



TECHNISCH TALENT
KRIJGT TOEKOMST
mechanica/elektriciteit - hout - auto

VERY

TECHNICAL

INDEED

INDUSTRIËLE WETENSCHAPPEN

Brandstofcel

Leerling(en) :

Declercq Pieter
Vancoullie Tim

Mentor :

Verhaeghe D.

2003-2004

VTI TorhoutSint-Aloysius | Papebrugstraat 8a, 8820 Torhout
Telefoon: 050 23 15 15 | Fax: 050 23 15 25
E-mail: vti@sint-rembert.be | Site: <http://vtiweb.sint-rembert.be/>
Site GIP'S 6IW: www.gip6iw.be

Voorwoord

Als onderwerp voor onze geïntegreerde proef hebben we de brandstofcel gekozen. De brandstofcel wordt in de media genoemd als één van de wondertechnologieën in de toekomstige energievoorziening. De brandstofcel is zeer interessant omdat ze milieuvriendelijker en compacter is dan de huidige systemen. Ze heeft ook een beter rendement. Bovendien komen er bij de bespreking van de brandstofcel veel onderdelen van ons leerpakket aan bod, bijvoorbeeld chemie en elektriciteit, want er gebeurt onder andere een elektrochemische reactie in de brandstofcel.

Het grootste gedeelte van onze GIP is theoretisch, daarin proberen we het principe van de brandstofcel volledig onder de knie te krijgen en te bespreken. Ook zullen we enkele toepassingen waarin men brandstofcellen gebruikt bekijken en indien mogelijk bespreken. Enkele toepassingen waarin men de brandstofcel probeert te integreren of waarbij men in de toekomst gebruik wil maken van brandstofcellen zijn : voertuigen die werken op brandstofcellen (heel wat autoconstructeurs zijn bezig met het ontwerpen van wagens die rijden op brandstofcellen), draagbare toepassingen (vb. laptops, mobiele telefoons, ...), de ruimtevaart (in de ruimtevaart wordt de brandstofcel reeds gebruikt), ... Voor het kleinere praktische gedeelte hebben we ons een proefstandje aangeschaft, waarop we metingen zullen uitvoeren en waarmee proefjes zullen doen.

De brandstofcel is een toestel dat chemische energie omzet in elektrische energie, door reactie met een oxidans. De brandstofcel werkt meestal op waterstof en zuurstof, maar ze kan via een reformer (= toestel dat waterstof uit brandstof haalt) ook op brandstof werken.

Om het lezen te vergemakkelijken zit er een blad met de uitleg van enkele afkortingen bij de bijlagen. Dit blad kun je openklappen.

Inhoud

Voorwoord

Deel 1 : Bespreking van de brandstofcel

1	Korte geschiedennis van de brandstofcel.....	6
2	Wat is een brandstofcel?	7
2.1	De elektrochemische cel (galvanische cel of batterij).....	7
2.2	Werkingsprincipe van een elektrochemische cel	7
2.3	De opbouw van een elektrochemische cel	10
2.4	Verskil tussen batterij en brandstofcel.....	10
2.5	De brandstofcel	11
3	Opbouw van de brandstofcel.....	12
3.1	Constructie	12
4	Werking van de brandstofcel.....	13
4.1	De werking	13
4.2	Halfreacties.....	13
5	Effecten op de prestatie van de brandstofcel.....	14
5.1	Algemene ontwerpkenmerken.....	14
5.2	De brandstofcelprestatie	14
5.2.1	Spanningsefficiëntie	15
5.2.2	Ohmse weerstanden.....	16
5.2.3	Kinetische prestaties.....	17
5.2.4	Massatransporteffecten.....	18
6	MEA-componenten en hun werking	19
6.1	Het membraan	20
6.1.1	Perfluorinated membranen.....	21
6.1.2	De rol van het water	22
6.1.3	Alternatieve membraanmaterialen	22
6.2	De elektrodes.....	23
6.3	MEA-ontwikkeling en-uitvoering.....	25
6.4	Andere apparatuur in de brandstofcel	25
6.4.1	Bipolaire platen	25
6.4.2	Koelplaten en bevochtigers	30
6.4.3	Andere componenten v.....	31
6.4.4	an een brandstofcelsysteem.....	32
7	Katalysatoren.....	33
7.1	Elektrokatalysatoren voor de PEMFC.....	33
7.2	Anode katalysatoren	34
7.2.1	H ₂ elektro-oxidatie	34
7.2.2	Het effect van koolstofmonoxide	35
7.2.3	Het effect van koolstofdioxide	35
7.3	Aanpak van de verbeterde tolerantie	36
7.4	Kathode katalysatoren	36
7.5	Katalysatoren zonder platina.....	37
7.6	Gebruik van airbleeds.....	38
8	Het brandstofprobleem.....	39
8.1	Technologie van brandstofopslag.....	40
8.1.1	Opslag in drukcilinders	40

8.1.2	Voeibare waterstof	41
8.1.3	Metaal hydride.....	42
8.1.4	Koolstofpapier	43
8.2	Opslagcapaciteit	43
8.3	Omvormingstechnologie of reforming.....	43
8.3.1	Stoomomzetting of steam reforming (SR)	44
8.3.2	Eenzijdige oxidatie of partial oxidation (POX).....	45
8.3.3	Autothermal reforming (ATR).....	45
8.3.4	Vergelijking van de omvormtechnologieën	45
8.3.5	Elektrolyse.....	46
8.3.6	Gasreiniging	47
8.3.7	Andere processen	47
8.4	Verwijdering van Koolstofoxide	47
8.4.1	Methanation.....	48
8.4.2	Voorkeuroxidatie.....	48
8.4.3	Palladiummembranen.....	48
8.4.4	Anode aanpassingen.....	49

Deel 2 : Soorten brandstofcellen

9	Soorten brandstofcellen.....	51
9.1	Inleiding	51
9.2	Prestaties.....	52
9.2.1	Het Alkaline Fuel Cell (AFC) Systeem.....	53
9.2.2	Het Proton-Exchange-Membrane-Fuel-Cell (PEMFC) Systeem.....	54
9.2.3	Het Direct-Methanol-Fuel-Cell (DMFC) Systeem	56
9.2.4	Het Phosphoric- Acid-Fuel-Cell (PAFC) Systeem	58
9.2.5	Het Molten-Carbonate-Fuel-Cell (MCFC) systeem.....	59
9.2.6	Het Solide-Oxide-Fuel-Cell (SOFC) systeem.....	61
9.3	Samenvatting en besluit	62

Deel 3 : Toepassingen met brandstofcellen

10	Draagbare toepassingen.....	64
10.1	Wat is een draagbare toepassing.	64
10.1.1	Definitie.....	64
10.1.2	Toepassingen	65
10.2	Prototypes en voorbeelden	66
10.2.1	Batterijvervangers	66
10.2.2	Verafgelegen vermogengeneratie en back-up oplossingen	74
10.2.3	Hulpvermogeneenheden (APU's) voor auto's	75
10.2.4	Demonstratiemateriaal en gadgets.....	77
10.3	Conclusies	78
11	Autotoepassingen	79
11.1	Brandstofceltoepassingen in de autotechnologie	79
11.1.1	Aandrijvingsvermogengeneratie	80
11.1.2	Hulpvermogengeneratie	80
11.2	Key ontwikkelaars van autotechnologie.....	81
11.2.1	General Motors, Opel, en Suzuki	81
11.2.2	Toyota Motor Corporation en Daihatsu	87
11.2.3	Ballard Power Systems, DaimlerChrysler, Ford, en Mazda.....	92
11.2.4	Nissan	111
11.2.5	Honda	113

11.2.6	UTC Fuel Cells en Shell Hydrogen.....	115
11.2.7	Huyndai	116
11.2.8	Andere ontwikkelaars.....	118
11.3	Conclusie.....	120

Deel 4 : Didactische stand

12	Didactische stand.....	122
12.1	De volledige auto met al zijn onderdelen.....	122
12.2	de werking	124
12.3	werking van de zonnecel	125
12.4	Elektrolyse.....	126
12.5	Werking van de brandstofcel.....	127
12.5.1	opbouw van de gebruikte brandstofcel.....	127
12.6	spanningen en stromen in het didactische toestel.....	128
12.6.1	openkring spanning van de zonnecel	128
12.6.2	spanning bij aansluiten van elektrolyse toestel	128
12.6.3	openkring spanning van de brandstofcel	129
12.6.4	spanning bij aansluiten van de motor	129

Dankwoord

Bijlagen

Deel 1 : Bespreking van de brandstofcel

1 Korte geschiedenis van de brandstofcel

Het principe van de brandstofcel is al meer dan een eeuw bekend. Het werd bedacht in 1838 door de chemicus Grove. Toen werd het systeem nog "*gaseous voltaic battery*" genoemd. Nu wordt dit *brandstofcel* genoemd. Bij deze brandstofcel gebruikte men platina elektrodes en zwavelzuur als elektrolyt. De reactanten waren: waterstof en zuurstof. Toen was platina al gekend als katalysator voor de reactie tussen zuurstof en waterstof. De eerste experimenten op deze brandstofcel waren zeer belangrijk voor verdere ontwikkeling en vonden plaats in het jaar 1839. In 1922 heeft Evans het principe de naam *brandstofcel* gegeven. *Brandstofcellen* worden nu al jaren gebruikt in de ruimtevaart. Ze voorzien de astronauten van drinkbaar water. Maar tot enkele jaren geleden werd er niet veel gezocht naar toepassingen waarin men de *brandstofcel* zou gebruiken. Maar nu is de ontwikkeling volop op gang gekomen. Vooral in Japan zijn de laatste jaren grote onderzoeken uitgevoerd om brandstofcellen te gebruiken in auto's. Nu hebben verschillende autofabrikanten al een prototype dat werkt op brandstofcellen. Ook is het de bedoeling om de huidige thermische centrales later te kunnen vervangen door centrales die werken op brandstofcellen.

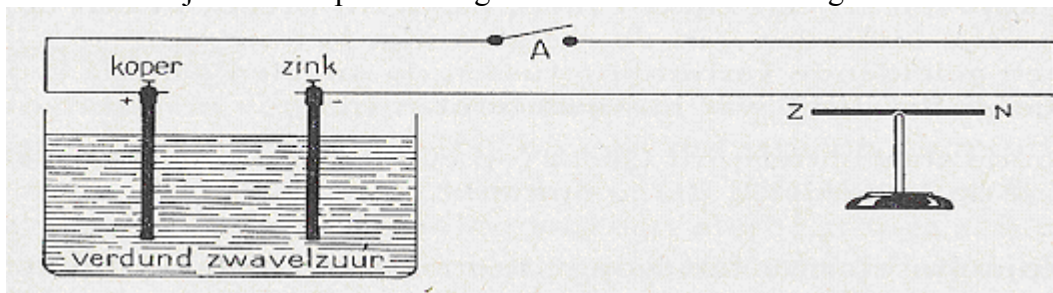
2 Wat is een brandstofcel?

2.1 De elektrochemische cel (galvanische cel of batterij)

Het principe van een brandstofcel is hetzelfde als van een elektrochemische cel.

2.2 Werkingsprincipe van een elektrochemische cel

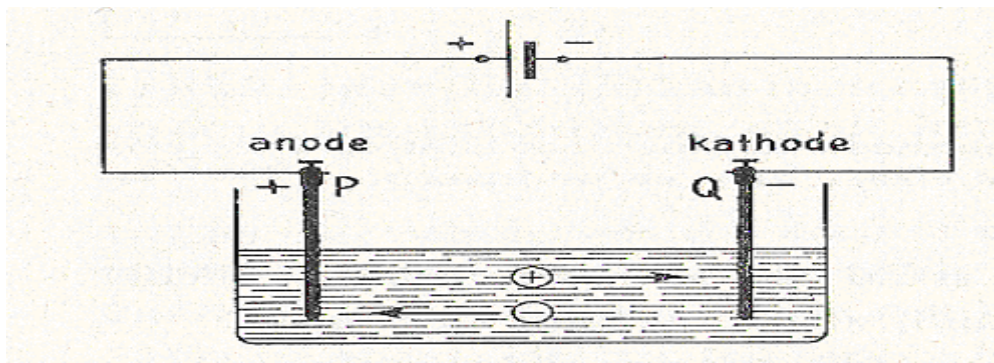
Graaf Alexander Volta, een Italiaans geleerde, heeft het eerste middel gevonden om elektrische stromen van lange duur te verkrijgen. Hij heeft het galvanische element uitgevonden. Dit bestaat uit een pot met zwavelzuur waarin men twee metalen staven stopt. Deze twee staven zijn zink en koper. Ze mogen elkaar niet raken. Zie figuur 2.1



Figuur 2.1 Voorstelling van het galvanische element van Volta

De scheikundige werking van zwavelzuur op koper maakt dat er een potentiaalverschil ontstaat tussen koper en zwavelzuur. De scheikundige werking van zwavelzuur op zink zorgt voor een potentiaalverschil tussen zink en zwavelzuur. De twee potentiaalverschillen die ontstaan, zijn niet gelijk aan elkaar. Hierdoor krijgt men een spanning. Wanneer men nu de twee staven met elkaar zal verbinden, is er een elektronenstroom in de verbindingsdraad. Dit principe kan men ook uitvoeren met andere metaalstaven.

Als een atoom een elektron mist, is het positief geladen. Dit noemen we een positief ion. Wanneer men nu een elektron toevoegt aan een atoom zal het negatief geladen worden. Dit noemen we een negatief ion. Als die ionen onder spanning staan kunnen ze meewerken aan elektriciteitsgeleiding.



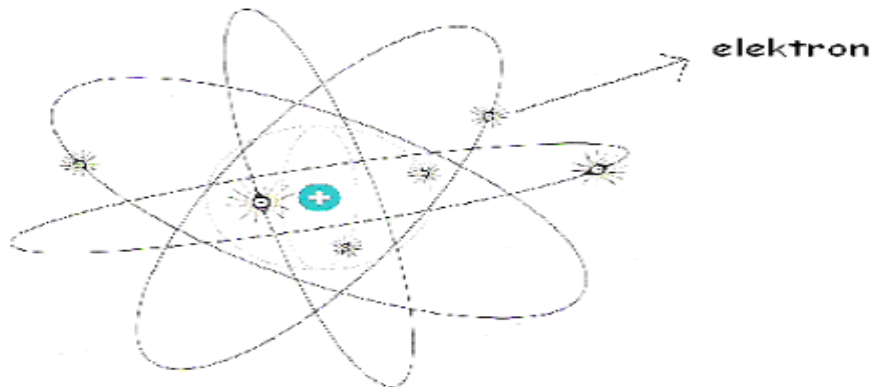
Figuur 2.2 Protonen helpen aan de elektriciteitsgeleiding

In de opstelling in figuur 2.2 staan de metalen platen P en Q in een oplossing die zowel positieve als negatieve ionen bevat. P is met de positieve pool van een accu verbonden en heet de anode. Q is met de negatieve pool verbonden en heet de kathode. Dit zijn de elektroden. De negatieve ionen in de vloeistof bewegen zich naar P. Daar staan zij hun teveel aan elektronen af. De positieve pool van de accu zuigt de elektronen door de draad naar zich toe. De positieve ionen in de vloeistof bewegen zich naar Q. Daar nemen zij een elektron uit de plaat op. De negatieve pool van de accu perst dan andere elektronen naar Q toe. In de vloeistof nemen dus zowel positieve als negatieve ionen aan het elektriciteitstransport deel. Hier heeft men dus te doen met ionentransport. In de draad echter heeft men elektronengeleiding.

In een elektrochemische cel wordt dus door middel van elektrochemische reacties elektriciteit geleverd. Deze reacties die bij een elektrochemische cel elektriciteit leveren, zijn redoxreacties. Redoxreacties zijn reacties met verandering van oxidatietrap. De oxidatietrap van een atoom is gelijk aan het aantal elektronen waarover een atoom beschikt in ongebonden toestand min het aantal elektronen waarover het atoom beschikt in gebonden toestand. Er bestaan enkele regels voor het bepalen van de oxidatietrap

- 1) zuurstof in samengestelde stoffen is altijd $-II$
- 2) waterstof in samengestelde stoffen is altijd $+I$
- 3) de oxidatietrap van een atoom uit de groep Ia, IIa of IIIa is in alle samengestelde stoffen $+ (nr. \text{ groep})$
- 4) in een neutraal deeltje is $\sum \text{oxidatietrap} = 0$
in een ion is $\sum \text{oxidatietrap} = \text{lading van het ion}$

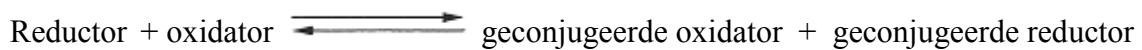
Een elektron heeft de kleinste ladingseenheid die er is. De lading van een elektron is negatief. Zie figuur 2.3



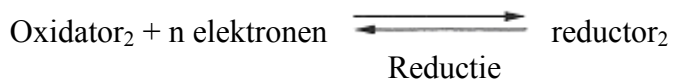
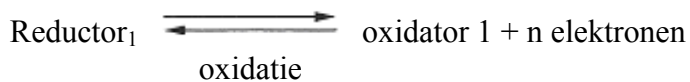
Figuur 2.3 Voorstelling van een atoom

Het atoom of deeltje waarvan de oxidatietrap stijgt (elektronen afgeven), is een reductor. Het atoom of deeltje waarvan de oxidatietrap daalt stijgt, is een oxidator. Een reductor oxideert en de oxidator wordt gereduceerd. De redoxreactie is dus een evenwichtsreactie, het ene element neemt de elektronen op die het andere element heeft afgegeven.

De algemene schrijfwijze van een redoxreactie is



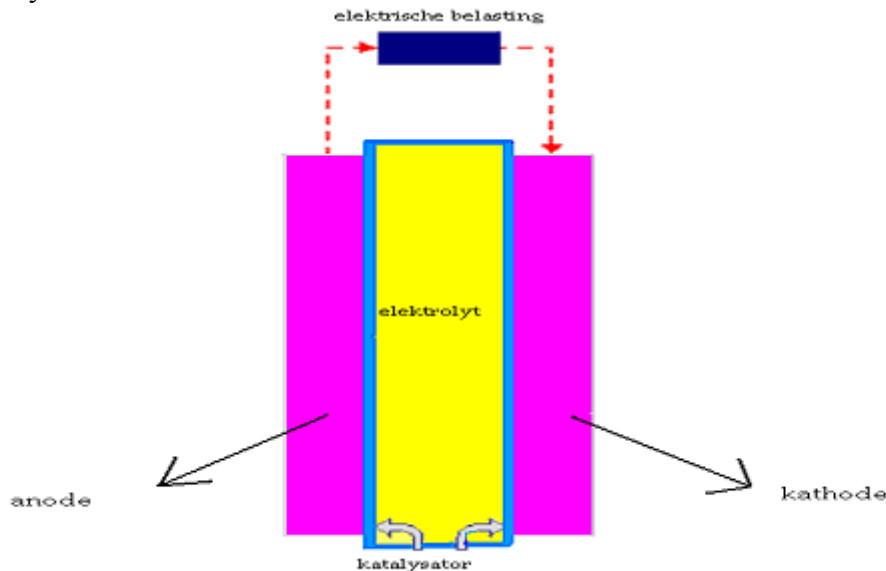
Deze redoxreactie bevat twee redox-halfreacties



2.3 De opbouw van een elektrochemische cel

De verschillende elementen van een elektrochemische cel worden weergegeven in figuur 2.4

1. Twee met elkaar verbonden elektroden (anode en kathode, reductor en een oxidator)
2. Aanwezigheid van een elektrolyt
3. Katalysatoren



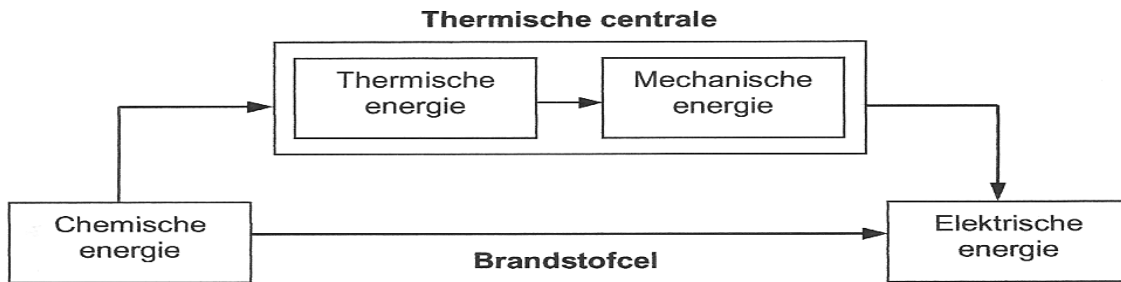
Figuur 2.4 voorstelling van de elektrochemische cel

2.4 Verschil tussen batterij en brandstofcel

De brandstofcel en de batterij zijn beide elektrochemische cellen, met als groot verschil dat bij een brandstofcel voortdurend brandstof moet worden toegevoerd. Daardoor blijft de brandstofcel zolang werken als je wil, maar je moet voortdurend brandstof toevoeren. Een batterij kunnen we opladen en dan een tijd gebruiken zonder iets te moeten toevoeren. Als je jouw auto op batterijen zou laten werken, zouden die leeg raken. De brandstofcel die wij in Oostende gezien hebben, zal wanneer je ze niet gebruikt, automatisch water splitsen in waterstof en zuurstof. Dit kan met behulp van zonne-energie. Je kunt hierdoor energie opslaan. Water wordt door zonne-energie omgezet in waterstof en zuurstof. Dit wanneer je de auto niet nodig hebt. Als je de auto weer nodig hebt is er al waterstof en zuurstof aanwezig. Die kan je dan onmiddellijk gebruiken. Met een batterij is dit niet mogelijk.

2.5 De brandstofcel

Een brandstofcel is een toestel dat op elektrochemische wijze chemische energie van een brandstof door reactie met een oxidans rechtstreeks omzet in elektriciteit. Dit komt doordat de reactie een potentiaalverschil opwekt. De chemische energie ontstaat uit de reactie van waterstof en zuurstof. Omdat de reactie exotherm (er komt warmte vrij bij de reactie) is zal er naast elektriciteit ook nog warmte vrijkomen. Deze energiebron zal op vele manieren gebruikt kunnen worden, bijvoorbeeld in een elektriciteitscentrale, auto's, bussen, maar ook in kleine elektrische apparaten zoals een gsm of een laptop. De werking van de brandstofcel is anders dan die van de klassieke elektriciteitsopwekking in een thermische centrale (schematisch weergegeven in figuur 2.1). In een thermische centrale wordt de warmte die vrijkomt bij verbranding langs een thermodynamische cyclus omgezet in mechanisch vermogen voor de turbine as. Een alternator zet het mechanische vermogen om in elektrisch vermogen. Omdat de brandstofcel deze twee stappen niet gebruikt zal het rendement waarschijnlijk hoger liggen. We weten dit niet met zekerheid.

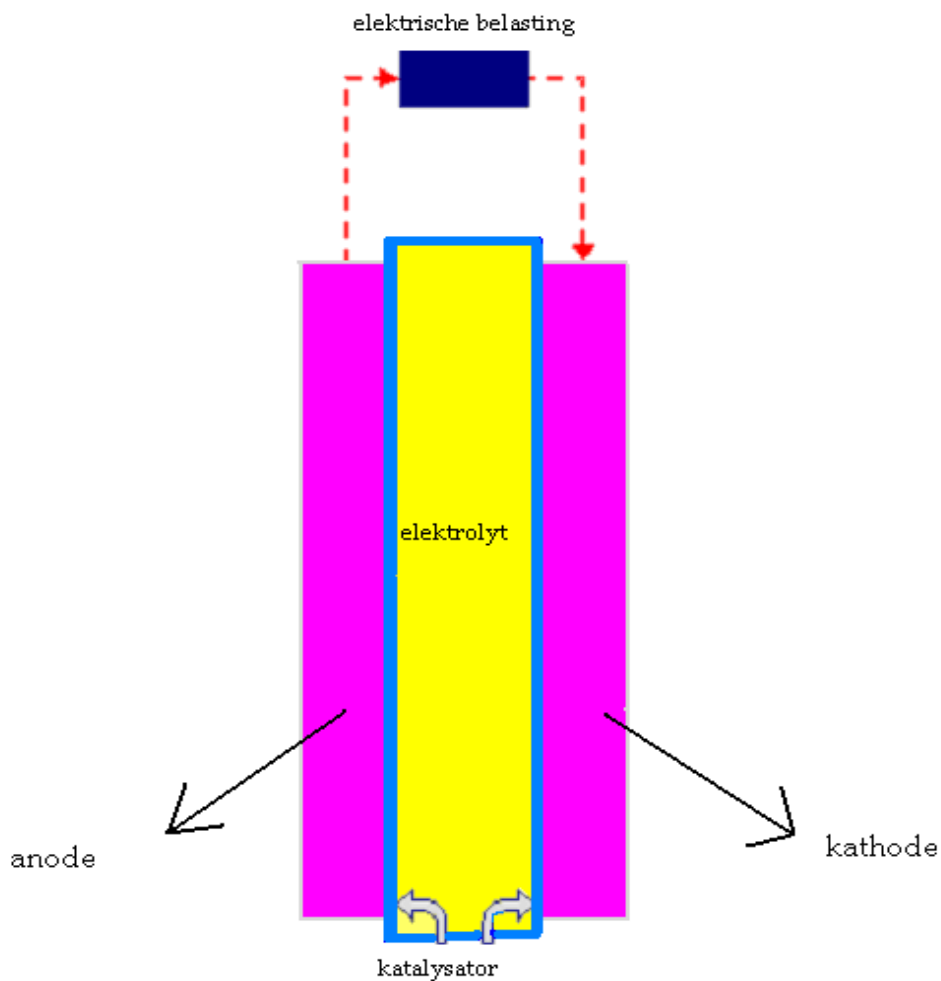


Figuur 2.5 verloop van vermogen opwekking

3 Opbouw van de brandstofcel

3.1 Constructie

De brandstofcel is opgebouwd uit twee elektroden die met elkaar verbonden worden door een externe kring. Tussen de twee elektroden is een elektrolyt (membraan) aanwezig. Op de elektrodes wordt een katalysator laag aangebracht.



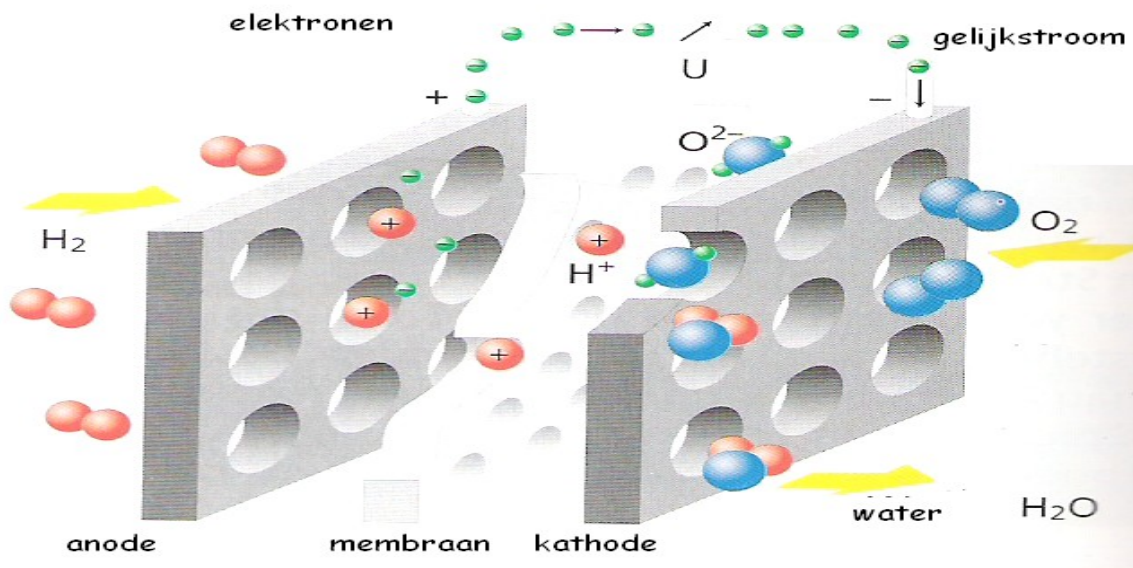
Figuur 3.1 Theoretische voorstelling

Het elektrolyt is een vloeistof die ionen bevat. Hierdoor is het geleidend. Een elektrode is een plaatje of een staaf van geleidend materiaal noodzakelijk voor de stroom van elektronen in de brandstofcel. De katalysator is nodig om ervoor te zorgen dat de reactie op de gewenste manier verloopt.

4 Werking van de brandstofcel

4.1 De werking

Aan de anode wordt brandstof toegevoerd. De brandstof die toegevoerd wordt, is meestal waterstof (H_2). In andere gevallen (wanneer de brandstof geen H_2 is) moet de brandstof nog omgezet worden naar H_2 . Dit gebeurt met een reformer. Aan de anode zal oxidatie van waterstof plaatsvinden. Dit wil zeggen dat waterstofmoleculen (H_2) gesplitst worden in twee waterstofatomen ($2 H^+$) en 2 elektronen ($2e^-$). De waterstofionen zullen via de elektrolyt naar de kathode bewegen. De elektronen zullen via een extern aangebrachte elektrische belasting naar de kathode bewegen. Op dat moment worden aan de kathode zuurstofmoleculen aangebracht. Die worden gereduceerd tot zuurstofionen (O^{2-}) met de elektronen die ze krijgen van de anode. De gereduceerde zuurstofatomen zullen dan samen met de aangevoerde waterstofionen water vormen. Het eindproduct is dus water en verlaat de brandstofcel. Door dit gebeuren is er een elektrisch potentiaalverschil tussen de anode en de kathode.



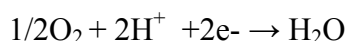
Figuur 4.1 verloop van reacties

4.2 Halfreacties

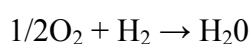
Halfreactie aan de anode: waterstof oxideert in 2 waterstofionen en 2 elektronen



Halfreactie aan de kathode: zuurstof wordt gereduceerd met de 2 elektronen tot zuurstofionen. Die zuurstofionen vormen samen met 2 waterstofionen water



In de cel wordt dus uit waterstof en zuurstof water gevormd



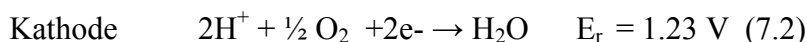
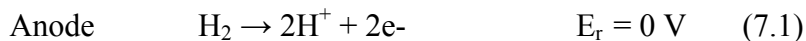
5 Effecten op de prestatie van de brandstofcel

5.1 Algemene ontwerpkenmerken

De brandstofcel of proton exchange membrane fuel cell, PEMFC, ontleent zijn naam aan het speciale kunststofmembraan dat gebruikt wordt als elektrolyt. Membranen werden eerst ontwikkeld voor de chlooralkali-industrie door DuPont. Deze membranen zijn niet dikker dan enkele honderden micrometer en bevinden zich in het midden van de PEMFC. Op de beide kanten van het membraan ligt een dunne laag met de nodige katalysatoren die de chemische reactie besturen. Het membraan werkt in aanwezigheid van vloeibaar water, dat zorgt voor de verplaatsing van de protonen en ligt tussen een paar vloeiplaten, die zorgen voor de verplaatsing en verdeling van zuurstof en brandstof naar en aan de kathode en anode. Soms wordt op de achterkant van deze vloeiplaten een waterpakket aangebracht dat zorgt voor de nodige koeling. De brandstofcel kan ook een luchtbevochtiger bevatten, om uitdroging van het membraan te voorkomen.

5.2 De brandstofcelprestatie

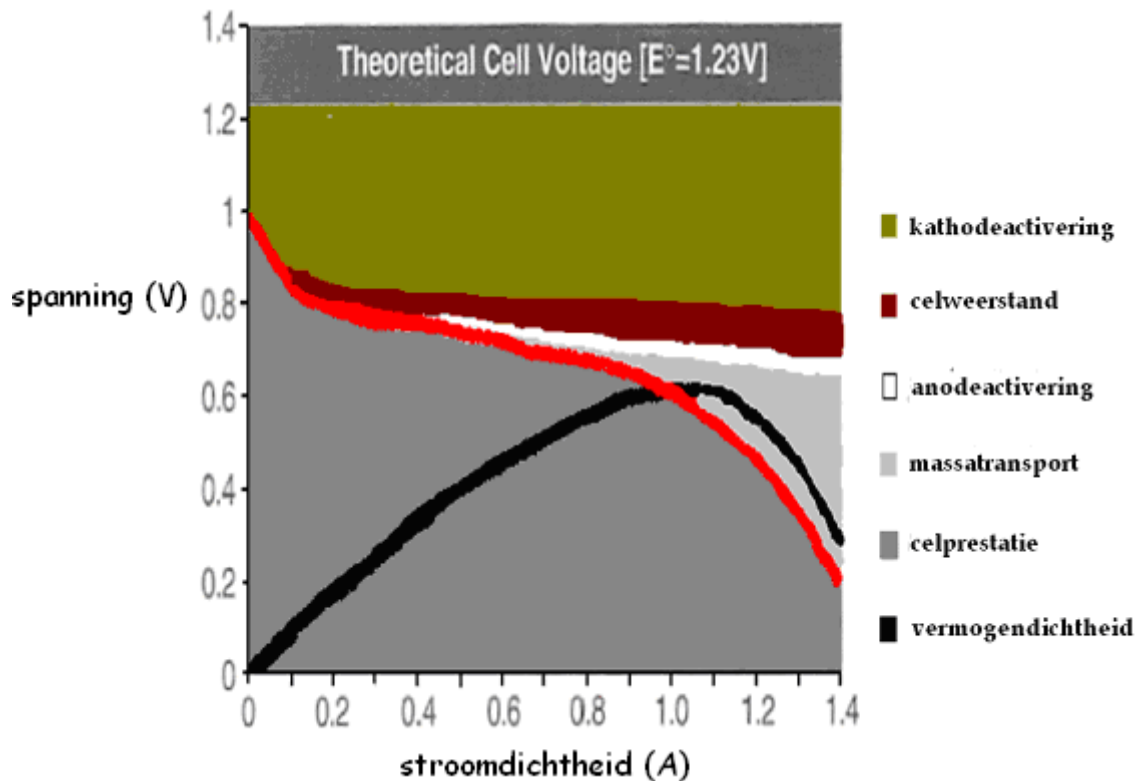
De factoren die de brandstofcelprestatie bepalen, kunnen we best bekijken wanneer we van elke component een spanningscurve maken. Het schema dat we hier zullen bekijken is gebaseerd op de PEMFC, omdat dit de meest verspreide brandstofcel is en ook de meest bestudeerde. Het kleinste deel van een PEMFC is de MEA. Deze bestaat uit twee elektrodes en een elektrolyt. Voor we de spanningscurve zullen bestuderen, is het nodig om de functies van de MEA componenten te kennen.



De gasdiffundeerlaag of elektrodesubstraat (dit zijn de dunne poreuze lagen aan beide zijden van het membraan, ze zijn niet vastgemaakt aan het membraan, maar wel aan de katalysatoren op beide zijden van het membraan) aan de anode laat waterstof toe om de reactieve zone in de elektrode te bereiken. De protonen migreren door het membraan en de elektronen door de substraatlaag om uiteindelijk terecht te komen op de elektrische aansluitklemmen van de cel. Het substraat moet gasdoorlatend zijn en goed geleidbaar voor elektronen. Niet alle chemische energie wordt omgevormd in elektrische energie, er wordt namelijk ook warmte geproduceerd. Het substraat moet daarom ook als warmtegeleider werken. Aan de kathode zijn de functies van het substraat nog ingewikkelder. Er wordt water gevormd aan de kathode. Het risico bestaat dat vloeistof de aanvoer van gas naar de reactieve zones blokkeert. Dit brengt een prestatieprobleem met zich mee, omdat de meest gebruikte oxidator in brandstofcellen geen zuivere zuurstof is maar lucht. Het membraan werkt als protongeleider. Dit vereist dat het membraan goed bevochtigd is, omdat de protongeleiding werkt met water. Het is de bedoeling dat het onderzoek van de MEA uitmondt in een volledige analyse van de prestatie van de cel. Het is al mogelijk om met de hedendaagse diagnostische werktuigen de curve op te delen in kinetische, ohmse en massatransportbijdragen.

5.2.1 Spanningsefficiëntie

Figuur 5.1 toont een typische spanningscurve die de relatieve bijdrage van de verschillende prestatieverliezen op e vermogendichtheid toont.



Figuur 5.1prestatie van een brandstofcel

De celspanning bij OCV bereikt niet de theoretisch berekende waarde. Voor normale omstandigheden zou deze waarde ongeveer 1,23 V zijn.

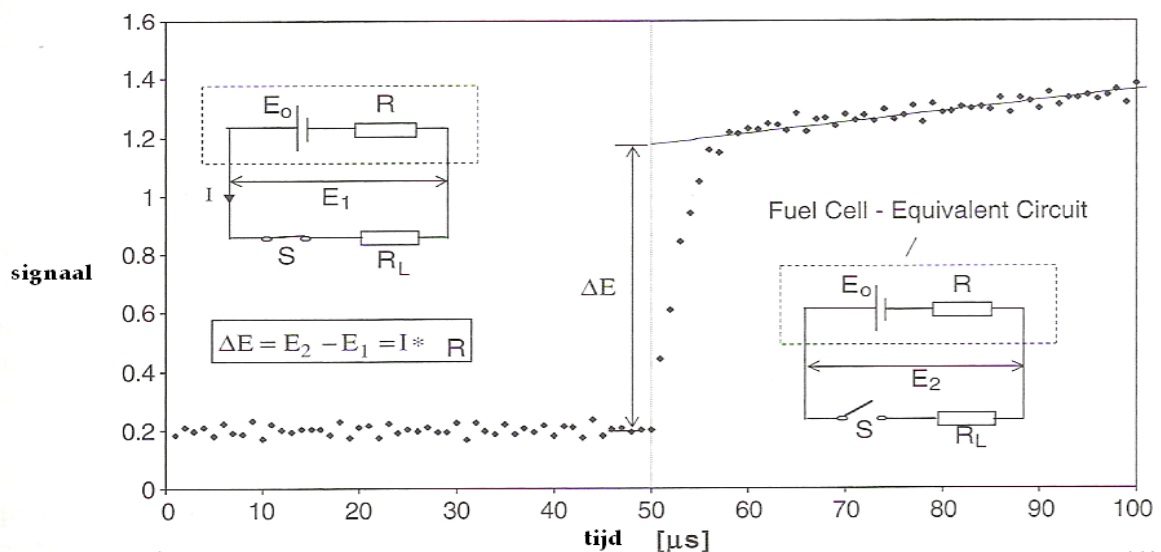
Wanneer er geen stroom van de cel afgenomen wordt, zullen bijkomende chemische reacties optreden naast de twee hoofdreacties. Hierdoor zullen er spanningsverliezen optreden. Er vindt ook corrosie plaats, deze hangt af van de samenstelling van de elektroden. Dit zal ook de spanning van de cel naar beneden trekken.

Wanneer er stroom van de cel afgenomen wordt, zullen deze parasitaire reacties gedomineerd worden door de hoofdelektrochemische reacties die veel hogere stroomdichtheden kunnen leveren en daardoor zullen deze bepalend zijn voor de elektrodepotentialen.

Het elektrische vermogen dat geproduceerd wordt door de MEA is het product van de spanning en de stroomdichtheid op elk punt van de spanning-stroomcurve (figuur 5.1). Bij OCV wordt er geen vermogen geleverd. Als de kring gesloten wordt, neemt het vermogen toe naarmate de stroomdichtheid toeneemt tot een maximum. Boven dit maximum is de afname van de celspanning groter dan de toename van de stroomdichtheid. Hierdoor zal er een vermogensdaling plaatsvinden. Het is logisch dat we willen werken op het punt waar de vermogendichtheid het hoogst is. We zoeken een werkpunt waarvan niet het vermogen het hoogst is maar wel waar de efficiëntie. Dit is bij een spanning rond de 0,7 volt (V). De gemeten celspanning is ook een maat voor de ceffeiciëntie. Hoe lager de celspanning hoe meer chemische energie er verspild wordt aan elektrochemische omzettingen. Een brandstofcel moet werken rond een spanning van 0,8-0,9 A om een goede efficiëntie te hebben.

5.2.2 Ohmse weerstanden

Er worden elektrische weerstanden waargenomen in een aantal componenten van de brandstofcel: in het substraat en in de katalysatorlagen. Ionische weerstanden komen voor waar protontransport is: in het membraan en in de katalysatorlagen. De totale weerstand bepaalt de helling van het bijna lineaire middengedeelte (fig. 5.1). Hoe groter de weerstanden hoe meer de spanningscurve daalt. Elektrisch kan een brandstofcel bekeken worden als een serieschakeling van een ideale spanningsbron E_0 en een inwendige weerstand R . Zie figuur 5.2



Figuur 5.2 het meten van de weerstand door de stroomonderbrekingstechniek

Ohmse verliezen treden op tijdens elektronen- en ionentransport. De totale ohmse weerstand is de som van de elektrische en de ionische weerstanden van alle brandstofcelcomponenten. Om de verschillende invloeden van deze weerstanden op de celprestatie van elkaar te onderscheiden moeten we de weerstand meten. Dit kunnen we met de stroomonderbrekingstechniek. Deze techniek steunt op het feit dat de spanningval over de inwendige weerstanden wegvalt wanneer de constante stroom I onderbroken wordt, zoals getoond wordt in fig. 5.2. De waarde R wordt dan berekend uit de verhouding van ΔE en I . De resulterende potentiaalsprong is niet oneindig snel (de potentiaalsprong gebeurt bij het open van schakelaar) door de parasitaire capaciteiten en inductanties die in de elektroden aanwezig zijn, maar veel sneller gebeuren dan de elektrochemische processen. Deze elektrochemische reacties zullen de brandstofcel vervolgens weer traag naar de oorspronkelijke spanningswaarde laten gaan. Het is dus belangrijk dat we het potentiaalverschil zeer snel meten. Dit is om de elektrische en chemische effecten te kunnen onderscheiden. Stroomonderbreking is hiervoor de belangrijkste techniek voor. Deze techniek kan gebruikt worden, als de schakelaar voldoende snel gesloten wordt zodat de celprestatie niet kan worden beïnvloed door de meting. Dit kunnen we door het optekenen van een stapresponsie oplossing weergegeven in fig. 5.2 van een paar tientallen microseconden voordat je de stroom weer inschakelt. De noodzaak om een stroom van honderden ampères te onderbreken op een tijdschaal van enkele microseconden vereist een zorgvuldige keuze van de elektronische componenten.

5.2.3 Kinetische prestaties

Wanneer we met zuiver waterstof werken, blijft de anode op een potentiaal dicht bij het theoretisch berekende potentiaal ($E_r = 0 \text{ V}$). Op dit moment zullen we de anodebijdrage tot de celspanning verwaarlozen en dus een anodepotentiaal van 0 V gebruiken. Aangezien de celspanning het verschil is tussen de anode- en kathodepotentiaal, kunnen we de celspanning met een goede benadering gelijkstellen aan de kathodepotentiaal E_c . In tegenstelling met de anodereactie, is de zuurstofreductie aan de kathode een actief proces en vertoont daardoor een overpotentiaal. De Butler-Volmer vergelijking geeft een wiskundige omschrijving van zo'n actief proces, dit is een moeilijke manier. Een meer succesvolle manier is de *Tafel vergelijking*. Deze formule is proefondervindelijk opgesteld.

We kunnen het overpotentiaal berekenen met de formule $\eta = E_c - E_r$ en $E_r =$ theoretische potentiaal van de cel.

$$E_c = E_r - b \log(i/i_0) - i.R \quad (5.3)$$

$E_c =$ kathode potentiaal

$i_0 =$ uitwisselingsstroomdichtheid voor de zuurstofreductie,

$b =$ tafelhelling voor zuurstofreductie,

$i =$ stroomdichtheid

$R =$ ohmse weerstand

$-i.R = -\Delta E$ dit is de term die de ohmse verliezen in rekening brengt

De tafelhelling b wordt bepaald door de aard van het elektrochemische proces.

b kunnen we berekenen met de formule

$$\begin{aligned} [b] &= RT/(n\beta F \log_{10} e) & (5.4) \\ &= (\text{J mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \text{K})/(\text{C mol}^{-1}) \\ &= \text{J/C} \\ &= \text{Ws/As} \\ &= \text{VA/A} \\ &= \text{V} \end{aligned}$$

waarbij $R = 8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ de algemene gasconstante en $F = 96485 \text{ C mol}^{-1}$ de faradayconstante is, T de temperatuur in Kelvin en β de overdrachtscoëfficiënt. β is een parameter in verband met de symmetrie van de overdrachtstoestand. Wanneer geen principiële informatie beschikbaar is, wordt hiervoor 0.5 genomen.

Voor de zuurstofreductie is $n = 2$.

$$\begin{aligned} b &= (8.314 * 293) / (2 * 0.5 * 96485 * \log_{10} e) \\ &= 0.058 \text{ V} \\ &= 58 \text{ mV} \end{aligned}$$

Bij praktische brandstofcellen ligt b rond de 40 à 80 mV.

De voornaamste factor die het overpotentiaal en daardoor ook de celspanning E_c bepaalt, is i_0 (uitwisselingsstroomdichtheid). Formule 5.3 toont dat door de logaritme een vertienvoudiging van i_0 bij een bepaalde stroomsterkte leidt tot een toename van 1 eenheid van de term b , van 58 mV. De factor b wordt bepaald door de chemische reactie terwijl de factor i_0 afhankelijk is van de kinetische reactie. Het hangt dus eigenlijk af van de gebruikte MEA en elektrokatalysatoren.

1 eenheid van $b = 58\text{mV}$

hoe kan je een betere uitwisselingsstroomdichtheid te verkrijgen.

