



MNP Rapport 500083007/2006

**Brandstofcelauto op waterstof verkregen uit zonthermische
krachtcentrales (CSP)**

Evaluatie van transitie op basis van systeemopties

D. Nagelhout, J.P.M. Ros

Contact:

D. Nagelhout

Nationale Milieubeleidsvaluatie en Duurzaamheid

Dick.Naghout@mdp.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van Directie MNP, in het kader van Project M500083, Evaluatie van het NMP4-beleid

© MNP 2006

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: 'Milieu- en Natuurplanbureau, de titel van de publicatie en het jaartal.'

Abstract

Fuel cell vehicles running on hydrogen derived from Concentrating Solar Power

Since fuel cell vehicles use hydrogen as an energy carrier, they do not produce pollutants when in use, and furthermore, make less noise than conventional vehicles. However, hydrogen has to be produced, which leads to energy use. The most important non-fossil renewable energy sources are wind, biomass and the sun. This last source was the subject of a study carried out by the Netherlands Environmental Assessment Agency, supported by important input from Ecofys BV on the feasibility of Concentrating Solar Power (CSP). The energy intensity of the incoming direct solar radiation in the Netherlands is too low by far, compared to the southern parts of Europe, and especially North Africa, which are the most suitable areas for CSP. The costs of electricity production with CSP in the long term is expected to be only slightly higher than the costs of production from fossil fuels. A study on the three most likely chains from an CSP source (well) to fuel cell vehicles (wheel) revealed large environmental benefits, with few negative aspects, except for the costs of hydrogen production. Driving a fuel cell vehicle with hydrogen produced in this way will, then, lead to substantially higher costs. The Netherlands is actively involved in R&D related to fuel cells and hydrogen, but does not play a role in CSP development.

Key words:

Fuel Cell Vehicle, Concentrating Solar Power, Hydrogen, Innovation, Policy Evaluation

Inhoud

Samenvatting	9
1 Inleiding	15
1.1 Evaluatie van het transitiebeleid	15
1.2 De systeemoptie brandstofcelauto op waterstof verkregen uit zonthermische krachtcentrales (CSP)	16
1.3 Werkwijze	17
1.4 Leeswijzer	18
2 De systeemoptie brandstofcelauto op waterstof verkregen uit zonthermische krachtcentrales (CSP)	19
2.1 Korte schets van het basisidee	19
2.2 Productiestructuur	20
2.3 Consumptie en consumptiemiddelen	24
2.4 Instituties	25
2.5 Ruimtelijke invulling	25
2.6 Belangrijke spelers	26
2.7 Relatie met andere systeemopties	27
3 Beoordeling van de potentiële effecten van de systeemoptie	29
4 Resultaten van activiteiten in de voorontwikkelingsfase	35
4.1 Ontwikkelen van probleemperceptie	35
4.2 Ontwikkelen van een gezamenlijke toekomstvisie	36
4.2.1 Brandstofcelauto en waterstof	36
4.2.2 CSP	38
4.3 Research & Development	38
4.3.1 Brandstofcelauto en waterstof	38
4.3.2 CSP	42
4.3.3 CSP en brandstofcellen.....	42
4.4 Experimenten in de praktijk.....	43
4.4.1 Brandstofcelauto en waterstof	43
4.4.2 CSP	44
4.5 Samenhang activiteiten in de voorontwikkelingsfase.....	44
5 Motivatie voor daadwerkelijk systeemverandering	47
6 Conclusies	51

Referenties55

Samenvatting

Met het Nationaal Milieubeleidsplan 4 hebben transitieprocessen in het milieubeleid meer aandacht gekregen. Het gaat om ingrijpende veranderingen op de lange termijn met grote milieuwinst als doel. Het Milieu- en Natuurplanbureau heeft het proces van de afgelopen jaren en de rol van het Nederlandse beleid daarin geëvalueerd voor een van de opties voor het toekomstige systeem: de brandstofcelauto op waterstof verkregen met duurzame energie uit zonthermische krachtcentrales (CSP). Het is een mogelijk alternatief voor de auto met conventionele verbrandingsmotor. De centrales zijn alleen functioneel in gebieden met een hoge zonnestraling. Dat betekent dat er naast omzetting van zonne-energie in waterstof ook transport over grote afstand nodig is. De beschouwde varianten daarvoor zijn: elektriciteitstransport via een gelijkstroomnetwerk en waterstofproductie bij tankstations, waterstoftransport als gas via pijpleidingen en distributie naar de huizen en transport van vloeibaar waterstof via schepen en trucks naar tankstations. Daarnaast is op enkele punten de vergelijking gemaakt met een plug-in hybride, rijdend op 50% elektriciteit uit CSP en 50% bio-ethanol.

Relevante doelstellingen op de lange termijn

- **Schone lucht:** Het programma 'Clean Air for Europe' van de EC integreert de aanpak van verzuring en verbetering van de lokale luchtkwaliteit. Men wil de Europese luchtkwaliteit op de lange termijn verbeteren tot een niveau waarbij 'geen significante effecten' meer optreden voor de menselijke gezondheid en het milieu. Dit zal volgens de Toekomstagenda Milieu een nog grotere beleidsopgave betekenen voor Nederland dan de huidige emissieplafonds en eisen.
- **Klimaatverandering:** In het kader van klimaatbeleid streeft het kabinet er naar met hernieuwbare energie en andere aandrijvingen voor auto's bij te dragen aan reducties van broeikasgasemissies in 2050 van 50% ten opzichte van 1990 (zie Toekomstagenda Milieu).
- **Biodiversiteit:** Het EU-doel is de achteruitgang van biodiversiteit in 2010 te stoppen. De Nederlandse overheid geeft in de Toekomstagenda Milieu aan zoveel mogelijk te willen voorkomen dat negatieve gevolgen van ons handelen hier, naar elders worden afgewenteld. Er is bezorgdheid over extra landgebruik die in concurrentie gaat met voedselvoorziening en natuur (vooral ook bij biobrandstoffen).
- **Voorzieningszekerheid:** Minder afhankelijkheid van olie uit politiek gezien instabiele landen. CSP biedt de mogelijkheid de diversiteit in het energieaanbod en daarmee de voorzieningszekerheid te vergroten. De afhankelijkheid van olie-exporterende landen kan worden verminderd.
- **Geluidshinder:** Bij ernstige geluidshinder is het wegverkeer de grootste bron. Doel is het aantal woningen met een te hoge geluidsbelasting tot nul te reduceren.

- Armoedebestrijding en ontwikkeling: De overheid wil een positieve bijdrage leveren aan duurzame ontwikkeling in ontwikkelingslanden door technologieoverdracht, ondersteuning bij het verbeteren van het milieubeleid en ontwikkelingssamenwerking (zie Toekomstagenda Milieu).
- Economische groei en innovatie: Betaalbaarheid is één van de drie doelen van het energiebeleid. Een EU-doel is Europa weer concurrerend te maken met de VS door meer te innoveren. Slim is één van de drie trefwoorden van de Toekomstagenda Milieu die hiermee samenhangt.

Kunnen de doelen met de systeemoptie worden bereikt?

- Bij het maken van waterstof ontstaan emissies, maar de brandstofcelauto zelf veroorzaakt bij het gebruik geen emissies. Lokale luchtverontreiniging en verzuring door verkeer kan sterk teruggedrongen worden met deze systeemoptie. In hoeverre dit in 2030 nog nodig is om de doelen te halen is de vraag. Dit hangt samen met de ontwikkeling van de normering van uitstoot voor personenvoertuigen (momenteel vastgelegd in Euro 5- en Euro 6-normen) voor de conventionele verbrandingsmotor. Overigens is wel vereist dat auto's ook aan het einde van de levensduur nog voldoen aan de normen en niet alleen in de testcyclus en dat in de testcyclus een representatief beeld ontstaat van de emissies onder praktijkomstandigheden. Wanneer dit is bereikt heeft de brandstofcelauto ten aanzien van de luchtkwaliteit waarschijnlijk een veel kleinere meerwaarde in vergelijking met 20 jaar geleden.
- Het wegverkeer draagt nu voor ongeveer 15% bij aan de uitstoot van broeikasgassen. Met op termijn haalbaar geachte rendementen is - afhankelijk van de variant - bij deze systeemoptie een reductie van 70-95% te verwachten.
- De energiesector in Nederland draagt voor meer dan 25% bij aan de uitstoot van broeikasgassen. Bij import van elektriciteit afkomstig van CSP ook voor alle andere toepassingen van elektriciteit zou - met bijna 100% reductie ten opzichte van fossiele elektriciteit - al ruim de helft van de klimaatdoelstelling worden bereikt.
- De systeemoptie heeft een positief effect op de natuur en biodiversiteit. Er is enig verlies van ecosystemen in woestijnachtige gebieden. Het aantal soorten is daarin relatief beperkt. Het positief effect van de vermindering van broeikasgassen op de biodiversiteit is groter dan dat verlies.
- Het landgebruik - in de zonrijkste gebieden - voor CSP, nodig om uiteindelijk alle auto's in Nederland met brandstofcelauto's op waterstof te laten rijden, is rond 150 km² (veel kleiner dan bij biobrandstoffen). Daar komt bij dat dit landgebruik in de meeste gevallen niet concurreert met functies als land- en bosbouw en bouwgrond.
- De voorzieningszekerheid van energie kan verhoogd worden als CSP wordt opgewekt in een groot aantal landen in Zuid-Europa, Noord-Afrika en het Midden-Oosten. De Sahara

kan in theorie permanent meer dan 300 keer de huidige totale Europese behoefte aan elektriciteit dekken.

- Bij het gebruik van brandstofcelauto's neemt geluidhinder in steden als gevolg van verkeer, sterker af dan al optreedt met het huidige beleid.
- In zonnrijke ontwikkelingslanden biedt CSP al op korte termijn economische mogelijkheden, niet alleen voor de productie van elektriciteit of waterstof, maar ook door de daarmee te combineren mogelijkheid van ontzilting en indirect wellicht tuinbouw (schaduw).
- Omdat op dit moment CSP nog aan het begin staat van introductie op grote schaal, biedt deze systeemoptie volop kansen voor industriële en dienstverlenende bedrijven in Nederland en Europa, ook als CSP in Afrika wordt geplaatst. Nederlandse bedrijven spelen momenteel wel een rol bij de ontwikkeling van brandstofcellen en waterstof. Zij zijn niet betrokken bij de huidige initiatieven rond CSP.
- In landen rond de Sahara zouden – bij voldoende opschaling en schaalgrootte en na nog wat R&D – de productiekosten van elektriciteit op een termijn van 10 jaar een niveau van 5 à 6 €cent/kWh kunnen bereiken. In Zuid-Europa ongeveer 8 €cent/kWh, vanwege een lagere zonintensiteit. Voor elektriciteit uit fossiele bronnen en kernenergie ligt dit momenteel rond 4 tot 5 €cent/kWh.

Hoe verloopt het proces om de systeemoptie te realiseren?

- De stringente wetgeving ten aanzien van luchtverontreiniging in Californië gaf in 1990 sterke impulsen aan onderzoek naar de elektrische auto en de brandstofcelauto. In latere jaren kwamen daar zorgen rond klimaatverandering en - tamelijk recent – rond voorzieningszekerheid bij. Vanaf het begin was de visie bij velen, ook in Nederland, dat de brandstofcelauto op waterstof er op de lange termijn komt, al zal het nog 10 tot 20 jaar duren voor deze doorbreekt. Veel partijen zoals autofabrikanten, oliemaatschappijen, onderzoeksinstituten en overheden zijn actief. Niemand lijkt te willen achterblijven. Er zijn veel samenwerkingsverbanden omdat het om grote bedragen aan R&D gaat.
- De brandstofcelauto bevindt zich wereldwijd nog volop in de R&D-fase. Heel veel industriële landen, de OECD (IEA) en de EU hebben onderzoeksprogramma's op het gebied van brandstofcellen en waterstof. Nederland doet mee aan internationale programma's en in universiteiten en kennisinstellingen zijn verschillende onderzoeksgroepen actief. Het huidige kostenniveau is nog te hoog. De kosten voor een brandstofcel zijn volgens Ballard, een grote producent, tussen 2002 en 2005 gedaald met 40%.
- Er zijn in Nederland nog geen niches met waterstofvoertuigen, slechts enkele experimentele voorbeelden van bescheiden omvang (drie bussen in Amsterdam, een waterstofsloop, waterstofkarts, de waterstofauto van ECN). Samenhangend met de eerder

genoemde hoge kosten is men – zowel hier als elders - nog ver verwijderd van de praktijk.

- Een tussenstap naar introductie van de brandstofcelauto op waterstof zou kunnen zijn de brandstofcelauto op benzine met een converter in de auto om waterstof te produceren. Het lijkt erop dat de autoindustrie deze route inmiddels verlaten heeft. Een aantal autofabrikanten is actief met een verbrandingsmotor op waterstof. Ook dit wordt door velen als een tussenstap gezien.
- In verschillende landen wordt geëxperimenteerd met een nieuwe waterstofinfrastructuur. De EU heeft programma's lopen voor de normstelling rond brandstofcelauto's en de veiligheid van waterstof. Het zijn signalen dat de verwachtingen concreter worden.
- Veel partijen beamen dat waterstof uiteindelijk uit hernieuwbare bronnen moet komen. Er is nog veel R&D gaande om waterstof op goedkopere wijzen te produceren. Voor de transitiefase wordt veel gesproken over waterstof uit aardgas als tussenstap.
- De ontwikkeling van CSP staat los van nieuwe aandrijvingstechnieken. De opkomst in de jaren 1980 - met name in Californië - vond zijn oorsprong in de energiecrises van de jaren 1970. De lage olieprijs in de jaren 1990 zetten een rem op verdere invoering. De IEA en later ook de EU zijn in bescheiden mate met R&D-programma's verder gegaan. De laatste jaren komt CSP weer meer in beeld, met name in Spanje. Er zijn gelden van de Wereld Bank beschikbaar voor CSP in ontwikkelingslanden. Belangrijke barrière is het feit dat de productiekosten met op korte termijn te plaatsen installaties nog relatief hoog zijn en onzekerheid bestaat over groei van de omvang van CSP.
- Nederland speelt bij CSP geen rol; uiteraard niet in de plaatsing van installaties hier, maar ook niet in R&D en in het IEA-netwerk op dit terrein. Nederland heeft tot zeer recent ook geen visie laten zien op bijvoorbeeld kansen voor zonnrijke ontwikkelingslanden en Zuid-Europa.
- De kostenbarrière is nog aanzienlijk. Velen veronderstellen dat de brandstofcelauto op termijn niet duurder zal zijn dan een conventionele auto. Het rijden op waterstof uit CSP zal (per afgelegde km) naar verwachting 2,5 tot 5 keer duurder zijn dan het rijden op benzine, ook bij een hoge olieprijs (maar zonder CO₂-kosten). Het gaat hier over de kale prijs, dus exclusief belastingen en accijnzen.
- Een systeem van een plug-in hybride die half-om-half rijdt op elektriciteit uit CSP en biobrandstoffen zou wel goedkoper kunnen zijn dan het huidige systeem, zeker bij een hoge olieprijs (met wel meer landgebruik voor de kweek van gewassen voor bio-ethanol). Na het succes van de hybride de afgelopen jaren hebben diverse fabrikanten plannen met een hybride op de markt te komen, één heeft ook plannen voor een plug-in versie.
- Afsluitend kan worden gesteld dat Nederland vergeleken met veel andere landen nogal wat geld uitgeeft aan R&D voor brandstofcellen, dat het Nederlandse transitiebeleid waterstof nog wat sterker onder de aandacht heeft gebracht, maar dat het Nederlandse transitiebeleid voor deze systeemoptie tot nu toe niet of nauwelijks een versnelling in de

ontwikkelingscyclus heeft bewerkstelligd, niet bij CSP, maar ook niet bij de brandstofcelauto.

1 Inleiding

1.1 Evaluatie van het transitiebeleid

In 2001 heeft het vierde Nationaal Milieubeleidsplan (NMP4) een beleidsimpuls gegeven aan het denken in termen van systeemverandering op de lange termijn om hardnekkige milieuproblemen de baas te worden. Het heeft ook diverse beleidsacties in gang gezet, die invulling hebben gegeven aan het begrip transitie management in de context van duurzame ontwikkeling. In overleg met alle betrokken ministeries is afgesproken, dat het Milieu- en Natuurplanbureau in 2006 een eerste evaluatie uitbrengt van de voortgang van het transitieproces en de rol van het beleid daarin. Inmiddels is een interdepartementale directie voor de energietransitie in het leven geroepen, waardoor de breedte in de systeemopties – het gaat immers dikwijls over sectoren heen – beter kan worden aangestuurd.

Het werken aan een beter systeem op de lange termijn heeft met het NMP4 weliswaar extra aandacht gekregen, het is er niet mee begonnen. Er liepen al tal van onderzoeksprogramma's en experimenten, er waren vele ideeën over nieuwe institutionele vormgeving en er was al veel beleid dat daar direct of indirect invloed op had. Het heeft geen zin de ontwikkelingen van de laatste jaren te beschouwen zonder deze context. Er is ook afgesproken, dat het uitgangspunt voor deze evaluatie de voortgang van de processen in de praktijk zou zijn en dat daarbij wordt aangegeven welke prikkels er vanuit het beleid zijn gegeven en hoe effectief die zijn geweest.

In de voorontwikkelingsfase zijn transities doelzoekende processen. Zonder duidelijke doelen is het lastig evalueren, tenzij de evaluator een participerende en faciliterende rol speelt in een leerproces. Deze rol past niet bij het MNP als onafhankelijk planbureau. Er is gezocht naar een aanpak waarbij de elementen leren en afrekenen in samenhang zouden kunnen worden beschouwd. Dat heeft geleid tot systeemopties als uitgangspunt voor de evaluatie. Een systeemoptie schetst een deel van het toekomstige systeem zoals dat zou kunnen worden. Het vormt een potentieel doel. De evaluatie richt zich op het proces om deze systeemoptie te realiseren. Bij de formulering van de eindconclusies dient te worden bedacht dat het proces moet worden afgestemd op andere processen, waarin mogelijke alternatieven worden ontwikkeld. De keuze voor een specifieke systeemoptie geeft de evaluatie wel het nodige houvast.

