

Auto & Motor
TECHNIEK

© **WWW.AMT.NL** - Dé internetsite voor de Automotive Professional

MILIEU

Opel gelooft in brandstofcel

Waterstofauto nog lang geen realiteit**Een schone droom**

De brandstofcel heeft de toekomst, vindt GM. Als bewijs liet het een Opel Zafira Hydrogen3 van Hammerfest naar Lissabon rijden. Toch is niet iedereen overtuigd. Juist tijdens een pitstop in Delft promoveerde Robert van den Hoed daar op zijn twijfels aan de automobiele toekomst van de 'Fuel Cell'.

GM's hoogste baas op milieugebied, Beth Lowery schetst het probleem nog maar eens: "In het jaar 2030 zijn er meer dan acht miljard mensen op Aarde tegen zes miljard nu. Bijna 18% van die mensen zal een auto hebben tegen 12% nu. Bovendien zal het aantal kilometers per auto veel groter zijn dan nu. Voor ons als autoconcern is dat natuurlijk goed nieuws. Minder gunstig is het, dat auto's vervuilen, dat de olievoorraden opraken en dat de CO₂-uitstoot van auto's bijdraagt aan de opwarming van de aarde. Kortom, in het belang van het milieu én in ons eigen belang moeten we auto's ontwikkelen die ons duurzaam mobiel houden." Dit standpunt is niet nieuw voor GM. Al in 1990 toonde het op de Detroit Motor Show de elektrisch aangedreven Impact. En tegen het advies van de GM-strategen in, kondigde de toenmalige topman Smith aan, de schone Impact uiterlijk in 1995 in productie te nemen. Die stap trok de speciale aandacht van de CARB (Californian Air Resources Board). De CARB is verantwoordelijk voor de emissiewetgeving in de Amerikaanse staat California en loopt al decennialang vooruit op de rest van de wereld.



Twintig etappes, 14 landen en bijna 10.000 km. De brandstofcel-Opel Zafira legde ze bijna probleemloos af. Toch is de nieuwe emissieloze auto nog lang niet rijp voor de markt. Lissabon was nooit bereikt zonder assistentie van een truck met vloeibaar waterstof en een technisch begeleidingsteam.

Toen GM's Impact liet zien wat er mogelijk was, introduceerde de CARB nog in hetzelfde jaar (1990) de ZEV-regels. Die eisten van autofabrikanten dat een bepaald percentage van de auto's die ze in California verkochten 'zero emission', moesten zijn. De CARB gaf de autofabrikanten wel royaal de tijd om die ZEV's (Zero Emission Vehicles) te ontwikkelen. In 2003 zou elk op de markt in California vertegenwoordigd merk op iedere 10 verkochte auto's minstens één ZEV moeten leveren. Aan de grote zeven in California (GM, Ford, Chrysler, Toyota, Honda, Nissan en Mazda) werd minder tijd gegund. Zij moesten al vanaf 1998 een aandeel van 2% ZEV's halen en via 4% in 2001 naar 10% in 2003 gaan.

ZEV-bom

Alhoewel de autofabrikanten in 1990 al meer dan twee decennia bezig waren met de milieuvriendelijkheid van hun producten sloeg de Californische ZEV-regeling in als een bom. Promovendus Robert van den Hoed legt uit

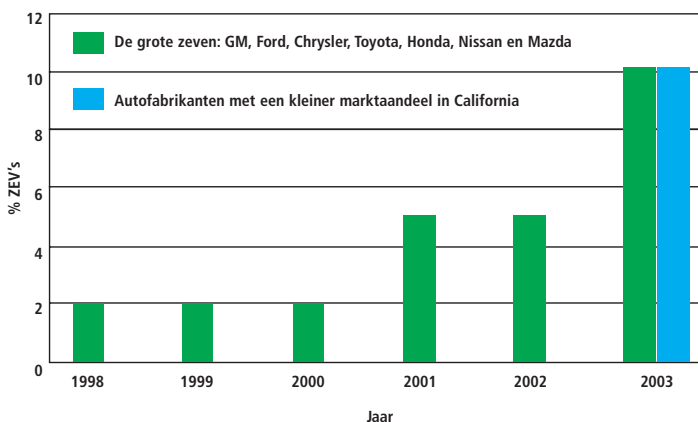
waarom: "Tot op dat moment konden de autofabrikanten steeds aan de strengere milieueisen voldoen door de ICE (Internal Combustion Engine of gewoon: interne verbrandingsmotor) te verfijnen. Maar je kunt verfijnen wat je wilt, het ICE-concept laat nulmissie eenvoudigweg niet toe. De ZEV-regeling dwong de autofabrikanten serieus werk te maken van een radicaal andere aandrijftechnologie."