De waarde van i_0 kan men doen stijgen door meer elektrokatalysatoren toe te voegen aan de kathode. Hoewel de elektrokatalysatoren nu platina bezitten, is dit nog niet de goede oplossing, omdat economische beschouwingen de hoeveelheid platina die de MEA fabrikanten aan hun product toevoegen, beperken.

Een efficiënter gebruik van het product platina door toevoeging van koolstoffen. (zie hoofdstuk over katalysatoren)

Een beter elektrochemisch contact zijn tussen het membraan en de katalysatorlaag.

Alleen na de verbetering van de brandstofcelprestatie door kleinere ohmse weerstanden te gebruiken en de massatransporteffecten weg te werken kunnen we de kinetische prestaties van de anode bestuderen.

5.2.4 Massatransporteffecten

Op het einde van het bijna lineair gedeelte van de spanningsstroomcurve zien we het begin van massatransportverliezen. Er komt lucht binnen en er gaat water weg uit de kathode. Het gebruik van kunstmatige lucht (een mix van 21% zuurstof en helium) in vergelijking met het gebruik van de omgevingslucht laat identificatie en locatie van massatransportverliezen in de katalysator lagen, in het substraat of doorstromingsplaten toe. De massatransporteffecten kunnen toegeschreven worden aan een van de volgende beperkingen:

Vermindering van de druk van zuurstof in de lucht samen met het zogenoemde *nitrogen blanket effect* (stikstofbedekkingseffect)

Begrensde diffusie van de zuurstof in de katalysatorlaag

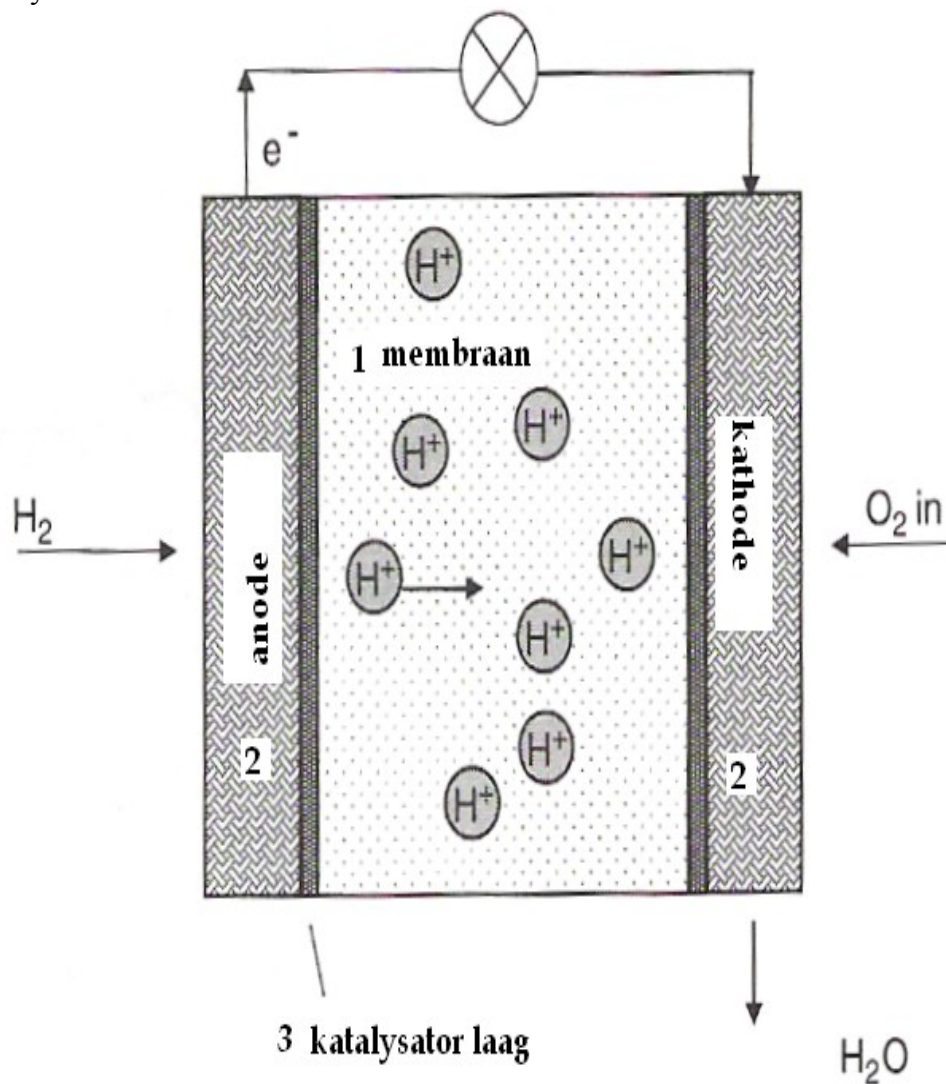
Het blokkeren van de gastoeegang door waterdruppels die gevormd worden in de doorstroomplaat of in de elektrode zelf.

6 MEA-componenten en hun werking

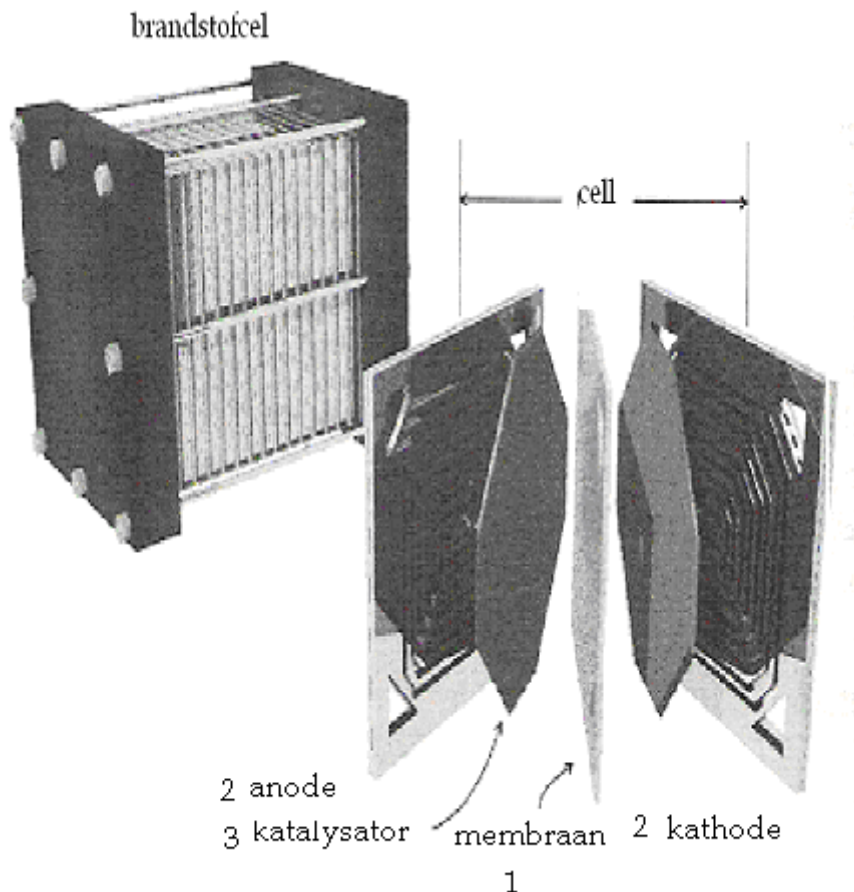
De ontwikkeling van de MEA staat centraal in de brandstofcelproductie. Een hoge prestatie van de MEA heeft niet alleen invloed op de prestatie van de brandstofcel, maar ook op diens levensduur en kostprijs. Hoe hoger de vermogendichtheid is per oppervlakte-eenheid van de MEA, hoe minder externe hardware gebruikt moet worden wat leidt tot een lichtere en kleinere omvang van brandstofcel.

De componenten zijn worden weergegeven in fig.6.1

- 1 membraan, vlies of elektrolyt
- 2 elektrode of gas diffusion layers
- 3 katalysator



Figuur 6.1



Figuur 6.2

6.1 Het membraan

Voor het membraan wordt een vast polymeer elektrolyt gebruikt. Het vaste polymeer elektrolyt is een dunne, maar sterke isolator en gasafsluiter tussen de twee elektrodes. Het laat een snel protontransport toe en bezit een hoge stroomdichtheid. De protonoverdracht in het membraan kan verklaard worden door twee principiële mechanismen: als meest voor de hand liggende oorzaak de dynamische omzetting van een molecule naar een molecule met een hogere graad. In dit draagsysteem verspreidt het proton zich door het medium samen met de drager.

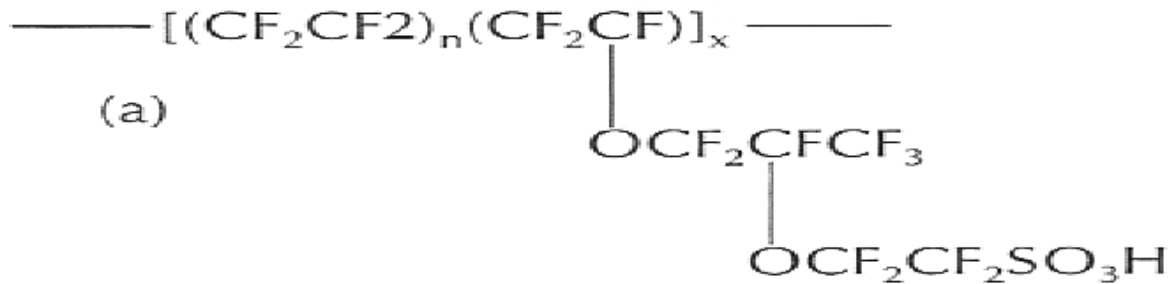
Vb met H_3O^+ in geval van H_2O

In het andere principiële systeem vertonen de dragers duidelijk een lokale dynamiek, maar ze blijven wel op hun plaats. Het proton wordt verplaatst van de ene drager naar de andere door middel van waterstofbindingen. Gelijktijdige reorganisatie van de protonomgeving leidt tot de vorming van een onafgebroken baan voor de protonmigratie. Dit mechanisme staat bekend als *Grotthuss mechanism* of *proton hopping*.

6.1.1 Perfluorinated membranen.

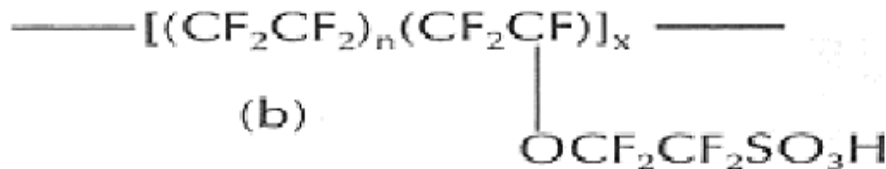
Protonuitwisselingsmembranen werden eerst gemaakt door General Electric voor de missie met de spaceshuttle (1962-1965). Daar zorgde een 1-kw_{el}-brandstofcel voor elektriciteit en drinkbaar water. Dit gebeurde op een werkingstemperatuur van 21°C. Er werd een polystyreen sulfonisch zuur membraan gebruikt. Door moeilijkheden met waterbehandeling in de cellen werd de membraanlevensduur onder sterke oxiderende voorwaarden ongeschikt voor de continue werking.

Een oplossing voor dit probleem kwam er in de jaren 60 toen *perfluorinated sulfonic acid membranes* (fig. 6.3) gemaakt werden door DuPont voor het gebruik in de chlooralkali-industrie. Het werd verkocht onder de naam *Nafion*. *Nafion* bestaat uit een PTFE (polymerized tetrafluoroethylene)-ruggengraat, die een grote chemische traagheid heeft. De nevenkettingen bestaan uit perfluorinated vinyl polyether dat gebonden is aan de PTFE-ruggengraat met zuurstofatomen.



Figuur 6.3 Nafion

Sulfatische zuurgroepen (-SO₃H) op het einde van de nevenketting geven het polymeer zijn uitwisselingsvermogen dat bepaald wordt door zijn equivalent gewicht. Dit is de massa van het polymeer per actieve sulfonische zuurgroep. Voor een gegeven polymeer resulteert een lager equivalent gewicht in een hoger geleidingsvermogen. Om het equivalente gewicht verder te verlagen is er een experimenteel *perfluorinated sulfonic acid membrane* ingevoerd door Dow Chemical Company. De moleculestructuur wordt getoond in fig. 6.4



Figuur 6.4 perfluorinated sulfonic acid membrane

Deze toont een duidelijk kortere structuur in vergelijking met die van Nafion. Het gebruik van deze membranen leidt tot een grote stijging van de prestatie van brandstofcellen. Door de successen van Dow Chemical houdt DuPont zich nu bezig met het ontwikkelen van membranen met hogere levensduur

6.1.2 De rol van het water

Het geleidingsvermogen van bijvoorbeeld Nafion is sterk afhankelijk van het niveau van hydratatie (= bindingen van waterstofatomen aan moleculen). In een brandstofcel systeem moeten de reactanten bevochtigd worden om waterverdamping te voorkomen ondanks de ontwikkeling van grote hoeveelheden water aan de kathode. Wanneer membranen onderhevig zijn aan temperaturen boven de 100°C op atmosferische druk, zal hun geleidingsvermogen sterk dalen. Dit is te wijten aan dehydratatie. Hogere werkingstemperaturen kunnen ook zorgen dat dit niet zo is maar dan moet de druk van de reactanten stijgen tot 1 à 2 bar boven de atmosferische druk. Dit is praktisch niet haalbaar, omdat het teveel kracht zou wegnemen voor een compressor. Zoals we zagen is water ook verantwoordelijk voor het protontransport. Wanneer een drager verantwoordelijk is voor protontransport, zal de migratie van elke proton gekoppeld zijn aan de verplaatsing van tenminste een watermolecule.

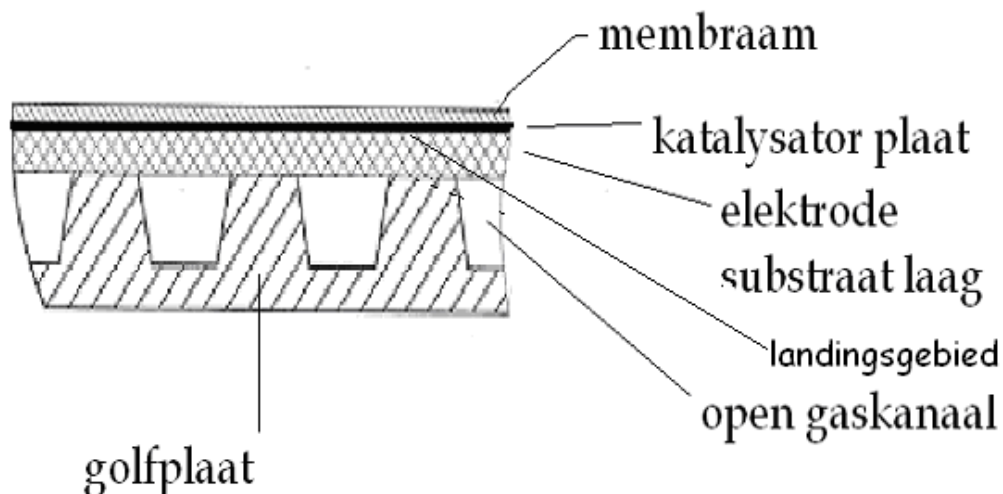
6.1.3 Alternatieve membraanmaterialen

Om volgende redenen worden er proeven uitgevoerd om nieuwe materialen te vinden die kunnen dienen als membraan: lagere kostprijs, betere prestatie op hoge temperatuur, lagere eisen op het vlak van luchtbevochtiging

6.2 De elektrodes

Moderne brandstofcelelektrodes zijn gasverspreidingselektrodes. Ze zijn gasporeus en hebben een groot katalysatoroppervlak en een elektrisch geleidbare gasverspreidingslaag of een elektrodesubstraat (elektrode ruglaag). Twee overeenkomende elektrodes, anode en kathode, zijn nauw met elkaar verbonden door het polymeermembraan. De gelaagde katalysator wordt vastgemaakt op het membraan. Er worden MEA's verkocht zonder substraatlaag, die moet dan apart gekocht worden. In deze context is het beter om te spreken van KMA. In de tekst zullen we verwijzen naar MEA als het over de volledige entiteit gaat (Fig. 6.1), en naar elektrodes of GDE als ze inwendig verbonden zijn met de katalysator. De verschillende functies van de brandstofcelelektrodes worden samengevat in tabel 6.1.

De kathode- en de anode-elektrode laten respectievelijk de reactanten, zuurstof en waterstof toe om de reactieve zone te bereiken binnen een elektrode. Elektronen en warmte worden aangevoerd door de substraatlaag. Aan de kathode is de afvoer van water een zeer belangrijke bijkomende taak. Zoals figuur 6.5 demonstreert, is de substraatlaag nodig als ruimte die het gas toegang geeft tot de katalysatoroppervlaktes onder de steunribben van de gasverdelingsplaat of golfplaat. Deze gebieden zijn ook gekend als landingsgebieden. Er moeten elektronen van of naar de katalysatorgebieden gebracht worden onder de open gaskanalen. Hier voorziet het substraat een aanvoerweg naar de landingsgebieden van de golfplaat.



Figuur 6.5 Eelektrode

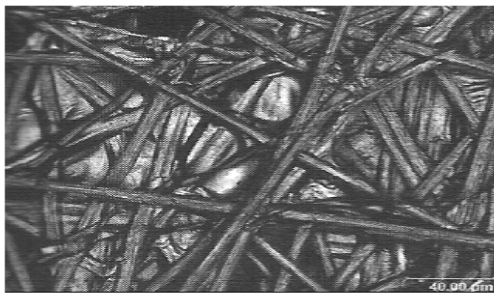
Er wordt maar 1 elektrode en het membraan getoond. De schematische schets toont de functie van de poreuze elektrodesubstraatlaag. De open gaskanalen zijn nodig voor de aanvoer van de reactanten, maar alleen de landingsgebieden kunnen elektrische stroom geleiden. Ook wordt gas geleid door het poreuze materiaal naar de elektrodedelen boven de landingsgebieden. (gas diffusion layer = substraat)

MEA component	Taak
Anodesubstraat	Toevoer en verdeling van de brandstof Elektronengeleiding Afvoer van warmte uit de reactieve zone Watertoevoer in de elektrokatalysatoren
Anodekatalysatorlaag	Katalysator voor de anodereactie Geleiding van protonen naar het membraan Geleiding van elektronen naar het substraat Watertransport Warmtetransport
Membraan	Protongeleiding Watertransport Elektrische isolatie
Kathodekatalysatorlaag	Katalysator voor de kathodereactie Zuurstoftransport naar de reactieplaatsen Protongeleiding van het membraan naar de reactieplaatsen Elektronengeleiding van het substraat naar de reactieplaatsen Waterverwijdering van reactiezijde naar het substraat Warmteverwijdering
Kathodesubstraat	Toevoer en verdeling van zuurstof Elektronengeleiding naar de reactieplaats Warmteverwijdering Waterverplaatsing (vloeistofstroom)

Tabel 6.1

Gebruikte materialen voor de substraatlaag

Er werden al veel materialen gebruikt als substraat voor de brandstofcelektrodes. Koolstofvezelpapier en geweven koolstofdoek zijn de meest voorkomende substraten. Koolstofvezelpapieren zijn hoge temperatuurgesinterde, meer of minder stijve structuren. Ze bieden een zeer goede elektronengeleidbaarheid. Koolstofdoek is een flexibel materiaal en bezit ook een goede geleidbaarheid en mogelijks ook voordelen voor hoge vermogenprestatie door een betere waterbehandeling. Figuur 6.6 toont microscopische foto's van de substraatstructuren.



Figuur 6.6

Koolstofpapier



Koolstofdoek

6.3 MEA-ontwikkeling en-uitvoering

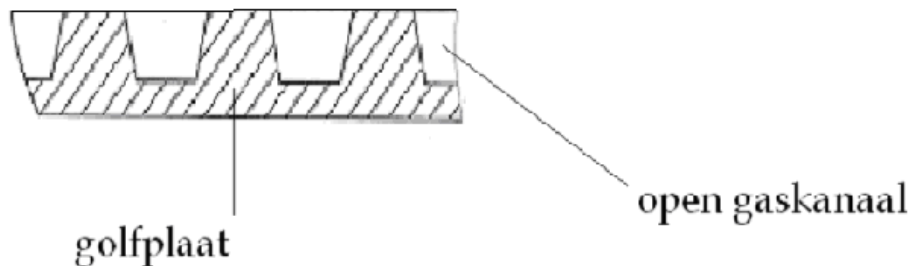
Er zijn twee manieren om een MEA samen te stellen. De katalysatorlagen kunnen onmiddellijk op elke zijde van het membraan aangebracht worden. Dit deel (KMA) wordt dan geklemd tussen de elektrodes (met daarop de substraatlaag) in de brandstofcel. De elektrodes kunnen ook geprefabriceerd worden in de fabriek: de katalysatorlagen worden op het substraat aangebracht en dan worden dit geheel op het membraan geperst.

6.4 Andere apparatuur in de brandstofcel

Figuur 6.2 toont hoe MEA's voorzien worden van reactanten en samengesteld worden om een brandstofcel te vormen. De flowfieldplates worden gebruikt om waterstof naar de anode te brengen en lucht/zuurstof naar de kathode. Er moet een balans zijn tussen de gastoevoer en de stroomgeleiding, de vloeiplaten moeten dus een bepaalde hoeveelheid gas doorlaten en ook elektriciteit geleiden.

Andere componenten van de brandstofcel zijn koelelementen, stroomcollectorplaten waarop de stroomkabels worden vastgemaakt, eindplaten en mogelijke bevochtigers. Eindplaten geven de brandstofcel mechanische stabiliteit en maken de afsluiting van de componenten mogelijk door samendrukking.

6.4.1 Bipolaire platen



Figuur 6.7 Bipolaire plaat

Flow field plates werden in vroegere brandstofcelontwerpen gemaakt van grafiet. Ze werden gemaakt in golvende kanalen, een gemakkelijk fabricageproces. Deze platen hadden een hoge elektronen en thermische geleidbaarheid. Ze waren ook stabiel in de chemische omgeving van de brandstofcel. Ruw grafiet wordt gemaakt in een hoogtemperatuursinteringsproces dat enkele weken duurt en leidt tot de poreusheid van de platen. Het maken van flow field plates is een lang en labo-intensief proces. Eerst moet het grafietblok tot platen gezaagd worden met een bepaalde dikte. Dan zal men de platen vacuüm verzadigen om ze een bepaalde gasdichtheid te geven. Dit doet men met behulp van een harsfilter. Daarna wordt het oppervlak gepolijst en geslepen tot de vereiste oppervlakteruwheid. Daarna worden in deze grafietplaten golvende kanalen aangebracht door een frees- en graveerproces. Het materiaal is gemakkelijk te vervaardigen, maar is wel scherp. Flow field plates die op deze manier ontwikkeld worden, zijn verschillende millimeters dik om hen voldoende mechanische sterkte te geven en het mogelijk te maken om er vloeikanalen in te graveren. De kanalen komen op elke kant van de flow field plates voor. Daarom wordt in de tekst ook wel eens bipolaire plaat gebruikt.

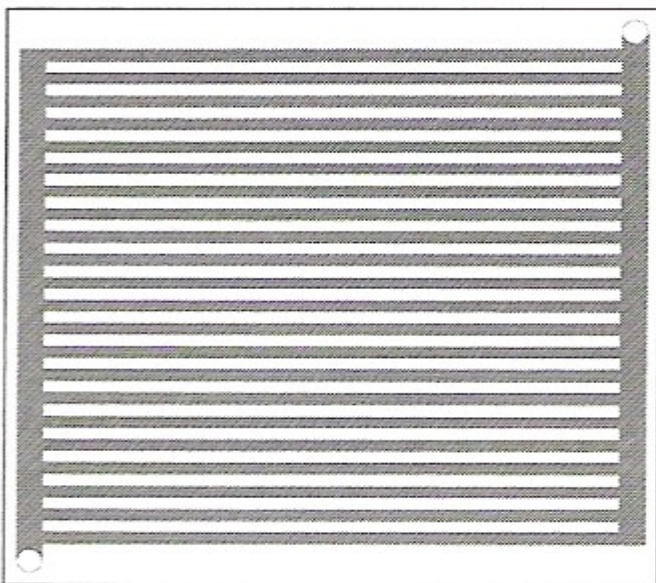
Flow field plates = bipolaire platen = vloeiveldplaten = golfplaten

6.4.1.1 Vloeveldontwerpen en hun invloed op de prestatie

We kijken eerst naar de taken van de vloeiplaten.

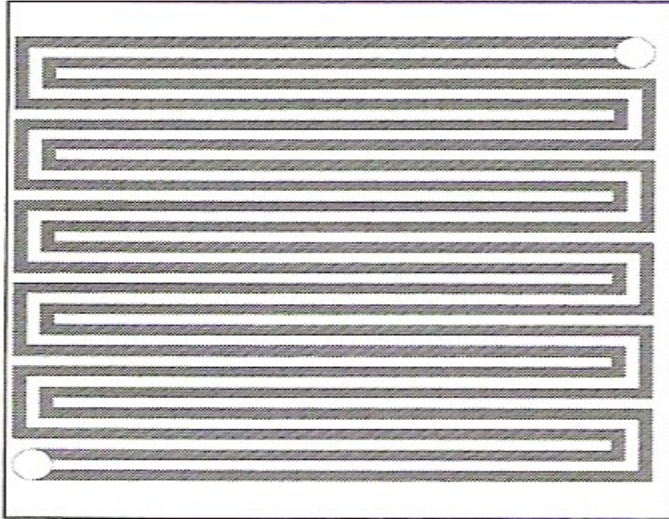
- 1 stroomgeleiding
- 2 warmtegeleiding
- 3 controle van de gasstroom
- 4 verwijdering van water

Zoals we al zagen, moet er een balans zijn tussen de gastoevoer en de stroomgeleiding. De beste geleider zal geen gasdoorgang toelaten, terwijl een geheel open structuur geen stroomgeleiding toelaat. Daarom is er een soort poreusheid nodig in deze vloeivelden. Het rib- en kanaalontwerp in fig. 6.7 is een manier om dit te bereiken. De grootte van de open kanalen hangt af van de weerstand van het gebruikte materiaal, de grootte van de MEA, de werkingsdruk en de beoogde stroomsterkte. De ingewikkelde taak om de juiste structuur te bereiken kan opgelost worden door beweegbare dynamische vormen te gebruiken in combinatie met de experimentele evaluatie van een groot aantal verschillende ontwerpen. Ook moeten we rekening houden met waterafvoer aan de kathode, omdat het een vloeiprobleem is. Terwijl turbulentie helpt om water af te voeren van het substraat, zodat gastoevoer mogelijk wordt, leidt een turbulente gasstroming tot een stijging in drukverschil tussen de vloeiveldingang en -uitgang. Drukverschillen vereisen compressie-energie om de reactanten door het vloeiveld te krijgen en dit heeft impact op de systeemefficiëntie. Een mogelijke oplossing hiervoor is de constructie van veel parallelle gaskanalen (zie fig. 6.8) Parallelle stroming door de vele kanalen zal het drukverschil tussen de in- en uitgang doen dalen. Helaas zal water gevormd aan de kathode, zich opstapelen in de aangrenzende kanalen van de kathode. Waterdruppels zullen samengroeien tot grotere druppels die de kanalen zullen verstoppen. Maar niet alle kanalen zullen verstopt geraken en daardoor zal de gas stroming zich verspreiden over de resterende kanalen. Sommige gedeelten van de MEA zullen niet meer voorzien worden van reactanten en zullen daardoor niet meer actief zijn. Hiervoor willen we een oplossing vinden. Men zal proberen om waterdruppels te vermijden door andere vormen te ontwikkelen.



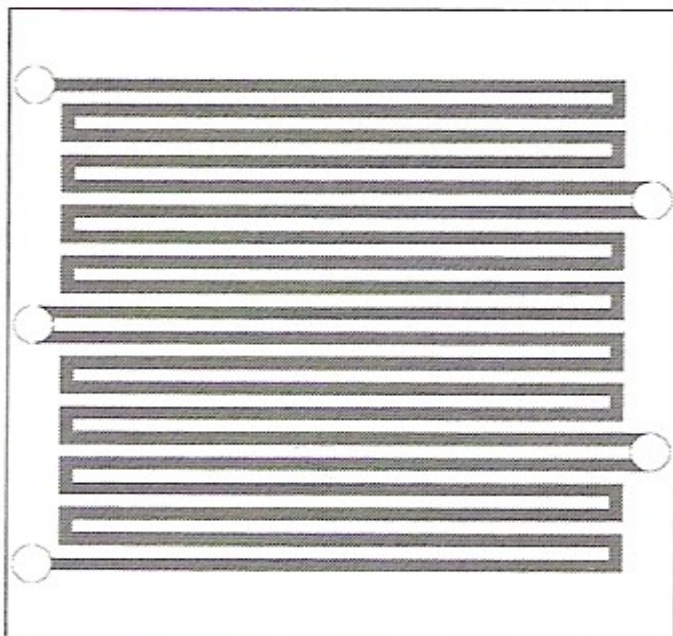
Figuur 6.8

De zogenaamde slang flow field beschreven door Ballardresearchers wordt getoond in figuur 6.9. Hij wordt verondersteld de verstopping van verschillende kanalen door water te voorkomen, omdat de verschillende drukken aan de in -en uitgang het stilstaande water naar de uitgang dwingt. Wanneer hogere stromen nodig zijn en eenverbreding van de kanalen niet mogelijk is, zullen we het aantal kanalen doen toenemen.



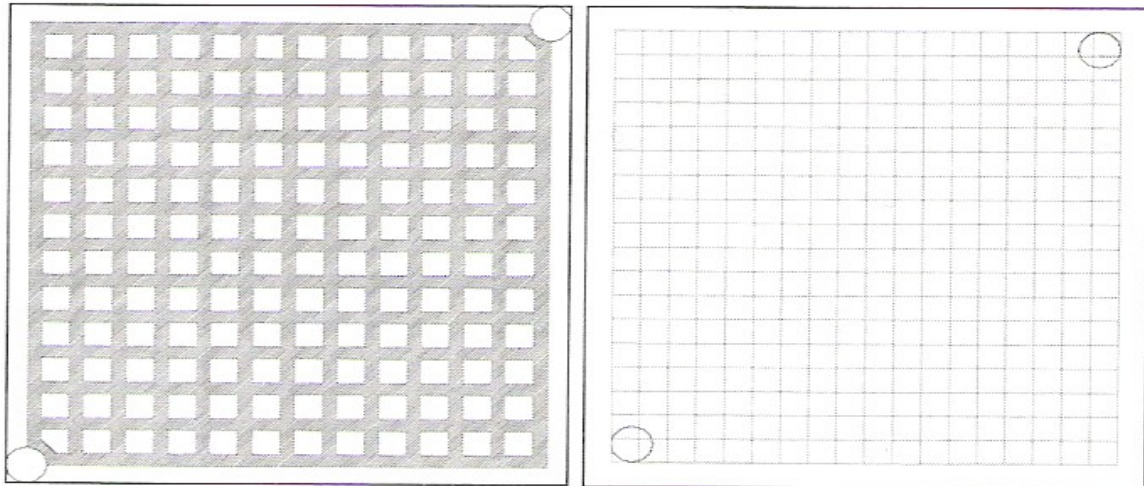
Figuur 6.9

General Motors heeft een patent op de flow field plate zoals getoond in figuur 6.10. Het is net een combinatie van rechte parallelle kanalen en een slangvloeveld. Het is een interessante plaat voor integratie van een koelsysteem.



Figuur 6.10

Een andere oplossing is het creëren van een regelmatig patroon van aaneensluitende structuren, zoals getoond in figuur 6.11, of het gebruik van een draadnetsubstraat of een schuimsubstraat (figuur 6.11). Deze twee opties zullen goed werken bij een beperkte stroom. Wanneer een hoger vermogen gegenereerd wordt in de MEA, zal de gasstroom zich meer en meer concentreren op het centrale gedeelte van het vloeiveld wat niet actieve stukken zal nalaten. Het is zeer moeilijk om onregelmatige structuren (fig. 6.11) te maken met absoluut dezelfde poreusheidseigenschappen. In een brandstofcel zou dit kunnen leiden tot verschillende stromingsweerstand onder verschillende cellen, zeker bij hoge vermogentoeepassingen.



Figuur 6.11

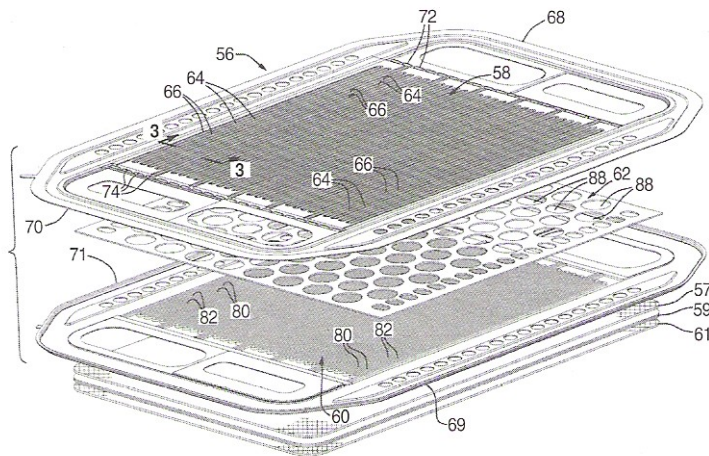
6.4.1.2 Vloeiveldontwerpgereedschappen

Mogelijks is het beste gereedschap een krachtig computerprogramma dat tweefase-stromingsproblemen in willekeurige structuren kan oplossen. Tot nog toe hebben ontwerpers geen resultaten van zulke oefeningen gepubliceerd.

Er is een techniek ontwikkeld voor het experimenteel controleren van de stroomverdeling in een vloeiveldplaat. Dit zogenoemde *stroom in kaart brengen* maakt het mogelijk om de prestaties van een MEA in de praktijk voor te stellen. Een voorbeeld hiervan zie je in figuur 6.12. Ballard was de eerste die een dergelijke stroommap kon maken. Figuur 6.12 toont de stroomverdeling in een werkende brandstofcel. Een mogelijk ontwerp is een speciale plaat, die verdeeld is in segmenten, en past in een brandstofcel. Stromen kunnen gemeten worden als spanningsval over een segment. Een andere aanpak wordt voorgesteld door DLR die hallsensoren heeft ingebouwd in elk segment van de plaat. De sensoren zijn zeer gevoelig voor stroom, maar reageren ook op de temperatuur in de brandstofcel.

6.4.2 Koelplaten en bevochtigers

De brandstofcel bevat nog andere componenten. De belangrijkste zijn koelplaten of andere apparatuur om warmte te verwijderen. Koeling is nodig om de gewenste werkingstemperatuur te krijgen bij een bepaalde brandstofcel. Het kan dat men de temperatuur doet dalen, maar het is ook mogelijk dat men warmte toevoegt om waterverwijdering te bevorderen. Men verwacht dat bij hoogvermogen toepassingen, zoals bij autobrandstofcellen, koeling vereist zal zijn. Dit wordt gewoonlijk gedaan door het invoegen van een koelplaat in de brandstofcelstack waardoor water stroomt. Dit kan men door gebruik te maken van inwendige, gekoelde bipolaire platen zoals er een te zien is in figuur 6.14.



Figuur 6.14 Prent van een 3 lagen metalen bipolaire plaat De bovenste en onderste platen worden gebruikt als anode- en kathodeplaten Dde binnenste platen laten water toe aan de binnenkant.

In minder vergende toepassingen zoals draagbare systemen, waar het systeem zo weinig mogelijk componenten moet bezitten, wordt luchtkoeling toegepast. In het simpelste geval zijn de kathodevloeivelden open en wordt lucht aangevoerd door een ventilator en ondertussen wordt er dus ook gekoeld. Een tweede functie die in een brandstofcelstack wordt gebruikt is reactantbevochtiging. Het is nog niet bekend of nieuwe membranen niet-bevochtigde werking zullen toelaten. In de autotoepassingen van vandaag wordt brandstof en de lucht bevochtigd omdat een maximumvermogen verwacht wordt. Dit kan alleen verkregen worden als de membraanweerstand zo klein mogelijk is. De vakliteratuur toont verschillende types van bevochtigers, waterbronmembraan of fiberbundelbevochtigers en waterverdampers. De eenvoudigste luchtbevochtiger is de bekende *bubbler* (zie Fig. 6.15), dit is het ontwerp van een fles met gas dat direct door vloeistof gaat. Deze benadering laat een slechte controle van de graad van bevochtiging toe en is minder geschikt binnen complexe brandstofcelssystemen.



Figuur 6.15 de bubbler

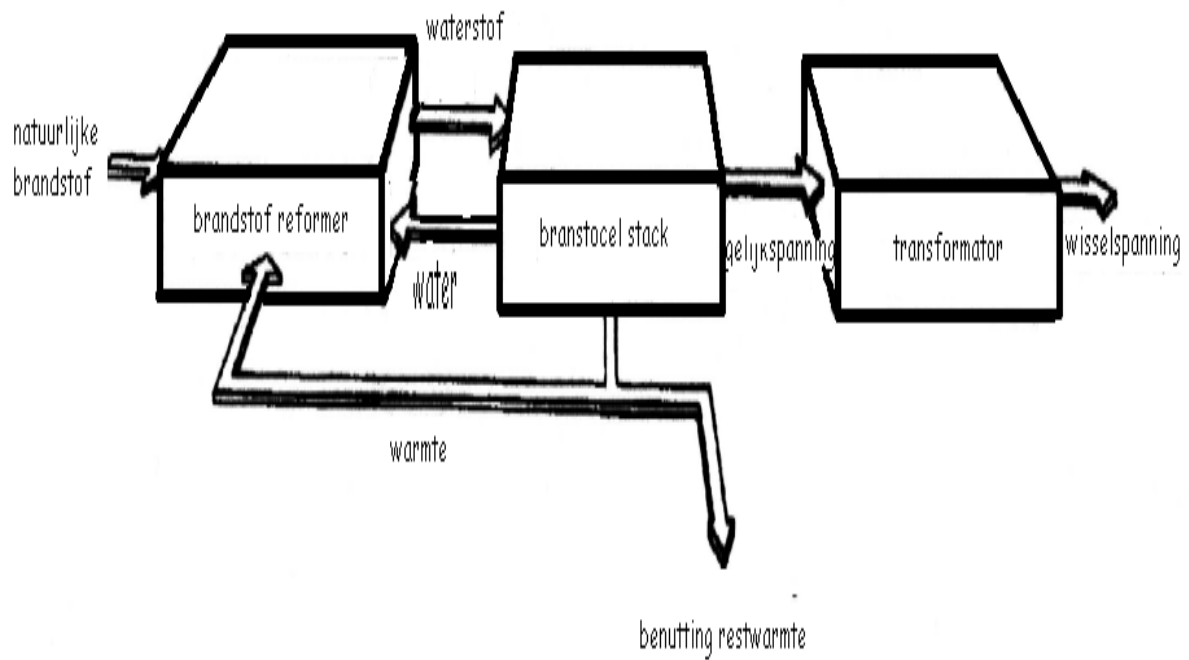
Een andere aanpak is het gebruik van een membraanbevochtiger. Een half doorlatend membraan scheidt een compartiment gevuld met water van een compartiment met het reactant gas. Onder ideale omstandigheden leidt het gas langs het membraan en verhoogt het voortdurend zijn vochtigheid. Het membraan mag buisvormig zijn of mag zelf bestaan een slangenbundel, die ook in en uit geschakeld worden om het niveau van bevochtiging te regelen. Het gebruik van koolstof in de buizen voor waterbevochtiging is voorgesteld voor waterzuivering op zijn oorspronkelijke plaats.

Tenminste drie bedrijven, Plug Power, Sanyo Electric en Tanaka Kikizoku Kogyo hebben een patent op systemen die bevochtiging en koeling combineren. De Plug Power- ontwikkeling bestaat uit een koeler-bevochtterplaat met een stroom van water om warmte te verwijderen aan de ene kant en wieken die de reactantgassen bevochtigen aan de andere kant. Verdamping van water aan de bevochtigende kant zorgt voor de bijkomende koeling.

6.4.3 Andere componenten v

6.4.4 an een brandstofcelsysteem

Nu hebben we het grootste deel van de componenten gezien. Een volledig brandstofcelsysteem kan nog verschillende componenten bevatten: de eigenlijke brandstofcel (brandstofcelstack) en eventueel een voorbehandeling van de brandstof (reformer), een omvormer voor wisselspanningstoepassingen en een benutting van de restwarmte. Het brandstofcelsysteem wordt principieel voorgesteld in figuur 6.16



Figuur 6.16 Brandstofcelsysteem

7 Katalysatoren

Definitie: een katalysator is een stof die een chemisch proces versnelt of vertraagt.

In het midden van een PEMFC zijn er twee katalysatorlagen. Ze hebben een kritische rol in het bepalen van de prestatie van de MEA. Zonder deze lagen zou de MEA niet functioneren en zou de PEMFC niet interessant zijn voor energieopwekking in de 21ste eeuw. Voor een goede werking moet een elektrokatalysator voldoen aan verscheidene vereisten. Hij moet een hoge intrinsieke werkzaamheid hebben voor de elektrochemische oxidatie van de brandstof aan de anode (dit kan waterstof of methanol zijn) en voor de reductie van zuurstof aan de anode. De katalysator moet een hoge levensduur en een hoge elektrische geleidbaarheid hebben om de weerstandsverliezen te minimaliseren.

7.1 Elektrokatalysatoren voor de PEMFC

De ontwikkeling van elektrokatalysatoren voor de PEMFC's is gebaseerd op de inzichten en de bevindingen ontwikkeld voor vroegere brandstofceltechnologie. Deze bevatten CO-tolerante katalysatormaterialen ontwikkeld voor het General Electric programma van 1960, koolstofdragende platinakatalysatoren ontwikkeld rond de jaren 70-80 en de MeOH-oxidatietechnologie voor het Shell direct methanol brandstofcel programma ook in 1960. In dit hoofdstuk is het de bedoeling om deze bijdragen te bestuderen en wanneer mogelijk ook de katalysatorprestatie in een PEMFC omgeving te illustreren.

Het belangrijkste voor de praktische brandstofcelkatalysatoren is dat ze op zoveel mogelijk oppervlakteplaatsen een hoge intrinsieke werkzaamheid voor de reactie bieden.

Andere vereisten zijn:

- elektrische geleidbaarheid
- goede wisselwerking met het membraan
- gastoeegang
- stabiliteit met de reactanten, producten en elektrodes

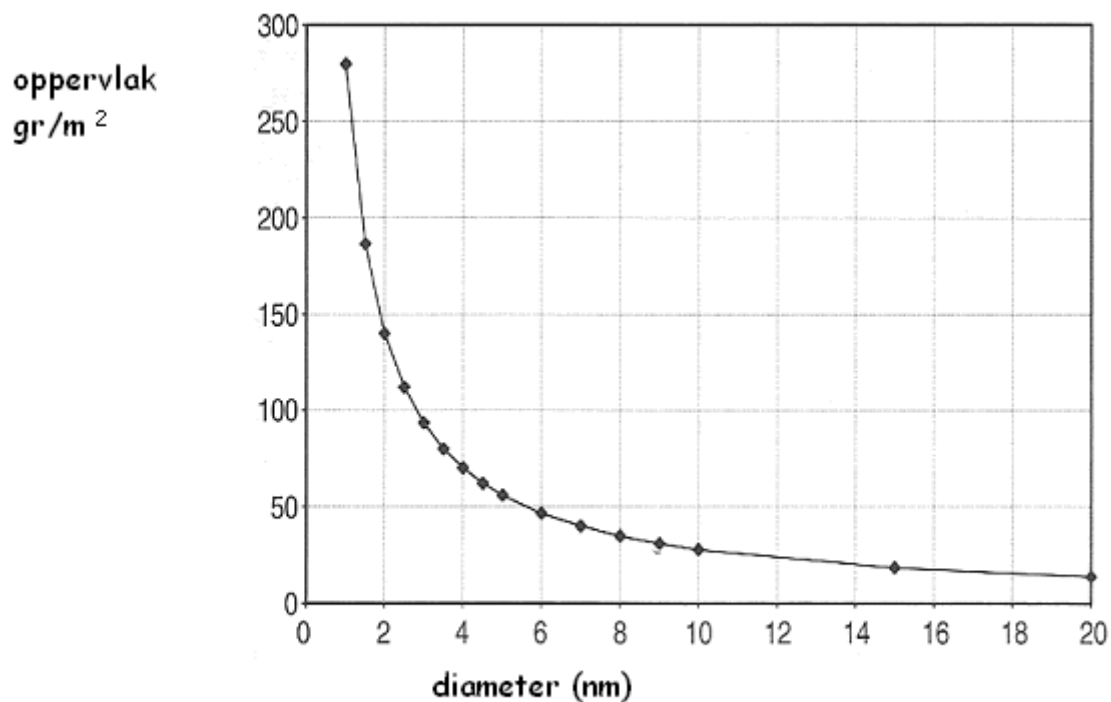
Omdat een brandstofcel een maximumefficiëntie zou bezitten, moeten beide elektrode reacties zo dicht mogelijk plaatsvinden bij hun theoretische potentiaal. Platinabevattende katalysatoren blijken de meest efficiënte katalysatormaterialen te zijn. Recente studies hebben uitgewezen hoe het platina gebruikt moet worden om optimaal te functioneren. Om het grootste aantal actieve plaatsen te verkrijgen bij een bepaalde actieve fase is verspreiding van die platina op een drager nodig. Zwarte koolstof voldoet aan deze dragervereisten. Die laat toe de actieve fase (normaal platina) te verspreiden over het drageroppervlak. Het verband tussen de grootte van platinadeeltjes en de oppervlakte ervan kan berekend worden met de formule

$$S = 6 / (\rho_{Pt} \times d)$$

S : de massieke oppervlakte

ρ_{Pt} : de platina dichtheid

d : de diameter van een deeltje



Figuur 7.1 Grafisch verband tussen de diameter van de platinadeeltjes en het oppervlak

7.2 Anode katalysatoren

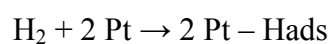
Er zijn slechts twee brandstoffen die we gebruiken voor een PEMFC-brandstofcel: H₂ en MeOH. De elektro-oxidatie van andere brandstoffen zoals ethanol zijn vroeger ook onderzocht, maar worden niet besproken, omdat dit geen goede brandstoffen zijn voor de PEMFC.