Binnen het MNP is een evaluatiemethodiek ontwikkeld die een leidraad vormt voor de evaluatie en bouwstenen aandraagt voor te hanteren methoden en modellen (Ros et al., 2006). Hoewel het proces en de rol van het beleid daarin centraal staan in de evaluatie, wordt ook

een eerste beoordeling van de mogelijke effecten bij realisatie van de systeemoptie opgemaakt. Dit gebeurt omdat deze mogelijke effecten van invloed zijn op de houding van diverse actoren ten opzichte van de systeemoptie en daarom niet los kunnen worden gezien van het proces.

Er zijn zeker tientallen mogelijke systeemopties die geanalyseerd kunnen worden. De systeemoptie brandstofcelauto op waterstof verkregen uit zonthermische krachtcentrales is er een uit een serie van zes systeemopties, die worden geanalyseerd. De andere systeemopties zijn:

- Vloeibare biobrandstoffen (reeds verschenen)
- Markt voor groene diensten;
- Biograndstoffen voor de chemische industrie;
- Duurzame viskweek voor behoud van de visvoorraad;
- Micro-warmtekracht en de virtuele centrale.

In paragraaf 2.7 wordt aangegeven welke raakvlakken er bij deze systeemoptie zijn met andere. Er zijn zeker andere systeemopties mogelijk op het vlak van energiebronnen en brandstoffen voor (auto)mobiliteit. Hier en daar zal in de tekst summier aandacht geschonken worden aan alternatieven.

Op basis van deze zes rapporten zal een samenvattend evaluatierapport over transities worden uitgebracht dat een eerste beeld geeft van milieurelevante transitieprocessen.

1.2 De systeemoptie brandstofcelauto op waterstof verkregen uit zonthermische krachtcentrales (CSP)

Deze systeemoptie is gekozen omdat wereldwijd al jaren wordt gesproken over een toekomstige waterstofeconomie die gepaard zou gaan met minder luchtverontreiniging. ‘Nederland waterstofland’ is een van de eindbeelden in het NMP4. Overigens is ‘Nederland Elektriciteitsland’ een tweede eindbeeld, reden waarom en passant in het rapport aandacht wordt geschonken aan de elektrische auto. De brandstofcel speelt in de waterstofeconomie een cruciale rol. De auto-industrie is al 15 jaar bezig met onderzoek naar de brandstofcelauto. Vanuit het oogpunt van klimaatverandering heeft het gebruik van waterstof alleen zin als de waterstof afkomstig is uit duurzame bronnen. De zon is de bron met de grootste potentie. In de Milieubalans van 2003 wordt al geopperd te denken aan een brandstofcelauto rijdend op waterstof uit zonne-energie (RIVM, 2003). In de VS staan al sinds het begin van de jaren 1990 goed functionerende zonthermische krachtcentrales, Concentrating Solar Power (CSP). Technische verbeteringen en schaalvergroting moeten leiden tot een kostenniveau dat op termijn concurrerend is met de kosten van fossiele energie. De ruimtebehoefte is bij CSP beperkt. In met name Spanje en Duitsland wordt veel onderzoek uitgevoerd. Er zijn veel varianten mogelijk om waterstof te produceren en energie te transporteren naar minder

zonrijke gebieden. Een aantal hiervan wordt in dit rapport weergegeven, met name gebaseerd op onderzoek van Ecofys bv (De Visser et al., 2006).

1.3 Werkwijze

Er is gebruik gemaakt van de door het MNP opgestelde evaluatiemethodiek voor transities en de daarin aangegeven bouwstenen. Het rapport waarin deze evaluatiemethodiek is vastgelegd (Ros et al., 2006), is te vinden op de website van het MNP.

In de eerste plaats is een beschrijving en vooral de afbakening van de beschouwde systeemoptie van belang. Het gaat om een samenhangend geheel van technieken, processen, instituties en structuren. Hoewel de evaluatie in de eerste plaats betrekking heeft op het transitieproces en niet zozeer op de mogelijke effecten als het eindresultaat wordt bereikt, kunnen deze zaken niet los van elkaar worden gezien. De mogelijke effecten bepalen immers mede de houding van diverse actoren. Daarom wordt in dit rapport ook kort ingegaan op de effecten.

Een ex-post evaluatie wordt gebaseerd op monitoring. Milieubeleidsevaluaties worden veelal gebaseerd op de monitoring van emissies, milieukwaliteit of zo mogelijk van effecten. In het geval van de lopende transitieprocessen is dit niet zo zinvol. De beoogde veranderingen in deze grootheden worden pas op de lange termijn bereikt. Beleid dient zich eerst te richten op de voorontwikkeling van dat veranderingsproces. Daarin zijn vier typen activiteiten verondersteld:

- het ontwikkelen van een gevoel van urgentie op basis van een probleempceptie;
- het ontwikkelen van een gezamenlijke toekomstvisie;
- onderzoek en ontwikkeling van nieuwe technologie en nieuwe instituties;
- experimenten in de praktijk met onderdelen van het nieuwe systeem of inrichten van niches.

De monitoring richt zich op deze activiteiten. Wat is er op die punten de afgelopen jaren gebeurd? Welke beleidsacties zijn daarop gericht geweest? Daarin staat Nederland niet los van de rest van de wereld, zeker niet bij deze systeemoptie. Daarom wordt ook de internationale context geschetst. Vervolgens wordt de samenhang in de feitelijke ontwikkelingen van de afgelopen jaren geanalyseerd. Hierbij wordt vooral beschouwd, in hoeverre de cyclus van visievorming-R&D-experimenten gericht op de lange termijn spoort met de cyclus van actiegerichtheid-creëren van markten-niches op de korte termijn.

De resultaten van deze activiteiten in de voorontwikkelingsfase moeten de motivatie vergroten om tot daadwerkelijke systeemverandering over te gaan. Met beleidsinstrumenten kan deze motivatie worden versterkt. Echter, het bestaande systeem met de daarin gecreëerde belangen kan tegenwerken. Nagegaan wordt hoe de motivatie zich de afgelopen jaren heeft ontwikkeld. Daarbij wordt uitgebreid aandacht geschonken aan de kosten van de systeemoptie.

Ecofys bv (De Visser, Van den Hoed en Barten) heeft aan deze studie een belangrijke bijdrage geleverd qua berekeningen en analyses (De Visser et al., 2006). Het als achtergronddocument te beschouwen rapport is te vinden op de website van het MNP.

1.4 Leeswijzer

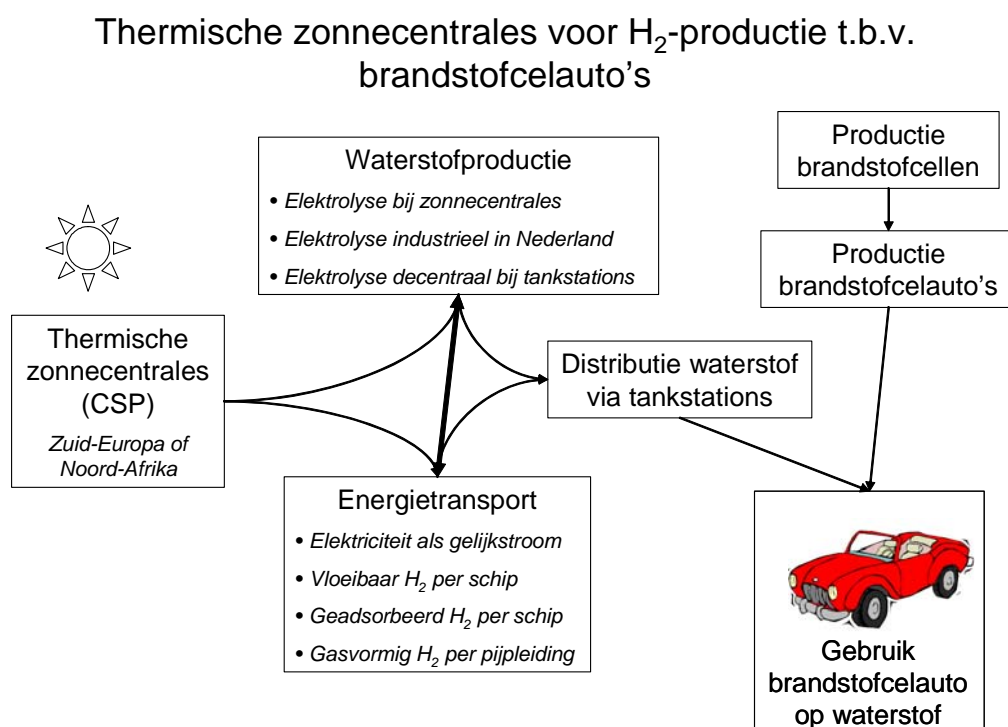
Hoofdstuk 2 geeft een beschrijving en afbakening van de beschouwde systeemoptie met alle bijkomende aspecten. In hoofdstuk 3 wordt een eerste duurzaamheidstoets op de systeemoptie losgelaten met speciale aandacht voor de effecten op broeikasgasemissies, het ruimtebeslag en de kosten. Vervolgens worden de feitelijke ontwikkelingen van de afgelopen jaren op een rij gezet in hoofdstuk 4; hierbij wordt ook ingegaan op de samenhang tussen deze ontwikkelingen in de voorontwikkelingsfase van de transitie. Hoofdstuk 5 richt zich op het krachtenspel en de ontwikkelingen daarin om daadwerkelijke investeringen in essentiële onderdelen van het nieuwe systeem te realiseren. In hoofdstuk 6 worden conclusies getrokken over de mogelijke effecten, de voortgang van het proces en de invloed van het Nederlandse beleid daarop.

Per paragraaf zal waar nodig onderscheid gemaakt worden in de ontwikkeling rond de brandstofcelauto, de productie en het transport van elektriciteit en waterstof, en de zonthermische krachtcentrale.

2 De systeemoptie brandstofcelauto op waterstof verkregen uit zonthermische krachtcentrales (CSP)

2.1 Korte schets van het basisidee

Bij deze systeemoptie wordt ervan uitgegaan dat de auto in de toekomst een belangrijk transportmiddel zal zijn naast trein, schip, vliegtuig en transportleidingen. Een mogelijk alternatief voor de auto met conventionele verbrandingsmotor is de brandstofcelauto. De laatste rijdt op waterstof, wat leidt tot minder luchtverontreiniging waar de auto rijdt. Waterstof kan gemaakt worden uit fossiele bronnen, kernenergie en hernieuwbare energiebronnen. Alleen in de laatste gevallen (en bij afvang en opslag van CO₂ bij fossiele bronnen) ontstaat aanzienlijk minder CO₂-emissie. Waterstof kan, met behulp van een reformer, in de auto gemaakt worden uit fossiele brandstoffen. De laatste jaren heeft deze mogelijkheid minder aandacht gekregen (technisch zeer complex en geen voordelen qua CO₂-emissie). Om deze redenen is deze variant niet meegenomen in deze systeemoptie.



Figuur 2.1. Schets van de systeemoptie (transport van H₂ per schip is niet meegenomen in deze studie; te weinig realistisch).

Mogelijke bronnen voor waterstof uit duurzame energie zijn onder meer wind, biomassa en zon. In deze systeemoptie is gekozen voor zonthermische krachtcentrales (Concentrating Solar Power). Deze centrales zijn alleen functioneel in gebieden met een hoge zonnestraling.

De energie moet in de een of andere vorm getransporteerd worden naar de gebruiker van de brandstofcelauto, bijvoorbeeld in Nederland. Figuur 2.1 geeft een overzicht van de systeemoptie.

Het betreft hier een brandstofcelauto die ook enige extra accucapaciteit heeft om remenergie op te slaan (hybride brandstofcelauto). Op enig moment in de keten moet waterstof gemaakt worden. Bij deze systeemoptie zullen enkele varianten worden doorgerekend op energiegebruik, emissies en kosten. Hier en daar zal in de tekst ook kort worden stilgestaan bij een andere variant voor de auto, de zogenaamde plug-in hybride, rijdend op electriciteit uit CSP en biobrandstoffen.

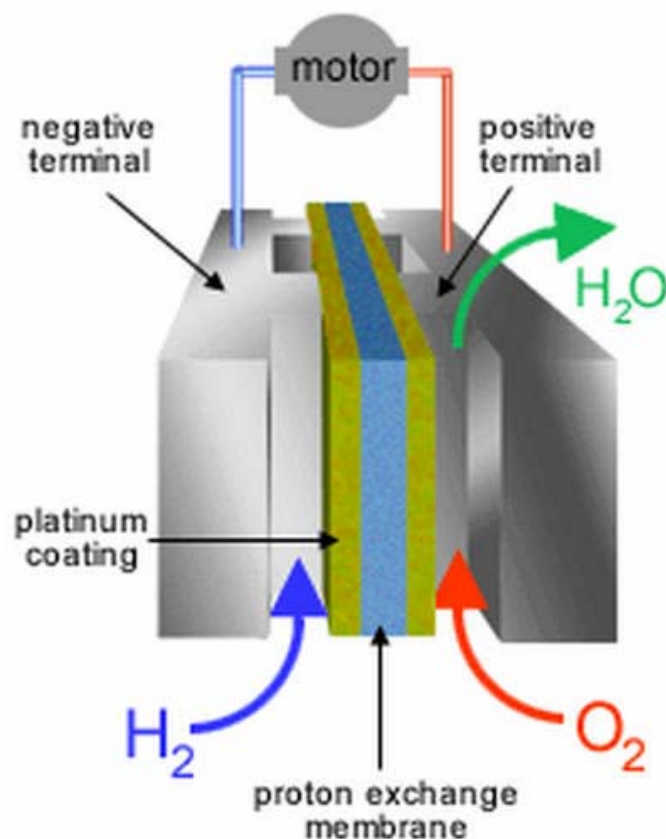
2.2 Productiestructuur

In het rapport is geredeneerd vanuit de keten: de vervanging van de conventionele auto door de brandstofcelauto waarvan de brandstofcel gevoed wordt door waterstof, vervaardigd met behulp van zonne-energie uit CSP installaties.

Brandstofcel

Een brandstofcel is een elektrochemisch apparaat dat via een chemisch proces brandstof en zuurstof omzet in elektriciteit, warmte en water (zie Figuur 2.2).

Een brandstofcel kan voor veel toepassingen worden gebruikt, bijvoorbeeld voor industriële toepassingen, micro-WKK in de bebouwde omgeving en auto's. Een aantal autofabrikanten in verschillende landen heeft prototypes van brandstofcelauto's gefabriceerd en voert experimenten uit. Er moet nog veel onderzoek gedaan worden, vooral om de kosten te verlagen. Er zijn verschillende typen brandstofcellen. Bij de brandstofcelauto richt het



Figuur 2.2 Werking van de brandstofcel

onderzoek zich tegenwoordig vooral op de polymeer-elektrolytmembraanbrandstofcel (PEMFC).

Waterstof

Brandstofcelauto's rijden op waterstof. Waterstof kan op verschillende plaatsen geproduceerd worden (thuis, bij tankstations, in havens, bij een chemische industrie en bij een elektriciteitscentrale). Er is een waaier aan mogelijkheden om waterstof vanuit de Middellandse Zee regio in Nederland en uiteindelijk bij de consument te krijgen. Bij de uiteindelijke keuze van routes is gezorgd voor zo min mogelijk conversiestappen omdat conversie ten koste gaat van energieverliezen. Verder zijn technologieën die alleen nog op labschaal bestaan (bijvoorbeeld thermo-chemische processen en Photo Electric Conversion) niet meegenomen.

Lange-afstandroutes

Uit een kwalitatieve analyse van Ecofys komen drie goed voorstelbare lange-afstandroutes van het producerende land naar het ontvangende land naar voren (De Visser et al., 2006):

Productie van waterstof bij de centrale en vervoer van gasvormige waterstof per pijpleiding

Via elektrolyse bij de centrale wordt waterstof gemaakt. Met pijpleidingen wordt onder hoge druk waterstof naar Nederland vervoerd. De energie-inhoud van waterstof is lager dan bij aardgas en de dimensies van de leiding zullen wat hoger zijn, maar qua kosten maakt dat niet veel uit. Waterstof dat per pijpleiding naar Nederland gekomen is, zou per pijpleiding verder naar tankstations vervoerd kunnen worden, of met een verfijnder net naar de consument. Hiervoor is wel een apart waterstofnet nodig vanwege het verschil in energiedichtheid van waterstof en aardgas en technische eisen in verband met voorkomen van lekkages en corrosie. Terzijde zij opgemerkt dat op de middellange termijn in een overgangsfase het aardgasnet zou kunnen worden gebruikt voor toevoeging van waterstof aan aardgas ('hythane'), waarna met behulp van membranen weer een scheiding bij de eindgebruiker plaats kan vinden.

