



Bridge between research in modern physics
and entrepreneurship in nanotechnology

Kwantumfysica

De fysica van het allerkleinste met grootse toepassingen

Deel 2

KWANTUMEIGENSCHAPPEN & TECHNOLOGIE

Leerstation XII:

Biobrandstofcel



Quantum Spin-Off is funded by the European Union under the LLP Comenius programme
(540059-LLP-1-2013-1-BE-COMENIUS-CMP).

Renaat Frans, Laura Tamassia, Erica Andreotti

Contact: renaat.frans@ucll.be



Lifelong
Learning
Programme

Dit materiaal reproduceert alleen de mening van de auteur en de Commissie kan niet verantwoordelijk worden gesteld voor het gebruik van de informatie die het materiaal bevat.

LEERSTATION XII: BIOBRANDSTOFCEL

| | |
|--|-----------|
| Inleiding | 3 |
| 1. Het basisprincipe van de biobrandstofcel en diens toepassingen | 3 |
| 1.a Potentiële toepassingen van de biobrandstofcel..... | 4 |
| 2. Celademhaling | 5 |
| 3. Elektrochemie en bio-elektrochemie | 7 |
| 3.a Redoxreacties..... | 7 |
| 3.b Elektrochemie..... | 8 |
| 3.c Bio-elektrochemie | 9 |
| 4. Nanogestructureerde materialen voor de biobrandstofcel | 10 |
| 4.a Over nanogestructureerde materialen | 10 |
| 4.b Nanocomposietmaterialen voor de biobrandstofcel | 11 |
| 5. Effectiviteit van de biobrandstofcel | 12 |
| 6. Biobrandstofcel met gemakkelijk te krijgen materialen | 15 |
| 7. Concepten in leerstation XII | 16 |

Naamsvermelding-NietCommercieel-GelijkDelen 4 Internationaal (CC BY-NC-SA 4.0)

Onder de volgende voorwaarden:



- Naamsvermelding - U dient de maker van het werk te vermelden, een link naar de licentie plaatsen en [aan te geven of het werk veranderd is](#). U mag dat op redelijke wijze doen, maar niet zodanig dat de indruk gewekt wordt dat de licentiegever instemt met uw werk of uw gebruik van het werk.
- NietCommercieel - U mag het werk niet gebruiken voor [commerciële doeleinden](#).

U mag:

- Delen - het materiaal kopiëren, verspreiden en doorgeven via elk medium of bestandsformaat
- Aanpassen - het materiaal remixen, veranderen en afgeleide werken maken.

De vergunninggever kan deze vrijheden niet intrekken mits de voorwaarden van de vergunning worden nageleefd.

U dient als volgt aan dit werk refereren:

Tamm, T. (2015) Quantum SpinOff Leerstation: Biobrandstofcel Instituut voor Technologie, universiteit van Tartu.

VERTAALD DOOR:



