

BRANDSTOFCEL

Brug tussen brandstof en elektriciteit

Wereldwijd verbruiken we jaarlijks grofweg 450 triljoen Joules aan energie en volgens schattingen zal dit in 2030 nog eens met 50 procent zijn toegenomen. Tot nu toe wordt de energiemarkt vrijwel volledig beheerst door fossiele brandstoffen. Dat levert niet alleen milieuproblemen op, maar bovendien raakt de voorraad op. Energie-experts denken dat waterstof, het kleinste element, kan bijdragen aan de oplossing voor deze problemen.

In zo'n nieuwe energiehuishouding speelt de brandstofcel een cruciale rol. Het apparaat produceert elektriciteit uit waterstof en zuurstof, met als afvalproduct water. Een schoner proces lijkt ondenkbaar. Er is wel een probleem: waar haal je waterstof vandaan? Onze planeet heeft meer dan genoeg op voorraad, maar niet in vrije vorm. Het

meeste zit samen met zuurstof opgesloten in water. We kunnen waterstof dus niet delven, maar moeten het eerst maken. In combinatie met de brandstofcel biedt waterstof veel perspectieven. De benodigde technologie ontwikkelt zich in hoog tempo, maar de concurrentieslag met de klassieke brandstoffen lijkt nog niet gewonnen.

In deze Chemische Feitelijkheid

- De Context: Wat is een waterstofeconomie? Kan het milieu daar inderdaad mee gered worden?
- De Basis: Een brandstofcel zet waterstof om in elektrische energie. Hoe werkt zo'n apparaat precies?
- De Diepte: Auto's op waterstof rijden schoon, stil en zuinig. Toch valt er nog veel aan te verbeteren.

In een brandstofcel levert de reactie van waterstof met zuurstof schone elektriciteit op. Dat zou weleens de oplossing kunnen zijn voor milieuproblemen en voor het tekort aan fossiele brandstoffen. Maar dat klinkt eenvoudiger dan het is.

Brandstof voor de waterstofeconomie

Veel grote beschavingen zijn ten onder gegaan door uitputting van hun energievoorziening, betoogt de Amerikaanse energiespecialist Jeremy Rifkin. Dat maakt de huidige samenleving volgens hem kwetsbaar. De fossiele brandstoffen raken op en vervuilen het milieu in rap tempo. Bovendien is onze politieke afhankelijkheid van olieproducerende landen in onder andere het Midden-Oosten een gevaar voor de economie. Ook is energie uit fossiele brandstoffen niet voor iedereen beschikbaar, vooral niet voor de armere bevolking. Directe toegang tot elektriciteit kan hen bevrijden van de armoede, aldus de Amerikaan. In 2003 schreef Rifkin het boek *The Hydrogen Economy*, waarin hij schetst hoe onze samenleving eruit kan zien als we voor onze energievoorziening massaal zouden overstappen op waterstof.

Rifkin denkt dat de waterstofeconomie de beste manier is om onze toekomst veilig te stellen. En daarin staat hij niet alleen. Waterstof is er immers in overvloed: het element omvat zo'n 90 procent van alle massa in het heelal. Weliswaar niet als vrij waterstofgas, maar gebonden aan zuurstof in water. Daarnaast zijn alle



Brandstofcel in het vervoer: energiezuinig, fluiserstil en superschoon.



In auto's met brandstofcellen zit geen verbrandingsmotor, maar een elektromotor en in plaats van benzine of diesel wordt waterstof getankt.

organische verbindingen in bomen, planten – en ook fossiele brandstoffen – bronnen van waterstof. Waterstof is bovendien een efficiënte brandstof. Het bevat per kilo drie keer zoveel energie als benzine, terwijl het afvalproduct van de energiewinning slechts schoon water is.

STROOM EN STOOM

Een onmisbaar onderdeel van de waterstofeconomie is de brandstofcel. Dit apparaat zet waterstof met behulp van zuurstof om in stroom en stoom, ofwel elektriciteit en water. Net als in accu's of batterijen wordt via een chemische reactie elektrische energie geleverd. Het verschil is dat die na verloop van tijd leeg raken (en eventueel weer moeten worden opgeladen), terwijl brandstofcellen continu stroom leveren. Althans: zolang waterstof en zuurstof worden aangevoerd en het afvalproduct, water, wordt afgevoerd. Op die manier kan een brandstofcel bij wijze van spreken eeuwig stroom blijven opwekken.

In principe kunnen brandstofcellen fungeren als leveranciers van elektriciteit in