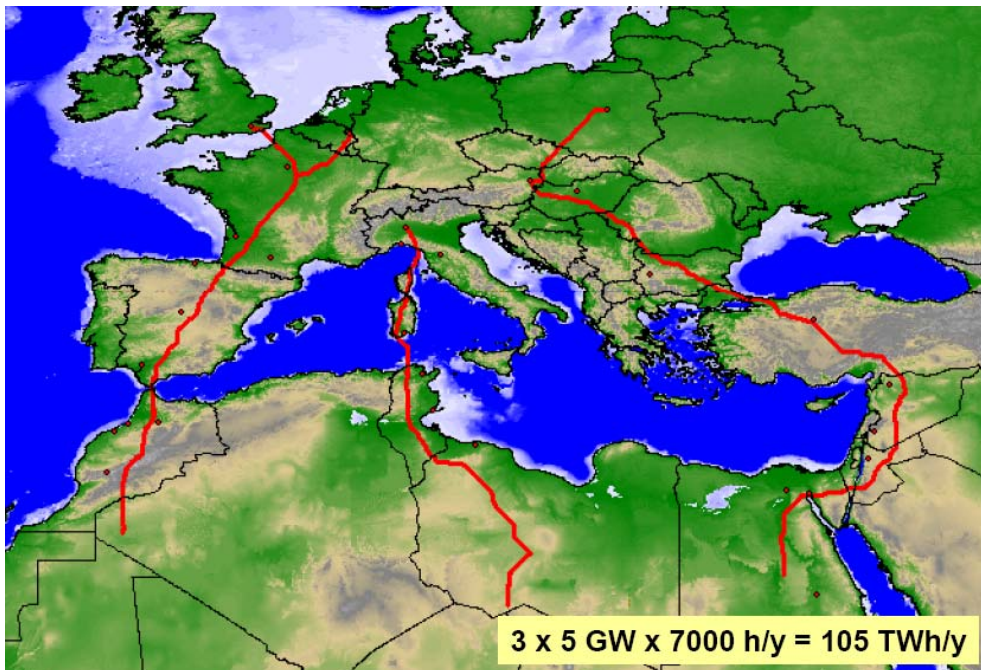
Productie van waterstof bij de centrale en vervoer van vloeibare waterstof per schip

Ook bij deze transportroute wordt waterstof bij de centrale geproduceerd. Ter plekke of aan de kust wordt het vloeibaar gemaakt om met schepen te vervoeren naar Nederland, vergelijkbaar met het transport van vloeibaar aardgas. Net zoals bij conventionele brandstoffen kan gasvormig of vloeibaar waterstof naar tankstations vervoerd worden. Vergeleken met een pijpleiding zijn er iets hogere verliezen en kosten. Afhankelijk van transportafstand en het aantal tonnen per dag is de ene vorm van hardware (pijpleiding of tankauto) en de aggregatietoestand (vloeibaar of gasvormig) qua kosten aantrekkelijker dan de andere.

Transport van elektriciteit waarna productie van waterstof in ontvangende land

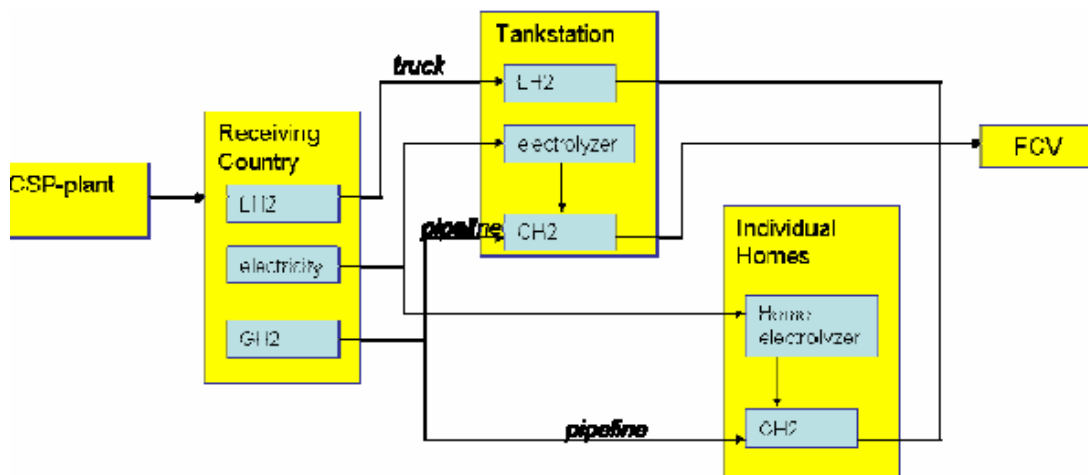
De meest conventionele (en meest besproken) transportroute is energie transporteren via het net. In het ontvangende land kan vervolgens waterstof geproduceerd worden. Bij gebruikmaking van het normale wisselstroomnet treden aanzienlijke verliezen op, zeker bij gedeeltelijke toepassing van zeekabels. Om verliezen te minimaliseren wordt hier een

hoogvoltage gelijkstroomnet (HVDC) verondersteld (zie Figuur 2.3). Wanneer elektriciteit over lange afstand vervoerd wordt naar Nederland kan het bijvoorbeeld in de Rotterdamse haven of een ander industrieel complex, met grootschalige elektrolyseapparatuur omgezet worden in waterstof. Maar het kan ook met kleinschaliger apparatuur bij tankstations of zelfs thuis. Hoe gedecentraliseerder de productie plaats vindt, hoe lager de distributieverliezen, maar hoe hoger de kosten door een lagere efficiency van kleinere elektrolyseapparatuur.



Figuur 2.3 Drie mogelijke transportroutes voor elektriciteit uit CSP vanuit de Sahara naar Europa (Trieb, 2006).

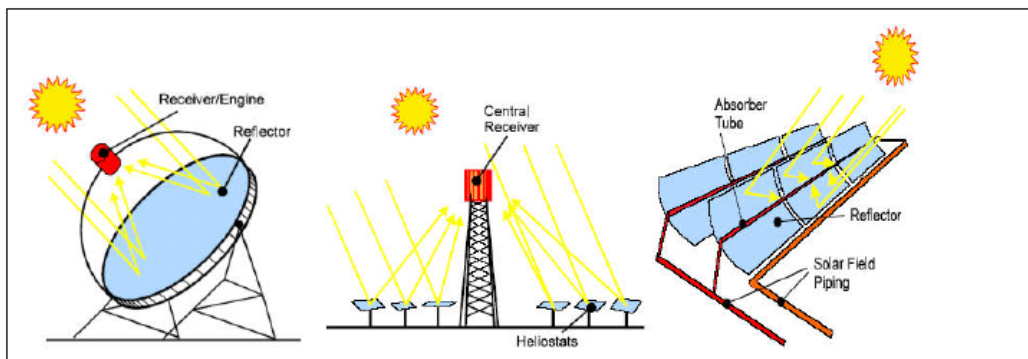
In Figuur 2.4 zijn de waterstofvarianten, die in het rapport worden meegenomen schematisch stap voor stap weergegeven.



Figuur 2.4. Varianten van de productie van waterstof en distributie van energie naar de brandstofcelauto (De Visser et al., 2006).

CSP

In deze systeemoptie staat de CSP-centrale aan het andere eind van de keten. CSP wordt al op bescheiden schaal toegepast. Er bestaat een aantal technieken om met spiegels zonne-energie te focussen en naar een min of meer conventionele centrale te leiden.



Figuur 2.5 CSP- concepten: Parabolische schijf, Heliostaat of toren en Parabolische Trog. (IEA www.solarPACES.org)

In het kort komt het erop neer dat zonnestrallen worden opgevangen met beweegbare spiegels en worden gericht op een circulerende vloeistof (vaak olie of gesmolten zout). Met de warmte wordt in een centrale elektriciteit opgewekt. Het tot nu toe meest toegepaste concept is de parabolische trog; een recente variant hiervan is de Fresnel-zonnecollector. CSP-installaties kunnen ook 's nachts of bij bewolking elektriciteit leveren via opslagsystemen of het bijstoken met fossiele brandstoffen. In deze systeemoptie is geen bijstook verondersteld. Afhankelijk van de locatie moet in meer of mindere mate rekening worden gehouden met fluctuaties per jaar.

parabolic trough (PSA)**solar tower (SNL)****linear Fresnel (Solarmundo)****parabolic dish (SBP)***Figuur 2.6 CSP-installaties (DLR, 2005).*

2.3 Consumptie en consumptiemiddelen

De consument komt in beeld bij het aanschaffen en het gebruik van de auto. Voor de consumenten zijn de volgende aspecten relevant bij de keuze tussen een brandstofcelauto en een conventionele auto:

- afstand die kan worden afgelegd zonder te tanken (bij voorkeur 600 km);
- tanken in korte tijd, liefst binnen enkele minuten;
- comfort op aspecten als ruimte, geluid, acceleratie, enzovoort;
- veiligheid tenminste vergelijkbaar met de huidige situatie;
- acceptabele kosten per km.

Voor de auto-industrie is het uitgangspunt dat de consument er niet op achteruitgaat. Enkele aspecten (zoals geluid en veiligheid) zijn trouwens niet alleen relevant voor de automobilist, maar ook voor de burger in het algemeen.

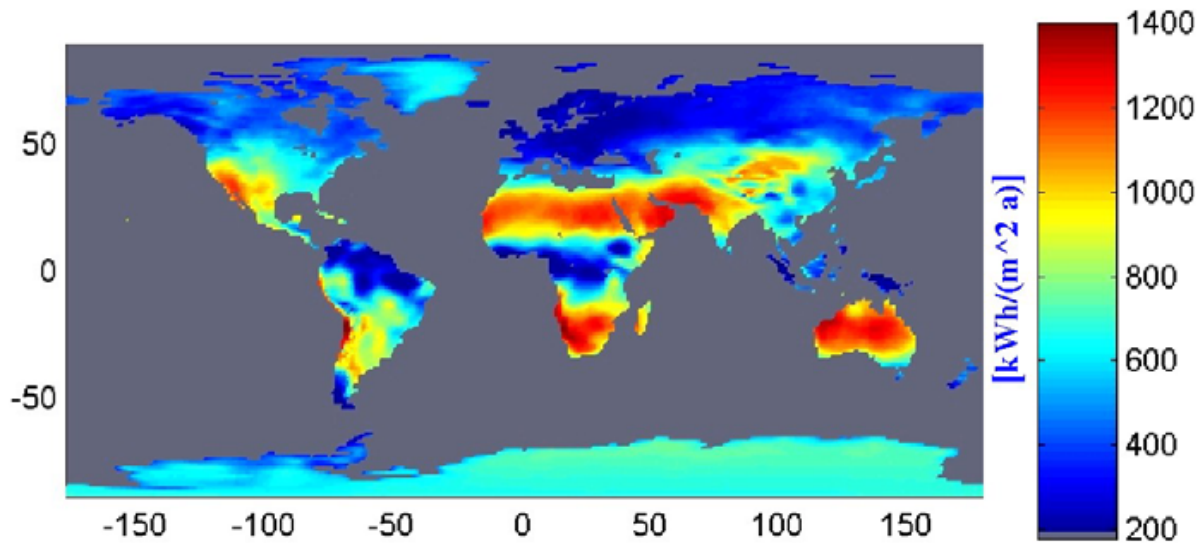
2.4 Instituties

Meestal is de eerste gedachte dat de techniek op orde moet zijn of in ieder geval voldoende potentie moet bieden, voordat men zich druk maakt om institutionele veranderingen. Voordat deze systeemoptie gerealiseerd is, moet een groot aantal zaken geregeld zijn. Een greep:

- Voor brandstofcelauto's moeten fabrikanten op enig moment overgaan tot standaarden voor vele onderdelen van de aandrijving.
- Een waterstofinfrastructuur vraagt om afspraken over opslagsystemen, veiligheid, tracés van schepen, leidingen en dergelijke. Geleidelijk zal ook de opzet van tankstations veranderen.
- Wanneer besloten wordt tot een hoogvoltagegelijkstroomnet moeten landen en beheerders van netten afspraken maken over technologie en capaciteiten.
- Voor waterstof als brandstof zal het belastingregime aangepast moeten worden.
- Er moeten opleidingen komen voor het kunnen werken met waterstof (leidingen, schepen, garages, enz). Bij een variant van de systeemoptie maakt de consument zelf waterstof uit elektriciteit. Dit vereist te zijner tijd nog enige 'scholing'. Bij de plug-in hybride wordt de auto thuis of bij een parkeervoorziening aan het net gekoppeld.

2.5 Ruimtelijke invulling

De directe zoninstraling in Nederland is veel te laag voor het plaatsen van CSP-centrales. Het zuiden van Zuid-Europa, maar veel meer nog Noord-Afrika en Arabië, zijn technisch gezien in onze omgeving logische plaatsen voor dit soort installaties. In de rode gebieden (zie Figuur 2.7) kan 30 MWh/km² worden opgewekt. Beeldender: de Sahara kan > 300 maal de Europese consumptie aan elektriciteit leveren (Kabariti et al., 2003).



Figuur 2.7 Potentie van gemiddelde jaarlijkse warmteproductie bij gebruik van parabolische troggen (meteogegevens ECMWF en NCEP periode 1983-1992 uit Czisch).

2.6 Belangrijke spelers

Producenten van brandstofcellen

De core business van brandstofcelproducenten, maar ook van leveranciers van nieuwe onderdelen in de brandstofcelauto.

Auto-industrie en garages

De auto-industrie is zo'n honderd jaar gewend aan steeds verbeterende motoren en zal (geleidelijk) moeten overstappen op andere aandrijvingen. Ook voor garages betekent het andersoortig werk.

Olie- en gasmaatschappijen en tankstations

In ieder geval zal de aard van de brandstof veranderen. Afhankelijk van de uitvoering van de systeemoptie zullen de activiteiten veranderen of stoppen.

Elektriciteitsmaatschappijen

CSP in plaats van het verstoken van fossiele brandstoffen is een nieuwe tak van sport. Als ter plaatse ook waterstof wordt gemaakt, is dit een verdere uitbreiding van activiteiten.

Energietransporteurs

Dit zijn niet altijd dezelfde meer als als elektriciteitsmaatschappijen.

Consumenten en fleetowners

Ook voor deze systeemoptie zijn koplopers nodig die als eersten met een ander systeem aan de slag willen en zo meer risico's dragen dan het peloton.

Overheden

Overheden moeten financiële stimulansen bieden in de beginfase. Zij moeten ook werken aan Public Private Partnerships voor de infrastructuur voor waterstof en op alle mogelijke terreinen het transitieproces faciliteren

Financiële instellingen

De aanleg van een nieuwe energie-infrastructuur vraagt grote investeringen. De aanschaf van de eerste generatie brandstofcelauto's is kostbaar en zou misschien goed voor in aanmerking komen voor leasen.

2.7 Relatie met andere systeemopties

Er zijn veel relaties met andere systeemopties. Deze hebben betrekking op:

- Andere brandstoffen en autotypes, te denken valt aan hybride-auto's, verbeterde conventionele auto's, elektrische auto's, biobrandstoffen, gas (or coal) to liquids;
- Andere wijzen van vervoer, zoals openbaar vervoer, vliegtuig, scheepvaart;
- Andere bronnen van energie, zoals kernenergie, steenkool al of niet met CO₂-opslag, wind, PV, biomassa, etc;
- Andere toepassingen van zonne-energie (gebouwen, ontzilting);
- Andere toepassingen van brandstofcellen: mobiele elektronica, industriële installaties, woningen en bedrijfsgebouwen (zie voor het laatste: Elzenga et al., 2006).
- Andere bronnen van waterstof, zoals biomassa.

Op twee systeemopties wordt wat nader ingegaan. De laatste jaren wordt in toenemende mate onderzoek gedaan aan biobrandstoffen als alternatief voor conventionele transportbrandstoffen als benzine en diesel. In onder andere een recent MNP-rapport in deze reeks wordt uitgebreid aandacht geschonken aan ontwikkelingen rond biobrandstoffen (Ros en Montfoort, 2006). In De Visser et al., (2006) wordt als alternatieve referentie een plug-in hybride geïntroduceerd waarbij de accu gevoed wordt door elektriciteit uit CSP en biobrandstoffen de plaats innemen van benzine. Hier en daar wordt in het volgende aandacht geschonken aan deze systeemoptie.























In een overgangssituatie naar een systeem dat geheel is gebaseerd op hernieuwbare bronnen zou ook de volgende systeemoptie interessant kunnen zijn: een teveel aan elektriciteit bij micro-WKK-brandstofcellen in huishoudens, werkend op aardgas, wordt niet aan een virtuele centrale geleverd, maar is beschikbaar voor de plug-in hybride auto (zie ook Elzenga et al., 2006).

3 Beoordeling van de potentiële effecten van de systeemoptie

Het proces dat gericht is op realisatie van de systeemoptie kan niet los worden gezien van de mogelijke resultaten die ermee kunnen worden bereikt. Op basis van de huidige kennis van de technologie kan een inschatting worden gemaakt van de effecten als de systeemoptie daadwerkelijk gerealiseerd zou zijn.

De situatie met een verbeterde conventionele auto wordt als referentie genomen. De confrontatie levert een eerste ruwe duurzaamheidstoets (zie Tabel 3.1), waarbij de resultaten wel spreiding kennen, omdat er nog varianten (onder meer de drie technische varianten toegelicht in hoofdstuk 2) in de uitwerking openstaan. Dit betekent ook dat er nog veel richting aan kan worden gegeven. Voor een aantal indicatoren volstaat een summiere toelichting onder aan de tabel. Een aantal onderwerpen wordt daarna verder uitgewerkt.

Tabel 3.1 Beoordeling van de systeemoptie aan de hand van een duurzaamheidsindicatorenset.