www.scientix.eu

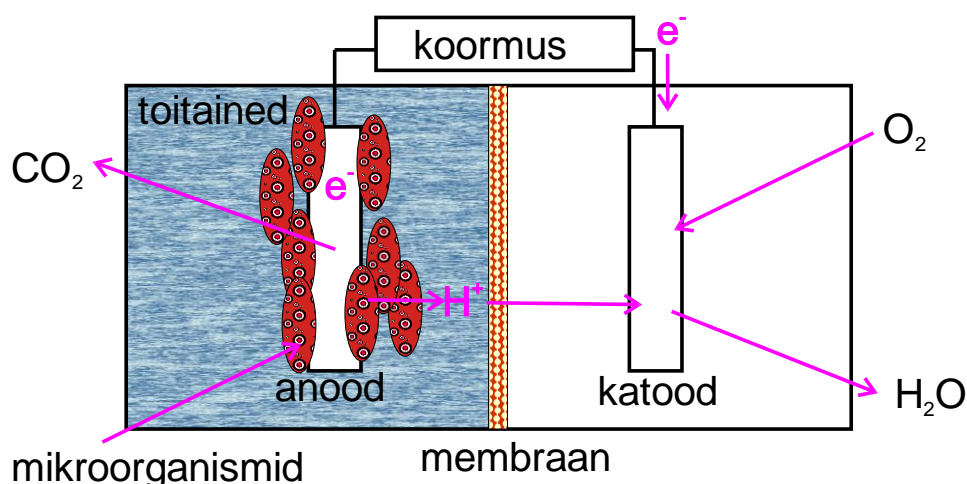
Inleiding

Het doel van dit leerstation is om basiskennis op verschillende gebieden te introduceren die zal helpen inzicht te bieden in de basisprincipes van biobrandstofcellen, en leerlingen in staat zal stellen om een biobrandstofelement te maken met gemakkelijk verkrijgbare materialen. Dit leerstation vertegenwoordigt recente prestaties op dit gebied, naast de theorie achter biobrandstofcellen. Fenomenen begrijpen die vaak onbekend blijven of weinig interessant is de sleutel tot het bouwen van een heus apparaat. Vanuit een breder perspectief kan dit materiaal daarom de interesse van leerlingen in wetenschap, techniek en praktijkgerichte activiteiten aanwakkeren, terwijl het hun eveneens laat nadenken over hoe dingen werken. Het leerstation bestaat uit verschillende onderling verbonden maar aparte modules, aangezien het biobrandstofelement gebaseerd is op fenomenen uit verschillende gebieden.

Allereerst zullen we de basiswerking van het biobrandstofelement introduceren, waarna we zullen onderzoeken wat het effectief maakt. Hiervoor dienen we de basisprincipes van verschillende vakgebieden onderzoeken: Voor de eerste achtergrondkennis zullen we kijken naar de processen die plaatsvinden in cellen, met een focus op celademhaling en celmetabolisme. Hierna zullen we de energie-inhoud van organische materialen bestuderen en hoe hieruit energie opgewekt kan worden. We zullen daarna kennismaken met elektrochemische processen, inclusief de processen die plaatsvinden in de natuur. Tot slot zullen we leren welke materialen gebruikt kunnen worden om een biobrandstofcel te bouwen en ook leren over de hedendaagse stand van zaken op dit gebied.

1. Het basisprincipe van de biobrandstofcel en diens toepassingen

In de meest algemene zin is het basisprincipe van de biobrandstofcel dat de elektronen voorgebracht door micro-organismen gevangen worden in een apparaat, dat daardoor elektriciteit/energie voortbrengt uit de brandstofcel. Micro-organismen doen energie op door verschillende processen van oxidatie en reductie uit te voeren, gedurende welke de chemische energie van de stoffen (gedeeltelijk) wordt omgezet in elektriciteit. Door organische stoffen te oxideren extraheren de micro-organismen elektronen. In de natuur worden de elektronen die vrijkomen daarna geconsumeerd tijdens andere processen. Het idee achter biobrandstofcellen is dat deze elektronen gevangen worden op een elektrode (anode), waarvandaan zij verhuizen naar een stroomkring zodat hun energie gebruikt kan worden om een elektronisch apparaat aan te drijven. De elektronen bewegen zich daarna naar de tegenovergestelde elektrode (kathode), waar een zeker reductieproces plaats zal vinden (normaliter de reductie van zuurstof). Naast de elektronen moeten de protonen, die ook verschijnen tijdens de oxidatie en die gebruikt worden tijdens de reductie, ook van de ene elektrode naar de andere elektrode circuleren. Normaliter worden de protonen begeleid naar de tegenovergestelde elektrode middels een protongeleidende membraan.



Afbeelding 1. Basisschema van een biobrandstofcel

De mogelijkheid van micro-organismen om energie op te wekken werd, vergelijkbaar met vele andere interessante fenomenen in de moderne wetenschap, vele jaren geleden ontdekt. Het was reeds in 1911 dat M. Potter erin slaagde elektriciteit op te wekken uit de *E. Coli*. Desalniettemin verstreken er vele jaren voordat het basisprincipe van de biobrandstofcel volledig begrepen en onderzoek op dit gebied doelgericht werd. Het werk van H. P. Bennetto in de vroege jaren tachtig van de vorige eeuw droeg veel bij aan de transformatie van de biobrandstofcel van een excentriek onderzoeksobject naar een apparaat met een daadwerkelijk praktisch belang.

