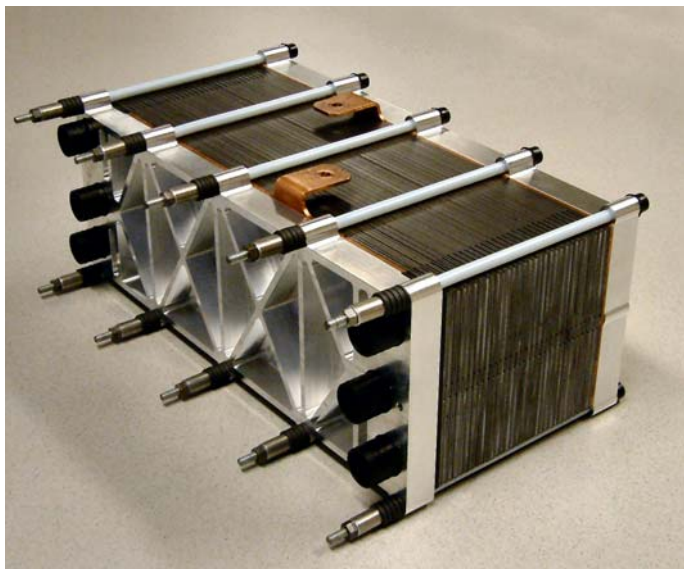


Brandstofcellen en waterstof



Een 'stack' van brandstofcellen. [Klik hier](#) voor uitgebreide beschrijving.

1. Hoe werken brandstofcellen?

Elektrochemische reactie

Een brandstofcel produceert elektriciteit via een elektrochemische reactie tussen een brandstof en zuurstof. De meest gebruikte brandstof is waterstof. Het elektrisch rendement ligt dan in de orde van 50 tot 60 procent. De rest van de energie komt vrij in de vorm van warmte op een temperatuur van ongeveer 70 °C. Bij de reactie komen geen emissies vrij; het enige product van de reactie is water.

Waterstof als energiedrager

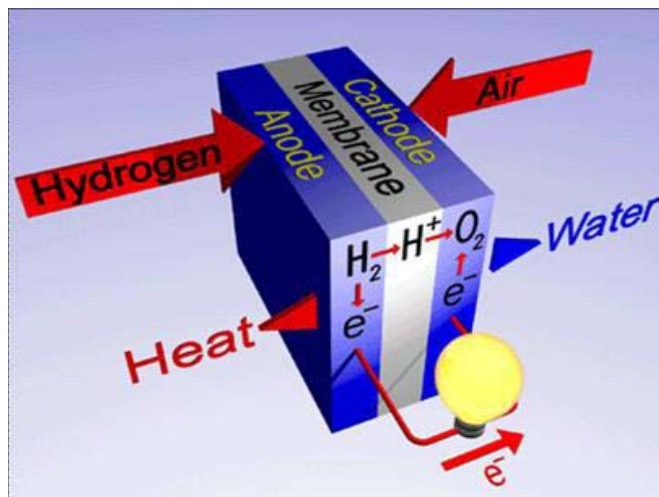
Waterstof is geen energiebron, maar een energiedrager. Waterstof komt niet in vrije vorm voor in de natuur en moet worden geproduceerd uit een energiebron, net zoals benzine en elektriciteit. Waterstof kan worden geproduceerd uit koolwaterstoffen, zoals aardgas, aardolie, steenkool en biomassa. In de industrie wordt waterstof op het ogenblik vooral geproduceerd uit aardgas. Het wordt gebruikt voor kunstmest en voor de productie en ontzwaveling van benzine, diesel en andere brandstoffen uit ruwe olie. De hoeveelheid waterstof die nu in het Rijnmondgebied geproduceerd wordt is voldoende om een groot deel van de Nederlandse auto's op waterstof te laten rijden.

Elektrolyse

Waterstof kan ook worden geproduceerd door water te splitsen met behulp van elektriciteit. Dit proces, elektrolyse, is precies het omgekeerde proces dat in de brandstofcel plaatsvindt. Elektrolyse is nu vooral geschikt voor kleinschalige productie van zuivere waterstof, omdat het nog relatief duur is. Grootschalige productie is aantrekkelijk als goedkope elektriciteit beschikbaar is.

