd en daarna gedistribueerd naar de eindgebruiker. De-centrale productie betekent dat een productie-eenheid bij de eindgebruiker zelf staat, wat de behoefte van een uitgebreide infrastructuur deels wegneemt. Tus-senvormen zijn ook mogelijk met middelgrote productie-eenheden, wat de trans-portlijnen verkort ten opzichte van centrale productie.

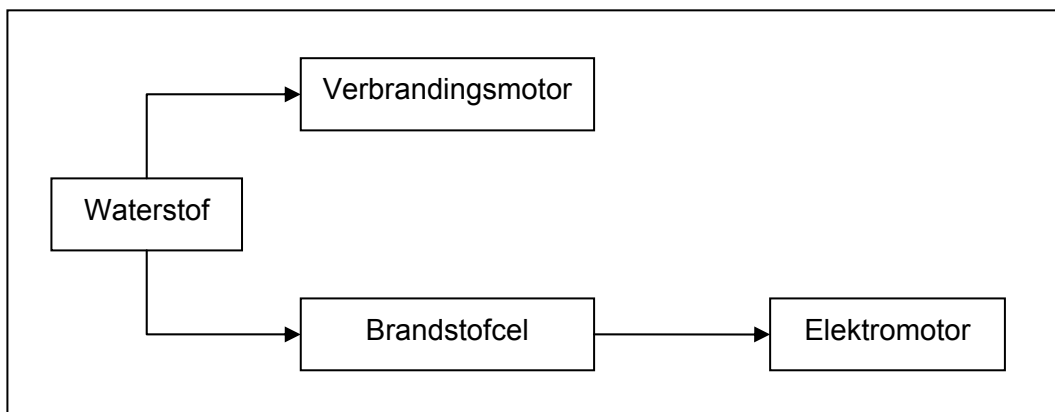
### 2.1.2 Opslag en transport

De opslag van waterstof is afhankelijk van het beoogde einddoel, voor transport-toepassingen zijn namelijk andere eigenschappen vereist dan voor stationaire of mobiele toepassingen. Opslag voor transporttoepassingen moet licht, veilig, en compact zijn. Transport van waterstof kan continue (pijpleiding) of gefaseerd (truck, schip of trein). Gefaseerd transport vereist de opslag van waterstof, deze twee onderwerpen zijn dan ook onlosmakelijk met elkaar verbonden. In hoeverre transport van waterstof nodig is hangt af van de hiervoor genoemde centrale of decentrale productie.

### 2.1.3 Conversie

Met conversie van waterstof wordt de stap bedoeld van energiedrager naar se-cundaire energie, zoals elektriciteit. Bij deze conversie vallen twee wegen te be-wandelen, namelijk verbranding of elektriciteitsopwekking met behulp van de brandstofcel, zoals weergegeven in Figuur 2. Bij verbranding wordt waterstof op dezelfde wijze ingezet als conventionele brandstoffen zoals benzine en aardgas. Met behulp van een brandstofcel kan waterstof via een chemische reactie direct worden omgezet in elektriciteit. Deze elektriciteit kan bij transporttoepassingen direct worden gebruikt om een elektromotor aan te drijven.

Figuur 2 Conversie waterstof



## 2.1.4 Toepassing

De toepassing van de energie die is opgewekt bij de conversie valt te verdelen in de volgende categorieën;

- transport;
- stationair;
- mobiel;
- industrieel.

Het verschil tussen mobiele en transporttoepassingen is dat bij mobiele toepassingen gedacht moet worden aan laptops, mobiele telefoons e.d. en transporttoepassingen gericht is op vervoer van personen of goederen. Deze studie zal zich voornamelijk richten op de transporttoepassingen van waterstof.

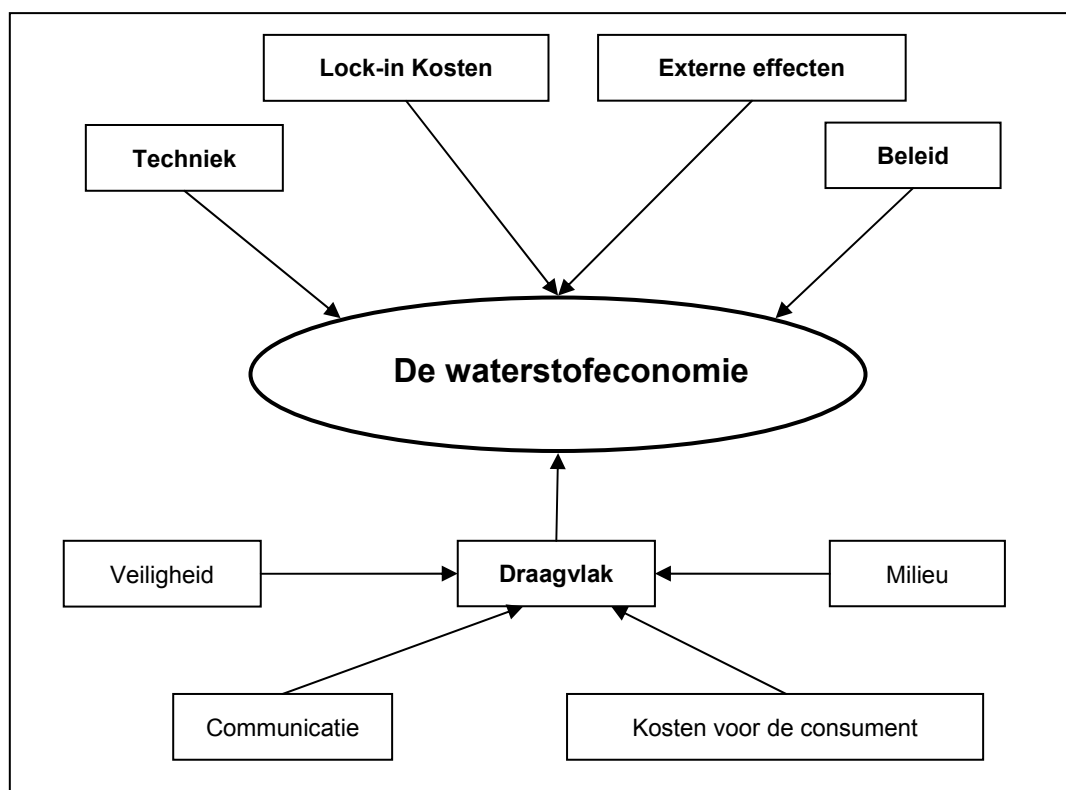
## 2.1.5 Transitiekrachten

Bij de transitie naar een waterstofeconomie spelen de volgende krachten een rol, ook te zien in Figuur 3;

- techniek;
- lock-in kosten;
- externe effecten;
- beleid;
- draagvlak.

Deze krachten zijn dus in grote mate van invloed op de uiteindelijke rol van waterstof in de energievoorziening.

Figuur 3 Transitiekrachten waterstofeconomie



In visies over de waterstofeconomie is het tijdsaspect van belang. Over het algemeen wordt waterstof binnen een periode van 20 jaar niet als commerciële speler voor transporttoepassingen genoemd. Gezien dit tijdsspan zijn alle visies gebaseerd op een gunstige progressie van waterstof in vergelijking met de alternatieven. Uitspraken over de uiteindelijke energievoorziening zijn gebaseerd op aannames en zijn afhankelijk van de wijze waarop de krachten uit Figuur 3 zullen uitwerken.

De omvang van de transitie naar een waterstofeconomie is een van de grootste uitdagingen. Dit komt doordat de zowel de vraag en aanbodzijde van de energiemarkt een grote verandering dienen te ondergaan. Dit brengt aan beide zijdes actoren met zich mee die de transitie beïnvloeden. Niet alleen de productie en levering van waterstof, maar ook de omzetting van waterstof in energie voor de toepassing vergt een transitie van de huidige energievoorziening [NAS, 2004]. Met een dergelijke transitie is nog geen praktijkervaring opgedaan, bijvoorbeeld kernenergie veranderde alleen de aanbodzijde.

## **2.2 Toepassingen van waterstof**

Momenteel zijn er vier categorieën met potentie voor de toepassing van waterstof als energiedrager. Aangezien dit rapport met name gericht is op transporttoepassingen zullen de overige categorieën beknopt worden toegelicht. De categorieën zijn:

- transport;
- stationair;
- mobiel;
- industrieel.

Huidige toepassingen (ruimtevaart, industriële toepassingen etc.) zullen hier niet verder worden besproken, aangezien dit onderzoek is gericht op een toekomstig beeld.

### **2.2.1 Transport**

Waterstof is bruikbaar voor transporttoepassingen door het in te zetten als brandstof in een verbrandingsmotor, of als energiedrager in een brandstofcel. Redenen om waterstof als energiedrager voor transporttoepassingen in te zetten zijn de emissiereductie die het oplevert en een meer onafhankelijke energievoorziening. Indien waterstof wordt verbrand komen beperkte schadelijke emissies vrij in de vorm van  $\text{NO}_x$ , de brandstofcel emitteert alleen water. De voornaamste struikelblokken voor de inzet van waterstof in transporttoepassingen zijn de benodigde infrastructuur, kosten en opslag.

### **2.2.2 Stationair**

Stationaire toepassingen van waterstof omvat de energievoorziening in huishoudens en bedrijven. De reden om waterstof in te zetten in stationaire toepassingen is evenals bij transporttoepassingen emissiereductie. Bij de huidige decentrale



energievoorziening op basis van aardgas wordt emissiereductie gelimiteerd door technische en economische haalbaarheidsaspecten. Verdere reductie van emissies in stationaire toepassingen kan worden gerealiseerd door over te stappen op een andere energievoorziening. Hier zijn echter meerdere mogelijkheden, waarvan waterstof er één is. Door middel van waterstof in combinatie met een brandstofcel is het mogelijk zowel aan de elektriciteitsvraag als aan de warmtevraag te voldoen. Voor het leveren van waterstof aan huishoudens zou mogelijk de huidige aardgas infrastructuur gebruikt kunnen worden.

### **2.2.3 Mobiel**

Waterstof in combinatie met een brandstofcel kan ook worden ingezet in mobiele toepassingen, zoals mobiele telefoons, laptops e.d. De drijfveer voor deze ontwikkeling is de huidige generatie batterijen voor deze toepassingen, die stuk voor stuk nadelen kennen. Brandstofcellen hebben de potentie langer mee te gaan voordat ze 'opgeladen' moeten worden. Dit opladen kan in de toekomst het wisselen van een waterstof patroon inhouden.

### **2.2.4 Industrieel**

Industriële toepassingen van de brandstofcel vereisen een andere orde van grootte aan energievoorziening dan de hiervoor genoemde applicaties. In de toekomst zijn brandstofcellen die met een hoge temperatuur werken mogelijk inzetbaar voor deze toepassing. Deze brandstofcellen kunnen naast waterstof ook andere energiedragers gebruiken voor energieopwekking. De warmte die vrijkomt, kan gebruikt worden voor andere processen of worden gezet in elektriciteit.





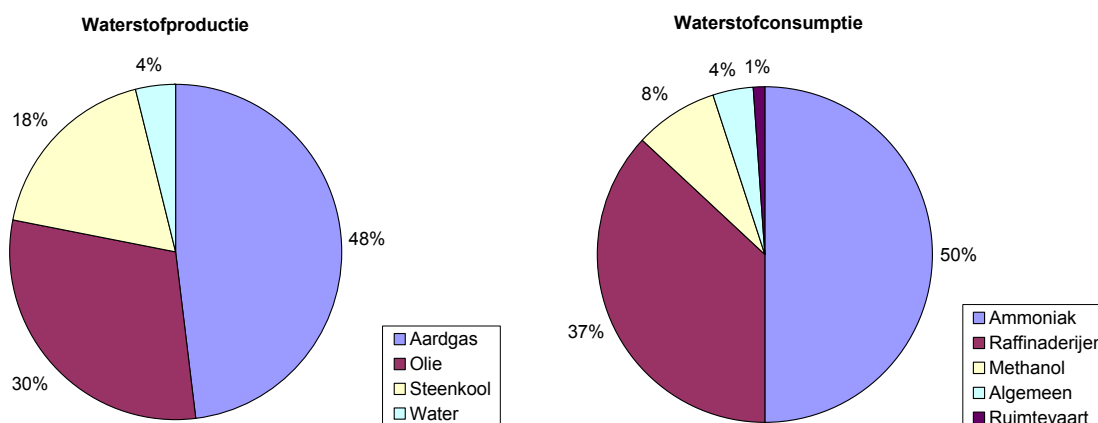
### 3 Technische aspecten & Kosten

Voor de transitie naar een waterstofeconomie zullen de benodigde technische middelen beschikbaar moeten zijn. Waterstof moet geproduceerd, opgeslagen, getransporteerd en gedistribueerd en geconverteerd worden naar bruikbare energie. Voor transporttoepassingen gelden specifieke technische eisen, zo moet een opslagtank in een voertuig voldoende waterstof bevatten voor een acceptabele actieradius. In dit hoofdstuk worden de technische aspecten van een waterstofeconomie beschreven, waar mogelijk toegespitst op transporttoepassingen.

#### 3.1 Productie waterstof

In tegenstelling tot fossiele brandstoffen bepaald de wijze waarop waterstof wordt geproduceerd voor het grootste gedeelte de hoeveelheid schadelijke emissies die vrijkomen. Het milieuvoordeel van waterstof is dus afhankelijk van de productiemethode. Voor 96% van de huidige productie van waterstof worden fossiele brandstoffen als grondstof gebruikt, zoals te zien in Figuur 4. Deze figuur geeft tevens een overzicht van de mondiale waterstofconsumptie, waaruit blijkt dat voor de aanmaak van ammoniak (kunstmestindustrie) en binnen raffinaderijen momenteel het grootste deel van de waterstof wordt verbruikt.

Figuur 4 Verdeling waterstofproductie en -consumptie



Waterstof is via een verscheidenheid aan wegen te produceren, waarbij de grondstof, eventuele tussenstof, het productieproces en de bron van energie voor het productieproces variabel zijn. Tabel 1 geeft een overzicht van de productievevariabelen van waterstof productie.

Tabel 1 Overzicht productie methodes

Grondstoffen	Tussenstof	Productieproces	Energie voor productieproces
<i>Fossiel</i> Steenkool Aardgas Olie	Syngas Benzine Diesel Methanol Ammonia Direct gebruik grondstof	<i>Thermisch</i> Reforming Stoom Partiele oxidatie Plasma Vergassing Pyrolyse	<i>Thermisch</i> Fossiel Duurzaam Nucleair  <i>Elektriciteit</i> Fossiel Duurzaam Nucleair
<i>Biomassa</i> Houtcellulose Zetmeel Plantaardige oliën Black liquor	Ethanol Methanol Biodiesel Biogas Suikers Direct gebruik grondstof	<i>Elektrochemisch</i> Elektrolyse Foto-elektrochemisch	<i>Lichtenergie</i> Zon
<i>Afvalstoffen</i> Afvalwater Stadsafval Rookgassen	Direct gebruik grondstof	<i>Biologisch</i> Fotobiologisch Aërobe fermentatie Anaërobe fermentatie	
Water	Direct gebruik grondstof		

Bron: DOE, 2004

Alle vier de factoren uit Tabel 1 van de productie van waterstof hebben invloed op de uiteindelijke milieubelasting van waterstofproductie. Beginnende met de grondstof is het koolstofgehalte van groot belang, want bij de productie van zuivere waterstof zal alle koolstof aanwezig in de grondstof vrijkomen binnen het productieproces. Zo komt bij kolenvergassing significant meer CO<sub>2</sub> vrij per kilogram geproduceerd waterstof dan bij het reformen van aardgas [ECN, 2001]. Indien de grondstof moet worden omgezet in een tussenstof levert dit rendementsverlies op. Dit rendementsverlies zal resulteren in een grotere hoeveelheid grondstof benodigd voor dezelfde hoeveelheid waterstof. Voor het productieproces geldt hetzelfde met betrekking tot rendementsverlies. Als laatste is de wijze waarop de benodigde energie voor de het productieproces wordt verkregen van invloed op de milieubelasting van het proces. Indien de energie op duurzame wijze wordt opgewekt leidt dit tot minder milieubelasting dan wanneer het uit fossiele brandstoffen wordt verkregen.

Zoals te zien in Tabel 2 hebben drie productietechnieken momenteel een commerciële status, namelijk reforming, partiele oxidatie en elektrolyse. Vergassing van steenkool heeft een precommerciële status, en is van de niet-commerciële technieken de enige die niet in de research & development fase zit.

Tabel 2 Status productietechnieken waterstof

Categorie	Productie proces	Status
Thermisch	Reforming	Commercieel
	Partiele oxidatie	Commercieel
	Vergassing Steenkool	Precommercieel
	Pyrolyse (Thermochemisch)	Research & Development
	Plasma-reforming	Research & Development
Elektrochemisch	Elektrolyse	Commercieel
	Fotochemisch	Research & Development
	Foto-elektrisch	Research & Development
Biologisch	Fotobiologisch	Research & Development
	Fermentatie	Research & Development

Bron: Maddy, 2003

### 3.1.1 Centrale versus decentrale productie

Voor de uiteindelijke invulling van een waterstofeconomie is de productieschaal van groot belang. Zoals eerder genoemd kan waterstof centraal, decentraal of in een tussenvorm worden geproduceerd. Een centrale productie van waterstof gebeurt in grote centrales waar waterstof in grote hoeveelheden wordt geproduceerd. Decentrale productie daarentegen is gebaseerd op kleinschalige productie, dichtbij de eindgebruiker. Tussenvormen kunnen bijvoorbeeld productie-eenheden zijn die een wijk voorzien van waterstof. De voor- en nadelen van centrale en decentrale productie zijn weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3 Voor- en nadelen van centrale versus decentrale productie waterstof

	Centrale productie	Decentrale productie
Voordelen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Afvang schadelijke emissies</li> <li>- Kosten eindproduct</li> <li>- Risico's gecentreerd</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geen uitgebreide infrastructuur nodig</li> <li>- Makkelijk bijplaatsen nieuwe eenheden</li> <li>- Transitie</li> <li>- Minder kwetsbaar voor aanslagen en grootschalige uitval</li> </ul>
Nadelen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kosten infrastructuur</li> <li>- Kip-ei probleem, geen vraag, dan ook geen aanbod en vice versa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Emissie afvang moeilijk</li> <li>- Onderhoud decentraal</li> <li>- Veiligheid dichtbevolkte gebieden</li> </ul>

Centrale productie heeft als voordelen dat het centrale sturing toelaat op het gebied van risico's, afvang emissies en onderhoud. Ook brengt het een kostenbesparing met zich mee, door massaproductie. Deze besparing gaat echter weer gepaard met investeringen die gedaan moeten worden voor de aanleg van een infrastructuur. Bij centrale productie is het kip-ei probleem van vraag en aanbod

meer nadrukkelijk aanwezig, omdat zonder aanbod van waterstof niemand een voertuig zal aanschaffen dat rijdt op waterstof. Echter zonder een vraagzijde zal ook geen productienetwerk voor waterstof worden opgezet.

Voor landen en gebieden die in ontwikkeling zijn is een voordeel van decentrale productie dat naar gelang de energievraag nieuwe productie-eenheden geïnstalleerd kunnen worden. Ook in het kader van een begin van de transitie naar een waterstofeconomie is dit een voordeel. Een grootschalige infrastructuur is dan namelijk niet noodzakelijk voordat consumenten de keus voor waterstof kunnen maken. Nadeel is wel dat productie-eenheden decentraal onderhouden moeten worden, en er dus vraag naar geschoold onderhoudspersoneel bestaat. Decentrale productie voorkomt wel het grootschalig uitvallen van energielevering en is tevens minder kwetsbaar voor terroristische aanslagen.

