

MASTER

H2: hype & hope

de productie, opslag en distributie van waterstof in de Verenigde Staten

Rijsdijk, V.

Award date:
2005

[Link to publication](#)

Disclaimer

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain

H2: Hype & Hope

*De productie, opslag en distributie van waterstof in de
Verenigde Staten*

Student : Vincent Rijdsijk
Opleiding : Techniek & Maatschappij
Instelling : Technische Universiteit Eindhoven
Opdrachtgever : Technisch-Wetenschappelijk Attachés
Nederlandse ambassade te Washington DC
Datum : April 2005

**NIET
UITLEENBAAR**

H2: Hype & Hope

Productie, opslag en distributie van waterstof in de Verenigde Staten

Naam : Vincent Rijdsdijk

Studentnummer : 0474686

Instelling : Technische Universiteit Eindhoven

Faculteit : Technologie Management

Opleiding : Techniek en Maatschappij

Maatschappelijke specialisatie : Technologie en Innovatiebeleid voor Advanced Economies

Technische specialisatie : Energietechniek

Afstudeerinstelling : Technisch-Wetenschappelijk Attachés (TWA)
Washington, D.C.

Eerste begeleider : Dr. ir. E.B.A. van der Vleuten
Faculteit Technologie Management
Technische Universiteit Eindhoven

Tweede begeleider : Dr. ir. Q.C. van Est
Faculteit Technologie Management
Technische Universiteit Eindhoven

Derde begeleider : Drs. R.A. Kleinenberg
Technisch-Wetenschappelijk Attaché
Ambassade van het Koninkrijk der Nederlanden
Washington, D.C.

Datum : April 2005

Abstract

This master's thesis contains a description of the developments in policy, technology and society concerning the production, storage and distribution of hydrogen in the United States. In addition, the consequences of these developments for the adoption of hydrogen as sustainable energy technology in the US are analyzed. The Technology Assessment approach is used as the analytical framework for the report, because it can be used for a systematic description of technological development and its societal environment. In addition, the approach can be used for determining the market potential of the competing technologies.

The Department of Energy (DOE) has developed a transition program to develop and implement a hydrogen economy, which is technocratic in nature. It focuses on developing existing "fossil" hydrogen production technologies and new distribution and storage technologies to realize a hydrogen economy.

The existing hydrogen market is chosen as starting point for the transition, despite current technological problems with storage and transportation and a complex regulatory system. The research is aimed at improving existing production technology, as well as developing and commercializing new storage technologies. These development decisions are mainly influenced by politics. Congress and DOE control the funds for development and assign them to research projects. The players in these projects are the national laboratories, universities and large companies from related sectors, such as industrial gases industry, oil industry and automobile manufacturing industry.

California has its own development program, in which technology plays only a minor role, for cooperation and demonstration projects are thought to be key of the development process. The Californian government invests in demonstration projects and also tries to involve consumers by means of a hydrogen information centre where consumers can learn about hydrogen technologies and their benefits.

The last chapter gives the conclusions of the report. In addition, recommendations for Dutch stakeholders are formulated in order to further stimulate and diversify the energy transition process in the Netherlands.

Voorwoord

Voor u ligt het afstudeerverslag over de productie, opslag en distributie van waterstof in de VS dat ik in het kader van mijn studie Techniek en Maatschappij aan de Technische Universiteit Eindhoven heb geschreven. Gedurende zes maanden heb ik in opdracht van het netwerk van Technisch-Wetenschappelijk Attachés van het ministerie van Economische Zaken onderzoek gedaan bij de afdeling van TWA in de Nederlandse ambassade te Washington DC.

Hierbij wil ik ook graag een woord van dank uitspreken aan de vele mensen die het mij mogelijk hebben gemaakt dit onderzoek te doen. Allereerst gaat mijn hartelijke dank uit naar Roger Kleinenberg en Paul op den Brouw, die beiden een belangrijke bijdrage aan dit verslag hebben geleverd. Niet alleen kon ik altijd bij één van beiden terecht met mijn vragen, het verslag had er ook heel anders uitgezien zonder hun kritische commentaar, waardoor ik gedwongen werd nog eens goed over bepaalde zaken na te denken. Ook de andere twee medewerkers van de TWA-afdeling, Els Pairel en Barbara Staals hebben veel bijgedragen door hun hulp bij het oplossen van problemen van organisatorische aard (zowel in het werk als daarbuiten).

Maar ook naast het werk hebben zij allen hun best gedaan mij een zo leuk mogelijke tijd in Washington te bezorgen, iets dat zeker is gelukt. Daarbij wil ik ook graag mijn dank uitspreken aan Kitty en Ineke, echtgenotes van Roger en Paul, en tevens aan Maurice en Maarten, echtgenoten van Els en Barbara.

Verder wil ik mijn dank uitspreken aan Erik van der Vleuten en Rinie van Est, mijn begeleiders in Nederland, die zowel tijdens als ook na mijn periode in Washington een grote bijdrage hebben geleverd aan het verslag, met name door mij door middel van discussies een dieper inzicht te verschaffen in de theoretische achtergronden van het verslag.

Het voert te ver om alle mensen die een bijdrage aan dit onderzoek hebben geleverd persoonlijk te bedanken. Niettemin wil ik mijn dank uitspreken voor alle mensen die tijd hebben vrijgemaakt om mijn vragen te beantwoorden en mij daarmee nuttige informatie te verschaffen. Door deze gesprekken heb ik een beter inzicht verkregen in zowel de situatie in de Verenigde Staten, alsook in de situatie in Nederland.

Samenvatting

Dit onderzoek, uitgevoerd in opdracht van het Technisch-Wetenschappelijk Attaché te Washington D.C., heeft drie doelen. Allereerst wordt de inzet van en het beleid rondom de productie, opslag en distributie van waterstof in kaart gebracht. Daarnaast wordt gekeken naar de invloed die het beleid en de resultaten ervan hebben op de adoptie van waterstof als duurzame energiedrager in de Verenigde Staten. Het derde doel is het in kaart brengen van mogelijke lessen die geïnteresseerden in Nederland kunnen leren uit de ontwikkelingen in de Verenigde Staten. Bij het onderzoek wordt gebruik gemaakt van de Technology Assessment-benadering (of TA-benadering).

De TA-benadering kan op twee manieren worden gebruikt. Enerzijds is het een middel om op systematische wijze technologische ontwikkelingen in kaart te brengen, om zo de gevolgen van deze technologieën te kunnen inschatten. Daarnaast kan het tevens worden gebruikt om de kansen van technologieën in te schatten en beslissingen te nemen over de toekomst van deze technologieën. De nadruk ligt in dit rapport op het inschatten van de kansen van de verschillende technologieën en het in kaart brengen van de invloed van de ontwikkelingen voor de adoptie van waterstof als duurzame energiedrager. Daarvoor wordt allereerst een referentiekader gegeven voor de ontwikkelingen in de vorm van de door de overheid gemaakte transitieplannen. Daarna wordt de huidige status van de bestaande technologieën beschreven, waarbij tevens wordt gekeken naar de maatschappelijke omgeving waarin deze technologieën worden gebruikt. Daarna wordt gekeken naar de ontwikkelingen die plaatsvinden onder het transitieplan en de resultaten die hierbij geboekt zijn. Daarnaast wordt ook hier gekeken naar de maatschappelijke omgeving waarin deze ontwikkelingen plaatsvinden, omdat deze een goede indicatie geven van de kansen van een technologie.

De regering Bush heeft, door middel van het National Energy Policy, indirect opdracht gegeven aan het Department of Energy (DOE) om een oplossing te vinden voor de groeiende afhankelijkheid van olie uit politiek instabiele en vijandige gebieden. Eén van de aanbevelingen was de integratie en uitbreiding van waterstofonderzoek om zo een waterstofeconomie te kunnen realiseren. Het DOE begon daarop aan de ontwikkeling van een transitieplan om een op waterstof gebaseerde economie te realiseren. Daartoe werd binnen het DOE een nieuwe afdeling opgezet, die dit proces moest opzetten en begeleiden, het zogenaamde Office of Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies.

De eerste stap in het proces was de vorming van een nationale visie over de (mogelijke) vorm van een waterstofeconomie. De bijeenkomst was bedoeld om de belangrijkste groepen in de transitie, te weten de bedrijven uit de energie- en vervoerssector, de onderzoeksweld en de overheid, bij elkaar te krijgen en consensus te bereiken over de eventuele vorm van een toekomstige waterstofeconomie. Daarbij valt op dat men verwacht dat de productie van waterstof met behulp van aardgas plaatsvindt en dat er geen consensus bestaat over het al dan niet bestaan van een infrastructuur. Naast de toekomstverwachtingen werd ook een overzicht gemaakt van factoren die remmend of stimulerend op de vorming van een dergelijke economie zouden kunnen werken. De veiligheid en zekerheid van de energievoorziening, met name de onafhankelijkheid van buitenlandse olie, en het broeikas-effect vormen samen met verwachte technologische

doorbraken de belangrijkste stimulerende factoren. De belangrijkste remmende factoren worden gevormd door de huidige kosten van waterstoftechnologie, het ontbreken van mogelijkheden voor waterstofopslag, het ontbreken van een visie op de ontwikkeling van infrastructuur en de politieke aarzeling om besluiten te nemen.

De tweede stap in de ontwikkeling van het transitieplan was vervolgens het opzetten van een routekaart, waarin een overzicht werd gemaakt van de verschillende bestaande en nieuwe, nog in ontwikkeling zijnde, technologieën. Tevens werd een overzicht gemaakt van de barrières in de ontwikkeling en het gebruik van de technologieën, waarna mogelijke oplossingstrajecten werden uitgezet. Ook werd bekeken op welke manier de verschillende taken op deze trajecten verdeeld konden worden tussen overheid, bedrijfsleven en kennisinstellingen, als vooruitblik voor het uiteindelijke transitieplan.

Dit uiteindelijke transitieplan, het Hydrogen Posture Plan, omvatte dan ook alle conclusies en informatie uit de eerdere rapporten en daarnaast tevens mijlpalen en doelstellingen voor de verschillende technologieën. Tevens werd een budgetindeling voor elke technologische categorie weergegeven. De verdeling van de fondsen en projecten binnen de verschillende technologische categorieën werd uitgevoerd binnen de werkplannen van de verschillende betrokken offices van het DOE.

De bestaande markt voor waterstof is gekozen als startpunt voor de transitie naar een waterstofeconomie, waarbij de bestaande technologieën een beginpunt vormen voor de ontwikkelingen. Er zijn drie middelen beschikbaar voor de productie van waterstof, waarvan stoomreforming van methaan de meest toegepaste is. De andere methoden zijn elektrolyse van water en partiële oxidatie van kolen. Stoomreforming is heeft zijn leidende positie te danken aan het feit dat aardgas tegen lage kosten beschikbaar is, waardoor de kosten van de productie het laagst zijn. Als zeer goedkope elektriciteit voorhanden is of slechts kleine hoeveelheden nodig zijn, wordt gebruik gemaakt van elektrolyse, terwijl partiële oxidatie wordt gebruikt voor co-productie van elektriciteit en waterstof (voor andere productieprocessen). De waterstof kan daarna nog worden omgezet in vloeibare vorm, indien daar aanleiding toe is voor transport of eindgebruik.

De geproduceerde waterstof wordt in de meeste gevallen direct gebruikt in een productieproces, omdat opslag gecompliceerd en duur is. Niettemin is er wel een scala aan opslagmiddelen voorhanden, waarbij de keuze afhangt van criteria als de duur van de opslag, de hoeveelheid die opgeslagen moet worden, de geologische omgeving en het al dan niet voorhanden zijn van externe energiebronnen. De best geschikte methode voor opslag wordt gevormd door uitgeputte gasvelden of in onbruik geraakte zoutmijnen, omdat grote investeringskosten overbodig zijn. Als deze middelen niet voorhanden zijn, wordt gebruik gemaakt van gecompriëerde gasopslag of van metaalhydrides. De keuze wordt hier beïnvloed door de aanwezigheid van restwarmte van andere processen, die de kosten voor gebruik van metaalhydrides kan verlagen tot onder de kosten van gecompriëerd gas.

Als de opslag voor langere termijn is, wordt vanwege de hoge kosten voor metaalhydrides gekozen voor gecompriëerd waterstofgas of vloeibare waterstof, waarbij de beschikbare ruimte en het eindgebruik doorslaggevende factoren in de keuze zijn. Opslag van waterstof in de vorm van ammoniak en methanol vindt zelden plaats vanwege het feit dat beide stoffen giftig zijn en de kosten tevens niet opwegen tegen andere middelen.

Het transporteren van waterstof naar consumenten kan in drie vormen plaatsvinden, te weten als gecompriëerd gas, vloeistof of in een metaalhydride, waarbij de keuze voor één van deze middelen wordt beïnvloed door factoren als afstand, hoeveelheid en vorm van eindgebruik.

Het transport van kleine hoeveelheden waterstof over korte afstand is het goedkoopst met behulp van gecompriemd gas aan boord van vrachtwagens of treinwagons. Voor grote hoeveelheden wordt gekozen voor een pijpleiding of vloeibare waterstof, afhankelijk van de continuïteit van de levering. Een pijpleiding is het meest rendabel bij continue levering, terwijl vloeibare waterstof ook geschikt is voor onregelmatige leveringen. Als gekeken wordt naar grote afstanden wordt transport als vloeibare waterstof het goedkoopst voor zowel kleine als grote hoeveelheden.

De markt wordt gedomineerd door vier grote bedrijven, die samen zowel de productie op locatie als de centrale productie grotendeels in handen hebben. Daarbij gaat het om zowel de productie van waterstofgas als die van vloeibare waterstof. De grootste afnemer van al deze waterstof is de olie-industrie, die grote hoeveelheden waterstof gebruikt voor de productie van transportbrandstoffen en daarmee een belangrijke marktmacht vertegenwoordigt. Deze relatie zal in de komende jaren nog belangrijker worden, omdat de raffinaderijen toenemende hoeveelheden waterstof nodig hebben om te kunnen blijven voldoen aan de strengere emissie-eisen voor brandstoffen. Nieuwe bedrijven worden niet verwacht op de markt door de hoge investeringskosten en de complexe en omvangrijke regelgeving. Deze regelgeving vormt tevens een belemmering voor het gebruik van waterstof als energiedrager.

Het transitieplan is gericht op het aanpassen en verbeteren van bestaande technologieën en het ontwikkelen van nieuwe technologieën voor de realisatie van een op waterstof gebaseerde economie. Daarbij wordt op het gebied van productie vooral gericht op de kleinschalige, decentrale productie van waterstof door stoomreforming van aardgas en het centraal grootschalig produceren van waterstof met behulp van nucleaire energie of partiële oxidatie van kolen. Daarnaast wordt geïnvesteerd in andere technologieën zoals waterstof uit biomassa, waterstofproducerende algen en waterstof uit water door directe omzetting met behulp van zonlicht. Er is veel vooruitgang geboekt in de ontwikkeling van kleinschalige decentrale productie door stoomreforming, waarbij vooral de nieuwe membraantechnologie een belangrijke rol speelt. Ook de productie van waterstof met algen maakt grote vooruitgang, met name op het gebied van betrouwbaarheid en continuïteit van productie, alhoewel de technologie nog lang niet marktrijp is.

Ook het onderzoek op het gebied van opslag verloopt moeizaam. De nieuwste tanks voor gecompriemd waterstofgas werken onder een druk van 700 bar en zijn op de markt gebracht. Het onderzoek richt zich nu voornamelijk op het ontwikkelen van nieuwe hydrides, zowel chemische als metaalhydrides. Daarbij wordt vooral gekeken naar een systeem dat werkt met een natriumboratooplossing, die kan worden verrijkt met waterstof tot natriumborohydride en een magnesiumhydrideslurrie. Daarnaast is er een nieuwe, nog onbekende chemische hydride die ontworpen is door Air Products. Om de nieuwe technologieën te testen wordt gewerkt aan een gestandaardiseerd testprogramma. De inspanningen met betrekking tot de distributietechnologieën zijn voornamelijk gericht op de analyse van mogelijke infrastructuuropties, waarmee een infrastructuurbeleid opgezet kan worden.

De ontwikkelingen zijn geïnitieerd door de Amerikaanse overheid, waarbij het DOE en het congres de belangrijkste drijvende krachten zijn. Het DOE ziet in waterstof een mogelijkheid om de groeiende afhankelijkheid van buitenlandse olie te reduceren, wat één van de doelstellingen van dit departement is. Ook het congres ziet graag een reductie van afhankelijkheid van de buitenlandse olie, omdat dit goed valt bij de kiezers en in het belang is van het land. Niettemin moet het congres ook rekening houden met

de belangen van het bedrijfsleven, dat een grote politieke macht vormt en politici kan maken en breken. Om deze reden moet worden gezorgd dat de bestaande grote bedrijven ook baat hebben bij de ontwikkelingen, wat kan worden bereikt door subsidies te bieden voor onderzoek. De verschillende sectoren uit het bedrijfsleven reageren verschillend op de ontwikkelingen. Voor de industriële gasproducenten bieden de ontwikkelingen een kans op de uitbreiding van hun markt en plukken zij, zelfs als de waterstofeconomie nooit tot stand komt, de vruchten van de subsidies. Niettemin vormt de opkomst van goedkope kleinschalige productietechnologie ook een bedreiging voor de huidige marktpositie, waardoor er nog enige reserves bestaan ten opzichte van de plannen. Voor de oliemaatschappijen en autobedrijven is het meedoen met de ontwikkelingen een strategische zet. Zij kunnen het zich niet veroorloven om niet mee te doen, voor als het inderdaad ooit tot een waterstofeconomie komt, maar zij hebben baat bij het in stand houden van de status-quo en zullen dan ook niet veel investeren in de nieuwe technologieën. De autobedrijven worden daarnaast onder druk gezet door de snelle ontwikkelingen die plaatsvinden in Japan.

Voor de kennisinstellingen bieden de ontwikkelingen goede kansen op nieuwe onderzoeksgelden en voorgezet onderzoek, waardoor de plannen goed ontvangen worden. Met name de opgerichte centers of excellence bieden mogelijkheden tot uitbreiding van bestaand onderzoek. Ook de voor de serviceverlenende bedrijven zijn er talloze mogelijkheden voor het verwerven van geld, omdat er gewerkt moet worden aan een verandering van de regelgeving, waarbij veel bedrijven betrokken zullen zijn.

De ontwikkelingen kunnen, buiten het beschrijven van de technologische ontwikkelingen en de betrokken spelers, ook worden bekeken vanuit een ander perspectief; dat van het geld. Kijkend naar het budget kan worden geconcludeerd dat het grootste deel van het beschikbare geld wordt besteed aan de productie en distributie, waarbij de productie het leeuwendeel vertegenwoordigt. De nadruk hier ligt op de grootschalige productie van waterstof met behulp van nucleaire energie en partiële oxidatie van kolen. De tweede categorie waar veel geld aan wordt uitgegeven is opslag, omdat dit een belangrijke en nog slecht ontwikkelde schakel in de waterstofeconomie vormt.

Naar aanleiding van de ontwikkelingen kan een aantal conclusies worden getrokken. Allereerst is het geschetste scenario voor een op waterstof gebaseerde maatschappij technocratisch van aard, met weinig oog voor eventuele maatschappelijke of economische invalshoeken waarmee de transitie sneller bewerkstelligd zou kunnen worden. Daarnaast spelen politieke factoren een grote invloed op de keuzes die zijn (en nog moeten worden) gemaakt. Dit is voornamelijk te zien aan de toewijzing van het onderzoek aan de grote bedrijven en aan de toewijzing van het budget aan productiemiddelen die gebruik maken van nucleaire energie en kolen. Hiermee wordt tevens het duurzame karakter van het plan op losse schroeven gezet.

In Europa, waaronder Nederland, wordt de energietransitie gekenmerkt door een terugtrekkende overheid, die slechts partijen bij elkaar brengt en marktpartijen en consumenten laat beslissen over de toekomst, terwijl in de Verenigde Staten de overheid een actieve financierende en sturende rol heeft. Dit verschil kan cultureel bepaald zijn, gezien de verschillen in houding van Amerikanen en Europeanen ten opzichte van technologische ontwikkelingen, maar of dit zo is zal nader onderzocht moeten worden. Niettemin biedt de Californische situatie een blik op een succesvolle samenwerking tussen bedrijfsleven en overheid, waarbij veel geleerd wordt van opgestarte demonstratieprojecten. Dit bewijst dat demonstratieprojecten toegevoegde waarde hebben voor de ontwikkeling en acceptatie van nieuwe technologieën, waardoor de transitie makkelijker verloopt. Het ontbreken van duidelijk zichtbare demonstratieprojecten kan daardoor remmend werken op een transitie.

Inhoudsopgave

ABSTRACT	1
VOORWOORD	2
SAMENVATTING	3
INHOUDSOPGAVE	7
1. INLEIDING	10
1.1 AANLEIDING ONDERZOEK.....	10
1.2 DOELSTELLINGEN.....	10
1.3 VRAAGSTELLINGEN.....	11
1.4 OPZET VAN HET VERSLAG.....	12
2. ANALYTISCH KADER	14
2.1 DE TA-BENADERING.....	14
2.2 SCENARIO'S.....	17
2.3 DE THEORIE ALS RODE DRAAD.....	18
3. HET BELEIDSKADER VOOR EEN WATERSTOFTRANSITIE	20
3.1. HET INTERNE BELEID.....	21
3.2. HET EXTERNE BELEID.....	23
3.2.1. <i>Het einddoel van de transitie</i>	23
3.2.2. <i>Op weg naar het transitieplan</i>	26
4. DE BESTAANDE MARKT	30
4.1 DE PRODUCTIE VAN WATERSTOF.....	30
4.1.1 <i>Stoomreforming van methaan</i>	30
4.1.2 <i>Partiële oxidatie</i>	31
4.1.3 <i>Elektrolyse</i>	32
4.1.4 <i>Productie van vloeibare waterstof</i>	33
4.1.5 <i>Vergelijking van de productiemiddelen</i>	34
4.2 DE OPSLAG VAN WATERSTOF.....	35
4.2.1 <i>Opslag van waterstofgas</i>	36
4.2.2 <i>Opslag van vloeibare waterstof</i>	36

4.2.3	<i>Metaalhydrides</i>	37
4.2.4	<i>Ammoniak</i>	38
4.2.5	<i>Methanol</i>	38
4.2.6	<i>Vergelijking van de verschillende methoden van opslag</i>	38
4.3	DE DISTRIBUTIE VAN WATERSTOF.....	41
4.3.1	<i>Transport van waterstofgas</i>	41
4.3.2	<i>Vloeibare waterstof</i>	46
4.3.3	<i>Hydridetruck</i>	47
4.3.4	<i>Vergelijking van de verschillende methoden van transport</i>	47
4.4	DE SPELERS & DE REGULERING.....	50
4.4.1	<i>De spelers</i>	50
4.4.2	<i>De regelgeving</i>	53
5.	DE ONTWIKKELINGEN ONDER HET TRANSITIEPLAN	55
5.1.	PRODUCTIE.....	56
5.1.1.	<i>Decentrale productie van waterstof</i>	56
5.1.2.	<i>Centrale productie</i>	58
5.1.3.	<i>Nieuwe methoden van productie</i>	59
5.1.4.	<i>Voortgang productie</i>	65
5.2.	OPSLAG.....	67
5.2.1.	<i>Opslag onder het Hydrogen Program</i>	67
5.2.2.	<i>Opslag onder het HFC&IT-programma</i>	68
5.2.3.	<i>Voortgang opslag</i>	70
5.3.	DISTRIBUTIE.....	70
5.3.1.	<i>Voortgang distributie</i>	71
5.4.	DE SPELERS IN HET HFC&IT-PROGRAMMA.....	71
5.4.1.	<i>Overheid en de politiek</i>	72
5.4.2.	<i>Kennisinstellingen</i>	73
5.4.3.	<i>Industrie</i>	74
5.4.4.	<i>Serviceverlenende-bedrijven</i>	75
5.4.5.	<i>Belangengroeperingen en consumenten</i>	76
5.5.	HET BUDGET VOOR HET HFC&IT-PROGRAMMA.....	76
6.	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	78
	BIJLAGEN	82

BIJLAGE 1: DE EIGENSCHAPPEN VAN WATERSTOF.....	82
BIJLAGE 2: OVERZICHT VAN EINDDOELLEN EN MIJLPALLEN.....	83
BIJLAGE 3: DWARSDOORSNEDE VAN EEN KOLENVERGASSER.....	85
BIJLAGE 4: SCHEMATISCH OVERZICHT VAN DE ELEKTRICITEITSCENTRALES TE WABASH EN TAMPA	86
BIJLAGE 5: OVERZICHT VAN HET CONDENSATIEPROCES VOOR WATERSTOF.....	87
BIJLAGE 6: OVERZICHT VAN DE PIJPLEIDINGNETWERKEN VAN DE INDUSTRIËLE GASPRODUCENTEN.....	88
BIJLAGE 7: DE SOCIALE KAART VAN DE VERSCHILLENDE SPELERS BINNEN HET WATERSTOFVELD.....	89
BIJLAGE 8: OVERZICHT VAN DE DRIE CENTERS OF EXCELLENCE EN HUN ONDERZOEKSGEBIED EN EXPERTISES.....	92
BRONVERMELDING.....	94
LITERATUUR.....	94
GESPREKKEN.....	100
CONFERENTIES	100
WEBSITES.....	100

1. Inleiding

1.1 Aanleiding onderzoek

In 2001 is door de Nederlandse overheid het project Energietransitiemanagement opgestart. Dit project heeft tot doel het ontwerpen en uitvoeren van beleid voor een transitie naar een duurzame energiehuishouding in Nederland, zowel in economisch als in milieukundig opzicht. Aan het project nemen bedrijven, organisaties en consumenten deel en het geheel wordt ondersteund door de diverse ministeries. Ook wordt getracht het beleid in te bedden in de internationale ontwikkelingen door middel van samenwerking en technologie transfer.

Ook de Verenigde Staten kondigden in 2001 aan een energietransitie te willen doormaken, in dit geval een transitie naar een op waterstof gebaseerde economie. De Amerikaanse overheid ontwikkelde hiervoor een uit twee hoofdgroepen bestaand transitieplan, dat werd gevormd door onderzoek en ontwikkeling van brandstofcellen (voor stationaire en mobiele toepassingen) en onderzoek en ontwikkeling van de technologieën die het gebruik van brandstofcellen mogelijk moet maken, zoals productie, opslag en distributie van waterstof.

Eén van de taakstellingen van het netwerk van Technisch Wetenschappelijk Attachés is het signaleren en rapporteren van technologische ontwikkelingen in het betreffende land die voor het bedrijfsleven, de kennisinfrastructuur en de overheid in Nederland van belang zijn. De ontwikkelingen op het gebied van waterstoftechnologie waren om deze reden dan ook een belangrijk punt in het werkplan voor 2004 van TWA Washington D.C.. Een eerder rapport beschreef uitgebreid de stand van zaken met betrekking tot de diffusie van stationaire brandstofcellen in de Verenigde Staten [Ulutas, 2003]. In dit rapport wordt daarom met behulp van de Technology Assessment-benadering onderzoek gedaan naar de technologieën die het gebruik van de brandstofcellen mogelijk moeten maken.

1.2 Doelstellingen

In het rapport wordt specifiek gekeken naar de inzet van en het beleid rondom duurzame energie in de Verenigde Staten, met de nadruk op de productie, opslag en distributie van waterstof en de relevantie van dit beleid voor belanghebbenden in Nederland. Om deze reden zijn de volgende drie doelstellingen opgesteld:

- Het in kaart brengen van de inzet van en het beleid rondom de productie, opslag en distributie van waterstof ten behoeve van duurzame energie in de Verenigde Staten.
- Het in kaart brengen van de (mogelijke) invloed van de situatie rondom de productie, opslag en distributie van waterstof op de adoptie van waterstof als duurzame energiedrager in de Verenigde Staten.
- Het inventariseren van mogelijke samenwerkingsverbanden tussen Nederland en de Verenigde Staten met betrekking tot productie, opslag en distributie van waterstof.

1.3 Vraagstellingen

Uit de doelstellingen zijn een aantal onderzoeksvragen afgeleid, waarmee aan de doelstellingen voldaan kan worden. Voor de eerste doelstelling is de volgende onderzoeksvraag opgesteld:

1. Welke beleidsmaatregelen zijn getroffen om de ontwikkeling van een op waterstof gebaseerde economie te bewerkstelligen?

Naast het beleid zijn er nog een aantal andere factoren bepalend voor de ontwikkelingen die zich binnen het onderzoeksgebied afspelen. Deze factoren moeten dus ook worden meegenomen in de analyse, omdat deze ook van belang zijn voor het beantwoorden van de tweede doelstelling. Hiervoor is de volgende deelvraag opgesteld:

2. Welke technologische, politieke, economische en juridische factoren spelen een rol bij de transitie naar een op waterstof gebaseerde economie in de Verenigde Staten met betrekking tot de productie, opslag en distributie van waterstof?

Omdat niet van tevoren bekend is welke factoren een rol spelen in de ontwikkelingen is het noodzakelijk het gehele veld op systematische wijze in kaart te brengen, wat wordt gedaan met behulp van de technology assessment-benadering. Deze benadering is ontworpen om op systematische wijze technische en maatschappelijke aspecten van technologieontwikkeling in kaart te brengen en hiermee de gevolgen van de technologie te bepalen. Deze analyse wordt opgedeeld in een aantal verschillende stappen. Allereerst wordt gekeken naar de technologische ontwikkeling, waarbij de technologieën worden onderverdeeld in technologische paden:

- a. Welke technologische paden zijn er te onderscheiden in de Verenigde Staten met betrekking tot de productie, opslag en distributie van waterstof?

Deze technologische paden zijn geen autonoom verlopende technische ontwikkelingsprocessen, maar worden mede gevormd door de invloed die actoren die invloed er op uitoefenen. De volgende stap wordt daarom gevormd door het in kaart brengen van de binnen het veld actief zijnde actoren, waarbij een onderscheid gemaakt wordt tussen direct bij de technologie betrokken actoren en niet-direct betrokken actoren:

- b. Welke actoren spelen een rol in de verschillende technologische paden?
- c. Welke overige actoren spelen een rol in het spelersveld?

Naast de actoren bestaan ook externe factoren die invloed uitoefenen op het verloop van de ontwikkelingen, welke worden meegenomen met behulp van de volgende deelvraag:

- d. Welke andere invloeden bepalen de context van het spelersveld?

Na het bepalen van de verschillende van invloed zijnde factoren is het van belang de interactie tussen deze factoren in kaart te brengen, omdat deze een belangrijke rol

speelt in de richting en de snelheid van de ontwikkelingen in het betreffende gebied. Daartoe is de volgende deelvraag opgesteld:

- e. Wat zijn de relaties tussen de technologische paden, de relevante actoren en de overige invloeden?

Na het in kaart brengen van het deelgebied kan worden gekeken naar de gevolgen van de ontwikkelingen voor de adoptie van waterstof als duurzame energiedrager. Dit wordt gedaan aan de hand van de volgende onderzoeksvraag:

3. Welke invloed kunnen de ontwikkelingen in de productie, opslag en distributie van waterstof hebben op de adoptie van waterstof als duurzame energiedrager?

Met behulp van de informatie uit de voorgaande vragen kunnen vervolgens aanbevelingen worden gedaan met betrekking tot eventuele samenwerkingsmogelijkheden:

4. Waar liggen de (eventuele) mogelijkheden tot samenwerking tussen Nederland en de Verenigde Staten op het gebied van productie, opslag en distributie met betrekking tot een op waterstof gebaseerde economie?

1.4 Opzet van het verslag

Voorgaand in dit hoofdstuk is een korte inleiding gegeven, gevolgd door de doel-en probleemstellingen. In het volgende hoofdstuk wordt vervolgens een korte theoretische beschouwing gegeven, waaruit een theoretisch kader wordt gevormd dat wordt gebruikt om de probleemstellingen te beantwoorden. Hoofdstuk 3 beschrijft vervolgens het beleidskader dat door het Amerikaanse departement van Energie is ontworpen om de Verenigde Staten een transitie naar een op waterstof gebaseerde economie door te laten maken. Het hoofdstuk geeft het antwoord op de eerste onderzoeksvraag en daarnaast vormt het beleidskader tevens het raamwerk voor de beschrijving van de technologische ontwikkelingen die in de daarop volgende hoofdstukken aan bod zullen komen. Het beantwoorden van de tweede onderzoeksvraag wordt in twee verschillende delen gesplitst. In hoofdstuk 4 wordt ingegaan op de bestaande markt voor waterstof, waarbij aandacht is voor de verschillende technologieën, de daaraan verbonden kosten, de regulering van de markt en de spelers op deze markt. In hoofdstuk 5 wordt vervolgens een beschrijving gegeven van de technologische ontwikkelingen die binnen het beleidskader worden uitgevoerd. Daarbij is tevens aandacht voor de zich rondom de technologische ontwikkelingen afspelende maatschappelijke ontwikkelingen, waarbij de nadruk ligt op de betrokken spelers en het door de overheid voor onderzoek en ontwikkeling beschikbaar gestelde budget.

Hoofdstuk 6 is een korte samenvatting en geeft antwoord op de eerste doelstelling. In hoofdstuk 7 worden vervolgens de ontwikkelingen uit het deelgebied (gevonden in de eerdere hoofdstukken) binnen het grotere geheel van een waterstoftransitie geplaatst door te kijken welke invloed de ontwikkelingen hebben voor de adoptie van waterstof als duurzame energiedrager in de Verenigde Staten.

Hoofdstuk 8 geeft vervolgens de conclusies en daarnaast aanbevelingen voor de manier waarop dit verslag kan bijdragen aan de ontwikkeling van samenwerking tussen de Verenigde Staten en Nederland op dit gebied.

2. Analytisch kader

Een transitie kan worden omschreven als een structurele verandering van de maatschappij die invloed heeft op alle lagen van die maatschappij, waarbij technologie vaak een belangrijke rol speelt. In het geval van het overgaan op een op waterstof gebaseerde economie is dus eveneens sprake van een transitie, omdat het gaat om een structurele verandering van de maatschappij, die plaatsvindt in alle lagen van de maatschappij. Om dergelijke transitie in kaart te brengen zijn meerdere modellen ontworpen, waaronder het multi-level-perspectief (MLP) en het Technology Assessment-model (ook wel TA-model). In dit rapport is gekozen voor gebruik van het TA-model boven het MLP, een keuze die het makkelijkst verklaren is aan de hand van een voorbeeld. Hiervoor vergelijken we het rapport van Ulutas [Ulutas, 2003] en dit rapport. Het eerste heeft tot doel het in kaart brengen van en doen van uitspraken over de diffusie van stationaire brandstofcellen in de Verenigde Staten. Gezien het feit dat diffusie een maatschappelijk proces is (alhoewel met een belangrijke technische component), is het logisch gebruik te maken van een model dat vanuit een maatschappelijk oogpunt kijkt naar de ontwikkelingen. Het MLP is een dergelijk model. Dit rapport heeft tot doel het in kaart brengen van en het doen van uitspraken over de stand van zaken met betrekking tot de productie, opslag en distributie van waterstof in de Verenigde Staten. Hiervoor wordt voornamelijk vanuit het oogpunt van de technologie gekeken, waardoor het dus logisch is een model te kiezen dat de technologie als uitgangspunt neemt (zonder voorbij te gaan aan de maatschappelijke achtergrond van deze technologie). Het TA-model is een dergelijk model, waardoor gekozen is voor dit model boven het MLP.

In de volgende paragraaf wordt dieper ingegaan op de achtergrond van de TA-benadering, waarbij aandacht is voor de verschillende manieren waarop TA kan worden uitgevoerd. In de daarop volgende paragraaf wordt vervolgens ingegaan op de manier waarop deze theorie gebruikt zal worden voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen.

2.1 De TA-benadering

Technology Assessment kan op verschillende manieren worden gebruikt. Zo kan de methode worden toegepast om de kansen van nieuwe technologieën in te schatten, maar het kan tevens worden gebruikt voor het op systematische wijze in kaart brengen van technologische ontwikkeling om vervolgens met behulp van deze informatie betere keuzes te kunnen maken over de toekomst van deze technologieën [Decker et al, 2004]. Dit laatste doel komt ook tot uiting in de definitie van Coates, een belangrijke drijvende kracht achter de ontwikkeling van technology assessment. Hij definieert technology assessment als volgt:

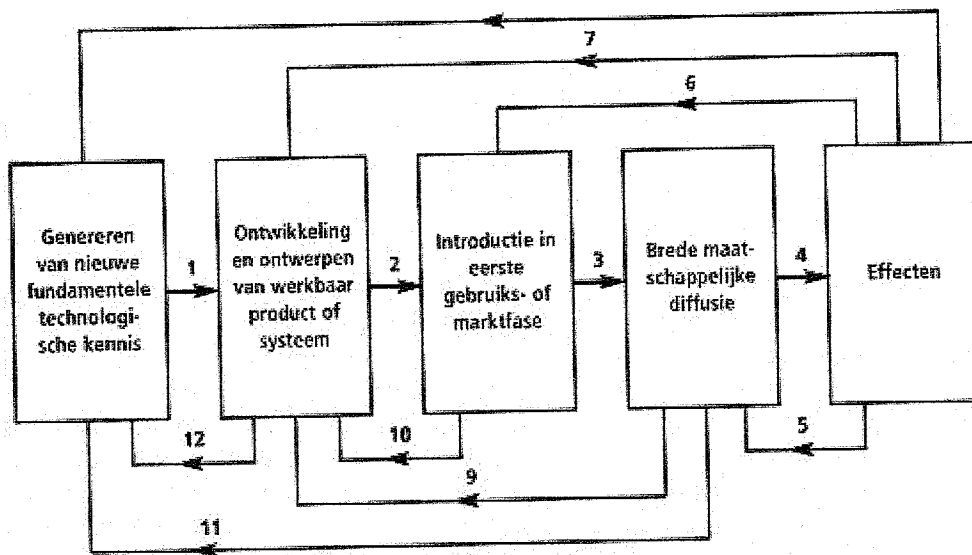
"A class of policy studies which systematically examine the effects on society that may occur when a technology is introduced, extended or modified. It emphasizes those consequences that are unintended, indirect or delayed." [citaat uit Porter et al, 1980, blz. 3].

Het gehele proces van in kaart brengen van de status van technologie en maatschappij en het inschatten van de effecten gebeurd aan de hand van een aantal stappen. Porter [Porter et al, 1980] onderscheidt bijvoorbeeld tien stappen in het uitvoeren van een TA-

onderzoek, die in chronologische volgorde worden uitgevoerd. Allereerst moet een probleemdefinitie worden opgesteld, waarmee een duidelijke afbakening van het onderzoek gegeven moet worden. Hierna wordt een beschrijving gegeven van de technologieën en de verwachte ontwikkelingen in de technologie (technology forecasting). Vervolgens worden deze ontwikkelingen in een maatschappelijk kader geplaatst door een beschrijving te geven van de maatschappelijke omgeving met daarin tevens een verwachting van de maatschappelijke ontwikkelingen (social forecasting). Na het schetsen van de technologieontwikkeling en de maatschappelijke omgeving van deze ontwikkelingen wordt gekeken naar de effecten die de invoering of verandering van de technologie met zich meebrengen. Dit gebeurt in een aantal verschillende stappen. Allereerst worden de mogelijke effecten geïdentificeerd, gevolgd door een analyse en een evaluatie van de effecten. Met behulp van deze gegevens kan dan een beleidsanalyse worden opgesteld. Dit vormt dan tevens de afsluiting van het onderzoek, waarna de resultaten openbaar gemaakt kunnen worden. Hieronder wordt de verschillende stappen van het proces kort behandeld.

De eerste stap in het proces is het in kaart brengen van de huidige stand van zaken met betrekking tot de technologie, waarvoor gebruik gemaakt wordt van een technologieontwikkelingsmodel. Dit model beschrijft aan de hand van een aantal fasen de ontwikkeling van nieuwe technologieën. Voorbeelden van dergelijke modellen zijn de modellen van Smit & Van Oost [Smit & Van Oost, 1999] en van Rogers [Rogers, 2000]. Beide modellen gaan uit van een aantal fasen voor ontwikkeling, alhoewel de exacte indeling van de fasen per model verschilt. Hieronder wordt essentie van de modellen kort beschreven aan de hand van het model van Smit & Van Oost.

