

Perspectieven van nieuwe technologie voor een duurzaam transportsysteem

Jan Anne Annema, Milieu en Natuur Planbureau, jan-anne.annema@mnp.nl

Robert van den Brink, Milieu en Natuur Planbureau, robert.van.den.brink@mnp.nl

Anco Hoen, Milieu en Natuur Planbureau, anco.hoen@mnp.nl

Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk 2005,
24 en 25 november 2005, Antwerpen

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
1. Inleiding	5
2. Het milieu: geen duidelijk beeld van de ‘schone’ technieken	5
3. Kosteneffectiviteit van de ‘schone’ technieken: matig tot slecht	10
4. Perspectieven van de zeer ‘schone’ technieken	15
Referenties	18

Samenvatting

Perspectieven van nieuwe technologie voor een duurzaam transportsysteem

Sommige combinaties van nieuwe brandstoffen en nieuwe voertuigtechnieken hebben op de lange termijn de potentie om tot zeer lage kooldioxide (CO₂)-uitstoot van verkeer en vervoer te komen. De technieken hebben bescheiden andere milieuvordelen, bijvoorbeeld op het vlak van verbetering van de luchtkwaliteit, ten opzichte van de schoonst mogelijke conventionele technieken (olie en verbrandingsmotoren). Op dit moment hebben de meeste CO₂-potentie: geavanceerde biobrandstoffen gemaakt uit houtachtige biomassa en brandstofcel-waterstof-voertuigen, waarbij de waterstof wordt gemaakt uit aardgas met CO₂-opslag, wind, zonne-energie, kernenergie en houtachtige biomassa. Er zijn nog flinke technische doorbraken nodig willen deze technieken qua effecten en kosten hun potentie waarmaken. De paper pleit voor een voorzichtige beleidsstrategie om deze technieken te stimuleren.

Summary

Prospects of new technology for sustainable transport

New fuels and vehicle technologies have the possibility to meet very strict CO₂ emission goals in transport. Other environmental advantages of these techniques compared to the cleanest possible conventional technology are modest. The highest CO₂ emission reduction are possible with so-called advanced biofuels (made from woody biomass) and with hydrogen fuel cell vehicles. With the restriction that hydrogen has to be made from natural gas with CO₂ storage, wind energy, solar energy, nuclear energy or woody biomass. In order to fulfill the possibilities (in terms of environmental impact and costs) highly complicated technical problems have to be solved. The authors of the paper argue to carry out a careful policy strategy to stimulate these new technologies.

1. Inleiding

In de ‘Verkenning van de duurzaamheid’ (MNP (2004) is het begrip duurzaamheid geanalyseerd aan de hand van vier verhalen van de toekomst. Eén verhaal ging over een wereld waarin het oplossen van maatschappelijke vraagstukken, zoals klimaatverandering, centraal staat. In de sector transport zijn in dit verhaal volop waterstofvoertuigen en alternatieve energiebronnen zoals biobrandstoffen ingezet. Bij het doorredeneren over het toepassen van deze nieuwe technieken concludeerde het MNP (2004) dat weliswaar forse broeikasgasemissiereducties in verkeer en vervoer in de toekomst mogelijk zijn, maar tegelijkertijd werd opgemerkt (MNP, 2004, p. 112): *‘...het gekozen technologietraject is kwetsbaar. Er is in dit verhaal veel geloof in technieken als waterstof en biobrandstoffen om de CO₂-emissies in de transportsector aan te pakken, maar een dergelijk traject is vooralsnog duur en risicovol’.*

We gaan in deze paper de conclusie ‘duur en risicovol’ wat meer in detail uitwerken. Wat zijn de milieuverwachtingen van de zeer schone voertuigtechnieken (paragraaf 2)? Wat zijn de verwachtingen over de kosteneffectiviteit (paragraaf 3)? En, tot slot, wat zijn de perspectieven van nieuwe technologie (paragraaf 4)?

2. Het milieu: geen duidelijk beeld van de ‘schone’ technieken

Voor de lange termijn verwachten diverse overheden vooral veel van de brandstofcel-waterstof-combinatie als dé schone techniek in verkeer en vervoer (zie bijvoorbeeld VROM, 2000, EC, 2001, www.eere.energy.gov). Voor de middellange termijn richten diverse internationale overheden zich in hun visie ook op biobrandstoffen. Het meest concreet op dit vlak is de EU die in 2003 een zogenoemde biobrandstoffen-richtlijn heeft uitgevaardigd. In de richtlijn worden indicatieve streefwaarden van 2% voor 2005 en 5,75% voor 2010 genoemd voor het aandeel biobrandstof in het totale brandstofverbruik voor transport. Lidstaten zijn niet verplicht deze indicatieve streefwaarden over te nemen, maar dienen bij afwijking gegronde redenen aan te geven.

Wat zijn de milieuvoordelen van deze geclaimde zéér schone voertuig-technieken? We behandelen achtereenvolgens de effecten van deze zeer schone technologie op de thema's klimaatverandering en luchtverontreiniging.