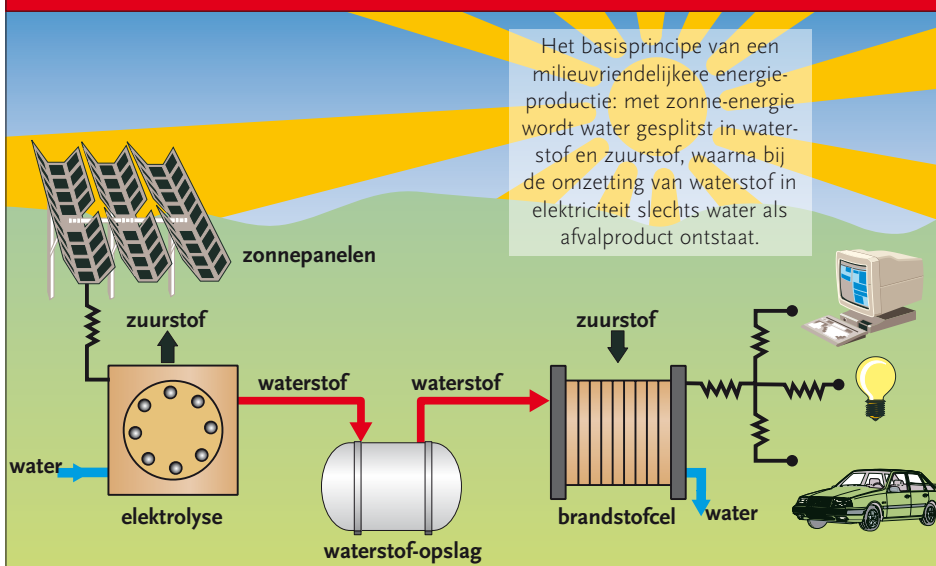
alle denkbare situaties. Er zijn bijvoorbeeld modellen ontwikkeld die als kleine elektriciteitscentrale kunnen worden toegepast; ze worden gevoed met waterstof in plaats van olie, kolen of verrijkt uranium. In een kleinere uitvoering kan een brandstofcel dienen als generator of minicentrale voor lokale stroomvoorziening in ziekenhuizen of in afgelegen gebieden waar geen elektriciteitsnet beschikbaar is. Verder zijn juist heel kleine brandstofcellen in de maak als alternatief voor batterijen in laptops of mobiele telefoons.

De toepassing van brandstofcellen in het vervoer is het verst gevorderd. Ook in ons land rijden inmiddels verschillende prototypen rond van auto's op waterstof. Eerder experimenteerde het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) samen met het Italiaanse bedrijf Piaggio al met een bijzondere scooter, die werd aangedreven door een elektromotor met een brandstofcel als stroomleverancier. Deze scooter stoot geen vieze walm uit en is fluiserstil – grote voordelen in de drukke Italiaanse steden. De meeste proeven vinden plaats in het busvervoer. Sinds 2003 loopt bijvoorbeeld het grote Europese project CUTE, *Clean Urban Transport for Europe*. Binnen dit project is een brandstofcel ontwikkeld die zeer geschikt blijkt voor toepassing in stadsbussen, maar momenteel nog wel te duur is.

WATERSTOF MAKEN

Waterstof klinkt als de ideale oplossing voor al onze energieproblemen. Waarom laat de waterstofeconomie dan nog op zich wachten? Allereerst ligt waterstof niet voor het oprapen. Je kunt het niet delven. Waterstof is daarom geen primaire energiebron zoals olie of zonne-energie, maar een energiedrager. Je moet

SCHONE ENERGIE



Een waterstofeconomie zou schoon en uiterst efficiënt zijn, zeker in vergelijking met de huidige economie die wereldwijd voor meer dan driekwart draait op olie, aardgas en kolen.

het eerst produceren, bijvoorbeeld uit water.

Dat kan via elektrolyse, waarbij water wordt gesplitst in waterstof en zuurstof. Dit proces vraagt echter minstens evenveel elektriciteit als je er later mee terugwint in een brandstofcel. Elektriciteit die bovendien ergens vandaan moet komen. Het idee van duurzame energie zou verloren gaan als daarvoor een kolencentrale zou dienen. Gebruik van elektriciteit opgewekt via waterkracht, windmolens of zonnepanelen ligt dan voor de hand. Vooral de zon, een onuitputtelijke energiebron, zou ideaal zijn. Maar zonnepanelen zijn nog veel te duur en hun rendement is nog te laag voor grootschalig gebruik.

Op dit moment wordt verreweg de meeste waterstof gemaakt door chemische omvorming van fossiele brandstof-

fen, zogeheten *reforming*. Probleem is echter dat daarbij koolstofdioxide vrijkomt. Bij gebruik van waterstof gemaakt uit aardgas of kolen levert een brandstofcel dus indirect een bijdrage aan de CO₂-emissie, al bedraagt de emissie van een waterstofauto ongeveer de helft van die van een vergelijkbare benzineauto. Bovendien is hier nog veel winst te halen door bij de waterstofproductie het vrijkomende broeikasgas af te vangen of door waterstof te maken uit biomassa.

DREMPEL

De helft van het totale energieverbruik komt voor rekening van elektriciteitscentrales. Elektriciteit is net als waterstof een energiedrager die gemaakt moet worden uit een primaire bron, tot nu toe voornamelijk fossiele brandstoffen. Helaas gaat daarbij liefst 60 procent verloren aan warmte. Bij reforming van fossiele brandstoffen naar waterstof blijft het verlies beperkt tot 20 à 30 procent.