	Sociaal		Economisch		Ecologisch	
Nederland	Geopolitieke stabiliteit ¹⁾		BBP ²⁾ Voorzieningszekerheid ¹⁴⁾		Lokale luchtverontreiniging ⁵⁾	
	Koopkracht-verschillen ⁶⁾				Verzurende emissies ⁴⁾	
	Geluid ¹¹⁾					
	Veiligheid ¹³⁾					
Elders	Landschap ¹⁰⁾		BBP ⁷⁾		Landgebruik ⁸⁾	
	Veiligheid ¹³⁾		Beschikbaarheid zoetwater ¹²⁾		Natuurwaarde / biodiversiteit ⁹⁾	
	Geopolitieke stabiliteit ¹⁾		Werkgelegenheid ⁷⁾		Klimaat effecten ³⁾	
 slechter  iets slechter  neutraal  iets beter  beter						

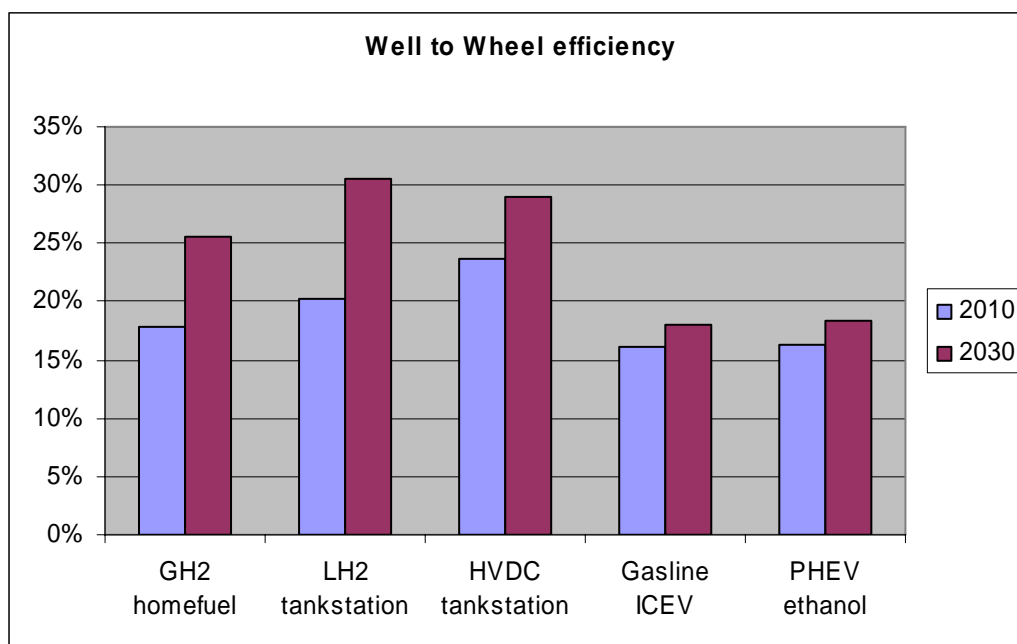
- De export van energie uit landen rond de Middellandse Zee verhoogt het BBP daar en versterkt economische banden met Noord Europa, hetgeen kan bijdragen aan verhoging van geopolitieke stabiliteit. Overigens blijven elektriciteitsnetten en pijpleidingen kwetsbaar voor aanslagen (maar dit geldt ook in de situatie van olie- en gasleidingen).
- De kosten van energie worden hoger voor burger en bedrijven. Het is onduidelijk waar onderdelen van de systeemoptie worden geproduceerd, maar naar verwachting zal niet veel massa in Nederland geproduceerd worden. Raffinaderijen in NL krijgen op termijn minder omzet. In principe biedt Rijnmond mogelijkheden voor op- en overslag van waterstof. Alles afwegende leidt de systeemoptie vermoedelijk tot een iets lagere economische groei in Nederland.
- De emissie van broeikasgassen neemt per gereden kilometer met een factor 3 à 4 af. Dit leidt tot relatief lagere risico's wat de fysieke aspecten van klimaatverandering betreft (zeespiegelstijging en overstromingen, heftiger fluctuaties in het weer, gezondheidsrisico's).

4. Er zijn weinig data beschikbaar. Minder raffinage van olie leidt tot vermindering van de emissies van NO_x, bij het gebruik van brandstofcelauto's in plaats van conventionele auto's ontstaat geen NO_x. Bij verschillende processen in de keten van CSP naar auto komen wel NO_x emissies vrij, maar per saldo is de emissie per km lager dan bij benzineauto's die voldoen aan de Euro 5-normen (De Visser et al., 2006).
5. Daar waar de brandstofcelauto rijdt, ontstaan geen emissies. Daar was het in Californië ook allemaal om te doen (zie 4.2.1). De conventionele auto zal waarschijnlijk in 2030 ook vrij schoon zijn, niet alleen in de testfase, maar ook tegen het einde van de levensduur.
6. De systeemoptie is duurder, dus moeten mensen met lagere inkomens zich meer onttrekken om in een auto te kunnen rijden. Er zijn geen compenserende maatregelen verondersteld.
7. In sommige zonnrijke landen gaan het BBP en de werkgelegenheid omhoog, in sommige olierijke (ontwikkelings)landen dalen deze. In veel landen worden de kosten hoger als deze systeemoptie wordt gerealiseerd, maar daar profiteren andere landen weer van, afhankelijk van de vraag waar de producenten zitten van (onderdelen van) CSP en brandstofcelauto. Wellicht is in bescheiden mate tuinbouw mogelijk onder schaduwbedende spiegels, ook gebruik makend van ontzilt water (zie noot 12).
8. Misschien is iets meer landgebruik nodig dan bij de oliewinning (zie DLR, 2005). Het landgebruik gaat niet ten koste van landbouw, bosbouw of bebouwing.
9. Stel dat CSP-installaties geplaatst worden in ongerepte woestijn met een natuurwaarde van 100%. Om verlies aan natuurwaarde te compenseren is een reductie van 10-30 ton CO₂ nodig (Ros en Montfoort, 2006 en daar aangehaalde literatuur: Ten Brink et al., 2002; Bakkenes et al., 2002; Leemans en Eickhout, 2004). Bij deze systeemoptie is sprake van een emissiereductie van ongeveer 250 ton CO₂/ha. Los daarvan geldt dat in woestijnachtige gebieden het aantal soorten vrij laag is. Oliewinning gaat ook gepaard met aantasting van biodiversiteit (denk aan olierampen op zee en vervuiling bij boorputten en leidingen (recente discussies over Alaska, Nigeria, etc).
10. Het landschap wordt aangetast door CSP. Olievelden vormen echter voor de meeste mensen ook geen fraai panorama. Bij het gebruik van hoogspanningsleidingen is wel sprake van ontsiering van het landschap.
11. Bij auto's die minder dan 25-40 km/uur rijden is het motorgeluid dominant. Een waterstofauto produceert geen geluid. Er is dus winst te behalen in 30 km-gebieden en bij kruispunten (stoppen en optrekken). Bij rondwegen is er geen effect.
12. Bij CSP is water nodig. De restwarmte van CSP biedt mogelijkheden voor ontzilting van zeewater als de installatie niet te ver van de kust ligt (onder andere Knies, 2006).
13. Bij sommigen bestaat vrees voor het gebruik van waterstof met vooral in het achterhoofd de brand van de Hindenburg Zeppelin. Ondanks het feit dat de brand niet zozeer veroorzaakt werd door de waterstof, maar door het brandbare materiaal, is het beeld van waterstof als gevaarlijk gas blijven bestaan. Anderen wijzen erop dat het gas al jaren lang probleemloos wordt gebruikt in diverse industriële processen. Dit is echter geen reële vergelijking. Er wordt van uitgegaan dat in de eindsituatie waterstof veilig gebruikt kan worden (Versloot, 2006). Passagiers van de waterstofbussen in Amsterdam (en omwonenden van de routes) hebben er overigens geen problemen mee (Klein Wolt et al., 2005).
14. De overgang van olie naar waterstof uit hernieuwbare bronnen verhoogt de diversiteit in het aanbod van brandstoffen en brengt een vermindering mee van afhankelijkheid van olielanden. Wanneer de elektriciteit/waterstof geproduceerd wordt in een groot aantal landen rond de Middellandse Zee, wordt de voorzieningszekerheid verhoogd.

Drie ecologisch relevante onderwerpen krijgen hier een nadere beschouwing: efficiency, broeikasgassen en landgebruik. Op de kosten wordt in hoofdstuk 4 en 5 uitgebreid ingegaan. Er zijn zogenaamde well-to-tank- en well-to-wheel-analyses toegepast (zie De Visser et al., 2006) om de verschillende varianten onderling te vergelijken en deze te leggen naast de referentie en de plug-in hybride.

Efficiency en energiegebruik

Er moet onderscheid gemaakt worden in brandstof-efficiency (well-to-tank) en voertuig-efficiency (tank-to-wheel). Een benzinemotor heeft nu een brandstof-efficiency van 88% en een voertuig-efficiency van 16%. Een brandstofcelauto zal waarschijnlijk een voertuig-efficiency bereiken van meer dan 40%. In de berekeningen bij deze systeemoptie is uitgegaan van een hybride-brandstofcelauto die een voertuig-efficiency heeft van 50%, door toevoeging van extra batterijcapaciteit (CONCAWE 2006 in: De Visser et al., 2006). Verder is verondersteld dat de referentie, een Europese middenklasser met benzinemotor, in de eindsituatie 20% zuiniger zal zijn. De brandstof-efficiency bij de brandstofcelauto verschilt per onderzochte waterstofvariant. Bij de drie varianten die in hoofdstuk 2 zijn beschreven, treden op verschillende punten verliezen op, bijvoorbeeld bij het maken van waterstof uit elektriciteit of het vervoer van waterstof en elektriciteit. Veel van de informatie die voor de berekeningen is gebruikt, is afkomstig van een recente, gezaghebbende CONCAWE studie (CONCAWE 2006) en staat beschreven in De Visser et al., (2006).

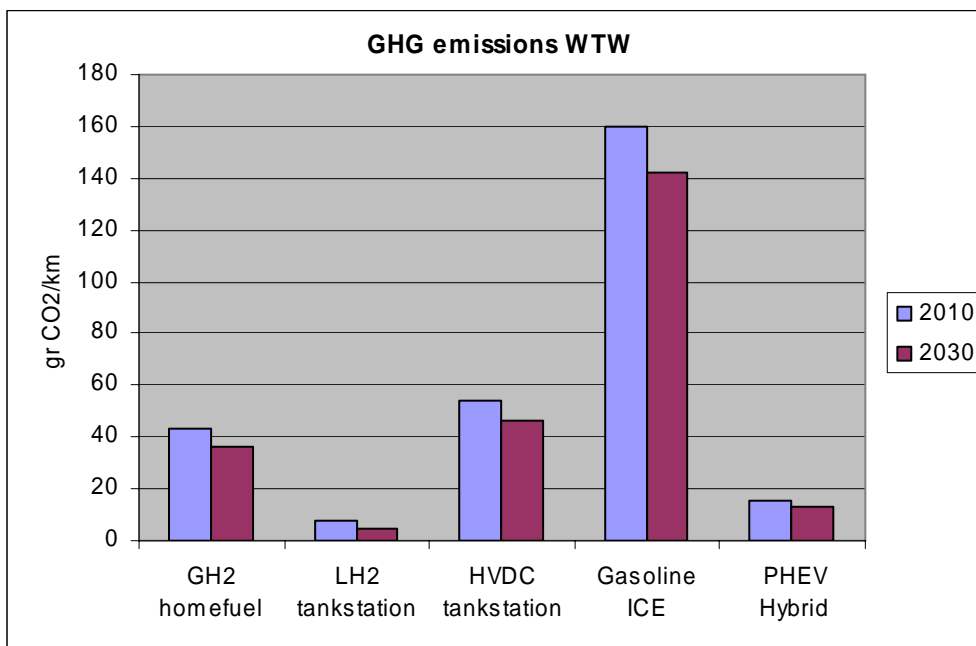


Figuur 3.1 Well-to-wheel efficiency bij drie brandstofcelautovarianten, de plug-in hybride en de benzineauto.

Wat de well-to-wheel efficiency (Figuur 3.1) betreft scoren alle alternatieven beter dan de referentie. Vooral de vloeibare-waterstofvariant scoort hoog. Er wordt hierbij van uitgegaan dat verliezen van waterstof op de waterstoftanker gebruikt kunnen worden voor de voortstuwing. De plug-in hybride scoort iets beter dan de referentie (De Visser et al., 2006).

Broeikasgassen

De bouw van een CSP-centrale en de infrastructuur (leidingen) leidt tot de emissie van broeikasgassen. De exploitatie van een CSP-installatie brengt slechts verwaarloosbare hoeveelheden broeikasgassen met zich mee (Figuur 3.2). Bij het maken van waterstof bij de CSP-installatie is verondersteld dat de elektriciteit benodigd voor elektrolyse, compressie en het vloeibaar maken, van de installatie zelf afkomstig is en dus nauwelijks broeikasgassen met zich meebrengt. Voor de elektriciteit die daarna in Europa nodig is voor de verschillende varianten van de systeemoptie, bijvoorbeeld bij het transport of bij de elektrolyse bij tankstations, is gerekend met een zgn. EU-15 mix - 389 gr CO₂/kWh (IEA, 2005).



Figuur 3.2. CO₂-emissies bij de drie brandstofcelautovarianten, de plug-in hybride en de benzineauto. Bij de LH2-variant wordt energie voor het vloeibaar maken van waterstof uit (nul CO₂-emissie) CSP betrokken.

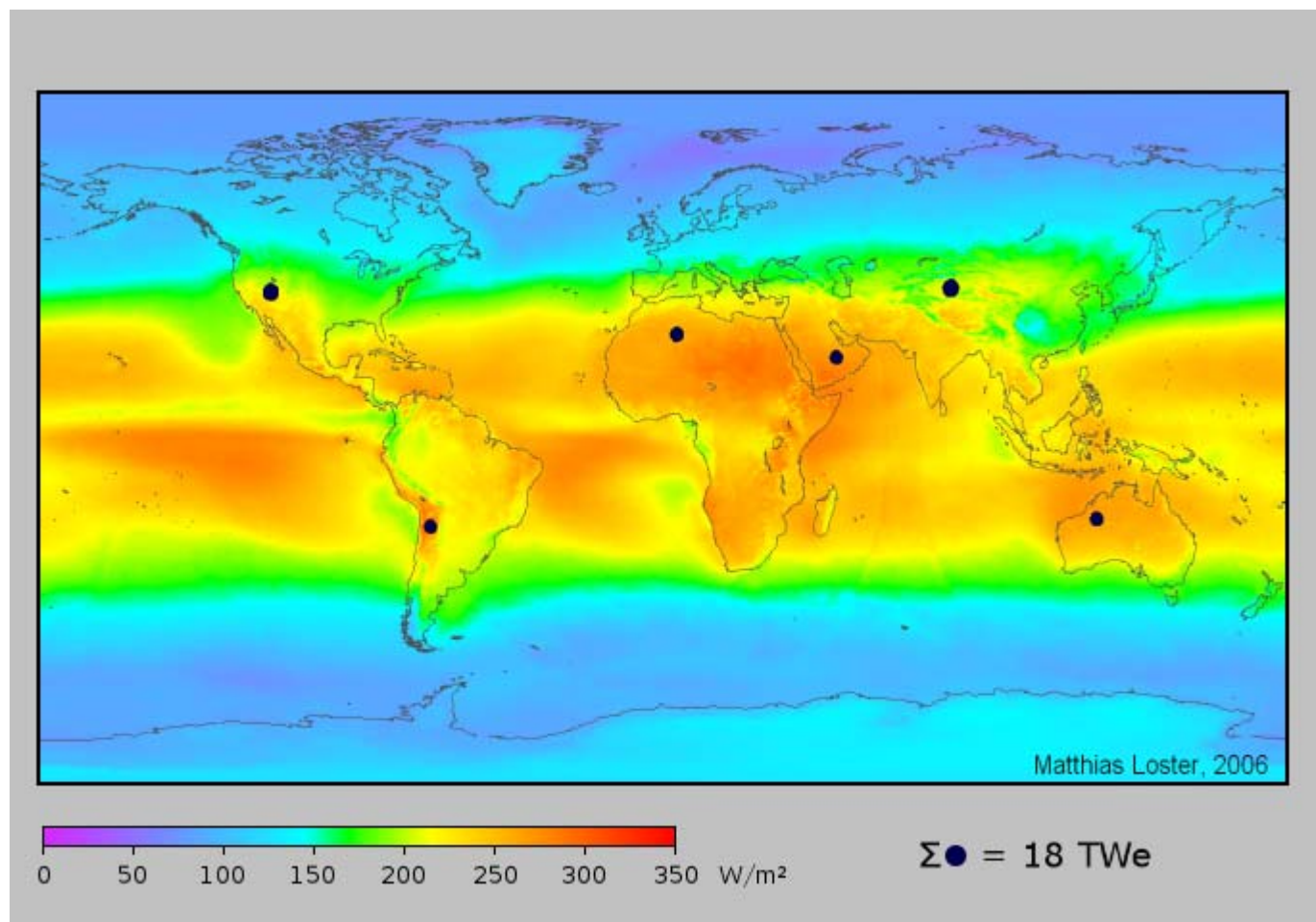
De waterstofvarianten laten een drastisch lagere emissie zien van broeikasgassen vergeleken met de referentie. De vloeibare-waterstofvariant laat de laagste emissie zien. Wanneer bij het vloeibaar maken van waterstof gerekend wordt met de EU-15 mix voor elektriciteit in plaats van CSP-elektriciteit, dan zijn de verschillen met de andere waterstofvarianten minimaal. De plug-in hybride geeft in dat geval trouwens de laagste emissie - gebaseerd op ethanol uit Braziliaans suikerriet en elektriciteit afkomstig van CSP (De Visser et al., 2006). Merk echter op dat ethanol uit Braziliaans suikerriet de variant voor bio-ethanol is met de laagste broeikasgasemissie over de keten (met in Europa geproduceerde bio-ethanol liggen de emissies hoger).

Het wegverkeer draagt voor ongeveer 15% bij aan de uitstoot van broeikasgassen. Met deze systeemoptie zou een reductie van deze emissie van 70-95% bereikt kunnen worden wanneer alle voertuigen op waterstof, verkregen uit zonne-energie, zouden rijden.

De energiesector in Nederland emitteert meer dan 25% van de broeikasgassen. Bij import van elektriciteit afkomstig van CSP voor alle toepassingen van elektriciteit, zou – met bijna 100% reductie ten opzichte van fossiele elektriciteit – al ruim de helft van de Nederlandse klimaatdoelstelling worden bereikt.