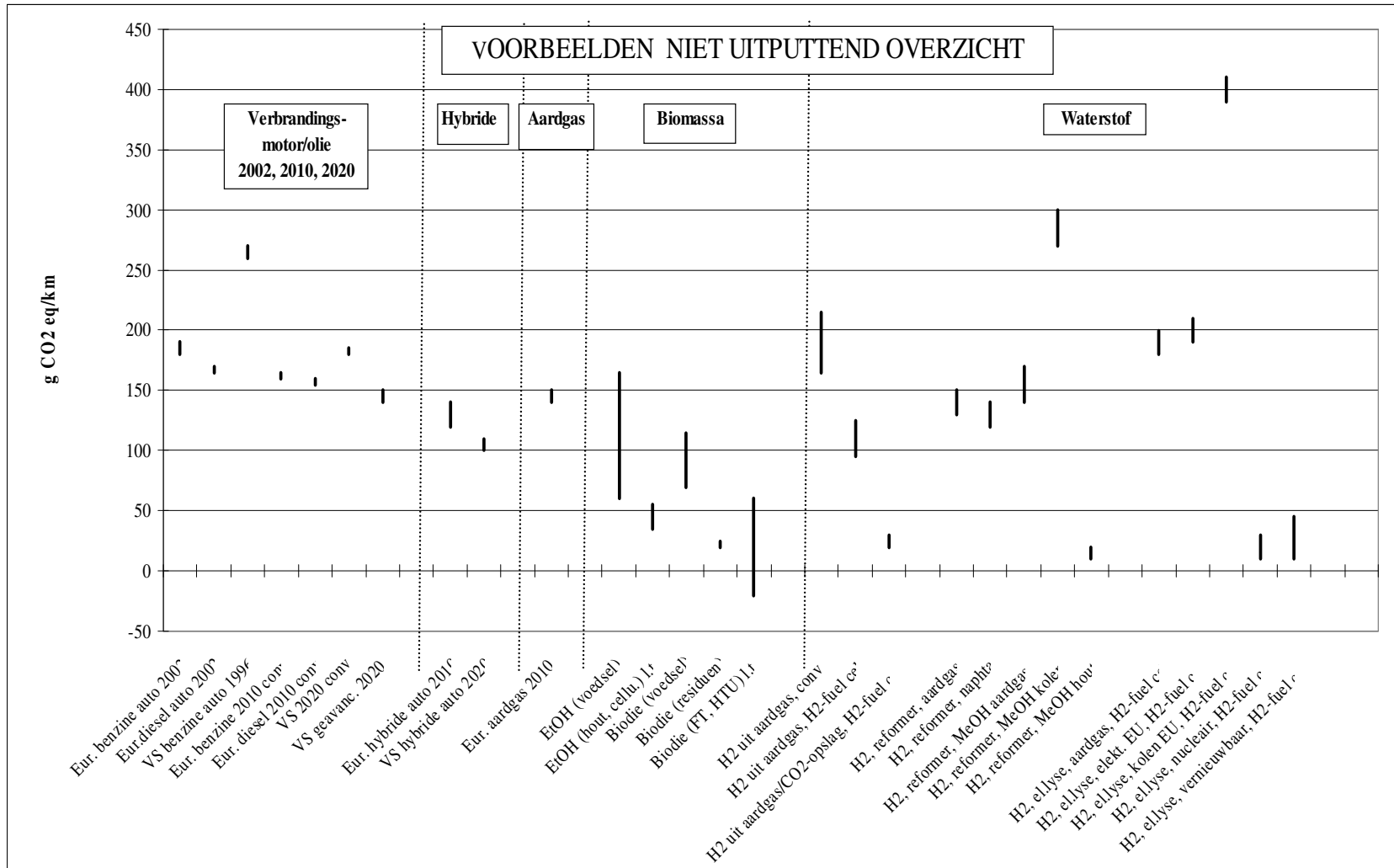
Klimaatverandering

Figuur 1 geeft een overzicht van de uitstoot van kooldioxide in gram per gereden kilometer voor personenauto's van 'bron tot wiel' ('Well to Wheels', WTW).

Zes hoofdtechnieken zijn in de figuur 1 onderscheiden. Van links naar rechts:

- a) de conventionele verbrandingsmotor op benzine en diesel,
- b) de hybride-auto die zowel een verbrandings- als een elektromotor bezit,
- c) de verbrandingsmotor op aardgas,
- d) de verbrandingsmotor op biobrandstoffen,
- e) de waterstof-brandstofcelauto.

Door WTW-emissiefactoren te beschouwen wordt de broeikasgasemissie per gereden kilometer gegeven voor de gehele keten van de brandstof: van de emissies die optreden tijdens brandstofproductie ('well') tot de emissies die optreden als de consument de brandstof daadwerkelijk gebruikt ('wheel'). CO₂-eq. staat voor CO₂-equivalenten en refereert naar een gewogen optelling van uitstoot van alle broeikasgassen: kooldioxide (CO₂), stikstofdioxide (N₂O), methaan (CH₄), enzovoort.



Figuur 1 CO₂-emissiefactoren voor personenauto's voor verschillende aandrijftechniek-brandstofcombinaties (Concawe et al., 2003, Kampman et al., 2005, Van den Brink en Annema, 2004, Greene en Shafer, 2003, Ecofys, 2003)

De belangrijkste boodschap van figuur 1 is dat het beeld van de CO₂-winst van nieuwe voertuigen niet eenduidig positief is. Er zijn combinaties van brandstof en aandrijftechniek die een 80 - 90% lagere CO₂-eq.-uitstoot hebben dan de conventionele verbrandingsmotor. Voorbeelden hiervan zijn: 'geavanceerde' biobrandstoffen en brandstofcelvoertuigen op waterstof waarbij de waterstof gemaakt wordt uit aardgas met CO₂-opslag, uit windenergie, kernenergie of zonne-energie. Echter, er zijn vanuit CO₂-eq.-oogpunt ook nieuwe technieken die het niet (veel) beter doen, zoals aardgas, hybride en sommige biobrandstoffen. Er zijn zelfs technieken die het slechter doen dan de conventionele techniek: voorbeelden zijn technieken die gebruik maken van waterstof gemaakt uit fossiele brandstoffen.