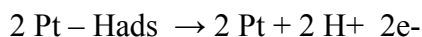
7.2.1 H₂ elektro-oxidatie

De chemische schrijfwijze van de oxidatie van H₂

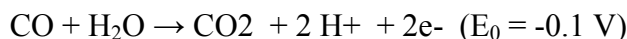


De oxidatie van waterstof op edele metaaloppervlakken zoals platina en palladium is heel eenvoudig. Andere metalen vertonen ook een hoge werkzaamheid voor waterstofoxidatie, maar in zure elektrodes hebben edelmetalen de grootste stabiliteit tegen corrosie. Het mechanisme van de waterstofoxidatie op platina in zuurelektrodes verloopt moeilijk door de geabsorbeerde afscheiding van waterstof, deze stap beslist welke weg te volgen. Dit wordt gevolgd door een ladingswisseling.

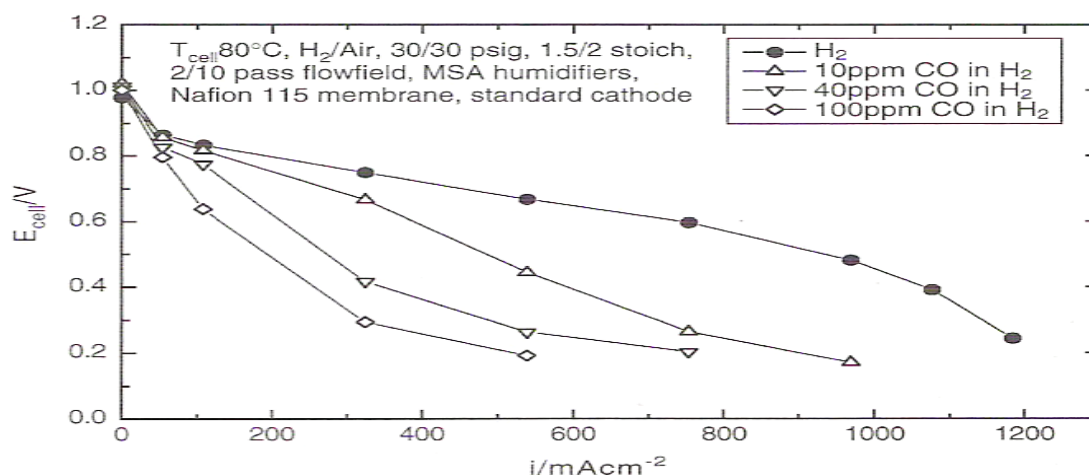




7.2.2 Het effect van koolstofmonoxide

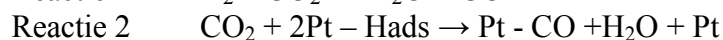
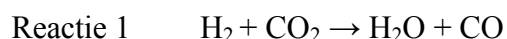


Het is aangetoond dat koolstof goed bindt met platinaplaatjes. Hierdoor vermindert het aantal ter beschikking gestelde platina plaatjes in een H₂/CO mengsel voor waterstofadsorptie en waterstofoxidatie. Hoewel de oxidatie van CO thermodynamisch gunstig is, zien we in de praktijk dat een groot overpotentiaal nodig is om op pure platina oppervlaktes oxidatie te verkrijgen. Bij platinakatalysatoren wordt bijvoorbeeld de CO-oxidatie niet uitgevoerd tot er zich een spanning van 0,5V bij 80°C aanwezig is. De graad van CO-vergiftiging van platinakatalysatoren is afhankelijk van de temperatuur en de concentratie van CO.



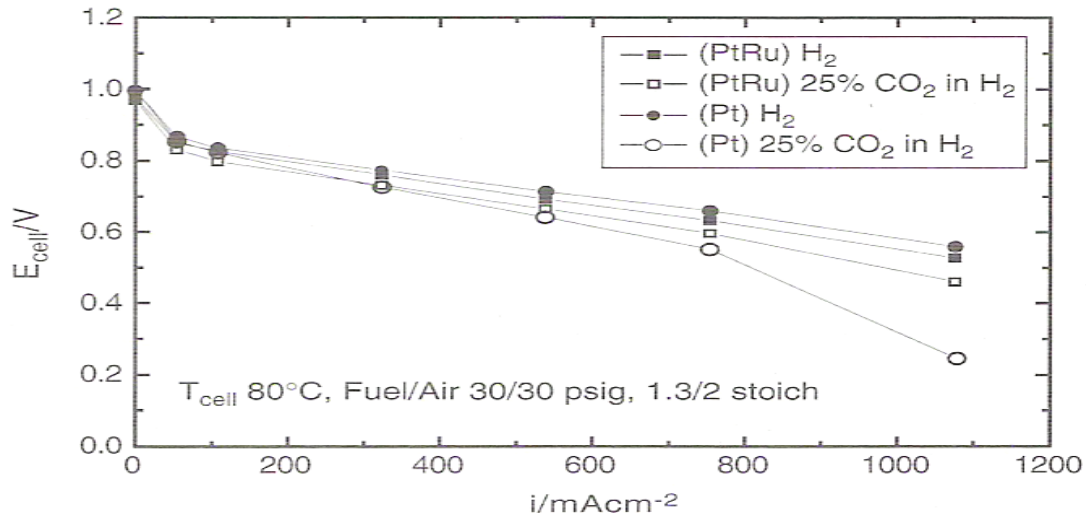
Figuur 7.2 Effect van CO op de celprestatie bij een platinakatalysator

7.2.3 Het effect van koolstofdioxide



Koolstofdioxidevergiftiging op pure platinakatalysatoren is bescheiden wanneer je het vergelijkt met het effect van koolstofmonoxide, zeker wanneer er grote verschillen zijn in de relatieve concentratie. De vergiftiging komt van twee mogelijke mechanismen. Beide ontstaan van de *omgekeerde water-gaswisseling reactie* met (reactie 1) de bekende gasfasereactie, en (reactie 2) het elektrochemische equivalent. In beide gevallen is het product koolstofmonoxide. Er werd berekend dat in evenwichtige toestand in een gasmengsel van 75% H₂ en 25% CO₂ er 100 ppm CO aanwezig zou zijn.

ppm = parts per miljoen



Figuur 7.3 Effect van CO₂ op de celprestatie bij gebruik van een platina- en PtRu katalysator.

7.3 Aanpak van de verbeterde tolerantie

Zoals we daarnet gezien hebben, wordt de prestatie van een zuivere platina-anode sterk naar beneden gehaald door de kleine deeltjes CO en ook door de in iets mindere mate CO₂-elementen, die aanwezig zijn in de brandstofstroom. De grote meerderheid van het geleverde werk om een betere tolerantie te verkrijgen bij de PEMFC anode is gegaan naar onderzoek van de CO-tolerantie.

Er zijn twee methodes om een betere tolerantie te verkrijgen: ontwikkelen van CO tolerante elektrokatalysatoren en het gebruik van air bleeds

7.4 Kathode katalysatoren

De kathodereactie verschilt van de anodereactie, aangezien de kathode geen selectieve katalyse hoeft te doen in de meeste toepassingen uit de PEMFC. Alleen bij het gebruik van MeOH als brandstof is een selectieve katalyse vereist, omdat de op platinagebaseerde katalysatoren de beide, zuurstofreductie en MeOH-oxidatie, moeten katalyseren. Dit leidt tot een gemengd potentiaal. Zoals bij de anode wordt de hoogste prestatie verkregen met de toevoer van zuivere reactanten, hier is dit zuiver O₂. In de meeste toepassingen is lucht de enige oxidans die gebruikt kan worden. De reductie van zuurstof in een waterig medium wordt uitgevoerd door enkele mogelijke reacties. De potentialen voor deze reacties zijn hieronder te zien.



De reductie van dizuurstof door vier elektronen is de meest aantrekkelijke reactie om te katalyseren, omdat die de hoogste celspanning heeft voor een H_2 / O_2 - brandstofcel. Men is tot het besluit gekomen dat het moeilijk is om deze reactie te laten presteren bij lage overpotentialen. In zuurelektrodes zijn edelmetalen zoals Pt, Pd, Rh en hun legeringen blijkbaar de katalysatoren die men zal gebruiken voor zuurstofreductie. Maar zelfs de beste van deze katalysatoren, Pt, is 10^6 keer minder actief voor de zuurstofreductie dan voor waterstofreductie.

De werkingsmechanismen van zuurstofreductie bij Pt en andere edele metalen zijn de laatste 40 jaar grondig bestudeerd. Een omvattende terugblik van zuurstofreductie-mechanismen kan teruggevonden worden in Appleby.

Omdat platina herkend wordt als de zuurstofreductie katalysator bij uitstek, is de ontwikkeling van de praktische Pt-technologie door een aantal verschillende stages gepasseerd. De vroege PEMFC technologie, zoals voor het ruimteproject, was gebaseerd op zeer grote elektrodemassa's (Pt en Pd) van soms meer dan 20 mg/cm^2 om een redelijke kathodeprestatie te verkrijgen. Deze materialen werden gemaakt door een aantal verschillende methodes en hadden meestal een klein oppervlak. De volgende ontwikkeling van de PAFC voor stationaire vermogenopwekking leidde tot de invoering van veel lagere kathodemassa's (0.5 mg/cm^2), dit door gebruik te maken van koolstofdragende platina katalysatoren. De ondersteuning van platina op een koolstofdrager liet een veel hogere verspreiding van metaal toe.

Wanneer de PEMFC-technologie in de jaren 80 opnieuw verscheen grotendeels te wijten aan een initiatief van Ballard Power Systems, werden Pt-kathode en anode katalysatoren gebruikt. Het verzoek om goedkopere elektrodes en MEA's te produceren heeft geleid tot de invoering van koolstofdragende platina katalysatoren die het gewicht en ook de prestatieverliezen verlaagden. Het is aangetoond dat de Pt-massa van 8 mg/cm^2 kan verminderd worden tot 1 mg/cm^2 wanneer we gebruik maken van koolstofdragers. In labo proeven is men erin geslaagd om massa's van minder dan 0.3 mg/cm^2 te produceren die een voldoende hoge prestatie presteren.

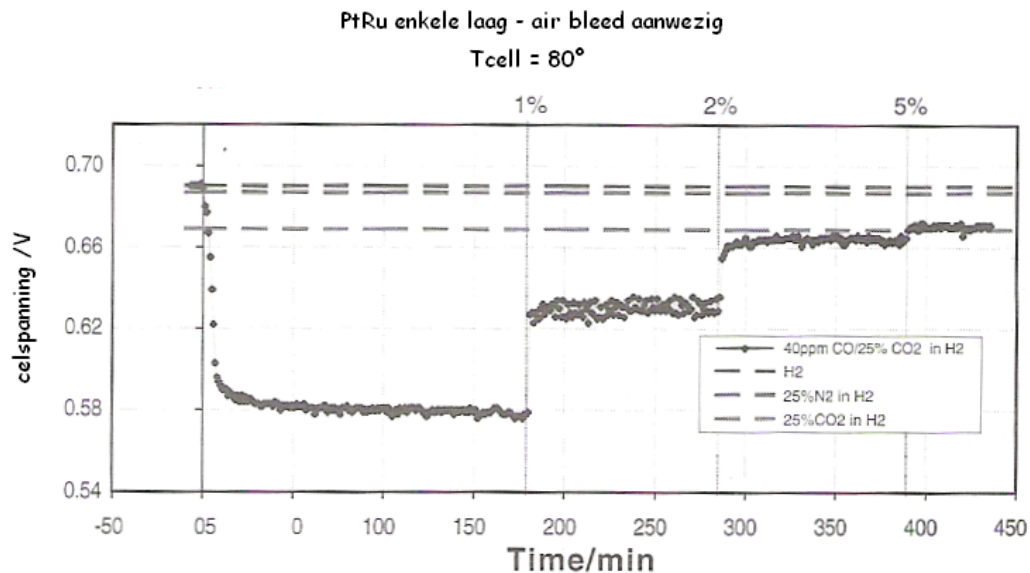
7.5 Katalysatoren zonder platina

De grote kosten en hoge overpotentialen die samengaan met de op platina gebaseerde katalysatoren heeft geleid tot een grote investering van alternatieve niet precieze metaalkatalysatorsystemen voor de PAFC en de PEMFC. Recente literatuur toont dat op Ru gebaseerde chalcogenides, pyrolyzed ijzer, kobalt macrocycles en metaal carbides ook een bepaalde prestatie voor zuurstofreductie hebben. Veel van deze katalysatoren zijn selectief naar zuurstof in de aanwezigheid van methanol dat een voordeel is bij de DMFC's want daar kan dit gebruikt worden als kathodekatalysator. Basismetalen (Fe, Co) en macrocyclic componenten (porfyrine, stof gevonden in het protoplasma bij dieren en planten) zijn al lang bekend als zuurstofreductoren. Koolstofdragende materialen kunnen werken voor beide brandstofcellen, alkalische en zuursystemen. In alkalische tonen de op koolstof gebaseerde systemen een goede prestatie, grootte levensduur en ze worden op grote schaal gebruikt bij batterijen. In zuur, tonen de op ijzer en kobalt gebaseerde systemen een zuurstofreductie maar hun prestatie en levensduur zijn niet groot. Pogingen tot het verbeteren van deze beide eigenschappen leidden tot de ontdekking dat als men warmte toevoegt aan de katalysatoren tot op een temperatuur van ongeveer 600°C dit leidt tot een verbeterde levensduur, maar de

prestatie was nog kleiner dan die van op platina gebaseerde systemen. De op Ru-gebaseerde katalysatoren werden veel onderzocht sinds de ontdekking dat chevrel-phase Ru–Mo chalcogenides een aanzienlijke zuurstofreductie vertoonden in zure elektrolyten. Men constateerde dat koolstofdragende materialen amorf blijken te zijn en dat bij blootstelling aan luchtbevochtigde en aan een waterige elektrolyt, een bepaalde hoeveelheid zuurstof aanwezig is die aantoont dat er hydrolyse had plaatsgevonden. Recenter werk heeft getoond dat een koolstofdragend Ru–Mo oxiseleen en een koolstofdragende Ru-katalysator overeenkomende activiteiten presteren. Dit bewijst dat Mo en Se niet deelnemen aan de katalyse. Het oxiseleen is tolerant voor methanol, maar het is een slechtere katalysator voor zuurstofreductie in vergelijking met platina. Minder dure katalysatoren bezitten zuurstofreductie activiteit onder PEMFC voorwaarden, hoewel deze slechter zijn dan platina de platina activiteit. Bij het begin, was de PEMFC ontwikkeling gericht op een hogere prestatie.

7.6 Gebruik van airbleeds

De platinakatalysatoren van de PEMFC zijn gevoelig voor vergiftiging door kleine hoeveelheden koolstofmonoxide in de brandstofstroom. Die koolstof is er als product van de reactie. Gottesfeld en Pafford konden het probleem voorkomen door het maken van een oxiderend oppervlak met het toevoegen van O₂ in de brandstof stroom. Aan de elektrode wordt het geabsorbeerde CO geoxideerd door zuurstof. Het alternatief voor het gebruik van CO-tolerante anodekatalysatoren is dus het toevoegen van een air bleed aan de brandstofstroom voor het de MEA bereikt. De overgebleven CO wordt dan geoxideerd door de anodekatalysator tot een niveau dat de anodeprestatie niet meer beïnvloedt (zie fig. 7.4).



Figuur 7.4 het effect van air bleed op de CO-tolerantie van PtRu

8 Het brandstofprobleem

Waterstof is het meest eenvoudige element op aarde. Het bestaat uit een proton en een elektron. Ook is het een van het meest voorkomende element op aarde. Waterstof maakt voor 90% deel uit van alle elementen op aarde en $\frac{3}{4}$ van de totale massa van het heelal. In zuivere gasvorm komt het op de aarde bijna niet voor. Dit komt omdat er gemakkelijk een reactie wordt aangegaan met een andere stof. Waterstof komt het meest voor in een verbinding van tweewaterstof atomen en een zuurstofatoom, ook wel bekend als water. Water beslaat namelijk meer dan 66% van deze planeet. Waterstof werd voor het eerst ontdekt in 1966 door Henry Cavendish die op dat moment in Engeland woonde. De originele naam komt uit het Grieks: Hudôr (water) en Gennan (generatie).

Het idee om waterstof ergens voor te kunnen gebruiken, kwam pas veel later. In 1874 schreef Jules Verne in zijn *The mysterious island* dat de fossiele brandstoffen zouden uitputten. Pas later beseftte men ook dat het inderdaad wel eens kon gebeuren. Vanaf dat moment kwam de studie naar waterstof pas echt op gang en heeft men vele aspecten van productie, opslag en gebruik van waterstof bestudeerd. De energiewaarde van waterstof in vergelijking met andere gebruikelijke brandstoffen is per gewicht eenheid het hoogst. Bij verbranding of energieopwekking met waterstof komt er alleen gedemineraliseerd water vrij. Hierdoor is het beter voor het milieu dan om het even welke andere hedendaagse brandstof.

Een nadeel op dit moment in het gebruik van waterstof is, dat er energie nodig is om het te vormen. Met de huidige rendementen kost het meer energie om waterstof te maken dan dat het oplevert. De enige manier om kosteloos waterstof te produceren is door zon/wind elektrolyse. Hierbij wordt de zon of wind gebruikt voor de energielevering. De kosten die hiervoor gemaakt worden zijn zeer hoog omdat de huidige zonnecellen en windmolens een zeer lage opbrengst hebben. Als er in de toekomst een hoger vermogen uit een zonnecel of windmolen gehaald kan worden, is dit het ideale proces voor de toekomst.

Enkele waterstofgegevens:

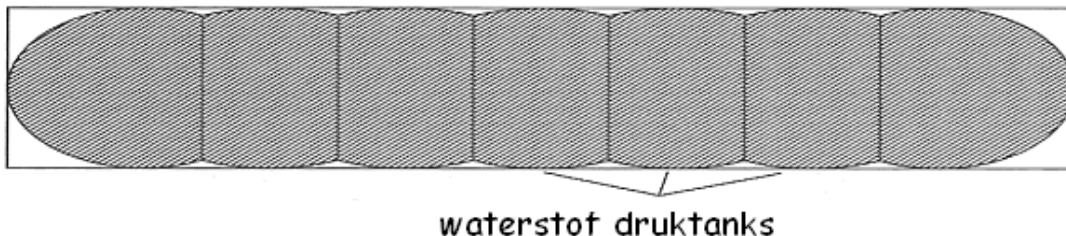
- 01 Atoom nummer 1
- 02 Atoom symbool H
- 03 Atoomgewicht 1,00794 U
- 04 Atoomradius 0,79 Å
- 05 Bindingsradius 0,32 Å
- 06 Elektronenconfiguratie 1S¹
- 07 Gasdichtheid 0,08987 Kg / m³
- 08 Gasconstante (R_s) 4160 J (kg.K)
- 09 Verbrandingswarmte 121 MJ / kg
- 10 Verbrandingswarmte (gas) 10,8 MJ / m³
- 11 Verdampingswarmte 0,44936 KJ / mol
- 12 Kookpunt -252,7 °C
- 13 Smeltpunt -259,2 °C
- 14 Kritische temperatuur -240 °C
- 15 Zelfontbrandingstemperatuur 520 °C
- 16 Standaardtoestand Gas
- 17 Kleur kleurloos

8.1 Technologie van brandstofopslag

Zoals elke brandstof zal ook waterstof opgeslagen moeten worden voor later gebruik. Het is bijna niet mogelijk om geproduceerde waterstof direct te gebruiken. Een groot nadeel van waterstof is de hoge brandbaarheid. In gasvorm is het niet waar te nemen zoals een ander gas of benzine. Hierdoor moet er extra zorg worden gedragen voor de opslag van waterstof. Tot op heden zijn er meerdere vormen van opslag bekend. Zowel opslag in gas- als vloeistofvorm worden gebruikt. Een overweging van het soort opslagtype dat gekozen wordt, hangt af van de hoeveelheid waterstof, de beschikbare ruimte en de kosten van de opslagtanks. Voor het transporteren van waterstof over langere afstanden is het mogelijk om dit door een pijpleiding te doen. In gasvorm kan waterstof onder iedere gewenste druk door de leiding heen geperst worden. Voor gebruik in de toekomst zal het heel goed mogelijk zijn om elk huis te voorzien van een gasleiding. Of het gebruik van het huidige leidingnet in de toekomst gebruikt kan worden is nog niet duidelijk, omdat waterstof een hogere brandbaarheid heeft en dus met meer zorg zal getransporteerd moeten worden. Hieronder worden enkele opslagmethoden besproken

8.1.1 Opslag in drukcilinders

Omdat we lichtere opslagtanks nodig hebben, zijn er cilinders ontwikkeld uit composiet materialen die sterker en lichter zijn dan staal. *Opgerolde koolstof-* aluminium cilinders kunnen waterstof opslaan onder een druk van 550 bar. Maar nationale wetgeving kan begrenzen op een lagere druk. Meestal is brandstof opgeslagen onder een druk van 248 tot 300 bar. Op hoge drukken bereiken de moderne composiet tanks een massareductie van waterstof. Er zal maar 3% van het gewicht van de volle cilinder uit waterstof bestaan. In verdere ontwikkeling zijn de gerichte brandstoftanks gemaakt om een betere plaatsvulling te bieden dan gestapelde cilinders.



Figuur 8.1

De nieuwe druktanks geven 50% betere plaatsvulling dan de conventionele cilinders. Thiokol heeft een tank gebaseerd op dit concept ontwikkeld. Hij weegt 29 kg vol en bevat 1,5 kg waterstof. Dus heeft hij een waterstofdichtheid van 5,17%. Waterstofopslag vereist ook het gebruik van een polymere afsluiting om de gasdoorlaatbaarheid te verkleinen.

8.1.2 Voeibare waterstof

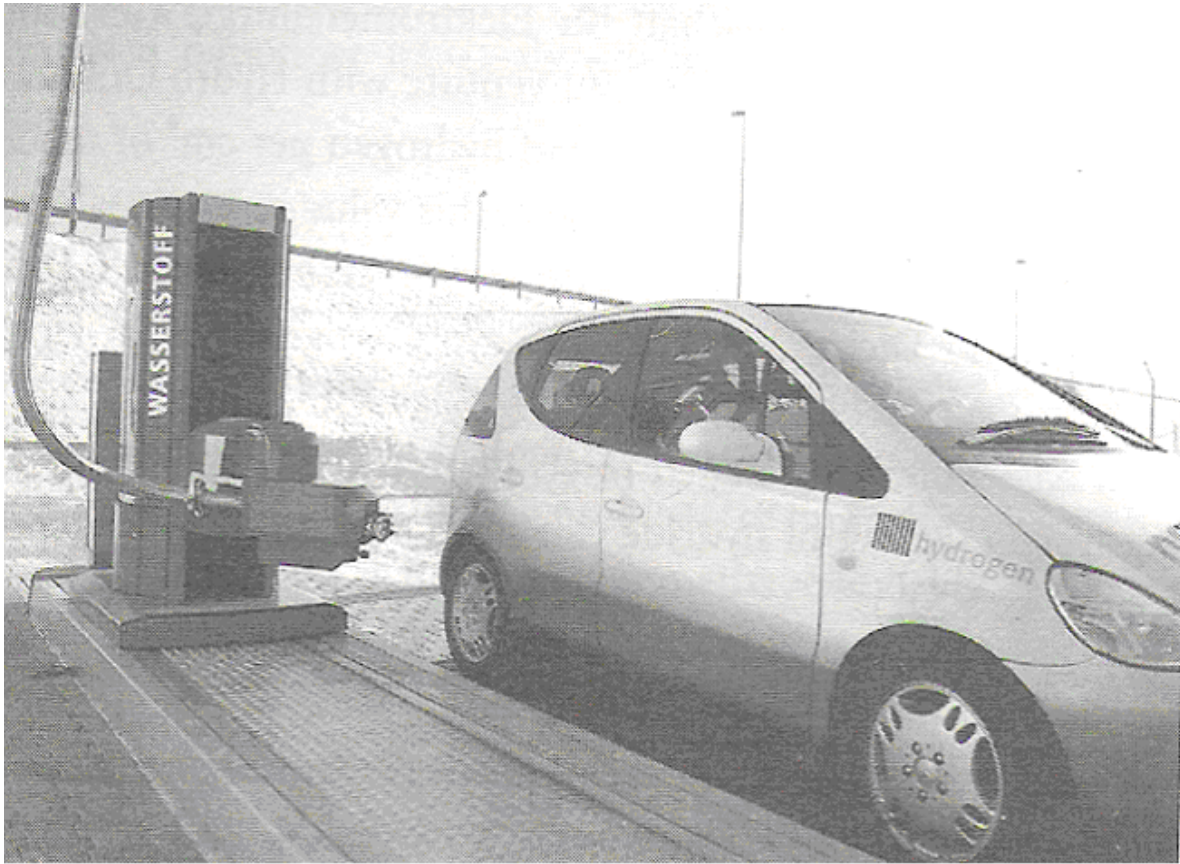
Door het condenseren van waterstofgas tot vloeistof is het mogelijk om een grotere hoeveelheid waterstof op te slaan en te vervoeren in een kleinere ruimte. Ook deze tanks bestaan uit zeer sterke materialen die hoge veiligheid bieden bij eventuele beschadiging. Het grootste nadeel van vloeibare waterstof is, dat het een zeer grote hoeveelheid energie kost om het van een gasvorm om te zetten in een vloeistof. Op dit moment is men nog voortdurend bezig met het onderzoeken, want deze opslagmethode is zeer moeilijk.

Er zijn veel gevaren bij deze opslagmethode.

Verschillende gebruikte materialen, zoals koolstofstaal, kunststoffen en rubber worden bros en kunnen scheuren bij extreem lage temperaturen van cryogene vloeistoffen. Bovendien krimpen de meeste materialen in bij cryogene temperaturen wat aanleiding kan geven tot lekken in de verbindingen. Ongeacht de gebruikte materialen dient men in alle gevallen verontreiniging van de apparatuur met water te vermijden, want de uitzetting van ijs kan scheurtjes in de apparatuur veroorzaken. Bij brand moet men rekening houden met het feit dat vloeistoffen zoals waterstof gemakkelijk het water doen bevriezen. Op die manier kan water, indien ondoordachtzaam gebruikt, de veiligheidskleppen gaan blokkeren; omdat het water bovendien relatief warm is, kan het de verdamping van vloeibare waterstof versnellen, wat de brand nog gaat voeden. Omdat de apparatuur dient gezuiverd te worden voordat men er vloeibare waterstof in brengt (om mogelijks een explosieve atmosfeer of een explosief mengsel van lucht en vloeibare waterstof te vermijden), kunnen bepaalde inerte gassen zoals stikstof gaan bevriezen, blokkeringen veroorzaken en zo aanleiding geven tot breuken in transferleidingen of in de opslagtank.



Figuur 8.2 Een vloeibare waterstoftank in een autokoffer



Figuur 8.3 Publieke brandstoftankplaats.

8.1.3 Metaal hydride

Bij deze opslagmethode wordt in een tank waterstof gecombineerd met een metaalsoort. Deze is in staat om zich te binden met waterstof. Hierdoor ontstaat er een stabiel metaalhydride. De metaalhydride lost op wanneer deze wordt verwarmd en laat dan de waterstof weer vrij. Deze opslagmethode is tot nu toe de veiligste en de meest rendabele. Men stelt vast dat deze opslagmethode helpt om onzuiverheden van het brandstofgas te verwijderen, omdat de onzuiverheden geen stabiele componenten vormen met het opslag medium. Dit is alleen zo voor niet absorberende onzuiverheden zoals CH_4 , CO_2 en edele gassen. Vervuiling van onzuiverheden zoals CO , O_2 en water veroorzaken onherroepelijke schade aan de brandstoftank. In de auto-industrie worden deze tanks al gebruikt voor de opslag van brandstof voor experimentele voertuigen. Ook voor de opslagmethoden geldt hetzelfde als voor de productieprocessen: er wordt nog steeds in hoog tempo gezocht naar eenvoudige oplossingen die goedkoper en meer rendabel zijn voor toekomstig gebruik.

8.1.4 Koolstofpapier

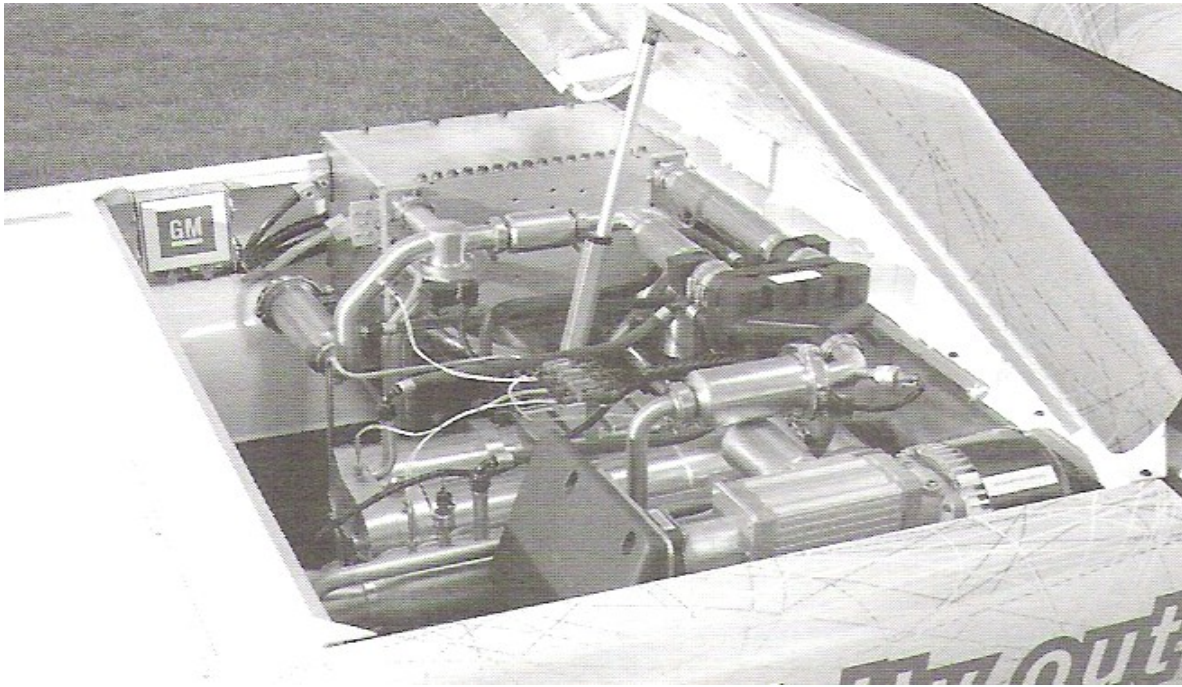
Recent meldde een onderzoekteam van een Engelse universiteit dat een speciaal type van nanokoolstofpapier een fractie van het waterstofgewicht kan absorberen tot meer dan 2/3 van het totale gewicht. Dit is zowel wetenschappelijk als commercieel van groot belang. Het is bekend dat waterstof kan worden opgeslagen door geactiveerd koolstof, maar van opslagcapaciteiten zoals die gevonden werden door de Engelse universiteiten vermoedde men het bestaan niet. Als bruikbare hoeveelheden van dit materiaal verkrijgbaar zouden worden en beladen zouden worden met waterstof, weliswaar door een ingewikkeld proces, dan zouden de auto's duizenden mijlen kunnen rijden met een tank. Er werd een onderzoekssamenwerking opgericht door DaimlerChrysler. Niemand schijnt er in te slagen om de juiste hoeveelheden van het goede koolstofpapier te produceren voor een prototype of zelfs niet voor een labo-onderzoek. Daarom is men nu nog niet zeker of het nanokoolstofpapier een technologische oplossing voor de waterstofopslag.

8.2 Opslagcapaciteit

Een ander probleem is de waterstof produceren waar en wanneer het nodig is. We kunnen dit zien als een methode van *chemische waterstofopslag*. Er zijn al veel vloeibare brandstoffen in aanmerking gekomen als mogelijke oplossing voor het brandstofprobleem van auto's op brandstofcellen. De belangrijkste zijn koolwaterstoffen zoals benzine en diesel. Aan methanol is veel aandacht besteed omdat het een relatief gemakkelijk proces is. Aan een andere alcohol, ethanol, wordt ook veel aandacht besteed als bruikbare brandstof. De brandstofhoeveelheid wordt beperkt door het gebruik ervan voor gisting van voedingsopslag. Het is ook minder toepasselijk voor brandstofcellen dan methanol. Twee grote voordelen van vloeibare brandstoffen zijn: hun grotere energie-inhoud en een gemakkelijk transport en verhandelbaarheid vroeger. Vloeibare brandstoftanks zijn al verkrijgbaar, ze zijn veel lichter en het volume wordt vooral bepaald door de soort brandstof. LPG wordt al toegepast voor transport in verschillende landen. De opslag is veel gestegen sinds LPG gemakkelijker vloeibaar gemaakt kon worden onder gematigde druk.

8.3 Omvormingstechnologie of reforming

Waterstof wordt voornamelijk voor twee toepassingen geproduceerd in grote hoeveelheden. De helft wordt gebruikt in olieraffinaderijen. Ongeveer 40% voor de reactie met stikstof tot ammoniak. Dit is het enige industriële proces dat bestaat om stikstof te binden. Ammoniak wordt gebruikt in een aantal toepassingen, vooral voor de productie van kunstmeststof. Het jaarlijkse productievolume van waterstof in de U.S. komt overeen met een beetje meer dan de gemiddelde twee daagse consumptie van benzine. Het zal dus nog een tijd duren vooraleer we overgeschakeld zijn van benzine naar waterstof. We hebben tot nog toe de opslagmethodes en welke brandstoffen we gebruiken bekeken. Nu zullen we kijken naar de omzetting van brandstof naar waterstof dit proces wordt *reforming* genoemd. Op figuur 8.4 hieronder zien we het volledige systeem van brandstofcellen met ook de processor waarin omvorming plaatsvindt.



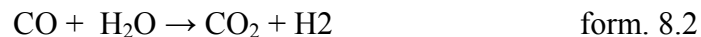
Figuur 8.4 een brandstofcelsysteem met processor

8.3.1 Stoomomzetting of steam reforming (SR)

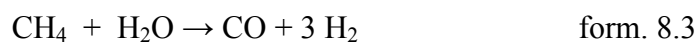
Chemische reactie



Methanol en water worden verdampt en reageren, ze vormen koolstofdioxide en waterstof. De waterstof zullen we nodig hebben voor de brandstofcel. Het koolstofdioxide is het uitlaatgas. De reactie wordt uitgevoerd op een temperatuur tussen de 200 en 300° Kelvin en wordt uitgevoerd boven koperen katalysatoren. 1 mol methanol reageert tot 3 mol waterstof. In de praktijk is reactie 8.1 maar één reactie van een hele reeks reacties. De normale ontstane producten zijn waterstof, koolstofdioxide en koolstofmonoxide. Maar de koolstofmonoxide wordt omgezet naar koolstofdioxide.



Stoomomvorming van methaan is de normale manier om waterstof te produceren. Daarom is het van algemeen belang voor de waterstofeconomie. De methaan stoomomvorming reactie is:



De reactie wordt ook ondersteund door reactie B. De reactie wordt gekatalyseerd door nikkel. De temperatuur waarop de reactie plaatsvindt, ligt tussen de 750 en 1000 Kelvin.

8.3.2 Eenzijdige oxidatie of partial oxidation (POX)

Een andere reactie om waterstof te generen is eenzijdige oxidatie. Ze wordt gebruikt voor zware koolwaterstoffen of wanneer er speciale voorkeuren zijn.

Voorbeeld voor methaan

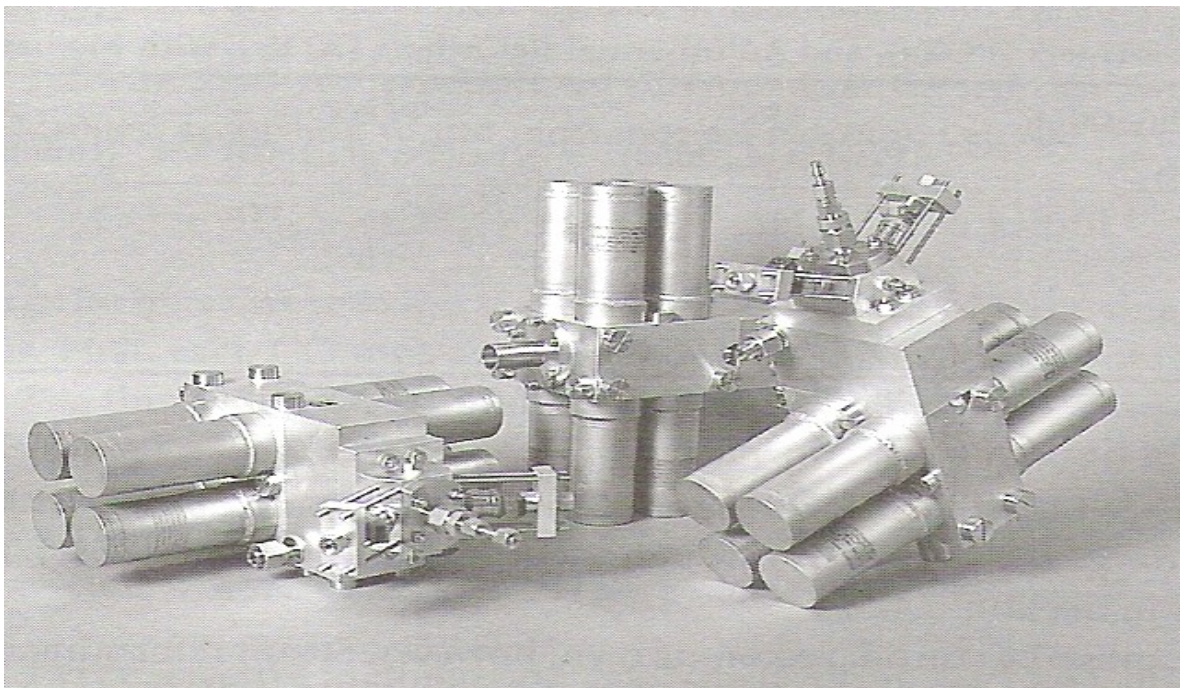


Of



8.3.3 Autothermal reforming (ATR)

Er zijn pogingen geweest om de voordelen van stoomomvorming en eenzijdige oxidatie te verenigen. De exotherme reactie 8.4 of 8.5 zou gebruikt worden als start. Die reactie zorgt voor de warmte voor het endotherme proces (proces waarbij men warmte moet toevoegen). De reacties kunnen gebeuren in afzonderlijke reactoren die een goed thermisch contact hebben. Figuur 8.5 hieronder toont een processor voor ATR



Figuur 8.5processor voor ATR

8.3.4 Vergelijking van de omvormtechnologieën

Wanneer gebruiken we welke omvormingstechnologie? Het eerste dat we bekijken is met welke methode de gekozen brandstof kan omgevormd worden. Methanol is de snelste om te zetten brandstof op een lage temperatuur. Het kan gebruikt worden in elk type omzetter (processor). Methaan en LPG vereisen een veel hogere temperatuur om omgevormd te worden. Methaan kan door SR en door ATR worden omgevormd. Om de zware koolwaterstoffen om te vormen gebruiken we POX. Tabel 8.1 toont voor methanol de verkregen uitgangproducten.

Uitgangproduct droog gas %	SR	POX	ATR
H ₂	67	45	55
CO ₂	22	20	22
N ₂	-	22	21
CO	-	-	2

Tabel 8.1

SR produceert de grootste waterstofhoeveelheden. Er bestaat een omvormsysteem dat volledig gebaseerd is op SR, maar het werkt het best in regimetoestand, omdat het niet geschikt is voor een snelle dynamische reactie. Als het niet geschikt is voor snelle reacties, verlengt dit de opstarttijd. De POX is compact en heeft een kleine opstarttijd, maar het produceert wel kleinere hoeveelheden waterstof. Naast de verschillen in stochiometrisch product tussen SR en POX moeten de uitgangproducten van een POX-omvormer noodzakelijk verder verdund worden, omdat er stikstof in de uitgangproducten aanwezig is. De stikstof wordt in het systeem gebracht door lucht.

De processor die zorgt voor de omvormingen, kan niet op zichzelf werken. Stoom-omvorming is hoog endotherm. Daarom moet warmte worden aangevoerd naar de processor door bijvoorbeeld een pomp. Bij dit brandstofcelsysteem voorziet oxidatie van extra waterstof de nodige warmte voor de processor. In stationaire energieopwekking is het belangrijk om te weten dat de PAFC-brandstofcel werkt op een temperatuur die voldoende hoog is, waardoor er geen extra warmte moet toegevoerd worden aan de processor. Brandstofefficiëntie is zeer belangrijk. Het belangrijkste aspect in stationaire energie-opwekking is de kostprijs van de brandstof. Vandaar dat de methode die het meeste waterstof kan produceren, uit de gekozen brandstof gebruikt wordt. De brandstof die gebruikt wordt bij SR, is een natuurlijk gas.

8.3.5 Elektrolyse

Bij elektrolyse worden watermoleculen opgedeeld door een elektrische spanning. Door een elektrisch spanningsveld op water los te laten wordt de verbinding tussen het zuurstofatoom en de twee waterstofatomen verzwakt en zelfs verbroken. De waterstofatomen worden naar de positieve elektrode getrokken terwijl de zuurstofelektronen naar de negatieve elektroden worden getrokken. Een nadeel van dit proces is het reageren met andere stoffen die als elektroden worden gebruikt. Het grote voordeel van dit proces is dat er alleen maar elektriciteit voor nodig is. Deze elektriciteit kan verkregen worden door zonnecellen of windmolens.

8.3.6 Gasreiniging

Gasreiniging is een proces dat waterstof filtreert uit een bepaald gas. Bij veel industriële processen vindt verbranding plaats. Olieraffinaderijen, chemische fabrieken en Verbranding ovens verbranden een grote hoeveelheid aan brandstof voor de productie van hun eventuele eindproduct. Bij de verbranding komen afvalstoffen vrij die waterstof bevatten. Vroeger werden deze gassen door een schoorsteen afgevoerd. Tegenwoordig worden deze uitlaatgassen, door de strengere milieueisen gefilterd. Tijdens het filteren wordt waterstof onttrokken aan de uitlaatgassen en opgeslagen voor later gebruik. De verkregen waterstof wordt meestal door de fabriek zelf weer gebruikt in een productie proces. Door de kleine opbrengst is dit proces niet geschikt voor toekomstig gebruik.

8.3.7 Andere processen

In de toekomst zal er gezocht moeten worden naar andere productieprocessen die een beter rendement geven. Enkele processen waarmee men op dit moment experimenteert, zijn: fotoprocessen, thermochemische processen en radiolyse

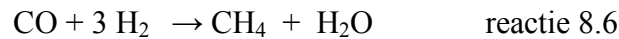
Op dit moment zijn deze processen nog niet rendabel genoeg om gebruikt te worden. Een groot voordeel van deze experimenten is dat er veel ervaring mee opgedaan wordt voor de toekomst. Door ervaringen uit meerdere processen te bundelen is men al vaker tot een nieuw proces gekomen.

8.4 Verwijdering van Koolstofdioxide

Verschillende brandstofcellen stellen bepaalde eisen qua gaszuiverheid. Koolstofdioxideverwijdering is van groot belang voor de werking van de PEMFC. Na omvorming en water-gas-verandering is de CO-concentratie in het omgevormde gas verminderd tot 1 à 2%. Wanneer stabiele werking gegarandeerd wordt, zal dit aandeel aanvaardbaar zijn voor een PAFC. Een PEMFC zal een verdere opruiming van koolstofdioxide vereisen. Een reden voor dit is het risico op CO-pieken die kunnen veroorzaakt worden door snelle belastingsveranderingen van het omvormingssysteem. Er zijn enkele manieren om CO te verwijderen uit het omvormde gas. Maar er ook een manier om ultra puur waterstof te maken met de palladiumtechnologie.

8.4.1 Methanation

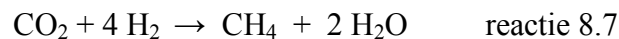
Methanation is een manier om koolstof uit een omgevormd gas te verwijderen. We kijken naar de samenstelling van het omvormde gas. We moeten de CO hieruit zien te verwijderen.



Deze reactie is niet geschikt om CO te verwijderen om twee redenen:

1 Bij elke CO-molecule die verwijderd wordt, worden er drie waterstofmoleculen verwijderd. Voor CO-percentages rond de 2% snijdt deze techniek pijnlijk in de brandstoffefficiëntie.

2 Omdat deze reactie plaatsvindt in nabijheid van een grote hoeveelheid CO₂, gaat de reactie zwaar in concurrentie met de reactie 8.7.

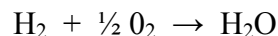


8.4.2 Voorkeuroxidatie

Uit het voorgaande blijkt dus dat methanation geen optie is voor koolstofverwijdering. Een oxiderende weg voor het opkuisen van CO zou de voorkeur krijgen. Jammer genoeg vergroot dit type van opkuisen de complexiteit van het systeem. Dit komt doordat zorgvuldig gemeten concentraties van lucht moeten worden toegevoegd aan de brandstof-stroom.