Buiten de mogelijkheid waterstof centraal te produceren d.m.v. reforming kan dit proces ook aan boord (on-board) van een brandstofcelvoertuig plaatsvinden. Hierbij wordt aardgas of een vloeibare brandstof omgezet in waterstof. Verscheidene autoproducenten hebben onderzoek gedaan naar on-board reformers, maar hebben dit in 2003 weer afgestoten wegens de nadelen die het met zich meebrengt. Nadelen van on-board reforming zijn; extra kosten, aanzienlijk complexer systeem, reductie van de efficiëntie, verhoogde opstarttijd en de bijbehorende veiligheidsaspecten. Nog een aspect is dat on-board reforming wordt gezien als een tussenstap tussen het huidige beeld en een waterstofeconomie, en daarom geen potentie voor de lange termijn heeft [NAS, 2004].

### 3.1.2 Thermisch

De basis van thermische technieken ligt in het verhitten van de grondstof. Na het verhitten wordt in sommige gevallen stoom, zuurstof of een katalysator toegevoegd. Stoom reforming is momenteel de meest gebruikte techniek om waterstof te produceren wegens de eenvoud en economische aantrekkelijkheid. Bij reforming, partiële oxidatie en vergassing zijn drie processen nodig om tot waterstof te komen;

- vorming van synthese gas<sup>2</sup>;
- water-gas shift reactie ( $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$ );
- gasreiniging (extraheren van  $\text{CO}_2$ ).

Het verschil tussen de drie processen zit in het vormen van synthese gas. Reforming werkt alleen voor lichte koolwaterstoffen zoals aardgas en nafta, vergassing vereist een vaste grondstof en partiële oxidatie een vloeibare of gasvormige grondstof. Bij het produceren van waterstof uit gasvormige grondstoffen zijn kosten de reden dat reforming wordt toegepast aangezien partiële oxidatie duurder is.

Bij pyrolyse wordt de grondstof ontleed in afwezigheid van zuurstof. Dit proces levert een gas en een koolstofrijke vaste stof. De verhouding van deze stoffen hangt sterk af van de temperatuur en verblijftijd in de reactor. In het Kvaerner Carbon Black & Hydrogen Process (CB&H) wordt aardgas omgezet in Carbon

---

<sup>2</sup> Synthese gas is een gasmengsel, dat voornamelijk bestaat uit  $\text{CO}_x$  en  $\text{H}_2$ .



Black<sup>3</sup> en waterstof, onder pyrolyse omstandigheden. Voordeel van dit proces is de diversiteit aan grondstoffen die gebruikt kan worden. Verder is onderzoek gaande naar de pyrolyse van biomassa voor de productie van waterstof.

Voor de productie van waterstof door middel van plasma-reforming wordt de koolwaterstof uit de grondstof verhit tot meer dan 2000°C samen met stoom en lucht. Hierna vindt een snelle afkoeling van het plasma plaats waardoor een gasmengsel ontstaat. Na het verwijderen van zwavelverbindingen uit dit mengsel vindt ook hier de shiftreactie en gasreiniging plaats. Net zoals bij pyrolyse kan bij plasma-reforming een breed scala aan grondstoffen worden gebruikt.

### 3.1.3 Elektrochemisch

Onder elektrochemische productie van waterstof vallen elektrolyse en foto-elektrochemische processen. Elektrolyse vindt plaats in een cel die is gevuld met een ionengeleidende wateroplossing. Door een spanningsverschil te creëren vormen zich waterstof en zuurstof. De grondstof voor dit proces is water en voor de vorming van waterstof is elektriciteit nodig.

De energie om een vloeistof te ontbinden in elementen komt bij foto-elektrochemische processen direct uit zonlicht. Twee processen zijn in ontwikkeling, namelijk foto-elektrisch en fotochemisch. Bij foto-elektrolyse wordt waterstof geproduceerd door directe elektrolyse in water, met zonlicht als energiebron. Hierbij wordt een foto-elektrische cel direct in de vloeistof geplaatst. Het fotochemische proces gebeurt met behulp van een katalysator op het oppervlak van de fotovoltaïsche cel die waterstof en zuurstof direct splitst op het oppervlak van de cel.

### 3.1.4 Biologisch

Bij fotobiologische productie van waterstof wordt waterstof geproduceerd door fotosynthese dat plaatsvindt in micro-organismen, zoals bacteriën en algen. Fermentatie is een rottingsproces dat tevens gebaseerd is op micro-organismen, maar zonder lichtinvloed verloopt.

### 3.1.5 Afweging productiemethodes

Tabel 4 geeft een overzicht van de voor- en nadelen van verschillende productiemethodes van waterstof [EC, 2003]. Momenteel ligt het knelpunt van productiemethodes voornamelijk in de beschikbaarheid van kleinschalige productietechnieken, deze zijn namelijk nauwelijks beschikbaar en bevinden zich veelal in de ontwikkelingsfase. Op korte termijn zal aardgas reforming de meest toegepaste productiemethode van waterstof blijven, op de lange termijn verschuift dit waarschijnlijk. Gezien de invloed van het kostenaspect zullen andere technieken goedkoper moeten worden om te kunnen concurreren met aardgas reforming. Uiteindelijk zullen klimaatneutrale technieken de overhand krijgen wegens hun duurzame karakter. Dit brengt drie mogelijkheden met zich mee;

---

<sup>3</sup> Carbon black is een pure koolstofvorm (roet), en wordt gebruikt in de autobandenindustrie, verfindustrie etc.

- elektrolyse op basis van duurzame energie;
- biologische productie;
- technieken in combinatie met CO<sub>2</sub>-opslag.

Tabel 4 Kansen en knelpunten productiemethodes

	Productiemethode	Kansen	Knelpunten
Thermisch	Reforming	Bewezen technologie op grote schaal; algemeen voorkomend; goedkoop waterstof uit aardgas; combinatie met CO <sub>2</sub> -opslag kansrijk	Kleinschalige productie-eenheden niet commercieel; onzuiverheden in de waterstof – verdere zuivering noodzakelijk voor sommige toepassingen; CO <sub>2</sub> uitstoot; CO <sub>2</sub> -opslag brengt kosten met zich mee; grondstof kan direct gebruikt worden
	Vergassing	Bewezen technologie om zware koolwaterstoffen op grote schaal om te zetten; zowel toepasbaar voor vaste als vloeibare grondstoffen; mogelijke synergie met synthetische brandstoffen uit biomassa worden gedemonstreerd	Kleinschalige eenheden zeldzaam; waterstof vereist over het algemeen intensieve zuivering voor gebruik; vergassen van biomassa wordt nog onderzocht; biomassa brengt landgebruik implicaties met zich mee; concurrerend met synthetische brandstoffen uit biomassa
	Thermochemische Cycli	Potentiële grootschalige productiemethode met lage kosten en zonder broeikasgasemissies voor zware industrie of transport; internationale samenwerking (EU, VS and Japan) op het gebied van onderzoek en ontwikkeling	Complex, nog niet commercieel, 10 jaar onderzoek en ontwikkeling naar het proces vereist: materialen, chemische technologie; inzet van een Hoge Temperatuur nucleaire reactor vereist, of een zonne-energie concentrator
Elektrochemisch	Elektrolyse	Commercieel beschikbaar met een bewezen technologie; Bekend industrieel proces; Zeer pure vorm van waterstof, geschikt voor productie van waterstof uit duurzame bronnen, compenseert voor het variabele aanbod van sommige duurzame bronnen	Concurrerend met direct gebruik van duurzame energie
Biologisch	Biologische productie	Potentiële grootschalige productiemethode	Langzame productie; groot oppervlak nodig; beste organismen nog niet gevonden; onderzoek gaande

Bron: EC, 2003

Het rendement van de verschillende technieken is weergegeven in Tabel 5. De twee meest gebruikte technieken, aardgas reforming en partiële oxidatie hebben beide een rendement van ongeveer 75%, de enige techniek die dit overschrijdt is



elektrolyse. Technieken die in ontwikkeling zijn op basis van lichtenergie zijn veelbelovend wegens het directe gebruik van zonne-energie voor de productie van waterstof.

Tabel 5 Overzicht rendement verschillende productiemethodes

Productietechniek			Rendement
Thermisch	Reforming	Stoom	73% [1]
	Partiele oxidatie		75% [2]
	Vergassing	Biomassa	60% [3]
	Pyrolyse		40-60% [4]
Elektrochemisch	Elektrolyse		80% [5]
	Foto-elektrochemisch		7,8% [5] 50% haalbaar [6]
Biologisch	Fotobiologisch		10% [5] 25 % haalbaar [5]
	Aërobe fermentatie		Niet bekend
	Anaërobe fermentatie		Niet bekend

Bron: [1] Contadini, 2002  
 [2] Aihara, 2001  
 [3] Faaij, 2001  
 [4] Reijers et al., 2001  
 [5] Kruse, 2002  
 [6] Licht et al., 2003

### 3.1.6 CO<sub>2</sub> afvang en opslag

Bij de productie van waterstof uit fossiele grondstoffen komt de aanwezige koolstof voornamelijk in de vorm van CO<sub>2</sub> vrij. In het kader van het Kyoto-protocol is CO<sub>2</sub>-opslag een interessante optie ter reductie van de uitstoot van broeikasgasen naar de atmosfeer. Zoals te zien in Tabel 6 komt bij de productie van waterstof door aardgas reforming zonder CO<sub>2</sub>-afvang momenteel per kg waterstof 2,51 kg koolstof vrij<sup>4</sup>. Voor kolenvergassing ligt dit getal zelfs meer dan twee keer zo hoog op 5,12. Indien CO<sub>2</sub>-afvang wordt toegepast kan - zowel in het huidige als het toekomstige scenario - de CO<sub>2</sub>-uitstoot ongeveer een factor 6 kleiner worden. Uiteraard brengt de afvang van CO<sub>2</sub> extra kosten met zich mee, indien de uitstoot echter wordt belast compenseert dit (gedeeltelijk) deze extra kosten.

Twee opties zijn mogelijk om CO<sub>2</sub> af te vangen bij de productie van waterstof:

- onttrekken van zeer pure CO<sub>2</sub> bij verhoogde druk, wat goed samengaat met het opslaan van CO<sub>2</sub>. Het nadeel hiervan is dat de geproduceerde waterstof minder puur is, en dus minder geschikt voor gebruik in een brandstofcel;
- het onttrekken van zeer pure waterstof, waarbij het residu nog waterstof bevat. Indien dit residu in gewone lucht wordt verbrand komt niet alleen CO<sub>2</sub> vrij, maar tevens een grote fractie stikstof uit de atmosfeer. Doordat de CO<sub>2</sub> vrijkomt in de vorm van een mengsel, is het moeilijker af te vangen in pure vorm dan bij de vorige optie.

<sup>4</sup> De uitstoot van 1 kg koolstof staat gelijk aan ongeveer 3,7 kg CO<sub>2</sub>-emissie.

Tabel 6 Huidige en geschatte toekomstige uitstoot koolstof als CO<sub>2</sub> behorend bij centrale productie van waterstof

Technologiestatus	Technologie	Ratio <sup>5</sup> zonder CO <sub>2</sub> afvang en opslag	Ratio <sup>5</sup> met CO <sub>2</sub> afvang en opslag
Huidig	Aardgasreforming	2,51	0,42
	Kolenvergassing	5,12	0,82
Toekomstig	Aardgasreforming	2,39	0,35
	Kolenvergassing	4,56	0,60

Bron: [NAS, 2004]

Voor de opslag van CO<sub>2</sub> is de aandacht tot nu toe voornamelijk gericht op opslag in geologische lagen diep ondergronds en de diepe oceanen. Geologische lagen ondergronds kunnen bijvoorbeeld lege aardgasvelden zijn. Bij de ondergrondse opslag van CO<sub>2</sub> zijn zaken als draagvlak, omkeerbaarheid voor toekomstige generaties, monitoren en eigendomsrechten van ondergrondse lagen van belang en zullen onderzocht moeten worden voor deze technologie kan worden toegepast [NAS, 2004]. In Nederland zal Gaz de France Nederland een proefproject gaan uitvoeren wat de injectie van CO<sub>2</sub> in de Nederlandse zeebodem omvat. Bij dit proefproject gaat het om de injectie van ongeveer 22.000 ton CO<sub>2</sub> per jaar, samengaand met een uitgebreid meet- en monitoringsprogramma. Dit project wordt gedaan in het kader van het CRUST-project (CO<sub>2</sub> Reuse Through Underground Storage) [MA, 2004].

### 3.1.7 Kosten

Voor een overzicht van de kosten van de productie van waterstof is uitgegaan van een studie van het National Academy of Sciences [NAS, 2004]. In deze studie zijn de kosten van diverse technieken in kaart gebracht, zowel het huidige beeld als een visie voor de toekomst. De cijfers voor de toekomstvisie zijn gebaseerd op mogelijke technologische doorbraken. Deze ontwikkelingen zijn niet voorspeld, ze kunnen voortkomen uit succesvolle onderzoek- en ontwikkelingsprogramma's.

Drie schalen van productie zijn meegenomen, centrale productie, middelgrote productie en gedistribueerde productie. Met gedistribueerde productie wordt geen volledige vorm van decentrale productie bedoeld. Decentrale productie kan namelijk zo ver gaan dat iedere burger thuis zijn eigen waterstof produceert. Zoals te zien in Tabel 7 ondersteund één productie-eenheid bij gedistribueerde productie 800 auto's.

<sup>5</sup> Verhouding van de massa eenheid koolstofuitstoot per massa eenheid waterstof geproduceerd.





Tabel 7 Gegevens per productieschaal

Productieschaal	Capaciteit (kg H <sub>2</sub> /dag)	Aantal voertuigen per productie-unit
Centrale productie	1.200.000	2.000.000
Middelgroot	24.000	40.000
Gedistribueerd	480	800

In de kostenraming is bij vier technieken die vallen onder centrale of middelgrote productie CO<sub>2</sub>-verwijdering als optie meegenomen. De extra kosten die dit met zich meebrengt wegen (deels) op tegen de besparing die in de toekomst kan worden behaald indien voor de uitstoot van CO<sub>2</sub> moet worden betaald (emissiehandel). Afhankelijk van de hoogte van deze kosten kan het voordeliger of minder voordelig uitvallen deze techniek toe te passen. Voor biomassavergassing brengt dit een extra voordeel met zich mee omdat de overall CO<sub>2</sub>-uitstoot negatief kan worden bij CO<sub>2</sub>-verwijdering.

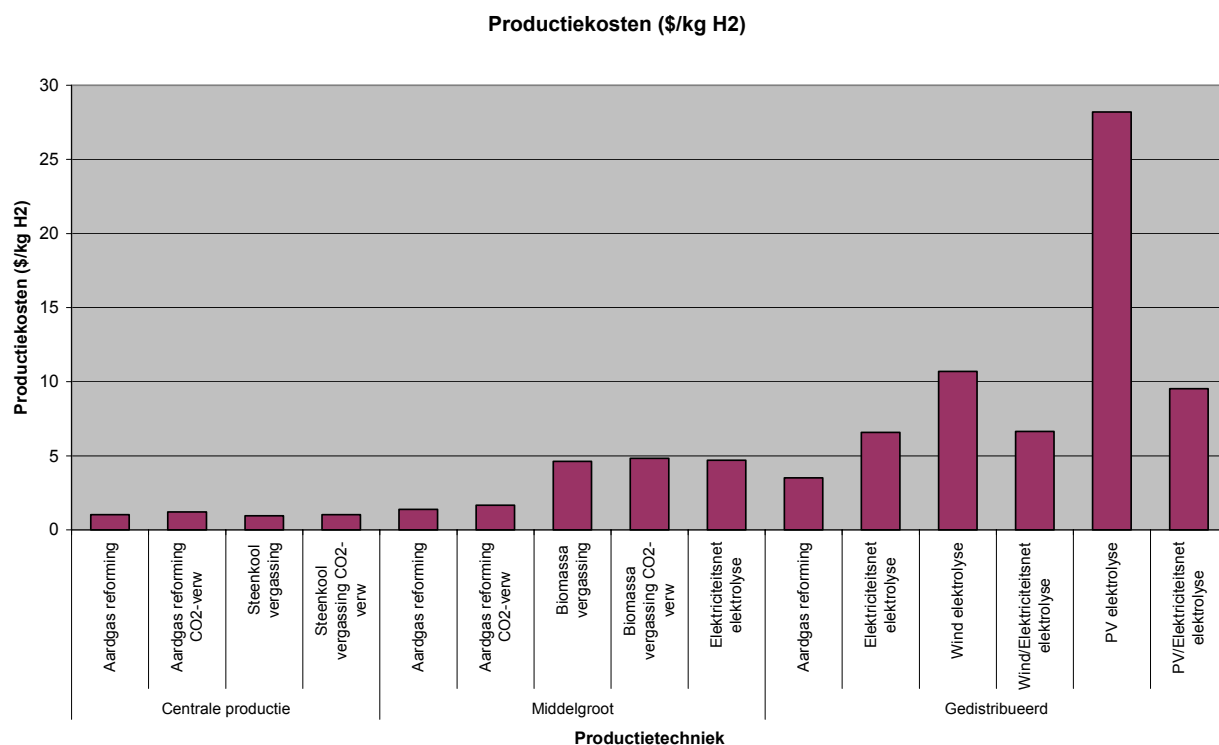
Hierna volgen een aantal figuren die de huidige kosten van productietechnieken weergeven, evenals de geraamde toekomstige kosten.