Bij biobrandstoffen valt de grote bandbreedte in CO₂-emissieprestatie op. De relatief minder goed presterende biobrandstoffen (figuur 1) zijn biobrandstoffen geproduceerd uit voedselgewassen (suikerbiet, tarwe, koolzaad, zonnebloemen). Deze soort biobrandstoffen is momenteel beschikbaar. Ze hebben CO₂-voordelen omdat de CO₂ die vrijkomt tijdens het verbranden van de biomassa gelijk is aan de hoeveelheid die de biomassa opneemt tijdens de groei. Desondanks ligt de netto CO₂-winst van dit soort biobrandstoffen meer in de range van 10% tot 90% ten opzichte de huidige conventionele verbrandingsmotor op fossiele brandstoffen. Dit komt omdat de biomassateelt energie nodig heeft en omdat broeikasgassen worden geëmitteerd gedurende de teelt (vooral N₂O) (zie verder bijvoorbeeld Kampman *et al.*, 2003, Ecofys, 2003 of Kampman *et al.*, 2005). Veel beter kunnen zogenaamde geavanceerde biobrandstoffen het gaan doen: biobrandstoffen gemaakt uit houtachtige gewassen of houtachtige residuen. Deskundigen verwachten totale broeikasgasemissiereducties van meer dan 90% van zogenaamde geavanceerde 'Fischer Tropesch' en 'HTU' diesel. Echter, op dit moment zijn dit soort geavanceerde biobrandstoffen alleen nog maar in ontwikkeling, met conversieprocessen die zich nog niet op grote schaal operationeel hebben bewezen. Kampman *et al.*, (2005) hebben een uitgebreide review van de geavanceerde biobrandstoffen gegeven.

Voor toepassing van waterstof in voertuigtechnologie geldt dat de CO₂-winst ten opzichte van de conventionele verbrandingsmotor op benzine en diesel vooral afhankelijk is van de wijze waarop de industrie de waterstof gaat maken. Aardgas met CO₂-opslag, windenergie, zonne-

energie, waterkrachtenergie en kernenergie zijn primaire energiebronnen om H₂ te maken met grote CO₂-potentie. Ook de aandrijftechnologie heeft invloed. Zo scoort de verbrandingsmotor op waterstof qua CO₂-emissiefactor relatief slecht. Beter doen de brandstofcelvoertuigen het die met zogenaamde ‘on board reformers’ zijn uitgerust. En nog beter brandstofcelvoertuigen die worden gevoed met waterstof die stationair is gemaakt. De reden voor deze oplopende CO₂-emissieprestatie heeft te maken met toenemende energie-efficiency van de systemen. ‘On board reformers’ zijn kleine chemische fabrieken aan boord van een voertuig die in staat zijn bijvoorbeeld benzine, diesel of methanol (uit biomassa of fossiele bronnen) om te zetten in waterstof waarmee de brandstofcel dan wordt gevoed.

Luchtverontreiniging

De nieuwe voertuigtechnieken kunnen zo schoon zijn dat ze nagenoeg geen uitstoot hebben van luchtverontreinigende stoffen. Let wel: dit geldt tijdens het gebruik van de technieken (‘Tank to Wheel’-emissie). Brandstofcelvoertuigen getankt met waterstof hebben emissies van nul aan de uitlaat van stoffen als koolmonoxide (CO), stikstofoxiden (NO_x), fijn stof (PM₁₀) en vluchtige organische koolwaterstoffen (VOC) (De Bruijn, 2005). Met ‘reformers’ uitgeruste brandstofcelvoertuigen kunnen nog wel kleine emissies hebben van bijvoorbeeld CO en VOS. Biobrandstoffen ingezet in verbrandingsmotoren kunnen vergelijkbare emissies hebben van luchtverontreinigende stoffen als de motoren op fossiele bronnen.

De positieve eigenschappen van de nieuwe voertuigtechnologie op luchtverontreiniging lijken maatschappelijk zeer gewenst gezien de huidige verhitte debatten rond verkeer en luchtverontreiniging. Verkeer is immers een belangrijke bron is van het niet overal halen van EU-luchtkwaliteitsnormen (MNP, 2005).

Echter, ten opzichte van de conventionele verbrandingsmotoren en fossiele brandstoffen hebben de zeer schone technieken bescheiden voordelen. Bij de conventionele aandrijftechnologie en fossiele brandstoffen zijn namelijk technisch gezien nog sterke verbeteringen mogelijk in uitstoot per gereden kilometer van luchtverontreinigende stoffen tegen meerkosten van ‘slechts’ enkele honderden euro’s per voertuig (Rijkeboer *et al.*, 2003).