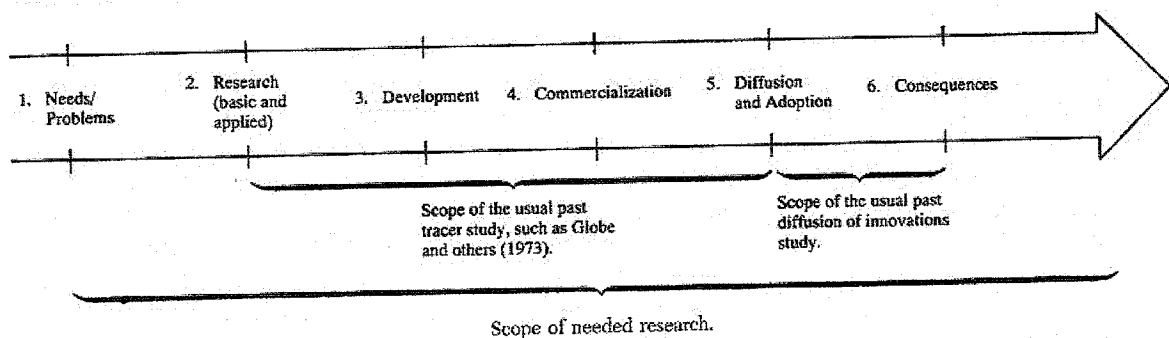
In dit model ontstaat technologieontwikkeling door het verkrijgen van nieuwe fundamentele kennis, welke men tracht om te zetten in een commercieel product. Dit commerciële product wordt vervolgens op de markt gebracht in een marktniche. Vanuit deze niche kan het vervolgens diffuseren naar een brede gebruikersgroep. Het gebruik van de technologie heeft vervolgens bepaalde effecten, welke sneller merkbaar worden naarmate de technologie wijder verspreid raakt. Dit proces komt overeen met de pijlen 1 t/m 4 in figuur 4.1. Niettemin is dit een veel te lineaire weergave van het proces, omdat zo talloze andere invloeden buiten beschouwing worden gelaten, die significante invloed kunnen uitoefenen op het ontwikkelingsproces. Zo kan bijvoorbeeld tijdens de ontwerpfase een gebrek aan fundamentele kennis optreden, waardoor men moet kiezen tussen hernieuwd fundamenteel onderzoek of het stopzetten van het gehele ontwikkelingsproject (waardoor het ontwikkelingsproces wordt afgebroken en de technologie nooit de markt zal bereiken). Ook kan na invoering blijken dat de technologie nog fouten bevat, waardoor het product aangepast moet worden (of het geheel van de markt verdwijnt). Maar ook de effecten van een technologie kunnen leiden tot onverwachte wendingen in het ontwikkelingsproces. Zo kan een negatief effect van een technologie leiden tot onderzoek om dit effect weg te nemen (zoals het verminderen van de uitstoot van wegtransport), maar het kan ook leiden tot een boycot op de technologie (zoals in Nederland is gebeurd met kernenergie). Uiteraard kan het ook nieuw onderzoek stimuleren om geheel nieuwe toepassingen te vinden (onderzoek naar brandstofcelauto's tegen uitstoot). Maar onverwachte toepassingen kunnen ook juist leiden tot een snellere verspreiding van de technologie.



Figuur 2.1: overzicht van de verschillende ontwikkelingsfasen van technologie [Smit & Van Oost, 1999; 69]

Uit de beschrijving blijkt al dat het ontwikkelingsproces niet slechts bepaald wordt door technische eigenschappen, maar ook door maatschappelijke invloeden. Rogers [Rogers, 2000] stelt zelfs dat technologische ontwikkeling in de meeste gevallen wordt veroorzaakt door het ontstaan van een maatschappelijke behoefte aan die technologie (zie ook figuur 4.2).

Figure 4-1. Six Main Phases in the Innovation-Development Process, Showing the Limited Scope of Past Tracer Studies and of Past Diffusion Studies



Figuur 2.2: overzicht van de verschillende ontwikkelingsfasen van technologie [Rogers, 2000; 133]

Naast het feit dat de modellen geschikt zijn voor het weergeven van de huidige stand van zaken, kan het ook inzicht geven in de tweede stap van de TA-studie, die volgens Porter wordt gevormd door de technologievooruitzichten (technology forecast), omdat een indicatie wordt gegeven van de verschillende stappen die in de toekomst nog gezet moeten worden.

De derde en de vierde stap worden vervolgens gevormd door het beschrijven van de maatschappelijke context van de technologische ontwikkelingen en de vooruitzichten voor deze maatschappelijke context. Daarbij zijn een aantal elementen van belang,

waaronder de gevestigde technologieën en de daarbij betrokken bedrijven en instellingen en hun positie in de maatschappij (marktmacht, aanzien etc.), maar ook de in ontwikkeling zijnde technologieën. Na het uitvoeren van deze stappen wordt gekeken naar de effecten van de technologieën op de maatschappij, waarbij wordt gekeken naar directe en indirecte effecten van het gebruik. Dit wordt, zoals reeds eerder gezegd, in drie stappen gedaan. Eerst worden de mogelijke effecten geïdentificeerd, waarna deze worden geanalyseerd en geëvalueerd.

Naast de hierboven omschreven methode, kan ook gebruik worden gemaakt van de evolutionaire methode, waarbij uitgegaan wordt het feit dat er meerdere concurrerende technologieën op hetzelfde moment bestaan. Een deel van de technologieën zal de concurrentiestrijd niet doorstaan en verdwijnen, terwijl één of enkele andere technologieën dominant zullen worden in de markt (zoals de auto met interne verbrandingsmotor dominant is geworden boven de elektrische auto). De niet overlevende technologieën kunnen later worden gezien als zijpaden in het ontwikkelingsproces, alhoewel dit tijdens de ontwikkelingen nog niet te voorspellen is (zie figuur 3). Er zijn talloze factoren, zowel technisch als maatschappelijk van aard, die de uitkomst van de het selectieproces bepalen. Het inschatten van de kansen van een bepaalde technologie is derhalve een moeilijk proces, waarbij rekening gehouden moet worden met de technologische eigenschappen van de verschillende technologieën, maar tevens met de maatschappelijke omgeving ervan, die wordt gevormd door de consumenten, de overheid, het bedrijfsleven en andere betrokken organisaties. Alleen door al deze aspecten in ogenschouw te nemen kan iets gezegd worden over de kansen van een technologie. De kans van een technologie kan vervolgens weer invloed hebben op de toewijzing van de aanwezige middelen.

Daarnaast wordt vaak gebruik gemaakt van scenario's om de keuze voor de toewijzing van de middelen te vergemakkelijken. In de volgende paragraaf wordt daarom kort ingegaan op het begrip scenario en de manier waarop deze worden gebruikt in het selectieproces.

2.2 Scenario's

Iedereen neemt dagelijks beslissingen over de toekomst, waarbij sommige beslissingen verstrekkende gevolgen kunnen hebben. Bij deze beslissingen wordt gebruik gemaakt van een zogenaamde "mental map", een kaart van hoe wij denken dat de toekomst eruit zal gaan zien [Shell International, 2003]. In sommige gevallen zullen deze beslissingen goed uitvallen, in andere gevallen niet. Om beter te leren omgaan met de onverwachte gebeurtenissen in de toekomst, kan gebruik worden gemaakt van scenario's. Er zijn meerdere manieren om scenario's te definiëren. In dit verslag wordt gebruik gemaakt van de definitie van Davis, die een scenario definieert als een beschrijving van een mogelijke toekomst, waarbij de nadruk ligt op de sleutelprocessen en beslissingen die in deze toekomst genomen moeten worden [Davis, 1998]. Een scenario is dus een hypothese over hoe de toekomst eruit *zou* kunnen zien, waarmee niet gezegd is dat dit beeld ook daadwerkelijk gerealiseerd wordt. Het doel van een scenario is dan ook niet het voorspellen van de toekomst, maar het begrijpen van heden aan de hand van wat in de toekomst zou kunnen plaatsvinden. Zodoende zijn we beter voorbereid op onverwachte situaties en kunnen dan beter afgewogen beslissingen nemen. Om dit te kunnen doen moet een scenario een aantal elementen bevatten. Een scenario moet dynamisch zijn, omdat de toekomst ook niet statisch is. Daarnaast moet het een chronologische beschrijving bevatten van belangrijke gebeurtenissen, waarin tevens aandacht is voor de drijvende krachten en de handelingen van deze drijvende krachten,

maar ook voor de consequenties van en samenhangen tussen deze handelingen. Alleen op die manier kan een samenhangend toekomstbeeld worden geschetst. Ook geldt dat een scenario slechts een bepaalde tijdsspanne beschrijft, met een gefixeerd begin-en eindpunt [Rothmans et al, 2000].

Er zijn meerdere publicaties verschenen over het opstellen van scenario's. In dit verslag wordt gebruik gemaakt van "Exploring the Future", een uitgave van Shell Global Solutions waarin een duidelijk stappenplan wordt gegeven van hoe een scenario tot stand komt [Shell Global Solutions, 2003]. De eerste stap in het proces wordt gevormd door het vaststellen van wat er precies bereikt moet worden met het scenario (of de scenario's) en welke middelen hiervoor beschikbaar zijn. De volgende stap in het proces is het verbreden en aanpassen van bestaande wereldbeelden door het ter discussie stellen van de bestaande aannames (de bestaande mentale kaarten). Daarna kan, met behulp van de verzamelde informatie, een nieuwe mentale kaart worden opgesteld aan de hand van een coherent en geloofwaardig toekomstbeeld. Het maken van een mentale kaart alleen is echter niet voldoende, omdat de personen of organisaties die met de mentale kaart moeten werken, zich ook moeten kunnen relateren aan de uitkomsten. Het afstemmen van de mentale kaarten is dus een belangrijke stap in het proces, waarmee mensen leren inzien wat deze ontwikkelingen voor hen persoonlijk zouden kunnen betekenen. De laatste stap in het proces wordt gevormd door het verkennen van de omgeving en het begrijpen wat deze ontwikkelingen voor de scenario's betekenen. Aan de hand van de bestaande ontwikkelingen kunnen, met behulp van de scenario's, beslissingen over de toekomst genomen worden. Tevens kan alvast een voorzet gegeven worden voor het in de toekomst nogmaals doorlopen van een dergelijk proces, omdat het opstellen en gebruiken van scenario's het meest effectief is als dit het een in de tijd wederkerend proces is. Het hierboven beschreven proces wordt echter niet altijd met succes afgesloten, wat veelal te wijten is aan een verkeerde aanpak. Er bestaan vijf veel voorkomende fouten, welke we hieronder kort zullen bespreken. Allereerst hebben veel scenario's een "business-as-usual"-karakter, waardoor er weinig ruimte bestaat voor plotselinge veranderingen en verrassingen, met gevolg dat het effect van het scenario wegvalt. Daarnaast ontbreekt het veel scenario's aan een creatieve invalshoek en multi-disciplinariteit, waardoor er slechts een beeld vanuit één invalshoek ontstaat (dus een subjectief beeld). Verder zijn veel scenario's inconsistent, omdat voor verschillende delen van het scenario verschillende aannames zijn gebruikt en deze niet onderling zijn afgestemd. De laatste fout betreft het gebrek aan transparantie, voornamelijk door het niet expliciet maken van aannames en voorkeuren en het gebrek aan onderscheid tussen autonome en niet-autonome processen. Het is tevens mogelijk om scenario's te beoordelen aan de hand van deze eigenschappen en fouten.

2.3 De theorie als rode draad

Het realiseren van een op waterstof gebaseerde economie kan slechts plaatsvinden als er een beeld bestaat van hoe zo'n economie er nu eigenlijk uit moet zien. Daarnaast moeten ook de deelnemers van deze transitie naar deze economie hetzelfde beeld hebben van de toekomst om onderling te kunnen communiceren en het beeld te realiseren. Zoals in de vorige paragraaf al uitgelegd, is een scenario een hulpmiddel in dit proces. Een dergelijk scenario is dan ook beschikbaar in de vorm van de beleidsplannen van het Amerikaanse Department of Energy, waarbij zowel de toekomstvisie zelf, als een aantal mogelijke wegen daar naartoe genoemd worden. In hoofdstuk 3 wordt dan ook ingegaan op deze beleidsplannen, waarmee tevens de aan eerste doelstelling wordt voldaan. Daarbij wordt de plannen beschreven vanuit het

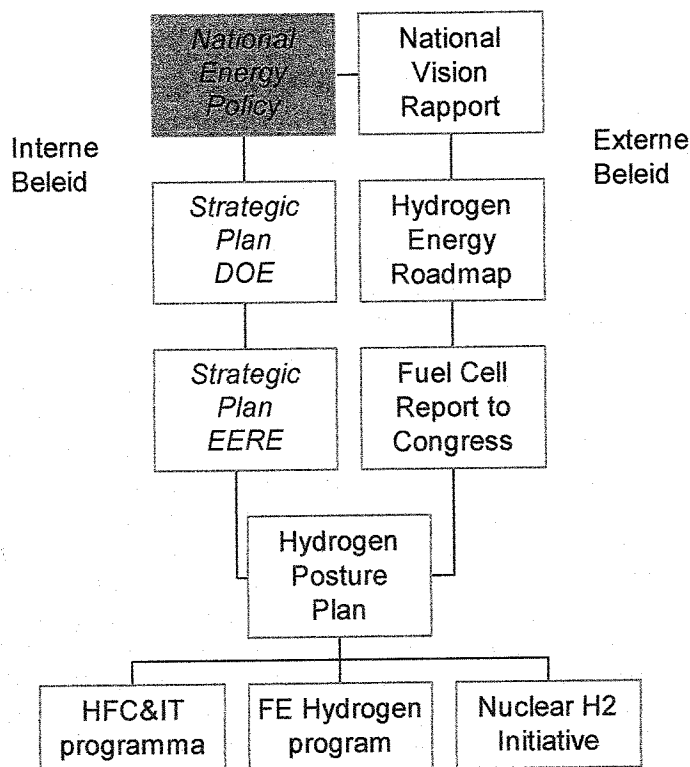
perspectief van de deelnemende bedrijven en instanties, met name het DOE. In de daarop volgende hoofdstukken wordt, eveneens vanuit de deelnemende partijen, gekeken naar de realisatie van deze plannen door het maken van een korte TA-studie van de ontwikkelingen. Het startpunt voor de ontwikkeling wordt gevormd door de bestaande markt, die in hoofdstuk 4 behandeld wordt. Er wordt gekeken naar de op dit moment in gebruik zijnde technologieën en de kosten van deze technologieën, gevolgd door een analyse van de spelers en de regulering van de markt. Hoofdstuk 5 gaat vervolgens in op het onderzoek naar verbetering van bestaande en de ontwikkeling van (mogelijke) toekomstige technologieën, die momenteel nog in het ontwikkelingsstadium verkeren. Daarbij wordt in de eerste paragraaf een beschrijving gegeven van de huidige stand van zaken met betrekking tot de nieuwe technologieën, waarna een vooruitblik (technology forecast) wordt gegeven in paragraaf 2. Paragraaf 3 en 4 behandelen vervolgens de maatschappelijke omgeving van de technologische ontwikkelingen door te kijken naar de betrokken spelers en het budget dat voor de verschillende technologieën beschikbaar gesteld is.

In hoofdstuk 6 wordt vervolgens kritisch teruggekeken op de eerdere hoofdstukken. Daarbij wordt gekeken naar de opzet van het programma, de deelnemers in het programma (en het ontbreken ervan).

Hoofdstuk 6 vormt vervolgens het afsluitende hoofdstuk van het verslag. In dit hoofdstuk wordt allereerst kritisch gekeken naar de ontwikkelingen die in de eerdere hoofdstukken beschreven zijn. Daarna worden, met behulp van de informatie, conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek geformuleerd. De conclusies vormen hierbij dan ook meteen de antwoorden op de onderzoeksvragen.

3. Het beleidskader voor een waterstoftransitie

De interesse in waterstof als energiedrager dateert uit de jaren '50, toen brandstofcellen werden ontworpen voor het ruimtevaart programma. Sinds het begin van de jaren '90 is ook de interesse voor waterstof als vervanger voor olieproducten bijgekomen, iets dat vooral te merken is aan de toename van de wetgeving ter stimulering van waterstofonderzoek. In 1990 werd door het congres de Matsunaga Act aangenomen, waarin het United States Department of Energy (DOE) werd opgedragen onderzoek te doen naar waterstoftechnologieën voor gebruik in de maatschappij [Matsunaga Act, 1990]. In deze Act wordt het DOE opgedragen een vijfjarenplan te ontwikkelen om de gebieden van onderzoek, welke een sleutelrol vervullen in het realiseren van binnenlandse waterstofproductie, te identificeren en een plan te ontwerpen om binnen de kortst mogelijke tijd en consistent met marktcondities dergelijke productiecapaciteit te ontwikkelen. Daarnaast moest het DOE het gemaakte plan met medewerking van de industrie ten uitvoer brengen. Daarnaast moest het DOE demonstratieprojecten van sleuteltechnologieën opstarten om de (economische) levensvatbaarheid van waterstoftechnologieën te kunnen inschatten. Ook dienden deze demonstraties als voorbereiding op een grootschalig waterstofdemonstratieplan. Dit alles moest gebeuren in samenwerking met industrie, kennisinstellingen en andere overheidsorganen, waarvoor het Hydrogen Technical Advisory Panel in het leven werd geroepen. De act gaf tevens toestemming voor het toekennen van budgetten voor waterstofonderzoek voor de jaren 1992-1994. In 1996 werd deze act opgevolgd (en aangevuld) door de Hydrogen Future Act, waarin het DOE werd opgedragen het waterstofprogramma voort te zetten en uit te breiden, waarbij de nadruk lag op het ontwikkelen van de sleuteltechnologieën voor een waterstofeconomie, met name productie [Hydrogen Future Act, 1996]. Het onderzoek vanuit het DOE mocht niet concurreren met onderzoek dat al werd uitgevoerd door de industrie, maar er mocht wel onderzoek samen met de industrie worden uitgevoerd. Ook werden de onderzoeksbudgetten tot 2001 in deze act vastgesteld. Door de verandering van de regering Clinton naar de regering Bush veranderde ook het beleid op het gebied van waterstof. Dat begon in 2001 met de publicatie van het National Energy Policy, een rapport dat een lange termijn plan bevatte voor de ontwikkeling van de binnenlandse energievoorziening. Ondanks het feit dat het plan nooit officieel goedgekeurd is door het Congres zijn een aantal van de aanbevelingen uit het plan door het DOE geïmplementeerd in het beleid. Daaronder ook de aanbeveling om bestaande R&D op het gebied van waterstof te integreren en uit te breiden, omdat waterstof belofte heeft voor de toekomst [NEP, 2001; 6-12]. Het DOE concludeerde uit deze aanbeveling dat het noodzakelijk was om de mogelijkheid voor een waterstofeconomie te onderzoeken [National Vision, 2002]. Dit onderzoek werd gedaan door het Office of Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies, een nieuwe afdeling binnen het Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE) van het DOE. Deze afdeling stelde vervolgens vast dat voor een transitie naar een waterstofeconomie steun van groepen uit de maatschappij noodzakelijk zou zijn. Daarnaast moest het gehele plan en de uitvoering ervan passen binnen de doelstellingen van het DOE. Om die reden werd gewerkt via twee verschillende paden: een intern traject en een extern traject (zie figuur 3.1). De resultaten van beide paden zouden samenkomen in het uiteindelijke transitieplan. Dit zou vervolgens dan weer de basis vormen voor de RD&D-activiteiten van de verschillende DOE-afdelingen.



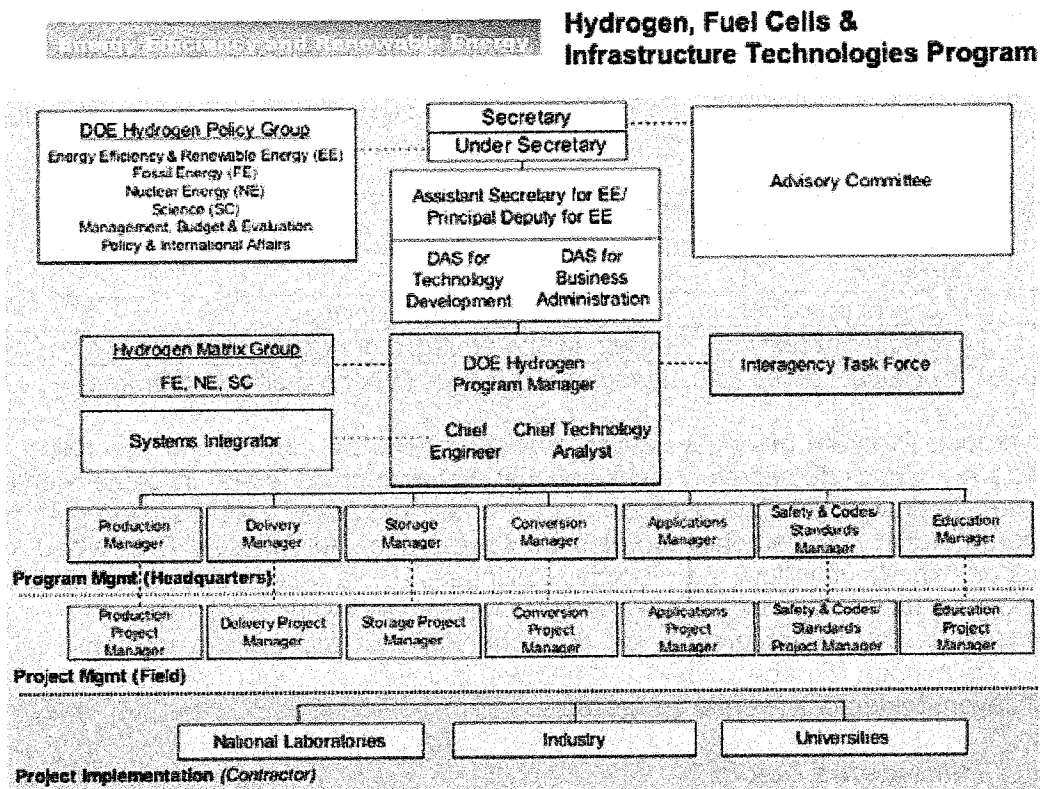
Figuur 3.1: overzicht van het beleidstraject voor de waterstoftransitie

In de komende paragrafen zal aan de hand van de gepubliceerde documenten een korte beschrijving worden gegeven van de resultaten van de beide trajecten, waarna kort wordt ingegaan op het uiteindelijke transitieplan en de manier waarop dit wordt gebruikt om de transitie te sturen.

3.1. Het interne beleid

Elk departement stelt aan het begin van een regeerperiode een strategisch plan op, waarin zij stellen welke doelen zij hebben en hoe zij deze denken te vervullen. Een dergelijk plan wordt dus ook opgesteld door het DOE, waarna ook de afdelingen binnen het DOE een eigen strategisch plan opstellen, waarin zij specificeren welke van de hoofdtakstellingen zij geheel of gedeeltelijk zullen uitvoeren en op welke wijze zij dit doen. Eén van de hoofdtaken van het DOE is het waarborgen van de energievoorziening in de Amerikaanse samenleving [DOE strategic plan, 2003]. Er zijn meerdere manieren om dit te bereiken, zoals het ontwikkelen van nieuwe energietechnologieën of het stimuleren van energiebesparing (bijvoorbeeld isolatie van huizen en hybride auto's). Het DOE ondersteunt private bedrijven in het precommerciële ontwikkelingstraject, waarbij het zich vooral richt op lange termijn fundamenteel onderzoek of risicovol onderzoek, waarbij waterstof in beide categorieën valt. Het onderzoek wordt uitgevoerd door de nationale laboratoria die onder het DOE vallen. Daarnaast valt het onderzoek naar waterstof ook onder het EERE, omdat één van de hoofddoelen van het EERE het reduceren of elimineren van de afhankelijkheid van buitenlandse olie is [EERE Strategic Plan, 2003]. Voor de huidige regering is het waterstofplan één van de belangrijkste stappen in het bereiken van deze onafhankelijkheid, wat de reden is voor de investering van grote hoeveelheden geld en

mankracht om de transitie te bewerkstelligen. Binnen het DOE is, in het kader van dit project, dan ook een uitgebreide beleidsstructuur opgezet. De leiding van het programma ligt bij de Hydrogen Program Manager, welke afkomstig is van het office of EERE (zie figuur 3.2). Hij is verantwoordelijk voor het project (dat het gehele transitieplan omvat) en heeft absolute autoriteit met betrekking tot het programma. Hij wordt daarbij ondersteund door de chief engineer en de chief technology analyst.



Figuur 3.2: een overzicht van de managementstructuur van de waterstoftransitie [Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies-program, 2003]

De chief engineer is verantwoordelijk voor de systeemintegratie van de acht subcategorieën en voor kosten-, tijd- en targetbeheersing tegen de in het posture plan gestelde baseline. Hij wordt daarbij geassisteerd door de system integrator. De chief technology analyst is verantwoordelijk voor analyse van de afzonderlijke onderdelen van het programma, waarbij hij wordt geassisteerd door de system integrator. Zijn taak is het uitvoeren van analyses met betrekking tot energie, milieu en economie. Hij adviseert vervolgens de program manager bij beslissingen over technologie, financiën en beleid. De acht subcategorieën van het waterstofprogramma worden geleid door de program managers, waarbij er voor elke categorie een manager is (de categorieën zijn productie, distributie, opslag, veiligheid, conversie, technologie validatie, regelgeving & standaarden en onderwijs/voorlichting). Deze managers worden vervolgens geassisteerd door de projectmanagers, die elk één of meer projecten onder zich hebben. Het uiteindelijke onderzoek wordt uitbesteed aan bedrijven en kennisinstellingen door middel van contracteren.

Er bestaan dus drie verschillende beleidsniveaus voor planning en management (zie tabel 3.1). Het eerste niveau is de program manager, die verantwoordelijk is voor de

integratie van het gehele programma op DOE-breed niveau, waarbij hij wordt ondersteund door de hydrogen matrix group (HMG) en de interagency task force (ITF). De HMG bestaat uit senior onderzoekers uit de afdelingen van Science, Fossil Energy en Nuclear Energy, Science & Technology, welke advies leveren over de integratie en de afstemming van het programma. De ITF is het overlegorgaan waarin andere ministeries vertegenwoordigd zijn, waarbij er overheidsbrede afstemming plaats kan vinden.

De verschillende categoriemanagers zijn verantwoordelijk voor het plannen en managen van de activiteiten in hun specifieke categorie (die meerdere technologieën en departementen kan omvatten). De projectmanagers zijn vervolgens verantwoordelijk voor het plannen en managen van de projecten die zij onder zich hebben. Elk niveau moet daarbij verantwoording afleggen aan het managementniveau boven zich.

Niveau	Persoon	Verantwoordelijk voor
1	Hydrogen program manager	Integratie waterstofprogramma op DOE-breed niveau
2	Program manager	Integratie op categorieniveau
3	Projectmanager	Afstemming project met hogere niveaus

Tabel 3.1: overzicht van de drie managementniveaus in het transitieprogramma

De Hydrogen Program manager is verantwoording schuldig aan de undersecretary en de secretary. De undersecretary evalueert het waterstofprogramma, in samenwerking met de Hydrogen Policy Group, waarin de betrokken DOE-afdelingen zijn vertegenwoordigd. De secretary wordt ondersteund door de Advisory Committee, die bestaat uit experts uit industrie en kennisinstellingen, en die direct advies levert over de voortgang en uitvoering van het programma, maar de secretary ook informeert over de consequenties van implementatie van de technologie en mogelijke manieren waarop problemen kunnen worden opgelost. Daarmee is intern dus een link gelegd tussen bedrijfsleven, onderzoekswereld en bestuur.

3.2. Het externe beleid

Het externe beleidstraject bestond uit drie afzonderlijke stappen. In de eerste stap werd een visie opgesteld over water een toekomstige waterstofeconomie in zou houden. De informatie voor deze visie werd betrokken uit de National Vision Meeting, een conferentie in november 2001, waaraan overheid, bedrijfsleven en kennisinstellingen deelnamen. De visie vormde vervolgens, samen met de Hydrogen Roadmap Meeting, de basis voor de National Hydrogen Roadmap. Deze routekaart geeft een aantal verschillende routes en de daarop voorkomende barrières naar een waterstofeconomie. Tevens zou er worden gekeken naar mogelijke samenwerkingsverbanden en taakverdelingen tussen overheid, kennisinstellingen en bedrijfsleven. Deze routekaart zou vervolgens, samen met de informatie uit het interne beleidstraject, de basis vormen voor het Hydrogen Posture Plan, dat een geïntegreerd overzicht zou bieden van alle RD&D op waterstofgebied. In de volgende paragrafen zal dieper worden ingegaan op de resultaten van de visie en de routekaart.

3.2.1. Het einddoel van de transitie

De eerste stap voor de ontwikkeling van de visie was de National Hydrogen Vision Meeting in november 2001. Het doel van deze bijeenkomst was niet slechts een startpunt en een visie te formuleren voor de transitie naar een op waterstof gebaseerde

economie, maar tevens het bij elkaar brengen van verschillende voor de transitie belangrijke partijen om zo maatschappelijk draagvlak te creëren voor de veranderingen. Talloze bedrijfstakken waren dan ook vertegenwoordigd, zoals de olie-industrie, de industriële gasindustrie, de automobielenindustrie, de brandstofcelindustrie, openbaar vervoerbedrijven en de overheid. Tijdens de conferentie formuleerden de deelnemers hun beeld over een (toekomstige) waterstofeconomie, waarbij naar twee specifieke jaartallen werd gekeken, namelijk 2030 en 2050 [National Hydrogen Vision, 2002]. Logischerwijs is de beschrijving voor 2030 uitgebreider dan die voor 2050, omdat 2030 eerder in de tijd ligt en dus meer gedetailleerd voorspeld kan worden¹. Daarom zal eerst worden ingegaan op de verwachtingen voor 2030, gevolgd door de verwachtingen voor 2050.

De waterstofeconomie in 2030

De verwachtingen voor de waterstofeconomie in 2030 zijn opgesteld door de verwachtingen van de deelnemers over een aantal categorieën te combineren. Deze categorieën zijn productie, infrastructuur, eindgebruikersmarkten, bijdrage van waterstof aan de energiemix van de Verenigde Staten en beleid. Uit de verwachtingen voor deze categorieën is vervolgens een totaalbeeld gecreëerd, dat hieronder is weergegeven.

Waterstof wordt in 2030 nog grotendeels geproduceerd uit aardgas zoals dat ook vandaag de dag gebeurt. Ook kolen worden genoemd als belangrijke bron voor productie van waterstof, mede omdat er grote hoeveelheden van aanwezig zijn in de Verenigde Staten. Het grote verschil met de hedendaagse productie wordt gevormd door het feit dat er CO₂-opslag plaatsvindt. Verder wordt ook productie van waterstof met nucleaire middelen genoemd, waarbij echter niet alle groepen hier zeker van zijn. De groep die het als zekerheid noemt, gaat er dan ook van uit dat deze vorm van productie de acceptatie van het publiek geniet. Een klein deel van de waterstof wordt geproduceerd uit biomassa of afval en tevens wordt waterstof teruggewonnen uit afvalgasstromen. De kosten voor waterstofproductie uit wind en zon beginnen in deze periode te dalen.

De schaal van productie is niet meer relevant voor de prijs van de geproduceerde waterstof, omdat zowel grootschalige als kleinschalige productie goedkope waterstof kunnen leveren, waardoor waterstof kan concurreren met benzine/diesel. De geleverde waterstofmix bestaat dan ook uit kleinschalige, op locatie geproduceerde waterstof en centraal, grootschalig geproduceerde waterstof. Efficiëntie van productie is van groot belang volgens ten minste één van de groepen.

Infrastructuur is een gebied waarop zich veel veranderingen hebben voorgedaan. Er blijken echter verschillen te bestaan tussen de visies van de verschillende groepen wat betreft de mate van verandering zowel als het soort verandering dat plaatsvindt. Twee groepen denken dat de voorzieningszekerheid van de infrastructuur verbeterd wordt door het vernieuwen en uitbreiden ervan. Dit doelt dan ook op het aanleggen van nieuwe aardgasleidingen. De derde groep denkt dat er in plaats daarvan meer leidingen voor waterstof zullen worden aangelegd, dat een aantal bestaande aardgasleidingen zal worden geconverteerd om waterstof te kunnen transporteren en dat duaal gebruik van leidingen voor waterstof en aardgas meer voor zal komen. De enige overeenkomst hier

¹ Als voorbeeld kan hierbij worden gedacht aan de ontwikkeling van de computer. Men had 50 jaar geleden niet kunnen voorspellen dat de computer vandaag de dag een onmisbaar deel van ons leven zou zijn. De technische ontwikkeling kwam pas in een veel later stadium goed op gang.

is dat de voorzieningszekerheid zal worden vergroot door uitbreiding en vernieuwing van de infrastructuur. Twee van de groepen denken dat de infrastructuur van on-site productie en centrale productie samen zullen smelten, de andere groep denkt dat de infrastructuur nog steeds in ontwikkeling is, terwijl on-site productie al relatief ver uitontwikkeld is. Niettemin zijn er ook overeenkomsten tussen de groepen. Zo wordt gesteld dat een deel van de bestaande tankstations waterstoftankfaciliteiten aanbiedt. Ook wordt verondersteld dat waterstof niet alleen wordt gebruikt voor transport maar ook voor het opwekken van elektriciteit, waardoor een zekere mate van versmelting optreedt tussen de twee verschillende energiedragers en hun infrastructuur. Voor afgelegen plaatsen wordt uitgegaan van on-site productie of levering per vrachtwagen, terwijl voor dichter bevolkte gebieden wordt uitgegaan van pijpleidingnetwerken, zoals de hedendaagse aardgasnetwerken. De belangrijkste conclusie is echter dat de opslag van waterstof grote technologische vooruitgang heeft ondergaan, waardoor de opslag niet langer een belemmerende factor voor de invoering van een waterstofeconomie vormt.

De opkomst van waterstof is allereerst te zien in afgelegen woongebieden die geen verbinding hebben met het reguliere elektriciteitsnet en als back-up elektriciteitsvoorziening voor bedrijven. Ook zal rond 2030 bijna al het openbaar vervoer en het grootste deel van de commerciële wagenpark waterstof als brandstof gebruiken. Eén van de groepen schat dat 25% van de privé-transportmiddelen ook gebruik zal maken van waterstof. De brandstofcel zal tegen deze tijd uitontwikkeld zijn, waardoor deze voor een lage prijs beschikbaar is voor iedereen. Daarnaast zal waterstof beschikbaar komen voor persoonlijke middelen zoals laptops. Deze ontwikkeling is voortgekomen uit onderzoek door de krijgsmacht. "On-demand" energie zal steeds belangrijker worden, waardoor waterstofapplicaties zullen worden gestimuleerd. Door al deze ontwikkelingen zal 1/3 van de energie gebruikt voor eindapplicaties afkomstig zijn uit waterstof. Hierbij wordt echter de voorwaarde gesteld dat brandstofcellen verkrijgbaar zijn voor minder dan \$50/kW. Indien dit niet het geval is, zal slechts 10-20% van de eindapplicaties gebruik maken van waterstof. Andere vloeibare brandstoffen zullen ook op langere termijn (na 2030) een rol blijven spelen in de Amerikaanse energiemarkt, maar deze rol zal steeds verder afnemen. De periode rond 2030 wordt gezien als een sleutelperiode in de transitie. Dit zal moeten worden gestuurd door een consistent en stabiel overheidsbeleid met lange termijn toewijding en haalbare doelen. Het federale beleid en het beleid van de afzonderlijke staten zullen hiervoor op één lijn gebracht zijn en brandstofcellen en waterstof zijn ingebed in de wetten en regulering van de Verenigde Staten. Omdat door de overheid wordt onderkend dat waterstof en brandstofcellen een belangrijke economische positie innemen wordt getracht de prijs ervoor laag te houden (zoals nu met andere transportbrandstoffen). Deze ontwikkeling wordt gestimuleerd door het toekennen van belastingvoordelen en het heffen van emissiebelastingen op onder andere CO₂.

Verwachting over de waterstofeconomie in 2050

De verwachtingen voor 2050 zijn weliswaar vager geformuleerd door de langere tijd, maar ze zetten de trend voor de verwachtingen in 2030 door. Fossiele brandstoffen spelen ook in 2050 nog een grote rol in de energievoorziening, zij het dan dat de geproduceerde CO₂ wordt opgeslagen, of wordt omgezet in koolstofproducten voor de bouwsector. Verder wordt waterstof ook geproduceerd uit hernieuwbare en nucleaire bronnen. Daardoor hebben zowel productie als het gebruik van waterstof geen

milieubelastende afvalproducten tot gevolg². Tevens is er sprake van verregaande voorzieningszekerheid en een stabiele vraag, waardoor iedereen onbeperkte toegang heeft tot schone en betaalbare energie. De infrastructuur voor het leveren van waterstof is volledig uitontwikkeld. Ook wordt gesteld dat de Verenigde Staten marktleider zijn in een floriserende, wereldwijde waterstofmarkt, waarin geen (beleidsmatige) handelsbarrières bestaan.

3.2.2. Op weg naar het transitieplan

De ontwikkelingen die kunnen leiden tot het uitkomen van de verwachtingen worden beïnvloed door talloze factoren, waarvan sommigen een significante invloed kunnen hebben. Voor het maken van een transitieplan is het dan ook van belang rekening te houden met de belangrijkste van de stimulerende alsook remmende factoren. Tijdens de National Vision Meeting werd een aantal van deze factoren genoemd, waarna door de deelnemers stemden over welke van deze factoren het belangrijkste geacht werden. Daarbij ontstond de volgende top vier van stimulerende factoren:

- Veiligheid van de Verenigde Staten door onafhankelijkheid van olie (Beleid; 17 stemmen);
- Een toenemende invloed van het broeikas-effect (milieu; 14 stemmen);
- Onafhankelijkheid/veiligheid van energievoorziening en opkomst CO₂-vrije technologie (Beleid; 13 stemmen);
- Belangrijke doorbraken in technologie voor productie en opslag van waterstof (Technologie; 10 stemmen).

De top vier van de remmende factoren zag er als volgt uit:

- De kosten van de productie, de opslag en het gebruik van waterstof (Markt; 19 stemmen)³;
- Gebrek aan helderheid over de te volgen weg voor infrastructuur; hoe te bepalen de waterstof aan de consument te leveren en welke minimale hoeveelheid transacties vereist is (overige factoren, 19 stemmen)²;
- Geen opslagtechnologie voorhanden die de gewenste opslagdichtheid kan leveren (Technologie; 11 stemmen);
- Politieke aarzeling/onwil om beslissingen te nemen & gebrek aan politieke ondersteuning (Beleid; 9 stemmen).

Een aantal observaties kan worden gemaakt. Allereerst kan worden afgeleid wat de reden is voor het meedoen van de verschillende spelers aan deze bijeenkomst. De veiligheid en continuïteit van de Amerikaanse energievoorziening is afhankelijk van buitenlandse olie en is daarmee gevoelig voor onderbreking. Een op waterstof gebaseerde economie kan dit risico van onderbreking wegnemen. Daarnaast wordt verwacht dat op het gebied van waterstoftechnologie binnen afzienbare tijd belangrijke doorbraken zullen plaatsvinden, iets dat getuigt van een groot vertrouwen in de technische capaciteiten. De kosten van de met de huidige technologie geproduceerde waterstof (en het vervoer en opslag ervan) worden ervaren als belangrijkste drempel op

² Hierbij wordt uitgegaan van het feit dat het gebruik van nucleaire energie geen afvalproducten oplevert.

³ De eerste twee factoren kregen evenveel stemmen en delen dus de eerste plaats. Om deze reden zijn beide redenen met een 1 genummerd.

de weg naar een nieuwe waterstofeconomie. De onzekerheid over de juiste weg voor de ontwikkeling van een infrastructuur, gecombineerd met politieke aarzeling of onwil om beslissingen te nemen, vormen eveneens belangrijke barrières voor de ontwikkeling en realisatie van een op waterstof gebaseerde economie.

Het ontwerpen van een door de overheid gesteund transitieplan zou, gezien de bovenstaande conclusies, een belangrijke stap in de richting van een waterstofeconomie betekenen. Naar aanleiding van de National Vision Meeting werd dan ook de volgende stap in het proces gezet: de ontwikkeling van een routekaart. Het doel van de routekaart was drieledig. Allereerst moesten de eerder geïdentificeerde problemen uit de visie nauwkeuriger worden omschreven (het eerste doel), waarna één of meerdere oplossingstrajecten bedacht konden worden (het tweede doel). Tevens werd nagedacht over de taakverdeling tussen industrie, kennisinstellingen en overheid, waarmee de problemen het meest efficiënt kunnen worden aangepakt (het derde doel). Het geheel werd verdeeld in een aantal aparte, maar onderling samenhangende categorieën, die elk een belangrijk deelaspect vormen van een waterstofeconomie. Op het gebied van productie werd geconcludeerd dat de huidige productietechnologieën niet toereikend zijn voor de implementatie van waterstof als energiedrager. Te hoge kosten en te lage efficiëntie maken het gebruik van waterstof te duur. Onderzoek zal de kosten van bestaande commerciële technologieën naar beneden moeten brengen, terwijl tegelijkertijd de efficiëntie wordt verbeterd. Dit geldt zowel voor centraal als voor decentraal geproduceerde waterstof. Het produceren van waterstof uit fossiele bronnen blijft de eerste tijd de meest gebruikte methode, omdat de kosten hiervan het laagst zijn en andere technologieën nog niet voldoende uitontwikkeld zijn. Om deze productiemethode milieuvriendelijker te maken moet onderzoek gedaan worden naar goedkope middelen om koolstofdioxide op te slaan. Tegelijkertijd moet ook het onderzoek naar nieuwe, milieuvriendelijke productietechnologieën worden voortgezet (en uitgebreid).