Landgebruik

Voor CSP is land nodig, maar de arealen zijn redelijk beperkt. Illustratief is de volgende figuur van Loster. De intensiteit van de zonne-instraling is mede bepalend voor het benodigde oppervlak voor een bepaalde productie. Figuur 3.3 laat zien dat alle energie in de wereld (niet alleen elektriciteit) geproduceerd zou kunnen worden met CSP op een oppervlakte die overeenkomt met de zwarte stippen.



Figuur 3.3. Verschillen in zonintensiteit en omvang van CSP-productie nodig om de wereldenergievraag te dekken (weergegeven door de zwarte stippen): Matthias Loster http://www.loster.com/ml/solar_land_area/

Bij CSP wordt vooral ruimte gebruikt voor de spiegels. Gerekend wordt met 6000 GJ/ha.jaar aan elektriciteit (De Visser et al., 2006). Als voor een inschatting van het benodigde oppervlak voor deze systeemoptie wordt uitgegaan van 20% penetratie van brandstofcelauto's in 2030 in Nederland, dan is, afhankelijk van de efficiency van de varianten, voor waterstof 29 tot 35 km² land nodig. Bij een verderweg in de tijd gelegen penetratie van 100% zou het gaan om ongeveer 150 km². Voor de plug-in hybride zijn al bij een penetratiegraad van 20% enkele honderden km² (vooral voor de bio-ethanol) nodig (zie De Visser et al., 2006; Hamelinck en Hoogwijk, 2006; Ros en Montfoort, 2006).

4 Resultaten van activiteiten in de voorontwikkelingsfase

In dit hoofdstuk wordt eerst ingegaan op de perceptie bij actoren van de problemen waarvoor deze systeemoptie (mede) een mogelijke oplossing zou kunnen zijn. Vervolgens wordt nagegaan of er een gezamenlijke toekomstvisie ontstaat bij belanghebbenden. In de paragrafen 4.3 en 4.4 wordt ingegaan op R&D-inspanningen in de afgelopen jaren en uitgevoerde experimenten. Tot slot wordt in paragraaf 4.5 gezien welke samenhang er is in de activiteiten in de voorontwikkelingsfase van het transitieproces.

4.1 Ontwikkelen van probleemperceptie

Deze systeemoptie bergt oplossingen in zich voor verschillende problemen.

- **Lokale luchtverontreiniging:** eind jaren 1980 was het smogprobleem in Californië zo groot dat zeer stringente wetgeving werd geïntroduceerd. Andere staten hadden plannen om Californië te volgen. Autofabrikanten namen het serieus en richtten zich op de elektrische en de brandstofcelauto.
- **Klimaat:** in de jaren 1990 is men zich wereldwijd in meer of mindere mate zorgen gaan maken over klimaatverandering. Hoe langer hoe meer is het idee ontstaan dat de waterstofeconomie in de toekomst de oplossing zou moeten brengen, waarbij de energie uit niet-fossiele bronnen zou moeten komen.
- **Voorzieningszekerheid:** de laatste jaren maakt men zich - met name in de Verenigde Staten, maar in toenemende mate ook in Europa - zorgen over de afhankelijkheid van olie, gekoppeld aan het gegeven dat veel olie uit enkele politiek instabiele landen afkomstig is. Daar komt nog de discussie bij over de sterk toegenomen vraag uit bijvoorbeeld China en India en het gegeven dat de olie vroeg of laat 'op' is of zeer moeilijk winbaar (de zgn. Peak Oil-discussie).
- **Geluidshinder:** een punt van zorg voor velen is de geluidshinder veroorzaakt door het verkeer. Met name in stedelijke gebieden (en steeds meer mensen wonen in stedelijke gebieden) zouden de brandstofcel- (en elektrische) auto tot een vermindering van geluidshinder kunnen leiden.
- **Armoedebestrijding en ontwikkeling:** nogal wat mensen zien in CSP een mogelijkheid om energie te produceren (en bijvoorbeeld water te ontzilten) in zonnige ontwikkelingslanden en daarmee bij te dragen aan de vermindering van de armoede aldaar.

4.2 Ontwikkelen van een gezamenlijke toekomstvisie

Het is helder dat de systeemoptie bij kan dragen aan het oplossen van een aantal problemen, maar is ook sprake van de vorming van een gemeenschappelijke toekomstvisie?

Voor een juist begrip van de merites van de systeemoptie is het goed wat verder terug te gaan in de tijd. Eerst wordt ingegaan op mondiale ontwikkelingen, daarna op de bijdrage van de EU en Nederland. Gemakshalve wordt een onderverdeling gemaakt in de ontwikkeling van de brandstofcelauto en waterstof enerzijds en CSP anderzijds. Over het systeem als geheel is nog maar weinig in concrete visies neergelegd (De Visser et al., 2006; Kramer et al., 2006).

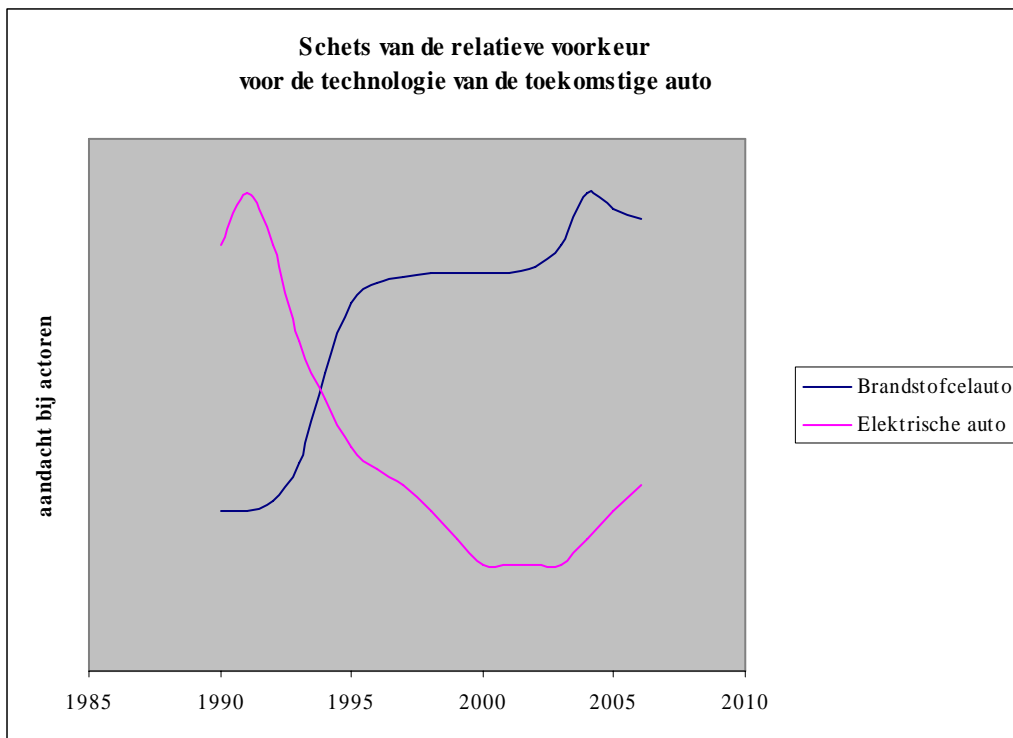
4.2.1 Brandstofcelauto en waterstof

In 1990 werd in Californië de zogenaamde Zero Emissions-wetgeving geïntroduceerd. De overheid eiste dat de industrie ervoor zou zorgen dat in 2003 10% van de verkochte auto's nul-emissieauto's zouden zijn. In eerste instantie werd daarbij door de industrie gedacht aan elektrische auto's. Geleidelijk ontstond bij autofabrikanten en brandstofcelmakers het idee dat brandstofcelauto's op een termijn van 10 tot 20 jaar wel eens betere mogelijkheden zouden kunnen bieden vanwege een hoge efficiency, een groot vermogen, hoge actieradius, snel tanken en de potentie van onafhankelijkheid van fossiele bronnen (Van den Hoed, 2004). Na 1996 ontstond een toenemend geloof, niet alleen in de VS, maar ook in Europa en Japan, dat brandstofcelauto's de toekomst hadden. Van belang werd nu ook de vraag naar een waterstofinfrastructuur. Oliemaatschappijen raakten geïnteresseerd. Tezelfdertijd verdween het geloof in de elektrische auto waarvan de meeste autofabrikanten een model op de markt hadden gebracht (te zwaar, te korte actieradius, te lastig om op te laden). Na 2002 ontstond bij actoren het beeld dat op termijn brandstofcelauto's levensvatbaar zouden zijn. Het ging er vooral om de kosten te reduceren. Het paste ook goed bij ideeën over een toekomstige waterstofeconomie. Zorg rond de voorzieningszekerheid van energie en de afhankelijkheid van olie gaf een nieuwe impuls aan onderzoek naar de brandstofcelauto. Niettemin waren er ook kritische geluiden over de efficiency van de waterstofketen (bijvoorbeeld Weiss et al., 2003). De kosten blijven voorsnog hoog. Nieuwe verbrandingsmotoren worden ook hoe langer hoe schoner, althans wat betreft NO_x en PM₁₀, nauwelijks wat betreft CO₂. Sommigen in de milieubeweging en de industrie zien investeringen in R&D als window dressing en een manier om emissie-regulering te vertragen. Zij vinden ook dat de auto-industrie te weinig heeft gedaan om de elektrische auto echt op de markt te krijgen. Ondanks deze kanttekeningen blijft een krachtig langetermijnbeeld van brandstofcelauto's en waterstof (uit hernieuwbare energie) bestaan (De Visser et al., 2006). Het *White Paper* van de EU, maar ook bijvoorbeeld Shell, ziet de brandstofcelauto als iets voor de zeer lange termijn (en daarvoor biobrandstoffen, aardgas en schoon fossiel).

Ook de inmiddels geïntroduceerde hybride-auto heeft echter aantrekkelijke kanten. Zo ontstaat de laatste tijd bij sommigen het idee dat de opkomst van nanotechnologie en recent gerealiseerde doorbraken bij accuproducten zouden kunnen zorgen voor een nog veel grotere efficiency van hybride-auto's en misschien wel plug-in hybrides. Recente

persberichten van Toyota, research van het Amerikaanse EPRI (Electric Power Research Institute), artikelen in het EZ-tijdschrift *TWA nieuws* 7-7-06, etc. wijzen ook op het laatste.

In Figuur 4.1 wordt kwalitatief weergegeven hoe in de loop van de tijd tegen de toekomstige mogelijkheden van de elektrische auto en de brandstofcelauto werd aangekeken.



Figuur 4.1. Schets van de relatieve voorkeur van de brandstofcelauto en de elektrische auto.

De Nederlandse overheid laat in het NMP4 mogelijke eindbeelden zien, waarbij zowel de accu-auto als de brandstofcelauto als voorstelbaar worden geschetst (VROM, 2001). In het Nationaal Verkeers- en vervoersplan (*Van A naar Beter*) uit 2001 wordt gesteld dat klassieke verbrandingsmotoren worden geoptimaliseerd en nieuwe aandrijfsystemen, zoals brandstofceltechnologie, beschikbaar komen. Formeel is deze nota overigens door de Tweede Kamer afgewezen, maar dat was niet vanwege deze passages. Indachtig het oudste Nederlandse spreekwoord: 'wee de muis die slechts één gaatje kent' (Van Oostrom, 2006), kiest de *nota Mobiliteit* uit 2005 niet voor één technologische route, maar stuurt aan op einddoelen.

4.2.2 CSP

Dankzij de oliecrises van de jaren 1970 ontstaat in de jaren daarna in verschillende landen het idee dat zonthermische krachtcentrales een rol kunnen spelen bij de toekomstige energievoorziening. Tussen 1984 en 1991 worden in Californië negen installaties gebouwd. In de periode 1991-2000 komen daar geen installaties meer bij, vanwege lage olieprijs, liberalisering van de elektriciteitsmarkten en het ongedaan maken van fiscale voordelen. Ondanks daling van de kosten van zonne-energie bleven deze hoger dan die van conventionele energie. Na 2000 ontstaat weer hernieuwde interesse in de VS en verder ook in de EU, met name in Spanje en Duitsland. Zonrijke en windrijke gebieden zouden elkaar kunnen aanvullen. Meer recent speelt ook het argument van de voorzieningszekerheid.

In Nederland is eigenlijk alleen de Stichting ter bevordering van Grootschalige Exploitatie van Zonne-energie (GEZEN) de laatste jaren actief op dit gebied. In maart 2006 heeft de Algemene Energieraad er bij de Nederlandse overheid op aangedrongen CSP in zonrijke ontwikkelingslanden te bevorderen, hetzij bilateraal, hetzij op Europese schaal. Het antwoord van de minister van Economische Zaken luidde (onder meer) dat de CSP-technologie kansrijk geacht wordt in die gebieden, evenals op langere termijn bijvoorbeeld PV. De Nederlandse overheid wil geen keuze maken voor een technologie. Nederlandse bedrijven zijn ook niet actief in de productieketen. Als marktpartijen geïnteresseerd zijn, zouden donorlanden, waaronder Nederland, eventueel financieel kunnen bijspringen (brief minister van EZ, 16 mei 2006). Zeer recent is er vanuit de Nederlandse overheid interesse getoond in een CSP-project in Algerije (Stromen, 23 juni 2006). Tot slot kan hier worden opgemerkt dat in het Energietransitieactieplan van mei 2006, CSP niet wordt genoemd.

De optie van CSP voor de elektriciteitsvoorziening in vele landen van Europa betekent dat er transport over lange afstanden, soms over zee, nodig is. Met het opzetten van een netwerk voor gelijkstroom (DC) kan hierin worden voorzien. Voorzover studies naar deze optie voor de elektriciteitsvoorziening zijn uitgevoerd, wordt dit als de meest voor de hand liggende keuze genoemd. Ook andere grootschalige, duurzame opties, zoals windparken op zee en biomassacentrales, zouden aan zo'n Europees DC-netwerk kunnen worden gekoppeld (DLR, 2005).

4.3 Research & Development

Heeft de toegenomen aandacht voor brandstofcelauto's en CSP geleid tot meer R&D?

4.3.1 Brandstofcelauto en waterstof

Vóór 1990 werd eigenlijk alleen onderzoek gedaan naar brandstofcellen voor stationaire toepassingen en voor de ruimtevaartindustrie. Gesponsord door nationale overheden en autofabrikanten gingen brandstofcelfabrikanten tussen 1990 en 1996 aan de slag met verbetering van de (onderdelen van) brandstofcellen. In 1996 hebben alle belangrijke autofabrikanten een uitgebreid onderzoeksprogramma of een werkend prototype van de

brandstofcelauto (Van den Hoed, 2004). Er zijn kleine verschillen in brandstof (meest waterstof), soort brandstofcel (meest PEM) en de mate van hybridisering (De Visser et al. 2006). In de periode 1997-2001 vindt een sterke toename van R&D-activiteiten plaats. Het gaat hierbij niet alleen om de brandstofcel, maar ook om de aanvullende technologie daaromheen en om de opslag en het vervoer van waterstof. Het betreft zowel fundamenteel onderzoek als toepassingen. Ook vindt veel onderzoek plaats naar reforming (waterstof uit vloeibare fossiele brandstoffen) als tussenstap naar een volledige waterstofinfrastructuur (Van den Hoed, 2004). Na 2002 wordt R&D meer toepassingsgericht. Brede programma's worden wereldwijd uitgevoerd door brandstofcelabrikanten, de auto-industrie, technologische instituten en universiteiten, gesteund door overheden in VS, EU en Japan (De Visser et al., 2006). Het bruist van activiteiten (Hoogma, 2003).

Illustratie van ontwikkelingen aan de PEM-brandstofcel

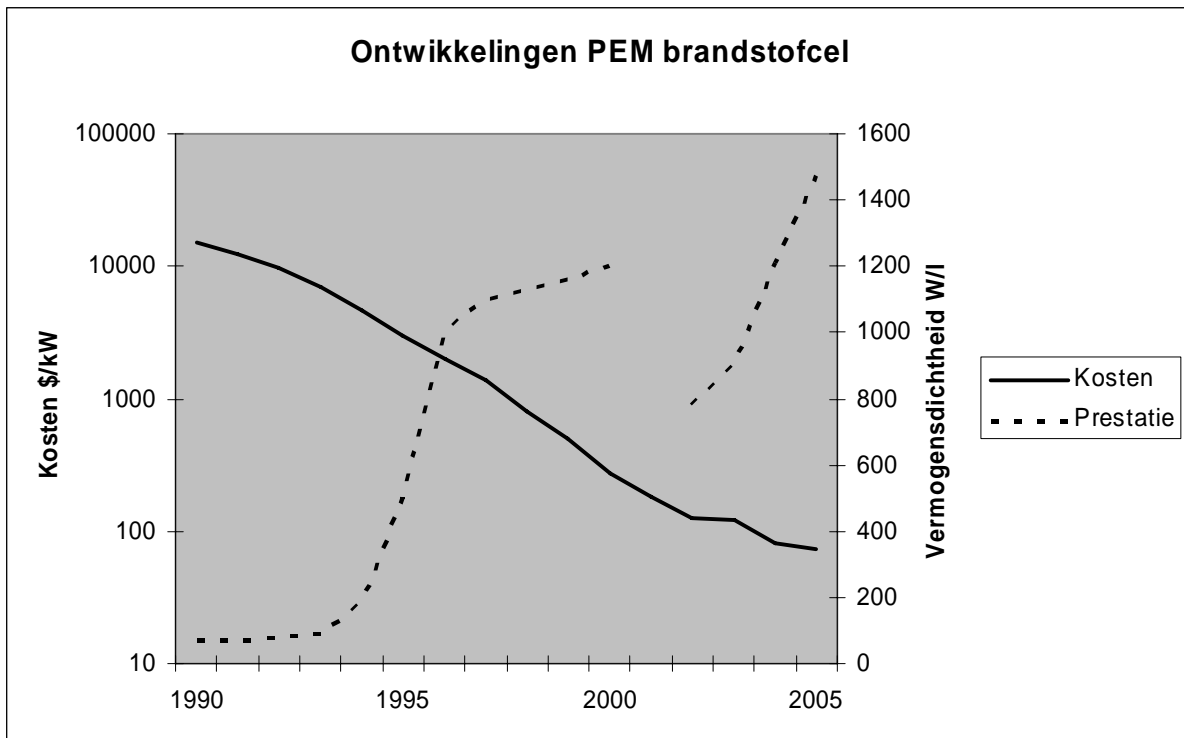
Ontwikkelingen voor brandstofcellen zijn er op vele plaatsen. Om een indruk te geven van de daadwerkelijke ontwikkelingen zijn enkele resultaten, zoals gemeld door het Canadese Ballard Power Systems (marktleider die brandstofcellen in 2010 marktrijs wil krijgen), gepresenteerd.