Ecologische nadelen

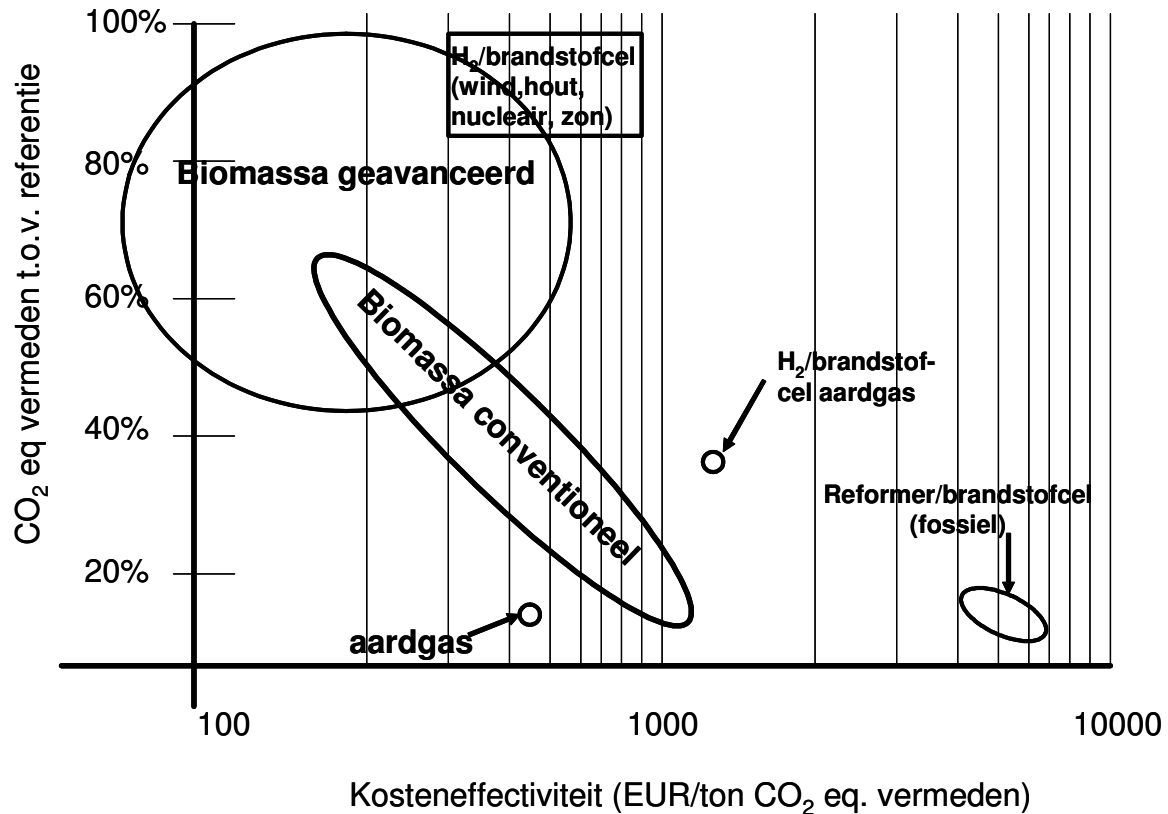
De nieuwe aandrijftechnieken en nieuwe brandstoffen hebben naast ecologische voordelen ook ecologische risico's. Zo kost het telen van biomassa ruimte wat ten koste kan gaan van voedselproductie en natuur. Het voert te ver om in deze paper op de nadelen in te gaan. Immers, om bijvoorbeeld waterstof te maken kunnen producenten kiezen uit zeer veel primaire energiebronnen en energieproductietechnieken – kernenergie, fossiel met CO₂-opslag, waterkracht, windenergie, biomassa en dergelijk – elk met de eigen voor- en nadelen. De boodschap is dat het niet per definitie alleen rozengeur en maneschijn is vanuit ecologische perspectief bij de nieuwe technieken.

3. Kosteneffectiviteit van de zeer 'schone' technieken: matig tot slecht

Uit paragraaf 2 blijkt dat nieuwe technieken vooral milieupotentie hebben op het vlak van veel lagere CO₂-emissie ten opzichte van de conventionele technieken. Het is dan maatschappelijk belangrijk dat de kosten om deze CO₂-winst te realiseren niet hoger zijn dan andere opties – binnen of buiten de sector verkeer en vervoer – om CO₂-emissiewinst te bereiken. Anders geven we immers mogelijk veel euro's uit aan nieuwe voertuigtechnieken om CO₂-winst te halen; een CO₂-winst die misschien elders tegen veel lagere kosten is te behalen.

De meeste potentie op het vlak van CO₂-emissiereductie tegen relatief goede kosteneffectiviteit (= lage kosten per vermeden emissie) hebben de geavanceerde biomassa en de waterstof –brandstofcelcombinaties (figuur 2). De waterstof moet dan wel gemaakt zijn uit houtachtige biomassa, zonne-energie, windenergie of nucleaire energie. Deze combinaties zitten hoog, iets links in het midden van figuur 2. Ter vergelijking: Van Vuuren *et al.* (2003) berekenden prijzen voor emissierechten van 1 ton CO₂-uitstoot van € 120 in 2050 en van € 200 in 2100 (verondersteld is: 1 US\$ = 1 €), uitgaande van mondiale emissiehandel en een 'klimaatveilige' CO₂-concentratie van 450 ppm. Om een dergelijke klimaatneutrale concentratie te bereiken zijn emissiereducties nodig van tientallen procenten. De kostenberekeningen van Van Vuuren *et al.* (2003) veronderstellen wel een ideale wereld waarin mondiaal zodanig wordt gehandeld dat de goedkoopste maatregel wordt gevonden. Dus, de waarden zijn nogal theoretisch. Hoe dan ook: uit hun schattingen kan worden geconcludeerd dat de geavanceerde biobrandstoffen op termijn een gunstige

kosteneffectiviteit kunnen hebben. De brandstofcel-waterstof-combinaties lijken daarentegen met een kosteneffectiviteit van boven de 400 euro per vermeden ton CO₂ duur ten opzichte van alternatieve CO₂-reductiemaatregelen¹ binnen en buiten de sector verkeer en vervoer.