Dit zou pleiten voor waterstof in plaats van elektriciteit als energiedrager, maar een voordeel van elektriciteit is de beschikbare infrastructuur. Via een uitgebreid netwerk wordt het geleverd aan de eindgebruikers. Het hoeft niet over de weg verplaatst te worden. Waterstof echter wel. Daar staat tegenover dat elektriciteit niet zo gemakkelijk valt op te slaan, waardoor problemen kunnen ontstaan bij een extreem grote vraag naar stroom. Voor waterstof kunnen daarentegen gemakkelijk buffervoorraden worden aangelegd om bij dag- of seizoenpieken aan de vraag

WATERSTOFBATTERIJ



Het grote voordeel van brandstofcellen is dat ze veel langer meegaan dan de huidige lithium-ion batterijen. Niet waterstof maar methanol is de brandstof voor de miniatur waterstofcellen in mobieltjes en laptops. De cartridges met methanol zijn gemakkelijk te verwisselen. Met slechts 2cc kan een MP3-speler 20 uur lang muziek spelen. Ook zijn er inmiddels kleine draagbare brandstofcellen te koop waarmee je batterijen in mobiele apparatuur kunt opladen. Het apparaatje kan worden gekoppeld aan een fles waterstof waarna het zo'n tien uur lang stroom levert.



te voldoen. Hierbij gelden natuurlijk wel belangrijke veiligheidsvoorwaarden, want waterstof is een explosief en brandbaar gas. Binnen de EU wordt gewerkt aan richtlijnen en nieuwe regels voor transport, opslag en gebruik van waterstof. Het wordt al op grote schaal gebruikt als industrieel product, waarbij al veel ervaring is opgedaan om het veilig te vervoeren via een speciaal pijpleidingennet.

Niet de brandstofceltechnologie vormt de belangrijke drempel voor de waterstofeconomie, maar vooral de duurzame productie van waterstofgas en een veilig en efficiënt distributienetwerk. IJsland loopt wat dit betreft voorop. Elektriciteit wordt er gewonnen uit geothermische energie en waterkracht, waardoor ruim 70 procent van de energiebehoefte uit duurzame bronnen komt. Het land neemt deel aan vrijwel alle experimenten met brandstofcellen. De IJslanders zien waterstof niet alleen als een mogelijkheid om in eigen land verkeer en energievoorziening milieuvriendelijker te maken, maar ook om schone energie – in de vorm van waterstof – te kunnen exporteren. Wellicht kan schone waterstof van dit eiland de ontwikkelingen van de waterstofeconomie op het Europese vasteland versnellen.



Ook Amsterdamse stadsbussen maken deel uit van het Europese Clean Urban Transport for Europe-project (CUTE), waarbij diverse typen brandstofcellen worden getest.

Eind negentiende eeuw verloor de brandstofcel de strijd met de verbrandingsmotor. Dankzij NASA kreeg de techniek een nieuwe kans. Het hart van de cel, het **elektrolyt**, bepaalt de mogelijkheden en beperkingen.

Energie uit chemie

Een stroompje door een glas water levert waterstofgas en zuurstofgas. Het is het bekende elektrolyseproefje in de scheikundelokalen. De Britse jurist en natuurwetenschapper Sir William Robert Grove paste begin negentiende eeuw dit principe toe om waterstof te maken voor zijn experimenten. Hij was vooral geïnteresseerd in batterijen en zocht naar een ontwerp dat de meeste elektriciteit opleverde. Daarbij stuitte hij op een artikel van de Zwitserse scheikundige Christian Schönbein, die schreef dat hij elektriciteit had opgewekt uit de chemische reactie tussen waterstof en zuurstof op plaatjes platina.

Grove realiseerde zich onmiddellijk het praktische nut van deze omgekeerde elektrolyse en in 1843 publiceerde hij over de eerste 'gasbatterij'. Die bestond uit een serie cellen van telkens één buis gevuld met zuurstof en een tweede met waterstof in een bekersglas met zwavelzuur en een platina staafje. Eén cel leverde ongeveer 1 volt aan spanning. Grove's gasbatterij, die later brandstofcel werd gedoopt, kreeg

in 1875 concurrentie van de verbrandingsmotor. Die bleek al snel veel krachtiger, lichter en minder storingsgevoelig.

De brandstofcel leek dan ook als voetnoot in de techniekgeschiedenis te eindigen. Totdat de Amerikaanse NASA eind jaren zestig van de vorige eeuw ernstig verlegen zat om een nieuw soort energievoorziening aan boord van ruimtevaartuigen. Bestaande batterijen en accu's waren te zwaar, zonnecellen te duur en kernenergie aan boord van een raket was onacceptabel. Een brandstofcel bleek betrouwbaar en leverde met wat aanpassingen voldoende elektriciteit. De afvalstof, water, konden de astronauten drinken.

ELEKTROCHEMISCH APPARAAT

Een brandstofcel is een elektrochemisch apparaat dat net als een batterij en een accu chemische energie omzet in elektrische energie. Aan de elektroden (anode en kathode) vinden oxidatie- en reductiereacties plaats. Omdat de elektroden gescheiden zijn, wordt aan de ene een negatieve lading opgebouwd en aan de





andere een positieve. De elektrische energie kan aan de reacties worden onttrokken door een stroomkring aan te brengen. Dit gebeurt met een elektrolyt die het ladingtransport tussen beide elektroden mogelijk maakt, zodat de stroomkring sluit. Anders dan een batterij of accu, raakt een brandstofcel tijdens gebruik niet leeg, omdat voortdurend nieuwe brandstof van buiten wordt aangevoerd.