Die technologie werd de batterij-elektrisch aangedreven auto, in ZEV-jargon: de BEV (Battery Electric Vehicle). Van den Hoed beschrijft in zijn onderzoek de R&D-activiteiten van de grote autoconcerns. Tussen 1990 en 1996 zijn die sterk gericht op de BEV. Als gezegd liep GM voorop. Het nam geen genoegen met het inbouwen van een stel accu's en een elektromotor in een bestaande carrosserie. Nee, het maakte 200 ingenieurs vrij om in zes jaar tijd een BEV van de grond af te ontwikkelen. Eind 1996 is het zover en introduceert GM als eerste fabrikant een BEV voor de Californische markt, de EV1.



Op de dag dat de Opel Zafira Hydrogen3 Delft aandeed, promoveerde Robert van den Hoed aan de TU op zijn werk: 'Driving fuel cell vehicles' (zie <http://www.io.tudelft.nl/research/dfs/hoed/>). Hij zet kanttekeningen bij de brandstofceldroom: "De keuze voor de brandstofcel is niet zuiver technisch, maar ook politiek gemotiveerd." En: "De grote automerken besteden niet meer dan een procent of drie van hun ontwikkelingsbudget aan de FCV. Als ze er zelf onvoorwaardelijk in geloofden, zou dat toch veel meer zijn!"

ZEV-regeling 1990



De ZEV-regels van 1990 betekenden een schok in autoland. Om er aan te voldoen konden autofabrikanten niet langer volstaan met het verfijnen van de interne verbrandingsmotor, maar moesten ze zoeken naar een heel nieuw aandrijfconcept.

In 1990 toonde GM de elektrisch aangedreven Impact op de Detroit Motor Show. De auto werd een belangrijke aanzet voor de Californische ZEV-regulation (Zero Emission Vehicles).



In 1996 nam GM de EV1 in productie. Daarmee was de EV1 de eerste ZEV-productieauto. Centraal in de auto bevonden zich 'gewone' loodzuurbatterijen om de elektromotor aan te drijven, maar voor het overige zat de auto vol met hightech. Zo had de EV1 een aluminium spaceframe, magnesium stoelframes, een regeneratief remsysteem met elektrisch bediende achterremmen en een Cw-waarde van 0,19.



Alles op de BEV

Ook andere fabrikanten investeren tussen 1990 en 1996 stevig in de BEV. Ford komt met de Ranger XL Pickup. Toyota, Honda en Nissan scoren een grote reeks patenten op BEV-gebied en ook merken die op het eerste gezicht weinig last hebben van de ZEV-regeling als Hyundai en Mitsubishi experimenteren volop met BEV's. Dat geldt ook voor het PSA-concern dat in die periode zes elektrische versies van bestaande modellen introduceert. Op de Europese BEV-markt heeft PSA in die jaren vooral te maken met concurrentie van Renault en Fiat. De Duitse merken Daimler-Benz, BMW en Volkswagen concentreren zich minder op complete voertuigen en meer op onderzoek naar batterijen die de BEV meer dynamiek geven dan de traditionele loodaccu's. Twee grote merken doen weinig aan de BEV, allereerst Chrysler dat de BEV absoluut niet ziet zitten en ten tweede Mazda dat er financieel zo slecht voorstaat dat er geen geld is voor onderzoek en ontwikkeling.