Figuur 2 *Het percentage vermeden broeikasgasemissies per soort van aandrijftechniek en brandstof 'well-to-wheel' (y-as) versus de kosten per vermeden ton CO₂ per brandstof (x-as). De analyses zijn uitgevoerd voor 2020 in een scenario met relatief beperkte vervanging van de conventionele technieken en fossiele brandstoffen (5% in de Concauwe-studie en 20% in de Ce-studie), bij olieprijsen van ruwweg \$25 per vat. Bron: Concauwe et al., 2003 en Kampman et al., 2005.*

¹ Andere auteurs zijn iets optimistischer over de kosteneffectiviteit van deze technieken dan de bronnen gehanteerd in figuur 3, maar deze auteurs zitten qua orde van grootte met 300 tot 400 euro per vermeden ton wel in de buurt van de schattingen in figuur 3 (Van den Brink en Annema, 2004, Keith en Farrell, 2003, Kolke, 1999).

Andere combinaties zoals de brandstofcel gevoed met waterstof gemaakt uit aardgas en de brandstofcel gevoed met waterstof via een 'on board' benzine 'reformer', scoren qua milieupotentie en kosteneffectiviteit veel slechter dan de meest kosteneffectieve combinaties (figuur 2). Toch wordt de route via aardgas gezien als een mogelijke tijdelijke tussentechnologie om uiteindelijk tot de 'ideale' technologie te komen: waterstof uit duurzame bronnen zoals zon en wind. Een mogelijkheid om deze tussentechnologie milieutechnisch verder te optimaliseren is om waterstof te maken uit aardgas waarbij de vrijkomende CO₂-emissie wordt afgevangen en onder de grond opgeslagen. Van den Brink en Annema (2004) schatten dat deze route, zou die in figuur 2 zijn opgenomen, ongeveer op de plek komt van de combinaties waarbij de waterstof wordt gemaakt uit houtachtige biomassa of uit windenergie of nucleaire energie.

Bij de biobrandstoffen in figuur 2 valt de enorme bandbreedte op in CO₂-emissie-effecten (y-as) en kosteneffectiviteit (x-as). Een weerspiegeling van het feit dat er zeer veel soorten teelten en productiewijzen mogelijk zijn en dat de effect- en kostenschattings per soort van techniek zeer onzeker is. Duidelijk uit figuur 2 is dat de geavanceerde biobrandstoffen uit houtachtige biomassa op termijn tegen lagere kosten CO₂-emissie kunnen reduceren dan de huidige 'conventionele' biobrandstoffen. Kampman *et al.* (2005) schatten recent de kosteneffectiviteit van de tweede generatie op mogelijk minder dan € 100 Euro/ton. Er moeten echter nog technologische barrières worden geslecht voordat 'tweede-generatie' biobrandstoffen op grote schaal kunnen worden geproduceerd. Bovendien moeten forse investeringen worden gedaan om 'tweede-generatie' biobrandstoffen goedkoop te kunnen produceren.

Het schatten van kosten van nieuwe technieken en brandstoffen in de toekomst is zeer lastig en draagt flink bij aan de bandbreedtes in figuur 2. De onzekerheden zijn zo groot omdat de schatter rekening moet houden met onbekende technische ontwikkelingen die kosten kunnen reduceren en met onbekende leer- en schaaffecten. Een voorbeeld. Op dit moment kosten brandstofcellen rond de 2500 tot 5000 US\$ per kW geleverd vermogen (Johansson en Ahman, 2002). Tsuchiya en Kobayashi (2002) schatten de huidige kosten iets lager op 1800 US\$/kW. De prijs van General Motor's waterstof-demonstratievoertuig, de 'HydroGen3, wordt geschat op 1 miljoen US\$ (geciteerd in De Bruijn, 2005). De kosten van de huidige

verbrandingsmotoren liggen rond de 40 tot 60 US\$/kW. Auto's worden gebouwd met een vermogen van 50 tot 150 kW. De Bruijn (2005) citeert twee onderzoeken die een schatting hebben gemaakt van de kosten van de brandstofcel wanneer brandstofcellen nu in serie zouden worden gebouwd: de geschatte range is 250 tot 325 US\$ per kW, bij een productieniveau van 500.000. Dit betekent meerkosten van de brandstofcelauto ten opzichte van de conventionele verbrandingsauto in orde van grootte van 10.000 tot 40.000 US\$. Van den Brink en Annema (2004) hebben op basis van een uitgebreide literatuur-review geschat dat op de lange termijn (2020) door nog meer schaal- en leereffecten de additionele kosten van de brandstofcel ten opzichte van de verbrandingsauto kunnen zijn gedaald tot:

- waterstof brandstofcelauto 4500 (900 tot 8100) US\$/voertuig
- methanol of benzine/diesel brandstofcelauto 6500 (1500 tot 11400) US\$/voertuig.