1.a Potentiële toepassingen van de biobrandstofcel

Er wordt vaak aan de biobrandstofcel gerefereerd als een belangrijke alternatieve energiebron voor de toekomst, maar een grote hoeveelheid tijd en onderzoek zijn nog nodig voordat dit een realiteit zal worden. Tot dan kunnen we een aantal specifiekere toepassingen van de biobrandstofcel bespreken. Een paar realistischere toepassingen zouden de volgende kunnen zijn:

1) Behandeling van rioolwaterzuivering: Een van de voordelen van micro-organismen is hun duale functie; behalve het produceren van energie zuiveren ze ook water. Verwacht wordt dat micro-organismen bijzonder bruikbaar zullen worden bij het zuiveren van rioolwater veroorzaakt door de landbouw en voedselindustrie, dat grote hoeveelheden organisch materiaal bevat. De voornaamste functie van de biobrandstofcellen zou zijn om energieverbruikende rioolwaterzuiveringinstallaties uit te balanceren.

2) Energietoevoer voor onderzeeërs of toezicht op afstand: Dankzij technologische ontwikkelingen verbruiken moderne apparaten nu minder energie. Verschillende autonome sensoren die bijvoorbeeld de staat van het milieu in de gaten houden worden vaak geplaatst op locaties die moeilijk te bereiken zijn, hetgeen het verwisselen van batterijen in deze sensoren een gecompliceerde taak maakt. De mogelijkheid van biobrandstofcellen om lokaal organisch materiaal te gebruiken als brandstof zou perfect zijn in deze situatie, aangezien weinig energie gecompenseerd wordt door de mogelijkheid om energie op te slaan in batterijen of supercondensatoren, om gebruikt te worden wanneer nodig. Sommige sensorsystemen die biobrandstofcellen gebruiken



Afbeelding 2. Autonome robot gebaseerd op de EcoBot III biobrandstofcellen (Bron:

functioneren al meer dan vijf jaar constant, hetgeen een zeer positief resultaat is vergeleken met alternatieve oplossingen.

3) Methaan of waterstof produceren: Als er anaerobe condities zijn in de kathoderuimte is het mogelijk, afhankelijk van de condities en ten koste van het verlagen van de haalbare klemspanning, voor de kathode om methaan of waterstof te produceren, die verzameld kan worden en gebruikt als brandstof. Een dergelijk multifunctioneel systeem wordt ook wel een biobrandstofreactor genoemd.

4) Autonome robots: Het gebruiken van biobrandstofcellen als een energiebron voor autonome robots is een algemeen onderzoeksonderwerp. Waarschijnlijk één van de meest geavanceerde systemen tot dusver is de EcoBot reeks, waarvan de derde generatie in 2010 ontwikkeld werd (zie ook afbeelding 2). De vierde generatie van deze robot is op dit moment in ontwikkeling. De energietoevoer voor de robot is gewaarborgd door een accu die bestaat uit 48 biobrandstofcellen. Naast andere kwaliteiten die hij heeft, was de robot in staat zijn eigen voedsel te vinden. Details over het project met de autonome robot kunnen gevonden worden op de homepage van het Bristol Robotics Laboratory (in het Engels):

<http://www.brl.ac.uk/researchthemes/bioenergysustainable/ecobotprojectoverview.aspx>.

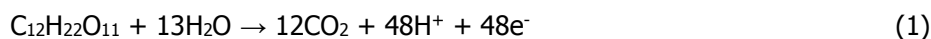
Meer informatie over het verbeteren van de capaciteit van biobrandstofcellen kan gevonden worden in het volgende overzicht (in het Engels): <http://link.springer.com/article/10.1007/s00253-009-2378-9> (B.E. Logan. *Scaling up microbial fuel cells and other bioelectrochemical systems*. Applied Microbiology and Biotechnology 85(6), 2009, 1665-71).