Voertuigen

De verwachting is dat brandstofcellen in de toekomst vooral worden gebruikt in voertuigen. Bijvoorbeeld personenauto's, kleine vrachtwagens, stadsbussen, vorkheftrucks en rondvaartboten. Ze produceren dan elektriciteit, die een elektromotor aandrijft waarop het voertuig kan rijden. Alleen voor toepassingen als internationaal vrachtverkeer, vliegtuigen of zeeschepen zijn brandstofcellen minder geschikt. Hiervoor is de hoeveelheid energie die in de vorm van waterstof kan worden meegenomen veelal niet toereikend.



De brandstofcel heeft twee elektroden met daartussen een elektrolyt. Waterstof stroomt langs de ene kant van de brandstofcel, de anode, en wordt daar met behulp van een katalysator gesplitst in twee protonen en twee elektronen. De elektrolyt geleidt de protonen naar de andere kant van de brandstofcel, de kathode. De elektronen kunnen niet door de elektrolyt en worden buitenom geleid. Deze stroom elektronen levert de elektrische energie. Aan de kathodekant van de brandstofcel reageren de protonen met zuurstof uit de lucht en twee elektronen tot water, het restproduct van de reactie.



Stationaire toepassingen

Behalve in voertuigen worden brandstofcellen ook ingezet op locaties die geen toegang tot het elektriciteitsnet hebben. Bijvoorbeeld doordat er een storing in het elektriciteitsnet is, of omdat de toepassing zich op een verafgelegen, moeilijke bereikbare plek bevindt waar geen elektriciteitsnet aanwezig is. In het eerste geval wordt gesproken van 'back-up power' systemen, in het tweede van 'remote power' systemen.

Warmtekrachtinstallaties

Een derde mogelijke toepassing van brandstofcellen zijn kleinschalige warmtekrachtinstallaties in woningen en gebouwen. Deze zetten aardgas om in elektriciteit en gebruiken de warmte die daarbij vrijkomt voor de verwarming van woonvertrekken en water. In het geval van brandstofcellen moet de installatie ook beschikken over een zogenoemde 'fuel processor' die eerst waterstof produceert uit aardgas.

Toekomstige toepassingen

In de toekomst kan waterstof ook worden gebruikt om tijdelijk overschotten aan duurzame elektriciteit uit zon en wind op te slaan. Deze elektriciteit wordt dan gebruikt voor productie van waterstof uit water, via elektrolyse. Op momenten dat er te weinig zon of wind is, wordt de waterstof weer omgezet naar elektriciteit met behulp van brandstofcellen.

2. Hoe dragen brandstofcellen bij aan het bestrijden van klimaatverandering?

De brandstofcel in combinatie met waterstof biedt een van de meest realistische opties voor schone aandrijving van auto's en andere voertuigen. Daardoor zou de hoeveelheid CO₂ die als gevolg van verkeer en vervoer in de atmosfeer belandt flink kunnen worden teruggedrongen. Voertuigen die op waterstof rijden, produceren alleen zuiver water. Zelfs bij de productie van waterstof uit aardgas zonder CO₂-afvang is de emissie, berekend over de totale keten, al de helft minder dan die van voertuigen op benzine. Wanneer CO₂ wordt afgevangen, of wanneer waterstof bijvoorbeeld uit biomassa wordt gewonnen, of uit water met behulp van duurzame elektriciteit, dan loopt de reductie verder op van 80 procent tot meer dan 90 procent.

3. Wat zijn voordelen, nadelen en risico's van waterstoftechnologie?

Voordelen

- Waterstof in combinatie met brandstofcellen biedt goede vooruitzichten op een breed scala van elektrisch aangedreven voertuigen die qua gebruiksgemak in veel opzichten vergelijkbaar zijn met de huidige auto's. Deze auto's stoten geen schadelijke verontreinigingen uit. De technologie kan zo een grote bijdrage leveren aan verbetering van de luchtkwaliteit, vooral in steden en dichtbebouwde gebieden. Bijkomend voordeel van elektrisch aangedreven auto's is dat ze stil zijn en dus ook de geluidshinder terugdringen.
- Vervanging van benzine en diesel door waterstof draagt bij aan vermindering van onze afhankelijkheid van aardolie. Waterstof kan in principe met behulp van elke energiebron worden geproduceerd. Dit biedt flexibiliteit voor de toekomst en draagt zo ook bij tot verbetering van de energievoorzieningszekerheid.
- Door de brede toepasbaarheid en de vele mogelijkheden om waterstof met geringe CO₂-emissie te produceren, biedt waterstof in combinatie met brandstofcellen uitzicht op vergaande reductie van de CO₂-emissie die samenhangt met wegverkeer.
- Waterstof kan worden gebruikt voor het opslaan van duurzame energie uit fluctuerende bronnen, zoals zon of wind. Dit maakt dat ze beter inpasbaar zijn in de energievoorziening en biedt interessante mogelijkheden voor optimalisatie in combinatie met gebruik van waterstof als brandstof voor voertuigen.