De ontwikkelingen op het gebied van distributie hebben grote invloed op de keuzes die gemaakt zijn en nog gemaakt moeten worden op het gebied van productie. De kosten, veiligheid en betrouwbaarheid van de distributiemiddelen zullen een belangrijke factor vormen in de beslissing tussen het toepassen van kleinschalige decentrale of grootschalige centrale productie en het oplossen van het "kip-ei"-probleem⁴ dat momenteel bestaat. De inspanningen moeten zich in eerste instantie richten op het verbeteren van de componenten van bestaande middelen voor transport. Hierbij kan bijvoorbeeld worden gedacht aan het verbeteren van sensoren, materialen voor pijpleidingen, compressoren en veiligheidscomponenten. Daarnaast zullen de verschillende systemen getest moeten worden in een "systeemaanpak", waarbij de test een geheel systeem omvat.

De sleutel voor het gebruik van waterstof wordt echter gevormd door opslagtechnologie, omdat het kunnen opslaan van waterstof een voorwaarde is voor het gebruik ervan voor mobiele toepassingen⁵. Grootschalige opslag is technisch weliswaar relatief goed ontwikkeld, maar de prijs ervan is hoog. Daarnaast geldt ook dat er geen geschikte opslag middelen voor mobiele toepassingen bestaat. Er is dan ook R&D nodig om

⁴ Bedrijven zullen niet investeren in grote, dure infrastructurele projecten als er geen vraag bestaat naar waterstof. Maar er zal geen vraag naar waterstof ontstaan als er geen infrastructuur beschikbaar is om het (tegen lage kosten) te leveren. Dit wordt ook wel het "kip-ei"-probleem genoemd (naar aanleiding van de vraag: Wat was er eerder, de kip of het ei?).

⁵ Het ontbreken van opslagmogelijkheden voor elektriciteit heeft de opkomst van de elektrische auto verhinderd.

bestaande technologieën te verbeteren en nieuwe technologieën te ontwikkelen. Hierbij wordt vooral gekeken naar prijs, prestatie en gebruikte materialen (wat sterk samenhangt met prijs en prestatie). Coördinatie tussen overheid en industrie op dit gebied is hiervoor noodzakelijk.

Naast de technologie, spelen ook een aantal maatschappelijke elementen een rol in het proces, zoals de applicaties die de consumenten (gaan) gebruiken, onderwijs/voorlichting en wetgeving/standaarden. Voor deze elementen zijn aparte categorieën ontworpen. De categorie applicaties houdt zich bezig met de wensen en verwachtingen van consumenten over producten. Waterstof kan worden gebruikt in laptops, auto's en mobiele telefoons, maar ook voor het opwekken van elektriciteit in huishoudens. Het ontwerpen van applicaties naar de wensen van consumenten is belangrijk, omdat de acceptatie ervan dan sneller verloopt. Belangrijke elementen zijn bijvoorbeeld gebruiksgemak, milieuvriendelijkheid, betaalbaarheid en veiligheid. Dit laatste element hangt sterk samen met de categorieën wetgeving/standaarden en onderwijs/voorlichting. De overheid moet in samenwerking met de industrie en internationale organisaties (ISO) standaarden ontwerpen voor alle elementen van de waterstofindustrie, zodat de veiligheid gewaarborgd kan worden en dit ook zichtbaar gemaakt kan worden bij de consument, zoals dat met de huidige energieapplicaties en industrieën al het geval is. Verder moet de consument worden voorgelicht over de voor- en nadelen van het gebruik van waterstof. Bestaande vooroordelen moeten worden weggenomen en objectieve informatie over wat waterstof precies is, moet worden aangeboden, zodat de consument een afgewogen keuze kan maken. Het element voorlichting speelt dus een belangrijke rol in de acceptatie van nieuwe technologie. Ook in het onderwijs moet er meer aandacht worden besteed aan de nieuwe waterstoftechnologie, zodat er een toekomstige generatie "waterstoftechnici" kan worden opgeleid.

Bovenstaande elementen vormen samen met de categorie conversie het weefwerk van de routekaart⁶. De conclusies uit dit rapport zijn vervolgens, samen met de conclusies uit het interne beleidsplan, verwerkt in het Hydrogen Posture Plan.

Het Hydrogen Posture Plan

Het Hydrogen Posture Plan is de leidraad voor de beoogde transitie naar een waterstofeconomie [Hydrogen Posture Plan, 2004]. Het geeft een overzicht van hoe men de transitie van de huidige maatschappij naar een op waterstof gebaseerde maatschappij wil uitvoeren en is opgesteld met behulp van de informatie en conclusies uit de beide beleidstrajecten. Voor elke categorie zijn mijlpalen en einddoelen opgesteld, die gebaseerd zijn op de huidige stand van zaken en de verwachtingen over hoe de waterstofeconomie eruit moet zien. Een overzicht van deze mijlpalen en einddoelen is weergegeven in bijlage 2. Daarnaast wordt ook een overzicht gegeven van het budget van de verschillende categorieën. De concrete invulling van het programma vindt plaats in de werkplannen van de betrokken DOE-offices en wordt gecoördineerd door het Office of Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies. Het merendeel van het onderzoek valt onder het Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program (HFC&IT-programma) van het EERE. Slechts de onderdelen waterstof met behulp van nucleaire energie en waterstof uit fossiele brandstoffen zijn uitbesteed. Het onderzoek naar waterstofproductie met behulp van nucleaire energie wordt gedaan door het Office

⁶ De categorie conversie gaat in op de omzettingapparatuur als brandstofcellen en verbrandingsmotoren. Aangezien dit buiten het onderwerp van dit verslag valt, wordt hier in dit verslag niet verder op ingegaan.

of Nuclear Energy, Science & Technology onder het Nuclear Hydrogen Initiative. Het onderzoek naar grootschalige waterstofproductie uit fossiele bronnen wordt uitgevoerd door het office of Fossil Energy, in samenwerking met het EERE.

In de volgende hoofdstukken wordt nader ingegaan op de huidige stand van zaken met betrekking tot de bestaande waterstofmarkt en de verdere ontwikkeling van bestaande en nieuwe waterstoftechnologie. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de verschillende werkplannen van de betrokken offices.

4. De bestaande markt

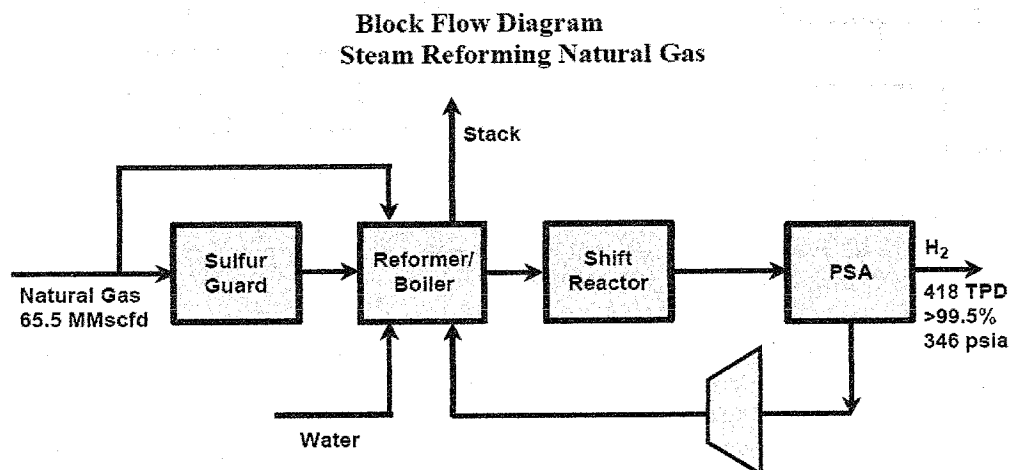
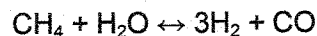
Waterstof speelt al langere tijd een belangrijke rol in de maatschappij als grondstof voor industriële doeleinden. Jaarlijks wordt wereldwijd 40 miljoen ton waterstof geproduceerd, waarvan 9 miljoen ton in de Verenigde Staten. Deze hoeveelheid waterstof is ruwweg geschikt voor de energievoorziening van 5 tot 8 miljoen huishouden per jaar [Hydrogen Energy Roadmap, 2002]. In dit hoofdstuk wordt gekeken op welke wijze deze waterstof wordt geproduceerd, gedistribueerd en opgeslagen wordt, waarbij als het ware in de huid van de verschillende in deze sector actieve spelers wordt gekropen. Voor elk van de drie verschillende categorieën (productie, distributie en opslag) is een paragraaf opgesteld waarin de beschikbare technologieën worden beschreven en vergeleken. Daarnaast wordt in de vierde paragraaf gekeken naar de (belangrijkste) spelers op de markt, maar ook naar de regulering van de markt. Beide vormen een belangrijke factor in de transitie naar de waterstofeconomie.

4.1 De productie van waterstof

De industrie kan gebruik maken van drie verschillende methoden voor de productie van waterstof. Bijna 95% van alle waterstof in de Verenigde Staten wordt geproduceerd door middel van stoomreforming [Padró, (datum onbekend)]. Daarnaast kan gebruik worden gemaakt van partiële oxidatie van kolen (kolenvergassing) en elektrolyse van water. Hieronder wordt kort ingegaan op de manier waarop de verschillende processen werken.

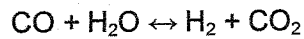
4.1.1 Stoomreforming van methaan

Het stoomreformingsproces zet in 4 stappen methaan om in waterstof en restgas (zie figuur 4.1). Het ingaande aardgas wordt gezuiverd van zwavel en vervolgens met een nikkelkatalysator omgezet in synthesegas volgens onderstaande reactie [Mintz, M. et al, 2002; 6]:



Figuur 4.1: het waterstofproductieproces door middel van stoomreforming schematisch weergegeven [Rutkowski, M.D. et al, 2002; 3-7].

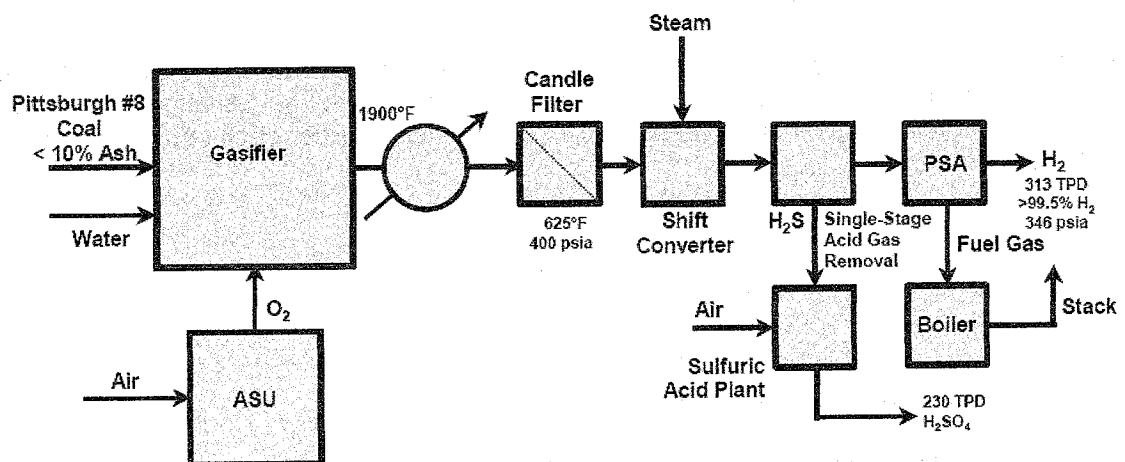
Het synthese gas bevat waterstof, koolstofmono-oxide (CO), CO₂ en methaan. Het synthese gas wordt vervolgens in een shiftreactor geleid, waar meer waterstof wordt geproduceerd door de koolstofmono-oxide met water te laten reageren [Mintz, M. et al, 2002; 7]:



De uitgaande stroom bestaat uit CO₂, waterstof en kleine hoeveelheden CO, waterdamp en methaan. Het gas wordt dan in een Pressure Swing Absorber (PSA)-eenheid gezuiverd, waarbij de waterstof wordt afgevoerd en het restgas wordt gebruikt om stoom te creëren voor de reformer.

4.1.2 Partiële oxidatie

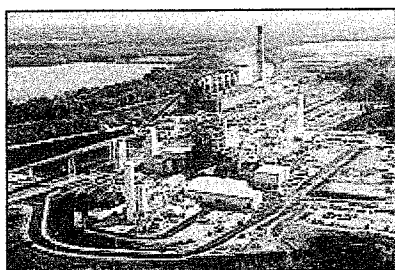
Waterstof kan ook uit kolen worden gehaald met behulp van een proces dat kolenvergassing heet, alhoewel bij hetzelfde proces ook gebruik gemaakt kan worden van olieresidu, teerzand, biomassa en afval (zie figuur 4.2). In het proces worden kolen, water en zuivere zuurstof aan een vergasser toegevoerd. De kolen worden halverwege toegevoerd en zakken langzaam naar beneden, terwijl de waterdamp en de zuurstof aan de onderkant worden toegevoerd en opstijgen, zodat het maximale reactietraject kan worden bereikt (zie bijlage 3). De waterstof wordt geproduceerd door een reactie tussen de drie toegevoerde stoffen, waarbij de waterstof afkomstig is uit de kolen (dat zijn koolwaterstoffen) en het toegevoerde water.



Figuur 4.2: een schematisch overzicht van een kolenvergassingsproces voor waterstofproductie [Rutkowski, M.D. et al, 2002; 3-14].

De vergasser produceert as (die wordt afgevoerd en verwerkt in andere producten) en synthese gas, dat aan de bovenkant wordt afgevoerd. Dit synthese gas is vervuild met onder andere zwavel en kleinere asdeeltjes. Daarom wordt het eerst door een as-filter gestuurd, waarna het door een shiftreactor wordt geleid om de nog meer waterstof te produceren. Het product wordt gezuiverd van zwavel, dat verder wordt verwerkt tot zwavelzuur. De resterende gasstroom wordt gezuiverd in een PSA-eenheid en het restgas wordt verbrand om warmte te produceren voor de andere processen.

Dit proces wordt momenteel al toegepast voor het op locatie produceren van waterstof voor bepaalde processen. Fabrieken die van dit proces gebruik maken zijn onder andere het Polk Power Station (Mulberry, Florida), Wabash River Coal Gasification Repowering Project (West Terre Haute, Indiana) en de Great Plains Synfuels Plant (Beulah, North Dakota). Het Polk Power Station (zie bijlage 4) gebruikt de vergassingstechnologie voor het produceren van elektriciteit. Het station heeft een bruto capaciteit van 315 MWe en een netto capaciteit van 250 MWe [b]. Het Wabash River project (zie bijlage 4) is ook een elektriciteitscentrale met een bruto productiecapaciteit van 296 MWe en een netto productiecapaciteit van 262 MWe met een efficiency van 39,7% [c]. De fabriek in Beulah produceert als hoofdproduct synthetisch aardgas voor energievoorziening met als bijproducten kunstmest, fenol en oplosmiddelen. De geproduceerde CO₂ wordt gebruikt voor secundaire oliewinning⁷ in Canada. Het proces wordt dus al wel gebruikt voor het produceren van syngas, maar nog niet voor het produceren van waterstof. Hiervoor zijn echter relatief kleine veranderingen in het proces noodzakelijk.

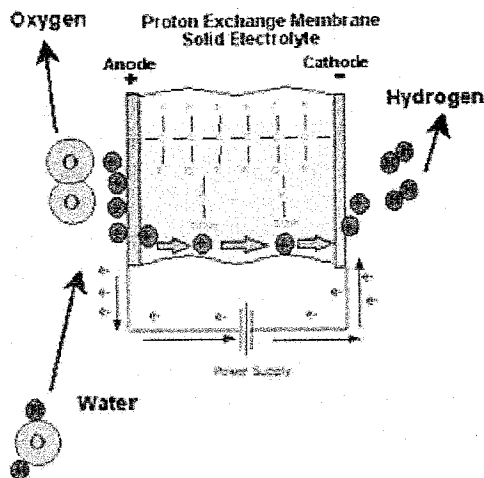


Figuur 4.3: de elektriciteitscentrale in Wabash [c]

4.1.3 Elektrolyse

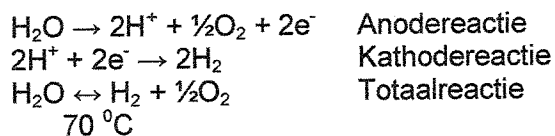
Elektrolyse is een proces waarbij water wordt omgezet in waterstof en zuurstof door middel van een elektrochemische reactie. Er bestaan twee typen elektrolysecellen: cellen met een vloeibare alkaline elektrolyt en PEM-cellen (waarbij PEM staat voor Proton Exchange Membrane). In de industrie wordt het meest gebruik gemaakt van alkaline-elektrolysecellen, omdat deze makkelijker op te schalen zijn en tevens omdat het warmtemanagement makkelijker is. Voor kleinschaliger toepassingen wordt echter meer gekeken naar PEM-elektrolysecellen. Deze hebben tevens het voordeel dat ze reversibel werken. Dit betekent dat ze waterstof kunnen produceren door water om te zetten met behulp van externe elektriciteit, maar dat ze ook waterstof kunnen gebruiken om elektriciteit te genereren. In figuur 4.4 is een doorsnede gegeven van de PEM-elektrolysecellen.

⁷ Oliewinning kent drie fasen. In de eerste fase van oliewinning komt de olie door de interne druk in het reservoir uit zichzelf naar boven. Tijdens de tweede fase vloeit de olie niet meer uit zichzelf en wordt de interne druk hersteld door gas of water in het reservoir te injecteren, waarvoor onder andere CO₂ wordt gebruikt. Tijdens de derde fase wordt gebruik gemaakt van zogenaamde waschemicaliën, stoominjectie of in-situ verbranding van een deel van de olie om de olie naar boven te laten komen.



Figuur 4.4: doorsnede van een PEM-elektrolysecel [Padro].

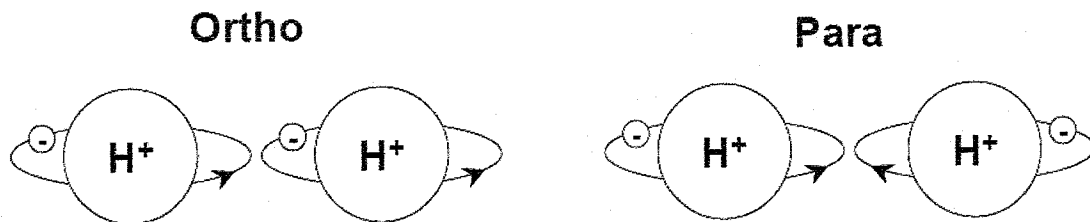
De stroom water wordt aangevoerd naar het membraan, waar het wordt door de elektriciteit uit elkaar valt en waterstofionen en zuurstofgas vormen. Het zuurstofgas wordt vervolgens afgevoerd naar buiten, de waterstofionen kunnen door het membraan heen migreren naar de kathode. Daar combineren de ionen zich met elektronen en vormen zo waterstofgas. Dit gebeurt aan de hand van de volgende reactievergelijkingen [Noponen, 2000]:



Op deze wijze kan zeer zuivere waterstof worden verkregen (ook afhankelijk van de zuiverheid van het water dat als grondstof wordt gebruikt). Nadeel van elektrolyse is dat de productie bij lage druk en lage temperatuur plaatsvindt, waardoor een extra compressor noodzakelijk is. De efficiëntie van commerciële elektrolysecellen is tussen de 70 en 75%, waarbij moet worden opgemerkt dat dit alleen de efficiëntie van de elektrolysecellen betreft en dus niet van het gehele productieproces.

4.1.4 Productie van vloeibare waterstof

Waterstof kan na productie worden omgezet van gas naar vloeistof. Hierbij wordt niet alleen de fase, maar ook de samenstelling van de stof verandert. Waterstof bestaat uit ortho-moleculen en para-moleculen. Bij ortho-moleculen hebben de elektronen dezelfde kern-spin (parallele kernspin), terwijl bij para-moleculen de elektronen juist een tegengestelde kernspin hebben (zie figuur 4.5).

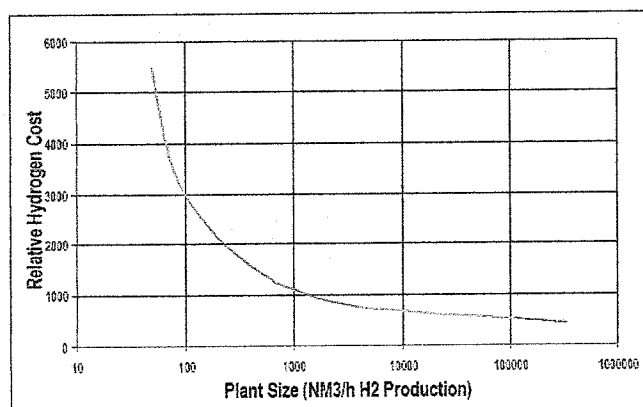


Figuur 4.5: de kernspin van waterstof [Drnevich, 2003].

Waterstofgas bestaat uit 75% ortho-moleculen en 25% para-moleculen, terwijl vloeibare waterstof uit 99,8% para-moleculen en 0,2% ortho-moleculen bestaat. Het omzetten van ortho-moleculen in para-moleculen kost 0,146 kWh_{th}/kg waterstof. Het afkoelen van het gas tot een temperatuur van -253 C^o kost 0,123 kWh_{th}/kg, voor een totale energievraag van 0,269 kWh_{th}/kg [3]. Maar het proces als geheel kost meer energie door de verliezen, waardoor uiteindelijk 12,5 en 15 kWh_e/kg. Deze energie wordt niet teruggewonnen bij gebruik, waardoor een extra verlies betekent. Het koelproces bestaat namelijk uit drie verschillende cycli (zie bijlage 5). De voeding wordt gemengd met gekoelde, teruggevoerde waterstof en wordt extern gekoeld. Daarna wordt het door twee vloeibare stikstofkoelsystemen geleid, waarbij de ontstane vloeibare waterstof wordt afgevoerd naar de opslag.

4.1.5 Vergelijking van de productiemiddelen

De keuze voor een bepaalde technologie is afhankelijk van de eisen die worden gesteld aan de productie. Het produceren van waterstof door middel van stoomreforming is de goedkoopste optie voor grote hoeveelheden waterstof. Dit is onder andere door het optreden van schaafeffecten (zie figuur 4.6). Daarnaast is aardgas tegen relatief lage prijzen bijna overal beschikbaar. Volgens verschillende studies van de nationale laboratoria kost waterstof tussen de \$1,40 en \$1,60/kg bij grootschalige productie en uitgaand van een prijs van \$3,50/MMBTU voor aardgas [Mann et al, datum onbekend]. Als de prijs van aardgas stijgt met \$1,50 (naar \$5,00/MMBTU) stijgt de prijs voor de waterstof naar \$1,70-\$1,90/kg [Mann et al, datum onbekend]. Andere bronnen suggereren dat de waterstof zelfs tegen een prijs van \$0,70/kg kan worden geproduceerd, maar hierbij is niet gegeven bij welke grondstofprijs dit wordt bereikt [e]. De IEA schat dat de prijs van aardgas voor de industrie voor de komende jaren relatief stabiel blijft (zie tabel 4.1).



Figuur 4.6: de productiekosten vs. productieschaal [Spilsbury, 2001].

Het kolenvergassingsproces wordt weinig toegepast, omdat waterstof tegen een lagere prijs geproduceerd kan worden met stoomreforming van aardgas. Het proces wordt dan ook gebruikt als er slechts zware koolwaterstoffen (kolen, olieresidu e.d.) beschikbaar zijn als grondstof. Helaas zijn er geen prijzen bekend van de geproduceerde waterstof.

Het elektrolyseren van water kost bij een productie van 1000 kg/dag ongeveer \$2,80/kg [HFC&IT-programma, 2003]. Daarbij wordt uitgegaan van een prijs van \$0.045/kWh, waardoor de productie van 1 kg waterstof \$2.00 aan elektriciteitskosten vergt. Dit betekent dus dat de productie zeer gevoelig is voor de invloed van elektriciteitsprijzen. De IEA schat echter dat de elektriciteitsprijzen voor de industrie voor de komende jaren stabiel blijven (zie tabel 4.1).

Jaar	Elektriciteit		Aardgas	
	\$/MBTU	\$/kWh	\$/1000 cu ft	\$/cu m
2001	15.11	0.052	5.04	4.91
2002	14.74	0.050	3.85	3.75
2003	13.96	0.048	5.76	5.61
2004	13.67	0.047	4.62	4.50
2005	13.52	0.046	4.28	4.17
2006	13.37	0.046	4.21	4.10
2007	13.26	0.045	4.25	4.14
2008	13.37	0.046	4.35	4.23
2009	13.49	0.046	4.23	4.12
2010	13.36	0.046	4.16	4.05
2011	13.30	0.045	4.31	4.19
2012	13.49	0.046	4.49	4.37

Tabel 4.1: schatting van de gas-en elektriciteitsprijzen in de VS [7].

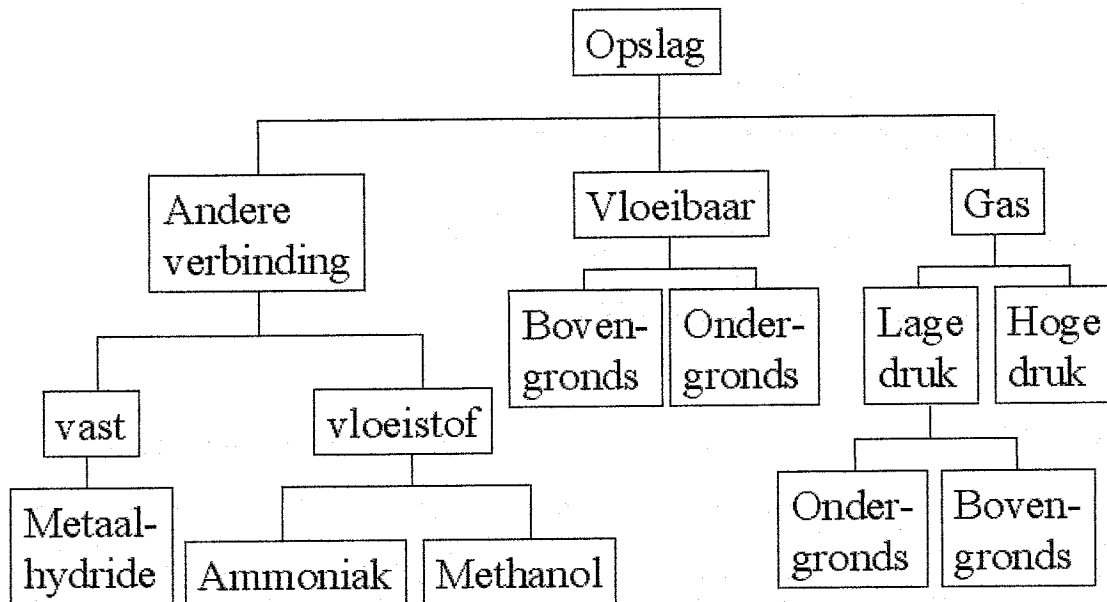
Het is mogelijk de geproduceerde waterstof om te zetten in vloeibare waterstof, om zo grotere hoeveelheden in één keer te kunnen transporteren. De kosten voor dit proces zijn afhankelijk van een aantal factoren. Allereerst is de schaal van de productie van belang, omdat ook in dit proces schaalearde effecten een grote rol spelen. Verder worden de kosten bepaald door de prijs van de benodigde grondstoffen. Deze worden met name gevormd door elektriciteit die nodig is voor het opereren van de compressoren en koelinstallaties. Zoals al eerder genoemd is tussen de 12,5 kWh en 15 kWh elektrische energie nodig per kg waterstof [Drnevich, 2003]. Bij een prijs van \$0,045/kWh geeft dat een extra kostenpost van tussen de \$0,56 en \$0,68 per kg waterstof die wordt geproduceerd (dat is de prijs exclusief transport).

4.2 De opslag van waterstof

Als de waterstof is geproduceerd moet het ofwel meteen worden gebruikt in een proces of het moet worden opgeslagen. Dit wordt bemoeilijkt door het feit dat waterstof onder standaardomstandigheden⁸ een lage energie-inhoud heeft, waardoor uit ruimteoverwegingen getracht moet worden de energie-inhoud te verhogen. Niettemin

⁸ Standaardomstandigheden zijn gedefinieerd als 273 K en 101,3 kPa.

zijn een aantal verschillende manieren beschikbaar om de waterstof op te slaan, zoals te zien is in het overzicht in figuur 4.7. In deze paragraaf zullen de voor- en nadelen van deze manieren kort worden doorlopen.



Figuur 4.7: de mogelijkheden voor het opslaan van waterstof

4.2.1 Opslag van waterstofgas

Waterstofgas kan zowel onder hoge als lage druk worden opgeslagen. Opslag onder hoge druk betekent meer waterstof, maar ook een groter risico. De opslag vindt plaats in cilinder-of bolvormige tanks, omdat deze het beste bestand zijn tegen hoge drukken. De grootte van de tank is afhankelijk van de toepassing.

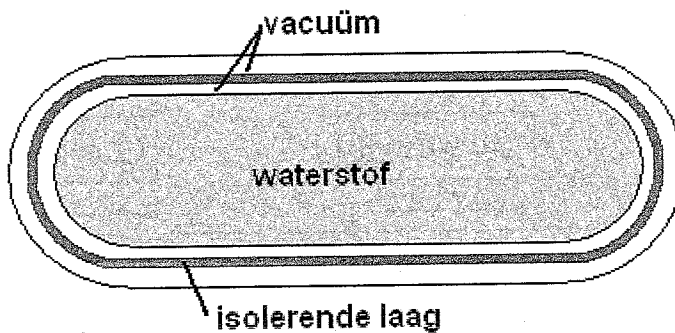
Opslag onder lage druk is weliswaar minder gevaarlijk, maar heeft als grote nadeel dat er slechts weinig waterstof opgeslagen kan worden. De meest voorkomende manier om waterstof tegen lage druk op te slaan is door opslag in uitgeputte gasvelden of in ongebruik geraakte zoutmijnen. Het grote nadeel daarvan is dat deze slechts op bepaalde geografische locaties aanwezig zijn. Daarnaast blijft er altijd een residu achter bij het terugwinnen van de waterstof. Dit residu moet dan worden teruggewonnen door gebruik van een vulmiddel, wat ingewikkeld en kostbaar is [Amos, 1998].

4.2.2 Opslag van vloeibare waterstof

Doordat vloeibare waterstof een hoge dichtheid heeft, is het een goede manier om waterstof op te slaan. Er zijn echter ook twee grote nadelen verbonden aan het opslaan van waterstof als vloeistof. Dit zijn de grote hoeveelheid energie die nodig is om de waterstof te condenseren en het optreden van verdamping van waterstof in de tank. Vloeibare waterstof wordt opgeslagen bij een temperatuur net iets onder het kookpunt (-253 C°), waardoor er bij geringe warmtetoevoer al verdamping optreedt. Men tracht dit te voorkomen door de drie vormen van warmteoverdracht (convectie, geleiding en straling) te minimaliseren. Convectie en geleiding zijn afhankelijk van een transportmedium,

straling is dat niet [Janna, 2000]. Om die reden is een tank opgebouwd uit twee verschillende tanks (zie figuur 4.8).

Cilindrische dubbelwandige waterstoftank



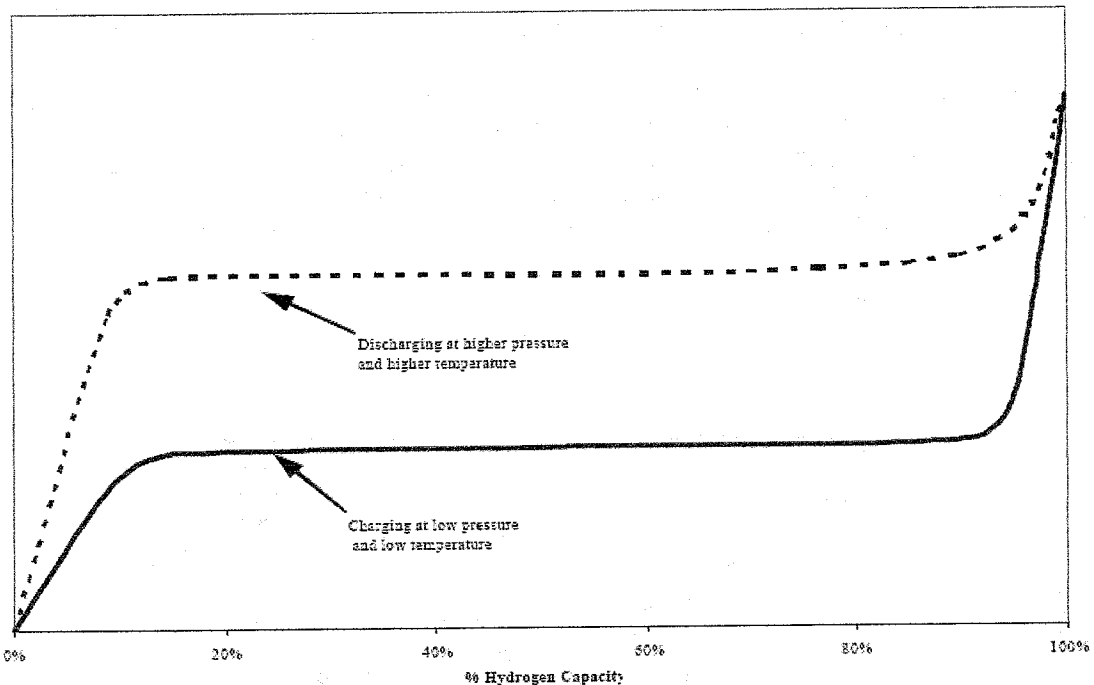
Figuur 4.8: een doorsnede van een cilindrische opslagtank voor vloeibare waterstof.

In de binnenste tank bevindt zich de waterstof. Tussen de binnen-en de buitentank bevindt zich vacuüm, waardoor convectie en geleiding gereduceerd worden tot bijna nul. Eveneens tussen de twee tanks, in het vacuüm bevinden zich een 30-100 lagen reflecterend en laagstralend materiaal [Lakeman, 2001], waardoor de straling (en daarmee de warmteoverdracht) naar de binnenste tank wordt beperkt. Daarnaast wordt soms om de buitentank nog een extra ruimte met vloeibaar stikstof aangebracht. Ondanks al deze maatregelen zal een bepaalde hoeveelheid warmte worden overgedragen, met verdamping als gevolg. Het ontstane gas moet op een gegeven druk worden afgevoerd naar buiten of naar het condensatieproces.

De opslagcapaciteit van tanks kan uiteenlopen van 110 tot 5.300 kg op fabrieksterreinen en tot rond de 115.000 kg op de plaats van productie. De grootste bestaande tank heeft een capaciteit van 269.000 kg en staat bij NASA [Lakeman, 2001]. Technisch is het echter mogelijk tanks met een capaciteit van 900.000 kg te bouwen [Amos, 1998]. De tanks kunnen zowel boven-als ondergronds worden geplaatst, afhankelijk van de wensen van de consument en de lokaal geldende regelgeving.

4.2.3 Metaalhydrides

Een metaalhydride neemt onder bepaalde omstandigheden waterstof op in zijn kristalstructuur, die later weer kan worden teruggewonnen door deze condities aan te passen. Daarbij zijn twee gerelateerde grootheden van belang: temperatuur en druk. Als waterstof bij een bepaalde druk in aanraking komt met een metaalhydride, zal de waterstof worden opgenomen, waarbij warmte vrijkomt. Deze warmte moet worden afgevoerd om te zorgen dat de binding in stand blijft. Om de waterstof terug te winnen moet vervolgens warmte worden toegevoerd, waardoor de waterstof loskomt uit het kristalrooster van het metaal. Een voorbeeld van het opladen en ontladen van een metaalhydride is weergegeven in figuur 4.9.



Figuur 4.9: de laad-ontlaadcyclus van een metaalhydride [Amos, 1998; 12].

4.2.4 Ammoniak

Ammoniak, bestaande uit stikstof en drie waterstofatomen, bevat een grote hoeveelheid waterstof per volume-eenheid, waardoor het een geschikt opslagmiddel kan zijn. Het terugwinnen van de waterstof gebeurt door de ammoniak bij 700 C° langs een katalysator van ijzeroxide te leiden, waarbij met behulp van elektrolyse de waterstof wordt geproduceerd. Toch wordt ammoniak niet veel gebruikt als drager voor waterstof, omdat het giftig is.

4.2.5 Methanol

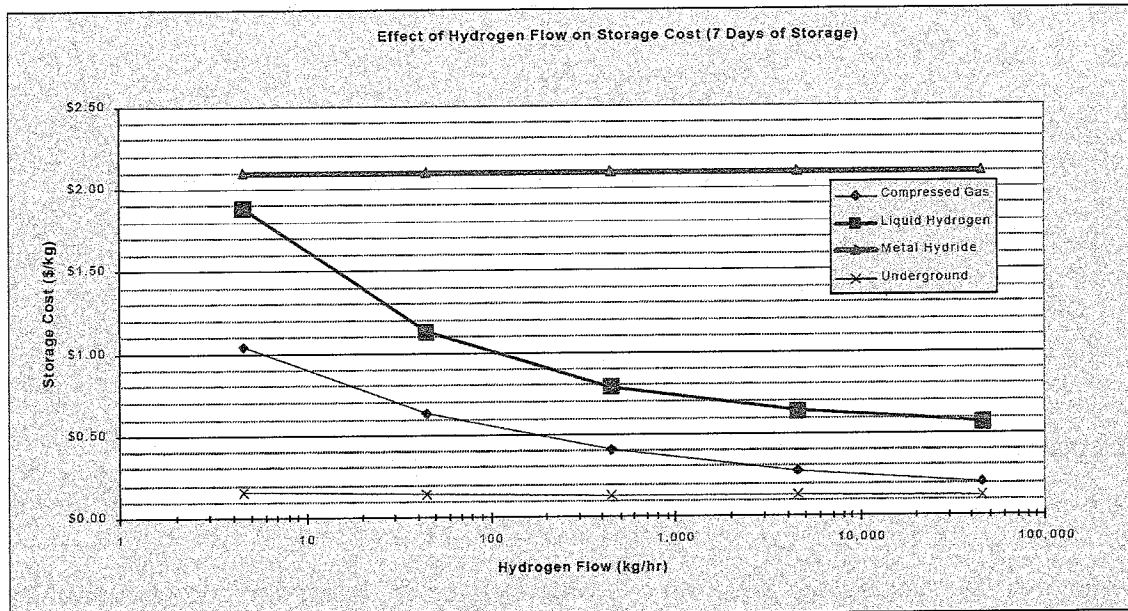
Ook methanol wordt in grote hoeveelheden geproduceerd in de industrie, voornamelijk als grondstof voor de chemische industrie. Het produceren van methanol gebeurt voornamelijk door methaan (aardgas) om te zetten in synthesegas en dat vervolgens om te zetten in methanol. Deze methanol kan vervolgens weer worden teruggereformeerd naar waterstof en koolstofdioxide met behulp van hetzelfde proces. Maar ook methanol is giftig en wordt daarom niet vaak gebruikt als drager voor waterstof.

4.2.6 Vergelijking van de verschillende methoden van opslag

De keuze voor een bepaald opslagmiddel wordt niet alleen bepaald door de prijs, maar ook door een aantal andere belangrijke criteria. Hierbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan de hoeveelheid waterstof die moet worden opgeslagen (samenhangend met de hoeveelheid waterstof die benodigd is), de tijdsduur van de opslag, de geologie van het gebied, de ruimte die het opslagmiddel maximaal in beslag mag nemen en de eventuele aanwezigheid van externe energiebronnen en de aard van deze energiebronnen. Al

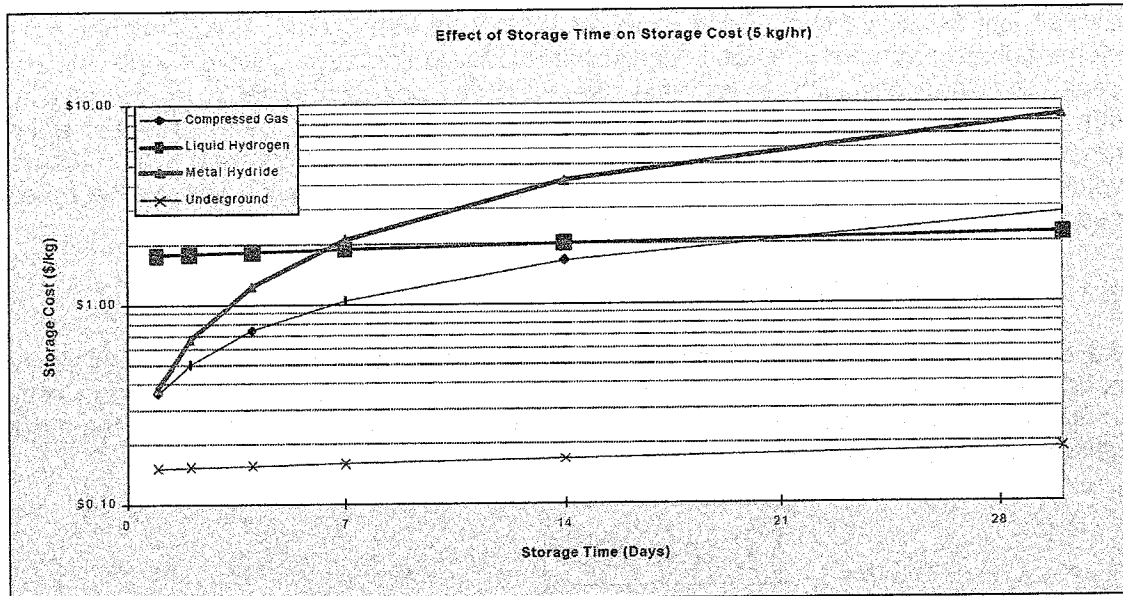
deze verschillende factoren hangen met elkaar samen en vormen samen een complex geheel, waarmee rekening gehouden moet worden bij de keuze van een opslagmiddel.