Tabel 8 Huidige productiekosten waterstof naar techniek en productieschaal

Productieschaal	Grondstof/Energiebron	Techniek	CO <sub>2</sub> -verwijdering	Kapitaal investeringen (Miljoen \$)	Productiekosten (\$/kg H <sub>2</sub> )
Centrale productie	Aardgas	Reforming		1.893,66	1,03
	Aardgas	Reforming	X	2.063,01	1,22
	Steenkool	Vergassing		2.591,18	0,96
	Steenkool	Vergassing	X	2.617,59	1,03
Middelgroot	Aardgas	Reforming		76,95	1,38
	Aardgas	Reforming	X	84,69	1,67
	Biomassa	Vergassing		176,46	4,63
	Biomassa	Vergassing	X	179,33	4,82
	Elektriciteitsnet	Elektrolyse		140,20	4,70
Gedistribueerd	Aardgas	Reforming		1,85	3,51
	Elektriciteitsnet	Elektrolyse		2,54	6,58
	Wind	Elektrolyse		6,86	10,69
	Wind/Elektriciteitsnet	Elektrolyse		2,75	6,64
	PV	Elektrolyse		9,94	28,19
	PV\Elektriciteitsnet	Elektrolyse		2,74	9,52

Bron: NAS, 2004

Figuur 5 Huidige productiekosten waterstof naar techniek en productieschaal



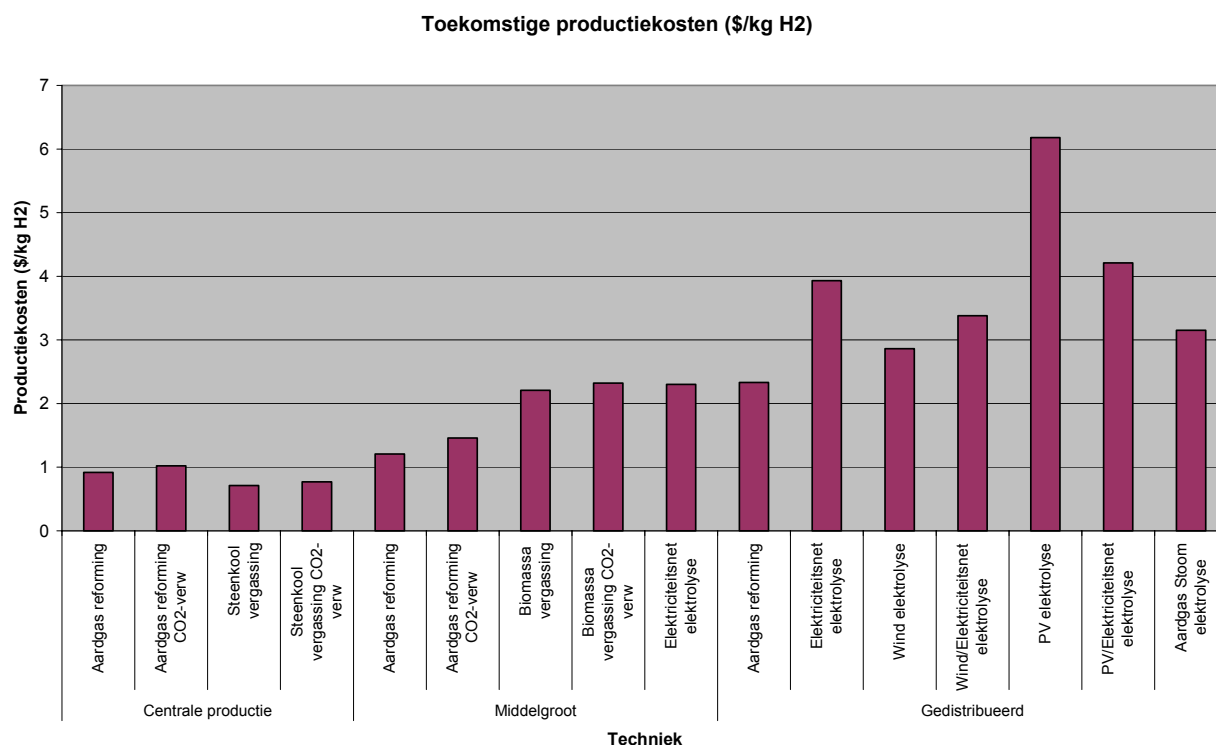
Tabel 9 Toekomstige productiekosten waterstof naar techniek en productieschaal

Productieschaal	Grondstof/ energiebron	Techniek	CO <sub>2</sub> - verwijdering	Kapitaal investeringen (Miljoen \$)	Productie-kosten (\$/kg H <sub>2</sub> )
Centrale productie	Aardgas	Reforming		1.367,35	0,92
	Aardgas	Reforming	X	1.465,95	1,02
	Steenkool	Vergassing		1.908,58	0,71
	Steenkool	Vergassing	X	1.930,38	0,77
Middelgroot	Aardgas	Reforming		44,67	1,21
	Aardgas	Reforming	X	50,61	1,46
	Biomassa	Vergassing		86,59	2,21
	Biomassa	Vergassing	X	88,08	2,32
	Elektriciteitsnet	Elektrolyse		37,26	2,30
Gedistribueerd	Aardgas	Reforming		0,96	2,33
	Elektriciteitsnet	Elektrolyse		0,57	3,93
	Wind	Elektrolyse		0,89	2,86
	Wind/ Elektri-ci-teitsnet	Elektrolyse		0,59	3,38
	PV	Elektrolyse		1,43	6,18
	PV/ Elektriciteitsnet	Elektrolyse		0,59	4,21
	Aardgas	Stoom elektrolyse		1,30	3,15

Bron: NAS, 2004



Figuur 6 Toekomst productiekosten waterstof naar techniek en productieschaal



Momenteel wordt 96% van alle waterstof geproduceerd met fossiele brandstoffen als grondstof. De twee belangrijkste technieken hiervoor zijn aardgas reforming en de vergassing van steenkool. Deze technieken zullen in de toekomst geen significante kostenreductie meer meemaken, maar blijven desalniettemin voorlopig de goedkoopste vorm van waterstofproductie. Ook elektrolyse van water is een commerciële techniek voor de productie van waterstof, welke echter wel toekomstige kostenreducties tegemoet ziet. Zowel de kosten van elektriciteit als de kosten van het apparaat voor elektrolyse kunnen dalen en derhalve de commerciële positie van de techniek versterken. Volgens schattingen blijft de duurzame productiemethode wind elektrolyse in de toekomst meer dan drie keer zo duur als aardgas reforming. Biomassavergassing is de duurzame techniek die qua kosten aardgas reforming en steenkool vergassing het dichtst nadert. Overige technieken vereisen significante technologische doorbraken om concurrerend te worden met aardgas reforming en steenkool vergassing [NAS, 2004].

Uitgaande van de gegevens van het NAS zijn indien de totale Nederlandse personenautovloot van 2003 op waterstof zou gaan rijden de volgende grondstoffen benodigd (zie: Bijlage B).

#### *Aardgas reforming*

90 MW vermogen

$4,35 \cdot 10^9$  m<sup>3</sup> aardgas per jaar

In 2003 is  $69 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  aardgas gewonnen in Nederland [CBS, 2004] wat zou betekenen dat het aardgasgebruik met ongeveer 6% zou stijgen indien alle auto's in Nederland op waterstof geproduceerd uit aardgas zouden gaan rijden.

#### *Elektrolyse op basis van windenergie*

4 miljoen liter water per uur

100.000 windmolens à 1 MW

Eind 2003 was een totaal vermogen van 910 MW op het Nederlandse elektriciteitsnet aangesloten [Vries, 2004]. Voor de totale elektriciteitsvraag voor de productie van waterstof voor de Nederlandse personenauto vloot zou het totale geïnstalleerde vermogen aan windmolens met een factor honderd moeten toenemen. Gezien recente ontwikkelingen van het vermogen van windmolens betekent dit niet dat het aantal windmolens met een factor honderd moet toenemen. In de berekening is uitgegaan van molens van 1 MW omdat dit momenteel een gangbare maat is, maar proefmodellen hebben de 3 MW al overschreden.

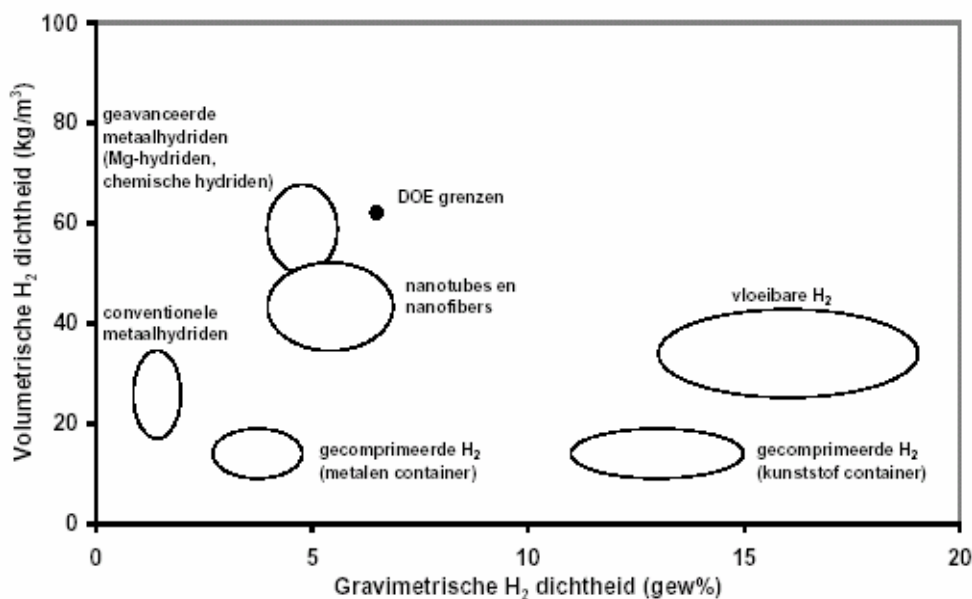
### **3.2 Opslag**

Een groot struikelblok voor het gebruik van waterstof in transporttoepassingen is de opslag. Omdat waterstof een relatief kleine energiedichtheid per volume-eenheid heeft is de uitdaging zoveel mogelijk waterstof op te slaan in een tank die geschikt is voor transporttoepassingen. Dit betekent dat het opslagmedium licht, compact, betrouwbaar en veilig dient te zijn. De uiteindelijke hoeveelheid waterstof staat namelijk direct in verband met de actieradius van het voertuig. Momenteel wordt waterstof voornamelijk opgeslagen in druktanks, in dit hoofdstuk zullen deze en andere potentiële technieken worden behandeld voor de opslag van waterstof voor transporttoepassingen.

Waterstof heeft als kenmerk een hoge energie dichtheid te hebben op basis van gewicht. Het is echter onder normale omstandigheden een gas, waardoor de energiedichtheid per volume-eenheid relatief laag is. Dit betekent dat het opslaan van waterstof een grotere uitdaging met zich meebrengt dan de opslag van vloeibare energiedragers.

Het United States Department of Energy (DOE) heeft doelstellingen gesteld voor de volumetrische en gravimetrische dichtheid van het opslagmedium van een personenauto met brandstofcel om een bereik te hebben van 500 km: 6,5 vol%  $\text{H}_2$  en  $62 \text{ kg H}_2/\text{m}^3$ . Volumetrische dichtheid is de hoeveelheid waterstof per volume-eenheid en gravimetrische dichtheid is de hoeveelheid energie per kilogram systeemgewicht. Figuur 7 geeft een overzicht van de volumetrische en gravimetrische dichtheid van opslagmedia.

Figuur 7 Volumetrische vs. gravimetrische H<sub>2</sub> dichtheid (met inbegrip van taak- en randapparatuur)



Bron: Reijers, 2001

Buiten de DOE-doelstellingen met betrekking tot energiedichtheid van de opslag van waterstof zijn de kosten, de vultijd en warmte management om aan de vermogensvraag te voldoen tijdens het rijden belangrijke aandachtspunten. Deze factoren bepalen in hoeverre voertuigen op waterstof vergelijkbare eigenschappen hebben als de huidige voertuigen.

Naast de opslag van waterstof voor transporttoepassingen is stationaire opslag van waterstof nodig bij het produceren van waterstof indien het niet meteen kan worden gebruikt/gedistribueerd. Bij deze vorm van opslag zijn minder struikelblokken, een grotere hoeveelheid waterstof kan namelijk worden opgeslagen bij het ontbreken van volumebeperkingen. Buiten de onderstaande technieken is opslag in ondergrondse spelonken een optie voor stationaire opslag, wat reeds in gebruik is in Duitsland, Frankrijk en Engeland [Padró et al., 1999].

### 3.2.1 Waterstof onder druk

Waterstof onder druk wordt opgeslagen in stalen cilinders of cilinders die bestaan uit composiet materialen. Traditionele stalen tanks gevuld met waterstof hebben een gravimetrische dichtheid van iets meer dan 1%. Nieuwere cilinders zijn gemaakt van aluminium dat is gewikkeld in koolstof vezels, welke onder een druk van 24,8 MPa een gravimetrische dichtheid van 2% kennen. De laatste ontwikkelingen op het gebied van composiet materialen voor opslagtanks heeft geresulteerd in een tank met een gravimetrische dichtheid van 12% bij een druk van 70 MPa. De energie om waterstof onder een druk van 34,5 MPa te brengen is 4 tot 8% van het energiegehalte van waterstof [NAS, 2004].

### 3.2.2 Vloeibaar waterstof.

Waterstof kan in vloeibare vorm worden opgeslagen bij een temperatuur van -253 graden Celsius en een druk van 0,1 MPa in goed geïsoleerde tanks. Bij een hogere temperatuur en dezelfde druk is waterstof een gas. Om waterstof te koelen tot deze temperatuur is ongeveer 30% van de energie aanwezig in de energiedrager nodig. Vloeibaar waterstof bevat drie keer zoveel energie per liter als conventionele benzine. Dit type opslag wordt voornamelijk gebruikt in de ruimtevaart wegens de goede karakteristieken voor dit type gebruik [Kruse et al. 2002]. Een groot probleem van opslag in vloeibare vorm is de zogenaamde 'boil-off'. Dit is het gedeelte van de opgeslagen waterstof dat door onvermijdelijke opwarming van de tank verdampt. Indien de druk in de tank een bepaalde grens overschrijdt dient een gedeelte van de waterstof in gasvorm te ontsnappen. Voor personen die frequent autorijden is dit geen probleem, de waterstof in gasvorm kan worden gebruikt om op te rijden en zal de drukgrens derhalve niet overschrijden. Indien de auto echter een langere tijd stilstaat, gaat dit probleem een rol spelen [GM, 2004]. BMW heeft een proefmodel geproduceerd - de BMW 750 hL - waarin waterstof is opgeslagen in vloeibare vorm, wat ook wordt gebruikt in de HydroGen3, een experimenteel voertuig van General Motors, zie paragraaf 5.4.1 [BMW, 2004].

### 3.2.3 Waterstofopslag in gebonden vorm.

De volgende types materialen zijn geschikt om waterstof in gebonden vorm op te slaan:

- metaal hydriden;
- chemische hydriden;
- koolstof nanostructuren.

In **metaal hydriden** vind absorptie in de metaalstructuur plaats. Bij het vullen van de tank komt warmte vrij. Voor het legen van de tank is warmtetoevoer nodig, waarvoor eventueel opgeslagen warmte die is vrijgekomen bij het vullen van de tank kan worden gebruikt. Hoge-temperatuur metaal hydriden hebben een hoge desorptietemperatuur<sup>6</sup> (150°-300°C). Deze systemen kunnen hoge volumetrische dichtheden bereiken (hoger dan vloeibaar opgeslagen waterstof), echter de gravimetrische dichtheid is laag. Indien dit systeem wordt ingepast in een auto zal zowel de gravimetrische- als de volumetrische dichtheid worden gereduceerd met 15 tot 20% wegens benodigde randapparatuur voor het vullen en legen van de tank. Naast de hoge-temperatuur hydriden zijn er lage-temperatuur hydriden. Deze hydriden hebben een desorptietemperatuur van 20°-90°C maar hebben een lage gravimetrische dichtheid en vereisen veel ruimte of zijn zwaar. Onderzoek richt zich momenteel op een metaal hydride opslag met opslageigenschappen die potentie hebben voor transporttoepassingen en een lage werktemperatuur.

Ten tweede zijn er de **chemische hydriden**, waarin d.m.v. hydrolyse waterstof wordt opgeslagen. Voorbeelden van hydrides die hiervoor geschikt zijn; LiH,

---

<sup>6</sup> Desorptietemperatuur is de temperatuur waarbij waterstof vrijkomt uit het opslagmedium.



$\text{LiBH}_4$  en  $\text{NaBH}_4$ . Chemische opslagmediums van waterstof zijn niet hervulbaar en vereisen dus een goede verwerking van de gebruikte materialen. Dit zou kunnen gebeuren bij een centraal verwerkingspunt of door opslag in het systeem zelf. In theorie kunnen deze systemen een gravimetrische dichtheid van 5 tot 8,5% halen.

Als laatste optie zijn er **koolstof nanoverbindingen** voor de opslag van waterstof in gebonden vorm. Door het grote specifieke oppervlak van koolstofstructuren zijn deze structuren in staat relatief grote hoeveelheden waterstof te adsorberen. Nanofibres en nanotubes zijn twee soorten nanoverbindingen welke poriën hebben met een diameter van ongeveer één nanometer. Nanotubes hebben buisvormige poriën en nanofibres spleetvormige poriën. Beide methodes zijn nog in de fase van ontwerp en ontwikkeling, maar bieden mogelijkheden tot commercialisering op de lange termijn. De voornaamste barrière van nanotubes zijn de productiekosten. Ook de productie van nanofibers brengt hoge productiekosten met zich mee, maar ook de reproduceerbaarheid van gemeten waterstofopnamen is een struikelblok. Sommige studies wijzen uit een gravimetrische dichtheid van 10% en meer te hebben gehaald met behulp van koolstof nanoverbindingen, terwijl andere studies meer tegenvallende resultaten uitwijzen [Zhou et al. 2003].

### 3.2.4 Afweging opslagmethodes

Tabel 10 geeft een overzicht van de verschillende opslagmethodes en hun voor- en nadelen. Opslag onder druk en vloeibare opslag zijn momenteel de methodes die direct toepasbaar zijn, maar hebben beide nadelen die onderzoek naar andere methodes stimuleren. Op de korte termijn zullen andere opslagmethodes niet worden ingezet, maar gezien de termijn waarop waterstof voor transporttoepassingen inzetbaar wordt hebben deze methodes de potentie een commerciële status te bereiken.

Tabel 10 Kansen en knelpunten opslagmethodes

Opslagmethode	Kansen	Knelpunten
Opslag onder druk	Bewezen technologie tot een druk van 200 bar; algemeen toegepast; kan tegen lage kosten	Kleine hoeveelheden waterstof bij 200 bar; bij hoge druk vergelijkbaar met vloeibare opslag, maar nog lager dan benzine en diesel; hoge druk opslag nog in ontwikkeling
Vloeibare opslag	Bewezen technologie; goede opslagcapaciteit haalbaar	Zeer lage temperaturen vereisen zeer goede isolatie; mogelijk hoge kosten; boil-off; energieverlies bij vloeibaar maken waterstof; opslagcapaciteit lager dan benzine en diesel
Metaal hydriden	Enige technologie beschikbaar; opslag in vaste vorm; vorm aan te passen; thermische effecten kunnen in andere systemen gebruikt worden; zeer veilig	Zwaar; kunnen verwerken; momenteel duur; vullen vereist een koelsysteem
Chemische hydriden	Algemeen bekende omkeerbare hydride formatie reactie; compact	Knelpunten in de verwerking van afvalmateriaal en de vereiste infrastructuur
Koolstof nanostructuren	Potentieel grote opslagcapaciteit; licht; mogelijk lage kosten	In ontwikkeling; eerdere verwachtingen blijven onvervuld

Bron: EC, 2003

### 3.2.5 Kosten

Voor de kostenvergelijking van Padró et al. (1999) zijn technieken waarvan niet wordt verwacht dat ze binnen 20 jaar een commerciële status bereiken niet meegenomen. In Tabel 11 is te zien dat de opslag van vloeibaar waterstof de minste kosten met zich meebrengt per GJ opgeslagen waterstof. Dit komt door de hoge energiedichtheid van vloeibaar waterstof. Deze kosten zijn echter exclusief de kosten voor het vloeibaar maken van waterstof.

Tabel 11 Kosten verschillende opslagmethodes

Opslagmethode	Kosten opslagmedium (\$/GJ)
Waterstof onder druk	5.100
Vloeibaar waterstof	1.280 – 2.550
Metaal hydride	4.200 – 7.020
Chemische hydrides	Niet bekend
Koolstof nanostructuren	Niet bekend

Bron: Padró et al, 1999





### 3.3 Transport en distributie

Het transport van waterstof is niet van toepassing indien waterstof bij de eindgebruikers wordt geproduceerd. Alle andere vormen van waterstof productie vereisen een vorm van transport naar de eindgebruiker. Voor de fase waarin en de transportwijze waarop waterstof wordt getransporteerd is de toepassing van groot belang. Indien waterstof bijvoorbeeld in gasvorm gebruikt wordt voor de toepassing is het inefficiënt waterstof vloeibaar te maken voor transport om het daarna weer om te zetten in een gas. Voor het transport van waterstof zijn 8 mogelijkheden beschikbaar, zoals weergegeven in Tabel 12.

Tabel 12 Hoeveelheden te transporteren waterstof per lading (kg)

	Vrachtwagen	Treinwagon	Schip	Pijpleiding
Gas	180	454	n.v.t.	Continue
Vloeibaar	4.080	9.090	45.000	n.v.t.
Gebonden	454	910	n.v.t.	n.v.t.