- *Vermogensdichtheid nam tussen 2002 en 2005 met 90% toe (een verbetering met nog eens 70% ten opzichte van dat resultaat is door het bedrijf als doel gesteld).*
- *De levensduur is tussen 2002 en 2005 met een factor 10 toegenomen; men streeft naar nog een factor 2,5.*
- *Voor de koude start heeft het bedrijf als doel bij -30 °C binnen 30 seconden op 50% vermogen te zitten; voor temperaturen tot -20 °C is dat gehaald en voor -25 °C zit men op 90 sec.*
- *De kosten zijn tussen 2002 en 2005 met 40% omlaag gegaan tot 73 \$/kW; men streeft naar 30 \$/kW (berekend op basis van productie van 500.000 eenheden).*

Er ontstaat consensus binnen de olie- en auto-industrie dat reforming niet de meest geschikte route is en de aandacht richt zich op het opzetten van een waterstofinfrastructuur.

Kostendaling wordt de belangrijkste uitdaging bij waterstof en de brandstofcelauto (Hoogma, 2003; Luzzi en Bonadio, 2004; NFCRC, 2006). Het gaat dan om verbetering van katalysator, membraan, hogere energiedichtheid, langere levensduur en bestand zijn tegen bevroering (water!). Thijssen kwam in 2002 uit op een 40% hogere kostprijs van de auto (Thijssen, 2002). Vooral door kosten van katalysator (edelmetaal), membraan, bijkomende apparatuur en de brandstoftank. Hoogma stelt in 2003: 'Volgens projecties is het prijsverschil (van brandstofcelauto's) op den duur weg te nemen, maar de vraag is hoe in de beginfase bij laag productie-volume de kostenbarrière genomen wordt'.

Een brandstofcelauto kost 1 miljoen euro; je leest hem al voor 10.000 euro/maand! (Haug, 2004). Maar dit zijn natuurlijk geen reële cijfers. Daarom worden de (reducties in de) kosten vaak weergegeven als de inschatting van de kosten bij grote volumina (enkele honderdduizenden exemplaren, zie Figuur 4.2 en bovenstaande tekstbox).



Figuur 4.2. Illustratie van vorderingen bij Ballard qua vermogensdichtheid en kosten van de brandstofcel (Kalhammer, 1998 in: Van den Hoed, 2004; Fitzgibbons, 2005; Ballard, 2006). De referenties zijn bij de vermogensdichtheid niet consistent.

De vorderingen zijn indrukwekkend, maar de laatste loodjes wegen het zwaarst. Het IEA schatte eind 2004 de 'high volume costs' op \$300-350/kW. Ballard kwam in 2005 tot \$73/kW voor haar eigen brandstofcel. Om qua kosten vergelijkbaar te zijn met een verbrandingsmotor moet men uitkomen op 30\$/kW.

Kostenschattingen worden in het algemeen bemoeilijkt door beperkte kennis over welke componenten in de berekeningen zijn meegenomen (van alleen de brandstofcel tot de hele aandrijving). Overigens gaat naar schatting 1-2% van R&D in de auto-industrie naar brandstofceltechnologie.

Bij het IEA wordt gewerkt in het kader van de Fuel Cell Implementing Agreement (www.ieafuelcell.com). De EU heeft een High Level Group on Hydrogen and Fuel Cells geïnstalleerd die leidde tot het European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform. Daarnaast is er bijvoorbeeld een European Network on Excellence HySafe 'Safety of Hydrogen as an Energy Carrier', dat zich bezighoudt met veiligheidsvraagstukken rond waterstof.

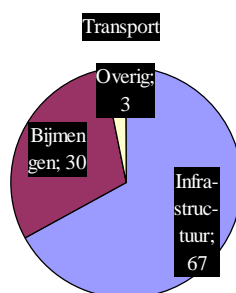
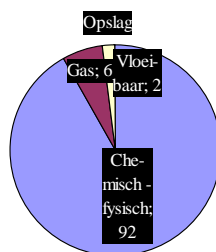
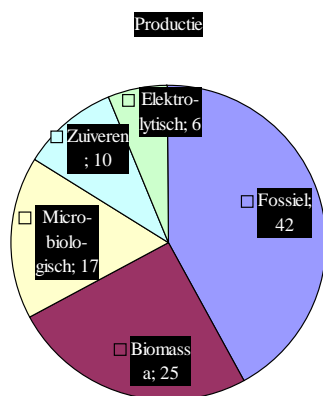
In Nederland vindt onderzoek plaats naar onderdelen van de systeemoptie bij verschillende bedrijven, mogelijk gemaakt door programma's van het IEA, de EU en EZ. Diverse programma's worden gecoördineerd door SenterNovem, zoals GAVE, EET en Stil, Schoon en Zuinig.

Verdeeld over productie, opslag, transport en gebruik ging in 2003 in Nederland het meeste geld voor R&D naar onderwerpen rond de productie van waterstof. Hiervan ging ongeveer

40% naar fossiele grondstoffen (zie Figuur 4.3). Van de gelden voor R&D was ruim 30% afkomstig van de Nederlandse overheid en ruim 10% van de EU.

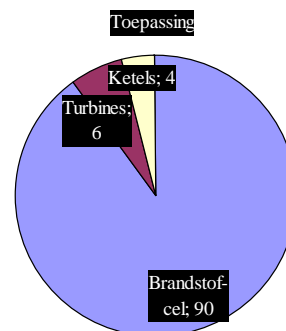
Waterstof

R&D gelden in Nederland in 2003



Beleidssteun:

Nederland 32%
EU 12%



Figuur 4.3. Verdeling van R&D-gelden voor onderzoek in Nederland naar de waterstofketen.

Uit (OECD/IEA, 2004) valt af te leiden dat, vergeleken met veel andere landen, Nederland behoorlijk wat geld besteedt aan R&D voor brandstofcellen en waterstof. De overheidsbijdrage is hoger dan gemiddeld.

Ontwikkelingen rond de elektrische auto

De toekomst van de brandstofcelauto is niet los te zien van de ontwikkelingen bij de hybride-auto en de elektrische auto. Een auto met elektrische aandrijving werkt heel efficiënt, maar het gewicht van de accu en de daarmee verband houdende actieradius en de lange oplaadtijd vormen de grootste problemen. De afgelopen jaren is er op diverse punten verbetering bereikt.

Een kort overzicht van verbeteringen aan de accu (USABC, 2006):

- *Vermogensdichtheid / specifiek vermogen + 22% (tussen 1999 en 2003)*
- *Levensduur verlengd van 7 tot >10 jaar (tussen 2000 en 2004)*
- *Aantal cycli vergroot tot 300.000 (25 kW-systeem) en 1.000.000 op celniveau.*
- *Prijs van 25 kW-systeem verlaagd van \$70/kW naar \$48/kW tussen 1999 en 2003.*

In Amerika is een aantal sportwagenfabrikanten druk in de weer om elektrische sportwagens in de markt te zetten. De combinatie van een hoog acceleratievermogen en een groen imago doet het goed in Silicon Valley.

4.3.2 CSP

Vóór 1980 ontstonden honderden concepten van CSP. Het leek erop dat ieder concept met een krachtige pleitbezorger, in ieder geval in het stadium van prototype en pilot, een kans kreeg zich te bewijzen (De Visser et al., 2006). Slechts enkele concepten bleken levensvatbaar. R&D richtte zich in de tachtiger en negentiger jaren op effectiviteit en kosten van spiegels, constructies, absorptiemiddel, opslagmedium en dergelijke. In Spanje werd in 1981 het Plataforma Solar de Almeria (PSA) opgericht. Negen Europese landen doen mee onder de paraplu van het IEA. Vooral Spanje en Duitsland zijn actief. Nederland doet hierin niet mee. In 1990 werd het PSA door de Europese Commissie als een 'Large-Scale European Research Facility' geassocieerd en werd in de verschillende kaderprogramma's ook R&D-geld beschikbaar gesteld. Sinds de oprichting van het PSA is het een belangrijke toegang voor internationale samenwerkingsprojecten. Het IEA kent de SolarPACES agreement en het bijbehorende netwerk.

Diverse Europese landen hebben R&D-activiteiten, met name Spanje en Duitsland, maar ook België, Frankrijk, Italië en Zwitserland (De Visser et al., 2006).

4.3.3 CSP en brandstofcellen

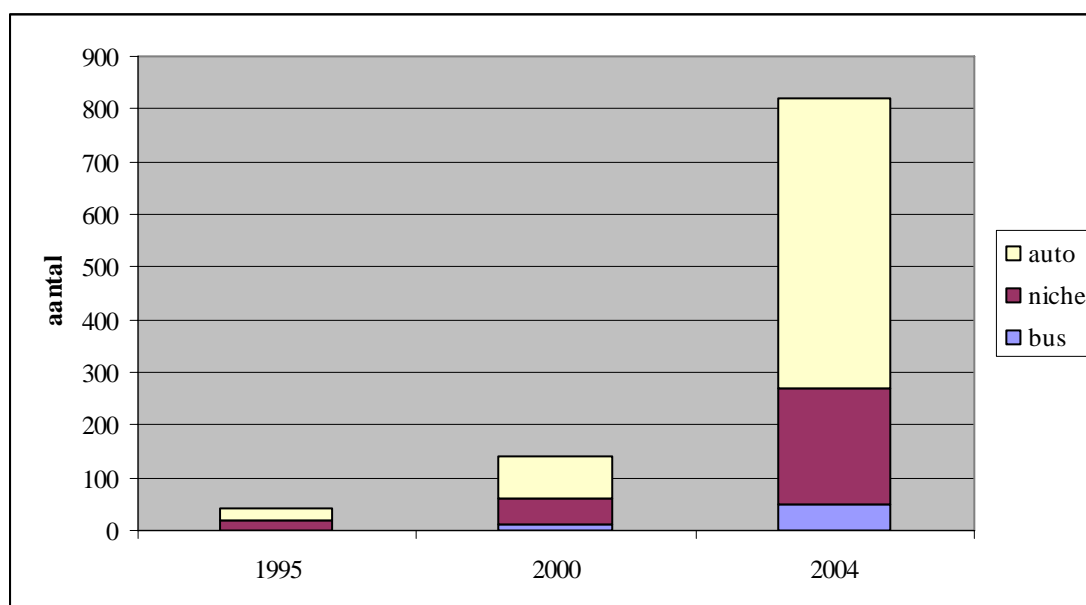
Specifieke onderzoeksprojecten die te maken hebben met links in de keten zijn er weinig. Een voorbeeld is het onderzoek dat gaande is naar CSP waarbij met de energie (direct uit warmte en niet via elektriciteit) via thermo-chemische reacties waterstof geproduceerd kan worden (EU Hydrosol en SOLHYCARB-projecten) (De Visser et al., 2006).

4.4 Experimenten in de praktijk

In hoeverre is de stap gezet van R&D naar experimenten in de praktijk?

4.4.1 Brandstofcelauto en waterstof

Ballard kwam in 1991 met een prototype van een brandstofcelbus. Verschillende autofabrikanten kwamen midden jaren 1990 met prototypes van brandstofcelauto's. Gewicht, volume en kosten bleken nog grote barrières op te leveren, maar de vooruitgang was voldoende om R&D-activiteiten uit te breiden. Uiteindelijk waren er in 2004 ruim 800 voertuigen gedemonstreerd (Figuur 4.3). Veel fabrikanten hebben nu auto's op de weg, overwegend voor duurproeven en demonstratiedoeleinden.



Figuur 4.3. Experimenten met voertuigen op waterstof.

Nederland kent een aantal waterstofbussen in Amsterdam en demonstratiemiddelen als een kart (Formula Zero), een waterstofauto (ECN) en een waterstofsloep (Ecofys en anderen).

Wereldwijd wordt ook geëxperimenteerd met het opzetten van (ketens van) tankpunten voor H₂. Waterstof is voornamelijk afkomstig van conventionele industriële bronnen. Shell Hydrogen speelt hierin een rol. De prijs van waterstof zal heel belangrijk blijken. Bij een te hoge prijs (bijvoorbeeld door te veel stations met te weinig auto's) worden er geen brandstofcelauto's gekocht. In 2003 is het eerste waterstofstation in Reykjavik geopend. Daarna zijn experimentele tankpunten geopend in verschillende andere Europese steden, waaronder Amsterdam, als onderdeel van het Clean Urban Transport for Europe-programma. Buiten Europa wordt geëxperimenteerd in Australië, Noord-Amerika, Japan en China (de laatste eind 2006) (De Scheemaker, 2006). Bij de brandstofcelauto en de waterstofinfrastructuur bestaat een beetje het kip-en-eiprobleem. Daarom worden zogenaamde Lighthouse-projecten geïntroduceerd, waarin van stations voor enkele voertuigparken, stap voor stap wordt overgegaan naar geïntegreerde stations (High Level Group for Hydrogen and Fuel Cells-rapport, 2003). De grootste uitdaging is volgens De

Scheemaker de prijs, niet de techniek. Ook het publiek bekend maken met de waterstof-technologie is een belangrijke doelstelling (website Shell Hydrogen, 12-7-2006). In 2006 zijn wereldwijd meer dan 60 tankstations operationeel, het merendeel in VS en Japan en in mindere mate in Duitsland.

4.4.2 CSP

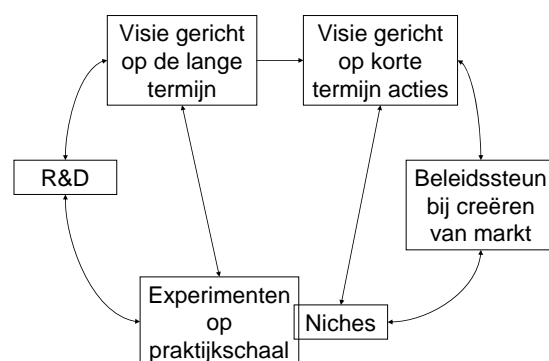
Er kwam een doorbraak bij CSP toen tussen 1984 en 1991 in de Amerikaanse Mojave-woestijn negen installaties van het trogtype werden gebouwd. Deze bedrijven zijn nog steeds operationeel. Daarnaast zijn ook twee CSP's van het torentype gebouwd, maar deze zijn slechts enkele jaren operationeel geweest. Schijftypes zijn vooral geschikt voor stand alone-toepassingen.

De Wereldbank heeft geld beschikbaar voor ondersteuning van de bouw van CSP-installaties in ontwikkelingslanden. Hier betreft niet complete CSP's, maar er is sprake van benutting van de zon aanvullend op conventionele centrales. De tendering verloopt langzaam, ook omdat het niet zo snel gegaan is in industriële landen, maar recent lijkt er schot in te zitten (De Visser et al., 2006).

Dankzij gunstige tarieven worden de laatste jaren in Spanje verschillende installaties gerealiseerd. De EU verleent financiële steun voor de pre-competitieve onderdelen. De projecten worden meer en meer geleid door industriële bedrijven in plaats van door onderzoeksinstituten, hetgeen erop wijst dat de CSP uit de R&D-fase komt (De Visser et al., 2006). Er zit voor ongeveer 1GW aan projecten in de pijplijn.

4.5 Samenhang activiteiten in de voorontwikkelingsfase

De samenhang van de hiervoor genoemde activiteiten wordt geanalyseerd aan de hand van bijgaand schema. Aan de linkerkant van het schema is de koppeling tussen visievorming, R&D en experimenten weergegeven, gericht op de lange termijn (LT-cyclus). Een versterkend effect op de ontwikkeling kan worden bereikt als de visie richting geeft aan R&D, waarvan de resultaten leiden tot praktijkexperimenten.



De leerervaringen van die experimenten leiden weer tot bijstelling, vaak concretisering van de visie, enzovoort. Aan de rechterkant van het schema is de visie meer gericht op concrete acties op de korte termijn (KT-cyclus). Er is dikwijls sprake van een lobby van enkele partijen om beleidssteun te verkrijgen en met die steun een gunstige marktsituatie gecreëerd te krijgen om niches in te richten. Het succes van een niche kan meer partijen ertoe brengen

mee te gaan in de vernieuwing. Idealiter zijn deze twee ‘innovatiemotoren’ gelinkt. De visie voor de lange termijn zou de basis moeten zijn voor de kortetermijnacties. Niches kunnen ook de rol van praktijkexperimenten invullen.

Hoe ligt dit voor de brandstofcelauto, waterstof en CSP? De samenhang in de ontwikkelingen wordt chronologisch geanalyseerd (met name in de VS, Europa en Nederland).

Brandstofcelauto en waterstof

Het was de smogproblematiek in Californië, die leidde tot de visie aldaar dat op de lange termijn auto's schoon moeten zijn. Het ‘zero-emission’-doel gaf in eerste instantie een impuls aan de elektrische auto. Maar R&D leidde niet snel tot grote verbeteringen in energiedichtheid. De LT-visie van vele partijen en vooral de autofabrikanten werd bijgesteld. De brandstofcelauto kwam meer in beeld, als zijnde veelbelovend op verschillende aspecten vergeleken met zowel de elektrische als de conventionele auto. Ook brak geleidelijk de gedachte door dat klimaateffecten verbonden aan fossiele energie groot zijn en dat waterstof uit niet-fossiele bronnen op de lange termijn de toekomst zou hebben.