Waterstof wordt nauwelijks opgeslagen als ammoniak of methanol, zowel uit het oogpunt van veiligheid, als uit het oogpunt van energieverbruik. Opslaan van waterstof kan in alle gevallen het goedkoopst voor middel van ondergrondse opslag, mits deze opslagruimte op natuurlijke wijze ontstaan is. Echter, het grootste probleem bij deze vorm van opslag is dat deze niet overal aanwezig is (dit is afhankelijk van de plaatselijke geologie).



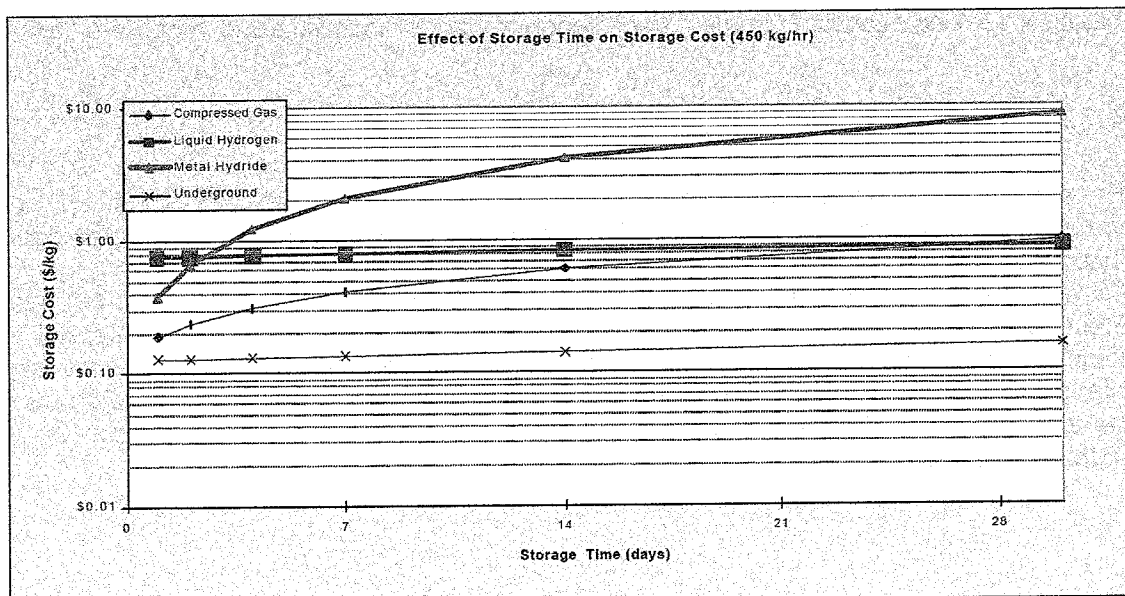
Figuur 4.10: kosten voor het opslaan van waterstof bij verschillende hoeveelheden [Amos, 1998].

Als er geen gebruik gemaakt kan worden van ondergrondse opslag, is het afhankelijk van de tijd welke methode het best gekozen kan worden. Voor korte termijn opslag (tot drie weken) gecomprimeerd gas het goedkoopst, ongeacht de hoeveelheid die opgeslagen moet worden (zie figuur 4.10). Dit wordt slechts beïnvloed door de eventuele aanwezigheid van externe energiebronnen. Als warmte tegen lage kosten beschikbaar is, dalen de kosten van metaalhydride-opslag. Dit geldt echter alleen voor korte termijn, omdat de investeringskosten voor langere termijnen sterk oplopen (zie figuur 4.11 en 4.12).



Figuur 4.11: kosten voor de opslag van kleine hoeveelheden waterstof als functie van de tijd [Amos, 1998].

Als waterstof voor langer dan drie weken opgeslagen moet worden, kan de waterstof (bij gebrek aan ondergrondse opslag) het goedkoopst opgeslagen worden als vloeistof (zie figuur 4.11 en 4.12). Dit is onafhankelijk van de hoeveelheid benodigde waterstof, alhoewel er wel schaafeffecten optreden, waardoor opslag van grotere hoeveelheden relatief wel goedkoper is. Dit geldt voor zowel opslag als vloeistof als voor opslag in gecomprimeerde vorm en wordt veroorzaakt door de vorm van de opslagtank (zoals reeds eerder uitgelegd).

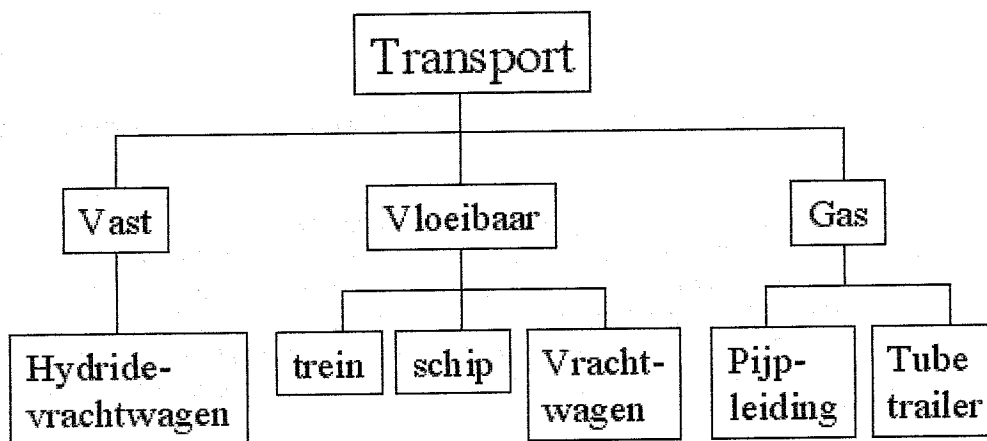


Figuur 4.12: kosten van de opslag van grotere hoeveelheden waterstof als functie van de tijd [Amos, 1998].

Een andere factor die van invloed is op de keuze voor een bepaald opslagmiddel, maar niet financieel van aard is, is de beschikbare ruimte. In sommige gevallen is slechts een beperkte ruimte beschikbaar voor het neerzetten van een opslagtank. In die gevallen kan het best gekozen worden voor metaalhydride-opslag voor kleine hoeveelheden, omdat deze een grote volumetrische opslagdichtheid heeft (dus veel waterstof per volume-eenheid). Voor grotere hoeveelheden is opslag als vloeibare waterstof het meest geschikt (vanwege de hoge investeringskosten voor metaalhydriden).

4.3 De distributie van waterstof

Als de waterstof niet geproduceerd wordt op de plaats van verbruik, moet het naar de consument getransporteerd worden. Een aantal middelen is hiervoor beschikbaar, zoals in figuur 4.13 is weergegeven⁹, waarbij ook hier geldt dat de lage energiedichtheid een belangrijke rol speelt in het geheel.



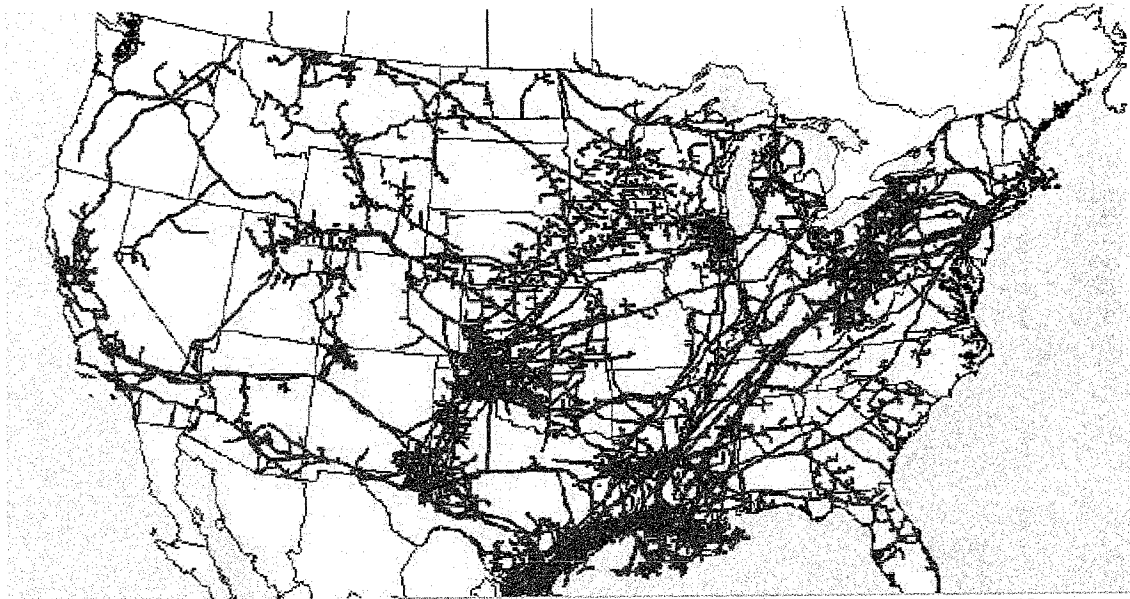
Figuur 4.13: een overzicht van de verschillende transportmogelijkheden voor waterstof

4.3.1 Transport van waterstofgas

Er zijn twee methoden om waterstofgas te transporteren: per pijpleiding en per vrachtwagen (de zogenaamde tube trailer). Beide methoden worden in de hedendaagse industrie toegepast.

Dit netwerk is in vergelijking met het aardgasnetwerk (weergegeven in figuur 4.14) zeer klein. Dit heeft aantal redenen. Het eerste probleem is dat de vraag naar waterstof te klein is om te investeren in een heel groot waterstofnetwerk en de vraag naar waterstof niet sterk zal groeien als er geen infrastructuur aanwezig is; een probleem dat ook wel bekend staat als het "kip-of-ei" probleem. Hier zal in latere hoofdstukken nog dieper op worden ingegaan.

⁹ Hierbij moet worden opgemerkt dat niet wordt ingegaan op de manier waarop de waterstof aan het proces wordt toegevoerd. Indien een waterstofeconomie tot stand komt, moet ook een geheel nieuwe manier worden gevonden om de waterstof in brandstofcelauto's over te brengen. Dergelijke technologie bestaat op dit moment niet in de industrie.



Figuur 4.14: het aardgasnetwerk in de Verenigde Staten. [Mintz et al (2), 2002, 6]

Een tweede probleem van waterstof is dat de moleculen klein zijn en een lage viscositeit hebben, waardoor ze makkelijk door metaal heen dissiperen. Er zijn twee redenen waarom dit van belang is. Allereerst is het rendement van een pijpleiding laag als er veel waterstof door de leiding heen dissipeert, waardoor er hogere eisen moeten worden gesteld aan de afdichting (wat hogere kosten betekent). Ten tweede kunnen er veiligheidsproblemen ontstaan door deze dissipatie. Een deel van de waterstofmoleculen reageert met het metaal, waardoor de metaalmoleculen "oplossen". Dit veroorzaakt kleine haarscheurtjes in het metaal (zie figuur 4.15), welke in de loop van de tijd groter worden, totdat het metaal uiteindelijk scheurt of breekt. De snelheid van een dergelijk verbrossingsproces is afhankelijk van een aantal factoren. Allereerst is de keuze van het metaal van belang, omdat elk metaal zijn eigen karakteristieke eigenschappen heeft. Uit onderzoek is gebleken dat hardere en sterkere metalen sneller bros worden dan zachte metalen [Campbell, 2003]. Ten tweede is gebleken dat het dissipatieproces (en daarmee het verbrossingsproces) veel langzamer verloopt in metaaloxide dan in het metaal zelf, omdat de permeabiliteit (doorlaatbaarheid) van de metaaloxide veel lager is. Dit betekent dat een dunne laag metaaloxide in de leiding de duurzaamheid van de leiding kan verhogen. Verder zijn ook de temperatuur en de druk van transport van belang, omdat het verbrossen sneller verloopt bij een hoge temperatuur/druk [g,h].

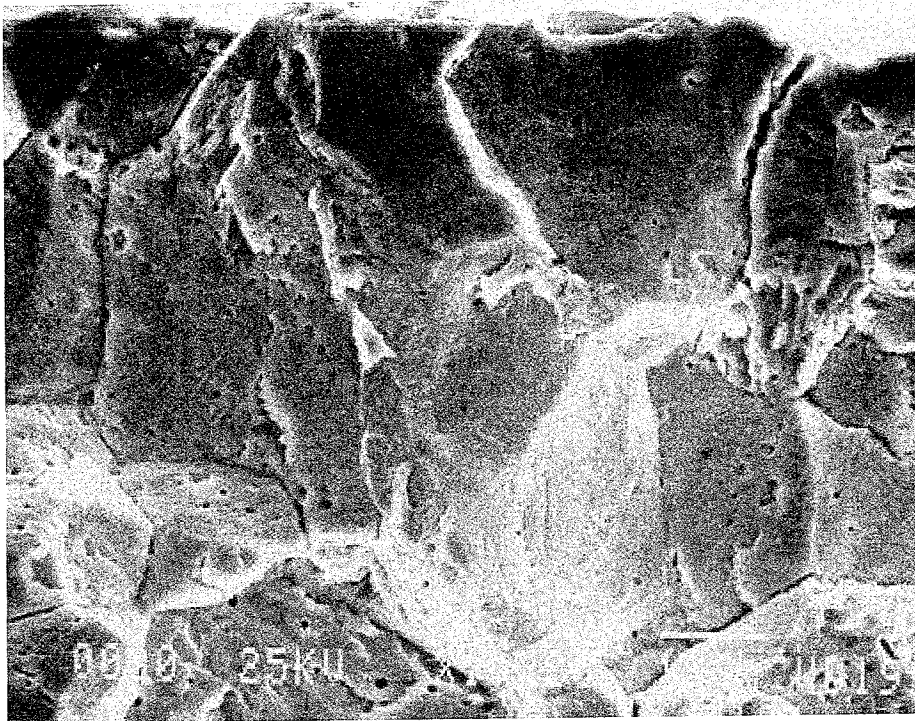


Photo Courtesy of NASA/Kennedy Space Center Materials Lab

Figuur 4.15: een foto van metaalscheurtjes door waterstof, genomen met een elektronenmicroscop [Campbell, 2003].

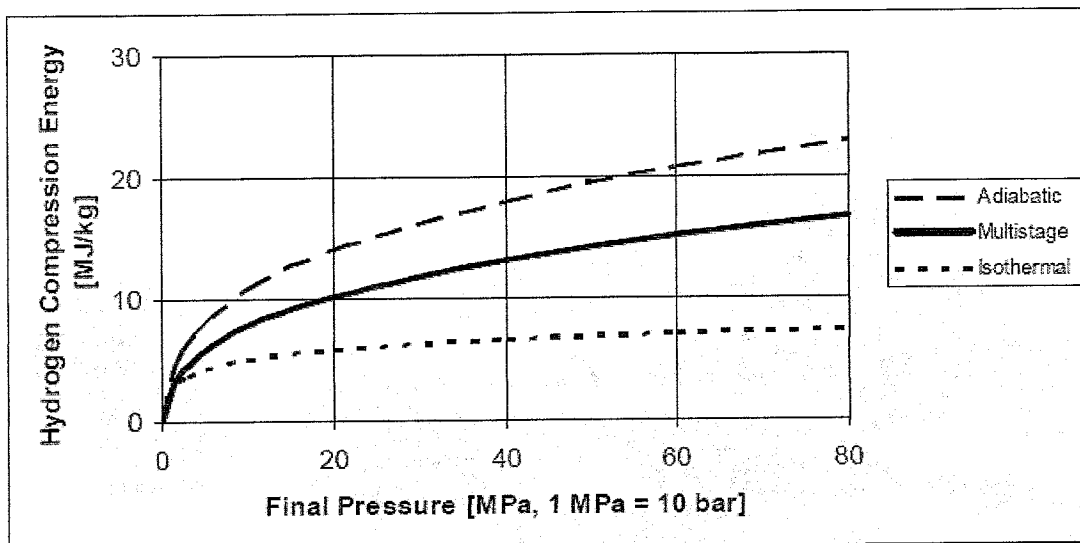
Toch is volgens de grote, industriële gasbedrijven het gebruik van een pijpleiding voor waterstof niet gevaarlijker dan het gebruik van aardgasleidingen, zolang de kwaliteit van de leiding zorgvuldig gecontroleerd wordt, waarvoor reeds allerlei bestaande instrumenten ontworpen zijn. Deze stelling wordt onderstreept door het feit dat er nog nooit ongelukken hebben plaatsgevonden met waterstofpijpleidingen, terwijl er al lange tijd gebruik wordt gemaakt van deze transportmethode. De apparatuur voor het controleren van de leidingen is dan ook beschikbaar, omdat dit momenteel al wordt gebruikt in de industrie. Mocht er desondanks toch een lek optreden in een leiding, zal de vlam zich omhoog richten, omdat waterstof snel vervliegt. Tevens is de vlamtemperatuur van waterstof lager dan die van aardgas, wat niet wegneemt dat deze nog altijd 2318 graden Celsius bedraagt.

Waterstofgas kan ook worden vervoerd in stalen cilinders. Tussen de 3 en 16 cilinders worden dan op een trailer geladen. Een dergelijke trailer wordt ook wel "tube trailer" genoemd (zie figuur 4.16).



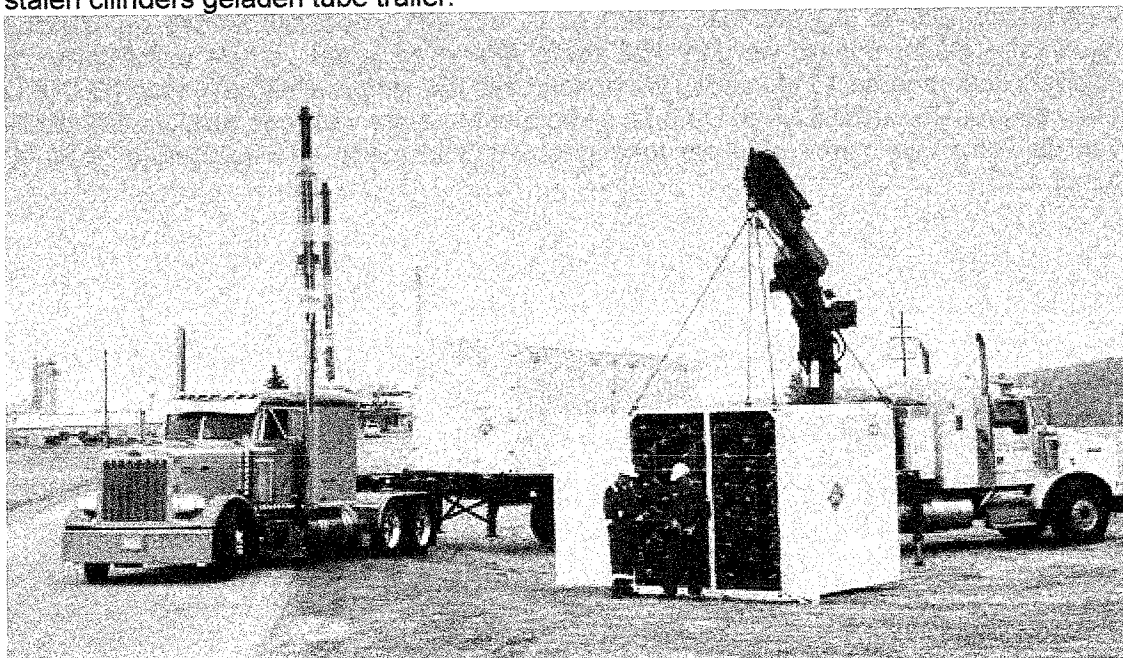
Figuur 4.16: een tube trailer [i].

De hoeveelheid waterstof in een dergelijke trailer is afhankelijk van een aantal factoren, waaronder druk, temperatuur en grootte van de cilinders. Een grote tube trailer kan tot 460 kg waterstof (verdeeld over 16 cilinders) bij een druk van 20,6 MPa transporteren. De cilinders op de trailer zijn onderhevig aan dezelfde problemen met betrekking tot verbrossing als de pijpleidingen. Daarom is het ook noodzakelijk dat de cilinders regelmatig geïnspecteerd worden. Het comprimeren en laden van de waterstof in de cilinders kost rond de 15 MJ per kg waterstof (dit is 8% van de energie-inhoud (HHV)) bij een compressie tot 20,6 MPa. De hoeveelheid energie die verbruikt wordt is afhankelijk van de vorm van compressie die toegepast wordt alsmede de uiteindelijke druk (zie figuur 4.17).



Figuur 4.17: energieverbruik voor het comprimeren van waterstof [Bossel, 2003]

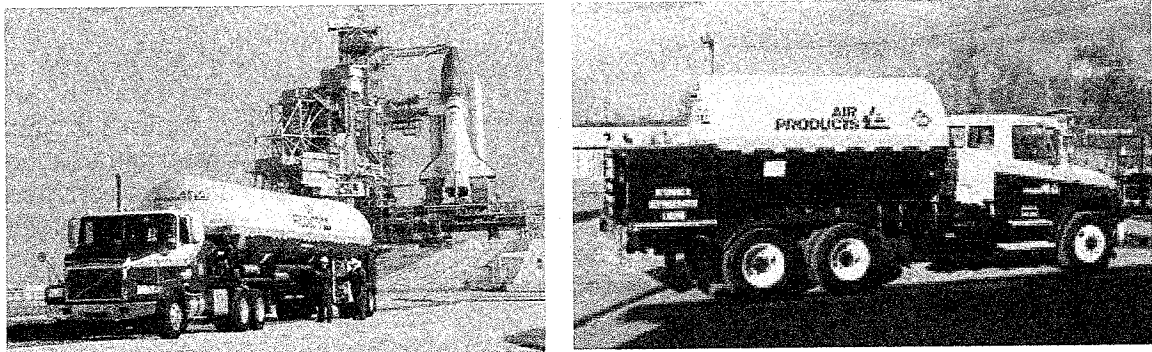
Een derde, recentelijk goedgekeurde methode van waterstofgas transport is door middel van een tube trailer geladen met samengestelde aluminium-koolstofcilinders (zie figuur 4.18) [i]. Deze cilinders zijn ontworpen door Dynetek Industries Ltd. en zijn beschikbaar voor drie verschillende drukken, te weten 200 bar (20 MPa), 250 bar (25 MPa) en 350 bar (30 MPa) [i]. Een dergelijke samengestelde cilinder bestaat uit een aluminium cilinder omwikkeld met een koolstoflaag voor versteviging. Het gewicht van een dergelijke cilinder is een derde tot een kwart van een traditionele stalen cilinder en een trailer geladen met dergelijke cilinders kan tot 80% meer waterstof vervoeren dan met stalen cilinders geladen tube trailer.



Figuur 4.18: vervoer van samengestelde waterstofcilinders [i].

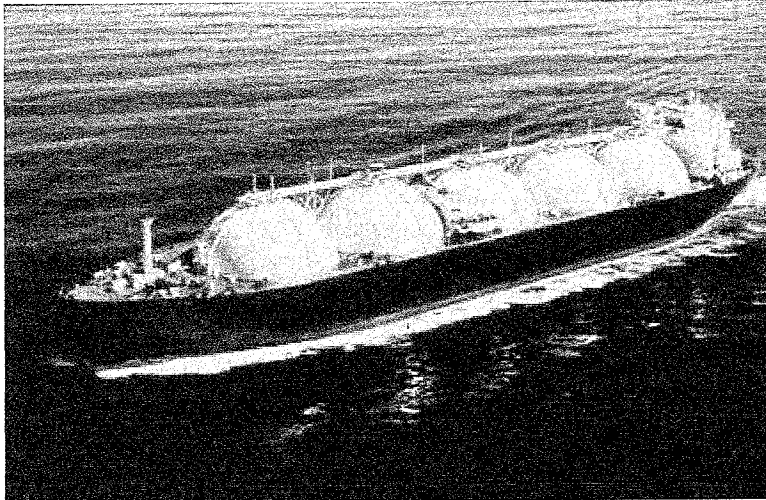
4.3.2 Vloeibare waterstof

Er zijn drie manieren om vloeibare waterstof te transporteren vanaf de plaats van productie: per vrachtwagen, per spoor en per tanker (uiteraard is deze laatste slechts over water mogelijk). Een vrachtwagen (LH2-truck) heeft een capaciteit van maximaal 4000 kg vloeibare waterstof bij een temperatuur van -253 graden Celsius. Dit gebeurt in supergeïsoleerde, dubbelwandige tanks met een capaciteit van 360 tot 4560 kg [Amos, 1998]. Deze tanks worden van elkaar gescheiden door vacuüm om de warmteoverdracht te minimaal te houden. De kleinere vrachtwagens dienen om relatief grote hoeveelheden waterstof te leveren in gebieden die moeilijk toegankelijk zijn voor grote vrachtwagens (zie figuur 4.19). Vloeibare waterstof kan ook per spoor worden vervoerd, waarbij de capaciteit van een railwagon tussen de 2300 en 9100 kg ligt [Amos, 1998], waardoor zeer grote hoeveelheden waterstof per trein vervoerd kunnen worden. Ook transport over water met behulp van tankers is mogelijk en wordt op kleine schaal al toegepast (zie figuur 4.20). Nieuwe ontwerpen voor lange-afstand oceaantankers met capaciteiten van 106.000 tot 10 miljoen kg worden momenteel ontwikkeld.



Figuur 4.19: een grote en een kleine LH2-vrachtwagen [i].

Er bestaan een aantal problemen bij het transport van vloeibare waterstof. Allereerst, zoals al eerder genoemd, de grote hoeveelheid energie die benodigd is voor produceren van vloeibare waterstof. Ten tweede bestaat het probleem van warmteoverdracht binnen de tank. De binnenste en de buitenste tank worden van elkaar gescheiden door een hoge-druk vacuüm om zo de warmteoverdracht te beperken. Het grootste warmteoverdrachtsprobleem wordt echter gevormd door de ondersteuning van de binnenste tank. Er vindt namelijk warmtegeleiding plaats in de steunbalken die de binnenste tank op zijn plaats houden. Het is zaak deze te minimaliseren of zelfs te verwijderen. Verder bestaat het probleem van verdamping. Een deel van de waterstof in de tank verdampt in de loop der tijd. Voor vrachtwagens en spoorwagens is dit ongeveer 0,3-0,6% van de totale hoeveelheid waterstof per dag. Dit ontstane gas moet worden afgevoerd, omdat er anders een te grote drukopbouw plaatsvindt in de tank. Voor oceaantankers wordt dit percentage geschat op 0,2-0,4%. Voor de oceaantankers bestaat het voorstel dit waterstofgas te gebruiken voor de voortstuwing van het schip, opdat de energie niet verloren gaat. Voor dit probleem is nog geen sluitende oplossing voorhanden.



Figuur 4.20: LNG-tanker¹⁰ [k].

4.3.3 Hydridetruck

Momenteel wordt veel onderzoek gedaan naar hydride-vrachtwagens, maar er is geen informatie voorhanden over bestaande hydride-vrachtwagens. Dit is voornamelijk het geval, omdat het opslaan van grotere hoeveelheden waterstof in hydride-vorm een groot oppervlak en een groot gewicht vereist. Dit betekent dat het niet rendabel is waterstof in deze vorm te transporteren, ondanks het feit dat het de veiligste methode is voor transport. Dit is het geval omdat het in gebonden vorm niet brandbaar en niet explosief is.

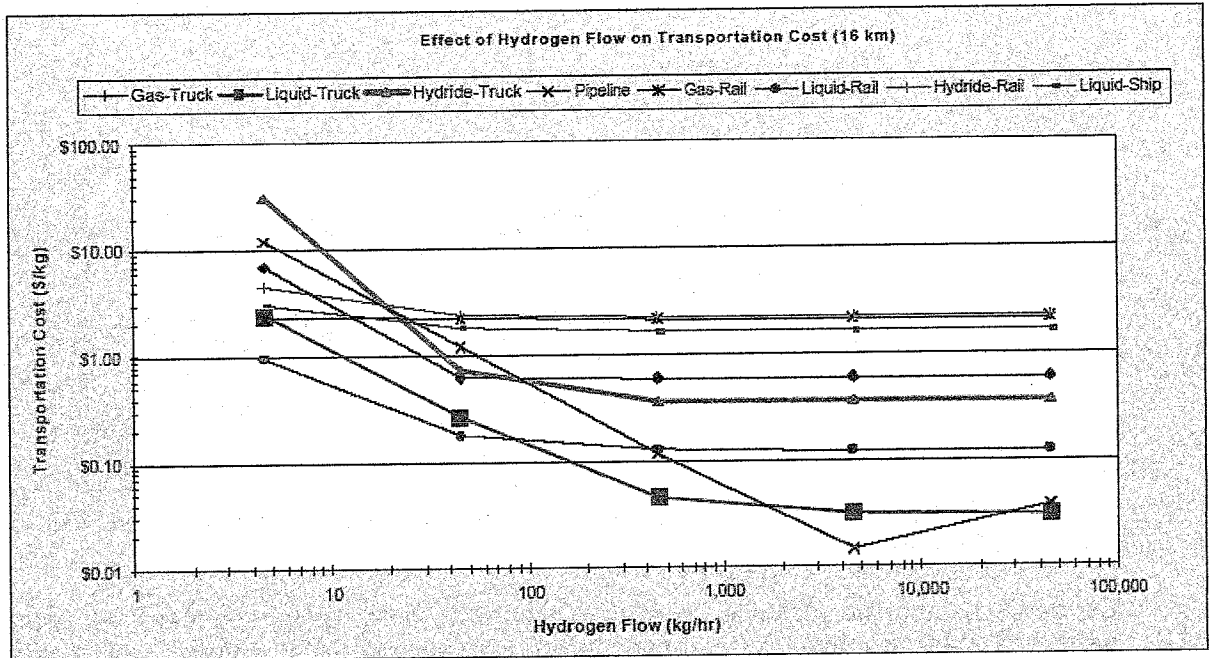
4.3.4 Vergelijking van de verschillende methoden van transport

De keuze voor een bepaald transportmiddel is afhankelijk van een aantal factoren, zoals de afstand tussen bron en doel, de hoeveelheid te transporteren waterstof en de flexibiliteit van het transportmiddel (dit kan zowel variabiliteit in hoeveelheid als variabiliteit in aantal afleverpunten inhouden). Hierdoor is de keuze voor "het beste" transportmiddel afhankelijk van de situatie. Niettemin is er wel een aantal richtlijnen te geven met betrekking tot de verschillende transportmiddelen. Allereerst kan worden gezegd dat het transport per vrachtwagen het meest flexibel is. Hiervoor zijn twee redenen aan te wijzen: het wegennetwerk in de Verenigde Staten is zeer uitgebreid, waardoor de meeste plaatsen, inclusief moeilijk bereikbare plaatsen als stadscentra, goed te bereiken zijn voor vrachtwagens. Daarbij moet worden opgemerkt dat voor grotere hoeveelheden transport per LH₂-vrachtwagen het goedkoopst is. De tweede reden voor de grote flexibiliteit is het feit dat vrachtwagens meerdere punten kunnen bevoorraden, in tegenstelling tot bijvoorbeeld een pijpleiding. Vervoer per spoor is ook relatief flexibel, maar wordt beperkt door het feit dat het spoorwegnetwerk kleiner is dan het wegennetwerk.

Een andere belangrijke factor in het bepalen van de kosten van waterstoftransport worden gevormd door de te transporteren hoeveelheid. Bij een transportafstand van 16

¹⁰ Een dergelijke tanker wordt eveneens gebruikt voor het transport van waterstof. Het ontwerp van dit schip is van Kawasaki Heavy Industries (Shipbuilding-dochtermaatschappij).

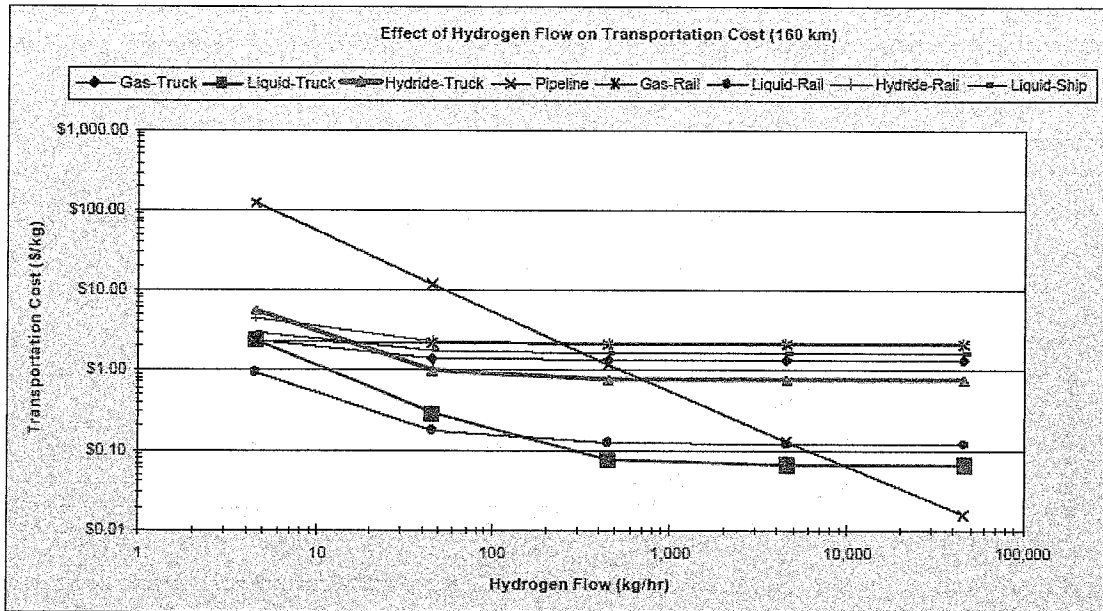
km geldt dat transport per spoor en vrachtwagen het goedkoopst zijn (zie figuur 4.21)¹¹. Voor grotere hoeveelheden geldt echter dat een pijpleiding of vervoer per LH2-vrachtwagen goedkoper is.



Figuur 4.21: transportkosten bij een toenemende flow en een afstand van 16 km [Amos, 1998; G-8].

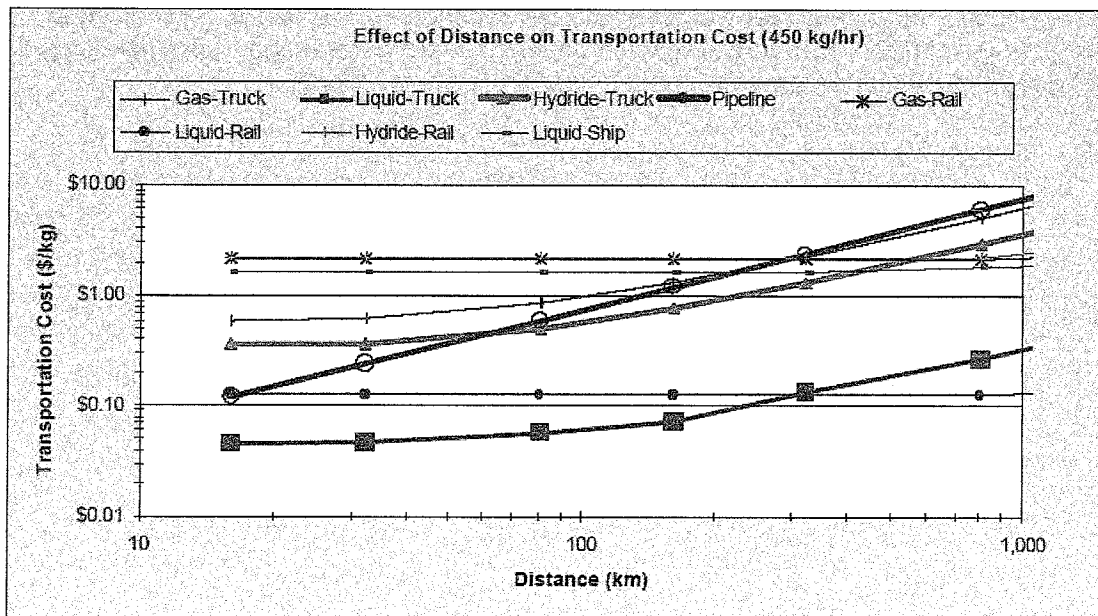
Deze situatie verandert niet wezenlijk als de transportafstand wordt vergroot naar 160 km (zie figuur 4.22)³. Er kan wel worden geconcludeerd dat transport per pijpleiding dan het goedkoopste middel van transport is voor grote hoeveelheden.

¹¹ Er moet worden opgemerkt dat de kosten van het produceren van de vloeibare waterstof niet in deze prijs zijn inbegrepen, waardoor een enigszins vertekend beeld ontstaat.



Figuur 4.22: transportkosten bij een toenemende flow en een afstand van 160 km [Amos, 1998; G-9].

De derde belangrijke factor is de afstand waarover wordt getransporteerd. Als wordt gekeken naar een kleine te transporteren hoeveelheid (450 kg/uur) kan worden geconcludeerd dat transport van vloeibare waterstof per vrachtwagen het goedkoopst is voor zowel korte als lange afstand (zie figuur 4.23).



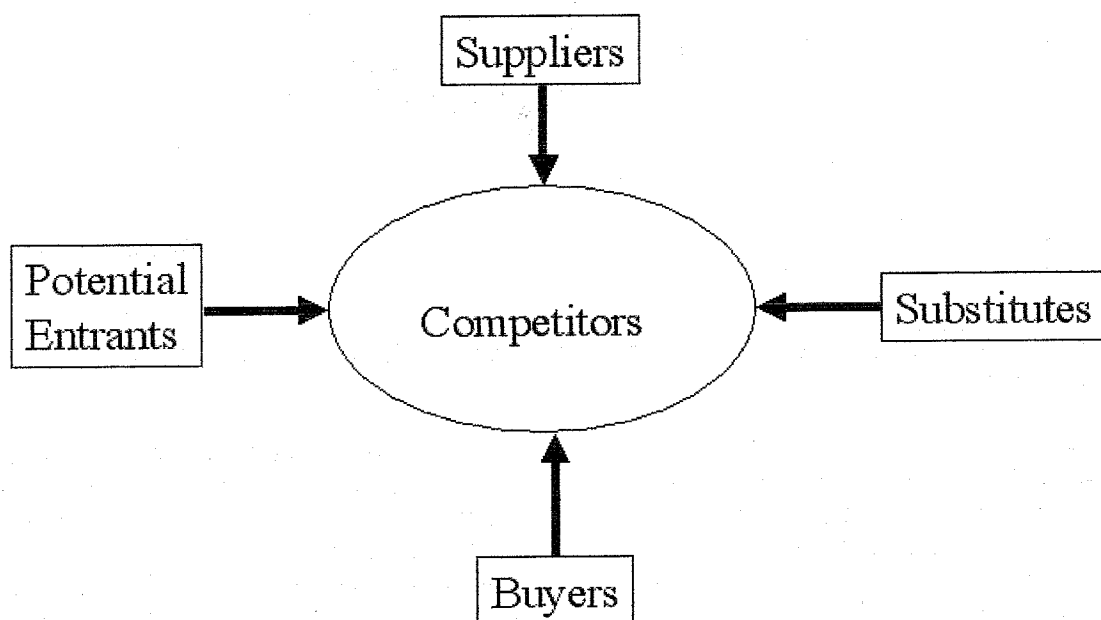
Figuur 4.23: transportkosten bij toenemende afstand en een flow van 450 kg/uur [Amos, 1998; G-10].

Echter, voor grotere hoeveelheden over kortere en middellange afstand is pijpleiding ook een goedkoop alternatief. Dit komt omdat de kosten voor het leveren van waterstof zeer laag zijn en de investeringskosten zeer hoog. Dit betekent dat een hogere capaciteit een lagere prijs per kg waterstof tot gevolg heeft.