Bron: Reijers, 2001

Zoals te zien in bovenstaande tabel is transport van waterstof per schip alleen mogelijk in vloeibare vorm en door een pijpleiding alleen in gasvorm. Ook blijkt dat een vrachtwagen meer dan 22 keer zoveel waterstof in vloeibare vorm kan vervoeren dan in gasvorm. De voor- en nadelen van transport van waterstof in een bepaalde fase komen voor een groot deel overeen met die van de opslag van waterstof (zie paragraaf 3.2). Voor het transport zal waterstof ook moeten worden opgeslagen, waarbij het grootste verschil de opslagschaal is.

Tabel 13 Meest kosten efficiënte methodes op basis van productiesnelheid en afstand

	Productiesnelheid →	
← Afstand	Gas Vrachtwagen Vloeibaar Vrachtwagen Gebonden Vrachtwagen	Gas Pijpleiding Vloeibaar Vrachtwagen
	Vloeibaar Vrachtwagen Vloeibaar Trein	Gas Pijpleiding

Bron: Reijers, 2001

Indien waterstof door een centrale wordt geproduceerd en geleverd aan tankstations is de meest kostenefficiënte methode van transport naar het tankstation afhankelijk van de afstand en de hoeveelheid waterstof die getransporteerd dient te worden. Bij een productiecentrale met bijvoorbeeld een hoge productiesnelheid is een pijpleiding onafhankelijk van de afstand de beste optie, zoals te zien in Tabel 13. Kleinere afstanden resulteren in het concurrerend worden van vloeibaar

transport met een truck. Dit wordt veroorzaakt door de kosten die een truck met zich meebrengt (chauffeur, file, onderhoud).

Huidige pijpleidingen voor waterstof hebben een diameter van 25 tot 30 cm en variëren in druk van 10 tot 30 bar. Leidingen voor waterstof liggen momenteel alleen in industriegebieden, zoals het Ruhr-gebied in Duitsland en de haven van Rotterdam. Voor deze leidingen liggen de investeringskosten hoog en de transportkosten (op druk brengen en houden) laag [Reijers, 2001].

Mogelijkheden om waterstof door het bestaande aardgasnet te transporteren zijn plausibel. Hieruit blijkt dat waterstof door het bestaande aardgasnet kan worden getransporteerd met geringe aanpassingen. Doordat in Nederland een fijnmazig aardgasnet aanwezig is dit een reële optie [Reijers, 2001]. Een uitgebreide studie op dit gebied die momenteel uitgevoerd wordt is de VG2-studie, over de vergroening van gas [VG2, 2004].

### 3.3.1 Kosten

Bij de kostenberekening van het transport van waterstof is het National Academy of Sciences ervan uitgegaan dat de distributie van waterstof bij centrale productie via pijpleidingen geschiedt en middelgrote productie distributie van waterstof in vloeibare vorm door vrachtauto's [NAS, 2004]. De kosten van distributie van waterstof per kilogram getransporteerde waterstof zijn afhankelijk van de afstand waarover het transport plaatsvindt, de intensiviteit van het gebruik van het transportmedium en de kapitaal investeringen. De onderstaande opgave is dan ook gebaseerd op aannames en zal veranderen indien de genoemde variabelen veranderen.

Tabel 14 Distributie- en uitgiftekosten waterstof

	Productieschaal		Kosten (\$/kg H <sub>2</sub> )	Kosten als % van totale kosten waterstof
Distributiekosten	Centraal	Huidig	0,42	19
		Toekomst	0,31	19
	Middelgroot	Huidig	1,80	24-45
		Toekomst	1,10	28-40
Uitgiftekosten	Centraal	Huidig	0,54	24
		Toekomst	0,39	24
	Middelgroot	Huidig	0,62	8-16
		Toekomst	0,30	9

Uit de kostenraming in Tabel 14 blijkt dat bij centrale productie de distributie- en uitgiftekosten in dezelfde orde van grootte liggen als de productiekosten, zowel in het huidige beeld als in de toekomst. Bij middelgrote productie verschilt dit per techniek, maar zal in de toekomst voor alle technieken ook in die richting verschuiven.

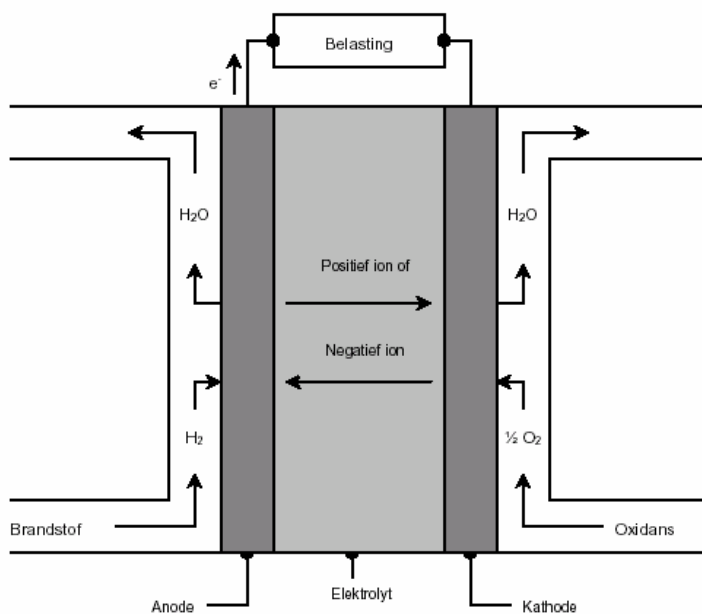
### 3.4 Conversie

Voor transporttoepassingen van waterstof is de brandstofcel de meest veelbelovende techniek om waterstof om te zetten in energie. Indien puur waterstof als energiebron voor de brandstofcel wordt gebruikt komt alleen waterdamp als eindproduct vrij. Om voldoende vermogen te kunnen genereren voor transporttoepassingen kunnen brandstofcellen aan elkaar gekoppeld worden in zogenaamde 'Stacks'. Waterstof kan echter ook als brandstof dienen in verbrandingsmotoren.

#### 3.4.1 Brandstofcellen

Een brandstofcel zet chemische energie van een reactie direct om in elektrische energie en warmte. De brandstofcel is uitgevonden door William Grove of Swansea in 1839. De basisopbouw bestaat uit een elektrolyt die aan één zijde in contact staat met een poreuze kathode en aan de andere zijde met een poreuze anode. Een schematische weergave van een brandstofcel en de stroomrichtingen van de reactiegassen en elektronen is te zien in Figuur 8.

Figuur 8 Principeschema van de werking van de brandstofcel



Bron: AMPERE, 2000

Tabel 15 geeft een overzicht van verschillende brandstofcellen. De naam van brandstofcellen is afgeleid van het elektrolyt. Het verschil tussen een brandstofcel en een verbrandingsmotor is dat de brandstofcel werkt d.m.v. een elektrochemische reactie en een verbrandingsmotor door verbranding. Het rendement van brandstofcellen wordt niet gelimiteerd door de Carnot-vergelijking, maar wordt grotendeels beperkt door weerstandsverliezen. Theoretisch kan de brandstofcel een rendement behalen van 83% [Kruse et al. 2002]. De emissies van een brandstofcel worden bepaald door de energiedrager die de cel voedt. Indien

puur waterstof wordt gebruikt zal alleen water vrijkomen. Bij gebruik van de DMFC is de energiedrager methanol, en komt CO<sub>2</sub> vrij.

Tabel 15 Eigenschappen brandstofcellen

	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Naam	Alkaline Fuel Cell (FC)	Proton Exchange Membrane FC	Direct Methanol FC	Phosphoric Acid FC	Molten Carbonate FC	Solid Oxide FC
Elektrolyt	Kaliumhydroxide	Polymeer	Polymeer	Geïmmobiliseerd Forforzuur	Geïmmobiliseerd gesmolten alkalicarbonaten	Keramisch
T (°C)	65 - 220	40 - 80	60 - 130	200	600 - 700	600 - 1000
Opstarttijd	Enkele minuten	Enkele minuten	Enkele minuten	4 uur	10 uur	10 - 14 uur
Ladingsdrager	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>=</sup>	O <sup>=</sup>
Celrendement (%)	60 - 70	50 - 68	20 - 30	55	65	60 - 65
Toepassingen	Ruimtevaart Transport	Transport CHP <sup>7</sup> Draagbaar Elektriciteitscentrale	Draagbaar Transport	CHP Elektriciteitscentrale	CHP Elektriciteitscentrale	CHP Elektriciteitscentrale

Zoals te zien in bovenstaande tabel zijn de PAFC, MCFC en SOFC door hun lange opstarttijd niet geschikt voor transporttoepassingen. Deze opstarttijd is nodig om de brandstofcel op werkteemperatuur te brengen, die bij deze types relatief hoog ligt. Bij de toepassingsvorm CHP kan gedacht worden aan huishoudens die zowel warmte als stroom gebruiken.

De AFC is gebruikt voor de energievoorziening aan boord van de Apollo vluchten van de NASA (National Aeronautics and Space Administration). Momenteel worden ze door de NASA ingezet aan boord van spaceshuttles. Een voordeel van deze brandstofcel is het gebruik van een relatief goedkope katalysator. Vanwege de lage CO<sub>2</sub>-tolerantie kan geen buitenlucht worden gebruikt voor de aanvoer van zuurstof als oxidans in dit type brandstofcel.

De PEMFC wordt op het moment gezien als meest geschikte brandstofcel voor transporttoepassingen, waarvoor drie redenen zijn. Ten eerste heeft hij een korte opstarttijd door de relatief lage werkteemperatuur. Ten tweede heeft de cel een laag gewicht en is robuust. Als laatste zijn de hoge vermogensdichtheid en de mogelijkheid de levering van dit vermogen snel aan te passen aan het gewenste niveau een voordeel. Het gebruik van het relatief dure platina in de cel als katalysator brengt echter nadelen op het gebied van kosten en CO-tolerantie met zich

<sup>7</sup> Combined Heat and Power.



mee. Bij het gebruik van een reformer<sup>8</sup> blijft CO aanwezig in de energiedrager, wat verdere CO-reductie vereist.

De laatste brandstofcel die in aanmerking komt voor transporttoepassingen is de DMFC. Het verschil met de hiervoor genoemde brandstofcellen is dat dit type methanol als energiedrager gebruikt. Het nadeel van methanol is de hoeveelheid CO<sub>2</sub> die wordt uitgestoten bij gebruik in de DMFC en dat methanol giftig is.

Op het moment wordt veel onderzoek gedaan naar de regeneratieve brandstofcel. Het principe van deze brandstofcel is in een gesloten kringloop waterstof te produceren en om te zetten in elektriciteit, waarmee het systeemrendement van brandstofcellen kan worden verhoogd. Dit resulteert in de overbodigheid van een afzonderlijk elektrolyse apparaat en brandstofcel. Momenteel is het struikelblok dat het rendement van de katalysatoren voor de toepassing van deze technologie niet even hoog zijn als die van de afzonderlijke elementen.

### 3.4.2 Verbrandingsmotor

Waterstof kan tevens als brandstof dienen in de conventionele verbrandingsmotor. De meeste bestaande benzinemotoren kunnen tot 15% waterstof bijgemengd in de brandstof verdragen zonder aangepast te hoeven worden. Voertuigen met een specifieke waterstof verbrandingsmotor hebben een 20% hoger rendement dan de conventionele verbrandingsmotor op benzine [Maddy, 2003]. Opgemerkt moet worden dat bij verbranding van waterstof NO<sub>x</sub> vrijkomt, wat een extra milieubelasting met zich meebrengt ten opzichte van de brandstofcel.

### 3.4.3 Kosten

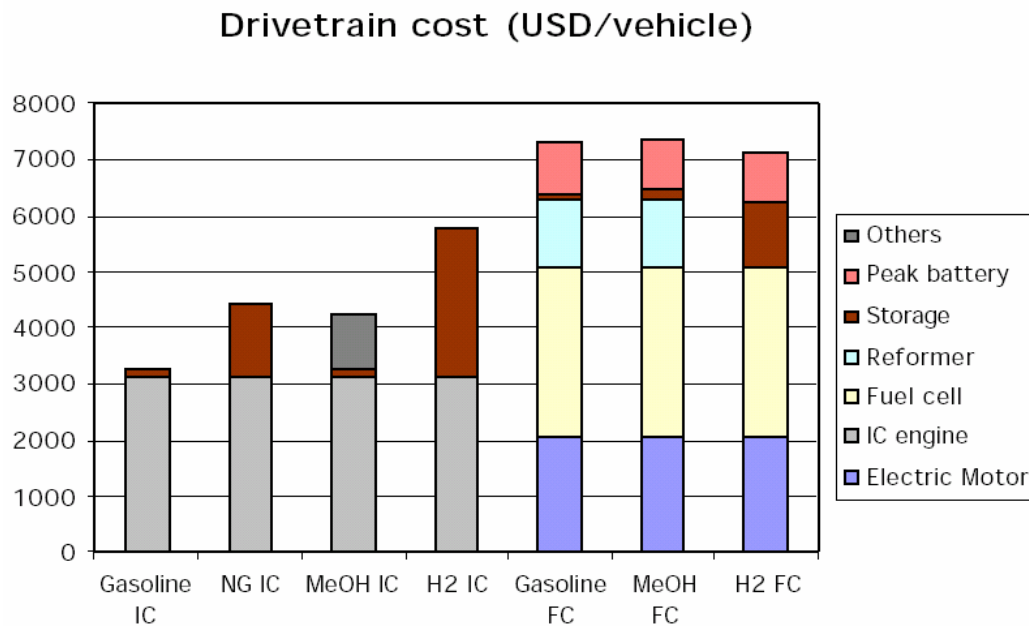
De kosten van een brandstofcel inclusief de opslag van waterstof aan boord zal niet meer dan 100 \$ per kW mogen bedragen voordat brandstofcellen commercieel aantrekkelijk worden. Het meest optimistische scenario voorziet het bereiken van 100\$/kW in 2010 [NAS, 2004].

Momenteel is elektriciteit van brandstofcellen niet commercieel rendabel, de investeringskosten bedragen ongeveer 3000 \$/kW [Azar et al., 2004]. In Azar et al. [2004] en Thomas et al. [1998] is een vergelijking opgenomen van de verwachte kosten van verschillende aandrijfmethodes bij massaproductie. Beide vergelijkingen gaan uit van een PEMFC als aandrijfmechanisme, maar verschillende aannames worden gedaan met betrekking tot de kosten per kW vermogen van de brandstofcel. Azar gaat uit van 60 \$/kW en Thomas et al. van 50 \$/kW. Een gedetailleerde studie wijst zelfs uit dat 20 \$/kW haalbaar is bij massaproductie [Azar et al, 2004].

---

<sup>8</sup> Een reformer is een apparaat dat andere energiedragers (bijvoorbeeld aardgas) omzet in waterstof.

Figuur 9 Vergelijking kosten aandrijfmechanisme bij massaproductie



Bron: Azar et al., 2004

Uit Figuur 9 blijkt dat het verschil tussen een conventionele auto en een brandstofcel auto niet zozeer voortkomt uit de kosten van de brandstofcel, maar uit de kosten van het gehele systeem. Het brandstofcel systeem is ongeveer 4.000 \$ duurder dan het systeem van de verbrandingsmotor. Indien de kosten van de brandstofcel echter worden teruggebracht naar 20 \$/kW is dit systeem concurrerend met de verbrandingsmotor. Bij bovenstaande figuur moet opgemerkt worden dat in twee van de drie brandstofcelsystemen een reformer aanwezig is, namelijk de Gasoline FC en de MeOH FC. Met MeOH worden systemen bedoeld die methanol als energiedrager gebruiken.

De studie van Thomas heeft als uiteindelijke kosten voor het brandstofcel systeem 4.655 \$, wat wordt veroorzaakt door verschillende kostenramingen voor de brandstofcel en de elektromotor. Hier is het verschil tussen het verbrandingsmotor systeem en het brandstofcelsysteem teruggelopen tot ongeveer 2.000 \$, zoals te zien in Tabel 16.



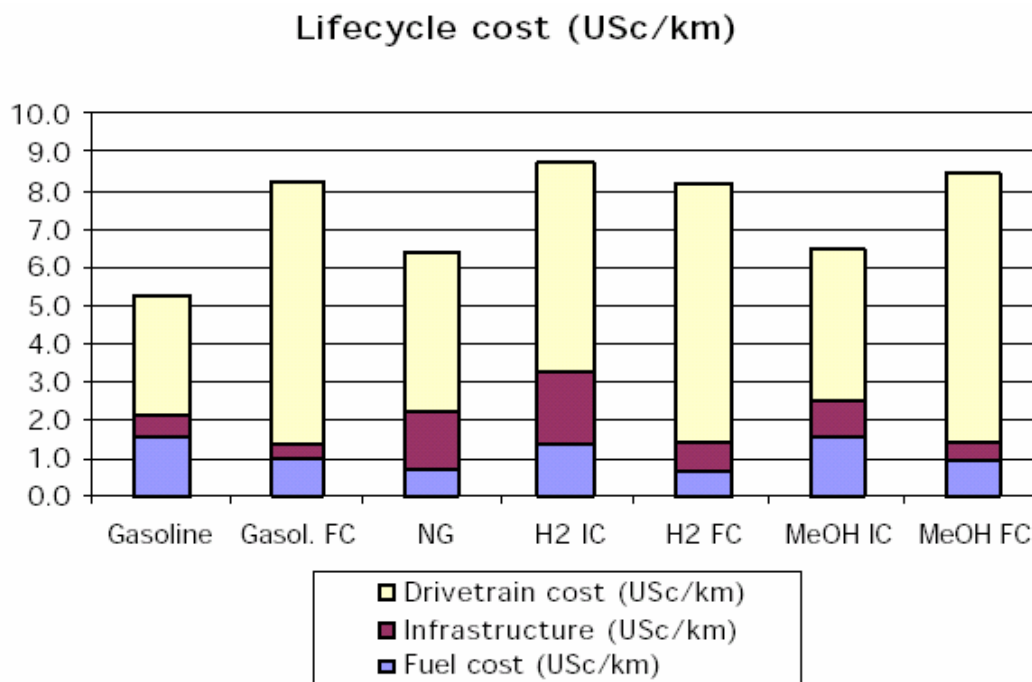
Tabel 16 Kostenvergelijking aandrijfsysteem verbrandingsmotor en brandstofcel

	Verbrandingsmotor		Waterstof brandstofcelsysteem	
	Vermogen (kW)	Kosten (\$)	Vermogen (kW)	Kosten (\$)
Brandstofcelsysteem			38,1	1.911
Verbrandingsmotor + toebeho- ren	100	1.600		
Transmissie		700		200
Tank		176	4,71 kg	760
Motor/controller		-	82	906
Batterij systeem		-	40,3	728
Regulateur		-		150
<b>Totale kosten aandrijving</b>		<b>2.476</b>		<b>4.655</b>
Toegevoegde kosten				2.179

Bron: Thomas et al., 1998

Buiten de kosten van het aandrijfsysteem gaat Azar nog in op de kosten per gereden kilometer per aandrijfsysteem. In deze tabel is er vanuit gegaan dat waterstof en methanol worden geproduceerd uit aardgas.

Figuur 10 Vergelijking kosten per gereden kilometer verschillende aandrijfmechanismen



Bron: Azar et al., 2004

In bovenstaande figuur is te zien dat het verschil in kosten per kilometer tussen brandstofcel en verbrandingsmotoren voornamelijk wordt veroorzaakt door het verschil in kosten voor het aandrijfmechanisme. De kosten per kilometer van een waterstof brandstofcelauto liggen ongeveer 50% hoger dan die van een benzine auto.