Het principe van de hedendaagse brandstofcellen is niet wezenlijk anders dan Grove's gasbatterij: een cel met een anode plus kathode, met daartussen een elektrolyt. De anode wordt gevoed met waterstof, de kathode met zuurstof. Buitenom loopt een elektriciteitsdraad. Een katalysator, bijvoorbeeld platina, splitst waterstof (H_2) in protonen en elektronen. De protonen gaan door de elektrolyt naar de kathode, terwijl de elektronen door de draad stromen. Bij de kathode komen protonen en elektronen weer bij elkaar en reageren met zuurstof (O_2), waarbij water ontstaat. Eén cel levert nog steeds maar een spanning van amper 1 volt. Dat is in de praktijk te weinig. Door meerdere cellen in serie aan te sluiten kan een grotere spanning worden verkregen. Zo'n rij van vaak enkele tientallen cellen heet een *stack*.

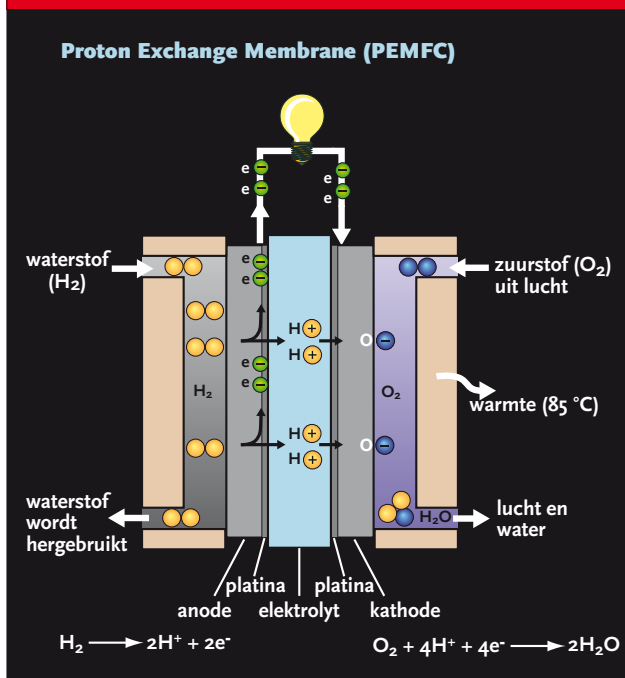
SOORTEN EN MATEN

Voor allerlei verschillende toepassingen zijn inmiddels vele soorten brandstofcellen ontwikkeld. Ze worden vernoemd naar de aard van de gebruikte elektrolyt, die het hart vormt van de cel. De elektrolyt bepaalt de mogelijkheden én beperkingen. Zo wordt in de ruimtevaart de *alkaline fuel cell* (AFC) gebruikt met kaliumhydroxide, en voor vervoermiddelen vooral de *proton exchange membrane*

ELEKTROLYT MAAKT HET VERSCHIL

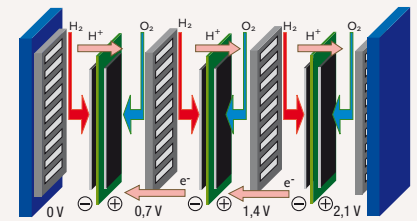
Verskillende toepassingen voor verschillende typen brandstofcellen				
	PEM FC	DMFC	SOFC	AFC
Naam	Proton Exchange Membrane	Direct Methanol	Solid Oxide	Alkaline
Brandstof	H_2	methanol	H_2 , CO	H_2
Elektrolyt	H^+ geleidend polymeer	H^+ geleidend polymeer	vast oxide	kaliumhydroxide
Mobiele ion	H^+	H^+	O^{2-}	OH^-

HOE WERKT EEN BRANDSTOFCEL



De brandstofcel bevat twee poreuze koolstofelektrodes die verbonden zijn door een elektrolyt. Op de elektrode is een dun laagje platina als katalysator aangebracht. Aan de anode wordt waterstof toegevoerd dat gesplitst wordt in protonen en elektronen. De elektronen leveren stroom in het externe circuit; de protonen gaan via een protonselectief membraan (*Proton Exchange Membrane*) naar de kathode. Aan de kathode wordt zuurstof (lucht) aangevoerd dat met de protonen reageert tot water.

CELLEN STAPELEN



Een enkele brandstofcel produceert genoeg elektriciteit (tussen 0,5 en 0,9 V) voor enkel de kleinste toepassing. Daarom worden brandstofcellen ook wel in serie samengevoegd tot een brandstofcelstapeling (*stack*). Een brandstofcel-stack kan uit honderden brandstofcellen bestaan.



Brandstofcel bestaande uit enige tientallen cellen gestapeld tot een stack.

fuel cell (PEMFC) met een protongeleitend polymeer. Om protonen door te laten van de anode- naar de kathodezijde bevat deze elektrolyt zure groepen in een waterig medium. Behalve deze hydrofiele plaatsen heeft het polymeer ook hydrofobe regio's die ervoor zorgen dat aan de kathodezijde het gevormde water wordt afgevoerd. Voor de mechanische sterkte zijn polymeerketens nodig. Behalve in transporttoepassingen wordt de PEM ook gebruikt in de *direct methanol fuel cell* (DMFC). Deze cel is gebaseerd op methanol in plaats van waterstof en wordt toegepast in laptops en mobieltjes als vervanger van batterijen. Methanol levert de protonen aan de anodezijde. Doordat methanol ook koolstofatomen bevat komt

bij de werking van deze brandstofcel koolstofdioxide vrij, maar de uitstoot is bij deze miniatuurbrandstofcellen zeer laag.