Tussen 1995 en 1998 raken de meeste merken uitgekeken op de BEV en gaan ze hun R&D-inspanningen richten op de brandstofcel. Die omslag komt vrij plotseling. Van den Hoed heeft de vele honderden artikelen die in het gezaghebbende Journal of Power Sources voor 1993 zijn verschenen geanalyseerd. Zijn conclusie: "In slechts twee publicaties wordt het gebruik van de brandstofcel in auto's genoemd. In beide gevallen overigens om aan te geven dat de brandstofcel ongeschikt is voor die toepassing." Geen wonder dus dat Van den Hoed in zijn onderzoek actief op zoek is gegaan naar de reden van de overstap van BEV naar FCV (Fuel Cell Vehicle).

Meer dan techniek

Bij een vergelijking tussen BEV en FCV biedt de laatste een aantal technische voordelen. Voordelen overigens die te danken zijn aan verbeteringen die Ballard al in de jaren '85 en '86 aan de brandstofcel doorvoerde, maar die pas nadat Daimler-Benz in de jaren negentig met

Ballard ging samenwerken door de auto-industrie werden gewaardeerd. Zowel qua vermogensdichtheid (kW/l) als qua specifiek vermogen (kW/kg) scoort de FCV aanzienlijk beter dan de BEV. Beiden zijn uiterst belangrijke criteria voor toepassing van een technologie in auto's. Een derde technisch argument is misschien wel van nog grotere betekenis: Als de energiebehoefte van het voertuig groeit nemen gewicht en volume van een batterij-elektrische aandrijving veel sterker toe dan die van een brandstofcelgevoede aandrijving. Meer energie betekent immers grotere batterijen, terwijl de brandstofcel van de FCV in principe gelijk kan blijven en alleen de brandstoftank hoeft te groeien.

Zijn deze technische voordelen voldoende om de overstap naar de brandstofcel te kunnen verklaren? Van den Hoed denkt van niet, zeker omdat tegenover de voordelen van de FCV ook een aantal onopgeloste problemen staan. Denk bijvoorbeeld aan de waterstofinfrastructuur en de opslag van waterstof aan boord van de auto.

Waterstofdroom

Van den Hoed is ervan overtuigd dat een deel van de verklaring buiten de techniek gezocht moet worden. Na het bekend worden van de ZEV-regulering gingen de autofabrikanten niet alleen aan de slag met onderzoek en ontwikkeling maar ook met lobbyen. En niet zonder resultaat! In 1996 werden de 2- en 4%-eisen van voor 2003 afgeschaft.

Dat gaf de auto-industrie vijf jaar uitstel. En de argumenten in die succesvolle lobby? De tekortkomingen van de BEV en... de brandstofcel. Die stond immers nog maar aan het begin van zijn technische ontwikkeling. En goed, problemen waren er nog te over maar die konden worden gezien als uitdagingen voor de komende jaren. Als de CARB dus een beetje geduld zou hebben, kwam er een veel mooier alternatief voor de ICE dan de saaie BEV, die na jaren van research nog lang geen volwaardig alternatief was en een beetje op dood spoor beland leek.

In 1998 zwichtte de CARB opnieuw. Ditmaal voor het argument dat elektriciteitscentrales die de stroom voor BEV's opwekken ook vervuilen. Het resultaat was dat de 10% ZEV-eis werd verlaagd tot 4%. Voor de overige 6% werd een nieuwe categorie bedacht, de PZEV's (Partial-ZEV). Hun uitstoot mag gelijk zijn aan die van een energiecentrale bij het opwekken van dezelfde hoeveelheid energie. Daarna zette de lobby de aanval in op de resterende 4%. Dat resulteerde eerst in een verlaging naar 2% met nog een nieuwe categorie voor de resterende 2%. Dat werd de ZEV-AT (Alternative Technology), gericht op hybrides en andere alternatieven. Ook de allerlaatste 2% is inmiddels gesneuveld. En opnieuw diende de mooie waterstofdroom in de verre toekomst als worst voor de CARB. De zes grote merken (Mazda hoort er inmiddels niet meer bij) rest slechts de verplichting om uiterlijk in het jaar 2008 gezamenlijk 252 FCV's te verkopen in California. GM als grootste moet er daarvan 62 voor zijn rekening nemen. Dat zelfs dat nog een hele klus zal worden, bleek op de vraag van een schrandere TU-student. "Als een auto in staat is om van Hammerfest naar Lissabon te rijden dan is hij ook goed genoeg om op de markt te brengen", vond hij. "En als het duur is om zo'n auto te bouwen, dan vraag je een hoge prijs", redeneerde hij verder. "Immers dan kun je er prima een nichemarkt mee bedienen, jullie verkopen toch ook Hummers!" Het antwoord van GM's Lars Peter Tissen was ontuchtend: "Ik denk dat die niche wel erg klein zou worden als er, net als bij deze trip, bij iedere rit een team monteurs en een truck met waterstof mee moet."