## 4 Beleidsmatige aspecten

Zowel in de Europese Unie als de Verenigde Staten wordt waterstof in beleidsstukken genoemd als mogelijke toekomstige energiedrager voor transporttoepassingen. In beide landen zijn werkplannen opgesteld die de transitie naar een waterstofeconomie weergeven.

De aanleiding voor beleid op het gebied van waterstof als energiedrager komt neer op twee algemene punten:

- terugdringen emissies milieubelastende stoffen (regionaal en mondiaal);
- onafhankelijkheid van de eigen energievoorziening.

Een veel genoemd argument voor waterstof is de eindigheid van de huidige voorraad fossiele brandstoffen. Aangezien dit een discutabel punt is, is het niet opgenomen als aanleiding voor beleid.

### 4.1 Algemeen

De invoering van een nieuwe technologie gaat gepaard met het doorlopen van verschillende fases. Elk van deze fases binnen de productlevenscyclus vereist een ander instrumentarium vanuit de overheid. Het doel van zo een instrumentarium is creëren van ruimte voor de technologie die het meest geschikt is de beleidsdoelstellingen te realiseren. Vanuit de verschillende ontwikkelingsfases gezien is dus een specifiek instrumentarium vereist, maar het is wenselijk dit instrumentarium generiek te hanteren voor verschillende technologieën. Het huidige beleid zal in de komende paragrafen worden besproken.

Momenteel bevindt de ontwikkeling van waterstof voor transporttoepassingen zich in de onderzoek en ontwikkeling fase. Hierbij vindt vooral stimulering van onderzoeks- en demonstratieprojecten plaats door het verlenen van subsidies. Mogelijke beleidsinstrumenten die op termijn duurzame energiedragers voor vervoer stimuleren zijn emissiehandel en regulerende energiebelasting (belasting op energiegebruik). Bij een transitie naar waterstof spelen voornamelijk lange termijn doelstellingen een belangrijke rol vanwege de termijn waarop wordt verwacht dat waterstof een commerciële rol zal gaan spelen in transporttoepassingen.

### 4.2 Nationaal

Op nationaal niveau gezien hebben wordt waterstof als energiedrager in beleidsstukken van twee ministeries genoemd, te weten het Ministerie van Economische Zaken (EZ) en het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu (VROM). Beide ministeries richten zich voornamelijk op het gebruik van waterstof als energiedrager voor transporttoepassingen op de lange termijn. In het Nederlandse beleid zijn echter nog geen concrete doelstellingen opgenomen op het gebied van de invoering van waterstof.

In het Nationaal Milieubeleidsplan 4 (NMP4) zijn vier transities opgenomen, die elk worden gecoördineerd door een ander ministerie [NMP4, 2001]. Met transities worden structurele maatschappelijke veranderingen bedoeld die bijdragen aan duurzame ontwikkeling. De vier transities en transitiepaden op het gebied van waterstof zijn te zien in Tabel 17. Het Ministerie van VROM is het overkoepelende ministerie en heeft een coördinerende rol binnen de vier transities.

Tabel 17 Overzicht Transities

	Ministerie	Transitie		
Ministerie van VROM	EZ	Duurzame energiehuishouding	A. Nieuw gas	A3. Nieuw gas voor de mobiliteitsmarkt
				A4. Productie van gasvormige energiedragers
				A5. Waterstof
			B. R3. Duurzaam Rijk	B1. Waterstof-energiehuishouding
			C. Biomassa	C9. Waterstof uit biomassa
			D. Met energie naar duurzaam produceren	
	Buitenlandse Zaken	Duurzaam gebruik van biodiversiteit- en natuurlijke hulpbronnen		
	Landbouw en Visserij	Duurzame landbouw		
	Verkeer en Waterstaat	Duurzame mobiliteit		

De voornaamste aanleiding voor de transitie naar een duurzame energiehuishouding - zoals beschreven in het NMP4 - is emissiereductie. In het NMP4 worden drie mogelijke eindbeelden geschetst van de transitie voor 2030. Allereerst is er het Status Quo eindbeeld, waarbij de huidige energie-infrastructuur intact blijft, maar de finale energiedragers worden gemaakt uit duurzame bronnen. Het tweede eindbeeld is dat van Nederland Waterstofland, waarbinnen een groot-schalige conversie plaatsvindt van Nederland aardgasland naar Nederland waterstofland. De derde en laatste visie is die van Nederland elektriciteitland. Hierin komt waterstof voor als energiedrager voor transportdoeleinden.

Binnen het beleid zijn een aantal belemmerende factoren voor de introductie van waterstof geïdentificeerd, kosten van de brandstofcel, kosten van een waterstof-infrastructuur en veiligheid. Om deze barrières weg te nemen is onderzoek nodig en het uitvoeren van demonstratieprojecten.

In het nationale milieubeleid van 2002-2006 worden geen concrete maatregelen genoemd die dienen te worden genomen op het gebied van waterstof. Wel wordt waterstof als mogelijke 'nieuwe gasdienst' genoemd binnen de transitie naar een duurzame energiehuishouding. Door het uitblijven van ICES-gelden<sup>9</sup> is echter





<sup>9</sup> ICES-gelden zijn opbrengsten die voornamelijk voortkomen uit de verkoop van aardgas door de overheid.



minder financiële ruimte om de lange termijn klimaatdoelstellingen voor 2030 dichterbij te brengen. Hieronder valt onder andere onderzoek naar het bijmengen van waterstof in het gasnet. De oplossing hiervoor wordt gezocht in het aanwenden van technologiesubsidies voor dit doel. Ook binnen de transitie naar duurzame mobiliteit komt waterstof als energiedrager naar voren. Hierbij is de internationale context van groot belang en is er aansluiting gevonden bij Engeland en Duitsland waar energiestrategieën zich richten op de mogelijke overgang naar een waterstofeconomie. Ook de Europese gemeenschap speelt hierin een belangrijke rol [VROM, 2002].

Het beleid van het Ministerie van Economische Zaken op het gebied van energie is verwoord binnen het project 'Lange Termijn Verkenning Energievoorziening' in het jaar 2050 [LTVE, 2000]. Hierin zijn vier visies m.b.t. energievoorziening opgenomen voor het jaar 2050 zoals te zien in Tabel 18.

Tabel 18 De vier wereldbeelden uit de LTVE

	 Vrijhandel	 Ecologie	 Isolatie	 Solidariteit
totaal verbruik binnenland	2500 PJ	2000 PJ	3000 PJ	4500 PJ
Gas- en gasinfrastructuur	Nederlands aardgas is op, Nederland is Europees gasbankier	Nederland produceert allerlei gas voor inzet in micro- /mini-WKK	Nederland heeft nog 'eigen' aardgas en is WKK-land	Nederlands aardgas is op, import, biofeedstocks in de chemie
Duurzame energie	Offshore wind, biomassa import	Kleinschalig: PV, zon, wind, biogas en biomassa	Wind offshore en op land, zon, bio-afval platteland	Offshore wind, import van PV en biomassa
Mobiliteit	Verbeterde benzine-motor	Fiets, hybride auto's	Brandstofcel én elektrische auto's	Brandstofcelauto, grootschalig OV tussen aggl'o's
Klimaatprobleem	Niet als probleem gezien, ook niet opgelost	Wel een probleem, deels opgelost, lift mee met overig milieu	Niet als probleem gezien, niet opgelost	Urgent probleem, wordt opgelost, instituties, emissiehandel
Wie stuurt ?	De markt, 'laagste kosten'	De burgers, 'autonomie'	Nationale staat, 'zekerheid'	Instituties, 'de wereld'

Bron: LTVE, 2000

Binnen de vier eindbeelden wordt waterstof genoemd voor verschillende toepassingen. Ten eerste zijn er de transporttoepassingen, waarvoor waterstof in drie van de vier visies een rol speelt. De hybride auto's uit het wereldbeeld 'ecologie' worden namelijk aangedreven door een brandstofcel op waterstof en een accu. Waterstof zal voor transporttoepassingen zonder tussenkomst van een reformer in voertuigen niet voor 2020 van de grond komen en zeker niet voor 2050 voltrokken zijn. Hierbij worden de opslag van waterstof en de aanleg van een geheel nieuwe brandstofvoorzieningstructuur als knelpunt gezien. Voordat het zover komt, is een aantoonbaar voordeel nodig van centrale waterstofproductie boven die in het voertuig zelf door middel van een reformer. Ten tweede is er de mogelijkheid waterstof bij te mengen in het aardgasnet als gasvormige energiedrager. Hierbij is ook de mogelijkheid aardgas volledig om te zetten in waterstof aanwe-

zig. Als laatste komen de stationaire toepassingen aan bod. Hierbij gaat het om een strategische keuze, welke energiedrager en daarmee welk distributienetwerk voldoet het meeste aan de wensen van de eindgebruiker. Bij het gebruik van waterstof voor deze toepassingen wordt veelvuldig CO<sub>2</sub>-opslag genoemd ter reductie van de uitstoot van dit gas naar de atmosfeer.

Het vervolg op deze verkenning kwam in de vorm van een uitwerking van de aanpak, transitie management genaamd [MINEZ, 2001]. Dit transitie management richt zich op de transitie naar een duurzame energiehuishouding, zoals opgenomen in het NMP4 van het Ministerie van VROM. Op basis van een externe consultatieronde zijn vier kansrijke transitietrajecten geïdentificeerd. Een van de transitietrajecten is 'Nieuwe gasdiensten', welke is onderverdeeld in 5 deelgebieden. In het overzicht van alle transitiepaden in Tabel 17 zijn de drie weergegeven die in relatie staan met waterstof.

Door het 'Team Nieuw Gas' dat is opgericht door het Ministerie van EZ is een visie opgesteld voor de transitiepaden naar een duurzame gasinzet [TNG, 2003]. Hierin is een verdere uitwerking van de vijf transitiepaden opgenomen die vallen onder 'Nieuwe gasdiensten'.

Het Ministerie van Verkeer en Waterstaat is momenteel niet actief bezig met de transitie naar duurzame mobiliteit.

Zoals blijkt uit te beleidsdocumenten worden waterstof en brandstofceltechnologieën als mogelijke technologieën voor een toekomstige duurzame energievoorziening aangeduid. Dit komt naar voren in de ruimte die ervoor is gecreëerd binnen bestaande innovatieprogramma's zoals SSZ (Stil, Schoon en Zuinig), EET (EcologieEconomieTechnologie) en Demo (Demonstratie van mobiele bronnen). Aan klimaatneutrale energiedragers wordt bovendien aandacht besteed in het programma GAVE (Climate Neutral Gaseous and Liquid Energy Carriers).

Als concreet voorbeeld van stimulering van duurzame technologie op Nationaal niveau is momenteel de Toyota Prius vrijgesteld van BPM<sup>10</sup>. Deze auto is een hybride voertuig, rijdende op een benzinemotor in combinatie met een elektromotor en een batterij, waardoor significante rendementsverbeteringen behaald worden. Dit soort instrumenten kunnen in de toekomst ook ingezet worden om de invoering van brandstofcelauto's op waterstof te stimuleren.

### 4.3 Europese Unie

Het Directoraat-generaal Energie en Vervoer, welke valt onder de Europese Commissie, heeft twee documenten uitgegeven die het Europese beleid van deze twee sectoren bevatten.

In het Groenboek 'Op weg naar een Europese strategie voor een continue energievoorziening' [EC 1, 2001] is een vragenlijst opgenomen als stimulans voor een Europees debat over energiebeleid. Deze lijst heeft tot een breed debat geleid en resulteerde in een document waarin de reacties zijn samengevat tot een eindver-

---

<sup>10</sup> Belasting van Personenauto's en Motorrijwielen (BPM).

slag [CEG, 2002]. De strekking van dit groenboek en eindverslag op het gebied van waterstof zijn dat er onderzoek naar waterstof als energiedrager voor transporttoepassingen zal moeten worden gedaan, zich met name richtend op de lange termijn. Als concrete doelstelling is opgenomen dat in 2020 20% van de huidige brandstoffen vervangen moet zijn door alternatieve energiedragers (bio-brandstoffen, aardgas, waterstof).

Naast het Groenboek is door de Europese Unie het Witboek 'Europese transportbeleid voor 2010: tijd om te beslissen' [EC 2, 2001] uitgegeven, wat het Europese transportbeleid formuleert voor 2010. Als eerste is sprake van de stimulering van waterstoftoepassingen door middel van experimenten en proefprojecten die burgers kennis laat maken met nieuwe ontwikkelingen. Ook de onderzoekskant van waterstof komt naar voren die erop gericht dient te zijn de vormen van transport met een duurzaam karakter te onderzoeken. Op het gebied van financiële instrumenten wordt vanaf Europees niveau gestuurd op het gelijk trekken van belastingvrijstelling voor alternatieve brandstoffen binnen de lidstaten.

Ter ondersteuning van de aanleiding van beleid om tot emissiereductie te komen is Tabel 19 opgenomen die de aanscherping van de Europese emissienormen voor personenauto's weergeeft. Dit beleid kan in de toekomst een belangrijke drijfveer voor het invoeren van waterstof worden. Toekomstige verscherping van deze emissienormen kan het opstellen van beleidsinstrumentarium stimuleren dat het gebruik van duurzame energiedragers aanmoedigt wegens de emissiereductie die hiermee gerealiseerd kan worden.

Tabel 19 Emissienormen personenauto's (gr/km)

		Euro1	Euro2	Euro3	Euro4
Ingangsjaar:		1992	1996	2000	2005
Benzine					
CO		2,72	2,70	2,30	1,00
HC + NO <sub>x</sub>		0,97	0,59	0,35	0,18
HC		-	0,34	0,20	0,10
NO <sub>x</sub>		-	0,25	0,15	0,08
Diesel					
CO	IDI en DI <sup>11</sup>	2,72	1,06	0,64	0,50
HC + NO <sub>x</sub>	IDI	0,97	0,71	0,56	0,30
	DI	1,36	0,91	0,56	0,30
NO <sub>x</sub>	IDI	-	0,63	0,50	0,25
	DI	-	0,81	0,50	0,25
PM <sub>10</sub>	IDI	0,14	0,08	0,05	0,03
	DI	0,19	0,10	0,05	0,03

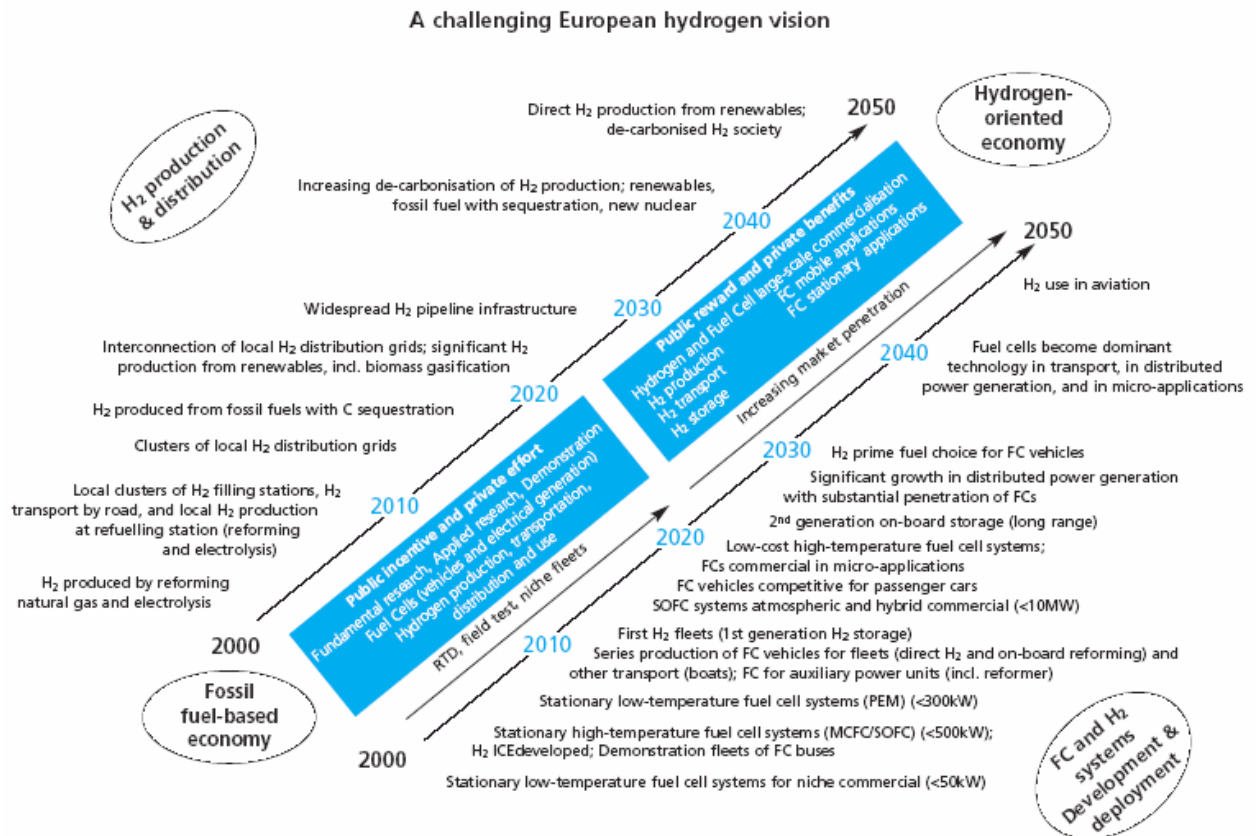
Bron: Dings, 2001

<sup>11</sup> IDI staat voor Indirecte Injectie  
DI staat voor Directe Injectie



In oktober 2002 is binnen Europa de High Level Group gevormd. Deze groep bestond uit 19 leden die de onderzoeksgemeenschap, industrie, overheidsinstellingen en eindgebruikers vertegenwoordigen. Het doel van de groep was het vormen van een visie over de bijdrage die waterstof en brandstofcellen kunnen leveren aan duurzame energie systemen in de toekomst. In het eindrapport [EC, 2003] staat dat de voordelen van waterstof als energiedrager pas echt tot uiting komen nadat een publieke impuls is gegeven en particuliere inspanning is verricht om de belangrijkste toepassingen - stationaire energievoorziening en transport - te stimuleren. Deze impuls dient gecoördineerd plaats te vinden om een mondiale voorsprong te realiseren. Hiervoor is beleid op Europees niveau nodig dat onderzoek en ontwikkeling, demonstratie en marktontwikkeling omvat. De aanbeveling was dan ook een waterstof en brandstofcel technologie platform te vormen, gestuurd door een adviesgroep op Europees niveau. In Figuur 11 is een concept te zien van een waterstof- en brandstofcel werkplan, opgesteld door de High Level Group.

Figuur 11 Concept voor een Europees waterstof- en brandstofcel werkplan



Bron: EC, 2003

Naar aanleiding van de aanbeveling van de High Level Group is per januari 2004 het 'European hydrogen and fuel cell technology platform' opgericht. De Europese Commissie heeft zorg gedragen voor de oprichting van dit platform, dat wordt gestuurd door een adviesgroep. Het hoofddoel van het platform is het bevorde-

ren en versnellen van de ontwikkeling en inzet van concurrerende brandstofcel systemen van wereldklasse voor transport-, stationaire- en draagbare toepassingen [CIRCA, 2004].

De Commissie 'Een Europees initiatief voor groei' heeft een voorstel gedaan om te investeren in netwerk en kennis om economische groei en banen te creëren [COEC, 2003]. In dit voorstel staat tussen 2004 en 2015 een budget van 2,8 miljard euro op de planning voor de waterstofeconomie. Dit wordt geïnvesteerd in twee projecten, te weten Hypogen (1,3 mld.) en Hycom (1,5 mld.). Hypogen is een testfaciliteit voor de productie van waterstof en elektriciteit, en Hycom is de opzet van een aantal 'waterstofgemeenschappen' verspreid over Europa die waterstof als energiebron gebruiken voor verwarming, elektriciteit en transport.