4.4 De spelers & de regulering

4.4.1 De spelers

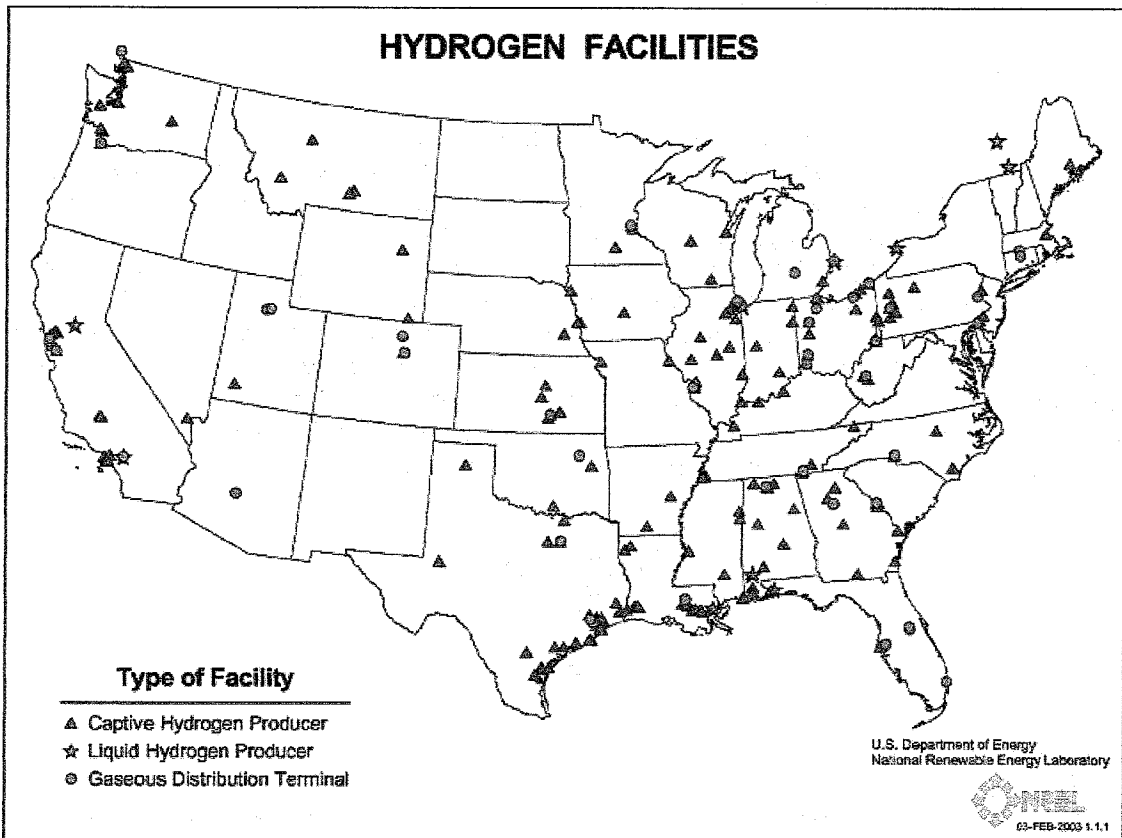
Een markt kan worden beschreven aan de hand van de bedrijven en instellingen die in deze markt actief zijn, waarbij dan tevens moet worden gekeken naar de relaties tussen deze verschillende spelers. Daarnaast moet worden gekeken naar de regulering van de markt, omdat dit een belangrijke indicatie geeft van de invloed van de overheid op deze markt. In deze paragraaf zal dieper worden ingegaan op de markt voor waterstof en waterstofinstallaties aan de hand van het uitgebreide vijfkrachtenmodel van Porter (zie figuur 4.24). Dit model is oorspronkelijk bedoeld om de bedreigingen voor een bedrijf in een markt te identificeren, maar in dit geval zal het model worden gebruikt om een bepaalde structuur aan te geven in de waterstofmarkt. In het originele model is geen sprake van overheidsinvloed, wat de reden is het model uit te breiden door de overheid (in de vorm van regulering) ook te betrekken in het model.



Figuur 4.24: het vijfkrachten model van Porter [Porter, M.E., 1992]

De eerste belangrijke groep wordt gevormd door de producenten van waterstof en waterstofinstallaties. Zoals al eerder gezegd wordt wereldwijd jaarlijks 40 miljoen ton waterstof geproduceerd [1, simbolotti presentatie IEA HIA], waarvan 9 miljoen ton ofwel 22,5% in de Verenigde Staten [National Hydrogen Roadmap, 2002]. Van deze 9 miljoen ton wordt 66% geproduceerd op de plaats van gebruik (op locatie) en 34% in een centrale productiefaciliteit, waarna het naar de eindconsument wordt getransporteerd. Een overzicht van alle productiefaciliteiten is gegeven in figuur 4.25. In het geval er grote hoeveelheden waterstof nodig zijn voor een proces, wordt meestal gekozen voor productie op locatie, omdat er dan geen kosten worden gemaakt voor transport en

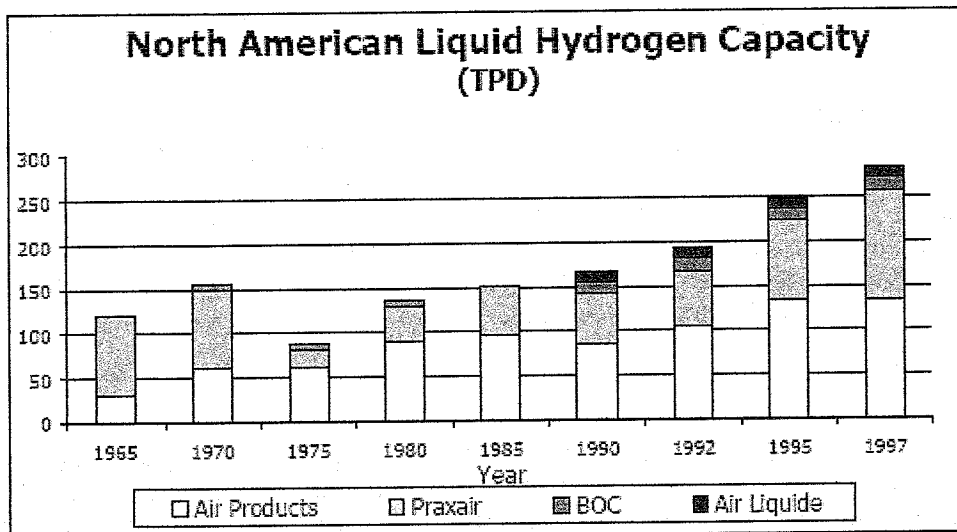
opslag, zowel als het feit dat het waterstofproces dan kan worden geïntegreerd in het gehele productieproces. De afweging hiervoor wordt vaak gemaakt op kosten (kosten van kleinere installatie vs. de kosten van aankoop, transport en opslag van waterstof). De installaties worden geleverd door de industriële gasbedrijven, die tevens het onderhoud uitvoeren.



Figuur 4.25: overzicht van de waterstofproductie in de Verenigde Staten. Bron: Air Products [1].

Daarnaast is er een markt voor centraal geproduceerde waterstof, die uit twee verschillende producten bestaat. Allereerst is er de markt voor vloeibare waterstof, welke ongeveer 8% van de totale centrale waterstofmarkt uitmaakt. Er zijn 10 fabrieken voor vloeibare waterstof in de Verenigde Staten, die in handen zijn van vier bedrijven (zie figuur 4.26). Air products & chemicals Inc. en Praxair Inc. bezitten elk vier fabrieken die respectievelijk 47,9% en 42,8% van de totale hoeveelheid vloeibare waterstof produceren. De BOC-groep en Air liquide¹² bezitten elk één fabriek, met respectievelijk 5,4% en 3,7% van de productiecapaciteit voor vloeibare waterstof.

¹² Deze fabriek wordt in joint venture met Hydro Quebec geopereerd



Figuur 4.26: capaciteit vloeibare waterstofproductie 1965-1997 [Drnevich, 2003; 6].

Deze vier bedrijven bezitten tevens 87,6% van de productiecapaciteit voor het centraal produceren van waterstofgas. Dit betekent dat de markt door deze bedrijven wordt gedomineerd. Dit blijkt verder uit het feit dat alle 460 mijl pijpleidingen voor waterstof in handen zijn van drie van deze vier bedrijven. Air Products bezit een aantal pijpleidingen voor waterstof rond de Golf van Mexico (zie bijlage 6; figuur B4.1). Praxair bezit eveneens een aantal pijpleidingen, met een totale lengte van meer dan 240 mijl (zie bijlage 6; figuur B4.2). Het netwerk van Air Liquide is kleiner dan dat van de andere twee bedrijven en ligt ook rond de Golf van Mexico (zie bijlage 6; figuur B4.3).

Het is niet verwonderlijk dat deze netwerken op die locatie te vinden zijn. Rond de 67% van alle geproduceerde waterstof wordt namelijk gebruikt voor het raffineren van olie [innovation group] en er bevindt zich een concentratie van raffinaderijen rond de Golf van Mexico. Een andere grote afnemer van waterstof is de chemische industrie, welke 26% van de waterstof gebruikt. De overige 7% is verdeeld over talloze andere industrieën. De oliemaatschappijen vormen een belangrijke marktmacht, omdat het grootste deel van de raffinagecapaciteit wordt gecontroleerd door een aantal grote bedrijven. In 2002 bezaten de grootste vier bedrijven¹³ 41,7% van de totale marktcapaciteit [EIA, 2002], in 2004 was dit gestegen tot 41% van de totale raffinagecapaciteit¹⁴ [NPR, 2004]. De verwachting is dat, door strengere eisen voor benzine en diesel, de hoeveelheid benodigde waterstof voor deze industrie sterk zal stijgen in de komende jaren. Praxair verwacht een stijging van 12-15% per jaar [lehman brothers conference call], alhoewel andere bronnen slechts 10% per jaar voor de centrale waterstofmarkt en 4% voor de totale waterstofmarkt voorspellen [o].

Naast de grote waterstofbedrijven voor productie en distributie bestaat ook een aantal bedrijven dat leverancier is voor deze bedrijven, maar tevens zelf actief is op de markt voor waterstofopslag. Hierbij moet vooral gedacht worden aan bedrijven als bijvoorbeeld Linde Gas [n]. Deze groep is echter vooral belangrijk als leverancier van de grote waterstofgasbedrijven en niet als autonome speler in de markt. Ondanks het feit dat ze een belangrijke element op de markt zijn, is de invloed van deze bedrijven beperkt,

¹³ Dit waren in 2002 Exxon (10,8%), Phillips (9,9%), BP America (9,7%) en Shell Oil (6,7%).

¹⁴ Dit waren in 2004 ConocoPhillips Company (13%), ExxonMobil Corp (10,9%), BP PLC (8,9%) en Valero Energy Corp (8,2%).

omdat het grootste deel van de waterstof niet opgeslagen wordt, maar direct verbruikt wordt.

De vraag naar waterstof zal naar alle verwachtingen de komende jaren stijgen, zelfs als een waterstofeconomie nooit gerealiseerd wordt. De steeds stringenter eisen vragen om schonere brandstoffen, die slechts met behulp van waterstof geproduceerd kunnen worden. Daarnaast worden toetreders geweerd doordat er sprake is van schaalvoordelen in de productie, waardoor grote investeringen vooraf vereist zijn. Ook bestaat een kennisbarrière tussen bestaande bedrijven en nieuwkomers, die ook met de vereiste investering marktbetreding bemoeilijken.

4.4.2 De regelgeving

De regelgeving in de Verenigde Staten is verdeeld in wetgeving en regelgeving. De wetgeving wordt door het congres gemaakt en daarna opgenomen in de US Code¹⁵. Als technische processen gereguleerd moeten worden, draagt het Congres bij wet een bepaald overheidsorgaan op deze regulering te ontwerpen. Daarbij kunnen bepaalde voorwaarden met betrekking tot tijd en inzet worden vereist, maar dit is niet noodzakelijk. Het betreffende departement ontwerpt dan conceptregulering, waarop iedereen uit de maatschappij schriftelijk commentaar kan leveren gedurende een periode van 30-60 dagen. Na deze tijd worden alle commentaren door het departement gelezen en verwerkt in de regulering, welke vervolgens wordt gepubliceerd en opgenomen in de Code of Federal Regulation (CFR). Organisaties kunnen tijdens het proces en het publiceren van het eindrapport bezwaar indienen tegen de regelgeving bij het congres of een administratieve of civiele rechtbank. Indien het bezwaar gegrond wordt verklaard, moet het departement opnieuw beginnen aan het ontwerpproces. Na het opnemen van de regulering in de CFR kan het slechts het congres bij wet opdragen de regulering te veranderen. Dit betekent dus dat er naar twee verschillende bronnen gekeken moet worden, die elk informatie bevatten met betrekking tot waterstof.

De bepalingen in de US Code over waterstof geven richtlijnen met betrekking tot de financiering van waterstofonderzoek van de verschillende departementen en de instanties die waterstofregulering moesten ontwerpen [o.a. Hydrogen Future Act 1996, Public Law 104-271-Oct. 9, 1996]. In deze bepalingen zijn onder andere de departementen van Defensie [USC50, Sec. 2098 Law Revision Office, 2003], Energie [USC42, chapter 128, Law Revision Office 2003] & Landbouw [USC7, Sec. 8101-8107; Law Revision Office, 2003] betrokken.

De regulering met betrekking tot het gebruik, opslag en transport van waterstof is opgeslagen in de CFR [29 CFR Sec. 1910.103; Law Revision Office]. Deze regels verwijzen op hun beurt weer naar andere delen van de CFR, waarin definities zijn gegeven. De regulering voor transport wordt opgesteld door het Department of Transportation (DOT) en is opgeslagen in 49 CFR chapter I. Het testen van nieuwe technologie mag slechts worden gedaan door gecertificeerde nationale laboratoria, welke zijn opgesomd in 49 CFR paragraaf 1910.7. Daarnaast wordt de opslag gereguleerd door de American Society of Mechanical Engineers (ASME) in verschillende regels (section VIII – unfired pressure vessels – 1968), welke vervolgens zijn opgenomen in de CFR onder paragraaf 1910.6. Daarnaast zijn voor pijpleidingen weer andere regels van toepassing.

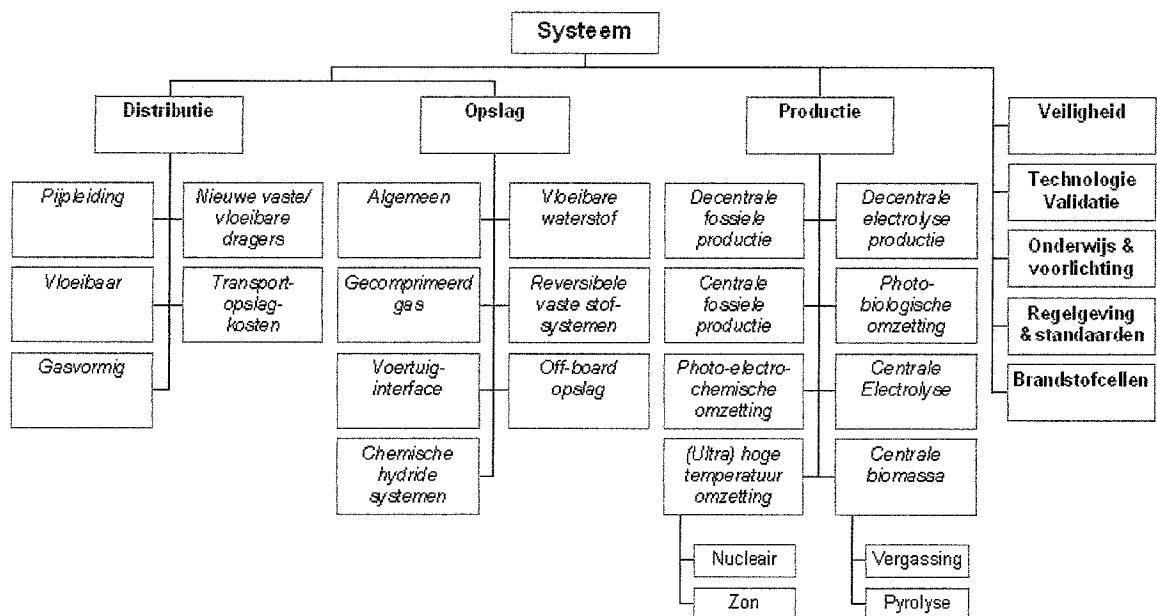
¹⁵ De US Code is dus het wetboek van de Verenigde Staten

De regelgeving vormt dus een complex geheel waarin vele organisaties een stem hebben, wat de overzichtelijkheid van de regelgeving niet ten goede komt. Met name de vele voorwaarden die verbonden zijn aan het transport en de opslag van waterstof, in combinatie met de vereiste voor gecertificeerde apparatuur, maken dat het betreden van de markt moeilijk is. Er kan dus geconcludeerd worden dat de markt voor waterstof geheel is ingericht op het gebruik van waterstof als industriële grondstof en dat vele veranderingen noodzakelijk zijn alvorens waterstof als universele energiedrager voor de Verenigde Staten gebruikt kan worden.

5. De ontwikkelingen onder het transitieplan

De bestaande markt, die in het vorige hoofdstuk beschreven is, wordt gezien als het startpunt voor de transitie naar een waterstofeconomie. Maar tevens dachten de aan de verschillende meetings deelnemende partijen dat de in deze bestaande markt gebruikte technologieën niet toereikend zouden zijn voor het realiseren van een waterstofeconomie. Bestaande en nieuwe technologieën moesten (verder) worden ontwikkeld om een waterstofeconomie mogelijk te maken. In dit hoofdstuk wordt dieper ingegaan op deze RD&D-plannen waarmee deze ontwikkeling verwezenlijkt moet worden, waarbij, net als in de vorige hoofdstukken, vanuit de deelnemende partijen wordt gekeken. Het overkoepelende RD&D-plan wordt gevormd door het HFC&IT-programma, dat is verdeeld in een aantal verschillende categorieën. Binnen deze categorieën wordt onderscheid gemaakt tussen verschillende technologieën. Een overzicht van deze opzet is gegeven in figuur 5.1. Daarnaast zal ook kort gerefereerd worden aan het Hydrogen Program¹⁶, omdat sommige ontwikkelingen reeds onder dat programma gestart zijn.

In paragraaf 5.1 wordt ingegaan op de verschillende productietechnologieën, waarbij wordt gekeken naar de stand van zaken, de geïdentificeerde barrières op het ontwikkelingspad en de stand van zaken met betrekking tot het oplossen van die barrières aan de hand van concrete onderzoeksprojecten. Daarnaast wordt ook gekeken naar de vooruitzichten van de technologieën. Paragraaf 5.2 en 5.3 beschrijven dezelfde elementen voor opslag en distributie van waterstof respectievelijk. In paragraaf 5.4 wordt vervolgens ingegaan op de maatschappelijke kant van de ontwikkelingen, waarbij aandacht is voor de spelers die betrokken zijn bij de ontwikkelingen, maar ook op het budget dat voor de verschillende technologieën beschikbaar is.

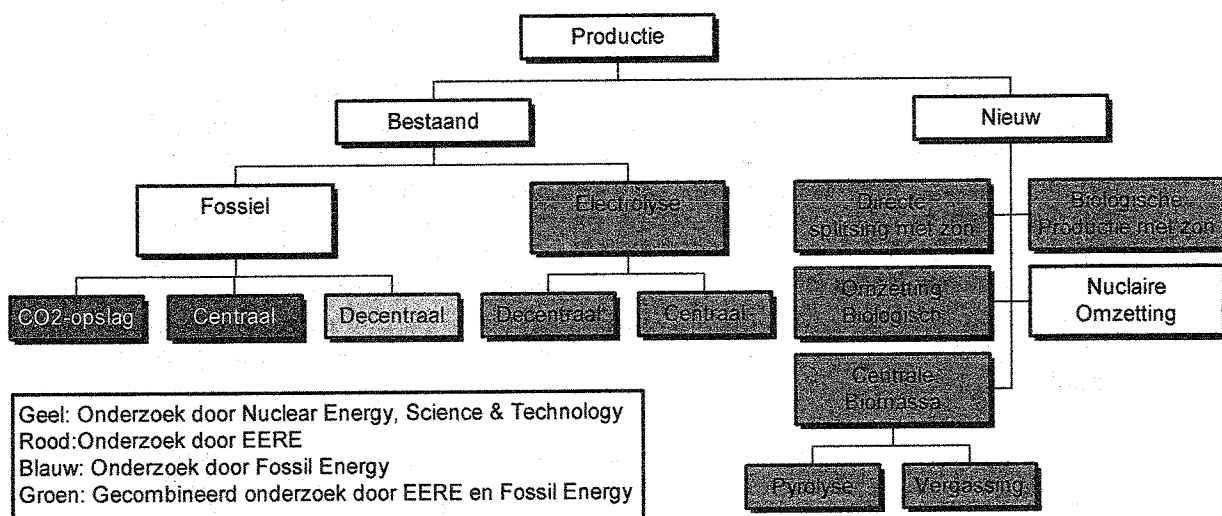


Figuur 5.1: overzicht van het HFC&IT-programma

¹⁶ Het Hydrogen Program was de voorloper van het HFC&IT-program en werd uitgevoerd onder de regering Clinton met als doel het ontwikkelen van waterstoftechnologie voor de langere termijn.

5.1. Productie

Het uiteindelijke doel is het tegen lage prijzen en zonder milieuvuiling produceren van waterstof uit binnenlandse bronnen [Hydrogen Posture Plan, 2004, iii]. Geen enkele technologie is op dit moment echter in staat dit te bereiken. Om deze reden wordt gewerkt aan het verbeteren van bestaande technologieën en tevens aan het ontwikkelen van nieuwe, milieuvriendelijke technologieën. Een overzicht van alle in onderzoek zijnde technologieën en de verdeling van dit onderzoek over de verschillende offices is gegeven in figuur 5.2.



Figuur 5.2: Overzicht van de verschillende productiemethoden voor waterstof

De focus van het onderzoek ligt op dit moment op het ontwikkelen van decentrale productie, omdat hiermee de problemen van transport en opslag worden vermeden. Het is dan ook deze groep waarop als eerste ingegaan zal worden. Daarna zal worden gekeken naar centrale productie, gevolgd door een inventarisatie van het onderzoek naar nieuwe technologieën.

5.1.1. Decentrale productie van waterstof

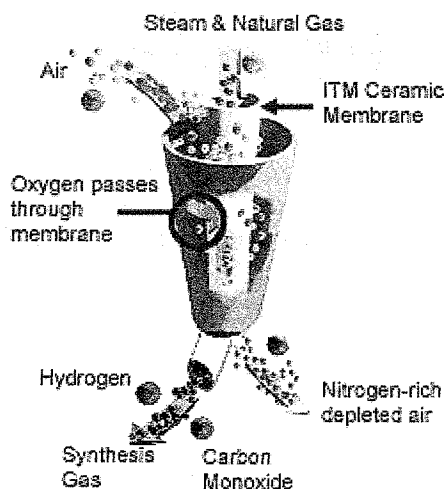
Decentraal produceren van waterstof kan door aardgas te reformeren of door water te electrolyseren. Het ontwerp voor reformatie van aardgas is gebaseerd op grootschalige productie, waardoor de kosten hoog zijn¹⁷. Er zijn een aantal oorzaken aan te wijzen voor deze hoge kosten. Allereerst bestaat er geen standaardontwerp voor een dergelijke installatie, waardoor elke installatie afzonderlijk ontworpen moet worden. Het maken een standaardontwerp is echter moeilijk, omdat de onderdelen van de installatie niet tolerant zijn voor vervuiling. Dat betekent dat elke installatie aan de lokale omstandigheden aangepast moet worden, waardoor de kosten stijgen. Daarnaast hebben de onderdelen een korte levensduur, waardoor ze vaak vervangen moeten worden. Ook de vereiste

¹⁷ Dit wordt veroorzaakt door het optreden van schaafeffecten. Dit betekent dat kleinschalige productie duurder is dan grootschalige productie.

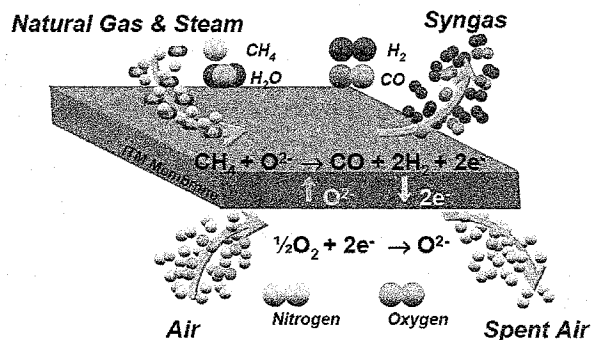
een goed en uitgebreid getest veiligheidssysteem te hebben, brengt extra kosten met zich mee.

De problemen worden op drie verschillende manieren aangepakt. Het is mogelijk bestaande installaties te verbeteren door het ontwerp aan te passen, waardoor kstotenreductie gerealiseerd kan worden. Daarnaast kunnen nieuwe onderdelen worden toegepast om de kosten te reduceren. De derde mogelijkheid is het ontworpen van een geheel nieuw proces, dat niet gebaseerd is op bestaande technologie. Het verbeteren van een bestaand proces is bijvoorbeeld het autocyclisch thermisch reformeren [HFC&IT-voortgangsrapport, 2003]. In dit proces worden twee verschillende reactoren gebruikt, waarbij deze afwisselend een productie-cyclus en een zuiveringscyclus ondergaan. Daardoor wordt een continue stroom synthesegas geproduceerd, terwijl er minder vervuiling optreedt (door regelmatige zuivering). Daarbij wordt de uit de zuiveringscyclus gegenereerde warmte gebruikt voor het (endotherme) reformingsproces met gereduceerde kosten en hogere efficiëntie als resultaat.

Daarnaast wordt gewerkt aan het ontwikkelen van nieuwe procesonderdelen met een langere levensduur en betere prestaties. Een voorbeeld hiervan is de ontwikkeling van het ion transport membrane (ITM). Dit membraan is ontwikkeld door Air Products onder het hydrogen program [Gronich, 2000] en opnieuw als project opgestart door Praxair onder het HFC&IT-programma [HFC&IT-voortgangsrapport, 2003]. Het membraan heeft als doel het overbodig maken van luchtzuivering voor het proces en het integreren van zuivering en reforming (zie figuur 5.3). Dit wordt bereikt doordat het membraan slechts zuurstofionen doorlaat. Hierdoor wordt het proces kleiner, beter geïntegreerd en goedkoper.



Figuur 5.3: Overzicht van het ITM-proces [q]



Figuur 5.4: het Ion Transport Membrane [Chen, C.M.]

In plaats van het reformeren van aardgas kan ook worden gekozen voor het electrolyseren van water. Dit is echter in de meeste gevallen duurder dan reformeren van aardgas, wat wordt veroorzaakt door twee factoren. Allereerst zijn de kosten van de electriciteit relatief hoog, zeker voor kleinverbruikers (wat het geval is bij kleinschalige electrolyse). Daarnaast wordt gebruik gemaakt van lage temperatuur-electrolyse, waarbij de waterstof onder lage druk uit de electrolysecellen komt. Dit betekent dat vervolgens nog een serie compressiestappen moet worden uitgevoerd, met extra kosten als gevolg. Het onderzoek is ontwikkeld zich nu in twee richtingen. Allereerst wordt gewerkt aan het ontwikkelen van hoge temperatuur-electrolyse, waarbij de waterstof onder hogere druk

wordt geproduceerd zodat minder additionele compressie vereist is. Daarnaast heeft dit tevens als voordeel dat de extra warmte gebruikt kan worden voor productie van een deel van de benodigde electriciteit, waardoor de electriciteitskosten per kg geproduceerde waterstof dalen. Voor het proces wordt gebruik gemaakt van reversibel opererende Solid Oxide Fuel Cells (SOFC's). Een aantal systemen met dergelijke brandstofcellen bevindt zich momenteel in de testfase, waarna opschaling van de systemen plaats zal moeten vinden [Herring, 2003].

Daarnaast wordt gewerkt aan het integreren van hernieuwbare energiebronnen en electrolyse door het ontwikkelen van zogenaamde "power parks". In dergelijke parken wordt wind-en zonne-energie gebruikt om waterstof en electriciteit te produceren [Lutz, 2004].

5.1.2. Centrale productie

Als de vraag naar waterstof op termijn toeneemt, zal decentrale productie alleen niet aan deze vraag kunnen voldoen is de verwachting van het DOE. Dit betekent dat centrale productie op dat moment noodzakelijk wordt voor de energievoorziening. Tevens is bekend dat de prijs van de met de huidige grootschalige productiemiddelen te hoog is om waterstof in te kunnen zetten als energiedrager. Om deze reden wordt dan ook door middel van onderzoek getracht de kosten van de bestaande productiemiddelen te verlagen. Tevens wordt gekeken naar nieuwe, milieuvriendelijke productiemethoden voor grootschalige productie van waterstof. Het onderzoek richt zich op drie verschillende punten. Allereerst wordt gewerkt aan het reduceren van de kosten van grootschalige productie door middel van stoomreforming van aardgas. Dit is voornamelijk gericht op het ontwikkelen van nieuwe procesonderdelen, waardoor de kosten dalen en de efficiëntie toeneemt [Fossil Energy Hydrogen Program, 2003]. Daarnaast wordt onderzoek gedaan naar waterstofproductie met behulp van kolenvergassing. Hierbij wordt samengewerkt met het Clean Coal Initiative, dat zich richt op electriciteitsproductie door middel van kolenvergassing. Het derde onderzoekspunt is opslag van CO₂. Hierbij wordt gewerkt aan de ontwikkeling van lekvrije en goedkope opslagmethoden voor CO₂-sequestratie in uitgeputte olie-en gasvelden.

Een andere grondstof voor het produceren van waterstof is biomassa¹⁸, dat als voordeel heeft dat het geen extra uitstoot van broeikasgassen tot gevolg heeft. Onderzoek naar waterstof uit biomassa valt onder het Office of EERE. Het onderzoek richt zich op het reduceren van de kosten van twee verschillende processen, te weten vergassing en pyrolyse. Bij (lage temperatuur) vergassing wordt de biomassa bij een temperatuur van 700-1000 graden Celsius in combinatie met zuurstof wordt omgezet in synthesesgas [Den Uil, 2003]. Dit synthesesgas wordt vervolgens op dezelfde manier tot waterstof verwerkt als het synthesesgas in het stoomreformingsproces.

Zowel onder het hydrogen program als onder het HFC&IT-programma wordt gewerkt aan het vergassen van laagwaardig organisch afval, zoals slurry. Het project onder het hydrogen program strandde daarbij op een te duur voorbereidingsproces. Het project

¹⁸ Biomassa wordt in de EG gedefinieerd als: "de biologisch afbreekbare fractie van producten, afvalstoffen en residuën van landbouw (met inbegrip van plantaardige en dierlijke stoffen), de bosbouw en aanverwante bedrijfstakken, alsmede de biologisch afbreekbare fractie van industrieel en huishoudelijk afval" [citaat uit 2001/77/EG]. Ook in de Verenigde Staten wordt een dergelijke brede definitie gehanteerd, al is deze niet specifiek opgesteld.

onder het HFC&IT-programma loopt nog en is gericht op het superkritisch vergassen van natte biomassa¹⁹ [Spritzer, 2003]. Het afval wordt bij hoge temperatuur en druk omgezet in synthesesgas, waarbij het water uit de biomassa verbruikt wordt in de reactie. Door de snelle reactie wordt voorkomen dat er as wordt gevormd. Daarnaast is het proces economisch aantrekkelijk doordat de grondstof een negatieve prijs heeft (het bedrijf wordt betaald om het afval aan te nemen). Een complete economische analyse is echter nog niet uitgevoerd, waardoor het niet zeker is dat het proces ook commercieel aantrekkelijk is.

Pyrolyse is een proces waarbij de biomassa bij een hoge temperatuur en in afwezigheid van zuurstof wordt ontleedt, waarbij synthesesgas wordt gevormd. Onder het hydrogen program werd een systeem voorgesteld waarbij decentraal pyrolyse-olie werd geproduceerd, die vervolgens centraal werd verwerkt tot waterstof. Het probleem daarbij is dat de waterstof vervolgens naar de eindconsument moet worden vervoerd, wat met de huidige middelen kostbaar is. Het project is dan ook nooit tot uitvoering gekomen.

Onder het HFC&IT-programma wordt op dit moment gewerkt aan het ontwerpen van een temporeel gescheiden pyrolyse reactor [Brown, R.C., 2003]. Normaal wordt een deel van de biomassa verbrandt om de warmte voor de pyrolyse reactie te verzorgen. Dit betekent dus twee reactoren (een verbrandingsreactor en de pyrolyse reactor). In dit ontwerp wordt getracht de kosten te reduceren door de reacties in de tijd gescheiden in één reactor uit te voeren. Daarbij wordt een deel van de biomassa verbrandt, waarbij de warmte wordt opgeslagen in gesmolten zout (in de reactor). Deze warmte wordt vervolgens gebruikt voor de pyrolyse reactie die daarna wordt uitgevoerd. Het reactorontwerp is compleet en nu richt het onderzoek zich op het maximaliseren van de waterstofopbrengst door voedingsstroom variatie en het doen van economische haalbaarheidsanalyses voor het ontwerp.

5.1.3. Nieuwe methoden van productie

Naast het onderzoek naar de verbetering van de huidige productiemiddelen wordt er ook onderzoek gedaan naar nieuwe productiemethoden, die momenteel nog in de kinderschoenen staan, maar in de toekomst een goed alternatief kunnen vormen voor de bestaande productiemethoden. Drie specifieke methoden kunnen daarbij worden onderscheiden: productie van waterstof met behulp van micro-organismen, directe photolytische waterstofproductie en nucleaire waterstofproductie. Hieronder zal kort worden ingegaan op de werking en de status van de verschillende technologieën.

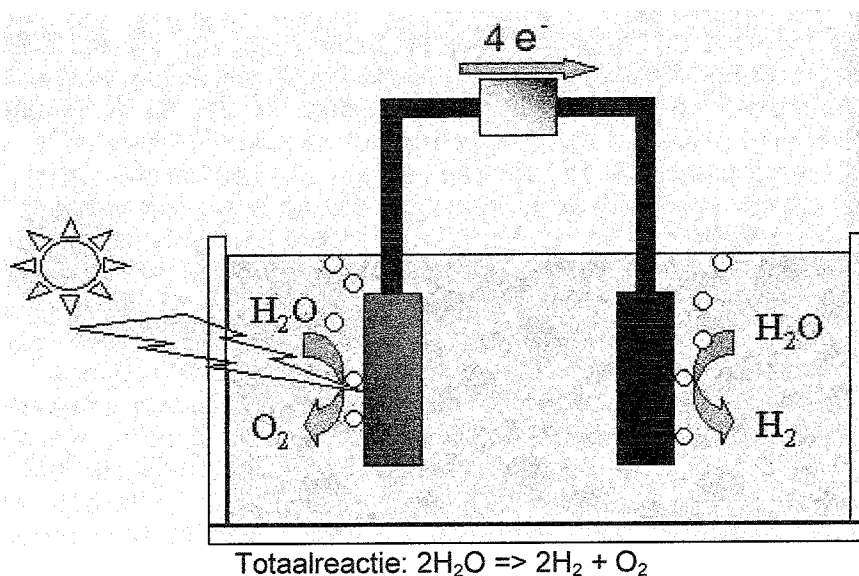
Dat algen in staat zijn kleine hoeveelheden waterstof te produceren, is al langere tijd bekend. Het proces is onderdeel van de normale groeicyclus van de algen, die, net als andere planten, groeien door met behulp van foto-synthese (omzetten van CO₂ in groei en zuurstof met behulp van zonlicht). Aangezien er 's nachts geen zonlicht beschikbaar is, wordt op dat moment het foto-syntheseprocess niet uitgevoerd (en wordt dus geen zuurstof geproduceerd). In plaats daarvan wordt een kleine hoeveelheid waterstof geproduceerd door het hydrogenase-enzym, dat onderdeel uitmaakt van de algen. Dit enzym produceert echter geen waterstof als er zuurstof aanwezig is (dus overdag). Het zuurstofprobleem is echter op te lossen door de algen op "dieet" te zetten. Algen gebruiken zwavel als grondstof voor de groei. Men laat dus eerst de algen groeien door het normale fotosyntheseprocess, waarna men ze zwavel onthoudt. De algen stoppen dan met het uitstoten van zuurstof en gaan een alternatief metabolisch proces volgen.

¹⁹ Waarbij natte biomassa is gedefinieerd als biomassa met een vochtgehalte tot 50%

Het hydrogenaseproces wordt geactiveerd met behulp van de zonne-energie en de algen gaan waterstof produceren. De hoeveelheid geproduceerde waterstof is groter dan de hoeveelheid die 's nachts geproduceerd werd. Na een aantal dagen moeten de algen opnieuw van zwavel worden voorzien, omdat ze anders sterven aan ondervoeding.

Het onderzoek richt zich nu op het verbeteren van de efficiëntie van het proces (die momenteel rond de 0,1% ligt) en het bereiken van continue productie [Ghirardi, 2004]. Om de productie continu te maken tracht men nu een doorstroomde reactor te maken met een verblijftijd van ongeveer 2 weken. Daarna worden de algen verwijderd en opnieuw "vetgemest". Het efficiëntieprobleem wordt aangepakt door de genetische eigenschappen van de algen aan te passen. De algen vangen het zonlicht op met behulp van antennes. Van alle opgevangen zonnestraling kan slechts een bepaald deel worden omgezet in waterstof, de rest wordt als warmte afgestoten. Onderzoekers zijn nu bezig de antennes in te korten, waardoor er slechts genoeg zonlicht wordt opgevangen als kan worden omgezet in waterstof. Het overige zonlicht kan tegelijkertijd doordringen in de diepere lagen van de algencultuur, zodat ook deze waterstof kunnen gaan produceren.

Het splitsen van water kan worden gedaan door met een zonnepaneel opgewekte elektriciteit te gebruiken voor elektrolyse. Bij directe foto-elektrische omzetting wordt getracht de elektrolysecellen en het zonnepaneel in één enkel apparaat te integreren. Het principe werkt hetzelfde als een zonnepaneel, alleen wordt in dit geval geen elektriciteit geproduceerd, maar direct waterstof, zoals weergegeven in figuur 5.5.



Figuur 5.5: overzicht van een foto-elektrisch systeem voor waterstofproductie [r]

Niettemin zijn er een aantal problemen bij het ontwerpen van het systeem. De werking van het systeem wordt beperkt door de eigenschappen ervan. Een elektron kan in de valentieband slechts een beperkte hoeveelheid energie hebben, omdat hij anders losschiet uit de valentieband. Er is dus een maximale hoeveelheid energie om in de valentieband te kunnen zitten. Tegelijkertijd geldt dat een elektron een bepaalde

minimale energiehoeveelheid moet hebben om in geleidingsband te komen. Of een elektron in de geleidingsband blijft, hangt af van de hoeveelheid energie die hij bezit. Het verschil tussen het maximale energieniveau in de valentieband en de minimale hoeveelheid energie is de bandwijdte. Deze bandwijdte-energie wordt meestal berekend met van de minimaal benodigde golflengte λ_g (red adsorption edge), volgens de formule:

$U_g = hc/\lambda_g$, waarbij h de Constante van Planck en c de lichtsnelheid is

Er kunnen dan vier situaties optreden, waarin energieverliezen ontstaan. Als de invallende fotonen een golflengte hebben die groter of gelijk is aan λ_g , hebben ze niet genoeg energie om een elektron in de geleidingsband te brengen. Dit betekent dat het elektron losschiet uit de valentieband en vervolgens weer terugvalt, terwijl de energie wordt omgezet in warmte. Licht met deze golflengte is dus nutteloos voor het gewenste proces. Als de golflengte kleiner is dan λ_g , zal het elektron van de valentieband naar de geleidingsband schieten. Als er echter meer energie aanwezig is dan de benodigd om de sprong te maken, gaat het overschot van deze energie verloren, doordat het omgezet wordt in warmte.