De reactie werkt verrassingwekkend goed ondanks de aanwezigheid van CO₂ in de brandstof. Dit is te wijten aan de keuze van de katalysator, die een edel metaal is zoals platina. Goudkatalysatoren hebben voordeel getoond op temperaturen onder de 100°C. In tegenstelling met CO₂ bindt CO zich zeer sterk aan edele metaaloppervlaktes bij lage temperaturen. Dus de reactie 8.8 neemt plaats op het katalytische oppervlak, bij voorkeur op de onmiddellijke katalytische oxidatie van waterstof.



8.4.3 Palladiummembranen

In sommige industrieën zoals de halfgeleiderindustrie is zuivere waterstof vereist. Omdat de aanschaf van gassen met een hogere zuiverheidsgraad de kostprijs sterk verhoogt, worden lagere graadgassen verder schoongemaakt door ze te laten doordringen door palladiummembranen. Palladiummembranen laten alleen waterstof door. Ze houden alle andere gasdeeltjes zoals stikstof, koolstofdioxide, koolstofmonoxide en andere onzuiverheden tegen aan de ingang van het palladiummembraan. Omdat koolstofmonoxide sterk absorbeert op edele metalen kan dit het doordringen van waterstof bemoeilijken door het membraan, tenzij de werkingstemperatuur hoog genoeg is om CO te oxideren naar CO₂ in aanwezigheid van toegevoegde lucht.

8.4.4 Anode aanpassingen

We kunnen de brandstofcel koolstofmonoxide-tolerant maken. Dit kan door CO-tolerante anode katalysatoren en elektrodes te gebruiken. Een standaardtechniek die gebruikt wordt, is ook het gebruik van platinalegeringen. Een andere eerder ruwe manier om anodevergiftiging van koolstofmonoxide te voorkomen is de onmiddellijke oxidatie van CO door lucht die aanwezig is in de anode. De lucht om de CO te oxideren is aangebracht in de gasstroom en is aanwezig met een concentratie van ongeveer 1%. De techniek noemen we *air bleed* (zie hoofdstuk 7.6).

Deel 2 : Soorten brandstofcellen

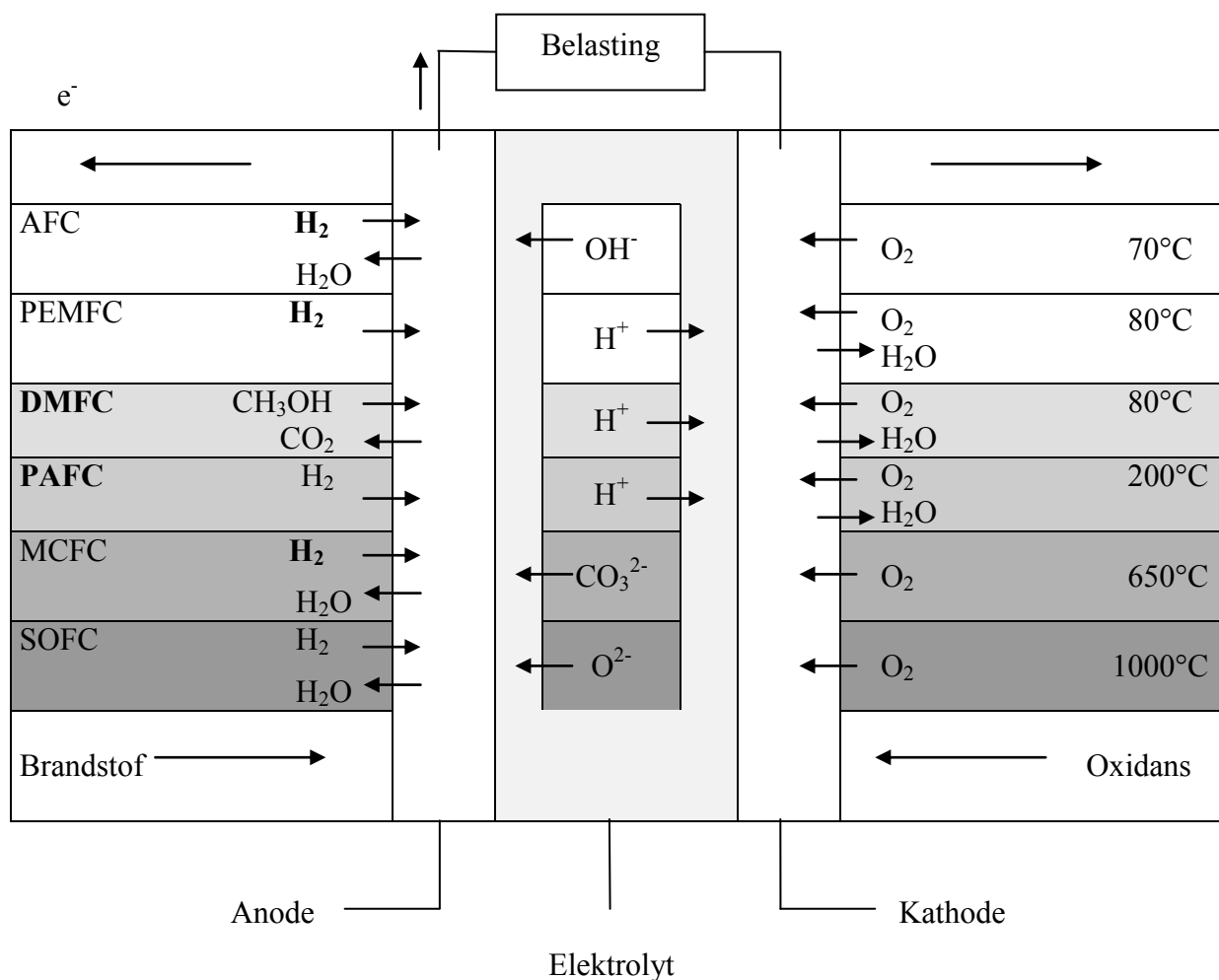
9 Soorten brandstofcellen

De brandstofcellen worden onderverdeeld volgens de elektrolyt die het inwendige ladingstransport verzorgt. In dit deel worden verschillende brandstofceltypes samen met hun eigenschappen beschreven. De volgende brandstofcellen worden besproken :

- de Alkaline Fuel Cell (AFC)
- de Proton Exchange Membrane Fuel Cell of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)
- de Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)
- de Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)
- de Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)
- de Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)

9.1 Inleiding

Het gebruik van verschillende elektrolyten voor de praktische verwezelijking van het werkingsprincipe zorgt voor duidelijke verschillen in de werking van de verschillende brandstofceltypes, hieronder een duidelijk overzicht.



De alkalische brandstofcel (AFC) heeft vloeibaar kaliumhydroxide als elektrolyt en werkt bij een temperatuur van om en bij de 60 tot 90°C.

De brandstofcel met protonuitwisselingsmembraan (PEMFC) maakt gebruik van een vast polymeer als elektrolyt en werkt bij 50 tot 80°C.

De direct methanol brandstofcel (DMFC) gebruikt dezelfde elektrolyt als de PEMFC, maar gebruikt methanol als brandstof in plaats van waterstof. De werkingstemperatuur bedraagt 80 tot 130°C.

Deze brandstofceltypes, de AFC, PEMFC en DMFC noemen we laagtemperatuurbrandstofcellen.

De fosforzuurbrandstofcel (PAFC) werkt bij temperaturen van 160 tot 220°C en maakt gebruik van geconcentreerd fosforzuur als elektrolyt.

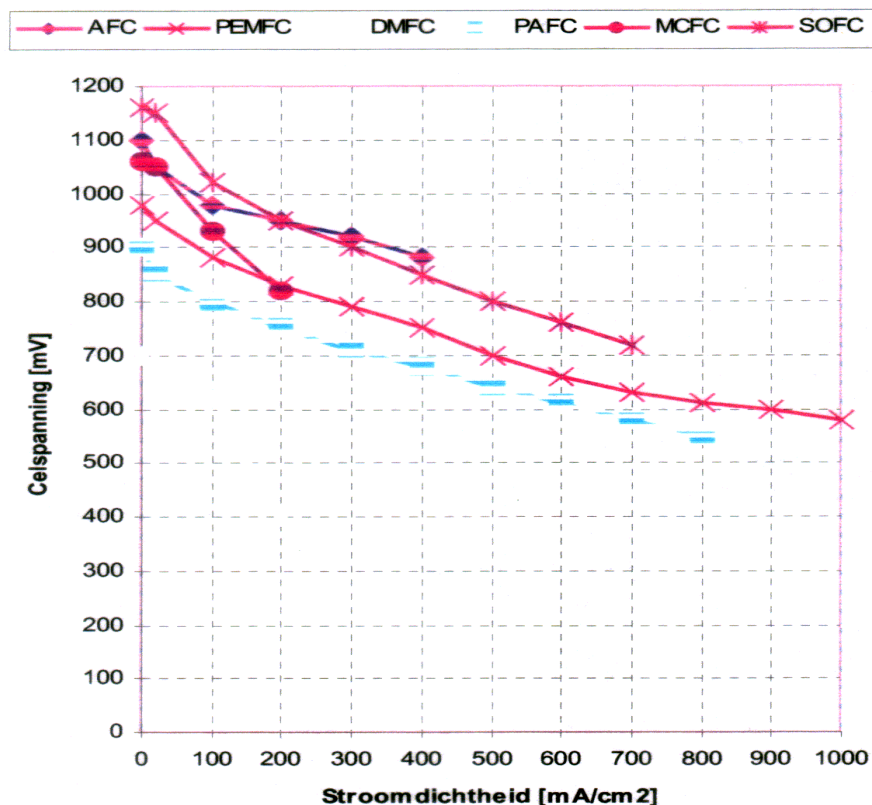
De carbonaatbrandstofcel (MCFC) maakt gebruik van een mengsel van gesmolten lithium- en kaliumcarbonaten als elektrolyt en heeft een werkingstemperatuur van 620 tot 660°C.

De vaste oxide brandstofcel (SOFC) gebruikt een vaste, keramische elektrolyt en werkt bij een temperatuur van 800 tot 1000°C.

De PAFC, MCFC en SOFC zijn dus hogetemperatuurbrandstofcellen.

9.2 Prestaties

In figuur 9.2 worden de spannings-stroomkarakteristieken van de bovenvermelde brandstofceltypes weergegeven.



Figuur 9.1: Vergelijking van de spannings-stroom-karakteristiek voor verschillende brandstofceltypes

De AFC heeft het hoogste rendement bij stroomdichtheden groter dan $200\text{mA}/\text{cm}^2$. De SOFC is bijna even goed als de AFC maar kan nog hogere stroomdichtheden verdragen, waardoor hogere vermogendichtheden bereikt kunnen worden. De MCFC verdraagt slechts kleine celstromen. De PEMFC bereikt veruit de hoogste stroom- en vermogendichtheid. Van alle brandstofcellen met waterstof en anodegas heeft de PAFC het laagste rendement. We zien ook dat de prestaties van de DMFC nog beduidend veel moeten verbeteren vooraleer dit type kan concurreren met de andere. Korte bespreking van de soorten brandstofcelssystemen

9.2.1 Het Alkaline Fuel Cell (AFC) Systeem

Voor de werking van de AFC omvat het systeem naast de eigenlijke brandstofcel of stack ook nog voorzieningen voor :

- de toevoer van H_2 en O_2 of lucht
- de onttrekking van reactiewater uit de elektrolyt
- de koeling
- de reiniging van de gassen na doortocht door de stack
- een CO_2 -scrubber bij werking met lucht als oxidans
- regelapparatuur

De AFC is de brandstofcel met het hoogste celrendementen, zo'n 60 tot 70%. Het elektrisch rendement van het hele systeem kan oplopen tot maximaal 62%. Het vermogenbereik varieert van 1 tot 100kW. De beschikbare nutswarmte komt enkel van de luchtkoeling van de elektrolytkring. De warmterecuperatie van de AFC-systeem is dus zeer beperkt.

Enkele voordelen van een AFC-systeem :

- Van alle brandstofcellen heeft de AFC het grootste celrendement doordat de kathodereactie tamelijk snel opgaat in een alkalische omgeving, die de kinetika bepaald.
- Door de lage werkingstemperatuur is de opstarttijd beperkt tot enkele minuten.
- De lage werkingstemperaturen, in combinatie met de weinig corrosieve elektrolyt, hebben ook het voordeel dat men ook relatief goedkope materialen kan gebruiken voor de celcomponenten.

Het AFC-systeem heeft echter ook nadelen zoals :

- De elektroden worden aangetast door CO
- De AFC is betrekkelijk duur tegenover andere brandstofcellen
- Kaliumhydroxide is zeer gevoelig voor CO_2 -vergiftiging. De CO_2 -concentratie moet in de praktijk kleiner zijn dan 3 ppm. Zonder voorafgaande CO_2 -onttrekking is de werking met lucht onmogelijk. De CO_2 -scrubbing is waarschijnlijk het grootste nadeel van de AFC. Een andere mogelijkheid is om met zuivere zuurstof als kathodegas te werken.
- Er moet een goede afdichting zijn aangezien KOH bij de werkingstemperatuur een vloeistof is.
- De katalysatorkosten zijn nog te groot.
- Een nadeel van de lage temperatuur is dat de AFC niet in een WKK installatie kan gebruikt worden, zelfs niet voor lage-temperatuur-toepassingen.

9.2.2 Het Proton-Exchange-Membrane-Fuel-Cell (PEMFC) Systeem

De PEMFC, ook wel eens SPFC (Solid Polymer Fuel Cell) of PEFC (Polymer Electrolyte Fuel Cell) genoemd, is een lage-temperatuur-brandstofcel die gebruikt maakt van een vast, protongelegend polymeer als elektrolyt. De werkingstemperatuur van de PEMFC is ongeveer 70 tot 80°C.

Een volledig PEM-systeem bevat naast de stack ook :

- een voorziening voor brandstofvoorbehandeling (reformer), zie verder
- regelapparatuur voor de waterhuishouding, zie verder
- een voorziening voor koeling van de stack, zie verder
- een inverter (indien wisselspanning gewenst)

a) Reformer

Als waterstof niet als energiedrager voorhanden is, en uit een andere primaire energiedrager gewonnen moet worden, maakt de reformer deel uit van het PEMFC-systeem. De PEMFC's bieden goede perspectieven voor mobiele toepassingen. Een veilige en compacte opslag van waterstof is momenteel nog moeilijk te realiseren, daarom gebruikt men andere energiedragers zoals benzine of methanol, die dan "on board" een reforming tot waterstof ondergaan.

De stoomreforming van methanol bij 200°C, waarbij H₂, CO₂, CO en H₂O gevormd worden, of de partiële oxidatie van benzine is het gebruikelijke reformingproces bij mobiele toepassingen. De reactieproducten worden dan door een shift reactor en eventueel door een preferentiële oxidatiereactor geleid om het CO praktisch volledig om te zetten in CO₂.

b) Waterhuishouding

De regeling van de waterhuishouding is van groot belang voor de PEMFC-cel. Het membraan moet voldoende vochtig zijn voor een goede protongeleiding, en bijgevolg voor een hoog rendement. Water wordt doorheen het membraan getransporteerd aangezien de protonen altijd in gehydrateerde vorm, dus als H⁺(H₂O)_n, migreren van de anode naar de kathode.

De hoeveelheid getransporteerd water neemt toe bij een toenemende stroomdichtheid. Er is ook een omgekeerde diffusie van water van de kathode naar de anode, die het nettotransport ongeveer nul maakt, doorheen het membraan.

Er moet gecontroleerd worden dat het geheel van membraan en elektroden niet te vochtig wordt anders wordt de diffusie van zuurstof en waterstof doorheen de elektroden te veel belemmerd.

Er moet dus een regeling voorzien worden om de gewenste vochtigheid van het membraan constant op het zelfde niveau houden.

c) Koeling

De koeling is noodzakelijk om de constante werkingstemperatuur van ongeveer 80°C te onderhouden.

De voordelen van een PEMFC-systeem zijn :

- Door de lage werkingstemperatuur is de opstarttijd klein, enkele minuten.
- Van alle brandstofcellen bereikt de PEMFC de hoogste stroom- en vermogendichtheden, dat op z'n beurt een compacte bouw van de cel toelaat.
- De vaste elektrolyt biedt het voordeel van een eenvoudige constructie van de brandstofcel. De elektrolyt verzekert een goede scheiding van de twee inkomende gasstromen en maakt een werking onder druk mogelijk, en dat komt dat weer de prestaties van de cel ten goede.

Men kan volgende nadelen van de PEMFC vermelden :

- De elektroden van de PEMFC cel worden voorzien van platina als katalysator. De elektroden zijn zeer gevoelig voor CO-vergiftiging, aangezien CO makkelijk bindt aan de Pt-katalysator bij de werkingstemperatuur van de PEMFC. Daarom moet de concentratie aan CO in de voedingsgassen kleiner zijn dan 10 ppm.
- Platina is een duur materiaal en moet zo weinig mogelijk gebruikt worden in de cel om de kostprijs te drukken. Tegenwoordig bereikt men waarden van 0,1 mg Pt/cm².
- De toepassingen als WKK eenheid zijn eerder beperkt door het lage temperatuurniveau.

9.2.3 Het Direct-Methanol-Fuel-Cell (DMFC) Systeem

De PEMFC lijkt zeer geschikt voor mobiele toepassingen maar de opslag van waterstof is zeer moeilijk. Methanol heeft als opgeslagen energiedrager in het voertuig voordelen tegenover de on-board opslag van waterstof.

- methanol is vloeibaar bij omgevingstemperatuur, terwijl waterstof onder zeer hoge druk (tot 300 bar) of bij een zeer lage temperatuur (-253°C of 20K) moet opgeslagen worden.
- methanol zou gebruik kunnen maken van de infrastructuur die er nu is (de leidingen en tankstations wordt daarmee bedoelt), terwijl er een totaal, nieuwe infrastructuur gebouwd moet worden om waterstof te gebruiken.
- voor een zelfde reikwijdte is het opslagvolume voor methanol zes maal kleiner dan voor vloeistof.

Met de voordelen van het gebruik van methanol in het achterhoofd is men met onderzoek naar de directe elektrochemische oxidatie van methanol gestart. Net zoals de PEMFC maakt de DMFC gebruik van een vast elektrolyt. Maar in tegenstelling tot andere brandstofceltypes ondergaat methanol (in plaats van waterstof) de elektrochemische oxidatie met water tot CO_2 . Daarbij komen protonen vrij die doorheen de elektrolyt migreren naar de kathode, waar ze met zuurstof reageren tot water.

Een DMFC-systeem bevat naast de eigenlijke brandstofcel of stack nog voorzieningen voor :

- de aan- en afvoer van de reagentia
- de CO_2 -afscheiding uit het methanol-watremengsel na de doortocht langs de anode
- de koeling van de stack
- de regeling van de waterhuishouding

en een inverter (indien wisselspanning gewenst is).

De methanol wordt in waterige oplossing (typisch 1mol/l) aan de brandstofcel toegevoerd. De oplossing is vloeibaar (bij ca. 80°C) of gasvormig (bij 120 tot 130°C). In de gasvormige toestand kunnen hogere vermogendichtheden gerealiseerd worden, maar het systeem wordt moeilijker. Aangezien de CO_2 -afscheiding veel eenvoudiger is als de methanol in vloeibare toestand is dan wanneer de methanol in gasvormige toestand is.

De ideale celspanning voor de oxidatie is 1,214V en ligt dus zeer dicht in de buurt van de waarde voor waterstof (zo'n 1,228V).

Men is tot nu toe nog niet gekomen tot een volledig systeem. Voorlopig heeft men enkel proeven op afzonderlijke cellen uitgevoerd, waarbij er elektrische rendementen van 20 tot 30% opgetekend werden.

De DMFC heeft volgende voordelen :

- Door de relatieve lage temperatuur is een snelle opstarttijd mogelijk, enkele minuten. Afhankelijk van de temperatuur van de brandstofcel (typisch 80°C voor vloeibaar en 130°C voor gasvormig methanol) kunnen verschillende WKK-toepassingen beschouwd worden.
- De vaste elektrolyt biedt dezelfde voordelen als voor de PEMFC. Maar er moet nog gewerkt worden aan de celspanningen en stroomdichtheden.
- Het grootste voordeel van de DMFC is het ontbreken van een reformer in het systeem, waardoor veel ruimte en kosten kunnen bespaard worden.

Volgende nadelen kunnen we voor een DMFC-systeem optekenen.

- De DMFC kan enkel op methanol werken. Geen flexibiliteit in zake de brandstof dus.
- Er zijn relatief grote hoeveelheden kostbare katalysatormaterialen (zoals platina) nodig door de trage anodereactie, voor deze lage-temperatuur brandstofcel. Het gebruik van die materialen heeft een sterke invloed op de kostprijs.
- De vermogendichtheden van de DMFC's zijn voorlopig nog laag ten opzichte van de PEMFC's. Er wordt momenteel gestreefd naar vermogendichtheden van om en bij 200mW/cm² bij celspanningen van 500 tot 600mV.

9.2.4 Het Phosphoric- Acid-Fuel-Cell (PAFC) Systeem

De PAFC heeft een werkingstemperatuur van ongeveer 200°C. Deze brandstofcel heeft als elektrolyt geconcentreerd fosforzuur. Van alle brandstofceltypes is de PAFC de enigste die reeds commercieel beschikbaar is.

Een PAFC-systeem bestaat uit :

- de PAFC-stack
- een voorziening voor koelapparatuur
- een voorziening voor gasbereiding met reformer
- een voorziening voor CO-shiftreactor (? ? ? ? ? ? ? ? ?) en ontzwaveling
- een wisselrichter

De bereiding van de waterstof gebeurt in een klassieke reformer bij ongeveer 900°C. Daarin wordt methaan met stoom omgezet tot H₂ en CO. Aangezien het rendement sterk terugvalt bij CO-concentraties hoger dan 2 vol% volgt na de reforming een omzetting van CO naar CO₂ in een shiftreactor bij 400°C.

De waterstof reageert in de brandstofcel met zuurstof tot waterdamp. Deze waterdamp wordt constant afgevoerd, gedemineraliseerd en toegevoerd aan de reformer en aan de shiftreactor. De warmte wordt via een warmtewisselaar afgegeven aan een secundair circuit. De PAFC haalt een elektrisch celrendement van 55%. Het elektrisch systeemrendement bedraagt 40%, en ligt daarmee tamelijk laag in vergelijking met andere brandstofceltypes. Door de werkingstemperatuur van 200°C biedt de PAFC een aanzienlijk warmtepotentieel, dat verder wordt besproken.

Naast de positieve elementen van PAFC die reeds vermeld werden, moeten ook volgende nadelen worden vermeld.

- De anode wordt ook vervuild door zwavel in
- De PAFC- elektronen maken gebruik van platina als katalysator, wat de kostprijs negatief beïnvloedt.
- De werkt temperatuur is betrekkelijk hoog (zo'n 200°C) en dat zorgt ervoor dat er een lange opstarttijd is, 3 tot 4 uur bij een koude start.
- De anode is gevoelig voor CO-vergiftiging. Om die reden mag de koolstofmonoxide-concentratie in het anodegas maximum 2vol% bedragen.
- De anode wordt ook vervuild door het zwavel.

De PAFC kan het best geïntegreerd worden in een WKK-installatie, en in mindere mate in een installatie voor kleinschalige vermogenopwekking. Er is maar een kleine kans dat de PAFC in mobiele toepassingen zal worden toegepast.

9.2.5 Het Molten-Carbonate-Fuel-Cell (MCFC) systeem

De MCFC is een hogetemperatuursbrandstofcel, de werkingstemperatuur bedraagt ongeveer 650°C. De elektrolyt is gesmolten alkalicarbonaat. De MCFC wordt soms de “tweede generatie” brandstofcel genoemd, omdat men verwacht dat ze na de PAFC het vlugst in de handel zal gebracht worden.

De belangrijkste onderdelen van een MCFC-systeem zijn:

- de MCFC-stack
- koelapparatuur
- een regeling
- een wisselrichter

Het meest opvallend aan de MCFC is dat men geen uitwendige reformer meer nodig heeft. De hoge werkingstemperatuur zorgt ervoor dat de reforming inwendig kan gebeuren. Daardoor heeft de reforming geen extra brandstof nodig, wat een hoger systeemrendement oplevert. De inwendige reforming heeft een tweede voordeel. Aangezien de reformingsreactie endotherm is en de brandstofcelreactie exotherm, wordt de stack chemisch gekoeld door de reforming. Men heeft dus geen behoefte aan koeling en dus is het verbruik van energie door het eigen systeem, wat op zijn beurt het rendement weer verhoogt.

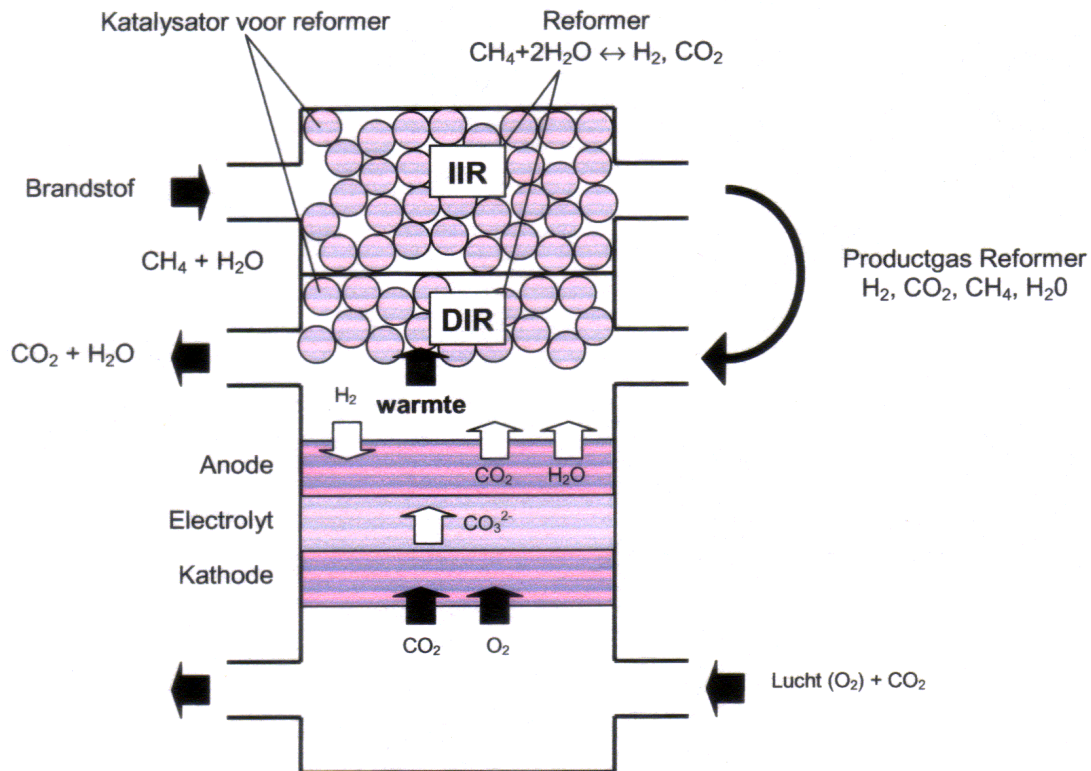
Bovendien wordt bij de werking van de cel constant waterstof verbruikt, zodat het evenwicht van de reformingsreactie naar rechts verschuift, en de omzetting van aardgas naar waterstof praktisch volledig gebeurt.

Bij de interne reforming onderscheidt men indirecte interne reforming (IIR) en directe interne reforming (DIR). Bij indirecte interne reforming is de reforming gescheiden van de anode, bij de directe interne reforming niet. Directe interne reforming levert een betere omzetting tot waterstof omdat het evenwicht van de reforming constant naar rechts verschoven wordt, maar maakt de constructie van de cel ingewikkelder. Figuur 9.2 toont een principeschets van een MCFC die een directe en indirecte reforming combineert, de uitlaatgassen van de indirecte reformer worden onmiddellijk toegevoegd aan de directe reformer.

Op dit ogenblik is interne reforming bij de MCFC enkel mogelijk bij omgevingsdruk. Bij externe reforming, die de werkingskarakteristiek van de brandstofcel verbetert, is een druk tot 3 bar mogelijk. De gassen aan de uitlaat van de kathode worden gekoeld in een warmtewisselaar. De warmte die daarbij vrijkomt kan gebruikt worden voor opwekking van stoom op een temperatuur tot 550°C. Deze stoom kan dan geëxpandeerd worden in een stoomturbine voor een bijkomende productie van elektriciteit. De stoom aan de uitlaat van de turbine kan gebruikt worden als processtoom.

De MCFC haalt een maximaal elektrisch celrendement van 65%. Het elektrisch systeemrendement bedraagt 55 tot 60%, respectievelijk bij externe en interne reforming.

Dankzij de hoge temperaturen kan stoom tot bij temperaturen van 550°C opgewekt worden. Opmerkend is dat er elektrische rendementen tot 65% mogelijk zijn wanneer de nutswarmte in een stoomcyclus voor bijkomende elektriciteitsproductie zorgt. De nutswarmte kan anderzijds gebruikt worden voor de productie van processtoom.



Figuur 9.2 Combinatie van directe en indirecte interne reforming bij MCFC

Voor de MCFC kunnen de volgende voordelen op een rijtje worden gezet :

- De hoge temperatuur zorgt voor een gemakkelijke reforming en een grote waaier aan brandstofcellen
- Men maakt praktisch enkel gebruik van goedkope, niet-edelmetalen katalysatoren, voornamelijk nikkel. Dit is een voordeel tegenover de lage-temperatuur brandstofcellen.
- Een interne reforming is mogelijk door de hoge werkingstemperatuur, wat de systeemrendementen verhoogt.
- De werkingstemperatuur is laag genoeg om gebruik te maken van klassieke materialen zoals roestvrij staal dat bestand is tegen de corrosieve werking van het elektrolyt, in tegenstelling tot de SOFC. Bij de SOFC is men verplicht keramische temperaturen te gebruiken.
- Er is restwarmte aanwezig op een hoog temperatuurniveau, wat een brede waaier van toepassingen mogelijk maakt.

De MCFC heeft volgende nadelen :

- Door de hoge werkingstemperatuur heeft de MCFC een lange opstarttijd nodig, zo'n 10 uur.
- De stroomdichtheid is beperkt ten opzichte van andere brandstofcellen. Daaruit volgt een lage vermogendichtheid, en een relatief groot celoppervlak.
- De hoge corrosiviteit van de elektrolyt zorgt ervoor dat de materialen van de brandstofstack snel oplossen.

9.2.6 Het Solide-Oxide-Fuel-Cell (SOFC) systeem

De SOFC maakt gebruik van een vast elektrolyt en is een hoge-temperatuur brandstofcel. Die hoge temperatuur bedraagt zo'n 800 tot 1000°C, men doet tegenwoordig onderzoek naar lagere werkingstemperaturen (650°C).

Naast de afzonderlijke cellen bevat het SOFC-systeem ook een koelvoorziening, regelapparatuur en een wisselrichter.

Net als de MCFC heeft de SOFC een voldoende hoge werkingstemperatuur en is er dus geen nood aan een uitwendige reformer. De reforming vindt plaats in de brandstofcel zelf. De endotherme reformingreactie zorgt voor een chemische koeling van de exotherme celreactie.

Door de hoge temperaturen kunnen de reactieproducten en overblijvende reagentia nog op verschillende wijzen gebruikt worden. Er zijn mogelijkheden voor stroomopwekking en nageschakelde stroom- en gascycli voor een maximale elektriciteitsopwekking.

De SOFC heeft celrendementen van 60 tot 65% en elektrische systeemrendementen tot 55%. Door nageschakelde stroomcyclus (9%) en gascyclus (16%) kan men het elektrisch rendement met 25% verhogen. Daardoor kan men rendementen krijgen die men met de klassieke technologieën niet kan bereiken.

De SOFC heeft volgende voordelen:

- Door de hoge werkingstemperatuur kan de reforming intern gebeuren en is er een grootte waaier van mogelijke WKK-toepassingen
- Het voordeel van de vaste elektrolyt is dat de bouw van de cel eenvoudig is en laat relatief eenvoudige een werking onder druk toe.
- Men beschikt over een grote verscheidenheid aan mogelijke brandstoffen.
- Bij hoge temperaturen vertoont het elektrolyt de hoogste geleidbaarheid, wat de werkingstemperatuur van 1000°C verklaart. Om de celcomponenten uit goedkopere materialen te vervaardigen, probeert men momenteel de werkingstemperatuur tot 650°C te verlagen. De lagere geleidbaarheid van de elektrolyt bij 650°C moet dan gecompenseert worden door een dunnere elektrolytlaag.

Het SOFC heeft ook nadelen, namelijk:

- Door de hoge werkingstemperatuur is er een grote opstarttijd, namelijk 10 tot 14 uur.
- Bij een werkingstemperatuur is men gedwongen om keramische materialen te gebruiken, en keramische materialen zijn natuurlijk zeer bros.
- De uitzettingscoëfficiënten van de verschillende materialen zijn verschillend, zodat bij hoge temperaturen problemen ontstaan om de constructieve integriteit te bewaren.
- De grote thermische spanningen waaraan de onderdelen onderworpen zijn beperken de levensduur van de cel.

9.3 Samenvatting en besluit

In dit deel worden de belangrijkste eigenschappen van de verschillende brandstofceltypes kort naast elkaar gezet ter samenvatting van de vorige paragrafen.

Techniek	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Elektrolyt	Kaliumhydroxide (KOH)	Vast polymeer (Nafion,Dow)	Vast polymeer (Nafion,Dow)	fosforzuur	Gesmolten alkalicarbonaten	Y ₂ O ₃ -gestab. ZrO ₂
Temperatuur	60-80°C	80-100°C	80-130°C	200°C	600-700°C	700-1000°C
Opstarttijd	Enkele minuten	Enkele minuten	Enkele minuten	4h	10h	10-14h
Brandstof	H ₂	Aardgas, LPG, methanol, biogas,H ₂ ,...	CH ₃ OH	Aardgas, LPG, methanol, biogas,H ₂ ,...	Aardgas, LPG, koolgas, biogas, synthesegas, H ₂ ,...	Aardgas, LPG, koolgas, biogas, synthesegas, H ₂ ,...
Oxidans	O ₂ , (lucht zonder CO ₂)	O ₂ , lucht	O ₂ , lucht	O ₂ , lucht	O ₂ , lucht	O ₂ , lucht
Ladingsdrager	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
	ja	ja	-	ja	nee	nee
Druk	3-4 bar	1 bar	1,5-2 bar	1-10 bar	1-3,5 bar	1-15 bar
Anode	Actieve kool + PTFE			Actieve kool + PTFE	Poreuze Ni plaat	Cermet
Kathode	Actieve kool + PTFE			Actieve kool + PTFE	Li-NiO	Cermet
Katalysator	Ni, Ag, Pt	Pt	Pt-Ru	Pt op grafiet	Ni, Cr	Ni/ZrO ₂ La, Sr, Mn
Giffen						S
Elektrisch rendement	Cel: 60-70% syst.: 62% (O ₂) 47-56% (lucht)	Syst.: 30-40%	Cel: 20-30%	Cel: 55% syst.: 37-42%	Cel:65% Syst.:45-60%	Cel: 60-65% syst.: 30-60%
	1-2 A/cm ²	0,3-0,5 A/cm ³	0-0,5 A/cm ⁴	0,15-0,3 A/cm ⁵	0,1-0,2 A/cm ⁶	0,2-1,4 A/cm ⁷
Vermogen-dichtheid	0,1 W/cm ³	0,33-0,5 W/cm ²	0,1-0,2 W/cm ³	0,1-0,3 W/cm ⁶	0,1-0,3 W/cm ⁵	0,2W/cm ⁶ (buis) 1,0 W/cm ² (vlak)

Deel 3 : Toepassingen

10 Draagbare toepassingen

10.1 Wat is een draagbare toepassing.

10.1.1 Definitie

Overall in de industrie wordt de term draagbaar gebruikt maar hij is niet scherp gedefinieerd en evenmin universeel. Voor ons wordt ‘draagbaar’ omschreven als een kleine, centraleonafhankelijke elektrische krachteenheid reikend van een paar Watt tot ruwweg één kiloWatt, die eerder grotendeels dienst doet als materiaal dan dat het voornamelijk een resultaat van milieu- of energiebesparingsoverwegingen is. Materiaal staat voor één of meer van de volgende dingen :

- het mogelijk maken of de duur verlengen van netonafhankelijke werking
- meer comfort, dat wil zeggen minder lawaai of overlast en hogere kwaliteit van de vermogengeneratie.
- Training of ‘toy’ effect

We zullen deze motivaties voor het gebruik van de voorgestelde draagbare systemen hieronder meer in het detail bespreken. Zulke systemen kunnen gebaseerd zijn op een grote variëteit aan brandstofceltypes en brandstoffen. Typische voorbeelden zijn direct proton uitwisselingsmembraanbrandstofcellen die werken met waterstof, dikwijls aangevuld met waterstof van metaalhydridebussen, direct methanol brandstofcellen of op reformer gebaseerde PEMFC of vaste oxide brandstofcel (SOFC) systemen lopend op benzine of andere gemakkelijk verkrijgbare brandstoffen. Door deze definitie zal een centraleonafhankelijk stationair krachtsysteem voor een bergsporthut als een draagbaar systeem meegeteld worden. Automatisch rijdende treinen en micro-CHP eenheden voor huishoudelijke vermogengeneratie zullen niet als draagbare systemen meegeteld worden, omdat milieu- of energiebesparingsoverwegingen de voornaamste motivaties voor hun gebruik zijn.

10.1.2 Toepassingen

Wanneer draagbare brandstofcellen publiek besproken worden, zijn het de brandstofcellen die uitgerust zijn met batterijen waaraan meestal eerst gedacht wordt. Bekende voorbeelden zijn draagbare telefoontoestellen, laptopcomputers, videorecorders en gelijksoortige elektronische apparaten. Of deze toepassingen succesvol zullen zijn, hangt af van meerdere beschouwingen zoals:

- brandstofcellen kunnen de wedloop tegen de geavanceerde batterijtechnologie, zoals secundaire lithium-ion-batterijen, winnen;
- ze kunnen klein genoeg gemaakt worden om in draagbare elektronische apparaten te passen;
- de prijs is aantrekkelijk genoeg;
- het brandstofprobleem opgelost kan worden.

Het brandstofprobleem betekent dat vervangbrandstofvullingen (zoals inktpatronen van een printer die je kunt vervangen als ze leeg zijn) of dergelijke apparaten dadelijk beschikbaar en gemakkelijker hanteerbaar moeten zijn dan een tweede batterijpak voor een laptop. Het algemene brandstofproces moet duidelijke voordelen hebben inzake het herladen van een vermogeenheid, welke bijna overal dadelijk verkrijgbaar is. Een andere bekommernis is veiligheid. Het valt te betwijfelen of luchtvaartmaatschappijen zulke vullingen of tanks aan boord van hun toestellen zullen nemen, vooral waar er brandbare vloeistoffen bij betrokken zijn.

Men kan de draagbare toepassingen indelen in vier groepen.

De eerste groep kan kort samengevat worden als *batterijvervangers* voor uitgebreide werkingstijd. Deze groep valt wel in de categorie onder 100W. Vermogeenheden met hogere vermogenconcentraties of grotere energieopslagcapaciteiten dan deze van bestaande secundaire batterijen kunnen ook nieuwe kansen voor centraleonafhankelijke werking van vermogenwerktuigen openen zoals afgelegen meteorologische of andere observatiesystemen of communicatie- en transmissietoestellen.

De tweede groep van toepassingen staat in verband met vermogenontwikkeling op grotere schaal, zo'n 1kW continue uitgang. Hier zijn goedkope, betrouwbare apparaten bovendien verkrijgbaar in de vorm van benzine- of dieselgeneratoren. Tot nog toe weet iedereen die al ooit eens één van deze eenheden gebruikt heeft dat ze behoorlijk wat geluid produceren, luchtvervuiling teweegbrengen en dat indoorgebruik volkomen uitgesloten is. Een generator aangedreven door een brandstofcel kan misschien binnen op bouw- en campingterreinen, concerten of door filmploegen gebruikt worden.

Een ander toepassingsgebied is het back-up vermogen. Dit wordt alsmaar interessanter in een geliberaliseerde markt waar terzelfdertijd een hoog kwaliteitsvermogen voor computer- en communicatienetwerksystemen nodig is. Omdat deze toepassingen met elkaar in verband staan, worden ze samen besproken. Eveneens kunnen deze eenheden gebruikt worden om stil elektrisch vermogen te leveren op boten, in kampeerwagens en aan boord van luxewagens (APU) of trucks voor langeafstandsvervoer.

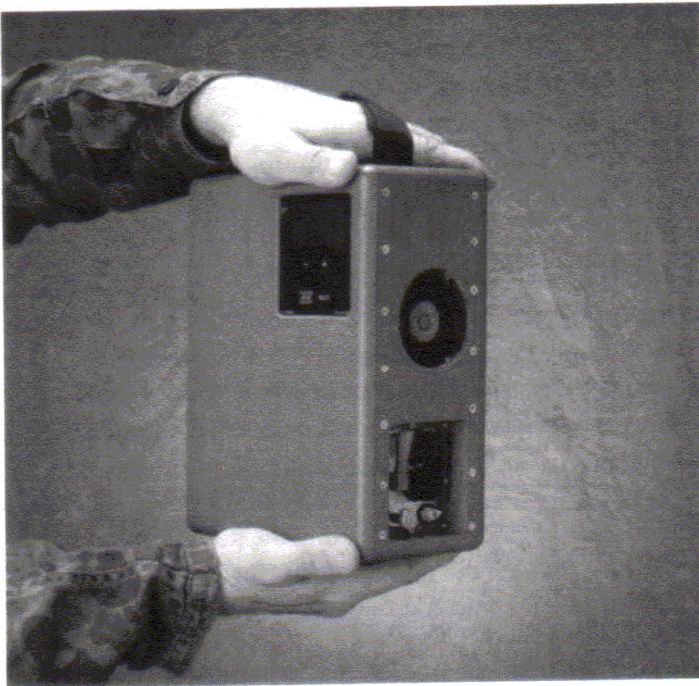
Het vierde toepassingsgebied betreft demonstratiemateriaal en gadgets.

10.2 Prototypes en voorbeelden

Het doel van deze selectie is niet de diepgaande discussie over zakelijke kansen voor startende bedrijven die met brandstofcellen werken voeren. Het is meer de bedoeling om typische voorbeelden te tonen zonder deze snel ontwikkelende set van brandstofceltoepassingen en leidende projectontwikkelaars op te noemen. De lijst van projectontwikkelaars is ver van volledig en breidt elke dag uit, deze lijst kan dus nooit volledig zijn.

10.2.1 Batterijvervangers

Een reden waarom brandstofcelbatterijvervangers niet dadelijk in de winkel verkrijgbaar zijn is, omdat ze van bij de start moesten concurreren met altijd-verbeterende batterijen zoals deze die gebaseerd zijn op de lithium-ion technologie. Ballard Power Systems bijvoorbeeld begon aan batterijontwikkeling te werken. Ten tweede is deze toepassing altijd verborgen gehouden voor militaire interesse. Figuur 10.1 toont een voorbeeld van een militaire batterijvervanging.



Figuur 10.1 H Power PPS100 militaire batterijvervanger werkend met een metaalhydridetank

10.2.1.1 Door methanol gevoed (met DMFC-systeem)

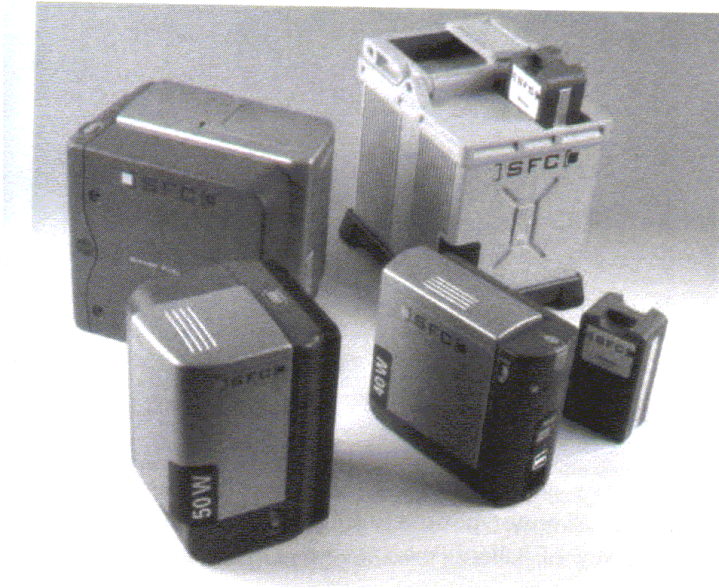
Op dit ogenblik is de energiebevoorrading van de elektronische uitrusting van de soldaat problematisch. De batterijpakketten voor verschillende divisies zijn niet onderling verwisselbaar en elk heeft zijn eigen oplader nodig. Bovendien is het totale gewicht groter dan nodig, omdat ze allemaal gedimensioneerd zijn om piekvermogen te leveren. Er wordt verwacht dat het systeem van de toekomstige soldaat een centrale vermogenbron zal gebruiken om alle verschillende componenten van energie te voorzien. Het gebruik van een centrale energiebus met plaatselijke spanningsomzetting (door AC/DC-convertors) zal ook de interoperationaliteit tussen verschillende strijdkrachten vergemakkelijken.

In de nabije toekomst worden herlaadbare batterijen nog steeds beschouwd als de beste keuze voor de energiebron. De direct methanol brandstofcel (DMFC) wordt beschouwd als een haalbare optie voor de langetermijnvervanging van batterijen.