#### 4.4 Internationaal

Indien waterstof en brandstofceltechnologie in een internationale context wordt geplaatst zijn 3 grote spelers aanwezig, namelijk de Europese Unie, de Verenigde Staten en Japan. In november 2003 is door afgevaardigden uit 15 landen en de Europese Commissie een overeenkomst getekend waarmee het IPHE (International Partnership for the Hydrogen Economy) formeel is opgericht [USEU, 2003]. Het doel van het IPHE is het coördineren van waterstofonderzoek, waterstoftechnologie ontwikkeling en de implementatie van waterstoftoepassingen.

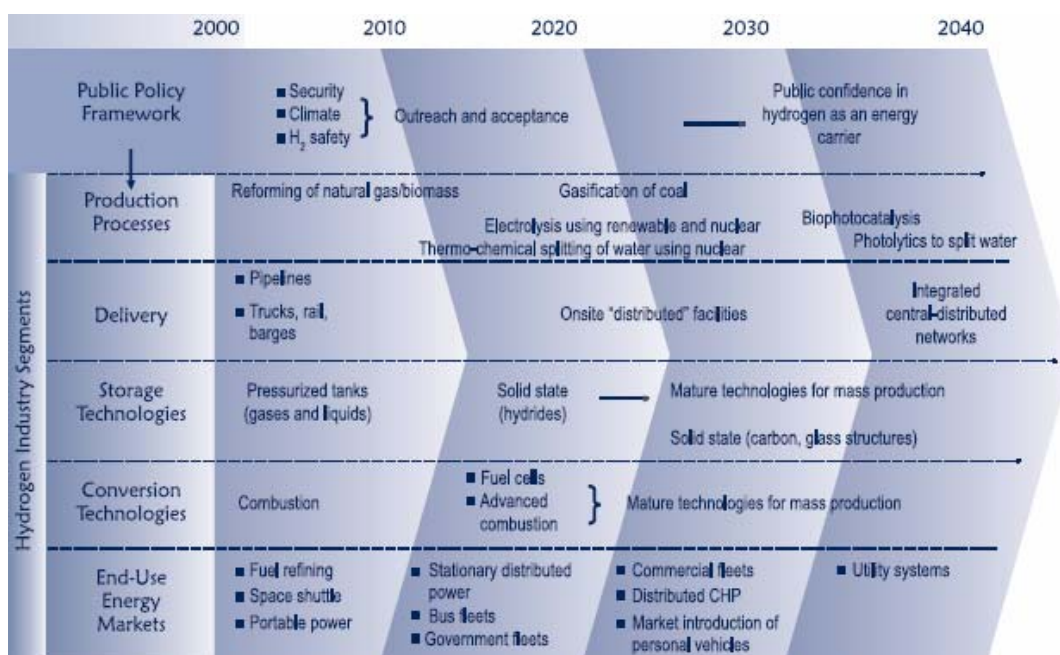
Het budget van Europa en de Verenigde Staten dat is uitgetrokken voor brandstofceltechnologie is de laatste jaren significant verhoogd. Dit is een teken dat beiden waterstof als energiedrager voor toepassingen in de toekomst serieus nemen. Door president Bush is voor de komende vijf jaar om een budget van 1,7 mld. dollar gevraagd aan de regering voor de ontwikkeling van waterstof brandstofceltechnologie. De Europese Unie heeft voor de komende vijf jaar een budget van twee miljard Euro toegewezen aan de ontwikkeling van en het onderzoek naar duurzame- en waterstof energie technologieën [USEU 2, 2003]. Japan heeft voor 2002 een budget van ongeveer 240 mln. dollar gereserveerd voor brandstofceltechnologie. De commerciële doelstelling van Japan op transportgebied is 50.000 brandstofcelvoertuigen te hebben in 2010 en 5 miljoen voertuigen in 2020 [EC, 2003].

De Verenigde Staten hebben een visie en een werkplan opgesteld over de waterstofeconomie. Deze visie geeft een algemeen beeld van de waterstofeconomie in de Verenigde Staten, ondersteund door mijlpalen die bereikt moeten worden om tot realisatie van de visie te komen. Figuur 12 geeft deze visie weer [DOE 1, 2002].





Figuur 12 Overzicht van de transitie naar de waterstofeconomie



Bron: DOE, 2002

In het werkplan is de weg naar de waterstofeconomie verder uitgewerkt. Hierin worden de verschillende (technologische) ontwikkelingen uiteengezet die nodig zijn om tot de waterstofeconomie te komen [DOE 2, 2002]. De belangrijkste programma's op het gebied van waterstof en brandstofceltechnologie in de Verenigde Staten zijn FreedomCAR en het Hydrogen Fuel Initiative<sup>12</sup>. Deze programma's hebben als voornaamste doelen het creëren van een onafhankelijke energievoorziening en het realiseren van milieuvoordeel [DOE 3, 2004].

Naast deze nationale programma's heeft de staat California beleid geschreven op het gebied van uitstoot van voertuigen, genaamd 'the California Zero Emission Vehicle Regulation'. In 1990 is dit beleid aangenomen door het Air Resources Board, met als doelstelling de milieu-invloed van voertuigen drastisch terug te dringen door middel van de invoering van 'Zero Emission Vehicles' (ZEVs). Dit beleid is echter door de jaren heen meerdere malen aangepast om de technologie meer tijd te geven om zich te ontwikkelen. Autofabrikanten krijgen punten per ZEV dat ze op de markt plaatsen. Dit voertuig moet aan bepaalde eisen voldoen met betrekking tot uitstoot om in de ZEV-categorie te vallen. Ook voertuigen die een zeer lage uitstoot hebben, Partial Zero Emission Vehicles (PZEV), zoals hybride voertuigen kunnen punten opleveren voor de fabrikant. Indien fabrikanten volledig gebruik maken van deze puntentoekenning voor PZEV hoeven ze tussen 2005 en 2008 slechts 250 type III (groot bereik, snel bijtanken) ZEVs te produceren en 2.500 tussen 2009 en 2011. Dit betekent wel dat meer dan 30% van de verkochte voertuigen in 2005 PZEVs moeten zijn. [Childers, 2004].

<sup>12</sup> Heette oorspronkelijk Freedom Fuel maar is omgedoopt tot Hydrogen Fuel Initiative.

Het Kyoto-protocol schrijft een reductie van broeikasgassen (onder andere CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O) van 6% in 2010 ten opzichte van het niveau van 1990. Momenteel heeft de reductie van luchtvervuilende stoffen de prioriteit in de Verenigde Staten, zoals fijn stof (PM<sub>10</sub>), stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>) en koolwaterstoffen (HC) wegens de gezondheidsrisico's van deze stoffen. Dit probleem treft vooral de stedelijke omgeving waar de verkeersintensiteit en de bevolkingsdichtheid het grootst is. Door gebruik van waterstof als energiedrager voor transporttoepassingen in zettten kan de emissie van deze gassen worden teruggedrongen, of zelfs tot nul gereduceerd.



## 5 Maatschappelijke aspecten

De acceptatie van waterstof als energiedrager door consumenten hangt af van maatschappelijke aspecten zoals veiligheid, infrastructuur, milieuaspecten en kosten. Ook de confrontatie van consumenten met een nieuwe technologie is van belang, door media of directe confrontatie. Deze aspecten dragen bij aan het uiteindelijke draagvlak voor waterstof. Gebrek aan draagvlak kan voor een nieuwe technologie echter ook betekenen dat deze niet wordt geaccepteerd. Een voorbeeld van een technologie die door een gebrek aan draagvlak binnen de maatschappij niet is doorgebroken is kernenergie. De aspecten die van invloed zijn op de maatschappelijke acceptatie van waterstof worden in dit hoofdstuk belicht.

### 5.1 Veiligheid

In het kader van maatschappelijke acceptatie van waterstof is het veiligheidsaspect en de risicoperceptie van groot belang. Voor maatschappelijke acceptatie moet de veiligheidsstandaard van waterstof voor transporttoepassingen gelijkwaardig zijn aan die van huidige brandstoffen. Het voornaamste gevaar van energiedragers zoals waterstof is brand- en explosiegevaar. Met betrekking tot dit brand- en explosiegevaar bezit waterstof eigenschappen die andere risico's met zich meebrengen ten opzichte van conventionele energiedragers. Effectieve veiligheidsmaatregelen en voorschriften kunnen deze risico's echter tot een minimum te beperken. Ook zijn de mate waarin burgers controle hebben over het risico en of het om een onbekend risico gaat van invloed op het draagvlak met betrekking tot veiligheid. In deze paragraaf zal ook worden ingegaan op dit psychologische aspect van veiligheid en risicoperceptie.

Waterstof is een licht gas en verspreid zich snel, wat een aantal consequenties met zich meebrengt ten aanzien van de veiligheid. Omdat het gas zich snel verspreid zal het percentage waterstof in lucht waarbij explosie mogelijk is minder snel bereikt worden dan bij andere gassen. In de buitenlucht zal waterstof niet snel vlam vatten, dit risico is vooral van toepassing in gesloten ruimtes. Niet alleen garages, maar ook tunnels zijn op dit gebied risicofactoren. Wegens de lage dichtheid van waterstof zal het in een gesloten ruimte naar het plafond stijgen, wat als voordeel met zich meebrengt dat indien zich een explosie of brand voordoet dit niet bij de grond plaatsvindt. Doordat waterstof het kleinste molecuul is neigt het te ontsnappen door kleine openingen waar andere gassen dit niet doen [Barbir, 2004]. De afdichting van leidingen en opslagmedia zullen hier dan ook op berekend moeten zijn.

Gassen kunnen vlam vatten door een vonk of door het te verhitten tot de ontvlamtemperatuur. Waterstof heeft een relatief lage energie nodig om te ontsteken, zo is een statische vonk van het menselijk lichaam voldoende dit effect te bewerkstelligen (in droge lucht, binnen het ontstekingsbereik). Hierbij moet de kanttekening worden gemaakt dat ook aardgas bij een statische vonk ontsteekt

[Lovins, 2003]. Dit brengt bijvoorbeeld risico's met zich mee bij het vullen van een waterstofauto.

Een andere eigenschap van waterstof is dat het onzichtbaar en reukloos is voor mensen. Waterstof brandt met een vaag blauwe vlam die nauwelijks waarneembaar is. Aardgas heeft een detector bijgemengd, waardoor het een geur met zich meebrengt en zo de consument waarschuwt voor lekkages. Het bijmengen van een detector in waterstof brengt problemen met zich mee door de kleine moleculen en bovendien zijn veelgebruikte detectoren giftig voor brandstofcellen.

In Tabel 20 is een overzicht te zien van eigenschappen van waterstof in vergelijking met andere gassen met betrekking tot veiligheid.

Tabel 20 Eigenschappen van waterstof met betrekking tot veiligheid

Eigenschap	Eenheid	Waterstof	Aardgas	Benzinedamp
Dichtheid gerelateerd aan lucht		0,07	0,55	4,0
Moleculair gewicht	u	2	16	107
Diffusie coëfficiënt	cm <sup>2</sup> /s	0,61	0,16	0,05
Explosie energie	MJ/m <sup>3</sup>	9	32	407
Ontvlammingsbereik	vol%	4 - 75	5 - 15	1 - 8
Ontstekingsbereik	vol%	18 - 59	6 - 14	1 - 3
Minimum ontstekingsenergie	mJ	0,02	0,29	0,24
Vlamsnelheid	cm/s	346	43	42

Bron: NAS, 2004

Op dit moment zijn een aantal organisaties bezig standaarden te ontwikkelen met betrekking tot waterstof. Deze standaardisering van waterstof gerelateerde producten en diensten kan leiden tot een vermindering van risico's. Voorwaarde is wel dat deze standaarden strikt worden nageleefd.

Typische voorbeelden die inbreuk doen op het maatschappelijke draagvlak van waterstof zijn de Hindenburg ramp uit 1936 en de waterstofbom.

In 1936 is de zeppelin 'Hindenburg' verongelukt, welke werd gebruikt voor passagiertransport over de Atlantische oceaan. Dit ongeluk ging gepaard met een grote explosie van het luchtschip. De zeppelin was gevuld met waterstof voor het drijfvermogen dat in eerste instantie werd aangedragen als aanleiding van de explosie. Nader onderzoek heeft echter uitgewezen dat materiaal dat werd gebruikt in het canvas zeer licht ontvlambaar was en een constructiefout leidde tot de ontsteking van het materiaal. Het waterstofgas in de zeppelin had geen directe invloed op de ramp.

Het begrip 'waterstofbom' refereert naar een bom waarin een nucleaire reactie plaatsvindt onder hoge temperatuur en druk. Het is in geen geval mogelijk tot een nucleaire reactie te komen van waterstof bij een ongeval met conventioneel waterstof [Kruse et al, 2002].

Voor de HydroGen3 - een brandstofcelvoertuig van General Motors - zijn verschillende veiligheidstesten uitgevoerd door middel van botsproeven en proeven met de effecten van een mankement in een garage/tunnel. Uit de botsproeven is



naar voren gekomen van het voertuig voldoet aan de Europese norm. Voor de veiligheidstests in garages en werkplaatsen zijn geen richtlijnen, maar gebleken is dat brandstofcelvoertuigen geen additionele risico's kennen boven die van conventionele voertuigen. In een Noorse tunnel is een proef gedaan waarbij in de tunnel een lek werd gecreëerd in de tank van een brandstofcelvoertuig. Het resultaat was dat direct na het creëren van het lek en een kwartier later geen ontvlambaar mengsel was gevormd. Dit zelfde geldt voor een tunnel zonder toegevoegde ventilatie, omdat de natuurlijke luchtstroom altijd voldoende is [GM, 2004].

Uit verschillende studies blijkt dat waterstof geen grotere, vaak zelfs kleinere risico's met zich meebrengt in vergelijking met het gebruik van conventionele energiedragers. Deze studies benadrukken het belang van verdere onderzoeksinspanning wegens het ontbreken van specifieke, relevante gegevens en praktijkervaring [Nilsen et al., 2004] [Cracknell et al., 2004]. Experts zijn het echter niet eens over de veiligheidsaspecten van een transportsysteem voor consumenten. Verder onderzoek en praktijkervaring zullen de risico's moeten uitwijzen, zodat hiervoor adequate maatregelen kunnen worden genomen.

## 5.2 Infrastructuur

Voor de brandstofvoorziening binnen de transportsector is momenteel een uitgebreide infrastructuur aanwezig. Onder infrastructuur wordt het geheel van onroerende voorzieningen bedoeld, van productie tot levering aan de consument. Deze infrastructuur is door de jaren heen steeds uitgebreid en complexer geworden. Voor het gebruik van waterstof is echter een andere infrastructuur dan de huidige nodig, samengaan met nieuwe voorzieningen. Voorzieningen zijn bijvoorbeeld onderhoudspersoneel, geaccepteerde veiligheidsvoorschriften, onderzoekers etc. De aanleg van een waterstofinfrastructuur wordt vaak gezien als een taak van de overheid. Het gebrek aan waterstofinfrastructuur en bijbehorende voorzieningen wordt als een van de voornaamste knelpunten gezien voor de het gebruik van waterstof als energiedrager voor transporttoepassingen. Hier zal worden ingegaan op het infrastructurele aspect van decentrale- of centrale productie van waterstof.

Hoe de infrastructuur en voorzieningen eruit gaan zien in de toekomst is onduidelijk en wordt bepaald door toekomstige ontwikkelingen. Een grote invloed op het karakter van de infrastructuur is of waterstof decentraal, dan wel centraal geproduceerd wordt.

Bij centrale productie zal de infrastructuur nagenoeg hetzelfde karakter houden, maar wel worden toegespitst op waterstof in plaats van op de huidige energiedragers. Bij de vorming van een nieuwe infrastructuur gebaseerd op centrale productie van waterstof komen een aantal problemen kijken. Zo is het kip-ei probleem van toepassing op dit aspect, indien er geen voertuigen zijn die waterstof tanken zal geen infrastructuur aangelegd worden, maar zonder infrastructuur zal niemand een voertuig kopen dat op waterstof rijdt. De kosten van de aanleg van een infrastructuur liggen hoog, maar de kosten per eenheid geproduceerde waterstof liggen lager dan bij decentrale productie.

Decentrale opwekking heeft geheel andere consequenties op het gebied van infrastructuur en voorzieningen. Decentrale productie van waterstof brengt een significante afname van infrastructurele kosten met zich mee, omdat waterstof dicht bij de eindgebruiker wordt geproduceerd.

De aanleg van een waterstofinfrastructuur wordt gezien als een taak van de overheid. Momenteel is er een 'lock-in' rondom fossiele brandstoffen en hun infrastructuur, omdat deze infrastructuur zich in een ontwikkelde fase bevindt. Deze lock-in houdt in dat de aanleg van een nieuwe of aangepaste infrastructuur kosten met zich meebrengt die 'business as usual'<sup>13</sup> niet kent. In hoeverre en op welke termijn de overheid deze infrastructuur zal opbouwen is mede bepalend of en wanneer waterstof ingezet wordt in transporttoepassingen.

RMI heeft een transitiestrategie ontwikkeld dat het kip-ei probleem zou kunnen oplossen [Lovins, 2003]. De volgende stappen leiden hierin uiteindelijk tot een waterstofgebaseerde economie:

- 1 Decentrale aardgas reformers in gebouwen in combinatie met brandstofcellen voor elektriciteit- en warmteproductie.
- 2 Inzetten van waterstof in bussen en taxi's.
- 3 Het leasen van brandstofcelauto's aan personen die in of dicht bij de gebouwen met reformers werken.
- 4 In daluren gebruik maken van de overcapaciteit van de reformers in gebouwen om waterstof te produceren en op te slaan. Dit kan geleverd worden aan meer brandstofcelauto gebruikers, of als elektriciteit worden teruggeleverd in piekuren.
- 5 Naarmate de productie van waterstof goedkoper wordt zal het aantrekkelijk worden buiten gebouwen in te zetten, bijvoorbeeld door vulstations voor voertuigen te bouwen.
- 6 De waterstofconcurrentie zal toenemen en zo zal de markt zelf bepalen waar waterstof ingezet wordt.

Deze visie wordt echter ontkracht door John Wilson [Wilson, 2004], met name doelend op de veiligheid van reformers en opslag van waterstof in dichtbevolkte gebieden. Het idee van een decentrale productie wordt wel ondersteund, maar de veiligheidsaspecten worden als cruciaal criterium genoemd voor de ontkrachting van de visie.

Of de noodzaak voor de aanleg van een grootschalige infrastructuur bestaat hangt af van de productieschaal van waterstof. De transitie naar een waterstof-economie kan bijvoorbeeld plaatsvinden door van een decentrale waterstofproductie gestaag over te gaan op centrale productie indien de vraag op die wijze wordt gecreëerd. De verschillende productieschalen kennen andere voor- en nadelen, waarbij niet één mogelijkheid naar voren komt als de beste optie.

---

<sup>13</sup> Business as usual betekend doorgaan op de huidige voet.

### 5.3 Milieu

Een van de argumenten voor de invoering van waterstof als energiedrager is het milieuaspect. Het terugdringen of zelfs elimineren van schadelijke emissies kan door middel van waterstof bewerkstelligd worden. Het gebruik van waterstof roept ook vragen en twijfels op, over de hoeveelheid water die nodig is, of de aarde uitdroogt en of het schadelijk is voor de ozonlaag om over te gaan op een waterstofeconomie. In deze paragraaf zal ingegaan worden op deze aspecten van de waterstofeconomie.