Erwin den Hoed

Langeduurtest van Hammerfest naar Lissabon

Wordt de FCV betrouwbaar, betaalbaar en praktisch?

De Opel Zafira Hydrogen3 is niet nieuw. Al in december 2002 reed AMT ermee op waterstof door de straten van Monaco (zie: AMT1 2003). "Al met al rijdt en lijkt de auto zo gewoon dat hij niet opvalt in het verkeer", concludeerden we toen. Toch is er sinds die tijd door honderden wetenschappers en ingenieurs dagelijks aan gewerkt. Problemen, of uitdagingen, net hoe je ze noemen wilt, zijn er dan ook nog te over. Een eerste is de betrouwbaarheid en duurzaamheid van de FCV. GM FCA (Fuel Cell Activities), het speciale FCV-bedrijf van GM, gebruikt de 10.000 km tussen Hammerfest en Lissabon dan ook als langeduurtest. De rit stelt de GM-technici in staat na te gaan hoe de techniek zich houdt onder uiteenlopende omstandigheden.

Overigens maakte men het met die omstandigheden ook weer niet al te dol, de Hydrogen3 heeft geen systeem dat na het stopzetten van de auto het in de brandstofcel geproduceerde water afvoert. Bij strenge vorst zorgt dit voor problemen. Daarom koos GM voor een zomerrit. Niet alleen de omstandigheden zijn van invloed op het uithoudingsvermogen van een auto, ook de berijders. Om een zo goed mogelijk beeld van de werkelijkheid te krijgen liet GM de waterstof-Zafira niet rijden door de eigen testchauffeurs, maar door lezers en journalisten van de Auto Bild-bladen. Daarom kwam het goed uit dat op de Hydrogen3 een systeem voor regeneratief remmen ontbreekt. GM wilde namelijk bewijzen dat de brandstofcel snel en adequaat kan reageren op belastingswisselingen en voldoende piekvermogen levert voor een vlotte acceleratie. Bij regeneratief remmen hoort een batterij om tijdelijk energie in op te slaan en als die aan boord is weet de rijdende lezer of journalist niet meer waar de elektronen vandaan komen, uit de brandstofcel of uit de batterij. Maar omdat een FCV niet op de motor kan remmen betekent dat wel een extra belasting voor de remmen. Om die reden is de Hydrogen3 uitgerust met met de grote remmen van de sportieve Zafira OPC. Dat bleek voldoende voor een veilige afdaling van de Brennerpas.

Isoleren met vloeibare lucht

Een volgend probleem is de waterstofopslag aan boord van de auto. "Daar liggen we 's nachts wakker van", bekent Hans Weidner van GM FCA. De marathon-Hydrogen3 heeft een tank

voor vloeibaar waterstof, die de interieurruimte van de Zafira vrijwel intact laat. Vrijwel, want de achterbank moest een tikkeltje (25 mm) omhoog. Daaronder is nu ruimte voor de opslag van 4,6 kg vloeibaar waterstof (goed voor 400 km). Met zijn 90 kg weegt de tank zelf aanzienlijk meer dan zijn inhoud. De oorzaak van dat overgewicht is de thermische isolatie van de tank. Waterstof kookt bij $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ en om het vloeibaar te houden mag de temperatuur in de tank niet boven die waarde uitkomen. Het alternatief tot nu toe is waterstof onder hoge druk op te slaan. Hoge druk betekent in dit geval maar liefst 700 bar. Zelfs onder die druk blijft waterstof gasvormig. En gas neemt nu eenmaal veel ruimte in. De Zafira Hydrogen3 in de uitvoering met gastank komt daardoor op een volle tank niet verder dan 270 km.