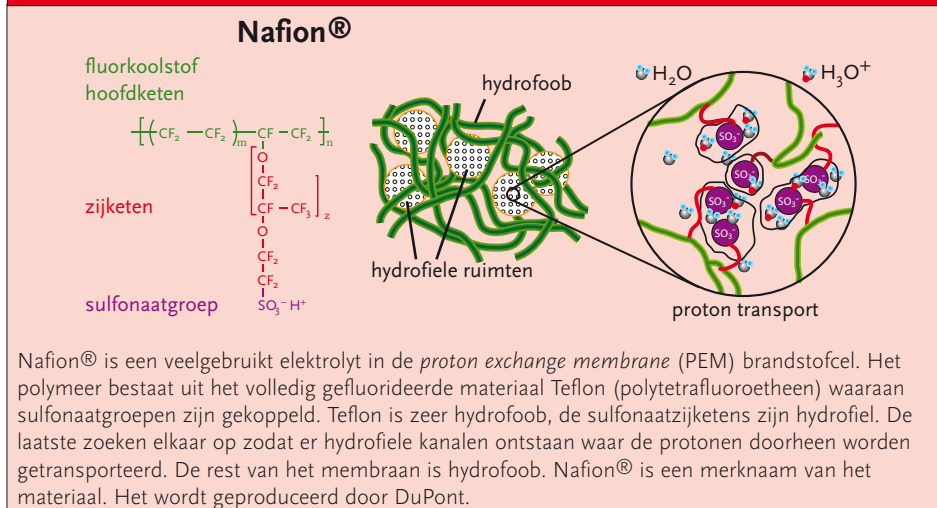
De hoge-temperatuur *solid oxide fuel cell* (SOFC) is niet geschikt voor aandrijving van een auto, omdat deze cel optimaal opereert bij een temperatuur van ongeveer $800\text{ }^\circ\text{C}$. Bij gebruik in auto's zou het veel te lang duren eer deze temperatuur is bereikt en de auto kan worden gestart. Dit type cel is ontwikkeld voor toepassing in een mini-elektriciteitscentrale. Bijvoorbeeld in een huis of een kleine woonwijk, of als hulpvermogen in koelvries-vrachtwagens die ook elektriciteit nodig hebben als de motor stilstaat. Het vaste oxide-elektrolyt in een SOFC is bijvoorbeeld zirconia (ZrO_2) gemengd

met yttria (Y_2O_3). De redoxreactie die plaatsvindt aan de elektroden is anders dan in de PEM-cel: aan de kathode worden zuurstofionen gevormd (O^{2-}), aan de anode kunnen verschillende reacties plaatsvinden – onder andere van koolmonoxide met waterstof tot water en kooldioxide. Hierdoor is het mogelijk een SOFC niet alleen met zuivere waterstof te voeden maar ook met synthesegas, een mengsel van koolmonoxide (CO) en waterstof (H_2) dat kan worden gemaakt uit fossiele brandstoffen zoals aardgas, diesel of kerosine.

HOOG RENDEMENT

In een brandstofcel vindt geen verbranding plaats, maar wordt waterstof rechtstreeks omgezet in elektriciteit. Deze elektrochemische reactie van waterstof met zuurstof verloopt veel efficiënter dan een klassieke verbranding, waarbij energie in de vorm van warmte vrijkomt. In de zogeheten Carnot-cyclus wordt de chemische energie namelijk eerst omgezet in warmte en pas daarna in bijvoorbeeld elektrische energie. Tijdens deze laatste stap treden altijd grote verliezen op, omdat maar een deel van de warmte kan worden omgezet. De directe omzetting leidt tot een uitzonderlijk hoog rendement. Een auto met brandstofcel benut 95 procent van de energie-inhoud van waterstof, terwijl de verbrandingsmotor in een benzineauto nauwelijks 40 procent van de energie weet om te zetten in netto beweging.

SELECTIEF PROTONTRANSPORT



Brandstofcellen en waterstoftechnologie staan wereldwijd in de belangstelling. Vooral in het vervoer wordt volop **geëxperimenteerd** en de verwachtingen zijn hoog. Onderzoekers hebben voorlopig echter hun handen vol aan verbeterpunten.

Prestaties op de proef gesteld

Voertuigen met brandstofcellen bevinden zich momenteel in het stadium van onderzoek, ontwikkeling en demonstratie. De ene na de andere autofabrikant komt met prototypes. Ze zijn schoon en stil en kunnen bij grootschalige introductie een belangrijke bijdrage leveren aan de verbetering van het milieu. Maar er klinkt ook kritiek. De brandstofcelauto zou niet snel genoeg zijn en er bestaan twijfels over de veiligheid van een waterstoftank aan boord, die bovendien veel te veel ruimte zou innemen. De critici worden op hun wenken bediend: verschillende fabrikanten hebben inmiddels modellen ontwikkeld die niet onderdoen voor een auto met een verbrandingsmotor. Zo heeft de FCX van Honda een actieradius van 400 km en een topsnelheid van 160 km/u. De auto telt twee waterstoftanks van in totaal ruim

150 liter; bij 350 bar waterstofdruk past daar 3,75 kilo waterstof in.