De milieuvoordelen die te behalen zijn door over te gaan op waterstof als energiedrager zijn een van de twee argumenten die breed worden aangedragen voor het gebruik van waterstof. In het kader van het vergroten van maatschappelijk draagvlak is dit een belangrijk argument voor een waterstofeconomie. Een brandstofcelvoertuig dat rijdt op waterstof stoot geen emissies uit die van invloed zijn op de lokale luchtkwaliteit. Ook geluidsoverlast wordt gereduceerd omdat een brandstofcel significant stiller is dan een verbrandingsmotor. Dit zijn argumenten die mensen direct aanpreken omdat ze lokaal van invloed zijn. Het argument dat de CO<sub>2</sub>-emissie kan worden teruggedrongen heeft meer invloed op de mondiale situatie. Deze reductie draagt ook bij aan de realisatie van de emissiedoelstellingen van het Kyoto-protocol, hoewel door middel van de inzet van waterstof waarschijnlijk geen emissiereductie wordt gerealiseerd binnen de termijn van het Kyoto-protocol. Ondanks een vergelijkbaar energieverbruik (over de gehele keten) bij gebruik van waterstof in plaats van diesel zal de uitstoot van CO<sub>2</sub> ongeveer 35% lager uitkomen door de verschuiving van aardolie naar aardgas. Verdere reductie van CO<sub>2</sub> die bij productie van waterstof uit fossiele grondstoffen vrijkomt kan worden gerealiseerd door CO<sub>2</sub> af te vangen en op te slaan, zie paragraaf 3.1.6 [Tillemans, 2003].

Indien alle andere factoren gelijk zijn stoot een voertuig dat rijdt op waterstof meer waterdamp uit dan een voertuig op benzine. Een hoger rendement van brandstofcellen resulteert echter in een lagere uitstoot van water, waardoor brandstofcelvoertuigen niet meer water hoeven uit te stoten dan huidige voertuigen met een verbrandingsmotor. Ondanks dat waterdamp een sleutelrol speelt in het broeikaseffect is de uitstoot van waterdamp door voertuigen relatief klein ten opzichte van natuurlijke verdamping en speelt geen significante rol [Wilson, 2004]. Toch zal dit aspect grondig moeten worden onderzocht, want de gevolgen kunnen groot en onomkeerbaar zijn.

De productie van waterstof kan in bepaalde gebieden waar water niet voorhanden is een probleem opleveren. Mogelijke oplossingen zijn het te produceren uit ontzout water, of te importeren. Het gebruik van water voor de productie van waterstof zal geen watertekort opleveren omdat het weer retourneert in de waterkringloop na de reactie in de brandstofcel. Ongeacht de productiemethode van waterstof zal de reactie in de brandstofcel geen significante verandering in het zuurstofgehalte van de atmosfeer met zich meebrengen [Lovins, 2003].

Het uitdrogen van de aarde door het ontsnappen van waterstof uit de dampkring van de aarde is niet aannemelijk, want waterstof heeft een mate van reactiviteit waardoor 0,04% van de uitgestoten waterstof ontsnapt uit de aardse dampkring.

Dit wordt aangevuld door kleine kometen die volledig verbranden in de dampkring en deze afname tenietdoen [Lovins, 2003].

Beweerd is dat door de waterstofeconomie 4 tot 8 keer zoveel moleculair waterstof zal worden uitgestoten dan nu het geval is. Dit zou ernstige problemen met zich meebrengen in het kader van klimaat stabiliteit en de ozonlaag [Tromp et al., 2003]. De aannames die worden gedaan zijn echter niet valide volgens Lovins [2003]. Gesteld wordt namelijk dat een lek percentage van 10 - 20% verwacht kan worden, terwijl dit in de realiteit niet hoger dan 2% ligt. Het gebruik van waterstof zou kunnen lijden tot een reductie van waterstofemissie doordat de huidige emissie voornamelijk door het gebruik van fossiele brandstoffen en biomassa wordt veroorzaakt.

Verdere milieuaspecten van de waterstofeconomie zoals productiemethodes en rendementen zijn in hoofdstuk 2.2 de technische aspecten van de waterstofeconomie behandeld.

## **5.4 Communicatie**

Het maatschappelijke draagvlak wordt deels bepaald door de wijze waarop en de frequentie waarmee over een nieuwe technologie wordt gecommuniceerd met consumenten. Deze paragraaf zal verschillende communicatiewegen behandelen, en uitleg geven over risicoperceptie van consumenten.

### **5.4.1 Voorbeeldprojecten**

Over het algemeen is het doel van voorbeeldprojecten op het gebied van waterstof het ontwikkelen en demonstreren van een nieuwe techniek. Hiermee worden voorbeeldprojecten bedoeld die naast het testen en verder ontwikkelen van een techniek ook de burger confronteren met de techniek. Naast dit type projecten worden ook grootschalige projecten opgezet die een doelstelling hebben die is gericht op kennisontwikkeling en testen van technieken in de praktijk. Ook deze projecten zullen beknopt aan de orde komen in deze paragraaf.

Door het ontbreken van relevante industriële partijen is Nederland niet het aangewezen land om een leidende rol te spelen bij de ontwikkeling van waterstof voor transporttoepassingen. Voor stationaire toepassingen is dit wel mogelijk door het meer lokale karakter van de markt. In Groot et al. [2003] is een globale opzet gegeven voor een proefproject waarin waterstof wordt ingezet voor stationaire energievoorziening in een woonwijk.

Het grootste voorbeeldproject dat momenteel in Europa loopt (tevens het grootste op mondiale schaal) is het CUTE-project (Clean Urban Transport for Europe). Hierbij worden in 9 Europese steden elk 3 bussen ingezet (zie: figuur 13) voor openbaar personenvervoer die rijden op waterstof. In deze steden wordt de benodigde waterstofproductie faciliteiten en tankstations aangelegd. Binnen het CUTE-project worden verschillende technieken voor de productie van waterstof ingezet. In Amsterdam vindt de waterstofproductie plaats door middel van elek-



trolyse op basis van groene stroom. Alle bussen rijden op gasvormig waterstof onder druk in cilinders. Tabel 21 geeft een overzicht van de wijze van waterstofproductie in de aangesloten steden bij het CUTE-project.

Tabel 21 Overzicht waterstofproductie CUTE-project

	Productie	Transport van productie naar uitgifte
Amsterdam	Groene stroom Onsite elektrolyse	
Barcelona	Zonnepanelen en netspanning Onsite elektrolyse	
Hamburg	Groene stroom Onsite elektrolyse	
Londen	Raffinaderij (olie/gas)	Vrachtwagens in vloeibare vorm
Luxemburg	Extern	Vrachtwagens in gasvorm
Madrid	Extern/ Onsite aardgas reforming	Vrachtwagens in gasvorm
Porto	Onsite aardgas reforming	
Reykjavik	Geothermische en elektriciteit uit waterkracht Onsite elektrolyse	
Stockholm	Elektriciteit uit waterkracht Onsite elektrolyse	

Bron: FCBC, 2004

Figuur 13 Brandstofcelbus Amsterdam



Gekoppeld aan het CUTE-project is het Accept H<sub>2</sub>-project, wat in 5 steden de publieke opinie over de waterstofbussen in kaart brengt. Het onderzoek is gericht op de situatie voor en na de introductie van de waterstofbussen. Naast de invloed van het CUTE-project op de publieke opinie binnen de steden waar het project loopt wordt ook de bereidheid van mensen bepaald meer te betalen voor duurzaam transport onderzocht. De maatschappelijke knelpunten die uit het project naar voren komen worden gebruikt voor aanbevelingen voor de opzet van toekomstige voorbeeldprojecten zodat de positieve invloed van deze projecten gemaximaliseerd wordt [AcceptH2, 2004].

In Duitsland is een project opgezet op het vliegveld van München, waar twee verschillende tests draaien die wel onderling zijn verbonden. Ten eerste rijden 3 bussen op gasvormig waterstof, binnen de grenzen van het vliegveld. Dit gasvormig waterstof wordt op het vliegveld geproduceerd d.m.v. elektrolyse. Naast deze bussen is er een tankstation (zie: figuur 14) voor vloeibaar waterstof buiten de grenzen van het vliegveld, die publiekelijk toegankelijk is. Dit tankstation is volautomatisch, waarbij een robot de voertuigen voltankt.

Figuur 14 Volautomatisch tankstation op luchthaven München



Vloeibaar waterstof wordt door vrachtwagens aangevoerd vanaf een vlakbij gelegen productie-eenheid. De twee waterstoftankstations zijn gekoppeld, zodat - indien noodzakelijk - vloeibaar waterstof op locatie kan worden omgezet in gasvormig waterstof.

Op 3 mei 2004 is de 'HydroGen3', een voertuig gebaseerd op de Opel Zafira een reis door 14 Europese landen begonnen, waarbij een afstand van ongeveer 10.000 kilometer wordt afgelegd. De reis is onderverdeeld in 20 stukken waarbij elk stuk door een journalist of prominente inwoner van een Europees land wordt bestuurd. Het voertuig beschikt over een 60kW/82pk elektrische motor, rijdt op vloeibaar waterstof en heeft een actieradius van 400 km en een topsnelheid van 160 km/u. Op 11 juni 2004 zal de reis eindigen in Portugal [GM, 2004].

In Californië, Amerika wordt momenteel gewerkt aan een waterstof snelweg (California Hydrogen Highway), wat inhoudt dat langs de belangrijkste snelwegen van Californië ongeveer elke 32 kilometer een waterstof tankstation wordt gebouwd. Het project loopt tot 2010 en zal tussen de \$75 en \$200 milj gaan kosten. Op 20 april 2004 is het eerste tankstation in UC Davis officieel geopend door gouverneur Schwarzenegger.

Buiten deze maatschappelijke voorbeeldprojecten om zijn de volgende projecten opgezet.

Door Gasunie is een voorstel gedaan in het kader van het Sixth Framework Programme (FP6) van de Europese Unie voor NATURALHY, een project dat de infrastructuurle benodigdheden onderzoekt voor waterstof en aardgas mengsels. Voor dit Europees georiënteerde project zijn 38 partners aangetrokken en is een budget van 11 mln. Euro toegewezen [EC 3, 2004].

Binnen de chemische industrie komt waterstof soms als bijproduct vrij, bijvoorbeeld bij Akzo Nobel. Dit chemieconcern is een samenwerkingsverband aangegaan met Nedstack, om een elektriciteitscentrale naast een chloor elektrolyse fabriek te zetten. Deze centrale zet het vrijgekomen waterstof om in elektriciteit d.m.v. brandstofcellen en levert deze terug aan de fabriek. Hierdoor kan het elektriciteitsverbruik van het proces met 20% gereduceerd worden en tevens worden de schadelijke emissies teruggedrongen. Momenteel is het project nog een haalbaarheidsstudie en wordt gefinancierd door de Europese Unie (FP6), maar zal waarschijnlijk overgaan in het bouwen van de centrale. De mogelijkheid bestaat dat dit project een Lighthouse<sup>14</sup> project wordt, wat het internationale aanzien verhoogt.

Ook is een project gaande in Amerika, waar een locomotief wordt omgebouwd tot een brandstofcellocomotief van 109 ton met een vermogen van 1,2 MW. Dit project heeft een looptijd van vijf jaar, en is reeds één jaar onderweg. Het grote verschil tussen wegvoertuigen en spoortoepassingen is dat treinen minder gewichtsbependingen kennen. Onder de uiteindelijke doelen van het project behoort ook het faciliteren van de commercialisering van brandstofceltechnologie voor toepassingen over het spoor [FCPropulsion, 2004].

---

<sup>14</sup> Een Lighthouse project is een nieuw project op Europees niveau, waarbij de Europese Commissie, de betreffende lidsta(a)t(en) en de industrie de belangrijkste actoren zijn.

### 5.4.2 Media

Waterstof is het afgelopen jaar steeds meer in de media geweest, niet alleen in tijdschriften maar ook op televisie, radio en internet. Media hebben een groot bereik en oefenen hierdoor invloed uit door alle lagen van de samenleving heen. Een aantal voorbeelden van media-aandacht voor de waterstofeconomie;

- ‘Tegenlicht’: Tweedelige documentaire van de VPRO over de waterstofeconomie, uitgezonden 12 en 19 oktober 2003. Tevens te bekijken via internet [VPRO, 2004];
- Artikel ‘Rijden op water’ in het AD Magazine van 7 februari 2004 [Kouwenhoven, 2004];
- Artikel ‘Valkuilen vol waterstof’ in Elsevier van 20 maart 2004 [Rozendaal, 2004].

In het geval van een ongeval met waterstof in de ontwikkelingsfase kan de media ervoor zorgen dat de maatschappelijke acceptatie van waterstof een onherstelbaar imagooverlies oploopt. Dit is een van de aspecten die de transitie naar een waterstofeconomie onzeker maakt. Een goede communicatie is dus essentieel voor de acceptatie van de bevolking. Tijdig beginnen met uitleg over de nieuwe technologie kan zorgen voor risicoacceptatie en goodwill bij een eventueel ongeval.

### 5.4.3 Risicoperceptie

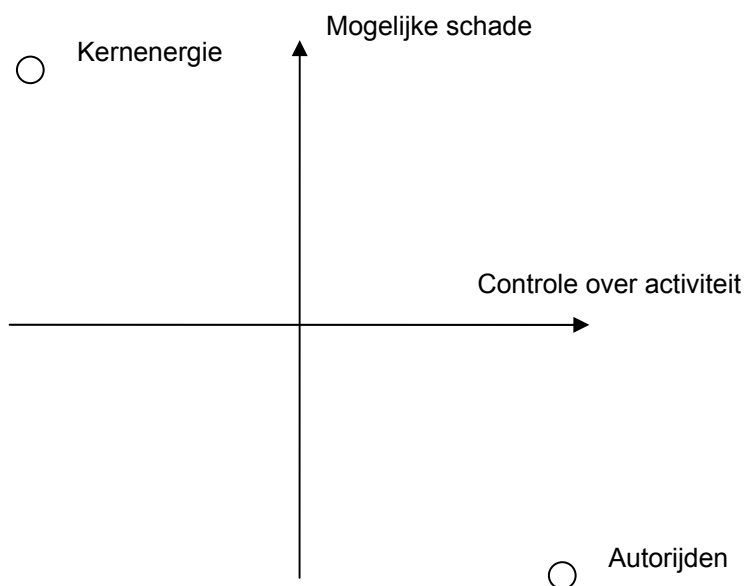
Uit onderzoek is gebleken dat mensen risico's meer op een gevoelsmatige basis beoordelen dan op een rationele basis [Loewenstein et al., 2001]. De risicoperceptie van mensen met betrekking tot nieuwe risicovolle technologieën of activiteiten wordt beïnvloed door factoren die niet als rationeel worden gestempeld. Bij deze technologieën en activiteiten spelen kans op een ongeval en de mogelijke gevolgen een ondergeschikte rol bij de risicoperceptie. Twee factoren hebben hier meer invloed op;

- angst, in de vorm van het gebrek aan controle over een activiteit, angstgevoelens en waargenomen rampotentieel;
- risico van het onbekende, in die mate dat het gevaar wordt gezien als onbekend, moeilijk in te schatten of een vertraagd effect heeft.

De eerste van deze twee factoren duidt op een meer gevoelsmatige dan rationele inschatting van risico's. Deze menselijke benadering heeft een zeer negatief effect gehad op de invoering van kernenergie. Deze nieuwe technologie biedt mensen geen controle over een mogelijke ramp, en heeft grote gevolgen in het geval van een ongeval. Figuur 15 is een weergave van de hiervoor genoemde factoren, met als voorbeelden autorijden en kernenergie uitgezet in een assenstelsel.



Figuur 15 Risicoperceptie



Dit beeld is gunstig voor de invoering van waterstof in transporttoepassingen, omdat een auto die op waterstof rijdt een grote controle geeft over de activiteit en de mogelijke schade van de activiteit niet groot is. Indien de mogelijke schade bekend is bij mensen, verlaagt dit de risicoperceptie, omdat ze weten wat voor risico het rijden in een waterstofauto met zich meebrengt.



## 6 Conclusies

Grootschalige toepassing van waterstof in transporttoepassingen speelt pas op de lange termijn (2020 en verder). De volgende kansen spelen de belangrijkste rol bij de invoering van waterstof:

- emissieloze samenleving;
- energieonafhankelijkheid.

Knelpunten voor de invoering van waterstof manifesteren zich op de volgende terreinen;

- technisch;
- maatschappelijk;
- economisch.

### 6.1 Kansen

Waterstof biedt de mogelijkheid tot een emissieloze samenleving te komen onder twee voorwaarden. Ten eerste moet de productie van waterstof plaatsvinden op een duurzame wijze, wat momenteel geen rendabele optie is. Op grond van kosten van duurzame productietechnieken wordt waterstof de komende jaren nog uit fossiele brandstoffen geproduceerd. Ten tweede moet de conversie van waterstof naar bruikbare energie emissieloos gebeuren, door middel van de brandstofcel. Ook de kosten van de brandstofcel liggen nog te hoog voor commerciële inzet in transporttoepassingen. Indien in de toekomst aan deze voorwaarden wordt voldaan is dit positief voor zowel de lokale luchtkwaliteit als voor de emissies die mondiale klimaatverandering tot gevolg hebben.

Waterstof kan tevens energieonafhankelijkheid bewerkstelligen, waarbij wordt gedoeld op de dominante rol van aardolie in de huidige energievoorziening voor transport. Deze onafhankelijkheid komt voort uit de mogelijkheid waterstof uit (duurzame) elektriciteit, aardgas of steenkool te produceren.

### 6.2 Knelpunten

Het belangrijkste technische knelpunt is de opslag van waterstof voor transporttoepassingen. Deze opslag zal voor commerciële toepassingen aan eisen moeten voldoen met betrekking tot veiligheid, capaciteit en systeemgewicht. Momenteel hebben opslagtanks voor waterstof in vloeibare vorm een opslagcapaciteit van 4,6 kg waterstof, wat een actieradius van 400 kilometer met zich meebrengt. Vloeibare waterstofopslag lijdt echter tot onvermijdelijke verliezen door de lage temperaturen waarop het bewaard moet worden, waardoor in de toekomst een andere opslagvorm gezocht moet worden. Het idee van een on-board reformer, waarin bijvoorbeeld methanol aan boord van het voertuig wordt omgezet in waterstof, is door de grote autofabrikanten afgestoten wegens de complexiteit van het systeem, de kosten en het feit dat het geen lange termijn oplossing is.

Het gebrek aan een waterstofinfrastructuur is het voornaamste maatschappelijke knelpunt. Of de aanleg van een infrastructuur noodzakelijk is hangt met name af van de schaal waarop waterstof geproduceerd wordt. Decentrale productie neemt de noodzaak van een waterstofinfrastructuur grotendeels weg, terwijl centrale productie wel een infrastructuur vereist. Bij de aanleg van een waterstofinfrastructuur kunnen zowel de overheid als het bedrijfsleven een belangrijke rol spelen. Veiligheid van waterstof wordt vaak gerelateerd aan de ramp met de zeppelin 'Hindenburg', die ontplofte in 1936. Uit onderzoek is gebleken dat deze ramp niet plaatsvond door de waterstof dat werd gebruikt als drijfgas. Recentelijk onderzoek naar de veiligheid van waterstof voor transporttoepassingen heeft uitgewezen dat het gas een vergelijkbaar of zelfs kleiner risico met zich meebrengt als LPG. De perceptie van mensen kan een remmende invloed hebben op de acceptatie door consumenten.