De methanol en benzine/diesel brandstofcelauto's zijn in deze schatting duurder dan de waterstof brandstofcelvoertuig omdat een 'reformer' nodig is. Daar staat tegenover dat waterstof, afhankelijk van de productiewijze, duurder kan zijn dan methanol en dat waterstof zeker duurder is dan benzine of diesel. Kortom: ten opzichte van de huidige kosten van een demonstratievoertuig schatten deze auteurs toekomstige kostenreducties in van meer dan 99%. Maar, nogmaals, de onzekerheden zijn groot.

Een interessant punt rond de schattingen van toekomstige kosteneffectiviteit van nieuwe voertuigtechnologie (figuur 2) is de prijs van olie. Een actueel thema gezien de recente stijging van de olieprijs richting, en zelfs boven, de € 60 per vat. Bij kosteneffectiviteitsschattingen worden het effect en de kosten van een nieuwe techniek of brandstof berekend ten opzichte van de 'oude' techniek. In dit geval is de 'oude' techniek de conventionele verbrandingsmotor met benzine of diesel, die gevoelig is voor olieprijs. Verwacht kan worden dat rekenen met een hogere olieprijs voor de toekomst de kosteneffectiviteit verbetert van de nieuwe zeer schone technieken, die immers minder olie gebruiken.

Om de gevoeligheid te testen van hogere olieprijs zijn wat indicatieve gevoeligheidsanalyses rond kosteneffectiviteit gedaan (tabel 2). In de berekening is verondersteld dat de hogere olieprijs de prijzen van de brandstoffen aan de pomp doen toenemen, maar dat het tevens

voertuigfabrikanten prikkelt tot het maken van duurdere maar zuinigere conventionele voertuigen om zodoende consumenten in staat te stellen een deel van hogere brandstofkosten te vermijden. Wij gaan in de gevoeligheidsanalyse er van uit dat een verdubbeling van de prijs van ruwe olie op termijn leidt tot energie-efficiency-verbeteringen van 15% in de conventionele verbrandingstechnologie ten opzichte van een scenario waarin de olieprijs constant blijft (veronderstelde brandstofprijselasticiteit op brandstofgebruik van -0,5). De meerkosten van de zuiniger auto is geschat op € 1000 (schattingen MNP op basis van diverse bronnen).

Zoals werd verwacht verbetert de kosteneffectiviteit van brandstofceltechnieken (FCEV) in een scenario met hogere olieprijsen, maar misschien niet zoveel als verwacht (tabel 2). Dit komt vanwege het dempende effect dat bij hogere olieprijsen de conventionele technologie zuiniger wordt, waardoor de uiteindelijke brandstofkosten van de toekomstige conventionele technologie minder toeneemt dan misschien verwacht. Bovendien gaat het in de voorbeelden om brandstofceltechnieken waardoor de meerkosten van de nieuwe techniek niet alleen door brandstofprijs wordt bepaald maar ook door de prijs van de brandstofcel. Het effect kan zelf nog meer ‘tegenvallen’ dan geschetst in tabel 2, omdat door hogere olieprijsen ook kostenverhogingen zullen optreden in de productie van nieuwe technieken, omdat in de productieketen hiervan waarschijnlijk wel minder maar nog steeds een bepaalde hoeveelheid olie zal worden ingezet. Deze kostenverhogende factor is niet bekend en zit daarom niet in de schattingen van tabel 2.

De invloed van een hogere olieprijs op de kosteneffectiviteit zal overigens meer van invloed zijn op nieuwe technieken zoals de inzet van biobrandstoffen in verbrandingsmotoren, omdat er dan geen meerkosten van de aandrijftechnologie is.

Tabel 2 *Kosteneffectiviteit van nieuwe technieken bij twee olieprijs-scenario's. FCEV staat voor 'Fuel Cell Electric Vehicle' = brandstofcel*

	FCEV	FCEV	FCEV	FCEV	FCEV
	Biomassa, H ₂	Biomassa, methanol	Biomassa, FT diesel	Zon, wind, water, H ₂	Aardgas met CO ₂ - opslag, H ₂
	€/ton CO ₂	€/ton CO ₂	€/ton CO ₂	€/ton CO ₂	€/ton CO ₂
Olieprijs 25 – 35 US\$	340	530	510	400	350
Olieprijs 50 – 70 US\$	270	500	470	350	280

4. Perspectieven van de zeer 'schone' technieken

De conclusies van de nieuwe voertuigtechnieken en brandstoffen zijn:

- sommige combinaties van nieuwe brandstoffen en aandrijftechnieken hebben op de lange termijn de potentie om tot flink lagere CO₂-uitstoot van verkeer en vervoer te komen. Tevens kunnen deze combinaties er toe leiden dat de olie-afhankelijkheid van de sector verkeer en vervoer sterk afneemt, wat tot geopolitieke voordelen kan leiden.
- de mate van CO₂-winst (en verminderde olie-afhankelijkheid) van een combinatie wordt bepaald door de keuze voor primaire energiebron om de energiedrager te maken, door de keuze voor energiedrager en door de gekozen aandrijftechniek. Op dit moment hebben de meeste milieu-potentie: geavanceerde biobrandstoffen gemaakt uit houtachtige biomassa en brandstofcel-waterstof-voertuigen, waarbij de waterstof wordt gemaakt uit wind, zonne-energie, kernenergie en geavanceerde biomassa.
- de nieuwe brandstoffen en aandrijftechnieken hebben ten opzichte van de schoonst mogelijke conventionele technieken (technisch haalbaar) bescheiden voordelen op het vlak van verbetering van de luchtkwaliteit. Ze hebben ten opzichte van de conventionele techniek nadelen zoals ruimtebeslag (biomassa);