2. Celademhaling

Net als elk ander levend organisme hebben microben energie nodig om te groeien, te ontwikkelen en eenvoudigweg te bestaan. Om energie op te doen hebben organismen een gepaste leefomgeving en voedingsstoffen nodig, maar ook een elektronenacceptator die elektronen accepteert die vrijkomen tijdens de oxidatieprocessen. De basis voor het ademen voor planten en dieren is zuurstof, hetgeen de laatste (ontvangende) link is in de meertraps transmissieketen van de elektron. Met andere woorden, zuurstofreductie is een proces waarbij een surplus aan elektronen in het organisme uiteindelijk geconsumeerd worden. Het energiesysteem van bacteriën is aanzienlijk flexibeler: Verschillende bacteriën kunnen uiteenlopende elementen gebruiken als een elektronenacceptator, zoals zwavel of één van de vele samenstellingen, verschillende stikstofsamenstellingen en in sommige gevallen zelfs metaalsamenstellingen met hogere oxidatieniveaus. Dit aanpassingsvermogen stelt bacteriën in staat om te leven in omgevingen, zelfs anaerobe omgevingen, waarin hogere organismen niet in staat zijn te overleven. Daarnaast zijn bacteriën in staat om zich aan te passen aan onstabiele of veranderende condities en gebruiken ze optimale processen in elke situatie. Een aerob (op zuurstof gebaseerd) metabolisme is veel efficiënter en daarom geven bacteriën er de voorkeur aan om, indien mogelijk, aerobe processen te gebruiken om energie op te wekken.

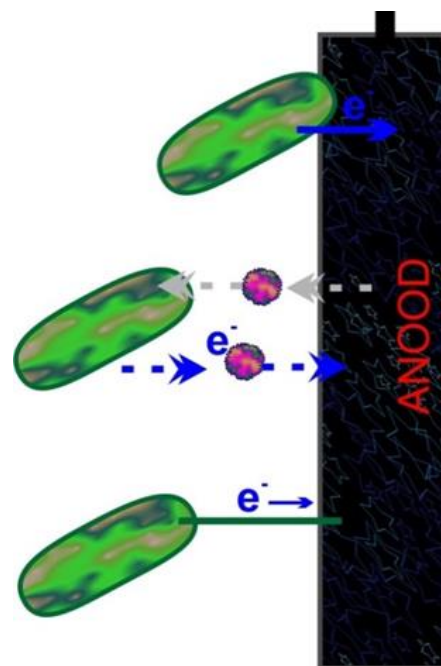
Wanneer er in de omgeving geen geschikte elektronenacceptatoren zijn kunnen sommige bacteriën (maar ook gistschimmels) een minder efficiënt alternatief gebruiken om energie op te wekken: fermentatie. Bij fermentatie wordt de geschikte elektronenacceptator gevonden in de cel. Bijvoorbeeld, melkzuurbacteriën verkrijgen energie door het fermenteren van lactose en het resultaat van het proces is melkzuur. In het dagelijks leven komen we dit fenomeen tegen wanneer melk schift, bedoeld of onbedoeld.

Celademhaling is een reeks metabolische reacties en processen die plaatsvinden in de cel. Het resultaat van deze processen is dat de biochemische energie van voedingsstoffen omgezet wordt in energie die opgeslagen wordt in adenosinetriphosfaat (ATP), en de geproduceerde overblijfselen worden vrijgegeven. Celademhaling is over het algemeen exotherm, hetgeen betekent dat er warmte vrijkomt. Anaerobe celademhaling, waarbij energie geproduceerd wordt uit suiker, wordt beschreven in de onderstaande reactievergelijking (1):