Momenteel is er een lock-in rondom de fossiele brandstoffen, omdat deze infrastructuur zich in een ontwikkelde fase bevindt. Dit economische knelpunt houdt in dat de aanleg van een nieuwe of aangepaste infrastructuur kosten met zich meebrengt die 'business as usual' niet kent. De kosten voor (gebruik van) brandstofcelvoertuigen zullen moeten dalen of de kosten voor (gebruik van) huidige voertuigen zullen moeten stijgen wil het een commercieel succes worden.

Een andere randvoorwaarde is visie en committent van verschillende actoren (overheid, bedrijfsleven en maatschappelijke actoren). Indien deze actoren waterstof zien als sleutelement voor een toekomstige duurzame energievoorziening blijven deze partijen zich inzetten om een waterstofeconomie te ontwikkelen.

### **6.3      Beleid**

De Europese Unie en de Verenigde Staten zijn intensieve onderzoek en ontwikkeling programma's aan het uitvoeren naar de toepassingen van waterstof. De beleidsdoelstellingen zijn gericht op het creëren van een onafhankelijke energievoorziening en het terugdringen van schadelijke emissies. Niet alleen het stimuleren van onderzoek, maar ook demonstratieprojecten vormen het speerpunt van het instrumentarium. Europa heeft als concrete doelstelling gesteld 20% van de auto's die verkocht worden in 2020 op alternatieve brandstoffen te laten rijden. Op nationaal niveau zijn geen concrete doelstellingen gesteld met betrekking tot waterstof in transport, maar wordt wel onderzoek gestimuleerd dat gerelateerd is aan de inzet van waterstof in de energievoorziening. De huidige vrijstelling van BPM voor hybride voertuigen is een tijdelijke maatregel, maar is wel een duidelijke stimulans voor de ontwikkeling van alternatieven voor fossiele brandstoffen.

### **6.4      Toekomstmuziek**

De transitie naar een duurzame energievoorziening waarin waterstof een rol kan spelen is een transitie die vele fases kent, en pas op lange termijn een grote rol kan gaan spelen. De vraag naar waterstof zal moeten groeien, beginnende met kleinschalig gebruik in stationaire of mobiele toepassingen, zodat de benodigde infrastructuur en voorzieningen kunnen worden opgebouwd. Indien de vraagzijde





van waterstof toeneemt wordt de aanbodzijde gestimuleerd zich te ontwikkelen, en op een kostenefficiënte wijze waterstof te produceren. De grootste drijfveren voor waterstof in transporttoepassingen zijn volgens stakeholders stijging van de olieprijs en technologische ontwikkeling. Indien de olieprijs stijgt wordt de ontwikkeling van alternatieve brandstoffen gestimuleerd en de concurrentiepositie versterkt ten opzichte van fossiele brandstoffen. Technologische ontwikkeling helpt knelpunten op het gebied van kosten en technologie weg te nemen.

Concrete acties die ondernomen worden om de transitie naar waterstof voor transporttoepassingen te bewerkstelligen zijn momenteel gericht op onderzoek en ontwikkeling in combinatie met voorbeeldprojecten. Deze acties zullen in de toekomst moeten worden doorgezet, gericht op toekomstige commerciële inzet van voertuigen die rijden op waterstof. De overheid kan in het wegnemen van twee knelpunten een rol spelen, namelijk het gebrek aan infrastructuur en de kosten van waterstof. Bij de ontwikkeling van een infrastructuur dient de overheid een coördinerende en trekkende rol in te nemen. Door middel van de inzet van financiële instrumenten kan de overheid de kosten voor transporttoepassingen van waterstof in vergelijking met fossiele brandstoffen reduceren. Hierbij moet gedacht worden aan belastingverlaging, emissiehandel en het doorberekenen van externe effecten van fossiele brandstoffen. In de toekomst zal industriële massaproductie ook een rol spelen in het verlagen van de kosten. Om het duurzame karakter van waterstof tot uiting te laten komen zal de overheid moeten waken dat waterstof op een duurzame wijze wordt geproduceerd, zodat uiteindelijk de twee kansen van waterstof volledig worden benut.

Doordat waterstof pas op de lange termijn in beeld komt als commerciële optie zijn veel onvoorziene invloeden denkbaar die het eindbeeld veranderen. De ontwikkeling van technische-, maatschappelijke en beleidsmatige aspecten oefenen hier invloed op uit. De toekomstige energievoorziening in transport zal hoe dan ook een duurzaam karakter krijgen, waar waterstof een rol in kan spelen. Gezien de vele onderzoek- en ontwikkelingsinspanningen door verschillende actoren wordt waterstof gezien als een serieuze optie als energiedrager in transporttoepassingen.



## Literatuurlijst

[AcceptH2, 2004]

Accept H2; <http://www.accepth2.com>; 10-05-2004 bekeken.

[Aihara, 2001]

Aihara, Y.; *R&D on High-Efficiency Hydrogen Production System for Hydrogen Supply Station*; Petroleum Energy Centre; 2001.

[AMPERE, 2000]

Commissie AMPERE; *Rapport van de commissie voor de Analyse van Productiemiddelen en Elektriciteit en de Reoriëntatie van de Energievectoren (AMPERE) aan de Staatssecretaris voor Energie en duurzame Ontwikkeling*; oktober 2000.

[Azar et al., 2004]

Azar, C., K. Lindgren, B.A. Andersson.; *Hydrogen or methanol in the transport sector*; [http://fvt.fy.chalmers.se/PDF-docs/CA/KFB\\_final\\_March\\_17.pdf](http://fvt.fy.chalmers.se/PDF-docs/CA/KFB_final_March_17.pdf); 20 april 2004 bekeken.

[Barbir, 2004]

Barbir, F.; *Safety issues of hydrogen in vehicles* [http://www.iahe.org/hydrogen\\_safety\\_issues.htm](http://www.iahe.org/hydrogen_safety_issues.htm); 29 maart 2004 bekeken.

[BMW, 2004]

BMW; <http://www.bmwworld.com/models/750hl.htm>; 22 maart 2004 bekeken.

[CBS, 2004]

Centraal Bureau voor de Statistiek - Aardgasbalans; <http://statline.cbs.nl>; bekeken 19-05-2004.

[CEG, 2002]

CEG; *Mededeling van de commissie van de raad en het Europees Parlement; Eindverslag over het Groenboek 'Op weg naar een Europese strategie voor een continue energievoorziening'*; Commissie van de Europese Gemeenschappen; juni 2002.

[CIRCA, 2004]

CIRCA; <http://forum.europa.eu.int/Public/irc/rtd/eurhydrofuelcellplat/home>, 12 maart 2004 bekeken.

[Childers, 2004]

Childers, C.; ZEV Section. Contact per email 10-04-2004.

[COEC, 2003]

COEC; *Investing in Networks and Knowledge for Growth and Jobs*; Commission of the European communities; 2003.

[Contadini, 2002]

Contadini, J. F.; *Life Cycle Assessment of Fuel Cell Vehicles – Dealing with Uncertainties*; University of California, Davis; 2002.

[Cracknell et al., 2004]

Cracknell, R.F., J.L. Alcock, J.J. Rowson et al.; *Safety considerations in retailing hydrogen*; <http://www.waterstof.org/NWVOverigenIndex.htm>; 25 mei 2004 bekeken.

[MA, 2004]

Milieuactueel; <http://www.milieuactueel.nl/archief/663.htm>, 19-05-2004 bekeken.

[Dings, 2001]

Dings, J., B. Kampman, J. Vermeulen; *Benzine, diesel en LPG: balanceren tussen milieu en economie - Update van 'Optimale brandstofmix voor het wegverkeer'*; Delft, 2001.

[DOE, 2004]

United States Department of Energy; *Hydrogen Posture Plan - An Integrated Research, Development, and Demonstration Plan*; February 2004.

[DOE 1, 2002]

United States Department of Energy; *A national vision of America's transition to a hydrogen economy – To 2030 and beyond*; February 2002.

[DOE 2, 2002]

United States Department of Energy; *National hydrogen energy roadmap*; November 2002.

[DOE 3, 2004]

United States Department of Energy; *Energy Efficiency and Renewable Energy*; <http://www.eere.energy.gov/hydrogenfuel>; 11-05-2004 bekeken.

[EC, 2003]

European Commission; *Hydrogen Energy and Fuel Cells – A vision of our future*; Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities; 2003.

[EC 1, 2001]

European Commission; *Green Paper - Towards a European strategy for the security of energy supply*; Luxembourg - Office for Official Publications of the European Communities; 2001.



[EC 2, 2001]

European Commission; *White Paper — European transport policy for 2010: time to decide*; Luxembourg - Office for Official Publications of the European Communities; 2001.

[EC 3, 2004]

European Commission – Community Research; *6th Framework Programme First Call – Hydrogen & Fuel cell projects under negotiation*; Brussel; Januari 2004.

[ECN, 2001]

Reijers, H.Th.J., A. de Groot, P. Lako.; *Evaluatie van waterstof-gebaseerde concepten en systemen*; ECN; april 2001.

[ENV, 2004]

Environmental chemistry; <http://environmentalchemistry.com/yogi/periodic/H.html>; 25 maart 2004 bekeken.

[Faaij, 2001]

Faaij, A., P.C. Hamlinck, C.N. *Future prospects for production of methanol and hydrogen from biomass - System analysis of advanced conversion concepts by ASPEN-plus flowsheet modeling*; University of Utrecht; September 2001.

[FCBC, 2004]

Fuel Cell Bus Club, <http://www.fuel-cell-bus-club.com>; 26 april 2004 bekeken.

[FCPropulsion, 2004]

Fuelcell Propulsion Institute; [www.fuelcellpropulsion.org](http://www.fuelcellpropulsion.org); 10 mei 2004 bekeken.

[GM, 2004]

General Motors; <http://www.gmeurope.com/marathon/index.htm>; 19 mei 2004 bekeken.

[Groot et al., 2003]

Groot, A. de., H. Jeeninga; *Praktijkexperimenten waterstof in de gebouwde omgeving*; ECN; december 2003.

[Kruse, 2002]

Kruse, B., S. Grina, C. Buch; *Hydrogen - Status og muligheter*; Bellona; 2002.

[Kouwenhoven, 2004]

Kouwenhoven E.; *Rijden op water*; AD Magazine p.p. 12-17; 7 februari 2004.

[Licht et al., 2003]

S. Licht, L. Halperin, M. Kalina et al.; *Electrochemical potential tuned solar water splitting*; Chemical Communications; Issue 24 p.p. 3006-3007; 2003.

[Lovins, 2003]

Lovins, A. B.; *Twenty Hydrogen Myths*; Rocky Mountains Institute; september 2003.

[LTVE, 2000]

Lange termijn visie energievoorziening; *Energie en samenleving in 2050 - Nederland in wereldbeelden*; Ministerie van EZ; december 2000.

[Maddy, 2003]

Maddy, J., S. Cherryman, F.R. Hawkes, et al.; *Hydrogen 2003*; University of Glamorgan, Pontypridd; 2003.

[Mann et al., 1998]

Mann, M., J.P. DiPietro, J. Iannucci, et al.; *Exploring the Technical and Economic Feasibility of producing Hydrogen from Sunlight and Wind*; XII World Hydrogen Energy Conference; Buenos Aires; June 21-26.

[MINEZ, 2001]

Ministerie van EZ; *De reis: Transitie naar een duurzame energiehuishouding. Ministerie van EZ*; December 2001.

[MINEZ,2004]

Ministerie van EZ; Nieuwsbrief Energietransitie nr. 15; 15 maart 2004.

[NAS, 2004]

National Academy of Science; *The hydrogen economy: Opportunities, costs, barriers, and R&D needs*; National Academies Press, Washington; 2004.

[Nilsen et al., 2004]

Nilsen, S., H.S. Andersen; <http://www.waterstof.org/NWVOverigenIndex.htm>; Norsk Hydro ASA; 29 maart 2004 bekeken.

[NMP4, 2001]

Nationaal Milieubeleidsplan 4; *Een wereld en een wil - werken aan duurzaamheid*; Ministerie van VROM, Den Haag; 2001.

[Padró et al., 1999]

Padró, C.E.G., V. Putsche; *Survey of the Economics of Hydrogen Technologies*; NREL; Colorado; September 1999.

[Reijers, 2001]

Reijers, H.Th.J., A. de Groot, P. Lako. *Evaluatie van waterstof-gebaseerde concepten en systemen*; ECN; April 2001.

[Rozendaal, 2004]

Rozendaal S.; *Valkuilen vol waterstof*; Elsevier p.p. 110-111; 20 maart 2004.



[Thomas et al., 1998]

Thomas, C.E.S., B.D. James, F.D. Lomax Jr. et al.; *Integrated analysis of hydrogen passenger vehicle transportation pathways* in: Proceedings of the 1998 US DOE Hydrogen Programme Review. Directed Technologies, Inc.; Arlington, Virginia; 1998.

[Tillemans, 2003]

Tillemans F.; *Kanttekeningen bij de brandstofcel – De energieprijzen van schoon stadsvervoer*; Verkeerskunde 6 p.p. 32-37; 2003.

[TNG, 2003]

Team Nieuw Gas; *Wegen naar Nieuw Gas: 'De eerste stap is een daalder waard' - Transitiepaden naar een duurzame gasinzet*; 2003.

[Tromp et al., 2003]

Tromp, T.K., R.-L. Shia, M. Allen et al.; *Potential Environmental Impact of a Hydrogen Economy for the Stratosphere*; Science 300: p.p. 1740-1742; 13 juni 2003.

[USEU 1, 2003]

The United States Mission to the European Union; <http://www.useu.be/Categories/Energy/Nov2003HydrogenResearchAccord.html>; *Ministers sign agreement to coordinate hydrogen research*; 2003; 12 maart 2004 bekeken.

[USEU 2, 2003]

The United States Mission to the European Union ; <http://www.useu.be/Categories/Energy/Apr2903HydrogenInitiative.html>; *U.S. Explains international hydrogen initiative*; 2003; 12 maart 2004 bekeken.

[Verkerk, 1992]

Verkerk, G., J.B. Broens, W. Kranendonk et al.: *Binas – Informatieboek vwo/havo voor het onderwijs in de natuurwetenschappen*; Wolters Noordhoff, Groningen; 1992.

[VG2, 2004]

Vergroening van gas; <http://www.vg2.nl>; 27-05-2004 bekeken.

[VPRO, 2004]

VPRO; <http://info.vpro.nl/info/tegenlicht/index.shtml?7738514+7738518+7738520+14331107>; 6 april 2004 bekeken.

[Vries, 2004]

Vries, E. de; *2003 opnieuw topjaar windenergie in Nederland*; Duurzame Energie nr 2, p.p. 40; maart 2004.

[VROM, 2002]

Ministerie van VROM; *Vaste waarden, nieuwe vormen - Milieubeleid 2002-2006*; november 2002.

[Zhou et al. 2003]

Zhou, L., Y. Sun, K. Feng et al.; *Studies on the adsorption mechanism of gases on carbon nanotubes*; <http://www.waterstof.org/NWVOpslagIndex.htm>; 25 april 2004 bekeken.





**CE**

**Oplossingen voor  
milieu, economie  
en technologie**

Oude Delft 180

2611 HH Delft

tel: 015 2 150 150

fax: 015 2 150 151

e-mail: ce@ce.nl

website: www.ce.nl

Besloten Vennootschap

KvK 27251086

## **Op weg met Waterstof**

De potentie van waterstof als energie-  
drager voor transporttoepassingen

Bijlagen

### **Rapport**

Delft, 1 juni 2004

Opgesteld door: W.A. (Wouter) Hoogenraad





## A Eigenschappen van waterstof

Waterstof is onder standaard omstandigheden (298 K en 1 atm.) een kleurloos, reukloos en licht ontvlambaar gas. Het is het lichtste gas dat bestaat en is het meest voorkomende element in het zichtbare deel van het heelal (73% gew%). Het gas werd 'ontdenkt' door Henry Cavendish in 1766. In Tabel 22 is een overzicht opgenomen van scheikundige eigenschappen van waterstof.

Tabel 22 Chemische eigenschappen van waterstofgas

Eigenschappen waterstofgas		Eenheid
Symbol	H <sub>2</sub>	
Atoomnummer	1	
Atoommassa (H)	1,00797	u
Verbrandingswarmte	10,8	10 <sup>6</sup> J/m <sup>3</sup>
Dichtheid	0,090	kg/m <sup>3</sup>
Smeltpunt	14	K
Kookpunt	20	K
Ontvlam temperatuur [ENV,2004]	773	K
Explosie limieten [NAS,2004]		
Laag	18%	
Hoog	59%	
Ontvlam limieten [NAS, 2004]		
Laag	4%	
Hoog	75%	
Soortelijke warmte	14,3	10 <sup>3</sup> J/kg/K

Bron: Verkerk, 1992

Onder normale omstandigheden is de verbrandingswarmte van waterstof per kubieke meter significant lager dan andere brandstoffen omdat het gasvormig is. Bij de vergelijking van waterstof met andere brandstoffen wordt duidelijk dat per eenheid gewicht waterstof een relatief hoge verbrandingswarmte heeft. Verbrandingswarmte duidt echter alleen aan hoeveel energie vrijkomt bij de verbranding van stoffen, wat niet in verband staat met het gebruik in brandstofcellen. Bij gebruik van waterstof in brandstofceltoepassingen komt namelijk elektrische energie vrij door de chemische reactie.

Tabel 23 Vergelijking verbrandingswarmte verschillende brandstoffen

Brandstof	Verbrandingswarmte (10 <sup>6</sup> J/m <sup>3</sup> )	Verbrandingswarmte (10 <sup>6</sup> J/kg)
Waterstof	10,8	120
Aardgas (Gronings)	32	38
Benzine	33.000	46
Diesel	35.000 [Maddy, 2003]	43
Steenkool	-	29
Hout	-	16

Bron: Verkerk, 1992





## B Berekening waterstofproductie

Tabel 24 Berekening waterstofproductie

### Gegevens:

Aantal auto's NL 2003	6.854.743	auto's
Gem. Kilometrage 1990-1997	16.546	km/jaar

Benodigd per auto bij 19.312 km per jaar	185	kg H <sub>2</sub> /jaar
Factor voor kilometrage NL	0,85677	

Benodigde hoeveelheid H <sub>2</sub> per jaar	1.086.497.352	kg/jaar
---	---------------	---------

### Aardgas reforming

Productie H <sub>2</sub> per eenheid	394.200.000	kg/jaar
Benodigd	1.086.497.352	kg H <sub>2</sub>
Aantal eenheden benodigd	2,76	

Benodigd aardgas (23.000 Btu/lb)	150.137	kg/h
Dichtheid aardgas	0,83	kg/m <sup>3</sup>
Benodigde hoeveelheid aardgas	180.236	m <sup>3</sup> /h

Totale benodigde hoeveelheid aardgas	496.769	m <sup>3</sup> /h
Totaal benodigd aardgas per jaar	4.351.699.427	m <sup>3</sup> /jaar
Elektriciteit voor compressie	89.309	kW

### Windelektrolyse

Productie H <sub>2</sub> per eenheid	157.680	kg/jaar
Benodigd	1.086.497.352	kg H <sub>2</sub>
Aantal productie-eenheden benodigd	6.890,52	

Energie per productie-eenheid benodigd	3.656	KW
Totale energie benodigd	25.192	MW

Energie per windmolen	1	MW
Effectief per windmolen	0,25	MW

Aantal windmolens benodigd	100.767	windmolens
----------------------------	---------	------------

Hoeveelheid water benodigd per eenheid	600	kg/h
	600	l/h

Totale hoeveelheid water benodigd	4.134.313	l/h
	1.148,42	l/sec