Voor zijn iets grotere actieradius betaalt de vloeistof-Zafira wel een forse prijs. Allereerst kost het veel energie om waterstof te koelen naar $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. Om één kilo waterstof op die temperatuur te krijgen is de energie uit 300 gram waterstof nodig. Bovendien verdampt waterstof als de tank opwarmt. Geen probleem als de auto rijdt en waterstof uit de tank verbruikt (vergeleijk het koud worden van het gasbusje van de campingbrander), wel als de auto niet gebruikt wordt. De druk in de tank loopt dan op zodat een overdrukventiel af en toe een waterstofscheet (boil-off in algemeen beschaafd Engels) moet laten om het exploderen van de tank te voorkomen. Wie zijn FCV met volle vloeibaarwaterstoftank parkeert, treft na drie weken een lege tank aan. Hendrik de Wit van Linde, de fabrikant van de tank, voorziet verbeteringen: "We werken aan een extra isolerende laag met vloeibare lucht erin. Het kookpunt van lucht ligt tussen de $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ en de $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pas als dat verdampt is, begint de opwarming van de laag eronder. Daardoor begint het afvoeren van waterstof uit zo'n tank pas na twee weken, tegen twee dagen voor de huidige tanks. Dat maakt vloeibaar gas niet alleen geschikt voor 'Fahrzeuge', maar ook voor 'Stehzeuge'." Voor de toekomst lijkt de opslag van waterstof in metaalhydridekristallen het meeste perspectief te bieden. Ook dan is een omvangrijke en zware tank nodig voor een beperkte hoeveelheid waterstof maar in ieder geval kan de vorm ervan vrij gekozen worden en zijn geen extreem



Opel bouwt de complete brandstofcelaandrijving samen als één module. Tijdens de productie wordt die module ingebouwd als ging het om het traditionele 'huwelijk' tussen carrosserie en motor/versnellingsbak. Hoewel de module onder de motor-kap past is hij met 75 x 70 x 55 cm duidelijk groter dan een traditionele aandrijving. Bovendien is hij met 300 kg ook nog eens 100 kg zwaarder. Daarom staat het overbodig maken van de grote gelijkstroomtrafo met stip bovenaan de to-do-lijstjes van de GM FCA-ingenieurs. Voorwaarde is wel dat de brandstofcel een spanning gaat leveren van tussen de 250 en 380 V in plaats van de huidige 125 tot 200 V.

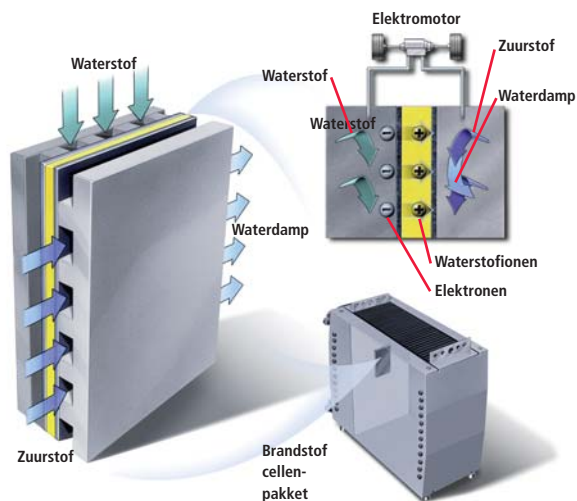
De techniek neemt in de waterstof-Zafira nauwelijks meer ruimte in dan in de benzine- en diesel-modellen. De tank dwingt de achterbank 25 mm omhoog en de ruimte voor het opbergen van de derde zitrij is verloren gegaan.

hoge drukken of lage temperaturen nodig. Weidner: "We werken daar op het moment hard aan en de resultaten zijn veelbelovend maar bij een duurtst als deze moet je niet alle nieuwe technieken tegelijk willen proberen."