Productie van elektriciteit op basis van waterstof en brandstofcellen bij AKZO Nobel in Delfzijl. De gebruikte waterstof is een bijproduct van de chloorfabricage. De geproduceerde elektriciteit wordt weer gebruikt in het proces.



Nadelen

- Van alle brandstoffen heeft waterstof de hoogste energie-inhoud per eenheid gewicht, maar het heeft bij standaardcondities helaas een lage energie-inhoud per eenheid volume. Om voldoende energie in een beperkt volume in een voertuig mee te kunnen nemen, moet waterstof daarom sterk worden gecompriëerd of vloeibaar worden gemaakt. Dit kost relatief veel energie.
- Zuiver waterstof is een volledig nieuwe energiedrager. Er is daarom nog geen infrastructuur voor distributie van waterstof naar de consument. Dit vormt een extra drempel voor toepassing van waterstoftechnologie in consumentenproducten. Zo lang er nog geen grote aantallen voertuigen beschikbaar zijn, heeft het geen zin om op ieder tankstation waterstof aan te bieden. Omgekeerd zullen er geen grote aantallen voertuigen op de weg komen als waterstof slechts beperkt beschikbaar is. Succesvolle introductie is daarom sterk afhankelijk van een goede coördinatie van beleid voor zowel toepassingen als bijbehorende infrastructuur.

Risico's

Waterstof is een brandstof, en dat brengt altijd risico's met zich mee. Waterstof levert niet per definitie meer of minder risico's op dan aardgas, benzine of diesel; wel andere.

- Ten opzichte van de andere brandstoffen vormt waterstof over een groter concentratiegebied een brandbaar mengsel met lucht. De hoeveelheid energie die nodig is om een brandbaar mengsel te onsteken, is iets kleiner dan voor de andere brandstoffen. Daar staat tegenover dat waterstof een heel licht gas is, dat snel opstijgt en zich ook snel in de lucht verspreidt. Hierdoor is de kans klein dat er een grote hoeveelheid brandbaar mengsel wordt gevormd.
- Pure waterstof brandt met een onzichtbare vlam. Daarbij komt minder hittestraling vrij dan bij de vlammen van andere brandstoffen. De schade zal hierdoor ook minder zijn. Aan de andere kant zal een brand minder snel worden waargenomen, vooral overdag. Hierdoor wordt de kans groter dat mensen ongemerkt met een vlam in aanraking komen.
- Waterstof is niet giftig, kleurloos en geurloos. Toevoegen van een geurstof zoals wordt gedaan bij aardgas is lastig bij gebruik van brandstofcellen, omdat die stoffen de werking van de brandstofcellen nadelig kunnen beïnvloeden. Er moeten daarom

nieuwe en gevoelige sensoren worden ontwikkeld om een lekje in een vroegtijdig stadium te kunnen detecteren.

- Op weg naar een volledig duurzame energievoorziening kan er ruimte zijn voor productie van waterstof uit fossiele bronnen, zelfs zonder afvang en opslag van CO₂. Dit vormt echter een risico voor schade aan het imago van schone brandstof door ongenueanceerde publiciteit en kan zo introductie en acceptatie van waterstof bij overheid en publiek bemoeilijken.

3. Wat is de publieke perceptie van waterstoftechnologie?

Onderzoek naar perceptie en acceptatie bij praktijktests met waterstofauto's en bussen laat tot nu toe het volgende beeld zien:

- De steun voor waterstof en brandstofcellen is hoog. Passagiers van bussen stelden het bijvoorbeeld op prijs dat de bussen een stuk stiller zijn, soepel rijden en niet stinken.
- Mensen hebben geen bezwaren tegen de introductie van waterstof en brandstofcellen, maar geven tegelijkertijd aan meer informatie nodig te hebben om tot een definitief oordeel te kunnen komen.
- De term waterstof levert verschillende associaties op. Zowel positief (milieuvriendelijk, schoon), als negatief (waterstofbom, explosief).