Om prestaties te verbeteren worden de auto-ontwerpen telkens aangepast. Zo zijn er uitvoeringen met aan ieder achterwiel een klein elektromotortje dat extra kracht levert. Soms is ook een condensator opgenomen om extra kracht te leveren bij het wegrijden. Dat kost natuurlijk energie, maar die wordt terugverdiend door hergebruik van het energieverlies tijdens het remmen. Bij personenauto's ligt de brandstofcel zelf meestal in een dubbele bodem onder de passagiersstoel. De hogedruktank met waterstof hangt onder de kofferbak, waardoor er nog voldoende ruimte overblijft voor de bagage.

STRUIKELBLOK

In de waterstofauto's wordt vooral de *proton-exchange-membrane* (PEM)

brandstofcel gebruikt. De levensduur van de huidige PEM-brandstofcellen bedraagt theoretisch 20.000 uur, terwijl voor een personenauto 5.000 uur voldoende zou zijn. Dat komt overeen met 300.000 km. Maar bij gebruik in de praktijk (koude, hitte, droogte) blijkt de levensduur heel wat korter. Probleem is de optimale bedrijfstemperatuur van de cel. Die ligt rond de 80 °C. Dat lijkt een comfortabele temperatuur, maar voor toepassing in een auto zou ongeveer 120°C gewenst zijn. Bij een groter verschil met de omgevingstemperatuur verloopt de afvoer van warmte (waardoor de cel niet té warm wordt) veel gemakkelijker. Een brandstofcel met een hogere bedrijfstemperatuur zou de cel en de aandrijving van de auto eenvoudiger, lichter en goedkoper maken.

Het protongeleidend membraan vormt het grootste struikelblok. Het tot nu toe meest geschikte materiaal, perfluorsulfonzuur (Nafion), moet verzadigd zijn met water voor een goede geleiding van protonen. Bij hogere temperaturen verdampt het water te snel en daalt het vermogen van de cel. Het bedrijf Gore (bekend van het waterdichte textiel *GoreTex*) ontwikkelde een poreus polymeer van polytetrafluoroethyleen (PTFE) dat gevuld is met perfluorosulfonzuur. Bij proeven met een membraan van dit materiaal is al een levensduur van 8.000 uur bereikt. De efficiëntie van het protontransport blijkt bovendien hoger dan in Nafion. PTFE is namelijk zó sterk dat het membraan heel dun gemaakt kan worden, waardoor het protontransport minder bijdraagt aan verlies in energieopbrengst.

Het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) ontwikkelde samen met DSM een vergelijkbaar systeem op basis van poreus polyethyleen, waarbij de hol-

HOE SCHOON EN HOE ZUINIG

Het rendement van de elektrochemische reactie tussen waterstof en zuurstof in een brandstofcel is hoog, waardoor een voertuig met zo'n cel energiezuinig is. Omdat geen verbranding plaatsvindt ontstaan geen stikstofoxiden, geen koolwaterstoffen, geen roetdeeltjes en ook geen koolstofdioxide – in elk geval niet tijdens het rijden. Maar bij de productie van waterstof komt natuurlijk wel CO₂ vrij wanneer het gas wordt gewonnen uit fossiele brandstoffen.

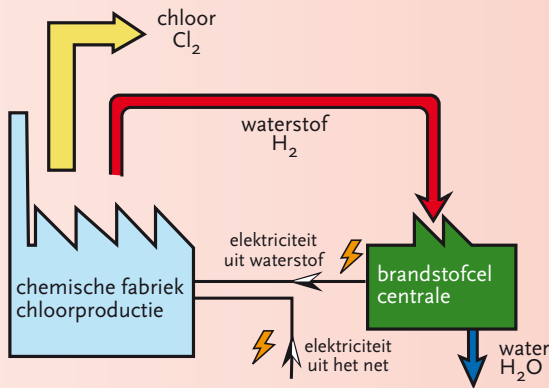
Om het energieverbruik en de emissies van een verbrandingsmotor en een brandstofcel eerlijk te vergelijken moet dan ook de complete energieketen worden bekeken. Dat gebeurt in een zogeheten *well-to-wheel* analyse, waarbij van elke stap wordt berekend hoeveel energie verloren gaat en wat de emissies zijn.

EEN AUTORIT VAN HONDERD KILOMETER



Energieverbruik	283 MJ	196 MJ
Emissies CO ₂	21 kg	11 kg
CO	48 g	0 g
NO _x	3 g	0 g
HC	3 g	0 g

POWER PLANT OP BRANDSTOFCEL



Bij de chloorfabriek van Akzo Nobel in Delfzijl is een elektriciteitscentrale gebouwd die gebruik maakt van een PEM-brandstofcel. Het is de eerste centrale in Europa van deze omvang, 120 kW. De benodigde waterstof komt vrij als bijproduct bij het maken van chloor. De opgewekte elektriciteit wordt direct teruggeleverd aan de fabriek.

tes worden gevuld met Nafion. Bijzonder bij dit membraan is dat de matrix niet gefluorideerd is. Lange tijd werd gedacht dat alleen volledig gefluorideerde polymeren bestand zouden zijn tegen de agressieve (zure) omgeving waarin redoxreacties plaatsvinden. De levensduur van deze cel bedraagt echter 3.000 uur bij onafgebroken gebruik. Honda past in zijn FCX-brandstofcelauto een membraan toe dat gebaseerd is op aromatische verbindingen. Daarmee kan de auto bij lagere temperatuur starten (-20 °C) en toch bij hogere temperatuur goed functioneren (tot 95 °C). Het ideale materiaal is nog niet gevonden. Onderzoekers denken dat dat nog zeker vijf jaar kan duren.