Betaalbare FCV in 2010

En dan is er de prijs. De Zafira Hydrogen3 wordt in een hele kleine serie gebouwd. Enkele auto's voor een demonstratieproject in Washington, een paar voor koerier Fedex in Tokyo en zo nog een stuk of wat auto's. Dat maakt een goede kostprijsberekening lastig. Voor wat het waard is zoemt een bedrag van 800.000 euro per stuk rond. Belangrijker is dat GM denkt dat het in staat is om bij een productie van 100.000 stuks de complete brandstofcelaandrijflijn te produceren voor \$ 50.000,-, dat is ruim \$ 500,- per kW motorvermogen. Een benzine- of dieselmotor kost tussen de 30 en 70 dollar per kW. Omdat de autofabrikant weet dat de gemiddelde autoconsument nauwelijks bereid is extra in de buidel te tasten voor milieuvriendelijkheid is het doel om in kleine stapjes op datzelfde niveau te komen. Bijvoorbeeld door de titanium bipolaire platen uit de brandstofcel te vervangen door roestvaststalen exemplaren of door een brandstofcel met een hoger outputvoltage te produce-

De elektriciteit voor de aandrijving van de Hydrogen3 wordt opgewekt in een metalen doos van 472 x 251 x 496 mm. In die doos zit een pakket van 200 brandstofcellen. Iedere cel bestaat uit vijf lagen. De middelste is het PEM-membraan, dat wel protonen (waterstofionen) maar geen elektronen doorlaat. Daar tegenaan zitten twee katalytische lagen. Aan de ene zijde de anode, waaraan waterstofionen en elektronen worden gesplitst, aan de andere zijde de kathode, waaraan uit zuurstof, waterstofionen en elektronen (die via de elektromotor van anode naar kathode zijn gegaan) water wordt gevormd. De buitenzijde van iedere cel wordt gevormd door twee bipolaire platen. De een geeft waterstof toegang tot de anode, de ander laat zuurstof (lucht) toe tot de kathode. Beide zijn voorzien van koelvloeistofkanalen omdat bij het proces niet alleen elektrische stroom wordt opgewekt maar ook warmte vrijkomt.



- 1=Luchtcompressor
- 2=Gelijkstroomtrafo
- 3=Luchtfiler
- 4=Brandstofcellenpakket
- 5=Stuurbekrachtigingspomp
- 6=Brandstofcelbevochtigingspomp
- 7=Koelvloeistofpomp
- 8=Radiator
- 9=Elektromotor
- 10=Compressor Airco

- 11=Coaxiale vulhals
- 12=Gelijkstroomtrafo 42 V
- 13=Gelijkstroomtrafo 12 V
- 14=12 V accu
- 15=Katalytische verbrander (voor verbranding boil-off waterstof)
- 16=Tankmanagement systeem
- 17=Elektrisch bediende handrem
- 18=Vloeibaarwaterstoftank

ren zodat de DC/DC-converter, die bovenop de aandrijfmodule staat, overbodig wordt. Dankzij deze en andere aanpassingen hoopt GM in 2010 een FCV te kunnen produceren met een aantrekkelijke consumentenprijs.

Overall waterstof

Een aantrekkelijk geprijsde FCV is mooi, maar zonder betaalbare en overall verkrijgbare waterstof zullen er niet veel verkocht worden. "Allereerst moet je je realiseren dat waterstof op dit moment absoluut geen zeldzaam product is. Jaarlijks wordt er in Europa 4,5 miljoen ton van gebruikt. Bovendien zijn er nog allerlei productieprocessen waarbij waterstof vrijkomt als bij-

product. Dat gaat in Europa ook nog eens om 1,8 miljoen ton per jaar. Als we daarvan de helft zouden kunnen gebruiken, konden er 4,5 miljoen auto's op rijden", rekt Weidner voor. Nog meer sommetjes: "In de 25 EU-landen zijn 135.000 tankstations. Om 10% daarvan geschikt te maken voor waterstof zou je 10 tot 12 miljard euro uit moeten trekken. Veel geld? Het is maar hoe je het bekijkt, op de totale begroting van de EU is het een schijntje." Dat mag zo zijn, ook 10% van de stations is nog maar een schijntje. Uit onderzoek onder consumenten van GM blijkt dat een alternatieve brandstof pas aantrekkelijk kan zijn, als hij op tenminste 15 à 20% van de tankstations verkrijgbaar is. Het gevolg is dat er hoe dan ook een aanloopperiode nodig is met te weinig FCV's voor teveel waterstoftankstations. Die zullen dan veel geduld moeten hebben, voor hun investeringen gaan renderen. In verkorten van die terugverdientijden ziet GM een mooie taak voor de Europese overheid.