Een welbekend voorbeeld van een mogelijke commerciële toepassing is de draagbare telefoon. Een voormalig onderzoeker van Los Alamos National Laboratories, R. Hockaday, was één van de eersten die het idee had om een bedrijf (ERD, Energy Related Devices) op te richten voor de ontwikkeling van verkleinde brandstofcellen om draagbare telefoons te voeden. ERD behoort momenteel tot Manhattan Scientific, een ontwikkelaar van de brandstofceltechnologie (zie ook de door waterstof aangedreven systemen ontworpen door Manhattans dochterbedrijf NovArs). Zulke toestellen gebruiken zogezegde *air-breathing*-brandstofcellen blootgesteld aan de omgevingslucht aan de kathodezijde en in contact staan met een methanolaanvoer aan de anode.

Andere DMFC-ontwerpers in de Verenigde Staten zijn Motorola, het centrum voor microtechnologie in Lawrence Livermore National Laboratories, Jet Propulsion Laboratory (JPL) en Giner, waarvan General Motors 30% van de aandelen heeft. Giners DMFC's besteedt veel aandacht aan gevormdgrafiet-celafscheiders met meer dan 10 cellen per inch. Toepassingen bevatten direct-methanol-brandstofcellen voor persoonlijke of voor voertuigen geschikte draagbare vermogenbronnen, batterijvervanging voor elektronische en communicatietoestellen, persoonlijke verwarmings- en koelinstallatie, batterijoplading, grasmachines, fietsen en tuin- en werkplaatsgereedschappen. Een andere potentiële toepassingsgroep is de bouwsector.

Op een waterstofbeurs in Hamburg in oktober 2001 presenteerde Smart Fuel Cell (SFC, Brunthal, Duitsland) een camcorder werkend met een DMFC die ongeveer 8 uur zou werken met één tank methanol. In januari 2002 was SFC al begonnen met een beperkte productie van 1000 eenheden voor veldonderzoek (zie figuur 10.2). Tabel 10.1 toont de technische gegevens van het laatst verschenen camcordertype van SFC. Een gelijksoortig prototype is ontworpen voor weg- en campingtoepassingen. Sommige ontwerpers gebruiken micromachinetehnologie om kleine DMFC's te maken. Op de 14^{de} IEEE Internationale Conferentie van micro-elektromechanische systemen werd een micro-brandstofcel voor medische toepassingen gepresenteerd door Woo et al. (2001). Japanse topbedrijven zoals Sony, Toshiba en NEC die werken aan kleine DFMC's, brachten ook verslag uit. Methanol wordt beschouwd als een ideale brandstof voor moderne, draagbare organizers en communicatietoestellen die in de toekomst waarschijnlijk meer vermogen nodig zullen hebben. De eerste commerciële producten worden volgend jaar verwacht.



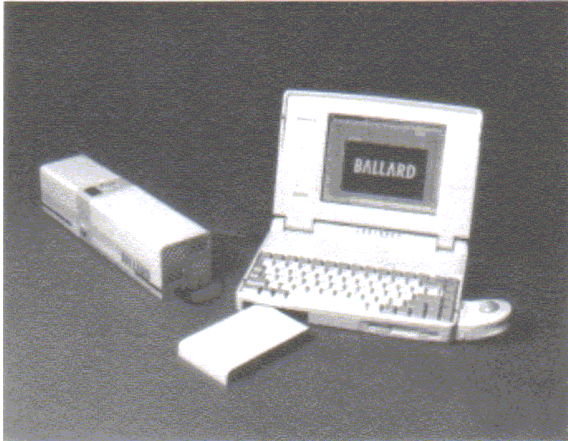
Figuur 10.2 Smart Fuel Cell's DMFC prototypes voor professionele camcorders en verkeerstoepassingen

Continu uitgangsvermogen	Max. 25 W
Uitgangsspanning	12 VDC
Werkings temperatuur	40°C aan het oppervlak
Afmetingen	120 x 160 x 170 mm
Gewicht	2,8 kg
Brandstofvoorziening	vervangbare tankvulling
Brandstofopslagcapaciteit	120 ml methanol
Energie in de brandstof	> 120Wh
Werkingstijd bij uitgangsvermogen van 20W	> 6 uur
Afmetingen van de vulling	100 x 40 x 55 ml
Gewicht van de vulling	190 g

Tabel 10.1 Technische gegevens van Smart Fuel Cell's Camcordertype Power Module

10.2.1.2 Door waterstof gevoed

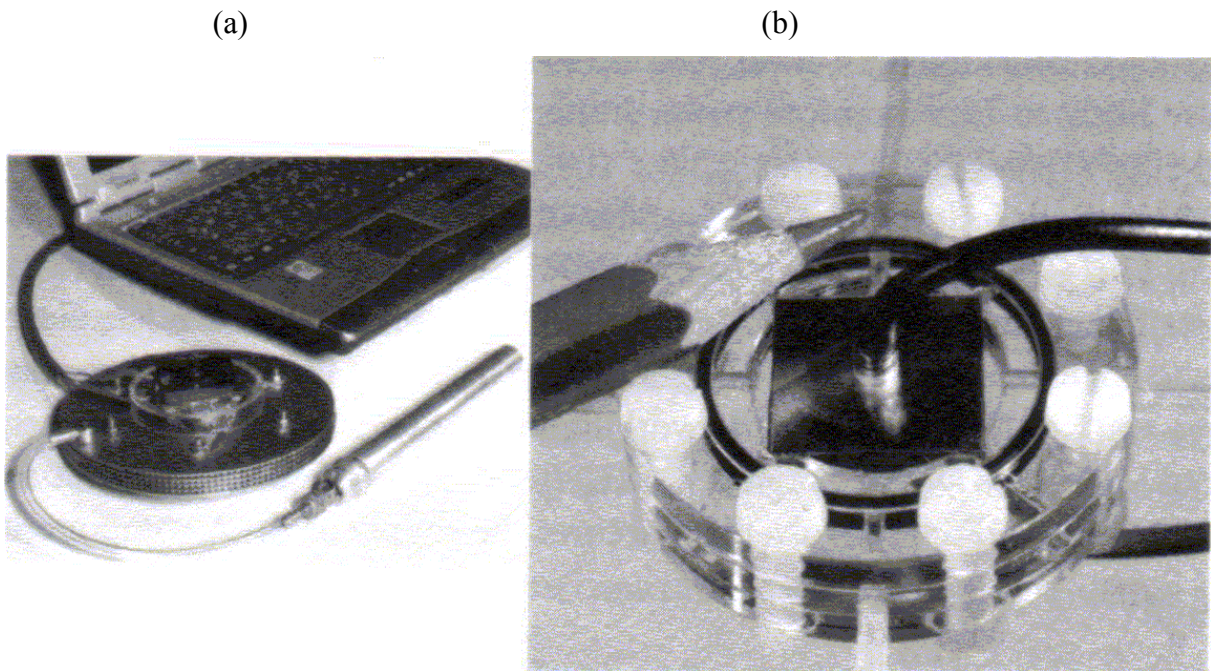
In directe confrontatie met de DMFC-systemen, werken andere ontwerpers aan systemen die met waterstof functioneren. De eerste laptop die met brandstofcellen werkte werd door Ballard Power Systems in de vroege jaren negentig gedemonstreerd. De met waterstof werkende brandstofcel werd gevoed vanuit een metaalhydride-opslagbus, die werd ondergebracht in een afzonderlijke tank buiten de laptop. Dit kun je zien in figuur 10.3.



Figuur 10.3 Een draagbare computer aangedreven door een Ballard waterstof brandstofcelprototype. De waterstof wordt geleverd vanuit een metaalhydridebus.

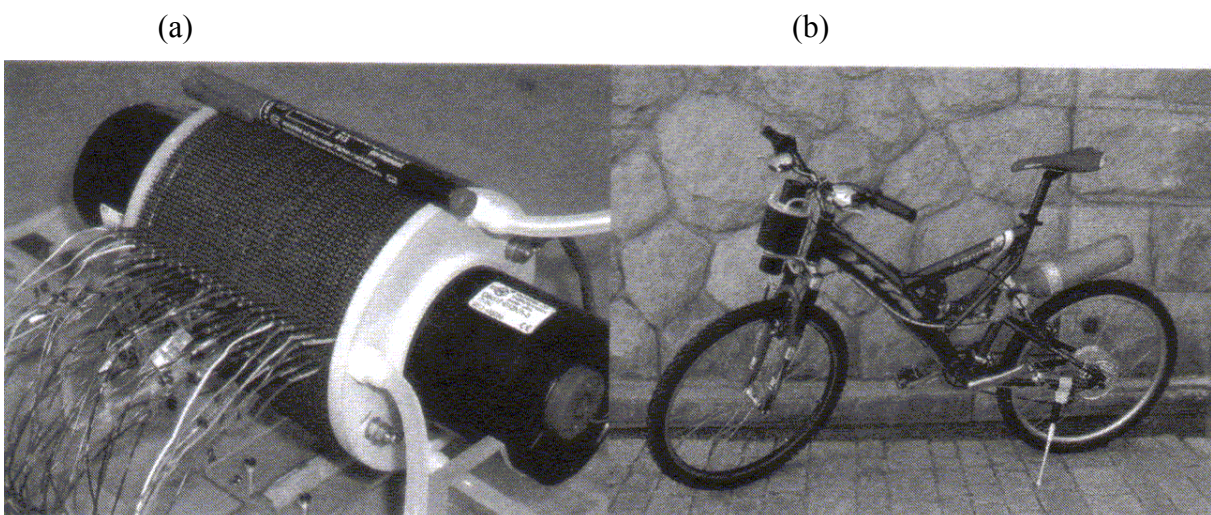
Recenter, presenteerde Fraunhofer Institute of Solar Energy Systems (ISE) een gelijkaardig concept, ook aan de hand van een draagbare computer. ISE staat voor twee verschillende lijnen van het bekrachtigen van kleine elektronica. Beide richten zich tot een sleutelprobleem voor kleine brandstofcellen, namelijk de kleine individuele celspanningen van brandstofcellen. Terwijl afzonderlijke cellen zeer compact gemaakt kunnen worden en tegelijk ook grote stromen kunnen leveren, zijn spanningen van 0,5 tot 0,8 V moeilijk te bepalen zonder aanzienlijk verlies. Daarom ontwierp ISE een *strip cell design* waarin individuele cellen zigzag geplaatst werden zodat bruikbare spanningen gegenereerd kunnen worden van het ene uiteinde naar het andere, terwijl de hele strip nog steeds maar één enkel compartiment waterstof en één compartiment lucht nodig heeft. Deze constructie bereikt een energieconcentratie en specifiek vermogen van 405 Wh/l en 106 Wh/kg. De andere, nu geprefereerd door ISE, zet de lage spanning van een zeer korte stack samengesteld met een paar cellen om naar een hoger niveau door een efficiënt geïntegreerde AC/DC-converter. Gebruikmakend van deze tweede benadering exposeerde ISE op de jaarbeurs van Hannover een laptop bevoorrad met waterstof van een metaalhydridebus, zie figuur 10.4(a). ISE heeft ook verkleinde brandstofcellen met een uitgangsvermogen van slechts enkele honderden mW. Figuur 10.4(b) toont een prototype.

In september 2001 onthulde Plettac Mobile Radio GmbH (Duitsland) een toestel dat al in zijn prototypefase was. Het bedrijf presenteerde een navigatiecomputer die gebruikt wordt in de transportlogistiek om objecten op te sporen met lange dienstintervallen zoals geladen treinen. Wanneer de eenheid een kwartier per dag actief gebruikt wordt voor, verzekert één enkele waterstoftank een werkzaamheid van zes jaar. Dit is een typisch voorbeeld van een niche toepassing wat een lange stand-by tijd meebrengt. Brandstofcellen kunnen in dit geval bewijzen dat ze voordeliger zijn dan batterijen.



Figuur 10.4 (a): Een verkleinde brandstofcel met een geïntegreerde AC/DC-converter, om tot 15 VDC te genereren met slechts enkele cellen. Waterstof wordt opgeslagen in een metaalhydridebus. **(b):** Een prototype van een miniatuurbrandstofcel ontworpen door ISE Freiburg en partners. De eenheid is samengesteld uit vijf brandstofcellen en bereikt een uitgangsvermogen van 250 mW wat overeenkomt met 1 Wcm³.

NovArs heeft een kleine luchtgekoelde brandstofcel ontworpen waarvan het vermogen reikt tot 3 kW. Figuur 10.5 (a) toont een 600W-eenheid bekrachtigd door gecomprimeerde waterstof. De technische gegevens daarvan vind je in tabel 10.2. Figuur 10.5(b) toont een prototype van een fiets werkend met deze technologie.



Figuur 10.5(a): Deze 600W-vermogeneenheid ontworpen door NovArs/Manhattan Scientific is gebaseerd op een polymeer-elektrolyt-brandstofcel die gecomprimeerde waterstof en lucht gebruikt om elektrisch vermogen op te wekken. **(b) :** Manhattan Scientifics' Hydrofiets werd gepresenteerd in juni 2000. Op de brandstofcel fiets vloeit gecomprimeerd waterstof van een 2-liter cilindervormige tank naar de brandstofcel.

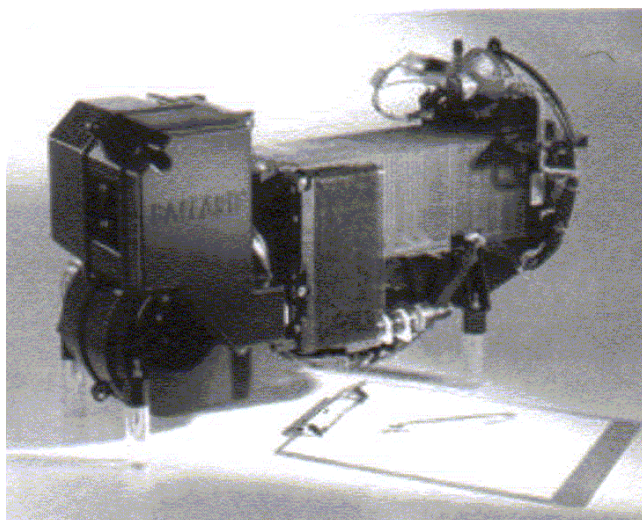
Uitgangsvermogen	600 W
Uitgangsspanning	24 VDC
Aantal cellen	40
Afmetingen	diameter van 110mm en hoogte = 130mm
Gewicht	780 g
Brandstof	gecomprimeerd waterstof

Tabel 10.2 Technische gegevens van Manhattan Scientifics' 600 W luchtgekoelde PEM-brandstofcel vermogeenheid.

In 2000 namen Ballard Power Systems en Millenium Cell-Inc. deel aan een gezamenlijke ontwikkelingsovereenkomst om Milleniums Cell's waterstof generatiesysteem te gebruiken bij de draagbare brandstofcelproducten van Ballard. Millenium Cell heeft een proces ontworpen dat *Hydrogen-On-Demand* heet. In dat proces wordt op een gecontroleerde manier waterstof vrijgemaakt uit natriumborohydride en water. Ballards heeft een leveringsovereenkomst met Matsushita Electric Works om Ballard brandstofcellen voor draagbare, compacte vermogengeneratoren van 250 W te leveren en dit gericht op de Japanse markt. De samenwerking met Matsushita begon reeds in 1996 als een evaluatieprogramma voor brandstofcellen.

Een andere belangrijke klant en tevens medeontwerper van Ballard wat draagbare technologie betreft is Coleman Powermate, een dochtermaatschappij van Sunbeam Corporation. Sunbeam verkoopt allerlei producten onder merknamen zoals Sunbeam[®], Oster[®], Grillmaster[®], Coleman[®], Mr.Coffee[®], First Alert[®], Powermate[®], Health-O-Meter[®], Eastpak[®] en Campingaz[®]. De twee maatschappijen zijn bezig met het ontwerpen van draagbare en back-up eenheden. Ze baseren zich op Ballard's Mark 900 stack bouwstijl.

In september 2001 kondigde Ballard de commerciële lancering van Nexa aan, een brandstofcelsysteem toegewijd aan draagbare toepassingen. Het systeem wordt getoond in figuur 10.6 en zijn gegevens zijn te vinden in tabel 10.3. Nexa levert 1200 W aan DC-vermogen. Back-up oplossingen zullen dus ook mogelijk zijn.



Figuur 10.6 Ballard's Nexa 1,2-kW draagbare vermogenmoduleContinu

uitgangsvermogen	max. 1200 W
Uitgangsspanning/stroom	26 VDC / 46 A
Werkings temperatuur	3-30°C
Afmetingen	560 x 250 x 330 mm
Gewicht	13 kg
Brandstofvoorziening	waterstofgraad 4.0, 0,7 –17 bar
Brandstofopslagcapaciteit	Extern
Brandstofverbruik	18,5 liter per minuut

Tabel 10.3 Technische gegevens van Ballards Nexa vermogenmodule

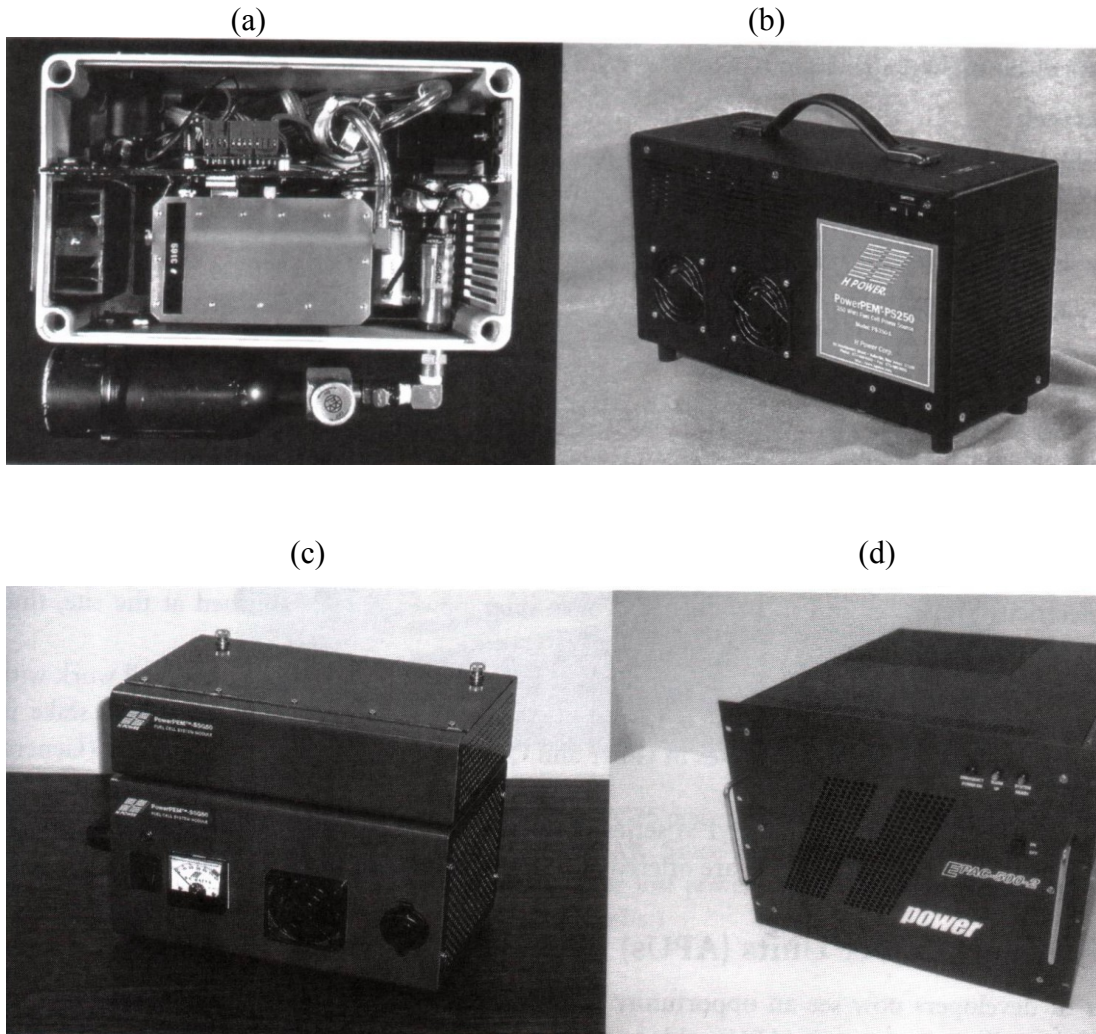
Hydrogenics, een partner van GM, heeft ook kleine door waterstof aangedreven modules ontworpen. Deze bevatten HyTEFseries generatoren met een nominaal uitgangsvermogen van 5 tot 200 W en uitgangsspanningen tussen 4 en 60 VDC. Brandstof wordt aangevoerd als lagedruk waterstof. De HyTEF werkt bij een temperatuur van –50 tot +40°C.

In tegenstelling tot de HyTEF-generatoren zijn de HyPORT-vermogengeneratoren ontworpen voor werkelijk draagbare systemen zoals militaire toepassingen (Figuur 10.7). HyPORT zal in een temperatuur tussen 0 tot 40°C werken en wekt 300 W op bij een spanning van 24 VDC. Waterstof wordt aangevoerd vanuit een metaalhydridetank. Een 5kW-versie van dit toestel aangedreven door een *chemische hydridetank* werd met succes gedemonstreerd aan het Canadese en Amerikaanse leger in februari 2002.



Figuur 10.7 De HyPORT 5000 generator ontworpen door Hydrogenics.

H-Power werd in 1989 opgericht in Belleville en heeft nu ook vestigingen in Montreal en Monroe. H-Power heeft een reeks brandstofcellen ontwikkeld met een vermogen gaande van 30 tot 1000 Watt voor het gebruik bij draagbare toepassingen voor consumenten, zakelijke producten en het Amerikaanse leger. Vier voorbeelden worden voorgesteld in figuur 10.8. De maatschappij heeft er ook patenten op en is een reeks multikiloWatt PEM-brandstofcellen aan het ontwerpen om bussen, trucks en auto's aan te drijven. Ze ontwerpt er ook voor stationaire toepassingen om huizen en kleine bedrijven van energie te voorzien.



Figuur 10.8 H Power batterijvervangers en draagbare systemen: (a) D35, (b) 250-W draagbare vermogeenenheid PS250, (c) SSG50 met metaalhydrietank en (d) een EPAC500.

10.2.2 Verafgelegen vermogengeneratie en back-up oplossingen

In dit deel bekijken we enkele bedrijven die zich hiermee bezighouden.

10.2.2.1 Ballard Power Systems

Ballard Generation Systems maakte in 2001 een 60 kW-prototype van een stationaire brandstofcelvermogengenerator verenigd tot de Mark 900 stack bouwstijl. Dit systeem is ontworpen voor back-up en stand-by toepassingen en toont voor de eerste keer gelijkenissen tussen stationaire en autotoepassingen.

10.2.2.2 H Power Corp.

H Power Corp. is een pionier in back-up vermogengeneratie. H Power is waarschijnlijk de eerste firma die PEM-systemen verkoopt, ze heeft een contract van meer dan 750 miljoen euro gekregen om veranderbare verkeersborden te voorzien van brandstofcel back-up vermogen. Op de figuur (Figuur 10.9) hieronder zie je zo'n verkeersbord.



Figuur 10.9 Een veranderbaar verkeersbord met brandstofcel back-up vermogen van H Power.

10.2.2.3 IdaTech

IdaTech heeft een reformersysteem voor draagbare toepassingen gebaseerd op een 1 kW-brandstofcel ontworpen. IdaTechs reformer is in staat om $13 \text{ dm}^3\text{min}^{-1}$ waterstof met een hoge zuiverheid te leveren en heeft een koude opstarttijd van 3 minuten. Dit prototype heeft een diameter van ongeveer 15 cm, een hoogte van 15 cm en heeft slechts 20 W elektrisch vermogen nodig.

10.2.2.4 Hydrogenics/Giner/Quantum/General Motors

In oktober onthulden General Motors en partners Hydrogenics, Quantum en Giner een prototype van een onafgebroken vermogeneenheid die zorgt voor back-upvermogen voor gsm-zendmasten tijdens stroomonderbrekingen. Het HyUPS-systeem kan tot 25 kW genereren voor maximum twee uur afhankelijk van de opslagcapaciteit van de waterstof. De laatst verschenen Quantum waterstofopslagruimte en behandelingssysteem slaat zo'n 140 liter waterstof op onder een druk van 34,5MPa.

Zodra het ontwerp af is, is Hydrogenics (GM's partner) van plan om de brandstofceleenheid op de markt te brengen en samen te werken met Nextel Communications, Inc. om veldtesten uit te voeren. GM heeft 24% aandelen van Hydrogenics, 30% van Giner en 20% van Quantum in zijn bezit.

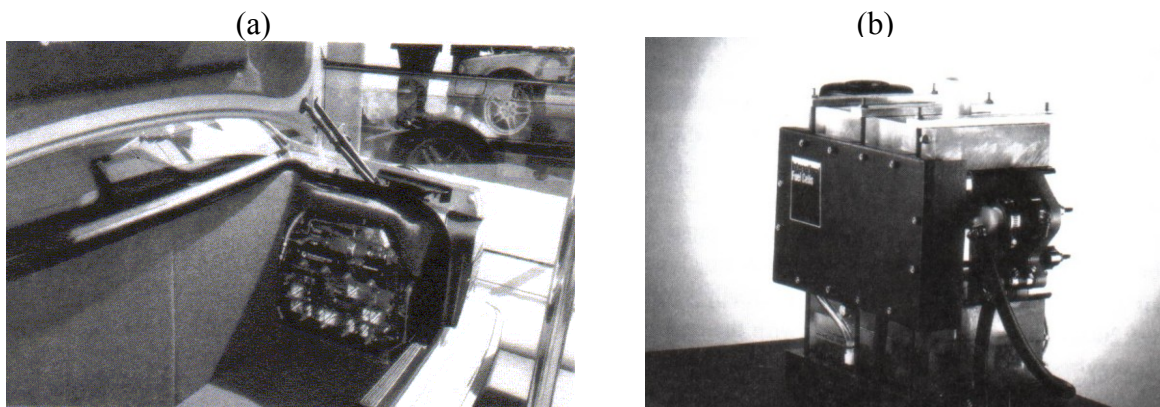
Hydrogenics heeft ook de HyPM-serie van de met waterstofwerkende PEM brandstofcellsystemen ontworpen gebaseerd op de H2X brandstofcelstack van Hydrogenics. Deze worden aangeboden met een uitgangsspanning van 5, 25 en 40 kW.

10.2.3 Hulpvermogeneenheden (APU's) voor auto's

APU staat voor Auxiliary Power Unit en betekent hulpvermogeneenheid. Enkele ontwikkelaars zien nu een gelegenheid in het voorzien van on-boardvermogen van brandstofcellsystemen voor auto's. De APU draagt bij tot het comfort van de passagiers. De eenheid kan elektrisch vermogen leveren aan het airconditioningsysteem, zelfs al draait de motor niet. Met goede systeemarchitectuur zal de efficiëntie van het aan boord genereren van elektriciteit stijgen, en zo generatoren en misschien batterijen vervangen. Andere toepassingen zijn hulpvermogeneenheden voor trucks, recreatieve voertuigen en militaire toepassingen. Ook het genereren van elektrisch vermogen voor hybride voertuigen, schepen en boten zijn voorbeelden van toepassingen. Bekende APU ontwerpers met prototypes in de 5 kW-reeks zijn Delphi en Honeywell.

10.2.3.1 UTC Fuel Cells en BMW

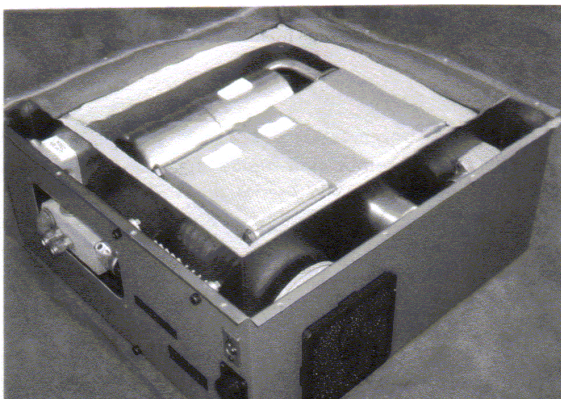
Het APU-systeem dat ontworpen is door UTC Fuel Cells, is waarschijnlijk de eerste APU die werkte op waterstof. Het was een PEMFC-brandstofcellensysteem ontwikkeld voor de met waterstof aangedreven verbrandingsmotor in een auto van BMW (zie figuur 10.10). BMW heeft door waterstof aangedreven versies van zijn BMW 7-serie en recenter ook een waterstofversie van de nieuwe MINI-Cooper ontwikkeld. De auto's slaan vloeibare waterstof aan boord op in cryogeentanks. De auto's in de BMW 750hL modelserie zijn luxewagens verkrijgbaar met waterstof- of benzinetanks.



Figuur 10.10(a) Een door waterstof gevoed APU-systeem ontworpen door UTC Fuel Cells. **(b):** Een APU geïnstalleerd in een BMW met een waterstof verbrandingsmotor.

10.2.3.2 Delphi and BMW

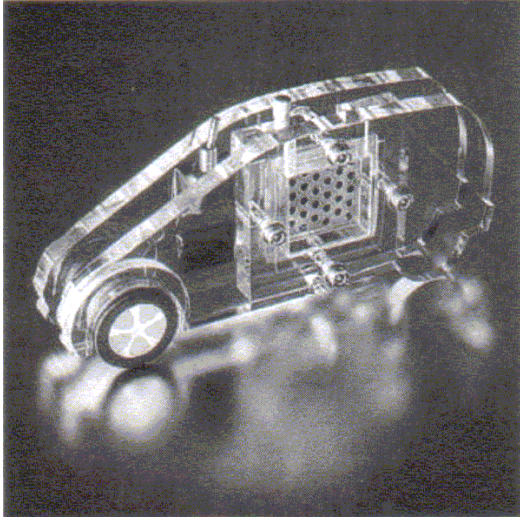
Terwijl door waterstof aangedreven APU's enkel toegepast zullen worden in auto's met door waterstof aangedreven verbrandingsmotoren (ICE's) en misschien ook in door brandstofcel aangedreven auto's, vereist de gangbare autotechnologie een brandstofcelsysteem dat werkt op benzine. Delphi ziet een SOFC-vermogeneenheid in combinatie met een benzine brandstofreformer als de eenvoudigste technische oplossing voor dit probleem. Gepaste SOFC-technologie werd eerder besproken. Courante APU-ontwikkelaars denken dat de SOFC-technologie zal zorgen voor een gepaste oplossing, omdat de SOFC minder gevoelig is aan vergiftiging door onzuiverheden in hervormde brandstof, met name koolmonoxide. Na minder dan twee jaar ontwikkelingstijd konden BMW en Delphi in februari 2001 de eerste auto met elektrisch vermogen aangevuld met een op benzinewerkende brandstofcel presenteren (Figuur 10.11). Het APU-systeem bestaat uit twee SOFC-stacks aangevuld met: een microhervormer en een hoofdhervormer, een thermisch behandelingssysteem, een afval-energie hersteleenheid, een luchtprocessysteem, SOFC-regelaars en vermogenelektronica, en een plastic lithium-ionbatterijpak. De opstarttijd bedraagt zo'n 45 minuten en het SOFC-systeem werkt bij 800°C. Volgens BMW is de omzetting van benzine in elektriciteit via reformer en SOFC-brandstofcel bijna tweemaal zo efficiënt als de combinatie van motor, alternator en batterij. De autonome werking van de 5-kW APU-brandstofcel laat een reeks van nieuwe mogelijke functies zien: het ontdooien van de ramen voor het instappen in de wagen of het verwarmen van de zetels en het stuur. Bij hoge buitentemperaturen kan de airconditioning optimaal werken ongeacht de motorsnelheid. Airconditioning in de auto met de motor uit kan reeds uitgevoerd worden met verbruik van een kwart van de energie die we tegenwoordig nodig hebben. We maken daarvoor gebruik van een conventionele, mechanisch aangedreven generator. Toekomstige *telegrafische* systemen (by-wiresystemen) zoals elektrisch bediende stuurinrichting of remmen vereisen veel meer elektrische energie, de SOFC-brandstofcel kan dan een oplossing bieden.



Figuur 10.11 Prototype van een APU-eenheid ontworpen door Delphi en BMW. De 5-kW, 42-V eenheid zal aangedreven worden met benzine. Een eerste generatie van vaste oxide brandstofcelstacks (SOFC-stacks) werd door Global Thermoelectric aan Delphi geleverd.

10.2.4 Demonstratiemateriaal en gadgets

Er is een grote publieke interesse voor de brandstofceltechnologie. Demonstratiesystemen zoals educatieve brandstofcelbouwpakketten worden dan ook veel gevraagd. Heliocentris, een Berlijns bedrijf, is één van de eerste verdelers van deze systemen met een wereldwijd distributienetwerk. Onderstaande figuur toont één van hun ontwerpen.



Figuur 10.12 Een brandstofcel demonstratieauto aangedreven door een direct methanol brandstofcel (DMFC).

10.3 Conclusies

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de vermogenreeks en de brandstoffen van de draagbare systemen. De tabel bevestigt dat de zogezegde draagbare reeks van prototypes tamelijk verschillend is. De systemen kunnen gebaseerd zijn op de PEMFC- of de SOFC-technologie. Er is ook een grote variatie aan gebruikte brandstoffen: waterstof, methanol, benzine of diesel. Het is zeer duidelijk dat zich hier een grote markt opent.

Waarschijnlijk zullen gespecialiseerde toepassingen verkocht worden door kleinere vennootschappen. Een reeks van systemen die geschikt zijn voor vele doeleinden zal een bredere reeks van toepassingen bieden. Bestaande ontwikkelaars zoals Ballard Power Systems en General Motors hebben, samen met hun partners, deze kansen benut. De volgende jaren zullen in een snel tempo boeiende ontwikkelingen tot stand komen.

Autotoepassingen		
Toepassing	lage-temperatuur-brandstofcellen = PEMFC	hoge-temperatuur-brandstofcellen
Hulpvermogeneenheid (APU)	Waterstof PEMFC (alleen BMW)	Benzine Diesel
Draagbare toepassingen		
Toepassing	Waterstof PEMFC	Direct Methanol PEMFC of DMFC
Vermogen van op afstand (100-500W)	/	Methanoltank
Vermogen van op afstand (300-3000W)	Propaan / Butaan Methanol Benzine Waterstof in metalen hydridebussen	Methanoltank Methanolvulling
Kleine consumentenelektronica		

Tabel 10.4 De vermogenreeks en brandstoffen van draagbare systemen.

11 Autotoepassingen

Door de alsmaar versnellende media overkoepeling van *nieuwe* uitvindingen en prestaties in de industrie, is men bijna de echte motivatie voor het ontwerp van, door brandstofcel aangedreven, auto's (voor hun schonere uitlaatgassen) vergeten. De verwachtingen gaan van door brandstofcel aangedreven auto's wachtend in de toonzaal volgend jaar tot de volledige onafhankelijkheid van olie-importen door waterstof of methanol aangedreven brandstofcelauto's. Want sommige mensen geloven dat auto's door brandstofcellen aangedreven met water werken, dit komt doordat de media onvolledige informatie geeft en dikwijls de technologie overroept. De vraag "waarom brandstofcellen?" werd al eerder gesteld, de bedoeling van wat hierop volgt is om een overzicht van wat er gepresteerd is in dit marktdeeltje te geven en wie de voornaamste ontwikkelaars zijn. Zonder twijfel hebben brandstofcellen zware concurrentie van verbeterde verbrandingsmotoren en andere concepten ondervonden. Een volmaakte bespreking van deze concurrentie zal in dit hoofdstuk gepresenteerd worden.

11.1 Brandstofceltoepassingen in de autotechnologie

De voornaamste autobrandstofcelontwikkeling strandde in de loop van het voorbije decennium of zo was de inspanning om een mobiele vermogenbron die genoeg elektrisch vermogen aan boord kan genereren te ontwikkelen om een elektrische motor te vervangen of de conventionele verbrandingsmotor (ICE) in het hoofd aandrijvingssysteem te helpen. Hieronder zullen we enkele manieren van aanpakken bespreken, één voor één gebaseerd op de proton uitwisselingsmembraan brandstofcel (PEMFC) technologie.

Ondertussen is een tweede toepassing geïdentificeerd: de vervanging van mechanische elektrischvermogen-generators in militaire -en luxevoertuigen en voertuigen voor zwaar werk. Deze systemen zijn bestemd voor ICE-aangedreven voertuigen en daarom (met één uitzondering) ontworpen om met benzine of diesel als brandstof te werken. Al deze systemen zijn gebaseerd op een vaste oxide brandstofcel (SOFC) technologie en zijn noch maar in een vroege ontwikkelingsfase.

11.1.1 Aandrijvingsvermogengeneratie

Er werden al enkele concepten van het gebruik van brandstofcelvermogen in aandrijvingsystemen voor auto's onderzocht. Ten eerste kan men een onderscheid maken tussen enkel een brandstofcel (FCV's) en brandstofcellen plus elektrische of mechanische energieopslag (FCHV's). Ten tweede is er het probleem van brandstofvoorziening, die eerder alle aandacht gekregen heeft: waterstof (vloeibaar, onder druk gezet of als metaalhydride) opslag aan boord of opslag van chemische brandstof zoals methanol, benzine/diesel, vloeibaar petroleumgas (LPG) of natuurlijk gas (samengedrukt).

Tot nu toe, heeft DaimlerChrysler het zuiver door brandstofcel aangedreven concept zonder gebruik te maken van buffer of back-up batterijen, in gebruik genomen. Aanvankelijk waren het reformers die de waterstof aan boord genereerden. De dynamische reactie van de werkelijke brandstofcelstack heeft gewoonlijk geen resultaat omdat het ogenblikkelijk ladingsveranderingen volgt.

Andere ontwikkelaars hebben brandstofcelvermogen gecombineerd met elektrischvermogen-opslag in batterijen of supercondensatoren of met mechanisch vermogen-opslag in vliegwielen. De vraag of een vermogen (elektrisch of mechanisch) buffer wordt gebruikt legt niet enkel de graad van de dynamische reactie van het brandstofcelvermogensysteem vast, maar is ook doorslaggevend voor de keuze van energiehernieuwing bij het remmen.

11.1.2 Hulpvermogengeneratie

Werken op hulpvermogeenheden (APU's) startte slechts betrekkelijk recent. APU's zijn ontworpen om op benzine te werken (uitgezonderd in door waterstof gevoede verbrandingsmotorvoertuigen bij BMW waar de APU met waterstof van de vloeibarewaterstoftank werkt, met de mogelijkheid om de verdamping van vloeibare zuurstof te recycleren). APU technologie verschilt ook in de meeste gevallen van aandrijvings-brandstofceltechnologie waar vaste oxide brandstofcellen eerder dan PEMFC-brandstofcellen worden gebruikt. We zullen APU's in de context van draagbare vermogengeneratie bespreken (hoofdstuk 10), waar ze natuurlijk beter thuishoren.

11.2 Key ontwikkelaars van autotechnologie

11.2.1 General Motors, Opel, en Suzuki

11.2.1.1 Technologie en Partners

General Motors (GM) heeft een lange historie inzake brandstofcelonderzoek en de ontwikkeling ervan. In 1964 startte GM een programma voor de bouw van elektrische voertuigen. Het bedrijf wou de doelen voor het onderzoek en de ontwikkeling van het elektrisch aandrijfsysteem, zoals de motor, zijn bedieningen en de vermogenbron vastleggen. Eén van de elektrische vermogenbronnen die voor evaluatie gekozen is, is de brandstofcel, omdat deze bron twee belangrijke voordelen had:

- In tegenstelling tot batterijen is het bereik niet begrensd
- Ze was niet begrensd door het rendement van de thermische motor en had bijgevolg het potentieel voor superieure brandstofeconomie

In 1996 werd GM de eerste autoconstructeur die een berijdbare brandstofcelauto kon demonstreren; de Electrovan. De Electrovan had vloeibare waterstof en zuurstof-brandstoftanks, een bereik van 240 km en een topsnelheid van 110 km/h. De alkalische brandstofcellen werden gefabriceerd door Union Carbide Corporation en waren met de driefasen AC-aandrijvingsmotor reikend tot 90 kW capabel om continu 32 kW te produceren en 160 kW voor korte perioden. Het Electrovan programma demonstreerde GM's vroege interesse in de ontwikkeling van brandstofcelvoertuigen voor commercieel gebruik, maar het brengt veel obstakels met zich mee die zich sinds toen voorgedaan hebben.

Sinds november 1998 zijn GM's brandstofcelontwikkelingsactiviteiten gecombineerd in het Global Alternative Propulsion Center (GAPC), met locaties in Warren, Rochester en Mainz-Kastel (Opel, Duitsland). Waarschijnlijk om de inspraak van GM's Duits filiaal te bewijzen. Opel GAPC heeft twee directeurs: Byron McCormick (V.S.) en Erhard Schubert (Duitsland). Beide directeurs net als andere hooggeplaatste GM stafleden hebben regelmatig onderlijnt dat GM gelooft dat waterstof de langetermijnkeuze van brandstof zal zijn voor transport en dat waterstof zal komen van hernieuwbare bronnen.

In een poging om de optie voor benzine toch open te houden, ondertekenden ExxonMobil en GM in 1998 een overeenkomst om onderzoek te doen naar hardware en brandstofkeuzes voor toekomstige voertuigen. Die samenwerking heeft sindsdien geleid tot de ontwikkeling van een benzinereformer, die in 2001 klaar was om op een Chevrolet S-10 voertuig gemonteerd te worden zodat hij een 25 kW-brandstofcelsysteem kon bekrachtigen. (zie figuur 8.4) Het reformerrendement is genoteerd op 80% en men verwacht dat het systeem een rendement heeft van bijna 40%. De processor is 50% lichter en half zo groot als de vorige generatie en kan in minder dan 3 minuten starten, vergeleken met de 12 tot 15 minuten opstarttijd bij vorige generaties wat een grote vooruitgang betekent.

Volgens de vice president Lawrence D. Burns van GM betekenen brandstofcellen werkend met benzine propere en meer efficiënte voertuigen. Tegen het eind van dit decennium kunnen deze in het bereik van de gebruikers zijn. Het zou moeten genoteerd worden dat de reformer werkt op "propere benzine", wat een chemisch zuivere brandstof tamelijk verschillend van de koolwaterstoffen tegenwoordig verkrijgbaar aan benzinestations betekent.

Andere strategische bondgenootschappen werden in 2001 aangekondigd met Suzuki, Hydrogenics en Giner. Hydrogenics zal de voorkeurspartner voor de ontwikkeling en de optimalisering van brandstofcellen en ook de verdeler van stationaire systemen zijn. Die stationaire systemen hebben ze samen ontworpen. In het verleden distribueerde Hydrogenics brandstofcelvermogen back-upsystemen voor waardevolle toepassingen zoals in ziekenhuizen. Het is één van de marktleiders in brandstofcel-testuitrusting. Giner zal GM assisteren inzake waterstoftanktechnologieën. GM heeft aandelen van respectievelijk 24 en 30% in beide bedrijven. Het hoofddoel van de samenwerking met Suzuki zal de integratie van brandstofcelsystemen in compacte en kleine wagens zijn. GM bezit momenteel 20% van Suzuki's aandelen.

Waterstofopslag is een ander gebied waar GM/Opel met partners aan het samenwerken is. Een samenwerking met Quantum Technologies werd in juni 2001 aangekondigd. Quantum is een leidende ontwikkelaar van lichte gecomprimeerde waterstofopslagtechnologie.

In 2001 presenteerde Quantum een 700-bar tank die 80% meer gas opslaat dan tanks die werken bij 350 bar. Het levert gas aan 10 bar. Breukdruk werd vastgesteld bij 1620 bar. GM heeft een aandeel van 20% in dit bedrijf.

In 1999 tekende GM een onderzoeks- en ontwikkelingsovereenkomst voor vijf jaar met Toyota, een andere toonaangevende ontwikkelaar, om de introductie van geavanceerde aandrijvingstechnologieën te versnellen.

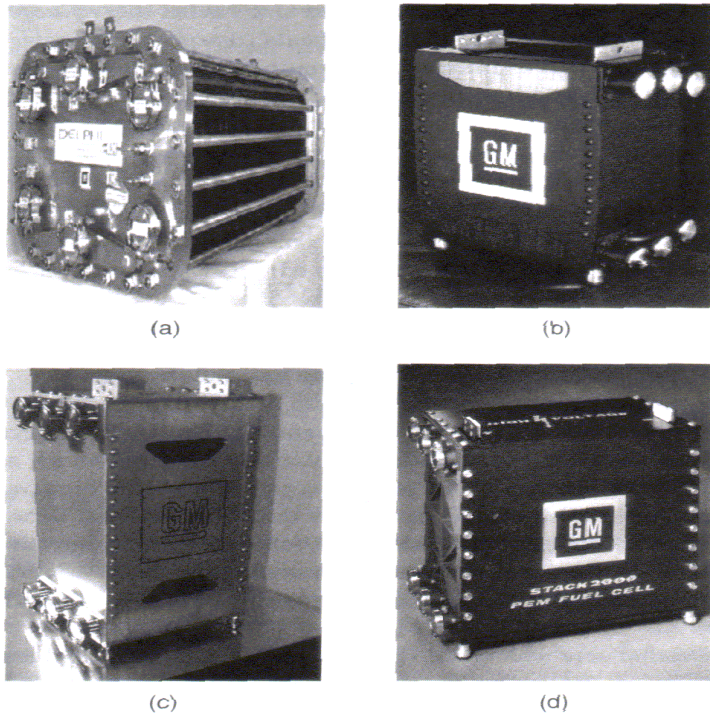
GM is lid van het Californische Brandstofcelvennootschap, dat is samengesteld uit autofabrikanten, olie- en energiemaatschappijen, brandstofcelontwikkelaars en regeringsinstanties. De vennootschap plande om meer dan 70 brandstofcel-passagiersvoertuigen en -bussen op de Californische wegen te plaatsen tegen eind vorig jaar.