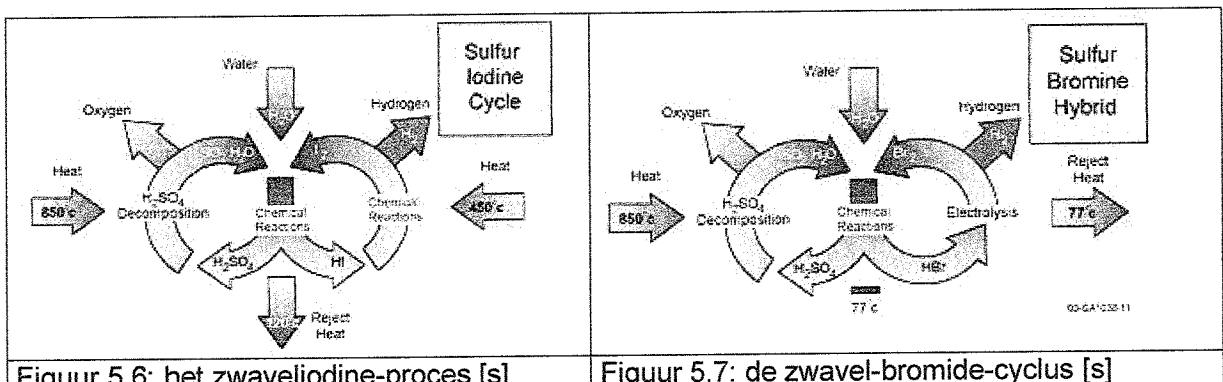
Daarnaast geldt dat de energie die een elektron in de aangeslagen toestand heeft *interne energie* is en geen Gibbs energie²⁰. De Gibbs-energie, ofwel de bruikbare energie is dus kleiner dan de interne energie, waardoor slechts een deel van de interne energie kan worden omgezet in arbeid. Dat vormt dus een verliespost. Als een foto-omzetter wordt bestraald, zal het totale chemische potentieel van de aangeslagen elektronen afhangen van de concentratie van deze aangeslagen elektronen. Als alle aangeslagen elektronen direct worden omgezet in producten betekent dit dat de steady-state concentratie van aangeslagen elektronen nul nadert, waarmee het totale chemische potentieel nul nadert (vergelijkbaar met kortsluiting van een transformator). Er zal dan geen energie worden omgezet. Maar omgekeerd geldt een zelfde redenering. Als het chemisch potentieel het maximum nadert, betekent dit dat de concentratie aangeslagen elektronen het maximum benadert, waardoor de steady-state-waarde ook het maximum nadert (vergelijkbaar met de open klem situatie van een transformator). Dit betekent dat er geen energie wordt omgezet, ofwel de productie is nul. Het optimum ligt dus tussen de twee extremen. Aangezien er altijd een bepaalde concentratie elektronen in aangeslagen toestand zal verkeren bij het optimum, zal er ook altijd een verliespost zijn, door spontaan terugvallende elektronen (fluorescentie). Deze factor wordt echter laag ingeschat, 1-2% [e]. De vier bovengenoemde factoren beperken de maximale theoretische (en dus ook maximale praktische) efficiëntie van de productiemethode. Onderzoek op dit gebied richt zich vooral op het vinden van nieuwe materialen, waarmee de nadelen zo klein mogelijk gehouden kunnen worden. Daarbij zijn twee punten van groot belang. De efficiëntie van een materiaal wordt vooral bepaald door de bandwijdte van het materiaal (en daarmee de maximaal acceptabele golflengte). Een materiaal moet dus een zo groot mogelijke bandwijdte hebben, omdat er dan maximaal gebruik gemaakt kan worden van de invallende straling. Echter, de materialen die over deze eigenschappen beschikken hebben vaak een zeer beperkte levensduur. Dit is vanuit kosten oogpunt niet erg effectief. Omgekeerd hebben de materialen met een lange levensduur vaak een zeer beperkte bandwijdte, waardoor ze niet erg efficiënt zijn. Het is dus noodzakelijk om een materiaal te hebben dat zowel een grote bandwijdte als een

²⁰ Gibbs-energie wordt gedefinieerd als de maximale hoeveelheid netto arbeid die uit de stof gehaald kan worden bij gelijkblijvende temperatuur en druk. De formule is $\Delta G = U - TS + pV$ (met U de interne energie; S de entropie; T de absolute temperatuur; p de druk en V het volume).

lange levensduur heeft. Het onderzoek richt zich dan ook op het vinden van een dergelijk nieuw materiaal of op het combineren van bestaande materialen (meerlaagspolen) om dit doel te bereiken [MaqQueen, 2004].

Water kan, naast splitsing met behulp van elektriciteit, ook worden gesplitst met behulp van warmte. Hiervoor zijn echter temperaturen van boven de 2500 graden Celsius noodzakelijk, wat uit praktisch oogpunt moeilijk te realiseren is. Daarom wordt gebruik gemaakt van thermochemische processen, in plaats van geheel thermische processen. Hierbij wordt het water gekraakt door een combinatie van hoge temperaturen en chemische reacties met andere chemische verbindingen. De warmte voor de reacties kan daarbij worden betrokken uit zonne-energie of uit nucleaire processen. Onderzoek naar de eerste mogelijkheid valt onder het departement van EERE, onderzoek naar nucleaire processen valt onder het departement van Nuclear Energy, Science & Technology. Het onderzoek naar de verschillende chemische reacties wordt door beide departementen samen uitgevoerd. Er zijn vijf verschillende cycli voor het kraken van water en het produceren van waterstof. Deze vijf verschillende cycli kunnen worden onderverdeeld in twee verschillende categorieën: de zwavelprocessen en de calciumbromide-processen. Hieronder zullen de verschillende processen in het kort worden besproken.

Er zijn drie op zwavel gebaseerde processen. In het zwaveliodine-proces wordt zwavelzuur (H_2SO_4) met behulp van warmte omgezet in water, zwaveldioxide (SO_2) en zuurstof (zie figuur 5.6). De zuurstof wordt vervolgens afgevoerd. Het water en de zwaveldioxide worden vervolgens gemengd met water en iodine, waarbij de volgende reactie optreedt: $I_2 + SO_2 + 2H_2O \Rightarrow 2HI + H_2SO_4$. Het zwavelzuur wordt vervolgens gerecicleerd om het opnieuw te kraken, terwijl de waterstofiodine wordt afgevoerd en door middel van warmte wordt omgezet in waterstof en iodine. Vervolgens wordt de iodine weer teruggevoerd het proces in. Theoretische rendementen van 40-50% zijn hierbij mogelijk. Het tweede op zwavel gebaseerde proces is bijna identiek aan het eerste, met het verschil dat er geen gebruik wordt gemaakt van iodine, maar van bromide (zie figuur 5.7). De ontstane waterstofbromide hoeft in dit geval niet gesplitst te worden met behulp van warmte, maar moet worden geëlectrolyseerd.



Figuur 5.6: het zwaveliodine-proces [s]

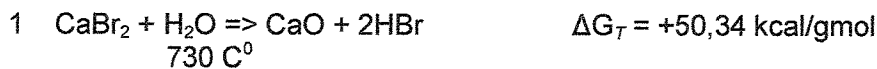
Figuur 5.7: de zwavel-bromide-cyclus [s]

Het derde proces is geheel gebaseerd op zwavel. Zwavelzuur wordt opgebroken in zwaveldioxide, water en zuurstof (waarbij de zuurstof wederom wordt afgevoerd). Door elektrolyse van de ontstane oplossing (van water en zwaveldioxide) wordt vervolgens waterstof en zwavelzuur geproduceerd. De waterstof wordt afgevangen en het zwavelzuur wordt gerecycled in het proces.

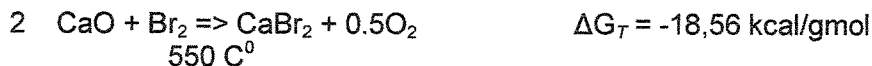
Ondanks de vele overeenkomsten tussen de processen is het zwaveliodineproces het meest kansrijk, omdat hierbij geen elektrolyse plaatsvindt. Bij het elektrolyseren van de

oplossingen met een lage pH zal er namelijk zwavel gevormd worden in plaats van waterstof. Om dit te voorkomen zal de pH hoog gehouden moeten worden. Maar dit betekent dat er minder zuur in de oplossing mag zitten. Een kleinere hoeveelheid zuur betekent echter weer dat er minder waterstof geproduceerd wordt tijdens het proces, een daling in productiesnelheid en dus efficiëntie van het proces, wat invloed heeft op de prijs van de geproduceerde waterstof.

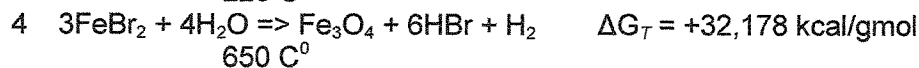
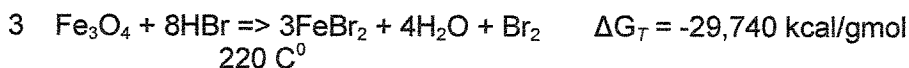
Er bestaat ook een proces dat gebaseerd is op calciumbromide. Dit proces, de UT-3 cyclus genoemd, bestaat uit vier stappen. In de eerste stap wordt de warmte gebruikt om de reactie tussen calciumbromide en water te laten verlopen:



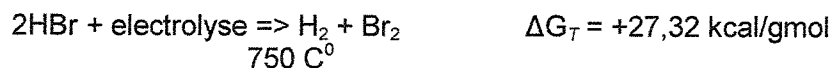
De calciumoxide en de waterstofbromide worden gescheiden, waarna de calciumoxide in een exotherme reactie weer wordt omgezet in calciumbromide:



De ontstane waterstofbromide doorloopt twee andere reacties, waarbij het eindproduct waterstof wordt geproduceerd. De twee reactievergelijkingen staan hieronder weergegeven:

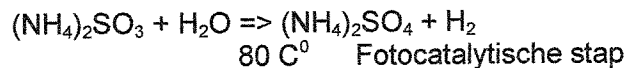


Theoretisch kan dit systeem een efficiëntie van 40-50% bereiken. Niettemin is er nog een aantal problemen dat moet worden opgelost om het proces goed te laten verlopen. In het proces worden vaste stoffen gebruikt, waardoor het moeilijker is de verschillende processen te laten verlopen. Daarnaast heeft calciumoxide een andere kristalstructuur dan calciumbromide (CaO heeft een blokstructuur, terwijl CaBr₂ een orthorombische structuur heeft), wat betekent dat er een structuurverandering plaats moet vinden tijdens de reacties. Hiervoor is het noodzakelijk een (geschikte) drager voor de calciumoxide te vinden, omdat er anders sintering plaats zal vinden, waardoor het proces verstoord wordt. Recente studies hebben hiervoor calciumtinoxide verbindingen gebruikt (CaTiO₃), maar onderzoek is nog gaande en nieuwe verbindingen worden nog geprobeerd. Ook het ontbreken van materialen die langdurig bestand zijn tegen zeer hoge temperaturen zijn nog niet ontwikkeld. Daarnaast is er sprake van een batchproces met vier verschillende opeenvolgende reacties, waarbij warmteoverdrachtsproblemen plaatsvinden (omdat de reacties afwisselend endotherm en exotherm zijn). In een nieuw ontwerp van deze cyclus wordt voorgesteld om de derde en de vierde stap in een enkele stap uit te voeren, waardoor de complexiteit van het proces afneemt. Hierbij wordt de waterstofbromide-oplossing geëlectrolyseerd om zo waterstof en broom te produceren, volgens de reactie:

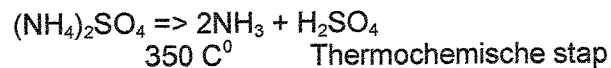


Het ontwikkelen van dit proces vereist echter materialen die bij een temperatuur van 750 graden Celsius niet gecorrodeerd raken door waterstofbromide. Voorgestelde materialen zijn hier legeringen van Fe-20Cr en Hastelloy C-22, maar nader onderzoek is nodig om dit materiaal te testen.

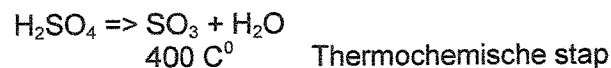
Een in dit opzicht nieuw proces, dat wordt ontwikkeld voor gebruik met zonne-energie, is een zwavel-ammoniakcyclus (weergegeven in figuur 5.8) [T-Raissi, 2003]. Een ammoniumsulfiet-oplossing wordt toegevoerd aan de fotolytische reactor, waar het reageert tot ammoniumsulfaat en waterstof, met behulp van een deel van het water, zoals hieronder weergegeven.



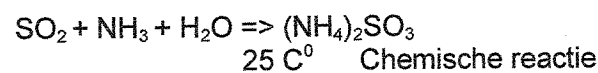
De geproduceerde waterstof wordt afgevangen, terwijl de ontstane ammoniumsulfaatoplossing onder invloed van warmte wordt omgezet in ammoniakgas en zwavelzuur, zoals hieronder weergegeven. Het water dat de oplossing vormde verdampt in hetzelfde proces.



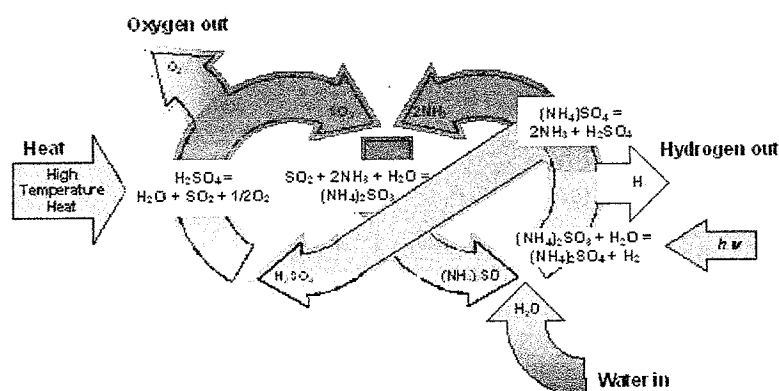
Het ontstane zwavelzuur wordt gescheiden en in twee reactiestappen omgezet in water, zuurstof en zwaveldioxide volgens de onderstaande reacties:



Het mengsel wordt vervolgens gemengd met ammoniak om ammoniumsulfide te produceren, waarbij het benodigde ammoniakgas gerecycled is uit de eerdere reactie.



Dit product wordt vervolgens opnieuw de fotolytische reactor ingeleid, waar het wordt omgezet in waterstof.



Figuur 5.8: een overzicht van de zwavel-ammoniakcyclus [T-Raissi, 2003]

Deze cyclus heeft geen externe energie-input nodig om te kunnen werken, anders dan de zonne-energie, wat een voordeel is boven de zwavel-iodine cyclus, waar wel externe energie nodig is. Door de fotolytische reactie uit te voeren bij een relatief lage temperatuur (80 C^o) is de concentratie sulfaationen relatief hoog. Hierdoor is de pH niet erg laag, waardoor de reactie geen zwavel zal produceren, maar waterstof (zoals dat gewenst wordt). Het proces is echter het experimentele stadium nog niet ontgroeid en is ook nog niet uitgebreid getest.

Voor alle processen met uitzondering van het laatstgenoemde, wordt gebruik gemaakt van een externe energiebron. Binnen het office of Nuclear Energy, Science & Technology wordt dan ook aan twee andere projecten gewerkt om deze externe energievoorziening te realiseren. Enerzijds richt men zich daarbij op het ontwerpen van de Generatie IV lichtwaterreactoren, die kleiner, veiliger en goedkoper moeten zijn dan voorgaande generaties. Deze worden dan gekoppeld aan één van de bovenstaande processen om waterstof te kunnen produceren. Daarnaast wordt gewerkt aan de ontwikkeling van een kleine, veilige en transporteerbare reactor, onder het STAR - programma (Secure Transportable Autonomous Reactor-program) [Doctor, 2002]. Als brandstof wordt uranium gebruikt en als koeling wordt vloeibaar lood toegepast. De reactie vindt plaats met een reactieratio van 1 (gecontroleerde continue splitsingsreactie), waarbij de overtollige warmte naar buiten wordt afgevoerd met behulp van helium of koolstofdioxide, zodat deze gebruikt kan worden voor waterstofproductie.

5.1.4. Voortgang productie

Het in kaart brengen van de technologische ontwikkeling kan op meerdere manieren worden gedaan. Eén van die manieren is in proberen te schatten of de DOE-doelstellingen gerealiseerd zullen worden. Hierbij geldt echter dat als de doelstellingen niet gehaald zullen worden, dit niet betekent dat er geen ontwikkeling heeft plaatsgevonden. Dit geeft slechts aan dat de gewenste ontwikkeling niet heeft plaatsgevonden. Een andere methode om de ontwikkeling in kaart te brengen is inschatten of de technologische barrières geslecht kunnen worden. Voordeel hierbij is dat de technologische ontwikkeling afgemeten kan worden aan het aantal barrières dat is overwonnen. Om deze reden wordt in dit verslag dan ook gebruik gemaakt van deze methode om de ontwikkelingen te beschrijven. Dat zal worden gedaan door voor de verschillende technologieën te kijken naar de daarbij geïdentificeerde barrières.

De ontwikkeling van kleinschalige decentrale productie van waterstof uit fossiele bronnen verloopt relatief snel. Vooral op het gebied van membraantechnologie wordt sterke vooruitgang geboekt, waardoor de ontwerpen compacter en goedkoper worden en tevens minder gevoelig zijn voor vervuiling. Enkele bedrijven zijn op dit moment in staat waterstof te leveren tegen een prijs van \$3,60/kg, terwijl het DOE een prijs van \$5,00/kg verwachtte. De vraag is of deze vooruitgang nog verder doorgezet kan worden. De meeste huidige projecten lopen tot 2007, waarna geconcludeerd kan worden of verdere voortzetting zinvol is. Het onderzoek naar kleinschalige electrolyse is pas in 2003 op gang gekomen, waardoor het moeilijk is aan te geven welke vooruitgang er is geboekt en of de barrières ook daarwerkelijk overwonnen gaan worden. Niettemin kan worden opgemerkt dat veel aandacht wordt besteedt aan het integreren van hernieuwbare bronnen en electrolyse. Daarnaast wordt ook onder gedaan naar het

verlagen van de kosten en het verbeteren van efficiëntie door ontwikkeling van nieuwe catalysatoren. De effecten van dit onderzoek zijn op dit moment moeilijk te voorspellen. Waterstof uit biomassa kent als grootste barrières een lage efficiëntie en moeilijk verkrijgbare en relatief onhandelbare grondstofstromen. De meeste projecten proberen beide barrières simultaan op te lossen. Hierbij wordt bijvoorbeeld gewerkt aan het combineren van verschillende stromen, gevolgd door water-gas-shiftreacties, waarmee een opbrengst van 80% waterstof kan worden bereikt. Ook het toepassen van eerder genoemde innovaties als het omzetten van vochtige biomassa in een enkele stap en het toepassen van temporeel gescheiden reactoren kan daarbij een rol spelen. De meeste projecten verkeren echter nog in een vroeg stadium, met onderzoek en tests op laboratoriumschaal, maar de resultaten daarvan zijn bemoedigend (zoals de 80% opbrengst). Wat dit echter specifiek betekent voor de prijs van de waterstof is nog niet te voorspellen. Daarvoor zijn grootschaliger tests noodzakelijk.

Het onderzoek naar centrale productie uit fossiele brandstoffen valt onder het departement van Fossil Energy. Het onderzoek naar grootschalige stoomreformingstechnologie wordt uitgevoerd door de grote bedrijven met financiële ondersteuning van het office of Fossil Energy. Daarbij is weinig bekend over de resultaten. Er wordt veel moeite gestoken in het ontwikkelen van grootschalige kolenvergassing. Daarbij gaat het vooral om procesmatige verbeteringen met betrekking tot de efficiëntie van de verschillende procesonderdelen, maar ook het verbeteren van de integratie van de verschillende onderdelen. Dit onderzoek moet op korte termijn resulteren in een proeffabriek voor waterstofproductie.

Naast het onderzoek naar de bestaande commerciële productiemiddelen wordt ook onderzoek gedaan naar nieuwe productiemiddelen. Daarbij richt het onderzoek zich op het verbeteren van de productiemiddelen, zowel als op het naar beneden brengen van de prijs door onderzoek en verbeteringen in het proces.

Op het gebied van de waterstofproductie met behulp van algen spelen een aantal problemen. Allereerst is er een algengroep ontdekt die geschikt is voor verder onderzoek voor waterstofproductie. Niettemin spelen ook hier een aantal technische en biologische problemen een belangrijke rol. Door de eerder al genoemde grote antennes van de algen is de efficiëntie van de omzetting laag. Onderzoekers zijn er echter al in geslaagd significante reducties in de antennegrootte te realiseren en het is waarschijnlijk dat verdere reducties kunnen worden gerealiseerd [UC Berkeley, 2004 review pres]. Daarnaast wordt gewerkt aan verschillende manieren op hetzelfde moment om de productiehoeveelheid te vergroten. Ook op dit gebied is vooruitgang geboekt [Ghirardi, 2004]. Ook andere projecten op dit gebied worden opgestart [Lee, 2004]. Er is dus aanzienlijke vooruitgang geboekt op het gebied van biologische waterstofproductie. En ondanks het feit dat er veel meer onderzoek op dit gebied plaats moet vinden voordat de technologie levensvatbaar genoemd mag worden, kan er toch gesproken worden van sterke vooruitgang in het oplossen van de barrières.

Het onderzoek naar photolytische waterstofproductie is vooral gericht op het vinden van materialen die geschikt zijn voor de waterstofproductie, waarbij de problemen liggen op het vinden van een materiaal met grote bandwijdte en hoge zonlichtefficiëntie. Daarnaast moet het materiaal ook duurzaam en goedkoop zijn om tegen een lage prijs waterstof te kunnen produceren. Op dit moment wordt een bepaalde groep materialen verder onderzocht, terwijl het onderzoek naar andere geschikte materialen ook doorgaat. Dat betekent dat de voortgang van het onderzoek voorlopig niet zeer snel verloopt, omdat er pas één groep van potentieel geschikte materialen is gevonden. De andere barrières kunnen pas worden opgelost als een geschikt materiaal is gevonden.

Het onderzoek op het gebied van de productie van waterstof door middel van hoge-temperatuursplitsing wordt gedaan door het departement van Nuclear Energy, Science & Technology en het departement van EERE. Het departement van EERE richt zich daarbij op het ontwikkelen van de zonne-cyclus, terwijl Nuclear Energy zich richt op de nucleaire cycli. Het onderzoek richt zich op het identificeren van concepten waarmee tegen relatief lage prijzen waterstof geproduceerd kan worden. Een uitgebreide analyse van de bestaande processen en concepten wordt daartoe uitgevoerd [Schultz, 2004]. Na deze analyse wordt een aantal cycli verder onderzocht. Daarnaast wordt gewerkt aan het ontwikkelen van materialen die bestand zijn tegen hoge temperaturen. Het onderzoek daarnaar is echter nog in de beginfase en het is dus moeilijk te voorspellen of de barrières overwonnen kunnen worden.

Samenvattend kan dus worden gesteld dat op bepaalde terreinen aanzienlijke vooruitgang wordt geboekt, terwijl op andere terreinen deze vooruitgang minder voorspoedig verloopt. Met name op het gebied van decentrale productie uit fossiele bronnen, waterstof uit biomassa en waterstofproductie met behulp van algen is veel vooruitgang te zien. Op de andere gebieden is vooruitgang minder groot. Deze verschillen in vooruitgang worden veroorzaakt door zowel de technische problemen alsook door de verdeling van de financiële middelen, waar later nog op ingegaan wordt.

5.2. Opslag

Waterstofopslag is een cruciaal element van een waterstofeconomie. Als men er niet in slaagt de waterstof goedkoop en veilig op te slaan onder bepaalde voorwaarden is een waterstofeconomie van tevoren gedoemd te mislukken. Als illustratie hierbij kan worden gerefereerd aan de geheel op elektriciteit gebaseerde maatschappij. Dit is ook (nog) niet mogelijk gebleken door het ontbreken van de juiste opslagmiddelen. Dit feit werd onderkend in zowel het hydrogen program als in het HFC&IT-programma. Beide programma's hebben echter een verschillende benadering. Het hydrogen program richtte zich op langere termijn ontwikkeling van nieuwe opslagmethoden en liet het aan de industrie over om bestaande commerciële technologieën te verbeteren. Het HFC&IT-programma daarentegen is gericht op het zo snel mogelijk verbeteren van de opslagmiddelen, inclusief de bestaande commerciële middelen. We zullen eerst kijken naar het onderzoek onder het hydrogen program en daarna naar het onderzoek onder het HFC&IT-programma, omdat een deel van het onderzoek onder het hydrogen program wordt voortgezet onder het HFC&IT-programma.

5.2.1. Opslag onder het Hydrogen Program

Onder het hydrogen program waren drie verschillende categorieën te onderscheiden: fysieke opslagmiddelen, chemische opslagmiddelen en metaalhydride-opslagmiddelen. Fysieke opslag betekent dat er geen interactie plaatsvindt tussen het opslagmiddel en de waterstof. Onder dit onderdeel viel het onderzoek naar 10.000 psi opslagtanks (689 bar), dat succesvol werd afgesloten. Op dit moment zijn een aantal soorten samengestelde 10.000 psi-opslagtanks commercieel beschikbaar. Chemische opslag is het opslaan van waterstof in koolstofstructuren. Het onderzoek richt zich daarbij op enkelwandige koolstofnanobuizen. De waterstof wordt opgeslagen in de buisjes en kan ook bij kamertemperatuur worden vrijgemaakt voor gebruik, waardoor hoge temperaturen overbodig worden. Het onderzoek loopt sinds 1993 en een commercialisatie is, ondanks geboekte vooruitgang, voorlopig niet te verwachten. Daarnaast wordt ook gekeken naar C-60 en C-70 structuren, welke onder bepaalde

omstandigheden waterstof kunnen opnemen en afstaan. Dergelijke structuren kunnen tot 6 gewichtsprocent waterstof opnemen bij een temperatuur van 180 graden Celsius en een druk van 350-400 psi (24 tot 27,6 bar). Het afstaan van de waterstof gebeurt vervolgens aan de hand van een iridium katalysator bij een temperatuur van 225 graden Celsius. Het onderzoek richt zich op dit moment op het commercialiseren van de technologie door prijsreductie en het verder reduceren van de terugwintemperatuur. De derde mogelijkheid wordt gevormd door opslag in metaalhydrides. Onder het hydrogen program werd vergelijkend onderzoek gedaan naar een aantal verschillende metaalhydride-slurries, waarbij lithiumhybride de meest veelbelovende keuze was. Het onderzoek richtte zich op een aantal specifieke elementen. Allereerst was van belang of de reactie waarmee waterstof geproduceerd werd onder controle gehouden kon worden, zodat de veiligheid van het systeem kon worden gewaarborgd. Daarnaast was het van belang dat het systeem zou voldoen aan de specifieke dichtheidseisen, die werden gesteld in het programma, zonder te hoge kosten te genereren. Verder moest worden geanalyseerd of de kosten van het regeneratiesysteem (transport van restproducten en regeneratiefabriek) competitief waren met conventionele brandstoffen.

5.2.2. Opslag onder het HFC&IT-programma

Het HFC&IT-programma heeft als doel het ontwikkelen van opslag voor mobiele toepassingen. Daarbij wordt gekeken naar zowel de opslag aan boord van het voertuig alsook de opslag op de plaats van tanken (het tankstation). Het onderzoek gaat daarbij uit van zowel het verbeteren van de bestaande commerciële technologieën als het ontwikkelen van nieuwe opslagmiddelen. De barrières zijn ingedeeld in de mobiele opslag (aan boord van het voertuig) en de stationaire opslag (bij het tankstation) en binnen dat kader naar technologie. Bij het opslaan van waterstof in een voertuig kan een aantal problemen worden geïdentificeerd. Het doel is het ontwerpen van een opslagmiddel waarmee genoeg waterstof opgeslagen kan worden om een bereik te hebben dat vergelijkbaar is met het bereik van een bestaande auto [Milliken, 2004; 5]. Daarbij moet rekening worden gehouden met het feit dat het gewicht van de tank niet te hoog mag worden (een bovengrens heeft), dat de grootte van de tank bepaalde maximumwaarden heeft en dat, als enigszins mogelijk, de tank in allerlei vormen beschikbaar moet zijn. Daarnaast mag een tank ook niet te duur zijn, omdat bestaande systemen dit ook niet zijn. Maar dat zijn niet de enige voorwaarden. Ook de levensduur van de tank moet langer worden dan deze op het moment is en de vultijd van een tank mag niet veel langer zijn dan die van bestaande systemen. Er is op dit moment echter geen enkel opslagsysteem dat aan al deze voorwaarden kan voldoen. Opslag van gecomprimeerd gas kan binnen de voor grootte en gewicht gestelde randvoorwaarden niet voldoen aan de eisen voor een groot bereik, omdat slechts een beperkte hoeveelheid waterstof opgeslagen kan worden. Daarbij vormen de kosten van de materialen voor dergelijke tanks een groot probleem. Ook de veiligheid moet gewaarborgd kunnen worden, waarvoor sensoren, kleppen en dergelijke ontworpen moeten worden.

Vloeibare waterstof heeft een grote dichtheid, maar dergelijke tanks zijn duur en groot door de omvangrijke isolatie. Daarnaast is er sprake van significante verdamping van waterstof, wat een veiligheidsrisico vormt in gesloten, slecht geventileerde ruimtes. Het onderzoek richt zich dan ook op het reduceren van deze verdamping.

Het onderzoek naar opslag in de vaste stoffen richt zich op een aantal verschillende elementen. Allereerst zijn de capaciteit van de waterstofopslag en de reversibiliteit van de opslag slecht bij de gewenste werkingstemperatuur. Verder zijn de fundamentele bases van opname en afgifte van waterstof niet goed bekend, waardoor het proces van

verbetering ervan wordt bemoeilijkt. Ook bestaan er geen testprotocollen en testcentra voor onafhankelijke tests van nieuwe opslagmaterialen.

Als wordt gekeken naar systemen die een bepaalde vorm van externe regeneratie nodig hebben (zoals het hydride-slurriesysteem) kan worden geconcludeerd dat de kosten voor het totale proces nog niet vergeleken kunnen worden met andere infrastructuurmogelijkheden, omdat analyses ontbreken. Ook het technische probleem van het afvoeren van het restproduct uit de tank vormt nog een probleem bij dit soort systemen. Maar er zijn niet alleen problemen met de opslag aan boord van het voertuig, maar ook zijn er nog een aantal problemen te signaleren met betrekking tot de omringende (op het tankstation) aanwezige opslag en distributie. De kosten van het vloeibaar maken van waterstof of het comprimeren van waterstof zijn relatief hoog. Daarnaast ontbreken regels en wetgeving voor tankstations en is er weinig bekend over de levensduur van tankinstallaties. Ook moet er samenwerking plaatsvinden om de tankfaciliteit (de pomp zelf) te ontwerpen. Een ander probleem is het gebrek aan informatie over het ondergronds opslaan van waterstof, waardoor niet bekend is of dit een goed alternatief is voor de opslag bij tankstations.

Het onderzoek dat wordt uitgevoerd is grotendeels gericht op het ontwikkelen van nieuwe technologieën voor opslag, in plaats van het verbeteren van bestaande commerciële technologieën. Er wordt onderzoek gedaan naar het verbeteren van opslag van gecomprimeerd waterstof bij 5.000 psi (345 bar) evenals bij 10.000 psi (689 bar), waarbij de nadruk ligt op het reduceren van de kosten van dergelijke opslagtanks. Onderzoek naar opslag van vloeibare waterstof wordt op dit moment niet uitgevoerd binnen het HFC&IT-programma. Eén project omvat het ontwikkelen van flexibele (conformable) opslagtanks, waarbij in eerste instantie de nadruk van het onderzoek ligt op het bereiken van het doel voor 2005 met opslag van gecomprimeerde waterstof en de focus daarna komt te liggen op het verder ontwikkelen van opslag van vloeibare waterstof om te kunnen voldoen aan de doelen voor 2010 en eventueel, afhankelijk van de geboekte vooruitgang, de doelen voor 2015.

De overige projecten zijn gericht op het ontwikkelen en op korte termijn commercieel beschikbaar maken van hydrides voor opslag. Het onderzoek richt zich daarbij op meerdere verschillende hydrides, zowel metaalhydrides als chemische hydrides. Chemische hydrides onderscheiden zich van metaalhydrides door een andere wijze van waterstofopname. Bij een metaalhydride wordt de waterstof opgenomen in de kristalstructuur van het metaal, waardoor het metaal in essentie niet veranderd. Een chemische hydride is een aparte stof, die ontbonden wordt op het moment dat de waterstof eruit teruggewonnen wordt²¹. Onder de chemische hydrides vallen bijvoorbeeld het onderzoek naar natriumboraat-oplossingen en magnesium-hydride-slurrie. Het onderzoek naar natriumboraat richt zich op het ontwikkelen van methoden om het regeneratieproces tegen lage kosten uit te voeren (natriumboraat moet in een apart proces worden omgezet in natriumborohydride). Hiervoor wordt onder andere gekeken naar elektrolyse en het gebruiken van radioactief afval om zo radiologisch de reactie te laten verlopen. Het onderzoek naar magnesiumslurry is analoog aan het onderzoek het hydrogen program uitgevoerde onderzoek naar chemische slurries (onder andere lithiumhydride). Daarnaast werkt Air products aan een nieuwe hydride, waarvan de samenstelling om patentredenen (nog) niet is vrijgegeven. Daarbij wordt uitgegaan van een systeemontwerp (het gehele productie-distributie-opslag-systeem).

²¹ Sommige chemische hydrides bevatten als onderdeel metalen, maar vallen (door de eigenschappen van de stof) niettemin onder de chemische hydrides

Daarnaast zijn er veel projecten waarin wordt gezocht naar nieuwe metaalhydrides, met betere eigenschappen voor het opslaan van waterstof dan de bestaande metaalhydrides, die relatief zwaar zijn voor de opgeslagen hoeveelheid waterstof. Ook wordt gewerkt aan het ontwerpen van een gestandaardiseerd testprogramma voor nieuwe opslagontwerpen, zodat er een onafhankelijk oordeel kan worden gegeven over nieuwe opslagmethoden.

5.2.3. Voortgang opslag

De meeste brandstofcelauto's hebben op dit moment opslag als gecompriemd gas of vloeibare waterstof. De eerste 10.000 psi-tanks werden in december 2001 al goedgekeurd en zijn nu commercieel beschikbaar. Met deze tanks kan een bereik worden gehaald dat identiek is aan dat van een conventionele auto. Verdere ontwikkeling richt zich op het reduceren van de prijs van de tanks. Er wordt geen onderzoek uitgevoerd onder het HFC&IT-programma naar opslag van vloeibare waterstof, waardoor het onwaarschijnlijk is dat er een oplossing komt voor de problemen met dit soort tanks, waaronder het verdampingsprobleem. Mogelijk wordt door individuele bedrijven nog voortgang geboekt, al is hierover op dit moment niets bekend. Onder het hydrogen program is al bewezen dat chemische slurries een goed alternatief kunnen bieden voor de opslag van waterstof in auto's. Het onderzoek hiernaar gaat onder het HFC&IT-programma dan ook door, waarbij vooral wordt gefocust op het ontwikkelen van goedkope processen voor regeneratie van de uitgeputte stoffen. Gezien de inspanningen op dit gebied mag worden aangenomen dat dergelijke processen binnen een aantal jaren beschikbaar komen voor de markt. Op dit moment is dit, samen met compressie-opslag, de meest voor de hand liggende technologie. Op het gebied van metaalhydride wordt minder grote vooruitgang geboekt. Het onderzoek is dan ook meer fundamenteel van aard, waarbij de nadruk ligt op het vinden van nieuwe metaalhydrides om de waterstof mee op te slaan om een grotere capaciteit te realiseren bij hetzelfde gewicht en dezelfde omvang. Het onderzoek moet echter onder lange termijn onderzoek worden ondergebracht, omdat het enkele jaren zal duren voor een dergelijke technologie commercieel toepasbaar is (als er een nieuwe metaalhydride wordt gevonden). De barrières voor stationaire opslag worden niet expliciet uitgevoerd onder het programma, maar onderdelen ervan zijn aanwezig in het onderzoek naar mobiele opslag. Daarnaast voeren bedrijven zelf procesonderzoek uit om bestaande processen te verbeteren (om zo goedkoper te kunnen leveren en daarmee marktaandeel te veroveren). Een deel van het onderzoek, zoals onderzoek naar compressoren en nieuwe condensatietechnieken, wordt uitgevoerd onder het distributie-ontwikkelingsprogramma.

5.3. *Distributie*

In de routekaart uit 2002 werd distributie van waterstof één van de sleutelementen van de waterstofeconomie genoemd. In de routekaart, zowel als in het posture plan, werden de barrières op het gebied van distributie genoemd. In 2003 werd daarom besloten om distributie op te nemen als onderdeel van het HFC&IT-programma. Daarbij werd een aantal barrières op het gebied van distributie opgenomen. Het grootste probleem wordt gevormd door het ontbreken van een objectieve analyse over de verschillende mogelijkheden waarop een waterstofinfrastructuur kan worden opgebouwd. Gezien het ontbreken van een objectieve analyse is het moeilijk om de R&D-fondsen te verdelen over de verschillende technologieën.

Daarnaast heeft elke technologie zijn eigen barrières. De kosten van het comprimeren van waterstof zijn op dit moment erg hoog, waardoor opslag onder hoge (5.000 psi) of zeer hoge druk (10.000 psi) ook duurder wordt. Het omzetten van waterstofgas in vloeibare waterstof is echter ook duur en zeer energie-intensief, waardoor dit dezelfde problemen oplevert als compressie. Het transport per pijpleiding heeft lage operationele kosten, maar wordt gehinderd door zeer hoge kapitaalinvesteringen en lange terugverdiertijden. Daarnaast bestaat ook het gevaar van verbrossing van de pijpleiding, waarvoor een oplossing gezocht moet worden als voor een dergelijk distributiemiddel wordt gekozen.

De focus van het programmaonderdeel ligt momenteel op het maken van de analyse van de verschillende mogelijkheden. De analyse wordt uitgevoerd door een aantal verschillende instanties en aan de hand van een aantal verschillende modellen. In 2006 moeten de resultaten bekend zijn, zodat aan de hand daarvan een consistent ontwikkelingsprogramma voor distributie kan worden opgezet.

Niettemin vindt ook op dit moment al onderzoek plaats om de barrières van de bestaande, zowel als van de nieuwe technologieën op te lossen. Zo doen de grote waterstofbedrijven bijvoorbeeld onderzoek naar nieuwe compressiemethoden en nieuwe materialen voor het fabriceren van pijpleidingen (ook met het oog op de bestaande markt). Ook de infrastructuur die nodig is voor het gebruik van chemische slurries wordt in bepaalde projecten onderzocht. Deze laatste groep projecten valt echter onder het opslagprogramma en niet onder het distributieprogramma.

5.3.1. Voortgang distributie

Op dit moment wordt er onder het programma slechts 1 project uitgevoerd op het gebied van technologische ontwikkeling. Dit project omvat het ontwikkelen van nieuwe compressietechnologie. Daarnaast wordt een aantal projecten uitgevoerd in het kader van de analyse.

Dit betekent dus dat de technologische vooruitgang op dit moment zeer klein is en als gewacht wordt op de resultaten van de analyse voordat meer onderzoek wordt opgestart, zullen de barrières ook niet worden geslecht. Echter, voor 2005 staan 4-8 nieuwe projecten op het programma, wat aangeeft dat er waarschijnlijk niet tot 2006 gewacht gaat worden met onderzoek. Niettemin is het niet waarschijnlijk dat de barrières op het gebied van infrastructuur snel opgelost zullen worden.

5.4. *De spelers in het HFC&IT-programma*

De technologische ontwikkelingen staan niet op zich, maar worden beïnvloed door de maatschappij waarin ze plaatsvinden. Netwerken van direct of indirect betrokken organisaties hebben veel invloed op het verloop van de ontwikkelingen. Het is daarom ook van belang dit netwerk in kaart te brengen. De basis van het netwerk wordt gevormd door de activiteiten van de verschillende spelers die bij het proces betrokken zijn. Maar, daarnaast is het ook van belang te weten waarom de spelers deze activiteiten ondernemen en welk belang zij hebben in het ontwikkelen van een waterstofeconomie.

De spelers kunnen in ruwweg vijf verschillende groepen worden onderverdeeld, die in de sociale kaart in bijlage 7 zijn weergegeven. De eerste groep wordt gevormd door de (semi-)overheid en de politiek, die door middel van wet-en regelgeving en beleidsvorming in staat zijn sturing uit te oefenen op de richting en de intensiteit van onderzoek. De uitvoering van het onderzoek ligt in handen van de publiek en private

kennisinstellingen (de tweede groep) en bedrijven uit de industrie (de derde groep)²². De vierde groep wordt gevormd door de serviceverlenende bedrijven²³. Deze bedrijven zijn vaak niet direct betrokken bij technologische ontwikkeling, maar hebben wel invloed op de factoren die samenhangen met de technologische ontwikkelingen (zoals regelgeving en politieke invloed). De laatste groep wordt gevormd door de consumenten en de hen vertegenwoordigende belangengroeperingen. De verschillende groepen en hun onderlinge relaties zullen hieronder kort worden besproken.

5.4.1. Overheid en de politiek

De drijvende kracht achter de ontwikkeling en uitvoering van de transitie naar een op waterstof gebaseerde economie wordt gevormd door de politiek en de overheid, waarbij met name het DOE een grote rol speelt. Door de toenemende afhankelijkheid van olie uit vijandige gebieden komt de zekerheid van de Amerikaanse energievoorziening steeds verder onder druk te staan. Het zoeken naar alternatieve bronnen van energievoorziening, met name voor mobiele toepassingen, is dan ook noodzakelijk, omdat er anders zeer groot stemmenverlies kan optreden in het geval van een crisis in de energievoorziening, die veroorzaakt wordt door olietekorten. Aan de andere kant moet zowel het congres als de overheid rekening houden met de belangen van bestaande Amerikaanse bedrijven, zeker omdat deze de politieke campagnes van de president en diverse congresleden hebben (mede-)gefinancierd. Het congres, zowel als het DOE (dat onder leiding van de regering Bush staat) moeten dus afwegingen maken tussen energiezekerheid en belangen van het Amerikaanse bedrijfsleven, iets dat gedaan kan worden door de betreffende bedrijven te betrekken bij het onderzoek en ze door middel van grote subsidies "schadeloos" te stellen.