Veel R&D werd gedaan, maar het werd hoe langer hoe duidelijker dat het een lange weg zou worden (een termijn van 15-20 jaar bleef genoemd worden). Toch was er genoeg vertrouwen om ook te gaan experimenteren met waterstofinfrastructuur. Dit leidde er wel toe dat in de KT-cyclus optimalisatie van de conventionele motor de boventoon bleef voeren en de normstelling ook daarop bleef afgestemd. ‘Zero-emission’-concepten kwamen daar niet in voor. De wetgeving in Californië werd aangepast aan zich wijzigende inzichten (verwatering/uitstel).

Met de elektrische auto ging het ondertussen bergafwaarts. Wel heeft vrijwel elke fabrikant een versie in productie gehad, maar de consument zag te veel nadelen en de auto-industrie is er ook niet echt voor gegaan om de nadelen weg te nemen. De hybride kwam op en vulde een niche, waarbij enkele praktische nadelen van de elektrische auto konden worden ondervangen. De hybride bood ook aanzienlijke efficiencywinst op een veel kortere termijn die paste bij de in Europa gemaakte vrijwillige afspraken met de auto-industrie. In Nederland is de introductie ondersteund met een korting op de BPM-regeling.

De aanslag van 11 september 2001 heeft voorzieningszekerheid van olie tot een veel belangrijker element in de problematiek gemaakt en nieuwe impulsen gegeven aan de visie op de brandstofcelauto (uitspraken Bush over de waterstofauto in State of the Union). Het onderzoek werd nog versterkt en er kwamen meer experimenten met waterstofvoertuigen en kleine stukjes infrastructuur. De LT-cyclus bleef daarmee draaien, ook in Nederland (onder meer experimenten met waterstofbussen zoals in Amsterdam). Dit leidde echter niet tot acties op systeemniveau op de korte termijn, die de brandstofcelauto dichterbij brengen.

De LT-cyclus voor de elektrische auto loopt ook door. R&D op gebied van nanotechnologie, maar ook op gebied van accu's voor mobiele apparatuur leidt de laatste jaren tot doorbraken die een (vrijwel) geheel elektrische auto toch weer dichterbij brengen. Bovendien biedt de

hybride de mogelijkheid om in de KT-cyclus eerste concrete stappen in die richting te zetten. Voor de brandstofcelauto is de auto met reformer (voor omzetting van benzine of diesel in waterstof in de auto) enige tijd als logische eerste stap op de korte termijn gezien, maar deze lijkt van de baan.

In de KT-cyclus gaat overigens de meeste aandacht uit naar de inzet van biobrandstoffen, maar de huidige aanpak is niet van belang als voorbereiding voor brandstofcelauto's. De voor biobrandstoffen geformuleerde beleidsdoelstellingen zetten zoveel acties in gang dat eerder de aandacht van alternatieven wordt afgeleid.

De olieprijs is een belangrijke factor in de kansen voor alternatieven. Een verandering in de olieprijs – naar beide kanten – verstoort de conventionele weg: van visie naar R&D naar experimenten (en terug). Brandstofefficiency is jarenlang het nummer-20-item van de automobilist geweest. Dat is nu anders, zeker in de VS waar vanwege de lage belastingen en accijnzen een procentuele verandering in de benzineprijs als gevolg van olieprijsstijging veel meer doorwerkt dan hier.

CSP

Nog duidelijker is het effect van de olieprijs te herkennen in de cyclus van CSP. De oliecrisis heeft CSP zeer snel van idee tot eerste grootschalige toepassing gebracht, aanvankelijk alleen in Californië, een land met investeringsmogelijkheden en zonnrijke gebieden. Verlaging van de olieprijs in de jaren 1990 leidde tot stagnatie in de bouw. De KT-cyclus stokte, want er werd niet meer geïnvesteerd, maar de LT-cyclus (R&D) ging op bescheiden schaal door. IEA speelde daarbij belangrijke rol. De LT-visie was dat met CSP eerder dan met PV tegen redelijke kosten hernieuwbare energie kon worden opgewekt.

De Wereldbank zag mogelijkheden voor sommige ontwikkelingslanden. Met name Spanje en Duitsland zagen ook mogelijkheden voor het bedrijfsleven. In die landen werd de LT-cyclus geïntensiveerd en vooral in Spanje leidde dit tot impulsen voor concrete acties in de praktijk, eerst om de wetgeving aan te passen voor gemakkelijke introductie van CSP en vervolgens met enkele installaties. Het is nu financieel aantrekkelijk genoeg om ze te exploiteren.

Ondanks enkele pleitbezorgers van CSP staat Nederland feitelijk buiten de ontwikkelingen rond deze technologie.

5 Motivatie voor daadwerkelijk systeemverandering

In de huidige situatie wordt de vraag of het tot introductie op praktijkschaal kan komen, volledig beheerst door de kosten. Daarom wordt de beschouwing daarop gericht. Specifieke stimulerende beleidsmaatregelen zijn er niet.

De kosten van deze systeemoptie worden vooral bepaald door de kosten van de brandstofcel (auto), de kosten van transport van waterstof of elektriciteit, de kosten van CSP en de efficiency van het brandstofgebruik.

Kosten voor de brandstofcelauto

De brandstofcelauto is nu uiteraard veel duurder dan de conventionele auto, maar veel experts verwachten dat de kostprijs bij voldoende seriegrootte gelijk zal worden aan die van de benzineauto (Wietschel et al., 2006; CONCAWE, 2006; L-B-Systemtechnik, 2006). Anderen zijn wat pessimistischer (Gielen en Simbolotti, 2005). De kosten van het rijden met de brandstofcelauto worden bepaald door de gehele keten, maar hangen dus vooral af van de kosten van waterstof en de efficiency.

Kosten voor CSP

In de Ecofys-studie is uitgebreid aandacht geschonken aan de kosten van CSP. Met behulp van het Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) is op verzoek van het MNP een review gedaan van een studie van het Amerikaanse National Renewable Energy Laboratory (NREL) uitgevoerd door Sargent en Lundy uit 2003. De kosten van energie bij de laatst gebouwde Amerikaanse CSP-installaties (rond 1990) bedragen 0,11-0,14 \$/kWh. De kosten van CSP zijn daarom op korte termijn nog aanzienlijk hoger dan de huidige kosten van elektriciteit uit fossiele bronnen en kernenergie (WLO, 2006), in de orde van 0,04 – 0,05 €/kWh. Dit verschil vormt een belangrijke barrière voor eerstvolgende stappen op het transitiepad. Zicht op de financiële middelen om dit te overbruggen ontbreekt vooralsnog.

De kansen van CSP hangen in sterke mate samen met verwachtingen over de ontwikkelingen van de kosten. Ecofys, Sargent en Lundy en DLR schatten dat de kosten van elektriciteit uit CSP in 2020 in de meest zonnrijke gebieden uit kunnen komen op 0,05 à 0,06 €/kWh. Daarbij wordt rekening gehouden met uitbreiding van productiecapaciteit, opschaling van installaties en technologische ontwikkeling. Het Amerikaanse SunLab komt wat lager uit (0,035-0,043 \$/kWh) (in: De Visser et al., 2006). De Energieraad gaat in haar Briefadvies uit van 0,045 €/kWh in 2020 (Algemene Energieraad, 2006). Voor Zuid-Europa wordt door Ecofys en DLR een kostenniveau van rond de 0,08 €/kWh geraamd. De opbouw van de verwachte kostenreductie bij Sargent en Lundy is gegeven in Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Verwachte kostenreductie (in %) bij CSP (2000-2020).

Technologie	Productievolume	Schaalgrootte	Technologie
Trog	26	20	54
Toren	28	48	24

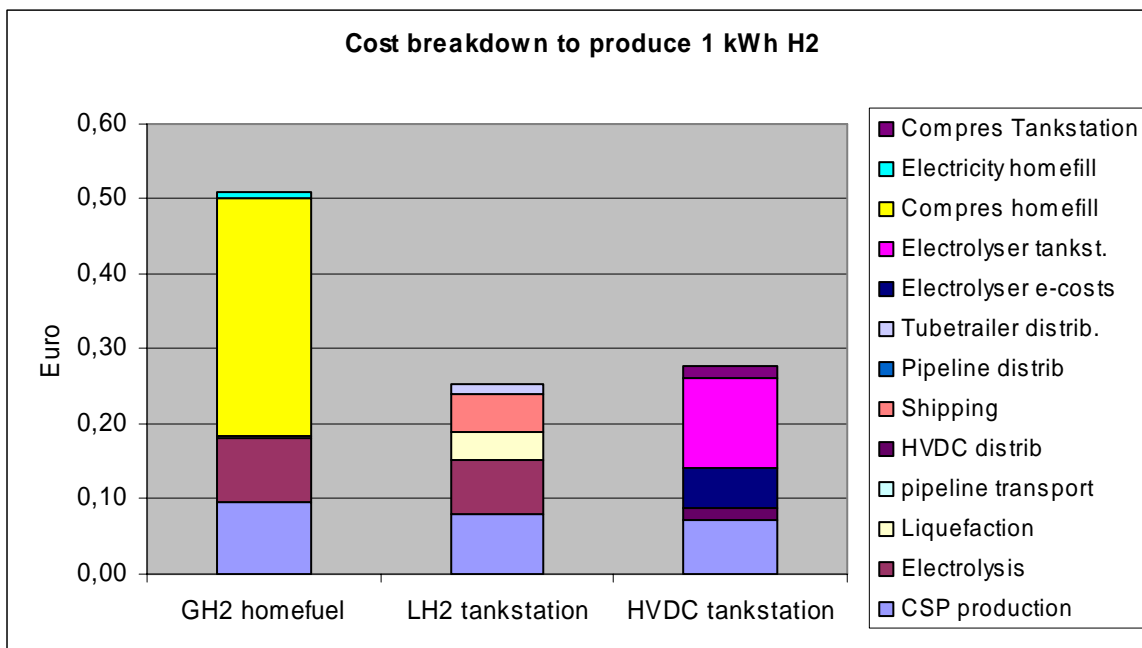
Sargent en Lundy (2003)

Indien de elektriciteit over grote afstand moet worden getransporteerd met een gelijkstroomnetwerk (HVDC), moet rekening worden gehouden met extra kosten van 0,01 €/kWh (Trieb, 2006). Naast kostenaspecten is bijvoorbeeld ook de institutionele inrichting van het beheer van zo'n internationaal netwerk nog een zaak die veel voorbereiding vraagt.

Kosten op het niveau van de systeemoptie

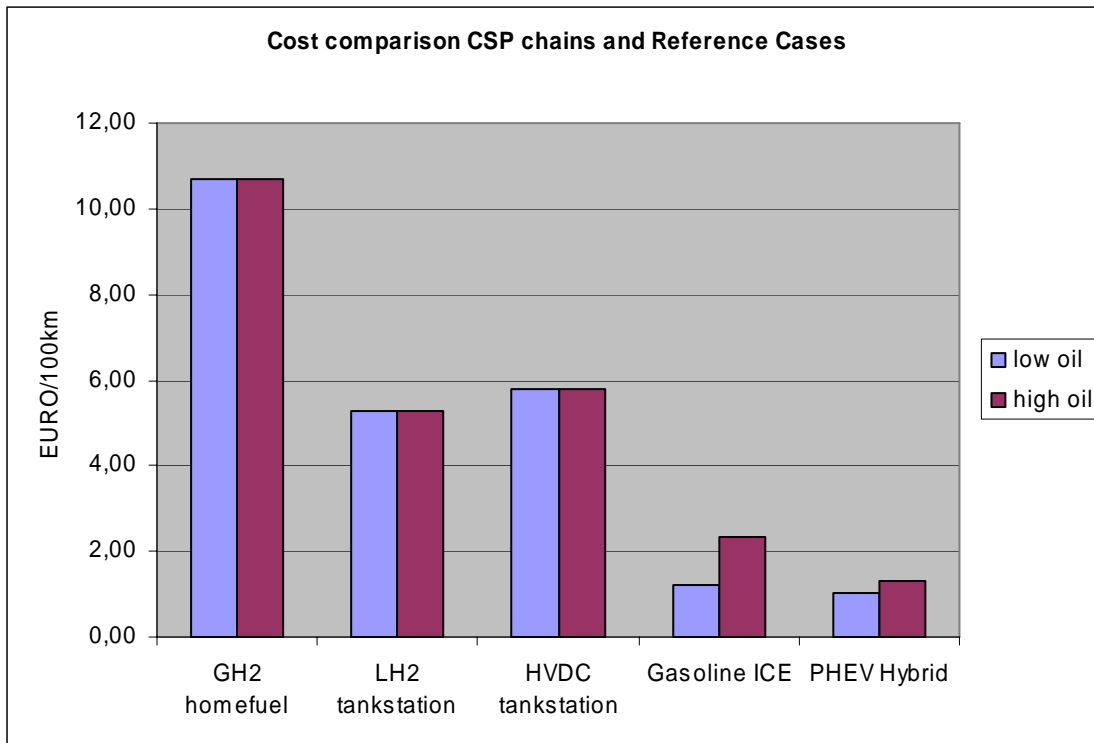
Ecofys heeft de kosten van waterstof in de verschillende varianten op een rij gezet. Zoveel mogelijk is uitgegaan van kostenschattingen voor 2030.

Van de waterstofvarianten is de gasvormige route de duurste. Dit komt vooral door de kosten van de vulinstallatie thuis. Wanneer het gas naar tankstations gaat, zijn de kosten slechts iets hoger dan bij de vloeibaar-waterstofroute. De kosten van de elektriciteit - waterstofroute worden vooral bepaald door de kosten van decentrale elektrolyse (zie Figuur 5.1).



Figuur 5.1. Opbouw van de kosten voor waterstof voor verschillende systeemvarianten (De Visser et al., 2006).

Wanneer de totale productiekosten van de brandstof (belastingen en accijnzen niet meegenomen) vergeleken worden, dan zijn alle varianten van deze systeemoptie duurder dan de referentie bij gekozen olieprijs van \$ 25 en 50 per vat en een benzineauto, die 1 op 16 rijdt (zie Figuur 5.2).



Figuur 5.2. Vergelijking van de productiekosten van brandstoffen in verschillende systeemvarianten (De Visser et al., 2006).

De plug-in hybride lijkt nog goedkoper dan de referentie. Dit wordt veroorzaakt door de relatief lage kosten van biobrandstoffen in de CONCAWE-studie, het gegeven dat 50% van de afstand wordt afgelegd met elektriciteit en de hoge efficiency van de elektrische tractie. Merk op dat geen rekening gehouden is met kosten van belastingen en accijnzen.

6 Conclusies

De onderzochte systeemoptie zal niet snel gerealiseerd worden. De optie bestaat uit complexe subsystemen met veel internationale dimensies vanwege het wereldwijde onderzoek dat gedaan wordt aan brandstofcel(auto's) en waterstof en het gegeven dat Concentrating Solar Power (CSP) alleen in gebieden met een hoge zonintensiteit zinvol is. Productie en import van waterstof in Nederland behoren echter wel tot de mogelijkheden. Mocht de systeemoptie in de verre toekomst werkelijkheid worden, dan zou de realisatie van een aantal overheidsdoelen dichterbij komen. Voor die tijd moet nog een groot aantal technische en institutionele problemen worden opgelost. In dit hoofdstuk wordt eerst ingegaan op duurzaamheidsaspecten, daarna op het proces dat gaande is om de systeemoptie te kunnen realiseren.

Lokale luchtverontreiniging was in 1990 de aanleiding voor de nul-emissiewetgeving in Californië en de zoektocht naar de brandstofcelauto. Vanwege de grote vorderingen die gemaakt zijn en nog gemaakt kunnen worden om de conventionele auto schoner te fabriceren, is de brandstofcelauto om redenen van verminderen van lokale luchtverontreiniging, minder relevant geworden.

Het klimaatprobleem is in de loop der tijd een extra argument geworden om meer aandacht te besteden aan waterstof. Het gebruik heeft echter alleen zin als het komt uit hernieuwbare bronnen. De zon is een onuitputtelijke bron van energie. CSP is technisch al mogelijk gebleken; in de Mojave-woestijn in Californië staan al jaren verschillende installaties. In landen rond de Middellandse Zee bestaan plannen om deze installaties te bouwen. Om 's nachts elektriciteit te kunnen produceren wordt overdag energie opgeslagen of vindt bijstook van fossiele brandstoffen plaats (in de berekeningen is alleen met het eerste rekening gehouden).

Er zijn drie sterk uiteenlopende varianten onderzocht om met energie uit CSP waterstof te maken en hiermee brandstofcelauto's in Nederland te voeden. De varianten verschillen van elkaar qua efficiencyverliezen bij transport, complexiteit, investeringen en exploitatiekosten. Op labschaal bestaan zeker nog veelbelovende mogelijkheden voor de productie van waterstof, maar deze zijn niet in de studie meegenomen.

Ten opzichte van de referentie: de (verbeterde) conventionele auto, scoren de varianten hoog qua emissies van broeikasgassen; afhankelijk van de variant kan een reductie van 70-95% bereikt worden. De systeemoptie heeft daarmee een positief effect op natuur en biodiversiteit. Wanneer alle auto's in Nederland zouden rijden op waterstof afkomstig van CSP, is een gebied van 150 km² nodig. Dit is waarschijnlijk wat hoger dan de referentiesituatie, maar veel kleiner dan bij het gebruik van biobrandstoffen. Ondanks enig verlies aan biodiversiteit in woestijnecosystemen blijft het saldo voor natuur en biodiversiteit positief. Overigens concurreert landgebruik voor CSP niet of nauwelijks met land- en bosbouw en bouwgrond.