11.2.1.2 Stacks

Figuur 11.1 toont een serie stacks die ontwikkeld zijn tussen 1997 en 2000 door het GM/Opel brandstofcelprogramma. De GM HydroGen1 stack (Gen 7, 1999), zie (c) van figuur 11.1, levert een elektrisch vermogen van 80 kW bij $1,1 \text{ kWdm}^{-3}$ en $0,47 \text{ kWkg}^{-1}$ terwijl de vroegere GM Gen 4 stack, dat wordt getoond in figuur 11.1 (b), 23 kW genereerde. Gen 4 bevatte 106 cellen en behaalde een vermogendichtheid en specifiek vermogen van respectievelijk $0,77 \text{ kWdm}^{-3}$ en $0,31 \text{ kWkg}^{-3}$. Zie ook tabel 11.1 voor meer technische gegevens.

Ondertussen heeft GM, met het GM Stack2000 model (Figuur 11.1(d)) tot op heden één van de krachtigste PEM-brandstofcelstacks ontworpen en toont een mogelijkheid om energie zelfs uit bevroren toestanden te putten. Bij -20 en -30 °C, wordt het volledige vermogen bereikt in respectievelijk slechts 20 en 60 seconden. De GM Stack2000 met 200 cellen levert 94 kW bij een vermogendichtheid van $1,6 \text{ kWdm}^{-3}$ en een specifiek vermogen van $0,94 \text{ kWdm}^{-3}$ (zie ook tabel 11.1). De stack vereist geen bijkomende externe bevochtigende componenten voor de cellen.

Met het oog op eind 2001 gaf GM ook details van zijn meest recente stack vrij die een nog hogere vermogendichtheid van zo'n 1,75 kW per liter bereikt. De stack met 640 cellen weegt 82 kg en levert continu een vermogen van meer dan 100 kW. Zie tabel 11.1



Figuur 11.1 Vorderingen van het DaimlerChrysler/Opel brandstofcelprogramma. De series (a) tot (d) tonen de stackontwikkeling tussen 1997 en 2000. (a) Gen 3 (vermogendichtheid van 0,26 kW/l), (b) Gen 4 (0,77 kW/l), (c) Gen 7 (0,47 kW/l - gebruikt om HydroGen1 aan te drijven) en (d) Stack2000 (1,6 kW/l). General Motors nieuwste stack genereert 1,75 kW/l. Voor technische gegevens: zie tabel 11.1

Stack	Gen 3	Gen 4	Gen 7	Stack 2000	Stack 2001
Ontwikkelingsjaar	1997	1998	1999	2000	2001
Stack vermogen (kW)	37-41	23-40	80-120	94-129	102-129
Vermogendichtheid (kW/l)	0,26	0,77	1,10	1,60	1,75
Specifiek vermogen (kW/kg)	0,16	0,31	0,47	0,94	1,22
Cellen	220	106	200	200	640
Actieve oppervlakte (cm ²)	500	500	800	800	?
Druk (bar)	2,7	2,7	2,7	1,5-2,7	?
Temperatuur (°C)	80	80	80	80	?
Afmetingen (mm)	/	/	590x270x500	472x251x496	140x820x500
Andere gegevens	/	/	/	Geen externe bevochtiging	Geen externe bevochtiging
Gebruikt in	/	1998 Zafira?	HydroGen 1	HydroGen 3	/

Tabel 11.1 Vooruitgang van General Motors stack hardware.

11.2.1.3 Passagierwagens

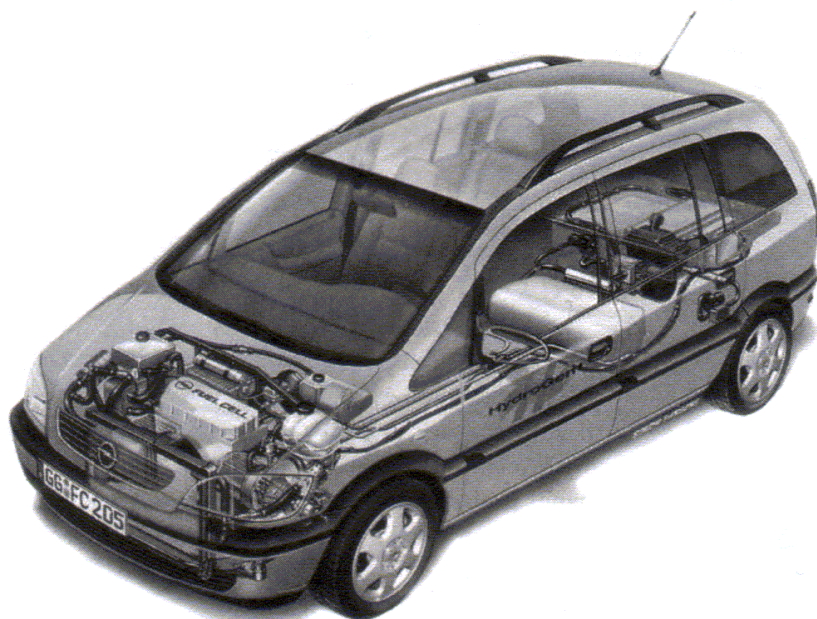
Aangemoedigd door de successen van Ballard Power Systems in de jaren 80 met de met luchtwerkende PEMFC-technologie, die sindsdien alle andere brandstofcellen voor autoaandrijving verving, financierde de U.S. Department of Energy in 1991 een GM-programma om een met methanol werkend elektrisch voertuig te ontwikkelen.

Een Opel Zafira brandstofcelvoertuig met een methanol reformer werd ontsluit op het autoSalon is september 1998. De 50 kW brandstofcel vermogeenheid kon een voertuig met een maximumsnelheid van 120 km/h voortbewegen, zie tabel 11.2. Het voertuig kon 483 km rijden. Een batterij bezorgd kortstondig vermogen en opslag van elektriciteit verkregen van het elektrisch remmen door recuperatie. Het type van reformer dat gebruikt werd is onbekend. Maar sinds het voertuig een bijkomende watertank van 20 liter en een soort brander bevat die de reformer voorziet van de nodige warmte, lijkt het erop dat het een stoomreformer is. Er is weinig informatie over dit voertuig verkrijgbaar omdat GM de methanolreformertechnologie opgeeft.

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	Fuel Cell Zafira (September 1998)
Basis van het voertuig	Opel Zafira
Gewicht	1850 kg
Aantal zitplaatsen	?
Maximumsnelheid	120 km/h
Brandstofceltype / vermogen rating	2 x 25 kW PEM brandstofcel 80 – 90°C
Motortype / vermogen rating	50 kW-inductiemotor. Motor, batterijpak, en vermogen- controle-elektronica zitten in het motorcompartiment
Brandstofvoorziening	Methanol, waarschijnlijk stoomreformer
Brandstofopslag	54l methanol
Back-up batterij	Metaalhydride batterij
Andere	Vernieuwend remmen
Rijbereik	483 km

Tabel 11.2 Technische data voor GM's 1998 Methanol-aangedreven Zafira

HydroGen1, een voertuig met 5 zitplaatsen eveneens gebaseerd op de compacte Opel Zafira transportwagen, werkt met vloeibare waterstof en werd voor het eerst gedemonstreerd in Brussel in juni 2000 (zie figuur 11.2). Het werd aangedreven door een driefasen synchrone elektrischemotor van 55 kW werkend bij 250-380 V en geleverd door een 75 kW-brandstofceleenheid die werkt op zuiver waterstof. De Gen7 brandstofcelstack bevat 200 individuele brandstofcellen en levert een spanning tussen 125 en 200 V. De stackafmetingen zijn 590 x 270 x 500 mm (lengte x breedte x hoogte), wat overeenkomt met een vermogendichtheid van 0,9 kW per liter. Het voertuig met voorwielaandrijving bereikt een topsnelheid van bijna 140 km/h en een bereik van 400km per tank waterstof. De tank uit roestvrij staal en geïnstalleerd onder de achterzetel is 1m lang en heeft een diameter van 40 cm en bevat 75 liter of 5 kg vloeibare waterstof. De acceleratie van het 1575 kg wegende voertuig van 0 tot 100 km/h gebeurt in 16 seconden. HydroGen1 bevat ook een batterij voor piekvermogen. Zie ook tabel 11.3.



Figuur 11.2 Het HydroGen 1 brandstofcel prototype gemaakt door GeneralMotors/Opel. De HydroGen 1 kan 400 km rijden met een tank met 75 liter vloeibare waterstof.

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	HydroGen 1 (2000)
Basis van het voertuig	Opel Zafira
Afmetingen	4317 mm (l) x 1742 mm (b) x 1684 mm (h)
Aantal zitplaatsen	5
Maximumsnelheid	140 km/h
Brandstofceltype / geschat vermogen / aantal cellen	GM Gen 7 PEMFC / 75 W /200 cellen
Motortype / geschat vermogen / koppel / werkingsspanning /gewicht	AC / 60 kW / 251-305 Nm / 250-380 V / 68 kg
Brandstofvoorziening	Direct waterstof
Brandstofopslag	Vloeibare waterstof, 75 liter / 5 kg
Back-up batterij	Ja
Rijbereik	400 km

Tabel 11.3 Technische gegevens van de HydroGen 1 van General Motors

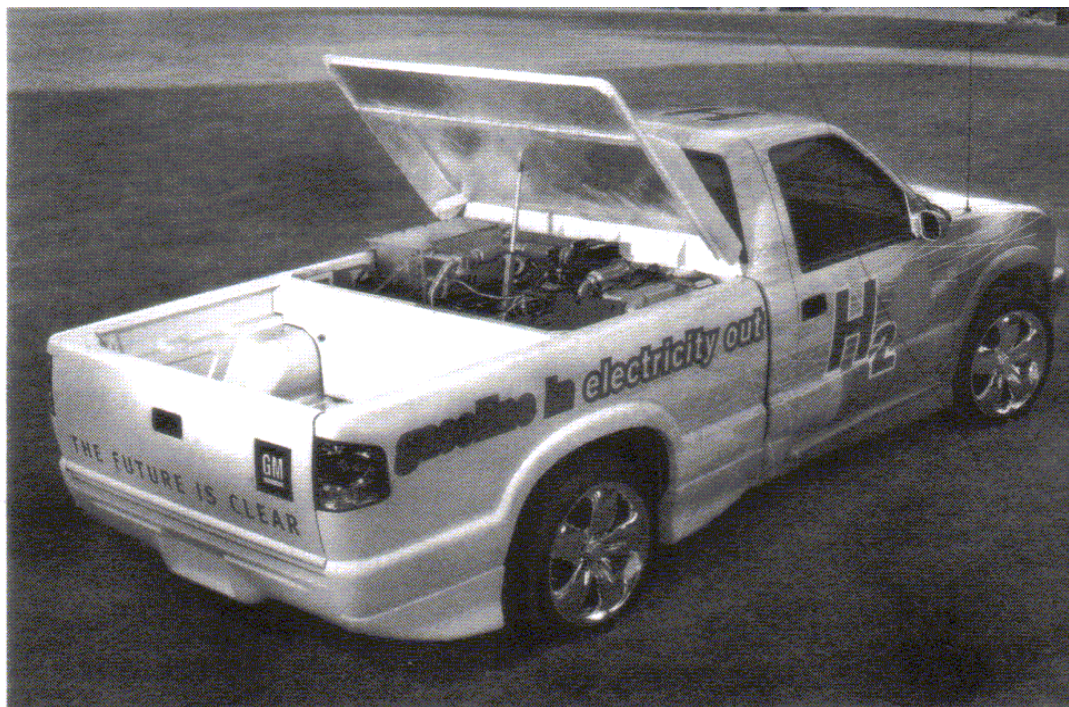
In 2001 werd de HydroGen1 opgevolgd door de HydroGen3, voor het eerst voorgesteld als model op het autosalon van Frankfurt in september dat jaar. Tabel 11.4 toont de technische gegevens van de HydroGen3. De GM Stack2000 behaalt 1,6 kW per liter bij een totaal vermogen van meer dan 90 kW.

Andere prestaties bevatten de eliminatie van de nood aan “ extra externe bevochtende componenten” voor brandstofcellen.

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	HydroGen 3 (september 2001)
Basis van het voertuig	Opel Zafira
Afmetingen	4317 mm (l) x 1742 mm (b) x 1684 mm (h)
Totaal Gewicht	1590 kg
Aantal zitplaatsen	5
Maximumsnelheid	150 km/h
Brandstofceltype / geschat vermogen / aantal cellen /gewicht / afmetingen	GM Stack2000 / 94-129 kW / 200 cellen / 90 kg / 472 x 251 x 496 mm
Motortype / geschat vermogen / koppel / werkingsspanning / gewicht	DC / 60 kW / 215 Nm bij 12.000 min ⁻¹ / 250-380 V / 92 kg
Brandstofvoorziening	Direct waterstof
Brandstofopslag	Vloeibare waterstof, 68 liter / 4,5 kg
Back-up batterij	?
Rijbereik	400 km

Tabel 11.4 Technische gegevens van GM's HydroGen 3

Een Chevrolet S-10 demonstratievoertuig werkend met benzine werd in augustus 2001 gepresenteerd. Dit was het eerste wegvoertuig met een benzinereformer aan boord zie figuur 11.3. Zoals de figuur toont neemt het vermogensysteem de helft van de laadruimte in, wat verschrikkelijk veel is. Het voertuig is dus nog steeds in ontwikkeling. Tot nog toe wekt de S-10 brandstofcel slechts 15 kW op om een batterijlader voor het elektrisch aandrijvingsysteem van het voertuig aan te drijven. De Gen III benzinereformer met gedeeltelijke-oxidatie biedt snellere opstarttijden dan de voorgaande versie met de capaciteit om in minder dan drie minuten te starten. Dit type heeft een piekefficiëntie van 80% en kan 70 kW waterstof produceren.. Rijdemonstraties waren gepland voor begin 2002.



Figuur 11.3 General Motors onthulde werelds eerste aan-boord benzine brandstofprocessor voor brandstofcelaandrijving. De Gen III processor, ingebouwd in een Cheverolet S-10 pick-up, hervormt "clean" benzine aan boord, om naar de brandstofcelstack te sturen. Het voertuig werd geïntroduceerd op 7 augustus 2001.

11.2.2 Toyota Motor Corporation en Daihatsu

11.2.2.1 Technologie en Partners

Toyota Motor Corporation, Japans grootste en werelds derde grootste autofabrikant, bouwt voertuigen in 27 landen. In 2000 produceerde het voor het eerst meer dan vijf miljoen eenheden.

Toyota leidt in de productie van massa-markthybride elektrische voertuigen. In 1997 lanceerde het de Prius (waarvan er meer dan 50 000 verkocht zijn) en volgens z'n voorzitter, Hiroshi Okuda, plant het om een eventueel hybride versie van ieder model aan te bieden. In 2001, verwachtten ze meer dan 20.000 hybride voertuigen te verkopen.

Sinds het begon met z'n brandstofcelinspanningen in 1992 heeft Toyota verscheidene types van brandstofcel hybridevoertuigen werkend met waterstof van metaalhydride- en gecomprimeerdewaterstoftanks ontwikkeld, zowel met methanol- als met benzinereformers.

Toyota Motor Corporation en General Motor Corporation kondigden in april 1999 de ondertekening van een technische overeenkomst aan en schetsten hun inspanningen om de ontwikkeling van *volgende generatie*-voertuigen en -voertuigtechnologie te versnellen. Het doel van deze samenwerking is het vinden van sets van elektrische tractie en controle-componenten voor toekomstige batterij-, hybride-, en brandstofcel elektrischevoertuigen; batterijen en batterijtestprocedures; en voertuig veiligheidsnormen. Toyota en GM plannen continu werk op verbeterde inductieve oplaadsystemen voor batterij elektrische voertuigen, powertrain en controlesystemen voor volgende-generatie hybride elektrische voertuigen en toekomstige systeemdesign en brandstofkeuze en procédés voor het ondersteunen van de productie van door brandstofcel aangedreven voertuigen.

11.2.2.2 Passagierwagens

In 1996 demonstreerde Toyota de RAV4 FC EV, een brandstofcel hybridevoertuig dat 2 kg waterstof opsloeg in een waterstof-absorberende legeringstank voor een totaal rijbereik van 175 km. Technische gegevens staan in tabel 11.5.

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	RAV4 FC EV (oktober 1996)
Basis van het voertuig	Toyota RAV4
Afmetingen	3980 mm (l) x 1695 mm (b) x 2410 mm (h)
Aantal zitplaatsen	5
Maximumsnelheid	100 km/h
Brandstofceltype / gewicht	20 kW PEMFC / 120kg
Motortype / geschat vermogen	Gesynchroniseert permanent magneet / 45 kW
Brandstofvoorziening	Direct waterstof
Brandstofopslag	Metaalhydride, 2% (2 kg H ₂ in 100 kg M-H)
Backup batterij	?
Rijbereik	175 km

Tabel 11.5 Technische gegevens van Toyota's RAV4 FC EV

In 1997 onthulde Toyota's werelds eerste FCHV werkend met een methanolreformer voor de aan-boord ontwikkeling van waterstof, zie tabel 11.6. Natuurlijk volgde hieruit het eerste door methanol aangedreven brandstofcelvoertuig.

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	RAV4 FC EV (oktober 1997)
Basis van het voertuig	Toyota RAV4
Afmetingen	3980 mm (l) x 1695 mm (b) x 2410 mm (h)
Aantal zitplaatsen	5
Maximumsnelheid	125 km/h
Brandstofceltype /gewicht /aantal cellen/afmetingen	25 kW PEMFC /120kg /400 cellen 1,05 x 0,5 x 0,24 m
Motortype / geschat vermogen	Gesynchroniseert permanent magneet / 50 kW
Brandstofvoorziening	Methanol met reformer – 600 mm (l) x 300 mm (diameter)
Brandstofopslag	Methanoltank
Backup batterij	NiMH, vernieuwend remmen
Rijbereik	Ongeveer 500 km

Tabel 11.6 Technische gegevens van Toyota's methanol- aangedreven RAV4 FC EV

Op het internationale symposium van brandstofcelvoertuigen in maart 2001 kondigde Toyota de ontwikkeling van het FCHV-3 brandstofceltestvoertuig. Z'n carrosserie was gebaseerd op die van Toyota's Highlander SUV en had een extra batterij voor energieopslag. De vermogenbron van het voertuig was een 90 kW brandstofcel met protonuitwisselingsmembraan (PEMFC), ontworpen en gebouwd door Toyota zelf. Details over dit voertuig zijn te vinden in tabel 11.7.

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	FCHV-3 (maart 2001)
Basis van het voertuig	Toyota SUV Kluger V/ Highlander
Afmetingen	4685 mm (l) x 1825 mm (b) x 1720 mm (h)
Aantal zitplaatsen	5
Maximumsnelheid	> 150 km/h
Brandstofceltype / geschat vermogen	Toyota PEMFC/90 kW
Motortype / geschat vermogen / koppel	Gesynchroniseerde permanente magneet/80 kW/260 Nm
Brandstofvoorziening	Direct waterstof
Brandstofopslag	Metaalhydride
Backup batterij / makelij	NiMH / Panasonic EV Energy
Rijbereik	300 km

Tabel 11.7 Technische gegevens van Toyota's FCHV-3

Net zoals de eerste FCHV van Toyota gebruikte de FCHV-3 een metaalhydride waterstoftank. Verder gebruikte de FCHV-3 een tweede batterij om de energie die bij het afremmen vrijkwam op te slaan en had andere kenmerken die een hoge efficiëntie van het rijden garanderen. Precieze controle van het laden en ontladen van de secondaire batterij en van het aanvullende vermogen is zo'n kenmerk. Tabel 11.7 geeft meer technische gegevens van dit voertuig. Een veranderde versie van de FCHV-3, de FCHV-4, aangedreven door waterstof opgeslagen in hogedruktanks, werd voorgesteld in juni 2001. Het voertuig had al een vergunning gekregen om op de Japanse wegen te rijden.

De FCHV was uitgerust met vier hogedruk (25 MPa) waterstoftanks die onder de achterbank gemonteerd waren. Zo kon men 250 km ver rijden (wat beduidend minder ver is dan met de FCHV-3). Elke tank bevat een equivalent van 11,2 liter benzine. Toyota hoopt om in 2002 de tankdruk op te drijven tot 35 MPa en tot 50 MPa in 2004. Hopelijk zal zo het rijbereik verhogen tot respectievelijk 350 en 500 km. Alle belangrijke componenten (stack, compressor, motor en vermogen controle-eenheid) zijn onder de motorkap ondergebracht (zie tabel 11.8). Verder heeft de FCHV-4 een nieuw ontwikkeld airconditioningsysteem dat CO₂ als koelmiddel gebruikt in plaats van HFC's.

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	FCHV-4 (juni 2001)
Basis van het voertuig	Toyota SUV Kluger V/Highlander
Afmetingen	4735 mm (l) x 1815 mm (b) x 1685 mm (h)
Aantal zitplaatsen	5
Maximumsnelheid	> 150 km/h
Brandstofceltype/geschat vermogen	Toyota PEMFC/90 kW
Motortype/geschat vermogen/koppel	Gesynchroniseert permanent magneet/80 kW/260 Nm
Brandstofvoorziening	Direct waterstof
Brandstofopslag	Gecomprimeerde H ₂ , vier drukcilinders bij 25 MPa, elk slaat 11,2 liter benzine op
Backup batterij/makelij	NiMH/Panasonic EV Energy
Systeem	Rem energieherstel
Rijbereik	250 km
Toekomstig rijbereik	350 km (bij 35 MPa in 2002); 500 km (bij 50 MPa in 2004)

Tabel 11.8 Technische gegevens van Toyota's FCHV-4

In 2001 kondigde Toyota een plan aan voor de start van de verkoop van brandstofcelvoertuigen in Japan gebaseerd op de FCHV-4 in 2003. De verkoop zou aanvankelijk op een beperkte basis (30-50 voertuigen) zijn omdat de wagen op hogedruk waterstof zou gaan werken. Daarom moest er uitgebreid getest worden in Amerika en Japan.

Toen de FCHV-4 in augustus 2001 werd gepresenteert in de V.S, zie een toenmalige ingenieur van Toyota dat het minstens nog tien jaar zou duren eer een fabrikant een volwaardige brandstofcelwagen voor massaproductie zal ontworpen hebben. Z'n voorspellingen steunden op enkele problemen, die nog niet opgelost waren, zoals de opslag van waterstof aan boord, systemen die verschillende brandstoffen gebruiken en de infrastructuur voor de verkoop van brandstofcellen.

In 2001 was Toyota met vijf FCHV-4's wegstesten aan het houden in Japan. Twee FCHV-4's moesten daarenboven zware testen ondergaan in Amerika. Alles samen had Toyota dus zeven wagens op de wegen, dat is meer dan om het even welke andere ontwikkelaar.

In oktober van datzelfde jaar presenteerde Toyota op het autosalon van Tokyo een nieuw voertuig in z'n FCHV-serie, de benzine-aangedreven FCHV-5. De FCHV-5 is een brandstofcel hybridevoertuig dat elektriciteit uit waterstof van CHF (Clean Hydrocarbon Fuel) genereert gebruik makend van Toyota's CHF-reformer. Details over dit voertuig vind je terug in tabel 11.9.

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	FCHV-5 (oktober 2001)
Basis van het voertuig	Toyota SUV Kluger V/ Highlander
Afmetingen	4735 mm (l) x 1815 mm (b) x 1685 mm (h)
Aantal zitplaatsen	5
Maximumsnelheid	> 150 km/h
Brandstofceltype / geschat vermogen	Toyota PEMFC / 90 kW
Motortype / geschat vermogen / koppel	Gesynchroniseert permanent magneet / 80 kW / 260 Nm
Brandstofvoorziening	Benzinereformer (120-liter volume)
Brandstofopslag	35-liter "benzine" (Zuiver koolwaterstof brandstof CHF) tank
Backup batterij / makelij	NiMH / Panasonic EV Energy
Systeem	Rem energieherstel
Rijbereik	?

Tabel 11.9 Technische gegevens van Toyota's FCHV-5

De FCHV-5 deelt verschillende hoofdcomponenten met de FCHV-4: z'n brandstofcelstack en motor. Daarnaast moeten ook z'n CHF reformer verpakt met een nieuw ontworpen katalysator en warmtewisselaar tussen andere componenten geplaatst worden in de wagen. De Hoofdsysteemcomponenten in de nieuwe FCHV-5 zijn: de 120-liter reformer (die onder de achterbank is bevestigd), een 35-liter brandstoftank (geplaatst onder de passagierszetel), een vermogen controle-eenheid, een permanente magnetische synchrone motor en een door Toyota ontwikkelde brandstofcelstack (allen onder de motorkap gepast), plus een herlaadbare nikkelhydridebatterij (geplaatst tussen de achter-as en de achterbank). De reformermodule bestaat uit een reformer, mixer, verdampingstoestel, warmtewisselaar, hoge- en lage-temperatuur shiftreactor en CO-remover.

Het batterijpak, dat werkt bij 288 V, is hetzelfde als dat in the Prius, Toyota's elektrische hybridewagen die werkt met benzine. Net zoals andere Toyotahybrides gebruikt ook de FCHV-5 de energievernieuwende technologie waarbij kinetische energie gedurende het vertragen en het remmen wordt gerecupereerd en opgeslagen. Deze energie kan dan bij het versnellen gebruikt worden.

Toyota's onderzoekers voorspellen dat ze binnen 3 jaar de grootte van de reformermodule met één derde zullen verkleinen en de stack- en vermogen-controle-eenheid voor de helft. Ondertussen, merken ze op dat de zuiver koolwatestof brandstof, een benzinesurrogaat, verkrijgbaar zal zijn in 2003. Het kan evenwel enkele jaren langer duren eer het in aanvaardbare volume's op de markt komt bij gebrek aan een infrastructuur voor de distributie van de brandstof. De brandstof, onder ontwikkeling bij een consortium bestaande uit Toyota, General Motors en ExxonMobil, wordt verwacht zo goed als zwavelvrij te zijn. De toekomstige vloeibare brandstof, CHF, kan gemaakt worden uit ruwe olie, aardgas of kolen. CHF wordt ook gebruikt als brandstof voor voertuigen met een benzinemotor en kan bevoorraad worden door de benzinepompen van vandaag.

Ondertussen vertoonde Daihatsu, een dochterbedrijf van Toyota, de Move FCV K II, een mini-brandstofcelhybride werkend met gecomprimeerde waterstof en een elektrische voertuigbatterij.

Daihatsu ingenieurs gebruikten een 30 kW-Toyota stack, twee derden kleiner dan de FCHV-4 eenheid. Net zoals bij de FCHV-4 is de waterstoftank van de FCV K II onder de achterbank gemonteerd. Het uitgangsvermogen van de motor is 32 kW (zie tabel 11.10).

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	Move FCV K II (2001)
Basis van het voertuig	Speciale Daihatsu
Afmetingen	3395 mm (l) x 1475 mm (b) x 1670 mm (h)
Aantal zitplaatsen	4
Maximumsnelheid	?
Brandstofceltype/geschat vermogen	Toyota PEMFC / 30 kW
Geschat vermogen	32 kW
Brandstofvoorziening	Direct waterstof
Brandstofopslag	Gecomprimeerde H ₂ , één drukcilinder bij 25 MPa
Backup batterij/makelij	NiMH, grote capaciteit/Panasonic EV Energy
Systeem	Brandstof hybride voertuig
Rijbereik	?

Tabel 11.10 Technische gegevens van Daihatsu's Move FCV K II

De stack, luchtcompressor en één van de twee vermogen controle-eenheden van de FCV K II zijn geïnstalleerd achter de achterbank. De herlaadbare batterij ervan bevindt zich onder de zetel van de bestuurder, is een EV-type en is ook een nikkelhydride type.

Daitshu ontwikkeld al elektrische voertuigen sinds 1965 en heeft al meest elektrische voertuigen verkocht in Japan (ongeveer 8000 tot het jaar 2000). Het heeft ook hybridevoertuigen geproduceerd en ontwikkelde in 1999 een eerste brandstofcel prototype, de Move Ev-Fc. De oude Move was een kleine vierzit, met een methanolreformer en brandstofcelstack, beide ontwikkeld door Daihatsu. De stack zelf was berekend op 16 kW, samen met een Ni-metaal batterij en dreef een 32 kW-synchrone motor aan. De brandstofreformer die gebruikt werd behoorde tot werelds kleinste. Dat is te danken aan een katalysator met ultrahoge prestaties, die door Daihatsu zelf ontwikkeld is.

11.2.2.3 Bussen

Op het vierde Toyota milieu-forum in juni 2001 kondigde Toyota de voltooiing van de FCHV-BUS1 aan, een lage vloers stadsbus aangedreven door een hoge-drukswaterstof brandstofcelhybridesysteem, ontwikkeld samen met Hino Motors,Ltd. De FCHV-BUS1 is gebaseerd op een Hino lagevloers 10,5 meter stadsbusmodel dat 63 passagiers kan vervoeren. Tabel 11.11 geeft details van deze bus.

De bus is aangedreven door een 90 kW-brandstofcel die twee permanente magneetmotoren van 80 kW voedt. Net zoals in de FCHV-4 passagiers auto wordt gasvormig waterstof opgeslagen in tanks die op het dak gemonteert zijn bij een druk van 25 MPa. Het gebruik van een uniek hybridesysteem, die secondaire batterijen bevat om energie geregenereerd tijdens het afremmen op te slaan, geeft de FCHV-BUS1 een meer efficiënte werking en een rijbereik van meer dan 30 km. De topsnelheid is meer dan 80 km/h.

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	FCHV-BUS 1 (juni 2001)
Basis van het voertuig	Hino Motors Ltd, standsbus HU2PMEE
Afmetingen	10.515 mm (l) x 2490 mm (b) x 3360 mm (h)
Aantal zitplaatsen	63
Maximumsnelheid	> 80 km/h
Brandstofceltype/geschat vermogen	Toyota PEMFC/90 kW
Motortype/geschat vermogen/koppel	Gesynchroniseerde permanente magneet/80 kW/260 Nm
Brandstofvoorziening	Direct waterstof
Brandstofopslag	Gecomprimeerde H ₂ drukcilinders bij 25 MPa
Backup batterij/makelij	NiMH, grote capaciteit/Panasonic EV Energy
Systeem	Rem energieherstel
Rijbereik	> 300 km

Tabel 11.11 Technische gegevens van Toyota/Hino Motors FCHV-BUS 1

11.2.3 Ballard Power Systems, DaimlerChrysler, Ford, en Mazda

11.2.3.1 Technologie en partners

Ballard is brandstofcellsystemen voor auto's aan het ontwikkelen voor transporttoepassingen voor zowel zwaar als licht industrieel gebruik inclusief bussen, auto's en trucks.

Ballard werd opgericht in 1983 en focuste zich vanaf de start op de met lucht werkende PEMFC-technologie, in 1993 kon Ballard Power Systems al een vaste polymeer brandstofcelstelsel als motor in een transitbus voorstellen, het gebruikte 24 stacks van elk 5 kW om 120 kW te leveren.

Vroege commerciële partners waren bijna heel de automaatschappij. De voormalige *grote drie* van de automarkt van Amerika, General Motors, Chrysler en Ford, waren allemaal vroege commerciële partners van Ballard. Tot aan 1998 bestelde General Motors Corporation brandstofcellen en testuitrusting van Ballard Power Systems, voor een totaal bedrag van 3,8 miljoen euro, net voor het z'n Global Alternative Propulsion Center bouwde.

De twee overblijvende Amerikaanse autofabrikanten zijn nu onmiddellijk gekoppeld aan Ballard door het Xcellsis samenwerking. Delphi, ook een partner in het vroege DoE-gefinancierde methanol brandstofcelprogramma, handelde als een medeontwikkelaar van Chrysler in z'n door benzine aangedreven brandstofcelprogramma. Voor dit programma, welke de demonstratiefase moest bereiken tegen 1999, plaatste Delphi een €3 miljoen euro bestelling voor Ballard brandstofcellen in februari 1997. Het mag voorzichtig aangenomen dat Chryslers fusie met Daimler-Benz, om DaimlerChrysler te vormen in 1998, geleid heeft tot grote herschikkingen in het brandstofcelprogramma van Chrysler.

Ballards samenwerking met wat toen nog Daimler-Benz heette dateert uit 1993. De twee bedrijven ontwierpen later gezamenlijk de Mark 700 stack, die werd gebruikt om enkele demonstratie brandstofcelvoertuigen aan te drijven.

In 1997 kondigden Ballard, Daimler-Benz en iets later Ford Motor Compagny, een leider inzake elektrische aandrijvingsysteemtechnologie, hun bondgenootschap voor de ontwikkeling van brandstofcelmotoren aan. De Ballard/DaimlerChrysler/Ford verbintenis creëerde drie bedrijven die ze samen bezitten: dbb Fuel Cell Engines (later omgedoopt tot Xcellsis), Ecostar Electric Drive Systems en Ballard Automotive. Mazda is een andere vroege ontwikkelaar van brandstofcel-aangedreven voertuigen en is hoofdzakelijk het bezit van Ford. Mazda sloot zich in 1998 aan bij de groep.

Xcellsis Fuel Cell Engines was in het leven geroepen om zich te concentreren op de ontwikkeling, fabricage en commercialisering van brandstofcelmotoren voor bussen, auto's en trucks. Xcellsis was voor 51% het bezit van DaimlerChrysler terwijl Ballard Power Systems en Ford respectievelijk 27 en 22% ervan bezitten.

Bovendien was Ecostar Electric Drive Systems opgericht voor de ontwikkeling van elektrische aandrijfsystemen voor elektrische voertuigen, en elk had er z'n aandelen van (Ford 62%, DaimlerChrysler 21% en Ballard 17%).

Ballard Automotive, de commerciële vleugel van deze alliantie, is verantwoordelijk voor de verkoop van brandstofcellen en brandstofcelmotoren voor voertuigen van autoconstructeurs van over de hele wereld.

Op het einde van 2001 kondigde de bondgenootschap, in een transactie van €547 miljoen, aan dat Ballard Ecostar en Xcellsis volledig heeft overgenomen. Tegelijkertijd verhoogden DaimlerChrysler en Ford hun aandelen in Ballard. Men kan speculeren naar de redenen van deze hergroepering. Het is waarschijnlijk dat het al moeilijk genoeg is om een bedrijf zoals Xcellsis met belangrijke research- en ontwikkelingstaken verspreid over drie verschillende plaatsen en twee continenten te runnen. Eigendom zijn van drie verschillende bedrijven maakt de dingen er zeker niet gemakkelijker op. Een tweede reden is kostenbesparing door 220 ontslagen (140 in Duitsland en 80 in Vancouver), aangekondigd in 2002.

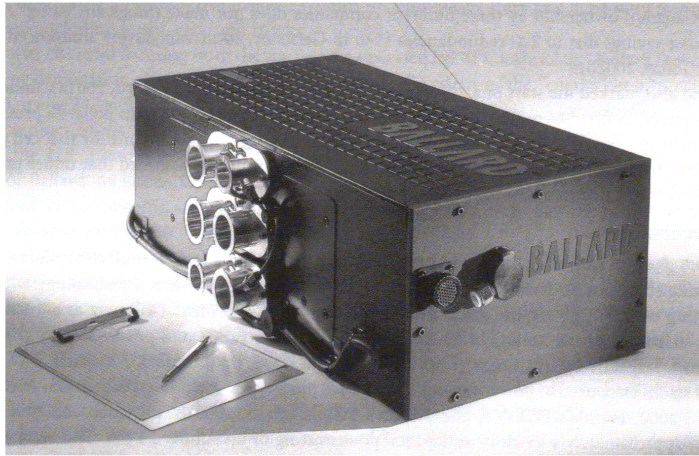
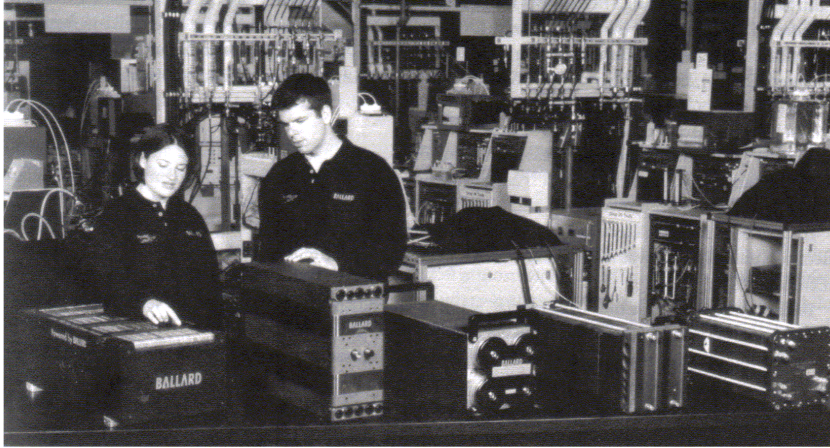
Deze deal betekende ook de start van een 20-jaar brandstofcel verbondovereenkomst, onder welke Ford z'n eerste bestelling voor €44 miljoen aan brandstofcelmotoren plaatste.. In Ballards persbericht, de overeenkomst verwijst naar een “ 20-jaar exclusieve aankoopovereenkomst met Ford voor brandstofcelmotoren”. Beoordelend naar Ballards vorige commerciële record, mag er verondersteld worden dat Ballard onder deze overeenkomst nog steeds vrij is om te verkopen aan klanten.

11.2.3.2 Stack technologie

Figuur 11.4 geeft een idee van de technologische vooruitgang gemaakt door Ballard ingenieurs in groter wordende stack vermogendichtheid. Figuur 11.4(a) toont Ballards vroegere Mark 5 technologie met een totale vermogen van 5 kW, welke de stack een vermogendichtheid van $0,15 \text{ kWdm}^{-3}$ geeft. Dit was gauw overtroffen door de Mark 513 stack met een verdubbeld vermogen en vermogendichtheid (respectievelijk 10 kW en $0,3 \text{ kWdm}^{-3}$), en in 1995 door de Mark 700 stack. Twee tot drie Mark 700 stacks waren gebruikt om verscheidene autoprototypes aan te drijven, inclusief DaimlerChryslers NeCar 4, Fords P2000, Honda's FCX V1 en Nissans FCV. Deze stack bereikte een vermogendichtheid van ongeveer 1 kWdm^{-3} en een totaal vermogen van iets minder dan 25 kW. De Mark 800 stack was ongeveer tegelijk ontwikkeld als de Mark 700, maar de stackmeetkunde was aangepast aan praktische ruimte behoeften. De Mark 800 genereerde 50 kW elektrisch vermogen.

In het begin van 2000 onthulde Ballard Power Systems z'n volgend generatie brandstofcelstack, de Mark 900. De brandstofcelstack in de Mark 900 Series Fuel Cell Power Module gebruikt goedkope materialen en is ontworpen voor de vervaardiging in auto's. De brandstofcelstack alleen geeft een verhoogde vermogendichtheid van $1,31 \text{ kWdm}^{-3}$. Ballard praat nu meer over een module dan over een stack omdat de 75-kW Mark 900 module verscheidene stacks bevat alsook noodzakelijke randapparatuur zoals sensoren. Het gewicht is met 30% gedaald vergeleken met de Mark 700 technologie. De Mark 900 is geschikt voor werking gebruik makend van waterstof of methanol reformaat en zal starten bij temperaturen die zo laag zijn als -25°C . Het bevat ook goedkope materialen, wat verwijst naar het gebruik van flexibele flow field platen. Mark 900 Series technologie is gedemonstreerd geweest door Ballards klanten in hun voertuigen, inclusief DaimlerChryslers NeCar 5, Fords TH!NK FC5 FCV, Honda's FCX-V4 en Nissans Xterra FCV. In oktober 2001 werd de Mark 900 gevolgd door de Mark 902, Ballards vierde generatie van auto stacktechnologie. Ontworpen om te voldoen aan de voorwaarden van transporttoepassingen, het Mark 902 platform laat ook configuraties toe voor stationaire vermogengeneratie en is wisselend van 10 tot 300 kW. Typisch uitgangsvermogen voor transportmarkten is 85 kW voor passagiersvoertuigen en 300 kW voor transit bussen. De Mark 902 bevat flow field platen gemaakt van flexibel grafietmateriaal van Graftech Inc. .

De eerste evaluatie-eenheden van Ballards Mark 902 zijn reeds aan klanten geleverd. Het Mark 902 platform is gebruikt om de bussen in het 10-steden Europese Unie busprogramma aan te drijven, wat begin 2001 aangekondigd is.



Figuur 11.4 (a) Verschillende generaties van Ballard® brandstofcellen voor transport toepassingen. De vermogendichtheid van deze stacks is enorm verbeterd (5 kW – 10 kW – 25 kW – 50 kW – 85 kW). Ballard heeft continu de vermogendichtheid van z'n cellen verhoogt, van 100 Watt/liter in 1989 (uiterst rechts) tot over 2250 Watt/liter in 2001 (uiterst links), Mark 5, 513, 700, 800, 900. (b) Ballards Mark 902 brandstofcel-vermogenmodule bracht een nieuwe standaard brandstofceluitvoering tot stand, door het optimaliseren van minder kosten, design voor volumefabricage, betrouwbaarheid en vermogendichtheid. De Mark 902 vertegenwoordigd Ballards 4^{de} generatie transport brandstofcelplatforms; hoewel, het Mark 902 platform ook configuraties voor stationaire toepassingen toelaat en is wisselend van 10 kW tot 300 kW. Het Mark 902 platform zal de bussen in het 10-steden Europese Brandstofcel Bus Project aandrijven.

11.2.3.3 Componenten

Ondertussen, bracht Ballard bevoorradings en samenwerkingsovereenkomsten in stand in enkele hoofd ontwikkelingsdomeinen. In januari 2001, kondigden Ballard Power Systems en Victrex plc een exclusieve overeenkomst voor de ontwikkeling en fabricage van ionomeren voor brandstofcellen aan. Onder deze overeenkomst, zullen Ballard en Victrex het fabricageprocessen voor Ballards privé-ionomer (BAM 3G) ontwikkelen en samenwerken aan de ontwikkeling van Victrex's privé-ionomer (S-PEEK). Victrex zal proefinstallaties behandelen om deze ionomeren voor het gebruik in Ballards brandstofcellen te maken.

Gewerkt te hebben met UCAR International, Inc., sinds 1992, nam Ballard deel aan een exclusieve samenwerkingsovereenkomst in 1999 voor de medeontwikkeling en exclusieve voorziening van GRAPOIL flexibel grafiet. Flexibel grafiet is een essentieel materiaal in de fabricage van Ballards flow field platen voor brandstofcellen. In juni 2001 werd deze overeenkomst hernieuwd en uitgebreid. De ontwikkelingsovereenkomst, welke uitgebreid is van 2002 in de eerste samenwerking tot 2011, omvat natural-grafiet-based materialen en componenten voor het gebruik in PEMFC brandstofcellen en brandstofcelsystemen voor transport, stationaire en draagbare toepassingen. Het medeontwikkelingsprogramma concentreert zich op de ontwikkeling van grafietachtig materialen en componenten, inclusief flow field platen en gas diffusie lagen. Als deel van deze overeenkomst, Graftech zal ook prototypematerialen ontwikkelen en fabriceren en zorgen voor vroege-fase beproeving van deze prototypes in een on-site brandstofcel beproevingscentrum. Onder een bijkomende leveringsovereenkomst, welke verlengd geweest is tot 2015, zal Graftech de exclusieve ontwikkelaar en leverancier van natural-grafiet-based materialen voor Ballards brandstofcellen, inclusief GRAFCELL geavanceerd flexibel grafiet voor het gebruik in flow field platen voor Ballards Mark 900 brandstofcellen. Onder de overeenkomsten, behoudt Graftech het recht om het fabriceren en te verkopen van natural-grafiet-based materialen en bepaalde componenten voor het gebruik in PEMFC brandstofcellen, aan anderen. Het is Ballards bedoeling dat Graftech de exclusieve fabrikant van flexibele graphite-based componenten is.

In mei 2001 kocht Ballard Textron Systems aan. Deze werkeenheden ontwikkeld en maakt een verscheidenheid aan carbonmaterialen voor auto- en brandstofceltoepassingen, inclusief een gas diffusie laag voor het gebruik in PEMFC brandstofcellen. De aangekochte bedrijfseenheid, gekend als Ballard Material Products, Inc., zal een dochtermaatschappij zijn die volledig het bezit is van Ballard Power Systems gevestigd in Lowell, MA. Ironisch genoeg, de afdeling is een gediplomeerde leverancier aan General Motors op een sole-souce basis door het 2003 modeljaar van wrijvingsmateriaal gebruikt in auto-overbrengingen. Ballard Material Products verkoopt ook gas diffusie lagen en koolstofvezels aan buitenlandse klanten.

In de loop van de jaren heeft Ballard veel vennootschappen gevormd. Als deel van z'n samenwerking met Ballard, leverde Johnson Matthey de platinum-gebaseerde elektrodes voor de 25-kW stacks in de NeCar 2, welke onthuld werd in mei 1996 door Daimler-Benz. In 1998 tekende Ballard een "overeenkomst voor meerdere jaren" met Johnson Matthey, een wereld leider inzake geavanceerde materialentechnologie en leidende leverancier van platinum katalysatoren en gekatalyseerde elektrodes in het hart van de brandstofcel, "voor de medeontwikkeling en levering van katalysatoren en producten die katalysatoren bevatten voor Ballards brandstofcellen". Uit de overeenkomst volgde een succesvolle samenwerking die begonnen is in 1992 voor de ontwikkeling van platinum katalysatoren en gekatalyseerde elektrodes welke hielpen om het gebruik van platinum te verminderen in brandstofcel MEA's, welke positieve invloed had op de kostprijs. In de volgende jaren, kondigde Johnson Matthey

de ondertekening van een contract met dbb Fuel Cell Engines aan, om dbb's exclusieve ontwikkelingspartner te worden, voor katalysatoren die het waterstofgas, gebruikt door brandstofcellen om elektrisch vermogen te genereren, zuiveren.