De politiek wordt gevormd door het congres (dat bestaat uit de afgevaardigden van de verschillende staten) en de overheden van de verschillende afzonderlijke staten. Het congres heeft op twee manieren invloed op het ontwikkelingsproces. Allereerst hebben zij de mogelijkheid de wet- en regelgeving te veranderen of te vernieuwen, zoals reeds genoemd in paragraaf 4.4.2. Daarnaast stelt het congres jaarlijks de budgetten (de appropriations) voor de verschillende overheidsinstanties vast. Het vaststellen van het budget voor de programma's en de departementen is een politiek onderhandelingsproces aan de hand van budgetvoorstellen, waarbij elk congreslid probeert het maximale voordeel te bereiken voor de staat die hij vertegenwoordigt [Morris, 2004]. Dit betekent dus dat de uitkomst van het proces wordt beïnvloed door de belangen en de onderhandelingspositie van de verschillende staten, waarmee de continuïteit van de verschillende onderzoeksprogramma's geen gegeven is.

Het DOE kan in principe, binnen de grenzen van de vastgestelde financiering, zelf de onderzoeksrichting vaststellen. Niettemin wordt de financiering vaak vergezeld van een "aanbeveling" voor bepaalde onderzoeksrichtingen, die worden afgedwongen door de dreiging van korting van het budget voor het volgende jaar. Op deze wijze wordt het onderzoek dus in sterke mate gestuurd door de politiek. Het DOE kan op zijn beurt het congres beïnvloeden door rekenschap te geven van de resultaten van het onderzoek. Indien een bepaalde onderzoeksrichting niet rendabel blijkt te zijn, kan voorgesteld worden de financiering naar een andere post te schuiven. De macht voor het toekennen

²² Industrie wordt hier gedefinieerd als bedrijven die stoffelijke goederen produceren met als doel het maken van winst.

²³ Serviceverlenende bedrijven worden hier gedefinieerd als bedrijven die immateriële goederen produceren (zoals kennis). Voorbeelden hiervan zijn consultants, banken en advocaten.

van subsidiegelden aan bepaalde bedrijven of instellingen voor projecten ligt bij het programma-management van het DOE. Het onderzoek kan dus worden geconcentreerd op het verder ontwikkelen van waterstof uit fossiele brandstoffen, wat in het belang van verschillende grote bedrijven is en tevens kan zorgen voor ondersteuning van de binnenlandse industrie.

Het onderzoek en het ontwikkelen van de regulering doet het DOE in samenwerking met het Department of Transportation (DOT), de American Society of Mechanical Engineers (ASME) en het National Institute of (NIST). Het DOT is het ministerie van Verkeer en is daarmee betrokken bij het ontwikkelen van nieuwe regulering voor transport van waterstof. De ASME en het NIST zijn betrokken bij de ontwikkeling van regulering voor opslag en distributie van waterstof.

Naast het DOE zijn nog twee andere departementen bij wet gerechtigd om onderzoek te doen naar waterstoftechnologie. Het Department of Defense (DOD) financiert onderzoek naar waterstoftechnologie en brandstofcellen voor militaire toepassingen. Zo wordt onder andere gewerkt aan de ontwikkeling van een brandstofcel-waterstofeenheid als vervanging voor batterijen en accu's. Het meeste van dit onderzoek is echter niet openbaar. Het Department of Agriculture (DOA) heeft budget voor onderzoek naar waterstof uit biomassa, waarvan echter, voor zover bekend, niet of nauwelijks gebruik wordt gemaakt.

5.4.2. Kennisinstanties

De groep kennisinstellingen bestaat uit universiteiten, nationale laboratoria en private onderzoeksinstanties. De universiteiten en de onderzoeksinstanties worden door de overheid bekostigd, terwijl de private onderzoeksinstanties uiteraard door het bedrijfsleven bekostigd worden (vaak als onderdeel van een concern). Hieronder worden de drie verschillende groepen kort besproken.

Universiteiten zijn instanties waar kennis vergaard en overgedragen wordt. In de Verenigde Staten zijn universiteiten, net als in Nederland, door de overheid gefinancierd en de resultaten van dit onderzoek zijn van belang voor de ontwikkeling van nieuwe commerciële producten. Veel van het door universiteiten uitgevoerd onderzoek is gerelateerd aan waterstoftechnologie, mede door het feit dat hierdoor extra financiering verkregen kan worden. Hieronder vallen bijvoorbeeld zuiveringsmembranen, maar ook onderzoek naar algenculturen die waterstof produceren. De universiteiten voeren in opdracht van het DOE contractresearch uit, waarbij de nadruk ligt op fundamenteel onderzoek dat van belang is voor de ontwikkeling van waterstoftechnologie. Vaak wordt hierbij samengewerkt met het bedrijfsleven en de nationale laboratoria.

De nationale laboratoria zijn de onderzoeksinstanties van het DOE met elk hun eigen expertisegebied. De acht nationale laboratoria die veel onderzoek doen naar waterstof zijn National Renewable Energy Laboratory (NREL), National Energy Technology Laboratory (NETL), Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Argonne National Laboratory (ANL), Los Alamos National Laboratory (LANL), Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Sandia National Laboratory (SNL) en het Savannah River National Laboratory (SRNL)²⁴. Het onderzoek is daarbij vaak fundamenteel van aard, maar er wordt eveneens toegepast onderzoek uitgevoerd (vaak in combinatie met fundamenteel onderzoek). Daartoe wordt veel samengewerkt met universiteiten en bedrijfsleven, zeker op het gebied van waterstofonderzoek. De nationale laboratoria hebben dan ook veel

²⁴ In totaal zijn er 23 nationale laboratoria en technology centers [t]

baat bij het extra geld dat beschikbaar is gemaakt voor waterstofonderzoek, omdat een deel daarvan bij hen terecht komt.

Private onderzoeksinstituten zijn vaak onderdeel van een groot bedrijf, maar er zijn ook onafhankelijke onderzoeksinstituten, die contractresearch uitvoeren voor bedrijfsleven en overheid. De grote hoeveelheid onderzoek naar waterstoftechnologie biedt kansen voor deze bedrijven om hun expertise in te zetten. Vaak wordt daarbij samengewerkt met andere instituten (bedrijfsleven of overheid) om zo expertises te bundelen en betere resultaten te behalen.

Op 27 april 2004 kondigde toenmalig secretary of Energy Abraham Spencer aan dat er een aantal zogenaamde "Centers of Excellence" werden opgericht. Deze centers moesten de problemen met betrekking tot de opslag van waterstof gaan oplossen, waarbij elk center zich op een bepaald deelgebied van dit onderzoek zou concentreren. In totaal is \$350 miljoen beschikbaar gemaakt voor de drie verschillende nieuwe centers. In bijlage 8 wordt een kort overzicht gegeven van de drie verschillende centers, waarbij wordt gekeken naar het deelgebied van onderzoek, het instituut onder wiens leiding het center opereert en de andere deelnemers aan het onderzoek.

5.4.3. Industrie

De groep bedrijven uit de industrie is zeer divers, omdat waterstoftechnologie veel verschillende aspecten omvat. De vier belangrijkste bedrijvenclusters worden gevormd door de industriële gasbedrijven, de automobielproducenten, de oliemaatschappijen en de brandstofcelbedrijven.

De ontwikkelingen bieden veel kansen voor de industriële gasbedrijven, omdat een geheel op waterstof gebaseerde maatschappij een veel grotere markt betekent. Maar deze ontwikkelingen brengen ook risico's met zich mee, omdat kleinschalige productie de schaalvoordelen teniet doet en daarmee hun positie op de markt ondermijnt. Dit is een goede reden om actief nieuwe kleinschalige productietechnologieën te ontwikkelen, waarbij de jarenlange ervaring met waterstof hier een kennisvoordeel betekent. Maar zelfs als een op waterstof gebaseerde economie nooit gerealiseerd wordt, kunnen de nieuwe technologieën worden gebruikt voor de productie of worden geëxporteerd naar andere landen in de wereld, zoals Japan en Duitsland (waar de meeste van deze bedrijven ook actief zijn). De voordelen van mee ontwikkelen zijn dus legio en deze bedrijven, waaronder Praxair en Air Products, doen veel door het DOE gesubsidieerde projecten. De activiteiten zijn daarbij voornamelijk gericht op het ontwikkelen van productie- en distributietechnologie. Ook de oliemaatschappijen hebben belang bij het mee ontwikkelen van de waterstofeconomie, al zijn er tevens grote nadelen verbonden aan de opkomst van waterstoftechnologie. Hun deelname is dan ook voornamelijk strategisch van aard. Zij zien de wereldwijde trend naar alternatieve brandstoffen, waarbij in meerdere landen waterstof als brandstof voor auto's naar voren geschoven wordt. Gezien het feit dat zij deze ontwikkeling niet aan zich voorbij kunnen laten gaan, participeren zij in het onderzoek door middel van financiering en aankoop van veelbelovende technologieën, met de nadruk op technologieën die van belang zijn voor tankfaciliteiten. Op deze wijze blijven zij betrokken in de nieuwe markt, terwijl ze tegelijkertijd actief kunnen blijven in de bestaande markt. De ervaring met het bouwen en het gebruik van tankfaciliteiten, dat zij in samenwerking met industriële gasbedrijven en automobielfabrikanten doen, is dan ook gericht op het verwerven van kennis binnen de markt voor waterstofstoftanken. Het zijn dan ook allen testtankstations voor

waterstofauto's²⁵ (voornamelijk van Chevron-Texaco, Exxon-Mobil, Shell en BP), die worden gesubsidieerd door het DOE en de overheid van Californië. De tankfaciliteiten zijn ontworpen voor brandstofcelauto's, welke ontworpen en gefabriceerd worden door de automobielbedrijven, waarbij de Japanse bedrijven voorop lopen bij het leveren van deze auto's. Voor de brandstofcelauto's worden hoge eisen gesteld aan veiligheid, comfort en prijs. Het doel is het leveren van een brandstofcelauto die gelijkwaardig of beter presteert op al deze gebieden dan de bestaande auto's. Vooral de opslag van de waterstof aan boord, waarmee de gewenste radius gehaald kan worden zonder al te veel ruimte op te offeren is technisch moeilijk. De automobielbedrijven werken dan ook samen met kennisinstellingen om nieuwe opslagtechnologieën te ontwerpen. Daarnaast wordt ook samengewerkt met industriële gasbedrijven en oliemaatschappijen om het tankproces te optimaliseren. Met name de Amerikaanse autobedrijven zijn min of meer gedwongen de ontwikkelingen te volgen om de concurrentie aan te kunnen gaan. De Japanse automobielbedrijven innoveren snel om op korte termijn brandstofcelauto's te kunnen leveren en zij leveren veel van deze auto's aan testprojecten in Californië. Het is ook deze staat die door steeds stringenter regels deze bedrijven dwingt emissies te verlagen en daarnaast heeft de staat ook een omvangrijk waterstofprogramma. Verbonden aan de waterstoftechnologie is ook de brandstofcel, die door verschillende bedrijven wordt geproduceerd. Ballard is één van de grootste spelers op de markt voor brandstofcellen. De ontwikkelingen richten zich vooral op het goedkoper maken van de brandstofcel, het ontwerpen van nieuwe koppelingen tussen brandstofvoorzieningsstelsel en de brandstofcel en het toleranter maken van brandstofcellen voor vervuiling in de invoer, zodat er kostenbesparing kan optreden aan de productiekant. Uiteraard hebben deze bedrijven er alle belang bij dat de ontwikkelingen snel en succesvol worden afgesloten, omdat zij dan omzet kunnen gaan maken.

Naast de gevestigde bedrijven zijn er ook tal van kleine nieuwe bedrijven die met innovatieve ideeën voor waterstoftechnologie komen. Deze bedrijven worden meestal niet gesubsidieerd door de overheid, waardoor ze beperkte financiële middelen hebben. Dit heeft als voordeel dat ze niet gebonden zijn aan een bepaalde onderzoeksrichting, waardoor er zeer creatieve producten ontstaan. De grotere bedrijven springen daar vervolgens op in door het bedrijf dan financieel te ondersteunen. Het is moeilijk om al deze bedrijven te noemen, zeker omdat het aantal en de samenstelling van deze bedrijven relatief snel veranderd.

5.4.4. Serviceverlenende-bedrijven

De groep serviceverlenende bedrijven is zeer divers. In deze groep vallen onder andere consultancy bedrijven, maar ook energiebedrijven en openbaar vervoerbedrijven. De consultancy bedrijven bezitten vaak expertise op een bepaald gebied, zoals energietechnologie of wetgeving, waardoor ze uitstekende aanvullingen vormen op de expertise van bedrijven en overheidsinstellingen.

Daarnaast zijn er ook bedrijven die zeer geïnteresseerd zijn in het gebruik nemen en uitproberen van de nieuwe technologieën. Hieronder vallen bijvoorbeeld openbaar vervoer bedrijven, zoals Sunline Transit Agency en Alameda Contra Costa Transit uit Californië, maar ook postorderbedrijven zoals TNT zijn geïnteresseerd in de schone en

²⁵ Onder waterstofauto's vallen zowel brandstofcelauto's als ook auto's met interne verbrandingsmotor die waterstof als brandstof gebruiken.

zuinige toepassing die brandstofcelauto's kunnen bieden en experimenteren hier dan ook mee (in samenwerking met andere bedrijven).

5.4.5. Belangengroeperingen en consumenten

De Verenigde Staten kent zeer veel belangengroeperingen, waarvan het grootste deel gericht is op het behartigen van een bepaalde groep binnen de maatschappij. Met name de milieugroeperingen zijn zeer geïnteresseerd in de ontwikkelingen van schone waterstoftechnologie. Op dit moment zijn deze groeperingen dan ook tegen het waterstofbeleid gericht, omdat dit uitgaat van gebruik van fossiele brandstoffen en nucleaire energie in plaats van uit te gaan van duurzame energiebronnen.

De gewone consument is op dit moment nog niet betrokken bij de ontwikkelingen en de programma's voor het demonstreren en promoten van waterstof zijn nog niet in gang gezet. De verwachting is dat dit pas zal gebeuren als de technologie is uitontwikkeld en in gebruik wordt genomen. Bestaande vooroordelen over het gebruik van waterstof worden dus niet op korte termijn weggenomen.

5.5. *Het budget voor het HFC&IT-programma*

In zijn State of the Union van 2003 kondigde president Bush aan dat hij 1,2 miljard dollar over vijf jaar zou uitgeven voor het ontwikkelen van een op waterstof gebaseerde economie. De verdeling van dat budget over de verschillende categorieën en technologieën geeft een belangrijke indicatie over de prioriteiten van de Amerikaanse overheid. Daarnaast kan de hoeveelheid geld die beschikbaar is voor een technologie grote invloed hebben op de snelheid waarmee de technologische ontwikkeling plaatsvindt. Om deze reden wordt in deze paragraaf dieper ingegaan op de verdeling van de financiële middelen. Allereerst wordt gekeken naar de verdeling van het budget over de verschillende categorieën over de jaren 2002 tot en met 2005, waarna naar de verdeling binnen de categorieën wordt gekeken voor dezelfde jaren.

Het HFC&IT-programma is verdeeld in twee verschillende hoofdcategorieën, te weten brandstofceltechnologie en waterstoftechnologie. Het budget voor beide categorieën is weergegeven in tabel 5.1. Daarbij is opvallend dat het budget voor waterstoftechnologie sneller stijgt dan dat voor brandstofcellen. In 2004 en 2005 is het budget voor waterstoftechnologie zelfs groter dan dat voor brandstofcellen. Een mogelijke verklaring hiervoor ligt in het feit dat er onder het Hydrogen Program van de regering Clinton reeds veel geïnvesteerd is in brandstofceltechnologie. Als vervolgens gekeken wordt naar het totaalbedrag dat tot nu toe is uitgegeven aan de ontwikkeling van de waterstofeconomie kan geconcludeerd worden dat nog niet de helft van de \$1,2 miljard is uitgegeven.

<i>Categorie/jaar</i>	<i>2002</i>	<i>2003</i>	<i>2004</i>	<i>2005</i>	<i>Totaal</i>
<i>Waterstoftechnologie</i>	28,9	42	93,2	120,3	284,4
<i>Brandstofceltechnologie</i>	46,7	55,5	65,2	77,5	244,9
<i>Totaal</i>	75,6	97,5	158,5	197,8	529,4

Tabel 5.1: de verdeling van het budget in miljoenen dollars over de verschillende categorieën binnen het HFC&IT-programma [u].

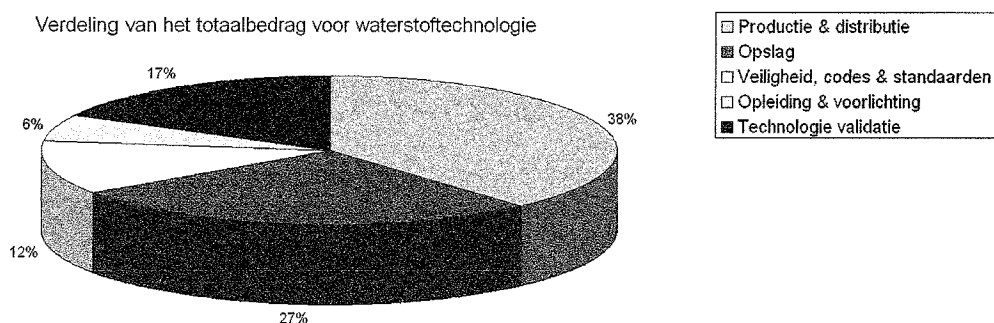
Het is van belang te kijken hoe de verdeling van deze \$284 miljoen is over de verschillende categorieën op het gebied van waterstoftechnologie, omdat er sterke verschillen bestaan. Een overzicht van de verdeling binnen de categorie

waterstoftechnologie is gegeven in tabel 5.2. Productie, distributie en opslag van waterstof krijgen samen 65% van het totale budget voor waterstoftechnologie. Dit is ook te rijmen met het feit dat de technologie ontwikkeld moet zijn en de consumenten op dit moment niet betrokken zijn bij de ontwikkeling, zoals dit in de vorige paragraaf naar voren is gekomen.

Categorie/jaar	2002	2003	2004	2005	Totaal
Productie & distributie	11,2	13,8	33,8	50,3	109,1
Opslag	6,1	11,3	29,4	30	76,8
Veiligheid, codes & standaarden	4,5	4,8	5,9	18	33,2
Opleiding & voorlichting	1,4	2	5,7	7	16,1
Technologie validatie	5,7	10,1	18,3	15	49,1
Totaal	28,9	42	93,1	120,3	284,3

Tabel 5.2. Overzicht van het budget binnen de categorie waterstoftechnologie in miljoenen dollars.

Het is echter wel merkwaardig dat opslag, dat als sleuteltechnologie beschouwd werd voor het realiseren van een waterstofeconomie slechts 27% van de totale financiering voor waterstoftechnologie krijgt, tegen 38% voor productie en distributie (zie figuur 5.10).



Figuur 5.10.: overzicht van de verdeling van het totale bedrag voor waterstoftechnologie.

Van het geld voor productie & distributie is een groot deel bestemd voor onderzoek naar waterstof uit kolen en waterstofproductie met behulp van nucleaire energie. Dit is in 2004 respectievelijk \$4,8 en \$6,4 miljoen en in 2005 respectievelijk \$16 en \$9 miljoen. Dit betekent dat deze technologieën samen goed zijn voor 43% van het budget voor productie & distributie in de periode 2004-2005 en over ruim 33% van het totale budget voor productie en distributie in de periode 2002-2005. Dit is dus in tegenstelling met het doel om kleinschalige, decentrale productie en milieuvriendelijke productie te willen ontwikkelen.

De conclusie is dus dat het zwaartepunt van het onderzoek nu op waterstoftechnologie komt te liggen in tegenstelling tot eerdere jaren. Het grootste deel van dat extra geld voor waterstoftechnologie gaat naar de ontwikkeling van productie, distributie en opslag, waarbij productie & distributie het merendeel ontvangen. Gezien het feit dat er binnen distributie geen projecten worden opgestart, volgt daaruit dat het geld in productie wordt geïnvesteerd. Daarbij ligt de nadruk op het ontwikkelen van kleinschalige decentrale productie, maar even zo goed op grootschalige productie uit kolen en grootschalige productie met behulp van kernenergie.

6. Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk wordt op een kritische manier teruggekeken naar de afgelopen hoofdstukken. Met behulp van de informatie en de kritische terugblik wordt vervolgens een antwoord gegeven op de onderzoeksvragen van het rapport. Tevens worden aanbevelingen voor verder onderzoek gedaan.

Welke beleidsmaatregelen zijn getroffen om de ontwikkeling van een op waterstof gebaseerde economie te bewerkstelligen?

Met de opgestelde beleidsplannen heeft het DOE een scenario opgesteld voor de ontwikkeling en realisatie van een op waterstof gebaseerde economie. De opgestelde plannen zijn opgesteld aan de hand van een aantal stappen, die overeenkomen met de stappen in het eerder in hoofdstuk 2 genoemde stappenplan van Shell. In dat plan begint de ontwikkeling van een scenario met het omschrijven van wat er precies bereikt moet worden, gevolgd door een omschrijving van welke middelen beschikbaar zijn om dit te bereiken. Daarna moet, aan de hand van een coherent en geloofwaardig toekomstbeeld, de mentale kaart van de betrokkenen worden veranderd. In dit geval zou dat een aanpassing betekenen van mentale kaart van de gehele maatschappij, omdat deze transitie de gehele maatschappij beïnvloed.

De nationale visie geeft een mogelijk beeld van een op waterstof gebaseerde economie rond 2030 en 2050. Tevens werden stimulerende en remmende factoren voor de ontwikkeling van een dergelijke economie in kaart gebracht. De routekaart verschaftte vervolgens, buiten de informatie uit de visie, een overzicht van de (mogelijke) technologische middelen die beschikbaar zijn of komen en de paden waarlangs deze zich zouden kunnen ontwikkelen. Het uiteindelijke transitieplan omvat al deze informatie en geeft verder een overzicht van mogelijke ontwikkelingspaden, de beschikbare financiële middelen en de te zetten stappen op weg naar de realisatie van een op waterstof gebaseerde economie. De plannen geven daarmee een coherent beeld van de gewenste ontwikkeling en de manier waarop men denkt deze te bereiken.

Niettemin kan, als er kritisch naar het geheel wordt gekeken, een aantal opmerkingen worden gemaakt. Allereerst is het opgestelde scenario technocratisch van aard, waardoor de suggestie wordt gewekt dat de ontwikkeling en marketing van het product lineair zal verlopen. Daarbij wordt uitgegaan van technologie die de prijs van waterstof lager maakt, in plaats van de prijzen van de huidige brandstoffen aan de economische omstandigheden aan te passen. Een tweede gevolg is dat slechts een kleine groep bedrijven en instellingen betrokken, omdat de technologische ontwikkelingen nog in een relatief vroeg stadium verkeren. Het kenmerk van een transitie is echter een maatschappijbrede verandering, waarbij dus ook de gehele maatschappij betrokken is.

Daarnaast geldt dat het scenario gebaseerd is op de visie, die op zijn beurt gebaseerd is op de verwachtingen van een kleine groep mensen, waarvan de meesten belang hebben bij het in stand houden van de status-quo met betrekking tot fossiele brandstoffen, omdat de bedrijven waarvoor zij werken in deze sectoren actief zijn²⁶. In de visie voor 2030, zowel als die voor 2050, wordt dan ook een belangrijke plaats toegekend aan het gebruik van fossiele brandstoffen als grondstof voor de productie van waterstof. Het nut van een visie, ondersteuning van nieuwe en creatieve denkbeelden,

²⁶ Hierbij wordt bijvoorbeeld gedacht aan oliemaatschappijen, autobedrijven, maar ook het DOE dat een grote afdeling voor fossiele energie heeft.

wordt hierdoor ondergraven. Daarnaast wordt de visie niet bekeken als mogelijke toekomst, maar wordt actief gewerkt aan het realiseren van de visie, waardoor andere mogelijkheden worden uitgesloten.

Welke technologische, politieke, economische en juridische factoren spelen een rol bij de transitie naar een op waterstof gebaseerde economie in de Verenigde Staten met betrekking tot de productie, opslag en distributie van waterstof?

De transitie naar een op waterstof gebaseerde economie wordt voornamelijk beïnvloed door politieke, juridische en technologische factoren. Zoals in paragraaf 5.4. al aangegeven vormen politiek en overheid de drijvende krachten achter de ontwikkeling en uitvoering van de transitieplannen. Het congres bepaalt aan de hand van een budgetaanvraag van het DOE en interne budgetonderhandelingen de hoeveelheid geld die vrijgemaakt wordt voor de verschillende onderzoeksrichtingen van het waterstofonderzoek. Ook de voortgang van de verschillende richtingen en onderzoeken speelt een rol in het bepalen van de allocatie van de middelen. De verdeling van het budget over de verschillende projecten binnen een onderzoeksrichting wordt gedaan door het DOE zelf.

Uit paragraaf 5.5. blijkt dat het grootste deel van het budget wordt besteed aan de ontwikkeling van productie en-opslagtechnologie. Binnen de categorie productie wordt vervolgens het grootste deel besteed aan de ontwikkeling van productiemiddelen die gebruik maken van fossiele brandstoffen en nucleaire energie. Hierbij zijn vooral gevestigde bedrijven betrokken, die zelf grote belangen hebben in de fossiele energie-industrie. De deelname van deze bedrijven is voornamelijk strategisch van aard, omdat zij niet willen achterblijven bij de ontwikkelingen, maar tevens niet te veel willen investeren in deze nieuwe technologieën, omdat deze pas op langere termijn tot bloei zullen komen, als het al gebeurt (wat nog onzeker is).

Naast de politieke en technologische factoren, is ook de juridische factor van groot belang, omdat deze de realisatie van een op waterstof gebaseerde economie geheel tot staan kan brengen. De huidige regelgeving is niet aangepast op het gebruik van waterstof als universele energiedrager, waardoor een drastische herziening noodzakelijk is. Het ontbreken van internationale standaarden en de lange duur van het invoeren van nieuwe wetgeving kunnen dan ook grote invloed hebben op de snelheid waarmee een waterstofeconomie gerealiseerd kan worden.

Welke invloed kunnen de ontwikkelingen in de productie, opslag en distributie van waterstof hebben op de adoptie van waterstof als duurzame energiedrager?

De huidige ontwikkelingen op het gebied van productie, opslag en distributie van waterstof schetsen geen rooskleurig beeld met betrekking tot de inzet van waterstof als duurzame energiedrager in de Verenigde Staten. Doordat het scenario technocratisch is, worden nieuwe technologieën pas in een heel laat stadium op de markt gebracht. Daarnaast moeten de kosten van productie, distributie en opslag van waterstof gelijk of lager zijn dan diezelfde kosten voor fossiele brandstoffen voordat de technologieën op de markt geïntroduceerd worden. Hierdoor wordt de marktintroductie dus langer uitgesteld. Ook het feit dat ingezet wordt op niet-duurzame productiemiddelen, geeft geen hoop voor waterstof als duurzame energiedrager.

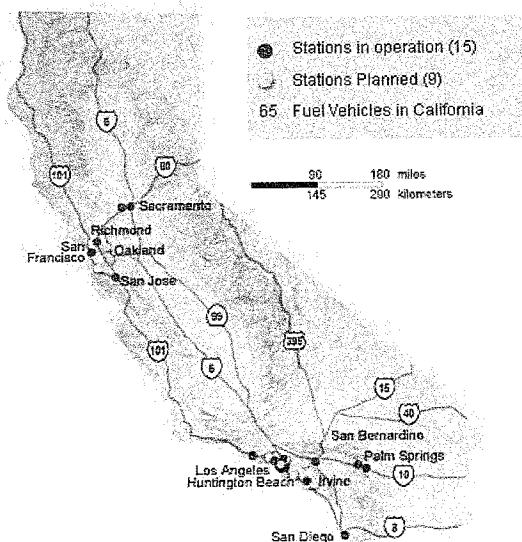
De staat Californië, één van de grootste economieën ter wereld, onttrekt zich echter aan de trend in de Verenigde Staten. De staat is recentelijk begonnen aan een ambitieus programma om over te schakelen op waterstof als energiedrager. Het programma is

gericht op het terugdringen van de luchtvervuiling, die voor grote overlast zorgt. Daarbij gaat men niet uit van op technologie gebaseerde invoering, maar van praktijkontwikkeling. In het Hydrogen Highway-plan wordt het kip-ei-probleem doorbroken door langs de belangrijkste highways om de 20 mijl waterstof-tankstations te bouwen, wat neerkomt op 150 tot 200 stations in de hele staat, waarvan er nu zo'n 14 gebouwd zijn (zie figuur 7.1). Men wil op deze wijze de vraag naar brandstofcelauto's bevorderen en de waterstofeconomie op gang helpen. Het programma is een publiek-private samenwerking van bedrijven uit verschillende sectoren en de Californische overheid. Recentelijk hebben de plannen nog een \$50 miljoen subsidie gehad van het DOE [u]. Naast het feit dat er door veel bedrijven testprogramma's worden uitgevoerd voor zowel brandstofcelauto's als tankfaciliteiten wordt tegelijkertijd ook gewerkt aan bewustwording van en voorlichting naar de consument. Hiervoor is een voorlichtingscentrum voor waterstof opgericht waar de consumenten informatie kunnen krijgen over waterstof, brandstofceltechnologie en tevens zelf een ritje kunnen maken in een brandstofcelauto om eens te voelen hoe zo'n auto rijdt. Ook kan men zien hoe een dergelijke auto wordt getankt. Een snelle commercialisatie van brandstofcelauto's betekent echter wel dat, gezien de huidige prijs van de geproduceerde waterstof, de kosten voor autorijden hoger zullen uitvallen. Uit recent onderzoek blijkt echter dat de inwoners van Californië bereid zijn een hogere prijs te betalen of minder comfort te hebben als ze daarmee een bijdrage leveren aan verbetering van het leefmilieu. Dit betekent dus dat een op waterstof gebaseerd transportsysteem op dit moment al haalbaar is, mits zowel overheid als consument bereid zijn te investeren in een dergelijke ontwikkeling.

Hydrogen Fueling Stations and Vehicle Demonstration Programs

Click on Northern or Southern California for regional detail, or click on the list to jump to latest details ("+" symbol represents fleet).

- ⊕ (+) AC Transit Hydrogen Energy Station – Oakland
- AC Transit Hydrogen Energy Station – Richmond
- BMW of North America – Oxnard
- ⊕ (+) City of LA for Honda FCX Fleet
- ⊕ (+) City of SF for Honda FCX Fleet
- ⊕ Chino Station
- ⊕ (+) Chula Vista Station
- ⊕ CSU LA Station
- ⊕ (+) Honda Home Energy Station - Torrance
- ⊕ (+) Honda Hydrogen Refueling Station - Torrance
- ⊕ Huntington Beach Station
- ⊕ LA H2 Pipeline - Torrance
- Praxair-BP Hydrogen Fueling Station at LAX
- ⊕ San Carlos Station
- ⊕ (+) Santa Clara Valley Transportation Authority
- ⊕ (+) SCAQMD Energy Station - Diamond Bar
- SunLine Station - Thousand Palms
- Toyota Torrance Station
- ⊕ (+) UC Davis Station
- ⊕ (+) UC Irvine Hydrogen Refueling Station
- ⊕ UC Irvine (second station - planned)
- ⊕ UC Irvine - Mobile refueler
- ⊕ UCLA Station - Westwood
- ⊕ (+) West Sacramento Station
- WinTec Hydrogen Production Facility - Palm Springs



Figuur 7.1: overzicht van waterstof-tankstations en waterstofinstallaties in Californië [w]

De ontwikkelingen in Californië zijn ook een belangrijke stap voorwaarts voor de ontwikkeling van duurzame productie van waterstof, omdat een groot deel van de reeds gerealiseerde tankstations beschikt over een elektrolyseproductieproces, waarbij zowel

de elektriciteit zowel uit een PV-panelen als uit het elektriciteitsnet kan worden betrokken. Gezien de grote hoeveelheid zon in Californië wordt veel gebruik gemaakt van zonne-energie. Daarmee vormt Californië dan ook een voorbeeld voor de Verenigde Staten en voor de rest van de wereld, wat ons bij de laatste onderzoeksvraag brengt:

Waar liggen de (eventuele) mogelijkheden tot samenwerking tussen Nederland en de Verenigde Staten op het gebied van productie, opslag en distributie met betrekking tot een op waterstof gebaseerde economie?

Als een vergelijking gemaakt wordt tussen de Verenigde Staten en Nederland met betrekking tot transitiebeleid, kan worden geconcludeerd dat er sterke verschillen zijn in de aanpak. In de Verenigde Staten zien we een zeer actieve, sterk participerende overheid die probeert de ontwikkelingen te domineren en in de gewenste richting te sturen. De aanpak is technocratisch van aard en gericht op het in stand houden van de bestaande bedrijven.

Europa wordt gekenmerkt door sterk terugtrekkende overheden, waarbij weliswaar participatie van de overheid optreedt, maar deze beperkt blijft tot het bij elkaar brengen van verschillende partijen. De ontwikkelingen worden vanuit de markt geïnitieerd en vervolgens verder ontwikkeld in nichemarkten. Betrokkenheid van alle groepen is van het grootste belang voor het slagen van een transitie, iets dat wordt onderstreept door het ministerie van Economische Zaken in een recente uitgave over energietransities.

Een mogelijke reden voor de gevonden verschillen kan liggen in de culturele verschillen tussen Europa en de Verenigde Staten, alhoewel dit zonder vervolgonderzoek niet bevestigd kan worden.

Californië zou gekenmerkt kunnen worden als mengvorm van de beide benaderingen. De Californische overheid brengt de verschillende partijen bij elkaar teneinde de ontwikkelingen te bespoedigen. Daarnaast nemen ze echter ook actief deel aan het toepassen van de nieuwe technologieën in testfaciliteiten. Enkele van deze testfaciliteiten zijn gecombineerd met voorlichtingscentra, waar de inwoners van Californië kunnen kennismaken met deze nieuwe technologieën. Ook het actief voorlichten van de inwoners maakt onderdeel uit van het transitietraject van de Californische overheid.

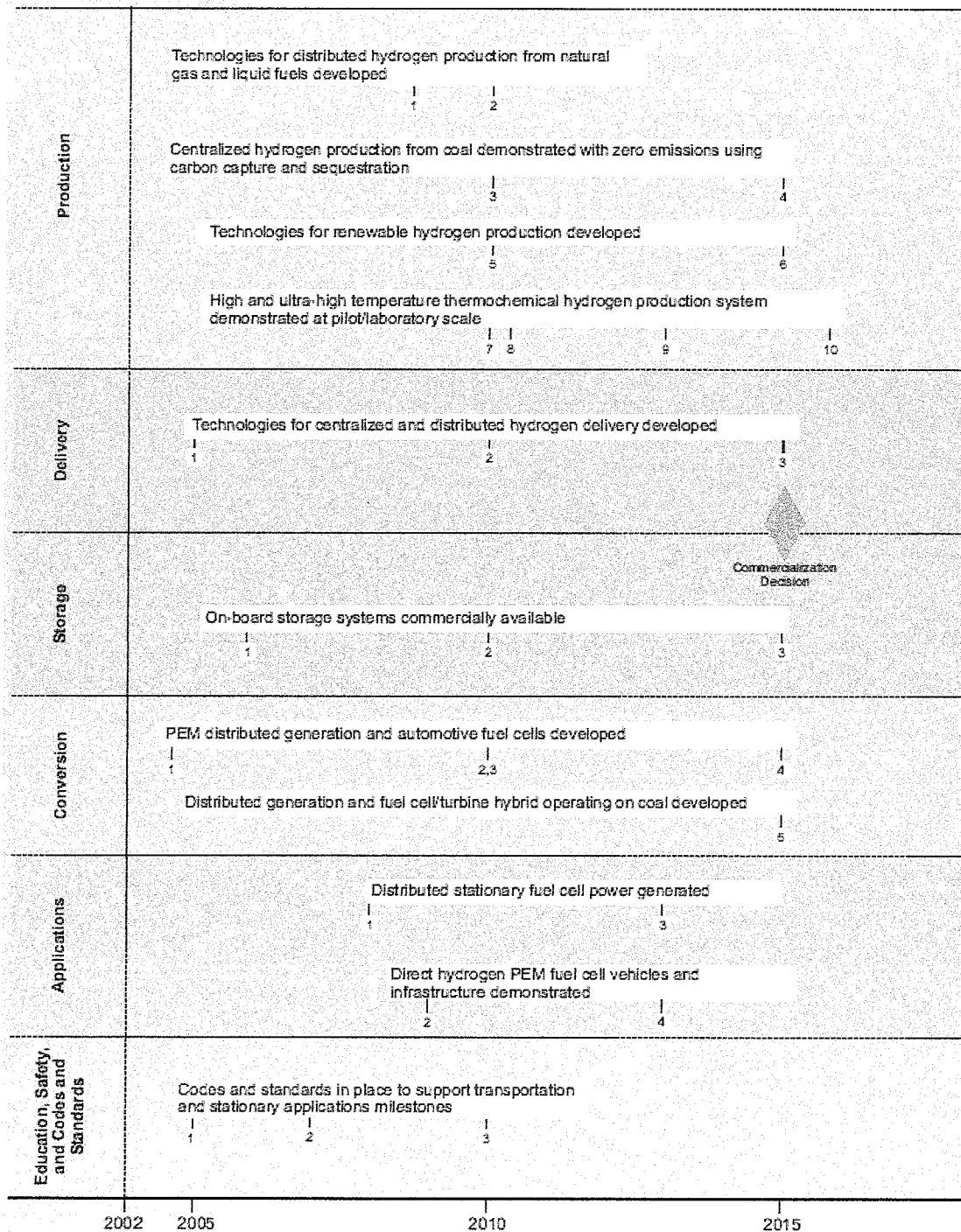
Uit de situatie in Californië valt een belangrijke conclusie te trekken. De mogelijkheid tot kennismaking met en het uitproberen van nieuwe technologieën creëert meer vertrouwen in de werking ervan. Op de thuisbasis van de California Fuel Cell Partnership kan een bezoeker een rondje rijden in een brandstofcelauto en tevens zien hoe het tanken bij een dergelijke auto plaatsvindt, waardoor een groot deel van de vooroordelen over waterstof als brandstof al snel weggenomen wordt. Het uitvoeren van voor iedereen toegankelijke demonstratieprojecten heeft dus een stimulerende werking op de acceptatie van een nieuwe technologie.