- onder optimistische veronderstellingen over kostenverlagingen door leer- en schaaleardeffecten bij grootschalige toepassing van de zeer schone technieken kan de kosteneffectiviteit van CO₂ van geavanceerde biobrandstoffen zich gunstig ontwikkelen: tot minder dan de kosteneffectiviteit van alternatieve CO₂-reductiemaatregelen. De kosteneffectiviteit van de brandstofcel-waterstof-voertuigen (waterstof gemaakt uit wind, zonne-energie, kernenergie en geavanceerde biomassa) blijft zelfs bij de optimistische veronderstellingen over de kostenontwikkeling matig tot slecht ten opzichte van alternatieve CO₂-reductiemaatregelen in de toekomst.

Het traject om transport duurzamer te maken via zeer schone technieken is, kortom, inderdaad *'vooralsnog duur en risicovol'*, zoals de duurzaamheidsverkenning (MNP, 2004) constateerde. De begrippen 'duur en risicovol' zijn hierbij op twee manieren op te vatten. De eerste is dat de zeer schone technieken zich technisch en economisch nog moeten bewijzen. Overheden en bedrijfsleven lopen dus risico dat ze veel geld steken in onderzoek en ontwikkeling van technieken die uiteindelijk toch niet hun potentie kunnen waarmaken. De tweede risico heeft te maken met 'lock in'. Om op termijn te komen tot inzet van de optimale technieken, is soms sprake van inzet van tijdelijk 'tussen'-technologieën die de markt als het ware rijp moeten maken voor de optimale technieken. Een actueel voorbeeld is het debat in Nederland of stimulering van de huidige generatie biobrandstoffen bijdraagt tot introductie van de beoogde geavanceerde biobrandstoffen op de lange termijn. Wanneer een dergelijke introductie niet gepaard gaat met strenge randvoorwaarden zijn er risico's dat ongewenste biobrandstoffen (weinig milieuvoordeel, relatief duur) zich volop op de markt gaan ontwikkelen. Deze ongewenste biobrandstoffen zijn dan later mogelijk erg moeilijk (bijvoorbeeld door sterke lobby van dan inmiddels gevestigde belangen) weer van de markt te krijgen ('lock in').

Is er dan helemaal geen perspectief voor de nieuwe technieken? Het bedrijfsleven en de overheid zien wel perspectief. Zo kan de visie van het bedrijfsleven op de brandstofcel worden gekarakteriseerd als voorzichtig positief. Van den Hoed (2004) schat dat tot aan 1998 de gezamenlijke auto-industrie circa 1,5 tot 2 miljard dollar investeerde in deze technologie en daarna jaarlijks ongeveer 0,5 tot 1 miljard dollar. Deze hoeveelheid geld is volgens Van den Hoed (2004) geen 'window-dressing' meer te noemen. Desondanks karakteriseert hij de

investeringen van de industrie als defensief en risicoreducerend. De diverse overheden zien ook perspectief. Een ruwe schatting op basis van openbare internetbronnen leert al snel dat de EU, VS, Japan, Korea en China de komende jaren miljarden euro's in onderzoek en ontwikkeling willen steken naar de zeer schone voertuigtechnieken.

Er zijn ook sceptici. Met veelzeggende titels, waaronder de zeer fraaie: 'The Hydrogen Emperor Has No Cloth' (Wilson en Burgh, 2003), proberen sommige onderzoekers enige nuchterheid in de droombeelden naar een 'zero emission' transportsysteem te brengen (zie bijvoorbeeld Keith en Farrell, 2003, Van den Brink en Annema, 2004). Het voornaamste punt van deze sceptici is dat waterstof, brandstofcellen en geavanceerde biobrandstoffen weliswaar aantrekkelijke beelden zijn, maar dat dit 'aantrekkelijk zijn' nog lang niet is waargemaakt, misschien wel nooit waargemaakt gaat worden en dat de technieken ook grote maatschappelijke nadelen met zich mee kunnen brengen. Bijvoorbeeld: waterstof lijkt misschien een 'schone' transportbrandstof, maar de productie van waterstof hoeft helemaal niet schoon te zijn (zie ook figuur 1 van deze paper).

In onze visie hebben de nieuwe technieken perspectieven, maar het lijkt ons wel verstandig om een voorzichtige beleidsstrategie te volgen.

Het belangrijkste in de voorzichtige beleidsstrategie is om vooralsnog breed te blijven denken. Voorgaande analyse laat immers zien dat er nog geen winnaar is onder de zeer schone voertuig- en brandstoftechnieken. Het lijkt dus verstandig niet te snel te focussen op stimulering van één techniek, zoals nu gebeurt in de EU-biobrandstoffenrichtlijn. Er zijn dan kansen op 'lock in'. Indien toch wordt gedacht om een nog niet optimale techniek reeds te stimuleren (als wegbereider naar een betere techniek), dan lijkt het stellen van harde randvoorwaarden aan deze stimulering belangrijk. Door de harde randvoorwaarden moet duidelijk worden aan de markt dat de stimulering van de suboptimale technieken tijdelijk is en dat de stimulering gericht is op verbetering en innovatie en niet op het in leven roepen van een nieuwe markt voor de suboptimale goederen.