In mei 2001, tekenden Ballard en MicroCoating, Inc.(MCT), een exclusieve overeenkomst om MCT's Combustion Chemical Vapor Desposition (CCDV) proces, een openlucht op vlammen gebaseerde techniek voor hoge-kwaliteits dunne films van geavanceerde materialen zonder het gebruik van een vacuüm. Onder de medeontwikkelingsovereenkomst, Ballard heeft de exclusieve rechten gekocht, voor een bepaalde periode, voor het patenteren van MCT's CCVD technologie voor het gebruik in katalysator-toepassingen voor Ballard brandstofcellen. Ballard gelooft dat de CCVD technologie de mogelijkheid heeft om de katalysatorbelasting te verkleinen en toedraagt tot een vermindering van kosten en het verbeteren van prestaties.

11.2.3.4 Manufacturing

Ballards eerste productiefabriek (9900 m²) voor massaproductie van draagbare en autobrandstofcellen werd in december 2000 geopend in Burnaby, Columbia.

11.2.3.5 Passagierwagens (Xcellis groep)

11.2.3.5.1 DaimlerChrysler

In de jaren 80 werden brandstofcellen opnieuw als een vermogenbron voor transportvoertuigen, maar met de brandstofselectie gedwongen naar methanol of benzine, het fosforzuur-brandstofcelsysteem (PAFC-systeem) was het meest geavanceerde en waarschijnlijk het meest geschikte om te gebruiken, uitgezonderd voor z'n werkingstemperatuur. De vaste-oxide-brandstofcel (SOFC) werd gezien als diegene met de beste kenmerken, maar het was nog steeds in z'n ontwikkelingsfase. Het was enkel na de bevorderingen door Ballard Power Systems dat de SOFC als een haalbare vermogenbron voor wegvoertuigen werd gezien.

Sinds DaimlerChrysler begon met samenwerken met Ballard in 1993, heeft DaimlerChrysler vijf generaties prototypes van passagiervoertuigen (NeCar 1 tot 5) en een prototype van een transit bus (NEBUS) geproduceerd, allen aangedreven door brandstofcellen van Ballard.

De eerste auto op ware grote die Ballards brandstofcellen gebruikte was de NeCar 1 (New Electric Car). Daimler-Benz demonstreerde de NeCar 1 in 1994, gebruik makend van SOFC's ontwikkeld door Ballard Power Systems. Het voertuig was een Mercedes-Benz transportwagen (figuur 11.5), met de ladingsruimte bijna volledig gevuld met 12 stacks van het Mk5 design (50 kW brutovermogen of elk net onder 5 kW) en met het gecompriëerde waterstof gas in cilinders. NeCar 1 had daardoor enkel ruimte voor de bestuurder en één passagier. Voor verdere technische gegevens zie tabel 11.12.



Figuur 11.5 DaimlerChryslers eerste drie brandstofcel-demonstratievoertuigen, de waterstof-aangedreven NeCar1 en 2, en NeCar 3 met een methanolreformer aan boord.

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	NeCar 1 (1994)
Basis van het voertuig	Mercedes-Benz 180 transportvoertuig
Totaal gewicht	3500 kg
Aantal zitplaatsen	2
Maximumsnelheid	90 km/h
Brandstofceltype / totaal vermogen	12 Ballard Mark 5 brandstofcelstacks / 50 kW
Motortype / geschat vermogen / koppel	-
Brandstofvoorziening	Direct waterstof
Brandstofopslag	Gecomprimeerde H ₂ , 150 liter, 30 MPa, met aluminium bekleed, met glasvezel versterkt
Backup batterij / makelij	Geen
Systeem	-
Rijbereik	130 km

Tabel 11.12 Technische gegevens van de NeCar 1

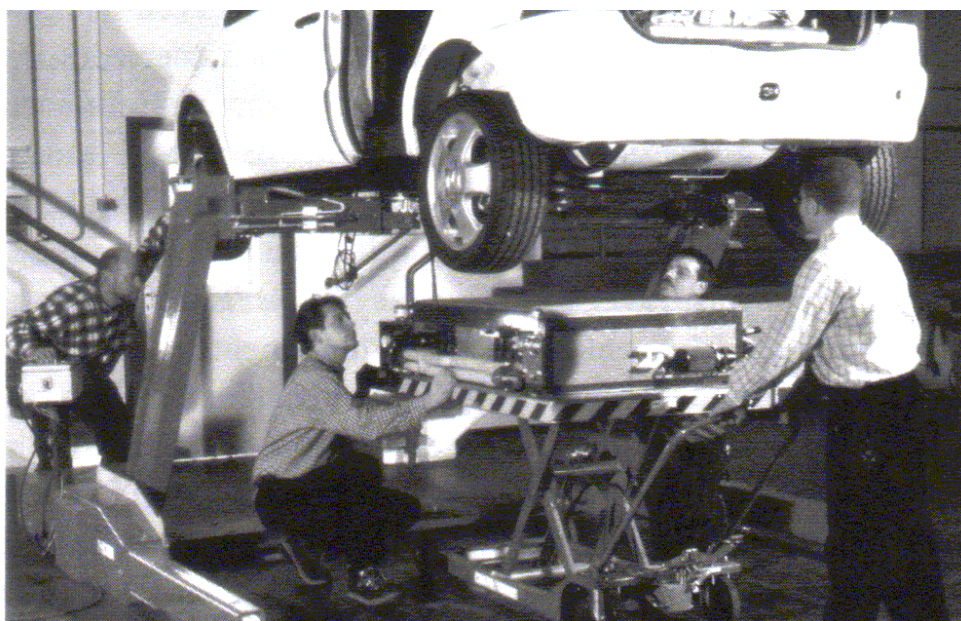
In de tweede fase, die voltooid was in 1996, twee Ballard brandstofcelstacks, met een vermogendichtheid van 1000W/l, bezorgde een totaal vermogen van 50 kW aan een door waterstof gevoede Mercedes-Benz Mercedes V (zie tabel 11.13). In deze NeCar 2, de vijfvoudige verkleining van de grootte van de brandstofcellen maakte het systeem mogelijk om onder de achterbank te passen wat geen vermindering van de passagiers- of bagageruimte mee bracht. Het voertuig was nog steeds in dienst in de lente van 2000 en was gebruikt geweest als deel van DaimlerChryslers bezoekers programma in Nabern (zie figuur 11.5).

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	NeCar 2 (1996)
Basis van het voertuig	Mercedes-Benz V-klasse MPV
Afmetingen	-
Aantal zitplaatsen	5
Maximumsnelheid	110 km/h
Brandstofceltype / totaal vermogen	2 Ballard Mark 700 brandstofcelstacks / 50 kW
Motortype / geschat vermogen / koppel	-
Brandstofvoorziening	Direct waterstof
Brandstofopslag	Gecomprimeerde H ₂
Backup batterij / makelij	Geen
Systeem	-
Rijbereik	250 km

Tabel 11.13 Technische gegevens van de NeCar 2

Dit voertuig werd nagevolgd door werelds eerste door methanol aangedreven brandstofcelvoertuig in september 1997, de NeCar 3, gebaseerd op het Mercedes A klasse design. Dit voertuig droeg alle componenten, methanol stoomreformer, schoonmaak en brandstofcel, maar enige ruimte ging verloren aan het reformersysteem dat op de plaats van de achterbank zat. De brandstofprocessor produceerde 50 kW waterstof aan een algemene vermogendichtheid van 1,1 kWdm⁻³. Met een tank van 40 liter methanol kan de NeCar 3 400km ver rijden. Voor meer gegevens zie tabel 11.14.

In 1999 werd een nieuwe door waterstof aangedreven passagierswagen gebaseerd op de A-klasse voorgesteld, de NeCar 4 (figuur 11.6). Aanvankelijk werd 5kg vloeibare waterstof gebruikt om de 70-kW brandstofcel aan te drijven, om 450 km ver te rijden met de wagen, zie tabel 11.15.



Figuur 11.6 Simpele hantering: De compacte brandstofcellen zijn geïnstalleerd in het NeCar conceptvoertuig. De skateboard vloer van de A-klasse bezorgd een ideaal platform voor alternatieve aandrijvingsystemen.

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	NeCar 3 (1997)
Basis van het voertuig	Mercedes-Benz A-klasse
Gewicht	1750 kg
Aantal zitplaatsen	2
Maximalsnelheid	120 km/h
Brandstofceltype / totaal vermogen	2 Ballard Mark 700 brandstofcelstacks / 50 kW
Geschat vermogen	45 kW
Brandstofvoorziening	Methanol stoomreformer en PROX (preferente oxidatie)
Brandstofopslag	Methanol, 40 liter
Backup batterij / makelij	Geen
Systeem	-
Rijbereik	400 km

Tabel 11.14 Technische gegevens van de NeCar 3

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	NeCar 4 (1999)
Basis van het voertuig	Mercedes-Benz A-klasse
Afmetingen / Gewicht	3,57 m (l) x 1,72 m (b) x 1,58 m (h) /1750 kg
Aantal zitplaatsen	5
Maximalsnelheid	145 km/h
Brandstofceltype / geschat vermogen	Ballard Mark 700 / 70 kW
Motortype	55-kW trans-as asynchrone motor
Brandstofvoorziening	Direct waterstof
Brandstofopslag	5 kg vloeibare waterstof, tank gemaakt door Linde
Backup batterij / makelij	Geen
Systeem	-
Rijbereik	450 km

Tabel 11.15 Technische gegevens van de NeCar 4

Recenter (2000), een zogenaamde geavanceerde versie van de NeCar 4, welke nu aandacht geeft aan de waterstofopslag, werd gedemonstreerd. Courante tankcapaciteiten bedragen 2,5 kg waterstof opgeslagen bij een druk van 35 MPa en geven dus de wagen een bereik van 200 km, zie tabel 11.16.

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	NeCar 4- gevorderd (2000)
Basis van het voertuig	Mercedes-Benz A-klasse
Afmetingen / Gewicht	-
Aantal zitplaatsen	5
Maximalsnelheid	145 km/h
Brandstofceltype / geschat vermogen	Ballard Mark 900 / 75 kW
Motortype	-
Brandstofvoorziening	Direct waterstof
Brandstofopslag	2,5 kg vloeibare waterstof gecompriemd bij 35 MPa
Backup batterij / makelij	Geen
Systeem	-
Rijbereik	200 km

Tabel 11.16 Technische gegevens van de NeCar 4 -gevorderd

Teruggaand naar de reformertechnologie die voor het eerst gepresenteerd werd in de NeCar3, DaimlerChrysler exposeerde de NeCar 5 in Berlijn op 3 november 2000. De NeCar 5 benut methanol als brandstof met een geavanceerde brandstofprocessor en systeem ontwikkeld door Xcellsis om waterstof te leveren aan een Ballard Mark 900 brandstofcel. De brandstofcel drijft een Mercedes A klasse auto, met vijf passagiers en hun bagage, aan met een snelheid van meer dan 150 km/h (zie tabel 11.17).

De commerciële productie van brandstofcellen zal gericht zijn op een variëteit van voertuigplatforms in maten tot en groter dan 100 kW. De beginbrandstof zal normaal methanol zijn, maar met verbeteringen in brandstofvoertechnologie en waterstofopslagstechnologie, zullen zowel petroleum brandstoffen en waterstof gebruik worden.

De nieuwste voertuigontwikkeling is de Mercedes-Benz Sprinter transportwagen (2001), zie figuur 11.7. Het is aangedreven door een 75-kW Ballard brandstofcel en een 55 kW elektrische motor. Met 3 druktanks die elk 100liter waterstof bevatten bij een druk van 25 MPa, het voertuig bereikt een topsnelheid van 120 km/h en heeft een rijbereik van 150km. DaimlerChrysler leverde de eerste Mercedes-Benz Sprinter met brandstofcellen aan een Duits pakjesleveringsbedrijf Hermes Versand Service in 2001.

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	NeCar 5 (november 2000)
Basis van het voertuig	Mercedes-Benz A-klasse
Afmetingen / Gewicht	-
Aantal zitplaatsen	5
Maximumsnelheid	150 km/h
Brandstofceltype / geschat vermogen	Ballard Mark 900 / 75 kW
Motortype	-
Brandstofvoorziening	Methanol reformer
Brandstofopslag	Methanoltank
Backup batterij / makelij	Geen
Systeem	-
Rijbereik	-

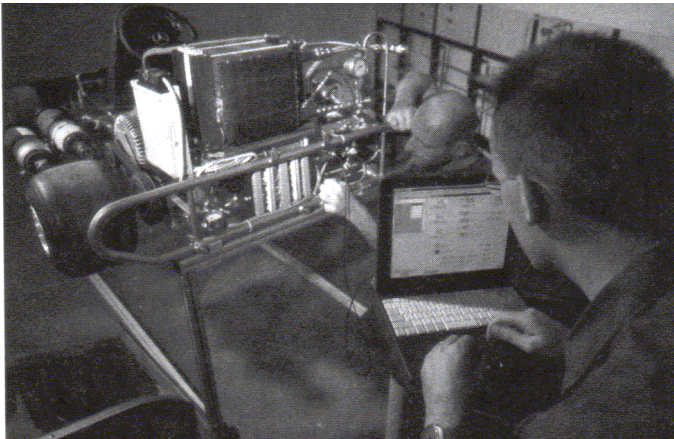
Tabel 11.17 Technische gegevens voor DaimlerChryslers NeCar 5



Figuur 11.7 Mercedes-Benz Sprinter: eerste transportwagen met brandstofcelstelsystemen.

Xcellsis is samen met Millenium Cell aan het werken aan een natriumborohydride brandstofsysteem om het rijbereik van waterstof-aangedreven brandstofcelvoertuigen te vergroten. Het Natrium conceptvoertuig wordt verondersteld een rijbereik van 483 km te bereiken met een volle tank van het waterstof-vrijlatende chemisch product.

Een oude brandstofcelontwikkelaars droom werd werkelijkheid tegen het eind van 2000. Op een Stuttgart Innovation Symposium vertoonde DaimlerCrysler een gocart aangedreven door een direct methanol brandstofcel (DMFC). Het 3 kW systeem is het resultaat van een voortdurende samenwerking tussen de onderzoeksgroepen van DaimlerChrysler en Ballard (figuur 11.8). Een DMFC is een brandstofcel met protonuitwisselingsmembraan (PEMFC) dat het gebruik van methanol als brandstof toelaat zonder de nood aan een brandstofprocessor om waterstof uit het methanol te halen. Het voertuig bereikte een Maximumsnelheid van 35 km/h. Hoewel de interesse voor draagbare toepassingen, auto-DMFC-systemen hebben geen commerciële basis binnen afzienbare tijd, volgens ons, wanneer men kijkt naar vermogendichtheden, edel metaal, membraan, en bipolaire plaat vraag.



Figuur 11.8 In 2000, vertoonde DaimlerChrysler een gocart aangedreven door een direct methanol brandstofcel (DMFC). Het 3 kW systeem is het resultaat van een lopende samenwerking tussen de onderzoeksgroepen van DaimlerChrysler en Ballard.

11.2.3.5.2 Ford

Ford onthulde in januari 1999 de P2000, een waterstof-gevoede, 75-kW, nul emissie voertuig aangedreven door drie Ballard Mark 700 brandstofcellen. De P2000 had een rijbereik van 160km (zie tabel 11.18). Ford vertoonde ook een concept sportvoertuig op het autosalon in Detroit.

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	P2000 FC EV (januari 1999)0
Basis van het voertuig	Ford P2000
Afmetingen / Gewicht	4,747 m (l) x 1,755 m (b) / 1514 kg
Aantal zitplaatsen	5
Maximumsnelheid	>128 km/h
Brandstofceltype / aantal cellen	3 x Ballard Mark 700 / 381 cellen
Motortype / koppel	67 kW AC inductiemotor van Ecostar/ maximum 190Nm
Brandstofvoorziening	Direct waterstof
Brandstofopslag	1,4 kg gecomprimeerd waterstof bij 24,8 MPa in twee 41-l tanks gemaakt door Dynatek
Backup batterij	Geen
Rijbereik	160 km

Tabel 11.18 Technische gegevens van Fords P2000 brandstofcelvoertuig

Het is te wijten aan de presentatie van een TH!NK FC5 Focus model op het autosalon van Detroit in 2000 en het hergebruik van gelijke namen voor verschillende voertuigen, dat de beschikbare informatie van Fords brandstofcelprototypes enigszins verwarrend is.

Later presenteerde Ford een berijdbare methanol-aangedreven versie van een op een Focus gebaseerde brandstofcelauto. Deze heeft de naam Ford Focus FC5 gekregen, voor meer gegevens zie tabel 11.19. Heeft gelijke technische gegevens als die van de Mazda Premancy FC EV (tabel 11.22), welke een verder ontworpen versie van het met methanol werkend voertuig.

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	Ford Focus FC5
Basis van het voertuig	Ford Focus
Afmetingen / Gewicht	4,338 m (l) x 1,758 m (b) / 1769 kg
Aantal zitplaatsen	?
Maximumsnelheid	>128 km/h
Brandstofceltype / aantal cellen	Ballard Mark 900 series
Motortype / koppel	65 kW AC inductiemotor van Ecostar/maximum 189,9Nm
Brandstofvoorziening	Methanolreformer
Brandstofopslag	-
Backup batterij	?
Rijbereik	?

Tabel 11.19 Technische gegevens van Fords Focus Fc5 Methanol-aangedreven brandstofcelvoertuig

In 2001 werd een andere waterstof-aangedreven versie van Fords brandstofcelvoertuig voorgesteld, de Ford Focus FCV. Technische data zijn gegeven in tabel 11.20. Dit voertuig heeft opnieuw de basis van de Focus (figuur 11.9). Het gebruikt de Ballard 901 stack in de plaats van de drie Ballard Mark 700 stacks die gebruikt werden in de P2000. Een nieuw brandstofcel/Ni-MH batterij hybride voertuig, Ford Focus FCEV Hybrid, zal aan het werk zijn in de 2002 Challenge Bibendum. Het is aangedreven door een Mark 902 module en rijdt 320km op een 4 kg/35 MPa tank waterstof.



Figuur 11.9 Fords Focus FCV voertuig wordt hervuld met waterstof

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	Ford Focus FCV (2001)
Basis van het voertuig	Ford Focus
Afmetingen / Gewicht	4,338 m (l) x 1,758 m (b) / 1727 kg
Aantal zitplaatsen	5
Maximumsnelheid	>128 km/h
Brandstofceltype / geschat vermogen	Ballard Mark 901/ 75 kW
Motortype / koppel	65 kW AC inductiemotor van Ecostar/ maximum 190Nm
Brandstofvoorziening	Direct waterstof
Brandstofopslag	1,4 kg waterstof bij 24,8 MPa
Backup batterij	?
Rijbereik	160 km

Tabel 11.20 Technische gegevens van Fords Focus FCV Waterstof-aangedreven brandstofcelvoertuig

11.2.3.5.3 Mazda Motor Corporation

Mazda is de vijfde grootste autofabrikant van Japan; het maakt auto's, minitransportwagens, pick-uptrucks, en commerciële voertuigen. Ford Motor Company heeft een hoofdaandeel in het bedrijf.

Mazda begon naar brandstofcellen te kijken in 1991 en heeft tot op heden enkele prototypes van brandstofcelvoertuigen gemaakt. In 1997 onthulde Mazda het Demio FC-EV prototype, een tweedeurs model dat Mazda's eigen brandstofcelsysteem gebruikt, zie tabel 11.21 en figuur 11.10. De stacks ontworpen door Mazda werkten bij lage temperaturen en zonder bevochtiging, te wijten aan het gebruik van dunne membranen. De vier stacks van de Demio FC-EV leveren slechts 20 kW en nemen een groot deel van de bagageruimte van de wagen in. Waterstof was opgeslagen als metaalhydride, en kortstondig vermogen was opgeslagen in een ultracondensator.



Figuur 11.10 Mazda's Demio FCEV voorgesteld in 1997. Het voertuig werd aangedreven door vier stacks (totaal vermogen van 20 kW) ontwikkeld door Mazda en bijgestaan door ultracondensatoren. Waterstof brandstof werd opgeslagen in een metaalhydride tanks.

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	Mazda Demio FCEV (1997)
Basis van het voertuig	Mazda Demio
Afmetingen / Gewicht	-
Aantal zitplaatsen	4
Maximumsnelheid	90 km/h
Brandstofceltype / totaal vermogen	4 Mazda stacks / 205W
Motortype / geschat vermogen	AC synchrone motor / 40 kW
Brandstofvoorziening	Direct waterstof
Brandstofopslag	Metaalhydride
Backup batterij	Ultracondensator
Systeem	Hybride
Rijbereik	170 km

Tabel 11.21 Technische gegevens van Mazda's Demio FCEV

Sinds Mazda deel uitmaakt van de Xcellsis vennootschap in 1998 hebben Mazda's brandstofvoertuigen vermogensystemen gebouwd door de vennootschap verenigd.

Mazda's nieuwste brandstofcelprototype, de Premacy FC-EV was onthuld in februari 2001, en werkt met omgevormde methanol, zie figuur 11.11. Het is momenteel getest geweest op publieke wegen in Japan samen met DaimlerChrysler Japan en Nippon Mitsubishi Oil (de bezorger van de brandstof infrastructuur). Voor technische gegevens van de Premacy FC-EV, zie tabel 11.22

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	Mazda Premancy FC-EV (1997)
Basis van het voertuig	Mazda Premancy
Gewicht	1850 kg, 2125 kg (bruto)
Aantal zitplaatsen	5
Maximumsnelheid	125 km/h
Brandstofceltype / geschat vermogen	Ballard Mark 901 / 65 kW
Motortype / geschat vermogen / koppel	AC inductiemotor / 65 kW / 190 Nm
Brandstofvoorziening	Methanolreformer
Brandstofopslag	Methanol tank
Backup batterij	Ja
Systeem	-
Rijbereik	-

Tabel 11.22 Technische gegevens van Mazda's Premancy FC-EV



Figuur 11.11 Mazda's methanol-aangedreven Premancy FC-EV aangedreven door een Ballard Mark 900 series stack.

11.2.3.6 Bussen

In de eerste fase, die in 1993 voltooid was, ontwikkelde en demonstreerde Ballard een waterstof-aangedreven 32-duim lichte transit bus, zie tabel 11.23. De waterstof brandstof was opgeslagen als gecompriemd gas in aardgas cilinders beproeft voor transportgebruik, en de cilinders bevonden zich onder het busframe. Dit was werelds eerste nul emissie voertuig die volledig aangedreven was door PEM brandstofcellen. De bus ging op de weg in juni 1993 met een 90-kW brandstofcelmotor werkend met gecompriemde waterstof. Om lucht voor de brandstofcellen te comprimeren, een compressor aangedreven door een motor werd in combinatie met een **turbocharger** aangedreven door uitlaatgassen gebruikt.

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	1993 Fuel Cell Bus (P1)
Basis van het voertuig	-
Afmetingen	32 voet
Aantal zitplaatsen	20
Maximumsnelheid	-
Brandstofceltype / geschat vermogen	Ballard PEMFC / 90 kW
Motortype / geschat vermogen / koppel	-
Brandstofvoorziening	Direct waterstof
Brandstofopslag	Gecomprimeerd H ₂
Backup batterij	-
Systeem	-
Rijbereik	160 km

Tabel 11.23 Technische gegevens van Ballards 1993 32-voet Bus

Twee jaar later, in juni 1995, introduceerde Ballard z'n Phase Two bus, een 40-voet prototype ZEV aangedreven door een 250-kW Ballard brandstofcelmotor. Hij kon 400 km rijden voordat het een tankbeurt vereiste, zie tabel 11.24. Deze bus ondervindt de werkingssuccessen van een diesel transit bus dat 60 mensen draagt. Alle motorcomponenten passen in de plaats die normaal door de dieselmotor is ingenomen.

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	1995 Fuel Cell Bus (P2)
Basis van het voertuig	-
Afmetingen	40 voet
Aantal zitplaatsen	60
Maximumsnelheid	-
Brandstofceltype / geschat vermogen	20 x 13-kW Ballard Mark 513 / 205 kW werkingstemperatuur 90°C Brandstof/ luchtdruk 207 kPa Spanning 450-750 VDC
Motortype / geschat vermogen / koppel	-
Brandstofvoorziening	Direct waterstof
Brandstofopslag	Gecomprimeerd waterstofgas
Backup batterij	Geen
Rijbereik	160 km

Tabel 11.24 Technische gegevens van Ballards 1995 40-voet P2 brandstofcelbus

Hoofd-systeemvermogen wordt geleverd bij 650 VDC en 400 A. Ondulatoren bezorgen de verschillende vereiste spanningen voor het voertuig. Componenten met hoge vermogens worden gekoeld met vloeistoffen, om hun grote en gewicht in te perken.

De mechanische, proces en elektrische vermogensystemen worden gecoördineerd en gecontroleerd door een geïntegreerd systeem met modules voor brandstof, lucht, koeling, aandrijving, meters, en werkingsmodes (start, opwarm, werken en stop). Het controlesysteem neemt informatie van inwendige instrumentatie en bezorgt die aan verschillende toestellen, zoals motor regelapparatuur, kleppen en meters. De aan boord computer gebruikt een industrie standaard programmeerbare logic controller.

De werkingstemperatuur van de motor is vastgelegd op 90°C met een thermisch gecontroleerde radiator en elektrisch aangedreven ventilatoren. Water van het koelsysteem wordt gebruikt om de lucht en brandstofgasstromen te bevochtigen voordat ze de brandstofcelstack binnendringen. Een extra koelsysteem met een constante temperatuur van 60°C wordt gebruikt om de hoge-vermogen elektrische componenten en de condensator te koelen. Bij koude temperaturen, wordt de elektrische remweerstand gebruikt als een dompelaar en wordt in een externe voeding aangesloten om te voorkomen dat de motor bevriest. Een ion-wisselaarfilter wordt gebruikt om het koelwater zuiver te houden, om te voorkomen dat het koelwater een elektrische geleider wordt.

De brandstofcelmotor is ontworpen om een maximum vermogen te bekomen bij 30 psig. Lucht van de buitenkant komt binnen doorheen een filter door een elektrisch aangedreven compressor. De lucht verwijderd ook het door de chemische reactie geproduceerd water.

Gecomprimeerd waterstofgas wordt opgeslagen in onder druk gezette cilinders op het dak van de bus. Brandstoflevering is bij 30 psig door een tweefase regelaar. Om volledig brandstofgebruik te verzekeren, wordt een ejector gebruikt om ongebruikt waterstof opnieuw in omloop te brengen door de brandstofcelrij, zonder gebruikt te maken van enig uitwendig vermogen.

Brandstofcel demonstratieactiviteiten volgden elkaar vlugger op, en in mei 1997, onthulde DaimlerCrysler de NEBUS (Nieuwe Elektrische Bus, zie figuur 11.12). De NEBUS maakte gebruik van geavanceerde Ballard brandstofcellen als vermogenbron (zie tabel 11.25). De brandstofcellen werden geschat op een totaal vermogen van 250 kW. Met een cefficiëntie van 55 %, de gemiddelde energieopbrengst van het brandstofcelsysteem is globaal 15% beter dan dat van een dieselmotor. Eens het geïnstalleerd is in het voertuig, leveren de brandstofcellen 190 kW aan het voertuigsysteem, welke vermogen sturing pumps, luchtcompressors, een deur controlesysteem bevat. Er is genoeg vermogen beschikbaar om tot 80 km/h te rijden met een volledig geladen bus. De bus ontving de toelating om te rijden op de wegen van TÜV, de Duitse technische goedkeurings autoriteit.



Figuur 11.12 DaimlerChryslers NEBUS

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	NEBUS (mei 1997)
Basis van het voertuig	Mercedes-Benz lage-vloer diesel stadsbus type O 405 N2
Afmetingen / Gewicht	11,8 m (l) x 2,5 m (b) x 3,5m (h) / 18.000 kg
Aantal zitplaatsen	62 (39 zittend en 23 staand)
Maximumsnelheid	80 km/h
Brandstofceltype / geschat vermogen	Ballard PEMFC / 250 kW
Motortype / geschat vermogen	
Brandstofvoorziening	Direct waterstof
Brandstofopslag	7 x Gecomprimeerd H ₂ tanks(elk 150l), gemonteerd op het dak, totaal volume 1050l, 21 kg H ₂ , 300 bar
Backup batterij / makelij	NiMH, grote capaciteit / Panasonic EV Energy
Systeem	Rem energieherstel
Rijbereik	250 km

Tabel 11.25 Technische gegevens van DaimlerChryslers NEBUS brandstofcelbus

In de derde fase namen de Chicago Transit Authority (CTA) en Translink elk drie waterstofgevoede prototype bussen van Xcellsis in ontvangst (zie tabel 11.26). Na de nodige training van chauffeurs en de onderhoudsstaf, gingen de bussen in maart (Chicago) en oktober (Vancouver) 1998 in dienst. Gedurende een twee jaar durende test periode, deze testsesies bepaalden de prestaties, de kosten en de betrouwbaarheidsdatum. Deze testen werden succesvol beëindigd maart (Chicago- zie figuur 11.13) en juli (Vancouver) 2000. Ze brachten enkele problemen met gespecialiseerde componenten en het systeemontwerp aan het licht, maar de algemene publieke aanvaarding van de bussen was goed. Een totale reisafstand van 48.000 km en 67.000km werd afgelegd in respectievelijk Chicago en Vancouver, en de bussen hebben meer dan 200.000 passagiers gedragen.



Figuur 11.13 Xcellsis P3 bus werkend gedurende uitgebreide veldtesten in Chicago.

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	Fuel Cell Bus P3(1998)
Basis van het voertuig	-
Afmetingen	-
Aantal zitplaatsen	60
Maximumsnelheid	-
Brandstofceltype / geschat vermogen	Ballard Mark 513PEMFC / 205 kW
Motortype / geschat vermogen / koppel	-
Brandstofvoorziening	Direct waterstof
Brandstofopslag	Gecomprimeerd H ₂
Backup batterij	Geen
Systeem	-
Rijbereik	-

Tabel 11.26 Technische gegevens van Ballards P3 brandstofcelbus

In 1999, wanneer Xcellsis z'n volgende-generatie bus uitrolde op de Internationale Publieke Transport Expo in Orlando, waren sommige problemen al aangepakt.

De bijna 2000 kg lichter wegende dan z'n voorganger, de Phase 4 (P4) motor was ontworpen gebruik makend van de kennis dat men heeft opgedaan uit de testuitslagen van de Phase 3 (P3) motoren. De 205 kW P4 motor is minder complex dan de P3, te danken aan de vermindering van het aantal componenten.

De nieuwe P4 motor moest gebruikt worden onder het California Fuel Cell Partnership programma "Driving for the Future", werkende met Californische transitagentschappen om ongeveer 25 bussen te testen. Deze testen startten in 2001 en 2002 en waren bijkomend gepland voor in Brits Colombia met SunLine Transit.

Commerciële busproductie is gepland voor 2002 voor bussen met 205-kW brandstofcelmotoren, die 75 mensen dragen over een afstand van 560km. Voortdurende ontwikkeling zal verschillende brandstoffen bevatten.

Ondertussen zijn Ballard en z'n partners aan het werken aan de vijfde bus generatie (P5), om gebruikt te worden in het tien Europese steden programma medegefinancierd door de Europese Unie en startend in 2002. Onder dit programma, zal Ballard brandstofcellen leveren voor in totaal 30 bussen. De P5 zal gebaseerd zijn op Mark 900 of, volgens recentere berichten, Mark 902 hardware. De eerste Citaro brandstofcelbus (figuur 11.14) werd voorgesteld aan EvoBus en aan z'n klanten, de Europese Transit Autoriteiten, op 14 november 2001 in het Ballard Plant 1 faciliteit. Werkelijke busleveringen zijn niet gepland tot 2003. De Citaro door brandstofcel aangedreven bussen zullen in dienst gaan in de volgende steden: Amsterdam, Barcelona, Madrid, Hamburg, Londen, Luxemburg, Porto, Stockholm, Stuttgart en Reykjavik. EvoBus GmbH, een zustermaatschappij van DaimlerChrysler, zal de Mercedes-Benz Citaro lage-vloers stadsbussen voorzien van brandstofcellen voor de prijs van elk €1,3 miljoen.



Figuur 11.14 De eerste Citaro bus met een brandstofcel vermogensysteem dat deelneemt aan rijexamens.

11.2.4 Nissan

Nissan, na Toyota en Honda de derde grootste autofabrikant van Japan, is een andere vroege partner van Ballard. Ten midden van Nissan's financiële moeilijkheden kocht Renault in maart 1999 36,8% van de aandelen van Nissan.

Na het eerste brandstofcelsysteem geleverd te hebben aan Nissan Motor Company in 1991, kreeg Ballard meer bestellingen van Nissan in maart 1997, in januari 1999, en in maart 2001. Een levering voor Nissan van de Mark 900 brandstofcelmodules met een waarde van 1,8 miljoen euro werd gemaakt in januari 2001.

Nissan's eerste brandstofcelvoertuig was een brandstofcelbatterijhybride met als basis de R'nessa SUV (1999). Het voertuig was uitgerust met een methanolreformer om waterstof aan boord te genereren. De methanol was afkomstig van een tank van 40 liter. De reformer zelf, dat in een box van 400 x 450 x 550 mm zat, had een volume van 80 liter. Terwijl heel het brandstofcel vermogensysteem, inclusief de 10-kW Ballard PEM-brandstofcelstack, de volgende afmetingen had: 1 x 1 x 0,6 m. Tabel 11.27 geeft bijkomende details.

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	Nissan R'nessa FCV (1999)
Basis van het voertuig	Nissan R'nessa
Afmetingen	-
Aantal zitplaatsen	2
Maximumsnelheid	70 km/h
Brandstofceltype/gewicht	Ballard 10 kW/41 kg
Motortype/geschat vermogen/koppel	Neodymium magneet synchrone tractiemotor (Hitachi)
Brandstofvoorziening	Methanolreformer in een 400 x 450 x 550 mm box Reformer heeft 10-20 minuten nodig om op te warmen
Brandstofopslag	40 liter methanol
Backup batterij/gewicht	Li-ion/100 kg
Systeem	-
Rijbereik	?

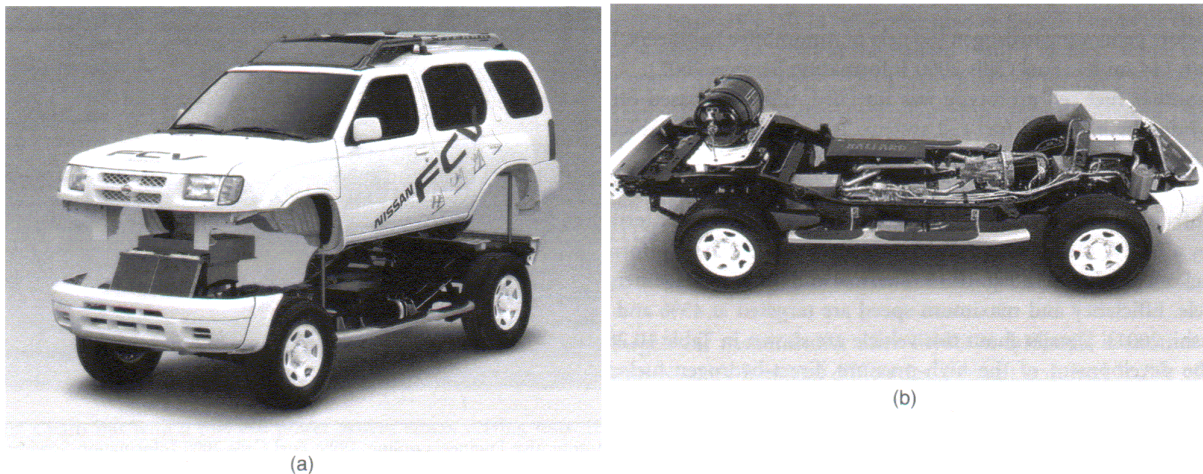
Tabel 11.27 Technische gegevens van Nissans 1999 brandstofcelvoertuig gebaseert op de R'nessa

Het voertuig werd voortbewogen door een neodymium magneet synchrone tractiemotor gecombineerd met lithium-ionbatterijen. Deze genoemde technologieën werden voordien reeds gebruikt in de R'nessa EV en in de Tino Hybrid. Het batterijpak woog ietsje meer dan 100 kg en hielp de methanolreformer in het opstartproces, welke 10 à 20 minuten nodig heeft om op te warmen voordat hij waterstof kan genereren. De wagen bereikte een topsnelheid van 70 km/h.

In oktober 2000 werd een andere brandstofcelprototype onthuld, deze keer op een Nissan Xterra SUV. Vermogen kwam weer van een Ballard brandstofcelsysteem. De testritten met deze wagen begonnen in mei 2001.

Nissan is actief betrokken in de California Fuel Cell Partnership (CaFCP) en initieerde het testen van de hogedruk direct-waterstof- **fueled** versie van z'n Xterra FCV langs publieke wegen. Die Xterra FCV werd aangedreven door een 75 kW-brandstofcel van Ballard. Het voertuig en z'n brandstofcellen kun je zien op figuur 11.15. Warmte- en watermanagementsystemen waren cruciaal bij het realiseren van dit voertuig. De efficiëntie en maximumsnelheid zijn gericht op respectievelijk 45% en 120 km/h. Details over dit voertuig vind je terug in tabel 11.28. Gelijklopend met de ontwikkeling van het hogedruk directwaterstofsysteem, kondigde Nissan ook aan dat het in samenwerking van 715 miljoen euro met Renault een benzinereformer FCV aan het ontwikkelen is.

De overeenkomst voor de ontwikkeling van brandstofcellen en brandstofcelcomponenten voor voertuigen tussen UTC Fuel Cells en Nissan werd aangekondigd in februari 2002. Deze overeenkomst veroorzaakte een verandering in Nissan's brandstofcelstrategie, voordien gebaseerd op Ballard hardware. Renault, een partner en aandeelhouder van Nissan, wil ook deelnemen aan deze projecten.



Figuur 11.15 (a) Nissans Xterra FCV. (b) Het voertuig is aangedreven door een Ballard Mark 900 brandstofcelmodule.

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	Nissan Xterra (2001)
Basis van het voertuig	Nissan Xterra
Afmetingen	-
Aantal zitplaatsen	5
Maximumsnelheid	120 km/h
Brandstofceltype/geschat vermogen	Ballard Mark 900/75 kW
Motortype	Neodymium magneet synchrone motor
Brandstofvoorziening	Direct waterstof
Brandstofopslag	Gecomprimeerd H ₂
Backup batterij	Li-ion
Systeem	Vernieuwend remmen
Rijbereik	?

Tabel 11.28 Technische gegevens van Nissans 2001 Xterra brandstofcelvoertuig

11.2.5 Honda

Honda is na Toyota de tweede grootste autofabrikant van Japan en werelds grootste producent van motorfietsen. Na Toyota leidt Honda de wereld in de ontwikkeling van lage emissie voertuigen met z'n *Hybrid Insight* model. Honda is nu ook een massamarkt hybrideversie van z'n Civic wagen aan het verwezelijken en ziet dit als een voorloper van de lancering van een massamarkt brandstofcelvoertuig.

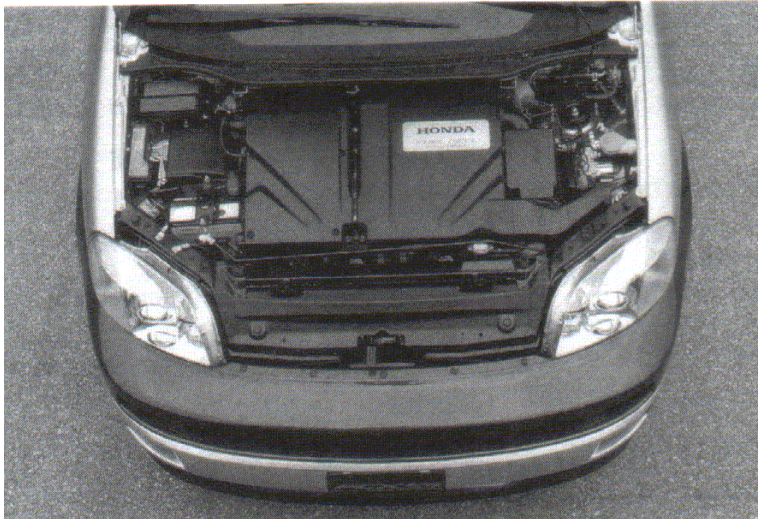
Honda startte in 1989 met het onderzoeken van het potentieel van brandstofcellen en heeft enkele prototype brandstofcelvoertuigen ontwikkeld. De laatste jaren heeft Honda enkele keren brandstofcellen van Ballard besteld. Ballard ontving bestellingen van Honda voor Mark 900 brandstofcellen en verwante uitrusting voor een prijs van meer dan 2,8 miljoen euro in oktober 1999, 1,7 miljoen in augustus 2001, en 1,5 miljoen in januari 2001.

Hoewel Honda z'n technologie niet zal delen met anderen, is het bedrijf aan het samenwerken met Ford, DaimlerChrysler en andere autofabrikanten om systemen voor brandstofvoorziening te ontwikkelen, om publieke aanvaarding te winnen en om de mogelijkheden voor commerciële productie te bestuderen. Honda wil starten met de bouw van ongeveer 300 brandstofcelvoertuigen per jaar in 2003, voor de verkoop in de V.S. en Japan.

Honda's eerste brandstofcelvoertuig, FCX-V1, werd voorgesteld op het autosalon in november 1999. Het werd aangedreven door Mark 700 brandstofcellen, een vermogen van 60 kW leverend aan een gesynchroniseerde AC-motormet een vermogen van 49 kW. Waterstof werd opgeslagen in een metaalhydridetank voor een rijbereik van 177 km.

In 1999 werd een door methanol aangedreven versie van dit voertuig, aangedreven door een Honda brandstofcel (eveneens 60kW) voorgesteld. Honda's derdegeneratie prototype, de FCX-V3, werd voor het eerst tentoongesteld in september 2000. Het is getest geweest op publieke wegen in Japan en Californië, waar Honda een kleine waterstof productie, opslagruimte en tankstation heeft opgezet bij z'n onderzoekscentrum in Los Angeles. De FCX-V3 gebruikt een 70 kW PEM-brandstofcelstack, ontworpen door Honda zelf. Een ultracondensator vervangt de batterij, wat resulteert in een betere acceleratie. De FCX-V3 is aangedreven door waterstof opgeslagen in een druktank van 25 liter onder een druk van 25 MPa, en bevat 2 kg waterstof. Met een volle tank behaald de wagen een bereik van 176 km. Tabel 11.29 stelt de bijkomende gegevens van dit voertuig voor.

In september 2001 bracht Honda een vierdegeneratie prototype uit, de FCX-V4 (zie figuur 11.16). Elke component van het brandstofcelsysteem is herontworpen , wat een meer compacte verpakking teweeg bracht en wat de acceleratie en de maximumsnelheid verbeterde. Het voertuig werd opnieuw aangedreven door een Ballard brandstofcel, een Mark 900 van 78 kW. Het bereik werd vergroot, van 180 naar 300 km. De technische gegevens van de FCX-V4 kun je vinden in tabel 11.30.



Figuur 11.16 Honda's FCX-V4. Het voertuig heeft weg vergunningen in Japan in Amerika gekregen.

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	Honda FCX-V3 (september 2000)
Basis van het voertuig	Honda EV Plus
Totaal gewicht	1750 kg
Aantal zitplaatsen	4
Maximumsnelheid	130 km/h
Brandstofceltype/geschat vermogen	Honda 70 kW
Motortype/geschat vermogen	Permanent magneet synchroon/60 kW
Brandstofvoorziening	Direct waterstof
Brandstofopslag	Gecomprimeerd H ₂ , 25 MPa, 25 liter, 2,0 kg
Backup batterij	Ultracondensatoren
Systeem	-
Rijbereik	176 km

Tabel 11.29 Technische gegevens van Honda's FCX-V3

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	Honda FCX-V4 (september 2001)
Basis van het voertuig	Honda EV Plus
Totaal gewicht / Afmetingen	1750 kg / 4045 mm (l) x 1810 mm (b)
Aantal zitplaatsen	4
Maximumsnelheid	140 km/h
Brandstofceltype/geschat vermogen	Ballard Mark 900/78 kW
Motortype/geschat vermogen/koppel	Permanent magneet synchrone AC-motor/60 kW/238 Nm
Brandstofvoorziening	Direct waterstof
Brandstofopslag	Gecomprimeerd waterstof , 35 MPa, 130 liter
Backup batterij	Ultracondensatoren
Systeem	-
Rijbereik	330 km

Tabel 11.30 Technische gegevens van Honda's FCX-V4

11.2.6 UTC Fuel Cells en Shell Hydrogen

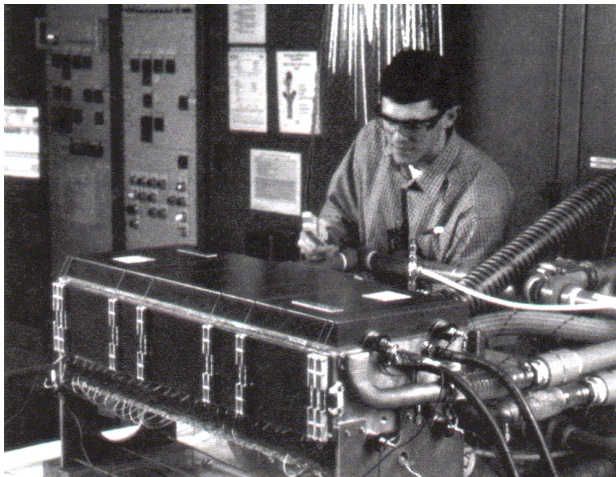
11.2.6.1 Technologie en partners

UTC Fuel Cells is de enige leverancier van brandstofcellen voor de Amerikaanse bemande ruimtevluchten en de enige maatschappij die momenteel een commercieel verkrijgbare brandstofcelinstallatie (fosforzuurbrandstofcel (PAFC)) produceert, de PC25C.