CONCURRENTIESLAG

Om de brandstofcel een aantrekkelijk alternatief te maken voor de verbrandingsmotor moet op het gebied van gewicht, vermogen en kosten nog vooruitgang worden geboekt. Maar er gelden nogal wat randvoorwaarden. Het gewicht moet laag zijn; niet hoger dan een kilo per geleverde kilowatt. Het vermogen moet minimaal 75 kW bedragen, maar liefst

hoger: in de buurt van de 100 à 150 kW, het vermogen dat een gemiddelde auto op fossiele brandstof levert. Verbetering van het vermogen gaat echter ten koste van het gewicht.

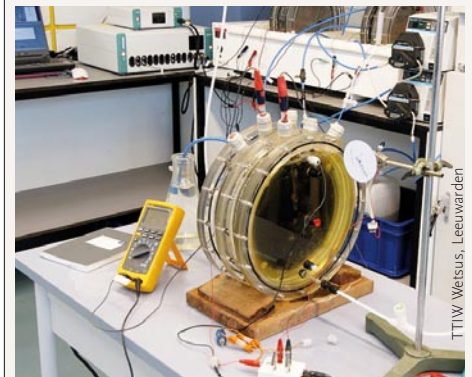
Verder mag ook de prijs per kW niet boven de vijftig dollar uitkomen. Vooral efficiëntere katalyse zou bijdragen aan een hoger vermogen. Maar dat gaat ten koste van de prijs, omdat er onder andere meer platina nodig zal zijn. Momenteel zit er ongeveer 0,4 gram platina per kW in een cel, ofwel dertig gram voor een auto van 75 kW. De hoeveelheid platina moet nog met de helft dalen. Men probeert dit door het platina fijner te verdelen over de grafielektrodes. Ook wordt onderzocht of toepassing van een legering de katalyse efficiënter maakt. Platina gemengd met ruthenium is geschikt om aan de anode te gebruiken, platina met cobalt levert aan de kathode een betere stabiliteit. Dergelijke legeringen zouden door besparing op platina voordeliger zijn.

WATERSTOFBESTENDIG

Tot slot moeten er ook alternatieve materialen worden ontwikkeld, omdat waterstof reageert met de gangbare metalen waarvan gascilinders en pijpleidingen zijn gemaakt. Een tijd lang dacht men dat metaalhydrides geschikt zouden zijn. Deze poreuze materialen werken als een soort spons en nemen waterstof reversibel op in hun holtes. Dat is echter een exotherm proces en voor het vrijmaken is dus energie nodig. De brandstoftank van een auto zou dan verwarmd moeten worden, waardoor een aanzienlijk deel van de energie-inhoud van waterstof wordt verbruikt voor opslag.

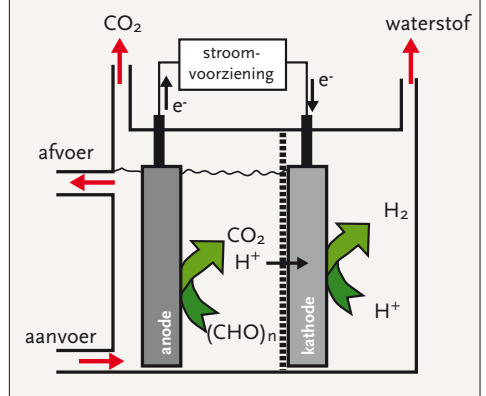
Onderzoekers proberen nieuwe materialen te vinden voor waterstofopslag,

BIOLOGISCHE BRANDSTOFCEL



ENERGIE UIT AFVALWATER

Biologische brandstofcellen functioneren volgens hetzelfde principe als een normale brandstofcel. Organisch materiaal (CHO) in afvalwater wordt door bacteriën omgezet in protonen en elektronen. De protonen diffunderen door een protonselectief membraan. De elektronen worden door een extern circuit geleid zodat elektriciteit wordt opgewekt. Aan de andere zijde van het membraan komen de elektronen en protonen weer bij elkaar en reageren samen met zuurstof tot water. Hetzelfde bio-elektrochemische principe wordt ook gebruikt om waterstof te maken uit afvalwater in plaats van elektriciteit. Bij de biologische waterstofproductie uit afvalwater wordt aan de kathode stroom toegevoerd in plaats van zuurstof, waardoor waterstof ontstaat in plaats van water.



bijvoorbeeld nanogestructureerde magnesiumhydrides. Kleine deeltjes of dunne lagen moeten ervoor zorgen dat de temperatuur waarbij het waterstofgas weer vrijkomt niet te hoog is. Daarnaast wordt de mogelijkheid onderzocht om waterstof op te slaan in alanaten, verbindingen van natrium, aluminium en waterstof. Er past meer dan de gewenste 5 gewichtsprocent waterstof in dit materiaal en het desorbeert al bij 77 °C, wat toepassing in een PEM-brandstofcel mogelijk maakt.



Vloeibare waterstof met een temperatuur van 30 Kelvin kan worden opgeslagen in enkelwandige of dubbelwandige, vacuümgeïsoleerde tanks. Doorgaans streeft men naar zo groot mogelijke containers onder zo hoog mogelijke druk.