Bijlagen

Bijlage 1: de eigenschappen van waterstof

Auto-ontbrandingstemperatuur	520 graden Celsius
Kookpunt (1 atmosfeer)	-252,7 graden Celsius
Dichtheid (gas)	0,08342 kg/m ³
Dichtheid (vloeistof)	70,99 kg/m ³
Diffusiviteit	1,697 m ² /hr
Vlamtemperatuur	2318 graden Celsius
Smeltpunt	-259,2 graden Celsius
Verbrandingswarmte	28670 kcal/kg
Ontstekingsenergie	0,02 milli-joules
Moleculair gewicht	2.016
Viscositeit	33,84 x 10 ⁻³ kg/m hr

Bijlage 2: Overzicht van einddoelen en mijlpalen

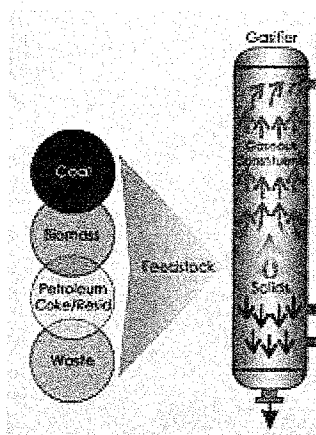


Overzicht van de mijlpalen en beslissingsmomenten van het Posture Plan [Posture Plan, 2004]

Production Milestones	Storage Milestones	Conversion Milestones
<p>Distributed Natural Gas/ Liquid Fuels*</p> <ol style="list-style-type: none"> 2009: Develop technology to produce distributed hydrogen from natural gas or liquid fuels at a refueling station that projects to a cost of \$2.50/gge for hydrogen. [At the pump, untaxed, no carbon sequestration] 2010: Develop technology to produce hydrogen from natural gas or liquid fuels at a refueling station that projects to a cost of \$1.50/gge for hydrogen. [At the pump, untaxed, no carbon sequestration, at 5300 psig] <p>Central Coal*</p> <ol style="list-style-type: none"> 2010: Develop pilot scale membrane separation and reactive/membrane separation technology for hydrogen production that meets cost targets. 2015: Demonstrate a zero emission coal plant producing hydrogen and power with carbon capture and sequestration at a 25% cost reduction that projects to \$0.80/gge at the plant gate (\$1.80/gge delivered). <p>Renewable Resources</p> <ol style="list-style-type: none"> 2010: Develop technologies for integrated wind hydrogen production at \$2.85/gge delivered assuming a 500 gge/day electrolyzer system and \$0.04/kWh wind electricity (2015: \$2.25/gge). 2015: Demonstrate laboratory-scale biological system to produce hydrogen at a cost that projects to \$10/gge at the plant gate (\$11/gge delivered). Demonstrate laboratory-scale photoelectrochemical water splitting at a cost that projects to \$5/gge at the plant gate (\$6/gge delivered). The long term goal for these hydrogen production technologies is to be competitive with gasoline. <p>High-Temperature Thermochemical</p> <ol style="list-style-type: none"> 2010: Laboratory-scale demonstration of ultra-high-temperature thermochemical hydrogen production from solar reactors that project to a cost of \$2.50/gge (\$3.80/gge delivered). 2011: Pilot-scale demonstration of high-temperature thermochemical production for use with nuclear reactors that projects to a cost of \$2.50/gge (\$3.50/gge delivered). 2013: Design of engineering scale nuclear hydrogen production system completed. 2017: Engineering-scale demonstration of thermochemical hydrogen production system with cost that projects to less than \$2.00/gge at the plant gate (\$3/gge delivered) using heat from nuclear reactors. 	<p>Applications Milestones</p> <ol style="list-style-type: none"> 2008: Validate first regional networks with fuel cell systems that project a cost of less than \$1.250/kWh. 2009: Direct hydrogen polymer electrolyte membrane fuel cell vehicles demonstrated at multiple sites, achieving 2,000 hours durability. 2013: Validate stationary fuel cell system that co-produces hydrogen and electricity at 40,000 hours durability with 40% efficiency at a cost of \$750/kWh or less. 2013: Validate direct hydrogen polymer electrolyte membrane fuel cell vehicles achieving 5,000 hours durability (service life of vehicle) and 300 mile range. <p>Phase 1 Commercialization Decision: 2015</p> <p>Based on technology development success in meeting customer requirements and establishing a business case.</p>	<p>Education, Safety, and Codes and Standards Milestones</p> <ol style="list-style-type: none"> 2004: On-board fuel processing Go/No Go decision based on ability to achieve 75% efficiency and <0.5 minute start time. 2010: Distributed stationary generation natural gas/propane 50-250 kW fuel cell developed: 40% electrical efficiency, 40,000 hours durability (equivalent to service life between major overhauls), at a cost of less than \$400-\$750/kWh. 2010: Develop direct hydrogen polymer electrolyte membrane automotive fuel cell operating at 60% peak efficiency, 220 W/L density, 325 W/gge specific power at a cost of \$45/kWh (automotive production quantity). 2015: Polymer electrolyte membrane automotive fuel cell meets cost of \$30/kWh. 2015: Fuel cell/turbine hybrid operating on coal developed at a cost of \$400/kWh with a system efficiency of 70% with carbon sequestration.
<p>Delivery Milestones</p> <ol style="list-style-type: none"> 2005: Define a cost-effective hydrogen fuel delivery infrastructure for supporting the introduction and long-term use of hydrogen for transportation and stationary power. 2010: Develop technologies to reduce the cost of hydrogen fuel delivery from the point of production to the point of use in vehicles or stationary power units to <\$1.30/gge of hydrogen. 2015: Develop technologies to reduce the cost of hydrogen fuel delivery from the point of production to the point of use in vehicles or stationary power units to <\$1.00/gge of hydrogen. 		

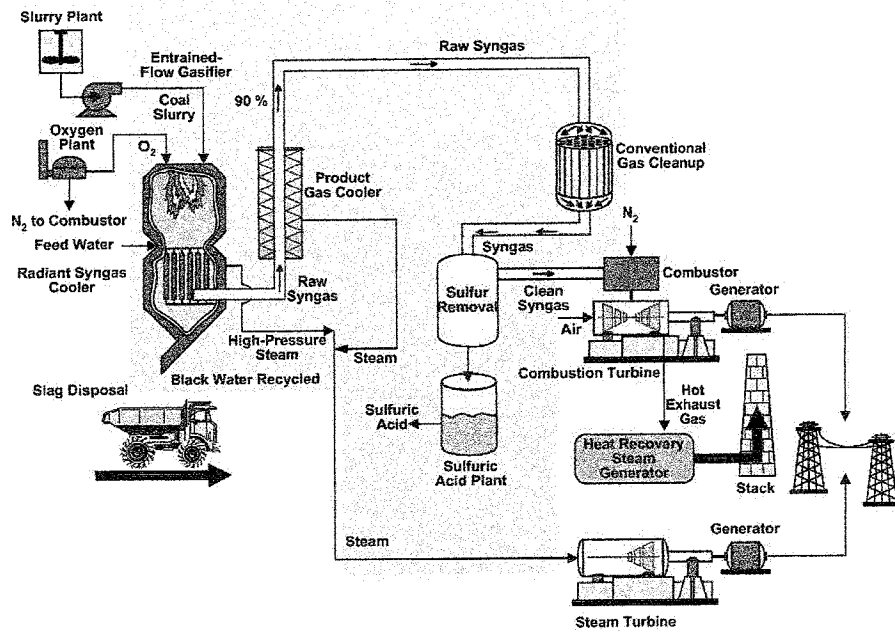
Overzicht van de mijlpalen uit het Posture Plan [Posture Plan, 2004]

Bijlage 3: dwarsdoorsnede van een kolenvergasser

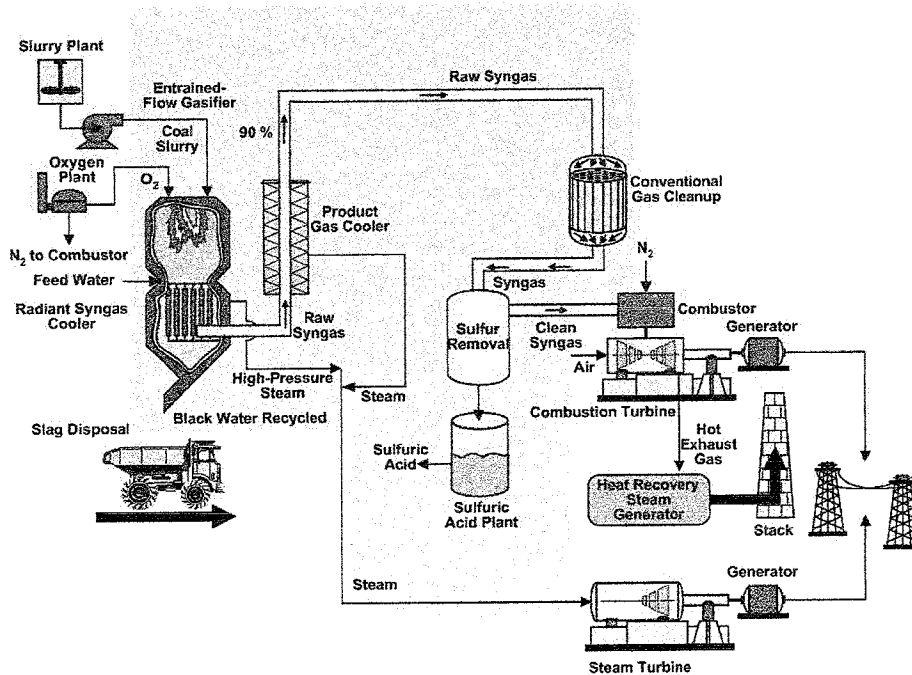


Schematische opzet van een kolenvergasser [a]

Bijlage 4: schematisch overzicht van de elektriciteitscentrales te Wabash en Tampa

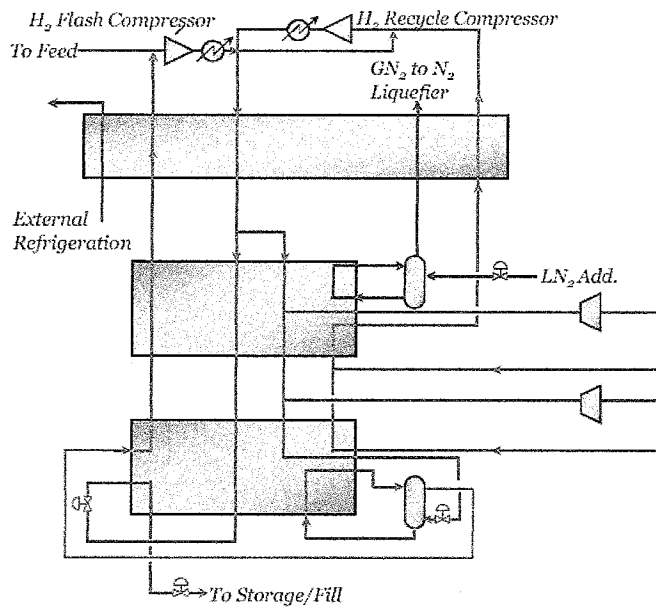


Schematisch overzicht van de Wabash elektriciteitscentrale [d]

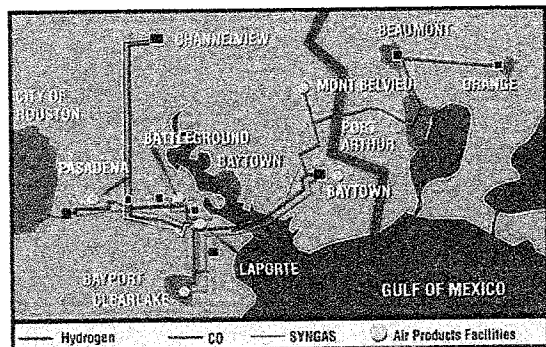


Schematisch overzicht van de elektriciteitscentrale te Tampa [d]

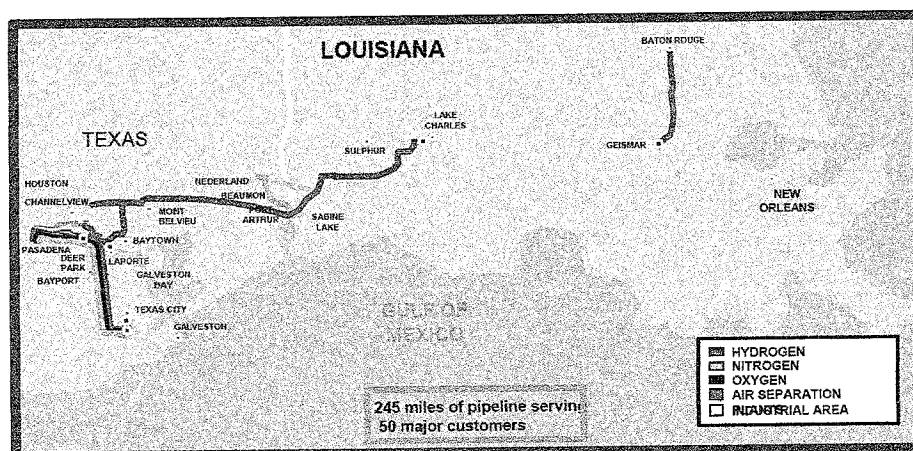
Bijlage 5: Overzicht van het condensatieproces voor waterstof



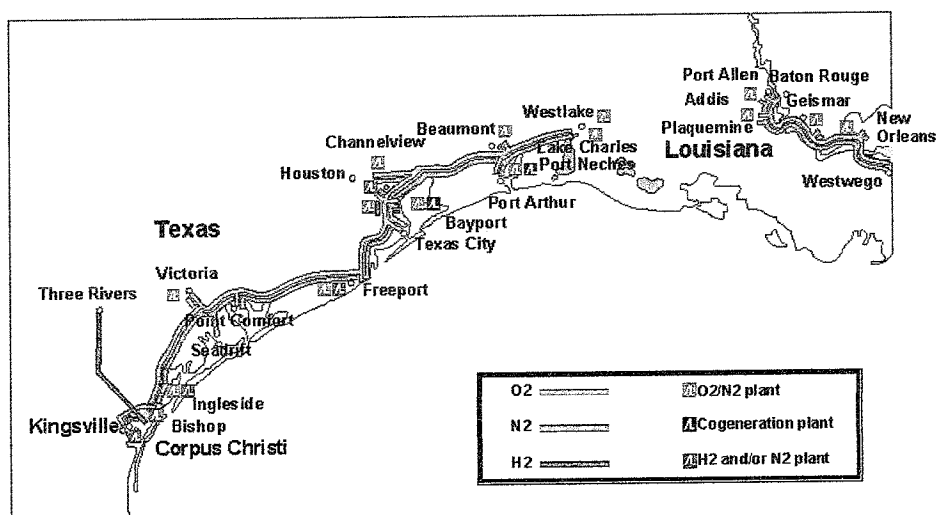
Bijlage 6: Overzicht van de pijpleidingnetwerken van de industriële gasproducenten



Figuur B4.1 Het waterstofnetwerk van Air products [m]

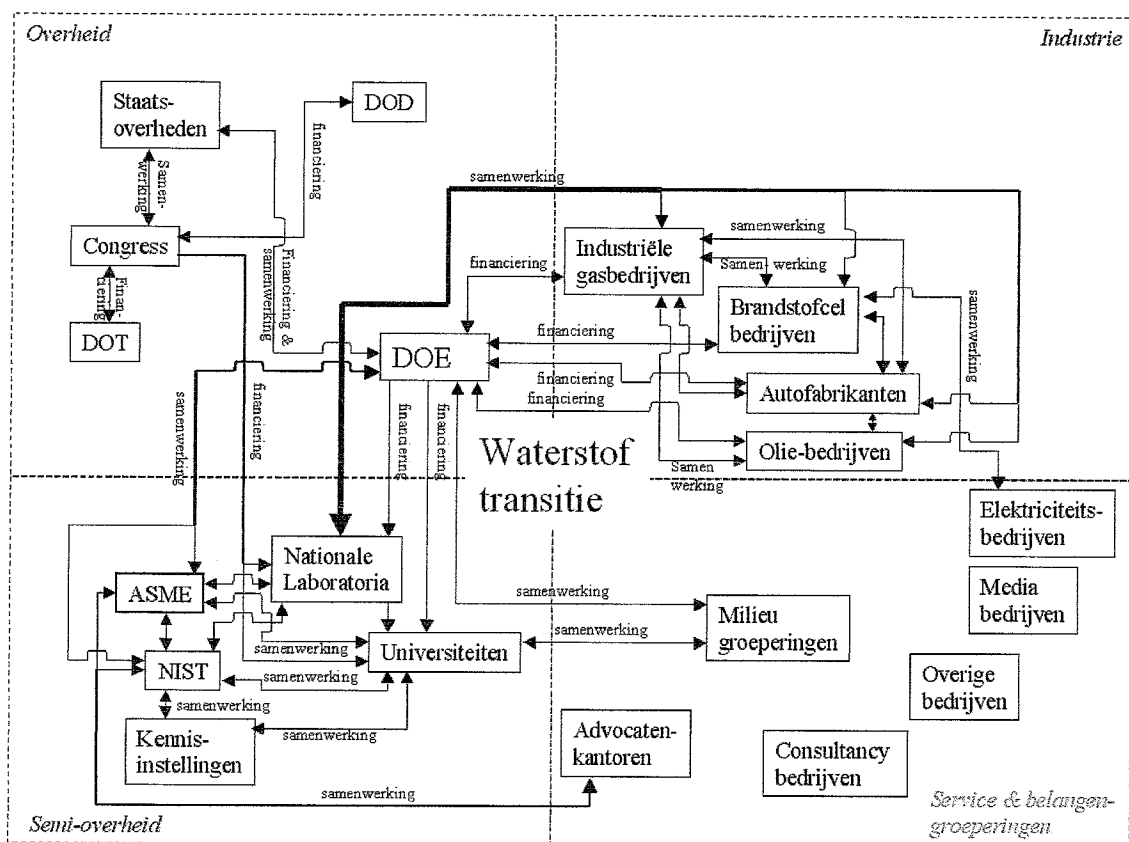


Figuur B4.2 Het waterstofnetwerk van Praxair [Drnevich, 2003]



Figuur B4.3 Het waterstofnetwerk van Air Liquide [n]

Bijlage 7: De sociale kaart van de verschillende spelers binnen het waterstofveld



Lijst van bedrijven en organisaties die deelnemen aan het HFC&IT-programma

Industrie	
Brandstofcelbedrijven	Automobilbedrijven
ATK Thiokol Propulsion	DaimlerChrysler
Ballard Power Systems	Ford motor company
DCH Technology, Inc.	General Motors
Dynetek Industries, Ltd	Honda R&D Americas, Inc
Energy conversion devices	
Entergy Nuclear, Inc	Industriële gasbedrijven
Ergenics, Inc.	Air Liquide America
Fuel Cells 2000	Air products & chemicals, Inc
H2 Solutions, Inc	BOC-Group
H2Gen Innovations, Inc	Praxair, Inc.
Hydrogen 2000, Inc	
Lincoln composites	Oliemaatschappijen
Millennium Cell	ChevronTexaco Ovonic Hydrogen Systems LLC
Pacific Carbon International	ChevronTexaco Technology Venture
Plug Power	ExxonMobil Refining & Supply company

Proton Energy Systems, Inc	Marathon Ashland Petroleum LLC
Quantum technologies	PDVSA-Citgo
QuestAir Technologies, Inc	Shell Hydrogen
SGL Carbon Group	Texaco Energy Systems
Startech Environmental Corporation	
Structural Composites Industries	Olie-industrie
Stuart energy systems	Gas Equipment engineering company
Teledyne Energy Systems, Inc	Hart Downstream Energy Services
UTC (international) Fuel Cells	
ZECA Corporation	Andere industriële bedrijven
Ztek Corporation	Activated Metals Technologies
Johnson Matthey Fuel Cells	Deere & company
	DuPont Company

<i>Kennisinstellingen</i>	
Universiteiten	Overige kennisinstellingen
Princeton University	Alberta Energy Research Institute
University of central Florida	Avista Labs, Inc
University of Illinois	Gas technology institute
University of Michigan	Hawaii Natural Energy Institute
University of Nevada-Reno	Houston Advanced Research Center
University of South Carolina	IET
	Institute for alternative futures
Nationale laboratoria	Massachusetts Institute of Technology
Argonne National Laboratory	Massachusetts Renewable Energy Trust
Los Alamos National Laboratory	Methanol Institute
National Energy Technology Laboratory	NASA Kennedy space center
National renewable energy laboratory	National academy of Engineering
Oak Ridge National Laboratory	National Academy of Science
Pacific Northwest National Laboratory	National Hydrogen Association
Sandia National Laboratories	SAIC
Savannah River Technology Center	World Resources Institute
Westinghouse Savannah River Company	Worldwatch Institute

<i>Overheid</i>	
Politiek	Overheidsinstanties
House Committee on Science	US TAG ISO TC 197
National Governor's Association	Hydrogen Technology Advisory Panel
Office of senator Akaka	National Institute of Standards and Technology
US House of Representatives	Office of Assistant Secretary of the Navy
	Office of Naval Research
(Semi)staatsoverheid	Office of Science & technology policy

California Energy Commission	US DOE
Florida Hydrogen Business Council	US EPA
South Coast Air Quality Management District	Denali Commission
Southern Hydrogen Fuel Cell Research Partnership	

Servicebedrijven en belangengroeperingen	
Consultancybedrijven	Overige bedrijven
Clean Power engineering company	Dunlap & Browder, Inc
Consultant: James Hampstead	E2I
Fauske and Associates, Inc	ECD, Inc.
History Associates, Inc	Alameda Contra Costa Transit
K. Wetzel & company	GE Corporate Research & Development
K. Winn & Associates	General Atomics
Sentech, Inc	JMC, Inc
Wexler Group	Minnesota Corn Growers Association
	Natural Resources Canada
Energiebedrijven	NiSource Inc
Electric Power research institute	Northeast Midwest Institute
Energetics, Inc	Pinnacle West Capital Corporation
Global Environment & Technology foundation	Sunline Transit Agency
Innovative Design, Inc	Underwriters Laboratories
	Verizon
Advocatenkantoren	
Covington and Burling	Milieuorganisaties
Dykema Gossett, PLLC	National Resources Defense Council

Bijlage 8: Overzicht van de drie centers of Excellence en hun onderzoeksgebied en expertises.

Centers of Excellence		
LANL/PNNL	SNL	NREL
Chemical Hydrogen Center	Metal Hydride Center	Carbon Center
Los Alamos National Laboratory (Los Alamos, NM)	Sandia National Laboratories (Livermore, CA)	National Renewable Energy Laboratory (Golden, CO)
Pacific Northwest National Laboratory (Richland, WA)	Stanford University (Stanford, CA)	California Institute of Technology (Pasadena, CA)
University of Pennsylvania (Philadelphia, PA)	General Electric (Niskayuna, NY)	Duke University (Durham, NC)
UCLA (Los Angeles, CA)	University of Hawaii (Honolulu, HI)	Penn State University (University Park, PA)
UC-Davis (Davis, CA)	California Institute of Technology (Pasadena, CA)	Rice University (Houston, TX)
Penn State University (University Park, PA)	Jet Propulsion Laboratory (Pasadena, CA)	University of Michigan (Ann Arbor, MI)
University of Washington (Seattle, WA)	HRL Laboratories (Malibu, CA)	University of North Carolina (Chapel Hill, NC)
University of Alabama (Tuscaloosa, AL)	University of Illinois (Champaign, IL)	University of Pennsylvania (Philadelphia, PA)
Rohm and Haas (Philadelphia, PA)	Univ. of Pittsburgh/Carnegie Mellon Univ. (Pittsburgh, PA)	Oak Ridge National Laboratory (Oak Ridge, TN)
Millennium Cell (Eatontown, NJ)	NIST (Gaithersburg, MD)	Lawrence Livermore National Laboratory (Livermore, CA)
Intematix (Moraga, CA)	University of Nevada-Reno (Reno, NV)	NIST (Gaithersburg, MD)
US Borax (Boron, CA)	Oak Ridge National Laboratory (Oak Ridge, TN)	Air Products (Allentown, PA)
	University of Utah (Salt Lake City, UT)	
	Intematix Corporation (Moraga, CA)	
	Brookhaven National Laboratory (Brookhaven, NY)	
Individual Projects		
Prime	Partners	Research Area
TIAX LLC (Cambridge, MA)	Gas Technology Institute (IL) Yale University (CT) University of Oklahoma (OK)	Lifecycle and cost analysis
University of Missouri (St. Louis, MO)	Pacific Northwest National Laboratory (WA)	New materials
University of Connecticut (Storrs, CT)	Pacific Northwest National Laboratory (WA)	New materials
Michigan Technological University (Houghton, MI)	None	Chemical hydrides
Gas Technology Institute (2 projects) (Chicago, IL)	Superior Graphite Co. (IL) NEXGEN Fueling (MN)	Carbon Off-board storage
Alfred University (Alfred, NY)	Savannah River Technology Center (SC) Mo-Sci Corporation (MO) CERALINK (NY)	New processes
Carnegie Institute of Washington (Washington, DC)	None	New materials
Research Triangle Institute (Research Triangle Park, NC)	State Scientific Research Institute (Moscow, Russia)	Chemical hydrides

	ATK/Thiokol Propulsion (UT)	
State University of New York (Syracuse, NY)	PoroGen, LLC (MA)	Carbon
TOFTEC, Inc. (Gainesville, FL)	University of Florida, Gainesville (FL)	New processes
University of Michigan (Ann Arbor, MI)	Northwestern University (IL) Los Alamos National Laboratory (NM)	New materials
University of Pennsylvania (Philadelphia, PA)	Drexel University (PA) NIST (MD)	Carbon
University of California-Berkeley (Berkeley, CA)	Lawrence Berkeley National Laboratory (CA)	New materials
University of California-Santa Barbara (Santa Barbara, CA)	Los Alamos National Laboratory (NM)	New materials

Bron: [x]



Bronvermelding

Literatuur

Ahmed, S. et al.: *Catalytic partial oxidation reforming of hydrocarbons*. Proceedings of the 1998 Fuel Cell Seminar Palm Springs (California). Argonne National Laboratory, Argonne (Illinois), 1998

Amos, W.A.: *Costs of storing & transporting hydrogen*. National Renewable Energy Laboratory, 1998

Baarda, D.B. & De Goede, M.P.M.: *Basisboek methoden en technieken*. 2nd ed., Educatieve Partners Nederland BV, Houten, 1997.

Babu, S.P.: *Biomass gasification for hydrogen production-process description and research needs*. Des plaines (Illinois), 2004

Barge, S. et al: *Hydrogen energy park based on autothermal cyclic reforming*. Presentatie tijdens de 2002 Fuel Cell Seminar. GE Energy & Environmental Research.

Benemann, J.R.: *Process analysis and economics of biophotolysis of water*. Walnut Creek (Californië), 1998

Bimber, B.: *The policy of expertise in Congress; The rise and fall of the office of technology assessment*. State University of New York Press, New York, 1996.

Bollinger, R.B. et al.: *Low cost hydrogen production platform*. Proceedings of the 2002 U.S. DOE Hydrogen Program Review. Praxair, Inc., Tonawanda (New York), 2000.

Bolton, J.R.: *Solar photoproduction of hydrogen*. London (Ontario), 1996.

Bossel, U.: *Physics of the hydrogen economy* (2003). European Fuel Cell News, Vol. 10, No. 2, July 2003

Brown, R.C.: *Biomass-derived hydrogen from a thermally ballasted gasifier*. Artikel in het Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies progress report 2003. Iowa State University, Ames (Iowa), 2003

Campbell, J.: *Hydrogen delivery technologies and systems; pipeline transmission of hydrogen*. Presentatie tijdens de Strategic initiatives for hydrogen delivery workshop, 7-8 mei 2003. Air liquide, 2003

Carbohydrate economy: *Talking hydrogen with Margaret Mann*. The Carbo-hydrate economy, Vol. 5, no. 1, winter 2003.

Chen, C.M.: *Ceramic membrane reactor systems for converting natural gas to hydrogen (ITM-syngas)*. Presentatie tijdens de Hydrogen Program Annual Review 2004. Air products & chemicals, Inc., Philadelphia, 2004.

- Davis, G: *Creating scenarios for your company's future*. Paper voor: The 1998 Conference on Corporate Environmental, Health and Safety Excellence te New York City -28 april 1998. Shell International Ltd., 1998
- Decker, M. en Ladikas, M.: *Bridges between science, society & policy; Technology Assessment - methods and impacts*. Berlin, 2004.
- Den Uil, H. Et al: *Duurzaam synthesegas; een brug naar een duurzame energie-en grondstoffenvoorziening*. ECN, Petten, 2004
- Dillon, A.C. et al: *Carbon nanotube materials for hydrogen storage*. Artikel in de Proceedings van de 2000 DOE Hydrogen Program Review. National Renewable Energy Laboratory, Golden (Colorado), 2000.
- Doctor, R.D. et al: *STAR-H2: A calcium-bromine hydrogen cycle using nuclear heat*. Argonne National Laboratory, Argonne (Illinois), 2002
- DOE decision team report: *On-board fuel processing go/no-go decision*. U.S. DOE, Washington D.C., 2004
- Doty, F.D.: *A realistic look at hydrogen price projections*. Doty Scientific, Inc., Columbia (South Carolina), 2004
- Drnevich, R.: *Hydrogen delivery; liquefaction & compression*. Presentation at Strategic initiatives for hydrogen delivery workshop. Praxair, 2003
- Fazio, D. et al: *Cost/benefit analysis in hydrogen logistics*. Laurea thesis, university of Genova, Genova, 2003.
- Geiger, S.: *Automotive hydrogen infrastructure - on the way to a hydrogen economy*. Fuel Cell Today, 2003.
- Ghirardi, M.L. et al: *Biological systems for hydrogen photoproduction*. Presentatie tijdens de Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program annual review 2004. National Renewable Energy Laboratory, Battelle, 2004.
- Ghirardi, M.L. et al.: *Microalgae: a green source of renewable H₂*. Review in Tibtech, Vol. 18, december 2000, pp. 506-511
- Gronich, S.: *Hydrogen Program; Goals and outcomes*. Presentatie tijdens de 2000 Hydrogen Program Annual Review Meeting. USDOE, 2000.
- Herring, J.S.: *High-temperature Solid Oxide Electrolyser System*. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, Idaho Falls (Idaho), 2003. Artikel in het Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies progress report 2003.
- Hydrogen Technical Advisory Panel: *Realizing a hydrogen future; Recommendation brochure*. National Renewable Energy Laboratory, Washington D.C., 1999.
- Hydrogen Future Act of 1996; Public Law 104-271--Oct. 9, 1996.

<http://www.thomas.loc.gov> (25/08/04)

Hydrogen Coordination Group: *Fossil Energy Hydrogen Program*. U.S. DOE Office of Fossil Energy, Washington D.C., 2003

IEA: *U.S. Refining capacity, 1982 and 2002*. EIA, 2002. Van <http://www.eia.doe.gov> op 08 september 2004

Janna, W.S.: *Engineering heat transfer*. 2nd ed. Van Nostrand Reinhold, London, 2000

Johnston, H.: *Big decisions, even bigger consequences*. The Fuel Cell Review, Vol. 1, Issue 1, June/July 2004, pp. 7-8

Jones, M.D.: *Towards a hydrogen economy*. Presentatie voor de IEA Renewables energy working party seminar, 3 maart 2003, Parijs.

Keith, D.W. & Farrell, A.E.: *Rethinking hydrogen cars*. Science, Vol 301, 18 juli 2003, pp. 315.

Lakeman, J.B. & Browning, D.J.: *Global status of hydrogen research*. 2001

Lee, J.W. et al: *Development of efficient and robust algal H₂-production systems*. Presentatie tijdens de Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program annual review 2004. Oak Ridge National Laboratory, Battelle, 2004.

Lutz, A.E. et al: *Power Parks System Simulation*. Sandia National Laboratories, Livermore (Californië), 2004. Presentatie tijdens de Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies program annual review 2004.

Mann, M.K. & Ivy, J.S.: *Can we afford it?* Artikel op [solartoday.com](http://www.solartoday.com), met link http://www.solartoday.org/2004/may_june04/h2_afford_it.htm op 11 maart 2005.

Mann, M.K.: *Economics of renewable hydrogen - It's about more than production*. Presentatie tijdens het Renewable Hydrogen Production Forum 10-11 april 2003. National Renewable Energy Laboratory, 2003.

MaqQueen, B. et al: *Discovery of photocatalysts for hydrogen production*. Presentatie tijdens de Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies annual program review 2004

Matsunaga Act, 1990

<http://www.thomas.loc.gov> (25/08/04)

Mauro, B.: *Our hydrogen future: Do we have one?* Artikel in het NHA News, 2003.

Milliken, J.: *Hydrogen storage*. Presentatie tijdens de Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies annual program review 2004

Mintz, M. et al: *Hydrogen Distribution Infrastructure*. Argonne National Laboratory (datum onbekend) Artikel van: ANL-website

Mintz, M. et al (2): *Hydrogen distribution infrastructure*. Presentatie tijdens de Jefferson Laboratory Fuel Cell Workshop 12 november 2002.

National Academies' National Academy of Engineering: *The Hydrogen economy: Opportunities, costs, barriers and R&D needs*. National Academies Press, Washington D.C., 2004

National Energy Policy Development Group: National Energy Policy, U.S. DOE, Washington D.C., 2001.

Noponen, M.: *Experimental studies and simulations on Proton Exchange Membrane fuel cell based storage systems*. Helsinki University of Technology, Helsinki, 2000

NPRA: *United States Refining & storage capacity report*. NPRA, 2004.

Ogden, J.M.: *Prospects for building a hydrogen energy infrastructure*. Annual Review Energy Environmental, Vol 24., 1999, pp. 227-279

Ohi, J.: *Enhancing strategic management of the hydrogen option: Scenario planning by the DOE Hydrogen Technical Advisory Panel*. National Renewable Energy Laboratory, Golden (Colorado), 2001.

Padró, C.E.: *The shape of the hydrogen economy*. Presentatie van Los Alamos National Laboratory (datum onbekend).

Padró, et al: *Survey of the economics of hydrogen technologies*. National Renewable Energy Laboratory, Golden (Colorado), 1999.

Palm, T. et al.: *Green heat and power, eco-effective energy solutions for the 21st century*. Bellona report no. 3, 1999, (English version published june 2000).

Pederson, M.: *Hydrogen Infrastructure*. Presentatie Air products, 2003

Poel, I.v.d.: *The transformation of technological regimes*. Research Policy 32 (2003), pp. 49-68

Porter, A.C. et al.: *A guidebook for Technology Assessment and Impact Analysis*. Series Volume 4. New York, 1980.

Porter, M.E.: *Concurrentiestrategie: analysemethode voor bedrijfstakken en industriële concurrentie*. Uitgeverij Contact, Amsterdam, 1992.

Powell, M.R. et al.: *Ammonia-based hydrogen production for fuel cell power supplies*. Kenniwick (Washington), (datum onbekend).

Rogers, E.M.: *Diffusion of Innovations*. 4th ed. New York, 2000

Romm, J.J.: *The hype about hydrogen*. Issues in Science & Technology, Vol. 20, No.3., spring 2004, pp. 74-86

- Rothmans et al: *Visions for a sustainable Europe*. International Centre for Integrative Studies (ICIS), Maastricht, 2000
- Rutkowski, M.D. et al: *Hydrogen production facilities plant performance and cost comparisons; Final Report, March 2002*. Parsons Infrastructure and Technology Group Inc., Reading (Pennsylvania), 2002.
- Schultz, K. et al: *Development of solar-powered thermochemical production of hydrogen from water*. University of Nevada, Las Vegas (Nevada), 2004
- Service, R.F.: *A dream of a hydrogen economy*. Financial Times, 2004.
- Shell Global Solutions: *Scenario's: An Explorer's Guide; Exploring the future*. Shell International, 2003.
- Sims, R. et al: *Tracking hydrogen codes & standards "Well-to-wheels": An IHIG initiative*. Presentatie tijdens de Fuel Cell Summit VII, 15 juni 2004.
- Smit, W.A. & Van Oost, E.C.J.: *De wederzijdse beïnvloeding van technologie en maatschappij, een technology assessment-benadering*. Bussum, 1999
- Spath, P.L. & Mann, M.K.: *Life cycle assessment of hydrogen production via natural gas steam reforming*. National Renewable Energy Laboratory, Golden (Colorado), 2001
- Spilsbury, C.: *Hydrogen production, supply and distribution*. Presentatie tijdens de Hydrogen Production Workshop, University of Glamorgan, 14 februari 2001. Air Products PLC, 2001.
- Spritzer, M.H.: *Supercritical water partial oxidation*. Artikel in het Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies progress report 2003. General Atomics, San Diego (Californië), 2003.
- Stöcker, J. et al.: *30 years of PSA-technology for hydrogen purification*. Des plaines, 1998
- The futurist, January-February 2003, Vol. 37, no.1, pp. 36-37:
Despite all the calls to develop alternative sources of energy, oil consumption is still rising rapidly
Contrary to popular belief, the world is not about to run out of oil
Oil prices are likely to remain around \$22 to \$26 per barrel for at least the next five years
- Thomas, G. et al.: *Hydrogen Storage-overview*. Presentatie tijdens de H2 Delivery and infrastructure workshop, 7-8 May, 2003.
- T-Raissi, A.: *Analysis of solar thermochemical water-splitting cycles for hydrogen production*. Artikel in het Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies progress report 2003. Florida Solar Energy Centre, Cocoa (Florida), 2003
- Tseng, P. et al.: *Hydrogen economy: opportunities and challenges*. Brookhaven National Laboratory (New York), datum onbekend.

United States Department of Energy: *National Hydrogen Energy Roadmap*. U.S. DOE, Washington D.C., November 2002

United States Department of Energy: *A national vision of America's transition to a hydrogen economy - to 2030 and beyond*. U.S. DOE, Washington D.C., February 2002.

United States Department of Energy: *Fuel Cell report to Congress*. U.S. DOE, Washington D.C., February 2003.

United States Department of Energy: *Hydrogen Posture Plan; An integrated research, development and demonstration plan*. U.S. DOE, Washington, D.C., February 2004.

United States Department of Energy: *Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program*. U.S. DOE Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Washington, D.C., June 2003.

United States Department of Energy: *Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program; 2003 Annual progress report*. U.S. DOE Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Washington, D.C., October 2003. (Verwijzing van HFC&IT-voortgangsrapport, 2003)

United States Department of Energy: *U.S. Department of Energy Strategic plan 2003*. U.S. DOE, Washington D.C., 2003

United States Department of Energy: *Office of Energy Efficiency and Renewable Energy Strategic Plan*, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Washington D.C., 2003

Vig, N.J. & Paschen, H.: *Parliaments and technology, the development of technology assessment in Europe*. State University of New York Press, New York, 2000.

Washington Post: GM and Postal Service announce two-year agreement on fuel cell vehicles for USPS. Foto met bericht in The Washington Post, wednesday, June 16, 2004

Wolfrum, E.J. & Watt, A.S.: *Bioreactor design studies for a hydrogen producing bacterium*. Humana Press Inc, Golden (Colorado), 2000.

Yacubucci, B.D.: *CRS report for Congress*. Congressional Research Service, Washington D.C., 2003

Betrokken van <http://uscode.house.gov/lawrevisioncounsel.php> (25 augustus 2004)
USC50, Sec. 2098 Law Revision Office
USC7, Sec. 8101-8107; Law Revision Office
29 CFR Sec. 1910.103; Law Revision Office
49 CFR chapter I; Law Revision Office

Gesprekken

Dhr. Barten van Novem. Gesprek te Washington D.C. op 07 mei 2004

Dhr. Bruggink van ACTS/NWO. Gesprek te Washington D.C. op 29 april 2004

Dhr. Kuipers van Shell Global Solutions International. Gesprek te Washington D.C. op 29 april 2004

Dhr. Morris, economisch medewerker van de ambassade van het Koninkrijk der Nederlanden. Meerdere gesprekken te Washington D.C..

Dhr. Schoonman van TU Delft & Delft Institute for Sustainable Energy. Gesprek te Washington D.C. op 29 april 2004

Dhr. Van der Klein van ECN. Gesprek te Washington D.C. op 29 april 2004

Conferenties

2004 DOE Hydrogen Program Review op 24-27 mei 2004 te Philadelphia (Pennsylvania).

Congressional Fuel Cell Expo 2004. June 22, 2004 te Washington D.C..

IEA Hydrogen Implementing Agreement (HIA) persconferentie ter presentatie van "In pursuit of the future", het eindrapport van de eerste HIA. National Press Club, Washington D.C., 7 september 2004.

Websites

- a) <http://fossil.energy.gov/programs/powersystems/gasification/howgasificationworks.html> op 1 juli 2004
- b) <http://www.lanl.gov/projects/cctc/factsheets/tampa/tampaedemo.html> op 1 juli 2004
- c) <http://www.lanl.gov/projects/cctc/factsheets/wabsh/wabashdemo.html> op 1 juli 2004
- d) <http://fossil.energy.gov/programs/powersystems/gasification/gasificationpioneers.html> op 30 juni 2004
- e) <http://www.hydrogenus.com> op 1 juli 2004
- f) <http://www.iea.org>
- g) s
- h)
- i) <http://www.airproducts.com> op 15 juli 2004
- j) <http://www.dynetek.com> op 15 juli 2004
- k) <http://www.phoenixproject.net/cryotanker.htm> op 16 juli 2004
- l) <http://www.cleancitiessacramento.org/eventsandnews/2003atc/20031021AirProductsandChem.pdf> op 23 juni 2004
- m) <http://www.airproducts.co.uk/refining/chemicalIndustry.htm> op 23 juni 2004
- n) http://www.us.airliquide.com/en/business/supply_mode/pipeline/index.asp op 23 juni 2004

- o) <http://www.the-innovation-group.com/ChemProfiles/Hydrogen.htm> op 23 juni 2004
- p) <http://www.linde.de> op 23 juni 2004
- q) <http://fossil.energy.gov/programs/fuels/hydrogen/hydrogen-from-gas.html> op 11 maart 2005
- r) <http://> op 15 juli 2004
- s) <http://www.ne.doe.gov/hydrogen/hydrogenBG.html> op 11 maart 2005
- t) http://www.energy.gov/engine/content.do?BT_CODE=OF_NLTC op 05 maart 2005
- u) <http://www.eere.energy.gov> op 02 december 2004
- v) http://www.doe.gov/engine/content.do?PUBLIC_ID=15725&BT_CODE=PR_PRESSRELEASES&TT_CODE=PRESSRELEASE op 11 maart 2005
- w) http://www.fuelcellpartnership.org/fuel-vehl_map.html op 11 maart 2005
- x) http://www.energy.gov/engine/content.do?PUBLIC_ID=15740&BT_CODE=PR_PRESSRELEASES&TT_CODE=PRESSRELEASE op 01 maart 2005

<http://www.uscar.org/freedomcar/index.htm>

<http://www.hionsolar.com/n-hion96.htm>

<http://www.srs.gov/general/scitech/srtc/srtchtm/xhydrrsys.htm>

<http://www.pnl.gov/energy/hydrogen/>

<http://www.photohydrogen.com>

<http://www.nrel.gov>