Hoewel UTC een lange geschiedenis inzake stationaire brandstofcel ontwikkeling heeft (het bedrijf ontwikkelde het eerste residentiële brandstofcel PAFC-systeem ontwikkeld in de jaren 1960) startte het UTC-autoprogramma slechts betrekkelijk recent.

In maart 2000 kondigde UTC aan dat het één van de meest krachtigste autostacks heeft ontwikkeld, namelijk de Stack 300 (zie figuur 11.17), op de bijeenkomst van de vereniging van auto-ingenieurs in Detroit. De stack wekt 75 kW op, bij een vermogendichtheid van 1,5 kW per liter.

UTC's brandstofcelsysteem, gebaseerd op Stack 300, werkt bij een druk van ongeveer de atmosferische druk en is daarom preciezer en minder complex dan de onder druk gezette systemen. UTC beweert ook dat het efficiënter is en dat het beter het water dat geproduceerd wordt behandelt dan de traditionele onder druk gezette brandstofcel designs.



Figuur 11.17 Een Series 300 transport brandstofcelstack worden getest bij UTC Fuel Cells' onderzoeks en ontwikkelingstestlabo's.

UTC en Shell Hydrogen U.S., een afdeling van Shell Oil Products Company, spraken in september 2000 af om een brandstofcel producerend bedrijf op te richten om brandstofprocessors voor de opkomende brandstofcel en waterstof brandstofmarkten te ontwikkelen, te vervaardigen en te verkopen. Dit bedrijf kreeg de naam HydrogenSource.

Shell Hydrogen is een wereldbedrijf bestaande uit afzonderlijke bedrijven en andere organisatorische wezens binnen de Royal Dutch/Shell Group of Companies. Shell Hydrogen werd opgericht in 1999 om zakelijke gelegenheden verwant met waterstof en brandstofcellen verder te zetten en te ontwerpen. En heeft zijn hoofdkantoor in Amsterdam.

11.2.6.2 Passagierwagens (Hyundai, Nissan, Renault)

In een persbericht van 2000 stond dat UTC zei dat het contracten had met vijf autoconstructeurs om autobrandstofcellen te ontwerpen. Dit bevat waarschijnlijk het brandstofcelontwerp voor BMW als een APU, welke in oktober 1999 onthuld werd op het autosalon van Frankfurt.

Hyundai is een andere partner van UTC voor auto-stacktechnologie en heeft een succesvol demonstratievoertuig geproduceerd, het voertuig is gebaseerd op UTC stacktechnologie.

UTC's meest recente partners zijn Nissan en Renault, welke de ondertekening van een overeenkomst voor gezamenlijke ontwikkeling van brandstofcelcomponenten aankondigde in februari 2002.

11.2.6.3 Bussen (Thor, Irisbus)

UTC is brandstofcelsystemen voor fabrikanten van bussen en vlootvoertuigen aan het ontwikkelen, waaronder Thor Industries in de V.S. en Irisbus in Europa.

Thor is het de grootste middelgrote busbouwer en de tweede grootste recreatieve-voertuigenfabrikant Thor heeft exclusieve rechten voor het gebruik van UTC's brandstofcellen in het volledige aandrijfsysteem, ThunderPower genoemd, voor alle Noord-Amerikaanse middelgrote bussen.

Thor plant om z'n 30-ft E-Z Rider lagevloers-transitbussen al platform voor een brandstofcel waterstofsysteem te gebruiken om ze te verkopen aan de prijs van overeenkomstig met andere alternatieve brandstofcellen. Thor Industries kondigde aan dat z'n eerste bus zal gebouwd worden tegen midden 2001.

ISE Research Corporation (San Diego) de leidende ontwikkelaar en integrator van hybride aandrijvingsystemen voor bussen en trucks, voorziet z'n hybride systeem en bevordert de integratie van het brandstofcelsysteem.

De Irisbus stadsbus werd voor het eerst in januari 2001 voorgesteld. Hij werd voortbewogen door een elektrische motor van 160 kW en is aangedreven door een 60 kW-brandstofcelstack gecombineerd met een batterij van 50 Ah. Waterstof is opgeslagen in negen drukvaten van 140 liter.

11.2.7 Hyundai

Hyundai, de Koreaanse motormaatschappij, was één van Ballard's vroege klanten. Op het einde van 1999 bestelde Hyundai voor 350 000 euro aan brandstofcellen van Ballard als deel van een samenwerkingsprogramma met de Koreaanse regering.

In mei 2000, kondigde Hyundai aan dat het een overeenkomst met International Fuel Cells (UTC) getekend had om UTC's brandstofceleenheid te integreren in z'n SUV demonstratieprogramma door de verbrandingsmotor te vervangen door een brandstofcelsysteem in de nieuwe Santa Fe SUV. Figuur 11.18 toont dit nieuwe voertuig en z'n technologie en tabel 11.31 de technische gegevens. Aanvankelijk vereiste de overeenkomst de ontwikkeling van twee prototypes van de Santa Fe brandstofcel SUV's. Deze overeenkomst bevatte een mogelijke uitbreiding om nog twee bijkomende voertuigen te produceren.



Figuur 11.18(a) Hyundai's Santa Fe brandstofcelvoertuig aangedreven door een UTC 75 kW-brandstofcel lopend op waterstof. (b) Een kijk onder de motorkap toont ons systeemintegratie. Merk op dat de brandstofcel niet onder de motorkap zit maar onder de achterbank in deze toepassing.

Het Santa Fe's 75 kW enkele-stack brandstofcelsysteem is aangedreven door waterstof. Een conventionele autobatterij werd gebruikt voor de opstart.

Enova Systems of Torrance is een grootse ontwikkelaar van elektrische- en hybride-aandrijvingsystemen voor Hyundai Motor Company. Het levert de elektrische aandrijvingsystemen en vermogen-managementsystemen voor de voertuigen. Het brandstofcelsysteem dat geïnstalleerd is in de Hyundai Santa Fe maakt totaal geen inbreuk op de passagiers- of ladingsruimte van het voertuig.

Hyundai is lid van het California Fuel Cell Partnership.

De Hyundai Santa Fe scoorde het best in z'n soort voor twee prestatietesten op het Michelin Challenge Bibendum, een jaarlijks evenement waar nieuwe autotechnologieën geëvalueerd worden door onafhankelijke juryleden. Hij werd beoordeeld met een "A" inzake lawaai en met een "B" inzake energie-efficiëntie, de hoogste cijfers gegeven aan brandstofcelauto's in deze categorieën.

Zes door waterstof aangedreven brandstofcelvoertuigen hebben deelgenomen aan het Michelin evenement, gehouden in Los Angeles en Las Vegas. Andere automakers die deelgenomen hebben met brandstofcelwagens zijn Ford, DaimlerChrysler, General Motors, Toyota en Honda. In 2000 nam enkel de NeCar deel aan de wedstrijd.

Een nieuw model van deze wagen met verbeterde waterstofopslag, wat een rijbereik van 402km biedt, was ontwikkeld in 2001. Een akte van verstandhouding voor het vormen van een formele alliantie met UTC Fuel Cell was getekend in januari 2002.

Naam van het brandstofcelvoertuig (jaar)	Hyundai Santa Fe (maart 2001)
Basis van het voertuig	Hyundai SUV
Totaal gewicht	3571kg
Aantal zitplaatsen	5
Maximumsnelheid	124 km/h
Brandstofceltype/geschat vermogen	IFC (UTC) Series 300 PEMFC/75 kW
Motortype/geschat vermogen	AC driefase inductiemotor (Enova)/65 kW
Brandstofvoorziening	Direct waterstof
Brandstofopslag	Gecomprimeerd H ₂ , 35 MPa
Backup batterij	Loodzuur
Rijbereik	160 km

Tabel 11.31 Technische gegevens van Hyundai's Santa Fe brandstofcelvoertuig

11.2.8 Andere ontwikkelaars

11.2.8.1 Passagierwagens

11.2.8.1.1 Fiat

Gedeeltelijk gefinancierd door het Italiaanse Ministerie van Milieuzaken, Fiat's onderzoekscenter onthulde een Fiat Seicento Elettra H₂ brandstofcelvoertuig in Februari 2001. De brandstofcel batterijhybride heeft als basis Fiat's kleinste stadswagen. Het wordt voortbewogen door een driefasen asynchrone motor (30 kW, 216 V) aangedreven door een 7 kW PEM-brandstofcelstack (1,5 bar waterstof en 1,8 bar lucht, 48 V) van onbekende makelij en door een batterij. Dit laat een topsnelheid van 100km/h toe (zonder batterij 60 km/h) en een rijbereik van 140 km gebaseerd op watersof opgeslagen onder een druk van 20 MPa in zes gascilinders, welke elk 9 liter bevat, en een volledig opgeladen batterij. De waterstof dat aan boord opgeslagen is laat een bereik van slechts 100 km toe.

Na de Seicento is ook de gloednieuwe Panda (verkozen tot auto van het jaar 2004) aangedreven door een brandstofcel. Fiat werkte daarvoor samen Nuvera Fuel Cells uit Cambridge. De Panda kreeg een nieuw brandstofcelconcept mee dat 'Andromeda' werd gedoopt. De brandstofcel is direct aan de elektromotor gekoppeld. Een kleine set accu's levert extra stroom bij acceleratie. De brandstofcel wordt onder de middentunnel en de achterbank geplaatst. Hierdoor is de Panda Hydrogen de eerste Fiat brandstofcelauto met prestaties en interieurruimte die met de huidige productiemodellen kan concurreren. De brandstofcel in de Panda levert 40 kW wat goed is voor een topsnelheid van 130 km/h. De Panda versnelt van nul naar 50 km/h in minder dan zeven seconden. Met 68 liter in twee waterstoftanks kan 220 km afgelegd worden.

Het is momenteel niet duidelijk wat Fiat's verdere strategie zal zijn betreffende door brandstofcel aangedreven voertuigen. Maar Fiat's hoofdfunctionaris zei in december 2001 dat volgens zijn mening "waterstof-aangedreven voertuigen zullen tenminste binnen 15 jaar op de markt komen". Hij was op een presentatie van een door de overheid ondersteund programma om natuurlijk-gas- aangedreven voertuigen voor stadsgebruik in taxi's, bussen en goederenvervoer en was van mening dat " in de nabije toekomst methaan ... de oplossing meest waarschijnlijk zal na streven".

Fiat Auto en General Motors, welke sinds maart 2000 20% van de aandelen van dat bedrijf heeft, zijn overeengekomen om samen componenten en systemen voor kleine auto's te ontwerpen

11.2.8.1.2 Mitsubishi Motors

Mitsubishi Motors Corporation is een multinational fabrikant en verdeler van een volledige lijn autoprodukten, met inbegrip van auto's, trucks, bussen, onderdelen en aandrijvingsystemen. In 1999 exposeerde deze fabrikant een door methanol aangedreven brandstofcel conceptvoertuig (model) op het autosalon van Tokyo samen met Mitsubishi Heavy Industries, met welke het aan het werken was aan de ontwikkeling van een eigendoms-brandstofcelsysteem en reformer. De vennootschap was toen aan het streven naar een commercieel brandstofcelvoertuig in 2005.

In de zomer van 2001 duiden de geruchten erop dat Mitsubishi Motors plande om brandstofcellen voor voertuigen te ontwerpen in samenwerking met DaimlerChrysler (welke een controlerend aandeel in het bedrijf heeft). De samenwerking zal de geavanceerde brandstofceltechnologieën van Mitsubishi Heavy Industries combineren met de autotechnologieën van Mitsubishi Motors en DaimlerChrysler. Nippon Mitsubishi Oil, welke aan het werken is om een vloeibare brandstof te ontwerpen dat kan gebruikt worden in brandstofcellen in de plaats van benzine, is er ook bij betrokken. Mitsubishi Space Liner, een concept passagierswagen, was tentoongesteld op het autosalon van Tokyo in 2001. Het gebruikt een brandstofcelstack van DaimlerChrysler's NeCar series.

Financiële moeilijkheden belemmeren momenteel de ontwikkeling van Mitsubishi's brandstofcellen.

11.2.8.1.3 PSA (Peugot, Citroën)

Twee brandstofcelvoertuigen waren geproduceerd door PSA in 2000 en 2001. Hydro-Gen was gepresenteerd in Juni 2000. Het voertuig mat 4110 x 1960 x 1800 mm en woog 1800kg, het werd voortbewogen door een elektrische motor van 20kW aangedreven door een 30 kW Nuvera-brandstofcel en een 162 V batterij voor energieherstel. Met 3,3 kg waterstof opgeslagen in een druktank(140 liter) onder een druk van 30 MPa, ontworpen door een partner: CEA, kan het voertuig 300 km rijden en bereikte een maximumsnelheid van 65 km/h.

De Peugeot Fuel Cell Cab werd een jaar later gepresenteerd, het was een gelijksoortig design (gewicht verminderd tot 1740 kg) en kon vijf passagiers dragen. Het werd aangedreven door een 5,5 kW-brandstofcel van H-Power. De druktank onder een druk van 30 MPa bevatte 80 liter of 1,5 kg waterstof. Het voertuig kon tussen 200 en 300 km rijden, ook gebruik makend van een 180 V, 95 Ah NiMH batterij (280 kg) voor energieherstel of voor extra belasting.

11.2.8.1.4 Renault

Frankrijk's andere grote autofabrikant, Renault, heeft twee brandstofvoertuigen geproduceerd tot zo ver. De Renault FEVER met twee zitplaatsen werd in 1997 voorgesteld. Elektrisch vermogen werd geleverd door drie 10-kW PEM brandstofcellen(115 cellen) van De Nora en woog 320 kg en wordt bijgestaan door een NiMH batterij met een energiereserve van 2,8 kWh die ook wordt gebruikt als vernieuwende remming. De 115 kg vloeibare lucht tank bevatte 8 kg of 120 liter vloeibare waterstof. Het 2200 kg wegende voertuig kon 500 km rijden en bereikte een maximumsnelheid van 120 km/h.

Renault's 1998 brandstofcel Laguna Estate was aangedreven door een 30-kW brandstofcel ontworpen door Renault. Ze had een bereik van 400 km gebaseerd op een vloeibare waterstofopslag.

11.2.8.1.5 Volkswagen

Volkswagen presenteerde tot nog toe enkel één concept, namelijk de Bora HyMotion in november 2000. Het bevat een 75 kW PEM-brandstofcel van onbekende makelij en is aangedreven door een 75 kW asynchrone motor dat een topsnelheid van 140 km/h teweeg brengt. Het bereik was gegeven op 350 km, maar informatie verschilt naargelang de waterstof is opgeslagen als gas of als vloeistof (50 liter).

Een berijdbare Volkswagen Bora Hy.Power was in elkaar gestoken door het Paul Scherrer Institute in januari 2002. Met een 28 kW brandstofcel en supercondensatoren voor rem energieherstel, het kon ongeveer 150 km rijden met een tank waterstof. Z'n topsnelheid was 115 km/h.

Volkswagen heeft ook het CAPRI project (VW, Volvo, ECN en Johnson Matthey), dat door de EU gefinancierd is, geleid. Om een door methanol aangedreven brandstofcelvoertuig aangedreven door PEM brandstofcellen, gekocht van Ballard.

11.2.8.2 Bussen

Afgezien van de bussen die ontworpen zijn door Ballard/DaimlerChrysler/Xcellsis, Toyota en andere leidende auto-ontwerpers, een grote reeks busprojecten van verscheidene consortia zijn aan de gang.

Onder gangbare ontwikkelaars zijn Scania (werkend met Air Liquide); MAN (werkend met DeNora, Messer en Siemens); MAN (werkend met L-B-Systemtechnik, onder druk gezette waterstof, negen vaten met 1548 liter 25 MPa waterstof); Georgetown University (Lockheed Martin electric drive train, Xcellsis 100 kW-brandstofcel en methanol reformer); Proton Motors (werkend met Neoplan en Magnet Motor, gecompriemd waterstof, 80 kW-PEM brandstofcel van Proton Motors, hernieuwend remmen gebruik makend van vliegwielen; en Neoplan (DeNora stacks, 3 x 40 kW). Tabel probeert om een samenvatting van lopende activiteiten voor te stellen.

11.3 Conclusie

Deze hoop technische gegevens zijn gegeven met de intentie om een overzicht te geven van onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma's, van vroeger en nu, van leidende ontwikkelaars. Deze informatie is zeker niet compleet en zal misschien gedeeltelijk verouderd zijn. Maar het zou moeten aantonen dat de hoofdbedrijven constant evolueren en hoe hun strategie ongeveer in elkaar zit. Het is duidelijk dat de verschillende bedrijven andere strategieën gebruiken en anderen hebben meer bouwmodellen gemaakt dan echte prototypes.

Maar het is toch opvallend dat de brandstofceltechnologie voor voertuigen enorm veel verbeterd is. Er zijn enkele passagiervoertuigen en bussen gemaakt die met waterstof, methanol of zuivere benzine kunnen rijden. Het zal zeker spannend zijn om te zien welk concept de technologische race tussen de kracht van een bestaande brandstofinfrastructuur en het gemak van de werking van de nieuwe, schone technologie.

Er kan niet veel twijfel zijn over het feit dat deze brandstofcellensystemen geïntegreerd in grotere voertuigen, zoals bussen en trucks, sneller op de markt zullen komen.

Deel 4 : Didactische stand

12 Didactische stand

12.1 De volledige auto met al zijn onderdelen.

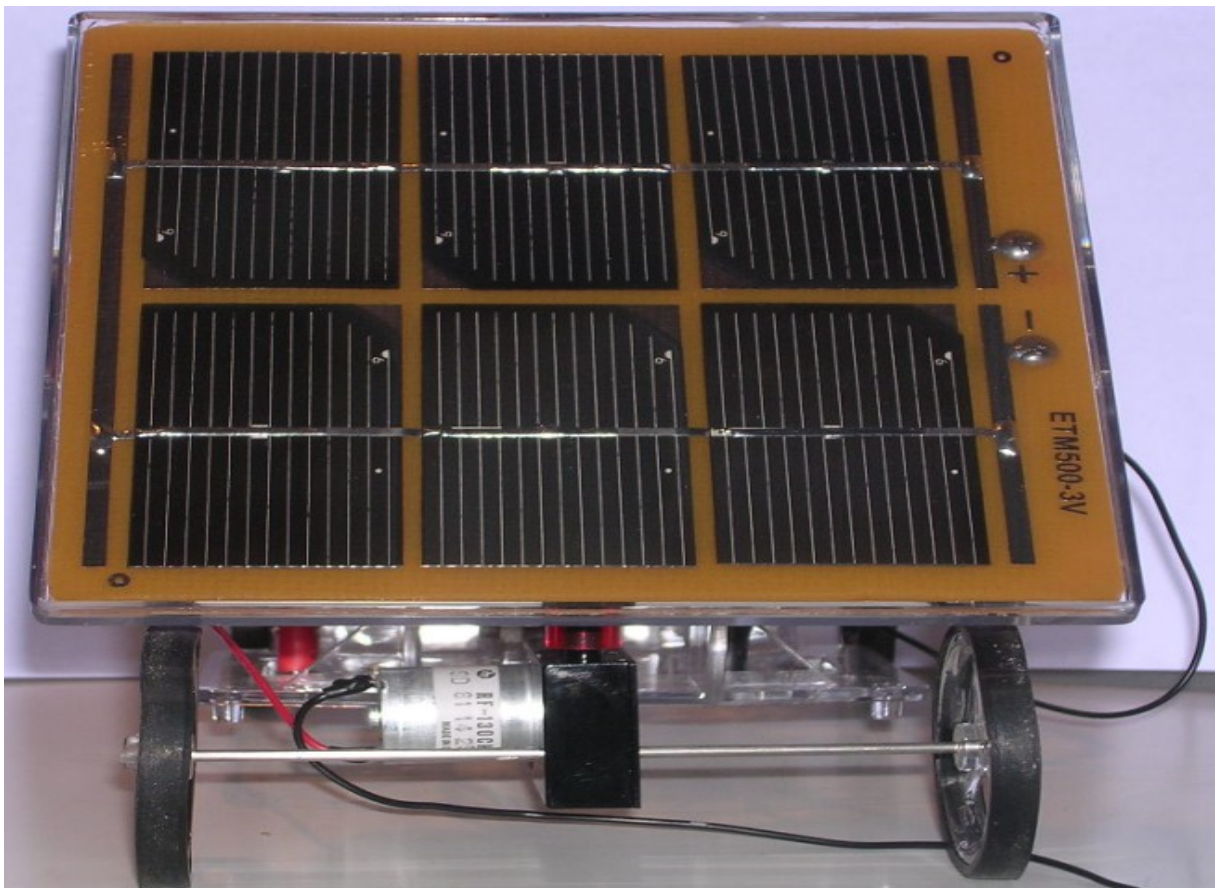
De onderdelen die in de bouwdoos aanwezig zijn:

1. frame
2. 4 wielen
3. zonnecel
4. elektrische motor
5. draden + aansluitklemmen
6. opslagtank voor zuurstof en waterstof

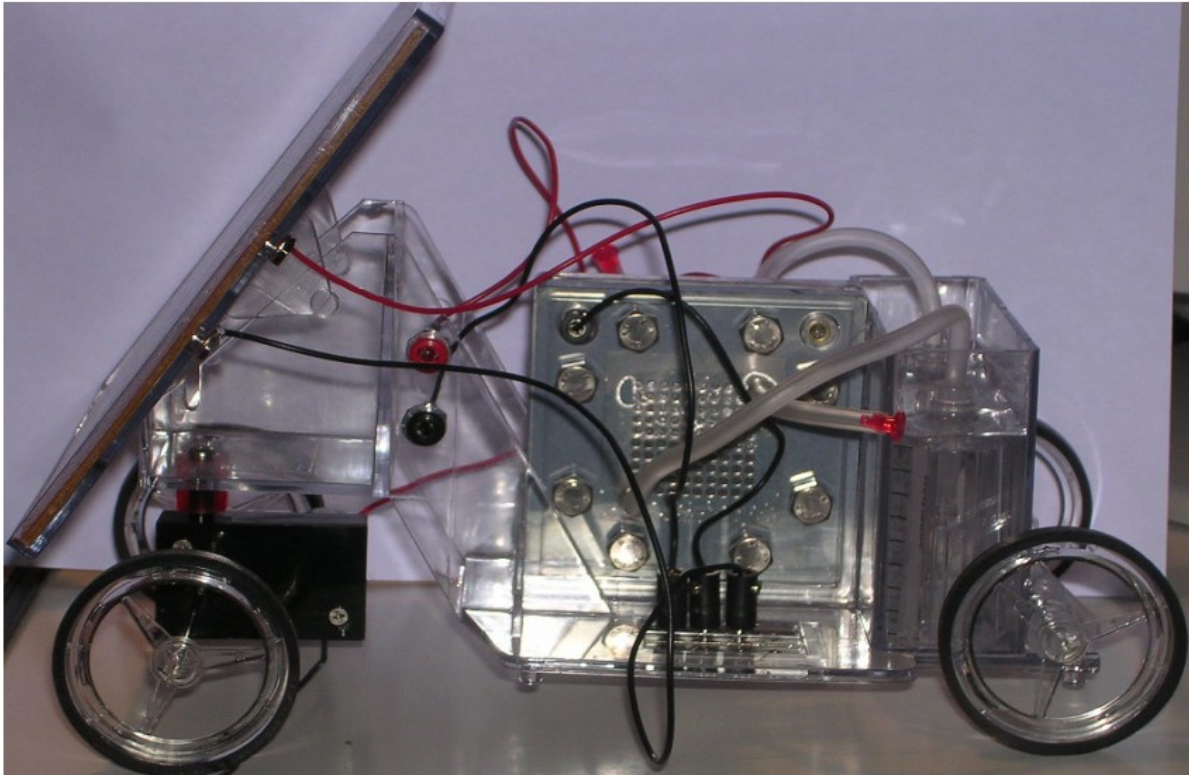
We hebben nog 2 belangrijke elementen nodig die essentieel zijn voor de werking van het autootje

1. gedestilleerd water
2. de zon of UV-lamp

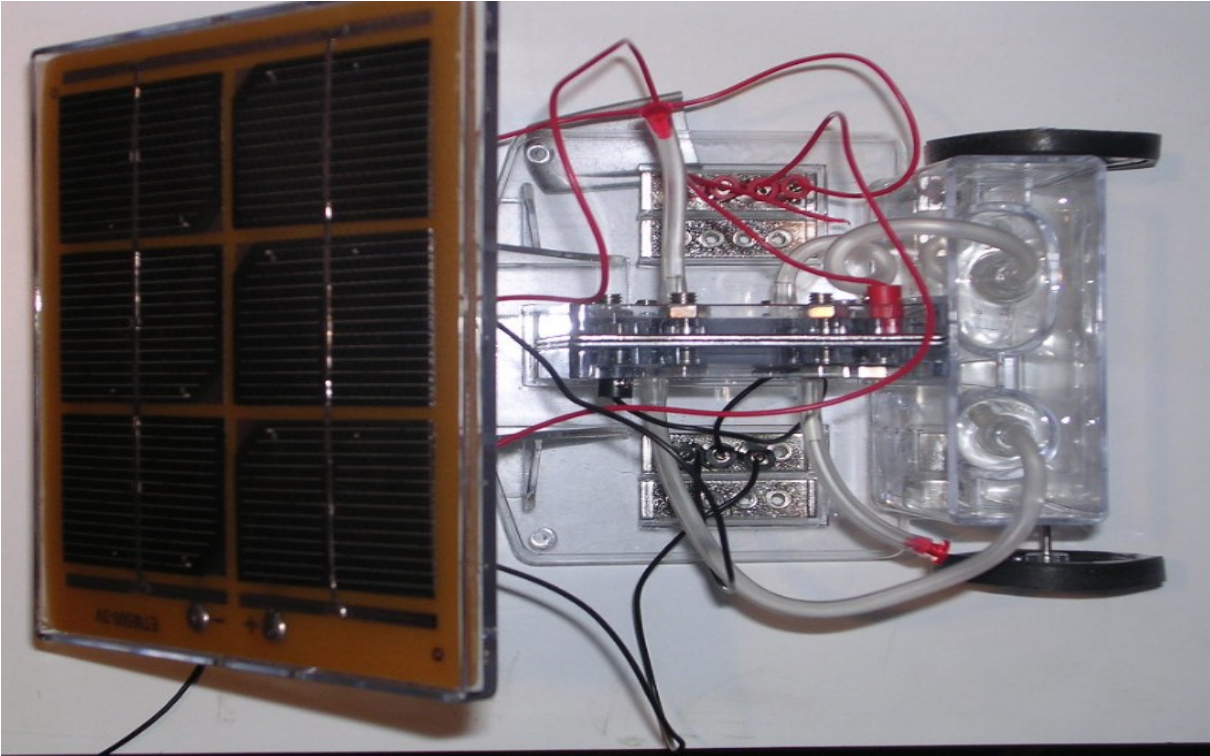
Het autootje



Figuur 12.1 Zijaanzicht



Figuur 12.2 vooraanzicht



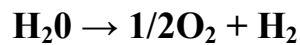
Figuur 12.3bovenaanzicht

12.2 de werking

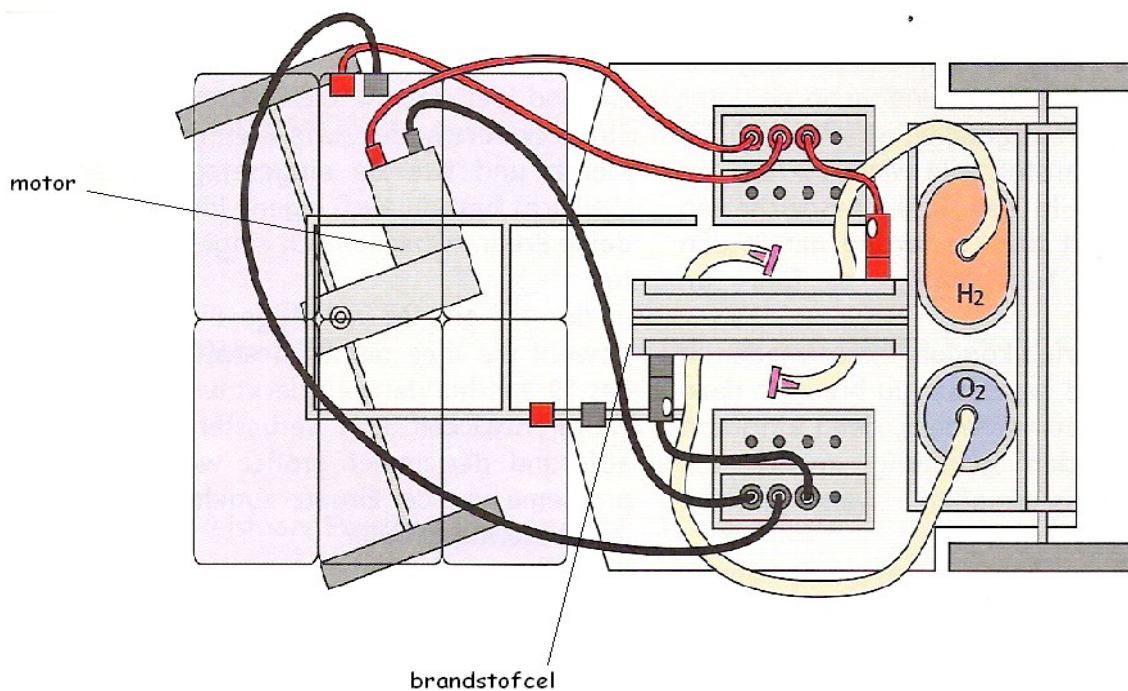
Bij de werking van de auto komen vier processen voor.

1. de zonnecel zet zonne-energie om in elektrische stroom (spanning).
2. de stroom uit de zonnecel wordt gebruikt om water te splitsen in waterstof en zuurstof door elektrolyse.
3. de brandstofcel wekt een spanning op de toevoer van de waterstof en zuurstof.
4. de gelijkspanning wordt omgezet naar een ronddraaiende beweging door een gelijkstroommotor.

Bij ons autootje wordt dus eerst zonne-energie omgezet naar stroom. De stroom wordt dan gebruikt om gedestilleerd water te splitsen in waterstof en zuurstof.



Deze twee elementen worden dan opgeslagen in de opslagtanks. De waterstoftank is dubbel zo groot als de zuurstoftank. Dit is zo omdat er dubbel zoveel waterstof gevormd wordt dan zuurstof. Wanneer men dan de juiste aansluitdraden verwisseld zal de waterstof en zuurstof naar de brandstofcel aangevoerd worden die zal dan een spanning opwekken. Die spanning wordt dan naar de gelijkstroommotor gebracht. Die zet die gelijkspanning om. Uit de motor komt dan een ronddraaiende beweging die de wielen in beweging zet.



Figuur 12.4 Didactische voorstelling van het autootje.

12.3 werking van de zonnecel

Zonnecellen zijn opgebouwd uit halfgeleiders. In een onbelichte halfgeleider kunnen elektronen zich door middel van thermische opwekking vrijmaken van hun atoomkern en zo vrije ladingsdragers vormen. Dit komt doordat het energieverval tussen vrije en gebonden elektronen niet zo groot is. Een halfgeleider heeft namelijk een volle valentieband. Bij een stof met een volle valentieband kan er een elektrisch veld aangelegd worden, maar zal er in principe geen netto effect van bewegende elektronen zijn.

Een halfgeleider geleidt toch stroom, doordat het energieverval tussen de valentieband en de eerstvolgende lege band niet zo groot is, zodat elektronen indien hun warmte energie groot genoeg is de overgang vrij gemakkelijk kunnen maken. Zodoende geleidt een onbelichte halfgeleider wel stroom.

Als er zonlicht op de zonnecel valt, zal er een deel van dat licht gereflecteerd worden en de rest zal doorgelaten worden. Het deel van het zonlicht dat doorgelaten wordt, zal voor een deel geabsorbeerd kunnen worden door een halfgeleideratoom. Door de absorptie van een foton door een atoom kan een elektron uit de valentieband naar een hogere lege energieband overgaan, zodat er vrije ladingsdragers ontstaan.

p/n materialen

Silicium is een halfgeleidermateriaal als hierboven beschreven, met vier elektronen in zijn buitenste schil. Door silicium in een kristalrooster te plaatsen wordt elke siliciumkern omgeven door acht elektronen; vier van zichzelf en één van elk van de vier buuratomen. Deze acht elektronen vormen voor elke kern een elektronenschil die vol lijkt. Als nu in dit rooster een kern wordt geplaatst met vijf elektronen in zijn buitenste schil, zoals arseen, dan worden weer schillen gevormd met acht elektronen en één elektron blijft er vrij over. Dit vrije elektron kan tussen alle atomen bewegen en kan dus aan een stroom bijdragen.

Evenzo kan het rooster van siliciumatomen 'vervuild' worden met een atoom met drie elektronen in zijn buitenste schil, zoals gallium. Doordat de buitenste schil dan slechts met zeven elektronen gevuld is, zal soms een elektron van een buurkern het zogenaamde 'gat' in de elektronenschil opvullen. Dit wordt meestal gezien alsof er een positief geladen gat door het kristal beweegt. Ook nu zijn er dus vrije ladingsdragers in het materiaal aanwezig die aan een stroom kunnen bijdragen.

De p/n junctie

Nu wordt bekeken wat er gebeurt als we p- en n-materiaal tegen elkaar aanbrengen. Dit heet een junctie, een verbinding. Het resultaat zal een diode zijn, die in principe al een zonnecel is.

Tegenover de hoge gatenconcentratie in p-materiaal staat een zeer lage concentratie vrije elektronen. Voor n-materiaal is dit precies omgekeerd. Dit heeft tot gevolg dat zodra deze materialen tegen elkaar worden gebracht er sprake is van een zeer sterk ladingsverschil ter plaatse van de overgang voor zowel elektronen als gaten. Deze zijn natuurlijk wel tegengesteld van richting.

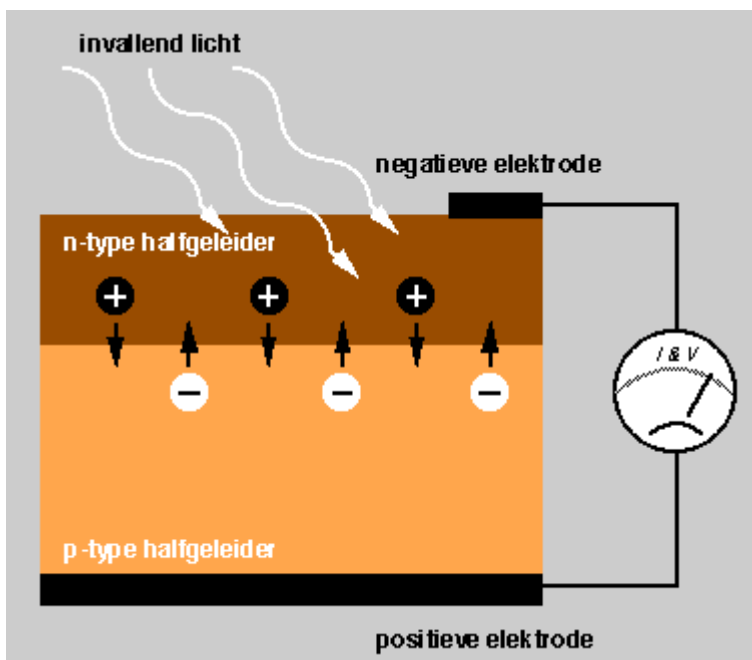
Als gevolg hiervan werken elektronen op het p-materiaal en gaten op het n-materiaal in. Normaal gesproken zou dit doorgaan tot het verschil nul is en de concentraties door het hele materiaal constant. Het inwerken van elektronen in de p-laag heeft echter tot gevolg dat er positieve donorionen achterblijven in het n-materiaal, vooral dichtbij de junctie. Wederom geldt hetzelfde voor het p-materiaal, waar negatief geladen acceptor-ionen achterblijven. De ruimtelijke ladingsverdeling die hierdoor ontstaat wekt door inductie een elektrisch veld op dat precies tegengesteld is aan de diffusierichting van de gaten en elektronen, en daardoor op de elektronen en gaten werkt. Zo stelt zich een evenwicht in waarbij de diffusiestroom ten gevolge van het ladingsverschil en de driftstroom ten gevolge van het geïnduceerde elektrische veld elkaar precies in evenwicht houden.

Omdat er een evenwicht in de onbelichte cel is, ontstaat er tijdens een junctie wel een spanning over de overgang, maar loopt er geen stroom. Doordat er geen stroom loopt is het ook niet mogelijk de spanning over de junctie met een normale voltmeter te meten.

Onder belichting worden in de gehele cel vrije ladingsdragers gegenereerd volgens het fotonvoltaïsch effect. De ladingsdragers die in de barrière laag worden vrijgemaakt worden meteen over deze laag heen versneld (elektronen richting n-laag, gaten richting p-laag).

Door deze veldstroom ontstaat er een concentratiegradiënt die ladingsdragers die buiten de barrière laag zijn vrijgemaakt richting junctie doet diffunderen. Daar aangekomen worden ook zij over de junctie heen versneld door het elektrische veld ter plaatse.

Zo fungeert de junctie als een enorme put voor ladingsdragers die de ruimtelijke scheiding van de vrijgemaakte ladingsdragers bewerkstelligt die nodig is om een externe stroom te laten lopen. Op deze manier kan de zonnecel extern vermogen leveren.



Figuur 12.5

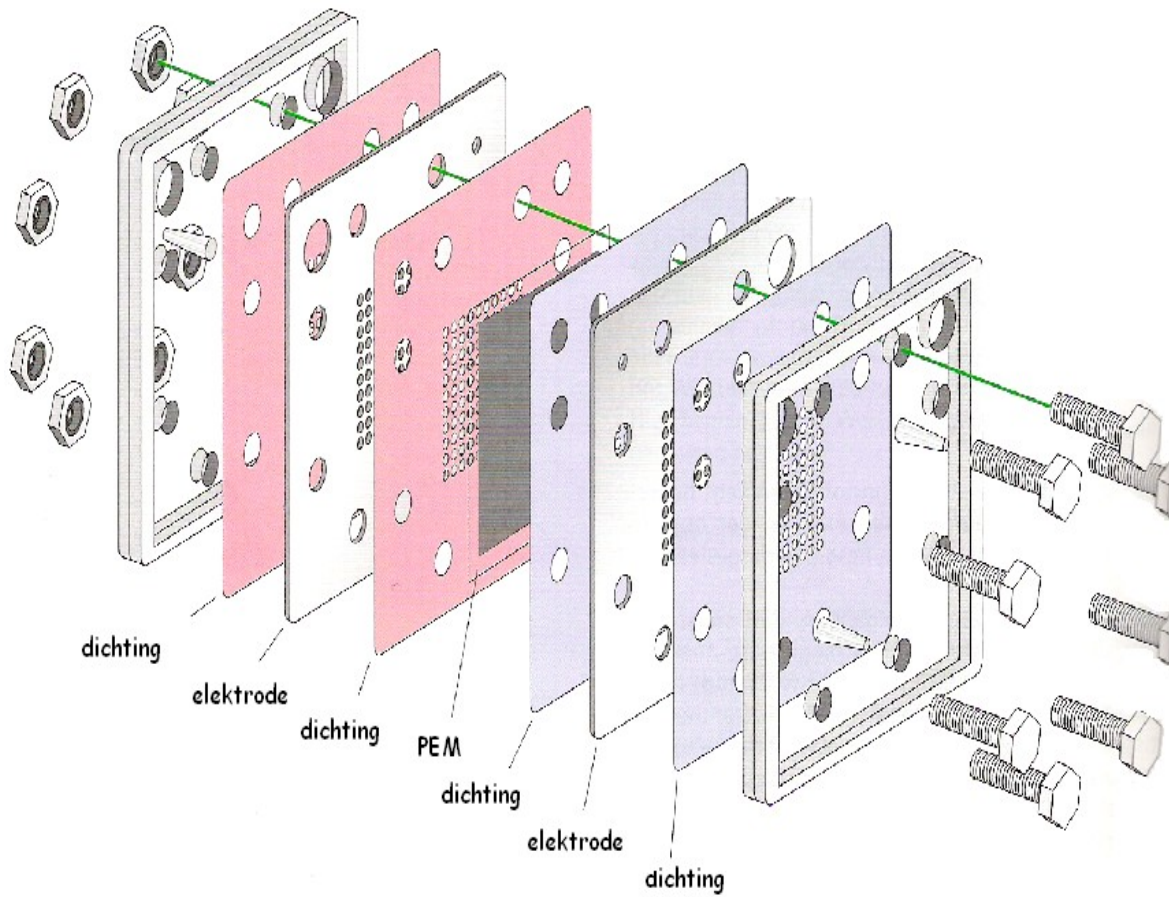
12.4 Elektrolyse

Zie hoofdstuk 8.3.5

12.5 Werking van de brandstofcel

Zie theoretische gedeelte

12.5.1 opbouw van de gebruikte brandstofcel



12.6 spanningen en stromen in het didactische toestel

We zullen spanningen over de componenten meten

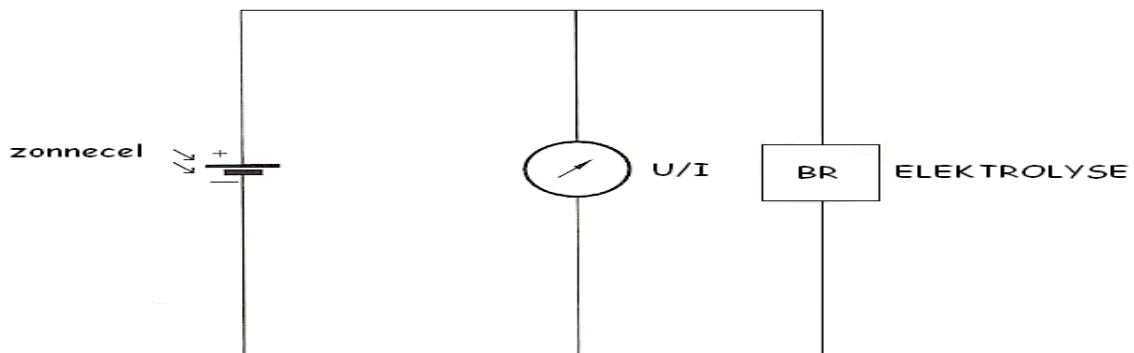
12.6.1 openkring spanning van de zonnecel



Figuur 12.6

$$U_{\text{zonnecel}} = 3.4 \text{ V}$$

12.6.2 spanning bij aansluiten van elektrolyse toestel



Figuur 12.7

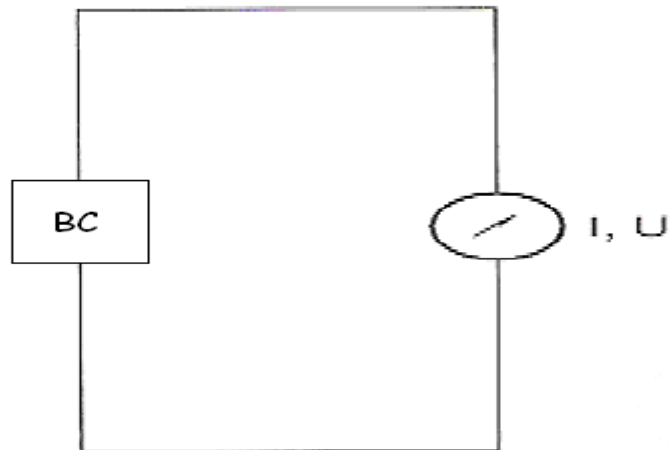
$$U = 1.64 \text{ V}$$

$$I = 189 \text{ mA}$$

$$P = U * I$$

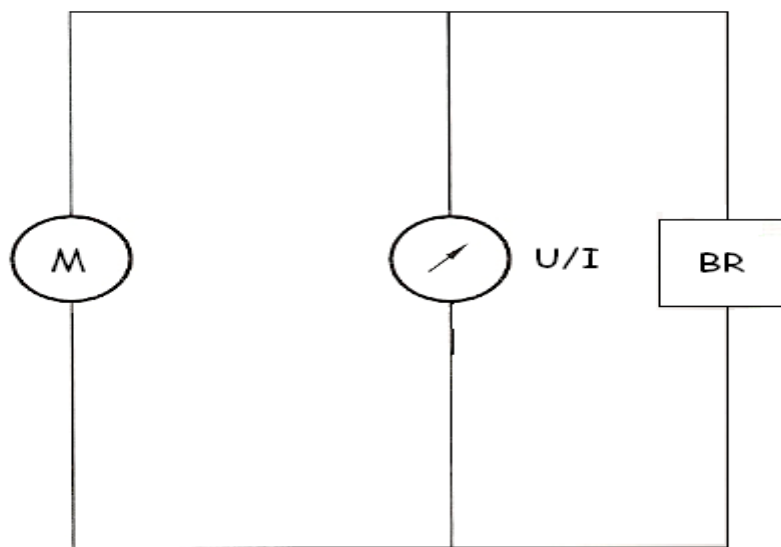
$$= 0.3 \text{ W}$$

12.6.3 openkring spanning van de brandstofcel



$$U_{\text{brandstofcel}} = 0.9 \text{ V}$$

12.6.4 spanning bij aansluiten van de motor



$$\begin{aligned} U &= 0.7 \text{ V} \\ I &= 0.157 \text{ A} \\ P &= U * I \\ &= 0.11 \text{ W} \end{aligned}$$