Waterstofbus in Amsterdam als onderdeel van het Europese CUTE-project. Bussen zijn een goede 'early market'. Ze vergen geen uitgebreide tankinfrastructuur en brengen een groot publiek in aanraking met waterstof en brandstofcellen.



4. Wat is het perspectief voor brandstofcellen?

Korte en middellange termijn

Waterstof en brandstofcellen kunnen voor een aantal toepassingen nu al rendabel zijn. Ze vervangen dan vaak accu's, zoals noodstroomvoorziening, 'remote-power', elektrische vorkheftrucks en andere voertuigen die 24 uur per dag ingezet worden. Naar verwachting zal de technologie in de loop van het volgende decennium ook betaalbaar wordt voor toepassingen met meer omvang, zoals stadsbussen en auto's.

Een groot marktaandeel wordt mogelijk op de middellange termijn. Dan zou dankzij waterstoftechnologie het huidige brandstofverbruik met bijbehorende CO₂-emissies en luchtverontreiniging met vele tientallen procenten kunnen worden teruggedrongen ten opzichte van 2009.

Rol overheid

Of waterstoftechnologie daadwerkelijk op grote schaal kan worden toegepast, hangt nu nog af van verdere verbetering van de technologie (zie onder). Vanaf ongeveer 2015 - 2020 zal het overwegend bepaald worden door overheidsbeleid. Blijven emissies van CO₂, fijnstof en stikstofoxiden onbelast en wordt de voorzieningszekerheid die waterstof biedt niet gewaardeerd, dan zal het marktaandeel van waterstof laag blijven. Komt er een gunstig klimaat voor schone voertuigen, dan kan rond 2050 tussen de 50 en 70 procent van alle voertuigen op waterstof rijden. Voorwaarde is wel dat overheid, auto-industrie en energiebedrijven tijdig beginnen met het plannen van een gecoördineerde introductie en groei van waterstof in het energiesysteem.

5. Hoe staat het nu met de toepassing van brandstofcellen?

Auto's

In het eerste decennium van de 21-ste eeuw heeft waterstoftechnologie zich flink ontwikkeld. Nu rijden er elektrisch aangedreven personenauto's met brandstofcellen op waterstof rond die in vele opzichten vergelijkbaar zijn met de huidige auto's: maximumsnelheid 160 kilometer per uur, een actieradius van meer dan 600 kilometer en een tanktijd van slechts enkele minuten. De techno-

logie is nu zo compact dat de ruimte voor passagiers en bagage onaangetast blijft. Als gevolg van deze technologiesprong produceren autofabrikanten nu niet alleen meer prototypen, maar zijn ze overgestapt op productie van kleine series brandstofcelauto's, die uitvoerig onder uiteenlopende condities in de dagelijkse praktijk worden getest. Wereldwijd rijden er op dit moment enkele honderden auto's rond op brandstofcellen; de meeste in en rond de steden Tokio, Berlijn en Los Angeles.

Kleinschalige warmtekrachtkoppeling

In Japan worden praktijktesten uitgevoerd met ongeveer 2200 warmtekrachteenheden voor huishoudens. Deze hebben een elektrisch vermogen van 1 kW. Er worden verschillende brandstoffen getest die in de eenheden met behulp van een 'fuel processor' worden omgezet naar waterstof. Ongeveer de helft maakt gebruik van aardgas. Hoewel op kleinere schaal, is ook in Denemarken veel aandacht voor micro-warmtekracht. Er zijn projecten met enkele tientallen systemen. Daarbij wordt ook waterstof als brandstof gebruikt. De waterstof wordt aangevoerd via een lokaal leidingnet, dat wordt gevoed door elektrolyzers die waterstof produceren uit water met behulp van elektriciteit. Denemarken beschouwt dit als een belangrijke optie om het aandeel windenergie in de energievoorziening verder op te kunnen voeren.



De purity generator van de firma Bredenoord is een mobiele generator op basis van brandstofcellen en waterstof, die zorgt voor milieuvriendelijke, geluidsarme elektriciteitsproductie op locatie.

Nichemarkten

In sommige nichemarkten, zoals noodstroomvoorziening en vorkheftrucks, kunnen brandstofcellen op waterstof in aanschaf- en onderhoudskosten nu al concurreren met bestaande technologie. Dit geldt ook voor rondvaartboten in steden die een stringent anti-vervuilingsbeleid voeren.