Meer weten

AANBEVOLEN LITERATUUR

- Ouwehand J. *et al.*, *Toegepaste Energietechniek*, Sdu Uitgevers, Den Haag (2005), hoofdstuk 12.
- US Department of Energy, *Fuel Cell Handbook*, 7th ed. (2004).
- De Bruijn F., The current status of fuel cell technology for mobile and stationary applications, *Green Chemistry* 2005;7:132-150.
- Rifkin J., *The hydrogen economy*, New York (2002), ISBN 1585421936.

AANBEVOLEN WEBSITES

- www.minihydrogen.com: presentaties, filmpjes en experimenten over waterstof en brandstofcellen.
- <http://noorderlicht.vpro.nl/dossiers/11867650/>: dossier Waterstofeconomie met documentaires en artikelen.
- www.ecn.nl/h2sf/: Unit Waterstof en Schoon Fossiel van ECN.
- www.shellhydrogen.com: site van Shell Hydrogen BV.
- www.brandstofcel.com: algemene site over brandstofcellen en hun toepassingen.
- www.geosnergie.nl/miniWaterstof.htm: technologie van kleine brandstofcellen uitgelegd.

VOOR OP SCHOOL

1. De veiligheid van rijden op waterstof is punt van discussie. Geef drie redenen waarom waterstof onveilig zou zijn dan benzine. Noem ook drie maatregelen of tegenargumenten.
2. Waarom is waterstof een energiedrager en niet een energiebron? Elektriciteit is ook een energiedrager. Noem een voordeel en een nadeel ten opzicht van waterstof.
3. Minibrandstofcellen op methanol bestaan ook. Hoe werken die? Geef de elektrode reacties. Denk je dat deze cellen de huidige lithium-ionbatterijen zullen kunnen vervangen? Geef een argument voor en tegen.
4. Twee cc (milliliter) methanol is voldoende voor 20 uur muziek op je MP3. Hoeveel Joule levert twee cc methanol bij volledige verbranding tot koolstofdioxide en water? Hoeveel



Foto: Bastienne Wentzel

De HydroGEM, ontwikkeld en getest bij ECN (Petten), wordt aangedreven door een brandstofcel die een vermogen levert van 5 kW. De waterstofauto is geschikt voor lokaal transport bij vliegvelden, stations, distributiecentra, ziekenhuizen etcetera. Het voertuig heeft een laadvermogen van tweehonderd kilogram en rijdt op een tank van 76 liter (200 bar) ongeveer tweehonderd kilometer bij een maximum snelheid van 40 km/u.

Watt levert 2 cc methanol in die twee uur. Hoeveel Watt verbruikt je MP3? Gebruik o.a. Binas 57a en 57B.

5. Geef de halfreacties die optreden in de brandstofcel met waterstof en (lucht)zuurstof. Gebruik Binas 48. Wat is de celspanning onder standaardomstandigheden?
6. Waardoor wijkt de celspanning veelal af van de waarde die je volgens Binas berekent?
7. Noem drie eisen waaraan een membraan voor een PEM-brandstofcel moet voldoen.
8. Zoek de elektrode reacties op voor een PEM- en een SOFC-cel. Waarom is verontreiniging met CO voor de eerste wél een probleem en voor de tweede niet?
9. Wat is het verschil tussen biologische brandstofcel en een chemische brandstofcel. Hoe kun je waterstof maken uit afvalwater?
10. Welke brandstofcel zou geschikt kunnen zijn voor de scheepvaart? (Tip: schippers houden niet van explosieve waterstof, zij varen liever op diesel.)

COLOFON

Chemische Feitelikheden: actuele encyclopedie over moleculen, mensen, materialen en milieu. Losbladige uitgave van de KNCV, verschijnt drie maal per jaar met in totaal tien onderwerpen.

Redactie:
Alexander Duyndam (C2W)
Marian van Opstal (Bèta Communicaties)
Arthur van Zuylen (Bèta Communicaties)
Gerard Stout (Noordelijke Hogeschool Leeuwarden)

Productie en realisatie:
Bèta Communicaties
tel. 070-306 07 26
betacom@planet.nl

Basisontwerp: Menno Landstra

Fotoverantwoording:
Foto's zonder bronvermelding zijn afkomstig van www.istockphoto.com

Uitgever:
Roeland Dobbelaer
Bèta Publishers
Postbus 249, 2260 AE Leidschendam
tel. 070-444 06 00
fax 070-337 87 99
info@betapublishers.nl

Abonnementen opgeven:
Abonnementenland
De Trompet 1739, 1967 DB Heemskerk
tel. 0251-31 39 39
fax 0251-31 04 05
aboservice@aboland.nl

Abonnementen:
• papieren editie en toegang tot digitaal archief op internet: (inclusief verzamelmap): € 75,-
KNCV- en KVCV-leden: € 65,-

• alleen toegang tot digitaal archief op internet: € 60,-
KNCV- en KVCV-leden: € 50,-

Abonnementen kunnen elk moment ingaan. Abonnementen worden automatisch verlengd tenzij vóór 1 november van het lopende jaar een schriftelijke opzegging is ontvangen.

BRANDSTOFCEL

editie 53
nummer 236
juni 2007

Met dank aan:

- Dr. Frank de Bruijn, ECN, Petten
e-mail: debruijn@ecn.nl
- Prof.dr. Gert Jan Kramer, TU Eindhoven en Shell Hydrogen BV, Amsterdam
e-mail: gertjan.kramer@shell.com