De brandstofcelauto heeft als gunstig neveneffect dat de geluidshinder in delen van de stad verder afneemt.

Wat betreft de veiligheid van waterstof zijn veel deskundigen het erover eens dat bij een zorgvuldige introductie geen problemen hoeven te ontstaan. Naar de mogelijkheden van een veilige toepassing wordt al uitgebreid onderzoek gedaan.

Omdat CSP in een groot aantal landen rond de Middellandse Zee kan worden opgewekt, neemt de voorzieningszekerheid van Europa toe. CSP leent zich qua geografische oriëntatie goed voor combinatie met andere hernieuwbare bronnen als wind (Noordwest-Europa) en biomassa (Noord- en Oost-Europa). Overigens, omdat de Nederlandse energiesector voor meer dan 25% bijdraagt aan de uitstoot van broeikasgassen, zou in het theoretische geval dat alle elektriciteit in Nederland wordt geïmporteerd uit CSP-installaties, al ruim de helft van de klimaatdoelstelling worden gehaald.

Het belangrijkste probleem bij de systeemoptie zijn de kosten. Het huidige kostenniveau van de brandstofcelauto is nog veel te hoog. De kosten voor een brandstofcel zijn volgens marktleider Ballard tussen 2002 en 2005 gedaald met 40%. Maar de aandrijving bestaat uit meer dan de brandstofcel. Hoewel de brandstofcelauto op termijn niet duurder hoeft te zijn dan de conventionele auto, blijft de kostprijs van de brandstof een belangrijke factor. De kosten van waterstof uit CSP zijn hoger dan die van benzine. Ondanks de hogere efficiency van de brandstofcelauto zijn de brandstofkosten (zonder belastingen en accijns) per afgelegde km 2,5 tot 5 keer hoger, ook bij een olieprijs van \$ 50/vat (maar zonder CO₂-kosten).

In landen rond de Sahara zouden – bij voldoende opschaling en schaalgrootte en na nog enige R&D – de productiekosten van elektriciteit op een termijn van 10 jaar een niveau van 0,05 à 0,06 €/kWh kunnen bereiken. In Zuid Europa ongeveer 0,08 €/kWh, vanwege een lagere zonintensiteit. Voor elektriciteit uit fossiele bronnen en kernenergie ligt dit momenteel rond 0,04 tot 0,05 €/kWh. In zonnrijke ontwikkelingslanden zou CSP al op korte termijn economische mogelijkheden kunnen scheppen, niet alleen voor de productie van elektriciteit, maar ook door de daarmee te combineren mogelijkheid van ontzilting en indirect wellicht tuinbouw (schaduw). Omdat op dit moment CSP nog aan het begin staat van introductie op grote schaal, biedt deze systeemoptie volop kansen voor industriële en dienstverlenende bedrijven in Nederland en Europa, ook als CSP in Afrika wordt geplaatst. Nederlandse bedrijven spelen momenteel een rol bij de ontwikkeling van brandstofcellen en waterstof. Zij zijn niet betrokken bij de huidige initiatieven rond CSP.

Proces

De stringente wetgeving ten aanzien van luchtverontreiniging in Californië gaf in 1990 sterke impulsen aan onderzoek naar de elektrische en de brandstofcelauto. In latere jaren kwamen daar zorgen rond klimaatverandering en - tamelijk recent - rond voorzieningszekerheid bij. Vanaf het begin was de visie bij velen, ook in Nederland, dat de brandstofcelauto op waterstof er op de lange termijn komt, al zal het nog 10 tot 20 jaar duren voor deze doorbreekt. Diverse partijen zoals autofabrikanten, oliemaatschappijen, onderzoeksinstituten en overheden zijn actief. Niemand lijkt te willen achterblijven. Er zijn

veel samenwerkingsverbanden omdat het om grote bedragen aan R&D gaat. Er blijven echter ook steeds kritische kanttekeningen geplaatst worden bij de brandstofcelauto en meer algemeen bij de waterstofeconomie.

De brandstofcelauto bevindt zich nu wereldwijd nog volop in de R&D-fase. Veel industriële landen, de OECD (IEA) en de EU hebben onderzoeksprogramma's op het gebied van brandstofcellen en waterstof. Nederland doet mee aan internationale programma's en aan universiteiten en kennisinstellingen zijn verschillende onderzoeksgroepen actief.

Er zijn in Nederland nog geen niches met waterstofvoertuigen, slechts enkele experimentele voorbeelden van bescheiden omvang (drie bussen in Amsterdam, een waterstofsloep, waterstofkarts, de waterstofauto van ECN).

Een tussenstap naar introductie van de brandstofcelauto op waterstof zou kunnen zijn de brandstofcelauto op benzine met een converter (of reformer) in de auto om waterstof te produceren. Deze tussenstap lijkt inmiddels van de baan, de onderzoeksbudgetten bij autofabrikanten zijn stopgezet. Een aantal autofabrikanten is actief met een verbrandingsmotor op waterstof. Ook dit wordt door velen als een tussenstap gezien.

Tabel 6.1 Voorbeelden van tussenstappen bij systeemoptie

Eerste stap	Bijdrage aan het systeem	Resultaten
Reformer	Brandstofcelauto hoeft niet te wachten op H ₂ -infrastructuur	Niet meer in beeld
Verbrandingsmotor met H ₂	Bespoedigt H ₂ -infrastructuur	Weinig fabrikanten geïnteresseerd
Niches voor andere voertuigen met brandstofcellen	Onderzoek en demonstratie, onafhankelijk van H ₂ - infrastructuur	Experimentele voorbeelden
Tankstations voor H ₂	Onderzoek H ₂ -infrastructuur	Eerste stations in aantal landen
Waterstof aan aardgas toevoegen	Ervaring opdoen met H ₂	In onderzoek
Waterstof uit aardgas produceren	Ervaring opdoen met H ₂ , voorafgaand aan H ₂ uit hernieuwbare bronnen	Al mogelijk
CSP voor lokale elektriciteitsvoorziening	Ervaring opdoen met en ontwikkeling van exploitatie van hernieuwbare bronnen	Bestaan in VS, in ontwikkeling, met name in Spanje

In verschillende landen wordt geëxperimenteerd met een nieuwe waterstofinfrastructuur om het kip-en-eiprobleem (wie investeert in een productielijn of wie koopt een auto als je niet kunt tanken en andersom) aan te pakken. De EU heeft programma's lopen voor de normstelling rond brandstofcelauto's en de veiligheid van waterstof. Het zijn signalen dat de verwachtingen concreter worden.

Veel partijen zijn het erover eens dat als overgegaan wordt op waterstof dit uiteindelijk uit hernieuwbare bronnen moet komen. Er is nog veel R&D gaande om waterstof op goedkopere

manieren te produceren. Voor de transitiefase wordt veel gesproken over waterstof uit aardgas als tussenstap.

De ontwikkeling van CSP staat los van nieuwe aandrijvingstechnieken. De opkomst in de jaren 1980 – met name in Californië - vond zijn oorsprong in de energiecrises van de jaren 1970. De lage olieprijs in de jaren 1990 zetten een rem op de verdere invoering. De IEA en later ook de EU zijn in bescheiden mate met R&D-programma's verder gegaan. De laatste jaren komt CSP weer meer in beeld, met name in Spanje. Er zijn gelden van de Wereldbank beschikbaar voor CSP in ontwikkelingslanden. Belangrijke barrière is het feit dat de productiekosten met op korte termijn te plaatsen installaties nog relatief hoog zijn en onzekerheid bestaat over groei van de omvang van CSP.

Nederland speelt bij CSP geen rol; uiteraard niet in de plaatsing van installaties hier, maar ook niet in R&D en in het IEA-netwerk op dit terrein. Nederland heeft tot zeer recent ook geen visie laten zien op bijvoorbeeld kansen voor zonrijke ontwikkelingslanden en Zuid-Europa. Het Clean Development Mechanism onder het Kyoto-protocol biedt mogelijkheden om te investeren in deze gebieden en de bespaarde CO₂-uitstoot toe te rekenen aan Nederland.

Na de tamelijk succesvolle introductie van de hybride-auto de afgelopen jaren hebben hoe langer hoe meer fabrikanten plannen met een hybride op de markt te komen; één heeft ook plannen voor een plug-in versie die thuis (of bij een parkeergelegenheid) aan het net gekoppeld kan worden. Ook volledig elektrische auto's komen weer meer in beeld dankzij technologische ontwikkelingen rond accu's.

Een systeem van een plug-in hybride die half om half rijdt op elektriciteit uit CSP en biobrandstoffen (De Visser et al., 2006), zou goedkoper kunnen zijn dan een benzine-auto, zeker bij een hoge olieprijs (maar met wel meer landgebruik voor bio-ethanol).

Afsluitend kan worden gesteld dat Nederland vergeleken met veel andere landen wat meer geld uitgeeft aan R&D voor brandstofcellen en waterstof, maar dat het Nederlandse transitiebeleid voor deze systeemoptie tot nu toe niet of nauwelijks een versnelling in de ontwikkelingscyclus heeft bewerkstelligd, niet bij CSP, maar ook niet bij de brandstofcelauto.

Referenties

- Algemene Energieraad (2006), Briefadvies Concentrating Solar Power (CSP) 3 maart 2006.
- Annema, J.A. (2005), Effectiveness of the EU White paper – ‘European transport policy for 2010’ – MNP Rapport 773002028/2005, Bilthoven.
- Bakkenes, M., J.R.M. Alkemade, F. Ihle, R. Leemans, J.B. Latour (2002), Assessing effects of forecasted climate change on the diversity and distribution of European higher plants for 2050. *Global Change Biology* 8, 390-407.
- Ballard website www.ballard.com : Fuel cell technology ‘road map’.
- Brink, B.J.E. ten, A. Van Hensberg, M. De Heer, D.C.J. van der Hoek, B. De Knecht, O.M. Knol, W. Ligetvoet, R. Rosenboom, M.J.S.M. Reijnen (2002), Technisch ontwerp Natuurwaarde 1.0 en toepassing in Natuurverkenning 2, RIVM Rapport 408657007.
- Bruijn, F. de, persoonlijke mededeling 23 augustus 2006.
- CONCAWE (2006), Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. A joint study by EUCAR/JRC/CONCAWE, Overview of results.
- CPB, MNP, RPB (2006), Welvaart en Leefomgeving, scenariostudie voor Nederland in 2040. Bilthoven.
- Czisch, G., Least-Cost European/Transeuropean Electricity Supply Entirely with Renewable Energies. ISET.
- DLR (2005), Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region, Final Report.
- DLR (2006), Trans-Mediterranean Interconnection for Concentrating Solar Power.
- ECN Nieuwsbrief juli 2006.
- Elzenga, H.E., J.A. Montfoort, J.P.M. Ros (2006), Micro-warmtekracht en de virtuele centrale. Evaluatie van transitie op basis van systeemopties, MNP Rapport 16/2006003, Milieu en Natuurplanbureau, Bilthoven.
- EZ (2006), brief aan Algemene Energieraad, 16 mei 2006 (ET/ED/6033385).
- EZ (2006), TWA nieuws, jaargang 44 nr 2 (Ministerie van Economische Zaken). Den Haag.
- Fitzgibbons, K. (2005), Future Prospects and Public Policy Implications for Hydrogen and Fuel Cell Technologies in Canada. Paper voor United Nations University International Conference Hydrogen Fuel Cells and Alternatives in the Transport Sector: Issues for Developing Countries. Nov 7-9, 2005, Maastricht. Office of the National Science Advisor, Ottawa, Canada.
- GEZEN, website: www.gezen.nl
- Gielen, D. en G. Simbolotti (2005), Prospects for Hydrogen and Fuel Cells, Energy Technology Analysis, OECD/IEA, Parijs.

Hamelinck, C.N. en M. Hoogwijk (2006), Future scenarios for first and second generation biofuels (in druk), Ecofys, Utrecht.

Haug, M (2004), Hydrogen – IEA Activities and Perspective. Presentatie op DTI: A UK/US Vision for Hydrogen Technology Conference 11&12 oktober 2004, Londen.

Hoed, R. van den (2004), Driving Fuel Cell Vehicles – How Established Industries React to Radical Technologies. Proefschrift, Delft.

Hoogma, R. (2003), State-of-the-Art Brandstofcellen in de mobiliteitsmarkt. PIT-Nieuw Gas. NOVEM, Utrecht.

Kabariti, M, U. Möller, G. Knies (2003), Trans-Mediterranean Renewable Energy Cooperation “Trec”, for development, climate stabilization and good neighbourhood.

Kalhammer, F.R., P.R. Prokopius, V.P. Roan, G.E. Voecks (1998), Status and Prospects of Fuel Cells as Automobile Engines: A Report of the Fuel Cell Technical Advisory Panel. Sacramento, CA: Prepared for the State of California Air Resources Board.

Klein Wolt, K. E. Jakobs, P. Van der Steenhoven (2005), De waterstofbus in Amsterdam – Een onderzoek naar het draagvlak en acceptatie voor de waterstofbus – Gemeente Amsterdam – Dienst Onderzoek en Statistiek, juli 2005.

Knies, G. (2006), Deserts as sustainable powerhouses and inexhaustible waterworks for the world. Trans-Mediterranean Renewable Energy Cooperation. Global Conference on Renewable Energy Approaches for Desert Regions, Amman, Jordanië, 18-20 september 2006.

Kramer, G.J., J. Huijsmans, D. Austgen (2006), Clean and Green Hydrogen, Paper gepresenteerd op de World Hydrogen Energy Conference 2006, Lyon.

L-B- Systemtechnik (2006), Hyways, A European Roadmap, Assumptions, visions and robust conclusions from project Phase I. Ottobrunn, Duitsland.

Leemans, R. en B. Eickhout (2004), Another reason for concern: regional and global impact on ecosystems for different levels of climate change. Global Environmental Change 14: 219-228.

Luzzi, A. en L. Bonadio (2004), In Pursuit of the Future, 25 years of IEA Research towards the realisation of Hydrogen Energy Systems. IEA Hydrogen Implementing Agreement.

Macleod, D. 2006, Dynamics of Vehicle and Infrastructure Rollout – Joint study Shell Hydrogen and General Motors, lezing op NHA conference, 15 maart 2006 Long Beach, Californië.

NFCRC (2006), website van het National Fuel Cell Research Center, University of California, Irvine. <http://www.nfccrc.uci.edu/Default.aspx> augustus 2006

OECD/IEA (2004), Hydrogen & Fuel Cells, Review of National R&D Programs. OECD/IEA Parijs.

Oostrom, F. van (2006), Stemmen op schrift. Geschiedenis van de Nederlandse literatuur van het begin tot 1300. Uitgeverij Bert Bakker. www.stemmenopschrift.nl

RIVM (2003), Milieubalans 2003. RIVM, Bilthoven.

Ros, J.P.M. en J.A. Montfoort (2006), Evaluatie van transitie: systeemoptie vloeibare biobrandstoffen. MNP Rapport 500083002. Milieu- en Natuurplanbureau, Bilthoven.

Ros, J.P.M., J.C.M. Farla, J.A. Montfoort, D. Nagelhout, M.A. Reudink, G.A. Rood, H. van Zeijts (2006), Evaluatiemethodiek voor NMP4-transities. Bouwtekening voor de evaluatie van het beleid ter ondersteuning van systeeminnovatie op de lange termijn, MNP Rapport 500083001, Milieu en Natuurplanbureau, Bilthoven.

Sargent en Lundy (2003), Assessment of Parabolic Trough and Power Tower Solar Technology Cost and Performance Forecasts. NREL, Golden, Colorado, USA.

Scheemaker, G.F. de (2005), Passion, purpose and partnerships – Hydrogen Roadmaps for Developing Countries, UNU Conference on Hydrogen Fuel Cells & Alternatives in the Transport Sector – Issues for Developing Countries UNU-INTECH, 7-9 November 2005.

Scheemaker, G.F. de (2006), '21st Century Fuels and the Hydrogen Opportunity' – Will China rise to the challenge, China Oil and Gas Summit, maart 2006.

Shell Hydrogen (website) 12-7-06.

Stromen 23 juni 2006, CSP in Algerije.

Task force Energietransitie (2006), Transitieactieplan: Meer met Energie! Kansen voor Nederland.

Thijssen, J.H.J.S. (2002), Viable and Sustainable Energy Strategies Grounded in Source-to-Service Analyses, A Perspective of the Role of Fuel Cells in Transportation. J.Thijssen LLC, Redmond, WA, USA.

Trieb, F. (2006), Trans-Mediterranean Interconnection for Concentrating Solar Power. DLR.

USABC (2006), Electrochemical Energy Storage Technical Team Technology Development Roadmap. Website United States Advanced Battery Consortium, Freedom Car & Fuel Partnership.

Versloot, N. (2006), Waterstof en veiligheid, ontwikkeling en implementatie van veilige waterstoftechnologie. Presentatie op Waterstofdag voor Bestuurders en Lokale Overheden, 6 april 2006. TNO Defensie en Veiligheid. Rijswijk.

Visser, E. de, R. van den Hoed, H. Barten (2006), Concentrating solar power for fuel cell vehicles. Ecofys, PDCSNL061208, Utrecht, augustus 2006.

VROM (2001), Nationaal Milieubeleidsplan 4. Een wereld en een wil, werken aan duurzaamheid. Ministerie van VROM, Den Haag.

VROM (2006), Toekomstagenda Milieu: schoon, slim, sterk. Ministerie van VROM, Den Haag.

Weiss, M.A., J.B. Heywood, A. Schafer, V.K. Natarajan (2003), Comparative Assessment of Fuel cell vehicles. MIT, Boston, USA.

Wietschel, M., U. Hasenauer, A. de Groot (2006), Development of European hydrogen infrastructure scenarios – CO₂ reduction potential and infrastructure investment. *Energy Policy* 34 (2006) 1284-1298.