6. Wat zijn de uitdagingen voor waterstoftechnologie op dit moment?

Technologie

De technologie in brandstofcellen heeft zich bewezen. Nu gaat het er om haar robuuster en betrouwbaarder te maken en de productiekosten naar beneden te brengen.

Infrastructuur

Studies tonen aan dat een samenhangende planning van waterstofvoertuigen en waterstoftankstations het beste perspectief biedt: rond een tankstation met een waterstofvoorziening zouden zoveel mogelijk waterstofvoertuigen moeten rijden om het tankstation rendabel te maken. Tussen deze clusters kunnen corridors worden aangelegd en van daaruit kan het netwerk langzaam groeien.

Beleid

Hoewel de ontwikkeling van waterstof en brandstofcellen snel vordert en toepassingen beschikbaar komen, worden waterstof en brandstofcellen nog steeds gezien als iets voor de verre toekomst. Daarom is het een uitdaging om waterstof op de agenda te krijgen van overheden. Er is niet alleen beleid nodig voor de toepassingen, maar ook voor de bijbehorende infrastructuur.



Waterstof kan worden geïntegreerd in bestaande tankstation. Tanken duurt niet veel langer dan we gewend zijn en is vergelijkbaar met tanken van LPG en CNG (aardgas).



7. Wat doet ECN?

R&D Brandstofcellen

ECN levert een bijdrage aan de verdere technologische ontwikkeling van brandstofcellen. Deze bestaat voor een belangrijk deel uit materiaalonderzoek: het verbeteren van de materiaaleigenschappen of het toepassen van nieuwe materialen. Om de effectiviteit van deze materialen te testen past ECN ze toe in brandstofcelcomponenten, zoals stacks. Deze worden worden op hun beurt verwerkt in systemen voor scooters, bedrijfsvoertuigen en microwarmtekrachtinstallaties, die in de praktijk worden beproefd. De ervaringen uit de praktijk worden weer gebruikt om het materiaalonderzoek een nieuwe impuls te geven.

Onderzoek infrastructuur

ECN doet onderzoek naar de energie- en milieuaspecten van verschillende opties voor de waterstofinfrastructuur en wat daarvoor een effectieve opbouw is.

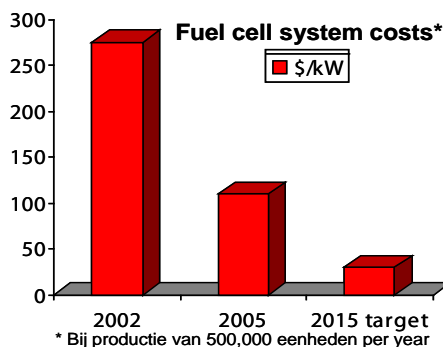
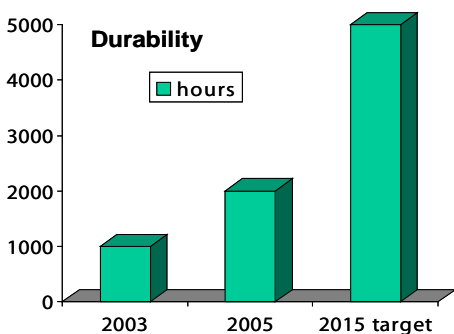
Beleid

ECN heeft ook de expertise in huis om de beleidsmatige kant van het omschakelen naar brandstoftechnologie te verkennen. Wat zijn effectieve instrumenten om deze te ondersteunen en te stimuleren?

Samenwerking

Om schaalvoordelen te behalen en van elkaar te leren, hebben partijen die een belangrijke rol voor waterstof zien, zich verenigd in verschillende samenwerkingverbanden. Een daarvan is de Nederlandse Waterstofcoalitie DutchHy. Binnen dit verband trekken een aantal grote steden samen op met ontwikkelaars van technologie en toepassingen en leveranciers van waterstof, om waterstof en brandstofcellen in Nederland op een hoger plan te krijgen. ECN levert de voorzitter voor de coalitie.

Voor meer informatie over wat ECN doet op het gebied van brandstofcellen [klikt u hier](#).



De ontwikkeling van brandstofcellen voor waterstof vordert snel. (bron: Chalk et al., Fuel Cell Seminar 2006)