In relatie tot voorgaande punt lijkt het ook verstandig om in de beleidsstrategie niet middelen (bepaalde technieken) voor te schrijven aan de markt, maar te sturen op einddoelen.

Beleidsinstrumenten die kunnen worden ingezet om op einddoelen te sturen zijn: verhandelbaarheid van CO₂-emissierechten, emissieheffingen, emissienormen en dergelijke. Het kan zijn dat de industrie onder druk van deze instrumenten vanwege (kosten-) effectiviteit kiest om de conventionele techniek verder te optimaliseren. Dit is niet erg, want het gaat immers niet om het innoveren als doel, maar om het behalen van bepaalde gewenst maatschappelijke einddoelen zoals CO₂-emissiereductie.

Naast het sturen op einddoelen, zoals hiervoor is betoogd, is het wel verstandig voor de overheid vooralsnog kansrijke nieuwe technieken te ondersteunen via onderzoek en ontwikkeling. Hoewel is betoogd dat hier risico's aan zitten dat na verloop van tijd blijkt dat onderzoek en ontwikkeling naar een kansloze techniekeuze financieel is gestimuleerd, laat deze paper zien dat de CO₂-winst van sommige ketens zodanig groot kan zijn dat het de moeite waard is deze risico's te lopen. Het is wel verstandig eisen te stellen aan het onderzoek, zowel op het vlak van duurzaamheid – de negatieve effecten van de nieuwe technologie moeten in het onderzoek ook geadresseerd worden - als eisen op het vlak van de periode waarbinnen een volgende sprong in emissie- of kostenverbetering moet plaatsvinden. Het onderzoek wordt zo minder vrijblijvend en beter afrekenbaar.

Referenties

- Beck, J.P., J.A. Annema, W.F.Blom, R.M.M. van den Brink, P. Hammingh, W.L.M. Smeets (2005), Effecten van aanvullende maatregelen knelpunten voor luchtkwaliteit, briefrapport MNP, april 2005
- Borgwardt (2001), R.H. (2001), Platinum, fuel cells, and future US road transport, Transportation Research Part D 6, pp. 199-207
- Brink, van den R.M.M. (2003), Scenario's voor duurzame energie in verkeer en vervoer. Beoordeling op verschillende criteria voor duurzaamheid, rapport 773002025, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven
- Brink, van den R.M.M., J. A. Annema (2004). Look before you leap! The necessity of short-term CO₂ emission reduction in transport, World Resource Review, 16, 3, pp. 330 - 356
- Bruijn, F. de (2005), The current status of fuel cell technology for mobile and stationary applications, Green Chemistry, 7, pp. 132-150

- EC (2001), White Paper. European transport policy for 2010: time to decide. Office for Official publications of the European Communities, Luxembourg
- Greene, D.L., A. Shafer (2003), Reducing Greenhouse Gas Emissions from US Transportation, PEW Center on Global Climate Change, Arlington, USA
- Johannsson, B., M. Ahman (2002). A comparison of technologies for carbon-neutral passenger transport, Transportation Research Part D., 7, 175-196
- Hoed, R. van den (2004), Driving Fuel Cell Vehicles. How established Industries React to Radical Technologies, PHD Thesis, TU Delft
- Kampman, B.E., H. Croezen, I. de Keizer, O. Bello (2003). Biomassa: tanken of stoken? Een vergelijking van inzet van biomassa in transportbrandstoffen of elektriciteitscentrales tot 2010. CE, Delft
- Kampman, B.E., L.C. den Boer, H.J. Croezen (2005), Biofuels under development. An analysis of currently available and future biofuels, and a comparison with biomass application in other sources, CE, Delft
- Keith, D. W. and A. E. Farrell (2003), Rethinking Hydrogen Cars, Science, 301, pp. 315-316
- Kolke, R. (1999), Technical Options for Abating Road Traffic Impacts; comparative study of fuel cell vehicles and vehicles with internal combustion engines, Federal Environmental Agency, Berlin
- MNP (2004), Kwaliteit en toekomst. Verkenning van duurzaamheid, Milieu- en Natuurplanbureau RIVM, Bilthoven
- MNP (2005), Milieubalans 2005, Milieu- en Natuurplanbureau, Bilthoven
- Rijkeboer, R. C., A. Dijkhuizen, N.L.J. Gense, Burgwal, E. van de, Smokers, R. (2003) Future emissions of passenger cars, expert judgement on the long term possibilities of conventional emission abatement technology. TNO Automotive, Delft, juli 2003
- Trommelen (2002), Schone auto vervuult Siberië, De Volkskrant 18 januari 2003
- Tsuchiya, H., O. Kobayashi, Fuel Cell Cost Study by Learning Curve, Annual Meeting of the International Energy Workshop, 18-20 June 2002, Stanford University, USA
- VROM (2001), Nationaal Milieubeleidsplan 4, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer
- Vuuren, D. van, M. G. J. den Elzen (2003). Regional costs and benefits of alternative post-Kyoto climate regimes, Bilthoven, MNP-RIVM
- Wilson, J, G, Burgh (2003), The Hydrogen Emperor has no Clothes, <http://evworld.com>