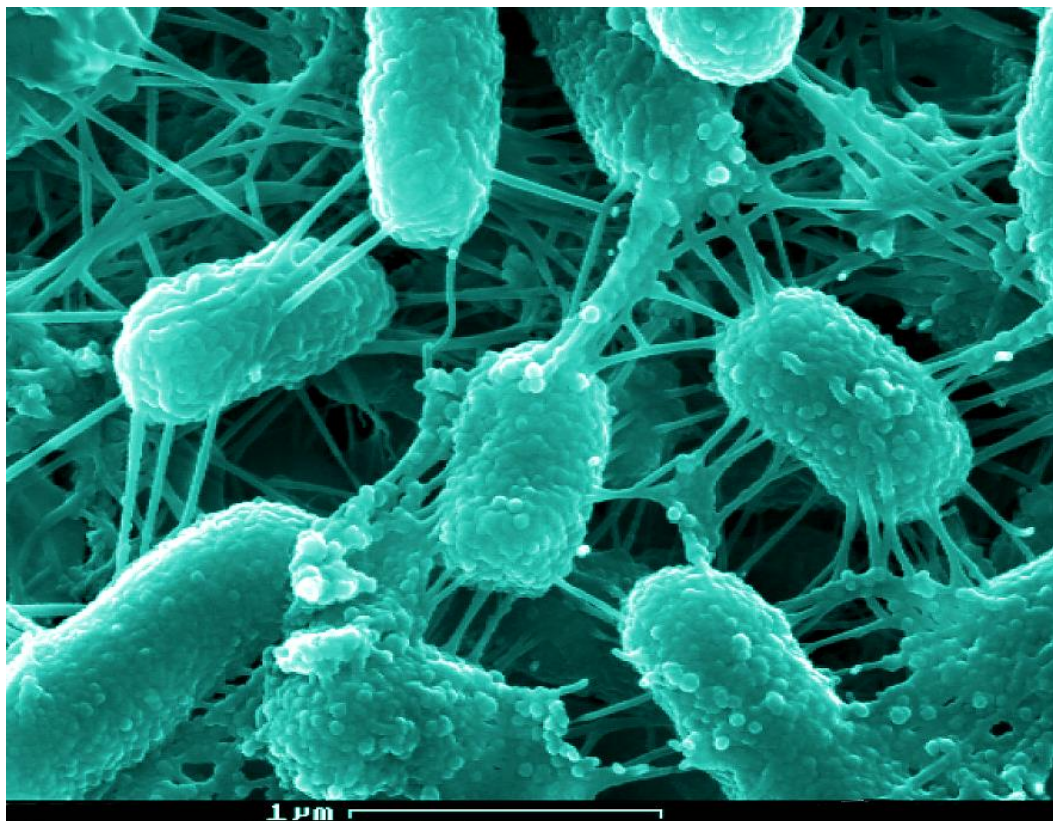
Deze vergelijking laat duidelijk zien dat naast de elektronen, de reactie veel protonen produceert (waterstofionen) die vrijgegeven moeten worden, aangezien de omgeving in het organisme anders zou worden (m.a.w. de pH zou te laag worden).

Wanneer energie geproduceerd wordt met behulp van een brijbrandstofcel zijn de voorwaarden gecreëerd voor bacteriën waarbij de mogelijkheid tot het vinden van geschikte elektronenacceptatoren in de omringende omgeving (oplossing) extreem gelimiteerd is. De bacterie gebruikt om energie op te doen middels ademhaling, in tegenstelling tot het aanzienlijk minder efficiënte fermenteren, een extracellulaire elektronenacceptator: een solide elektrode (anode). De protonen moeten desalniettemin de kathode wel bereiken, waar ze geneutraliseerd worden. Door de elektrode te gebruiken als een acceptator zijn de bacteriën in staat om de omgevingen van de elektrode (anode) te koloniseren en de meest geschikte weg te vinden om de elektron in de bepaalde omgeving over te brengen. Bacteriën hebben verschillende methodes ontwikkeld om de elektron over te brengen naar de anode (zie afbeelding 3).



Afbeelding 3. Verschillende methodes waarmee bacteriën de elektron naar de anode transporteren: rechtstreeks (boven), met behulp van een tussenpersoon

Een optie is om een tussenpersoon te gebruiken die de elektron transporteert door de celmembraan heen. Een tussenpersoon wordt ook toegevoegd aan sommige brijbrandstofcellen om het gebruik van elektrochemisch inactieve bacteriën mogelijk te maken. Helaas zijn dergelijke kunstmatig toegevoegde tussenpersonen over het algemeen duur en ook toxisch, hetgeen de reden is waarom er meer potentieel gezien wordt in biobrandstoffen gebaseerd op elektrochemisch actieve bacteriën eerder dan diegenen die toegevoegde tussenpersonen gebruiken. Een mogelijke strategie voor het vrijgeven van elektronen is om elektrochemisch actieve bacteriën te gebruiken die in staat zijn om nanodraden te laten groeien die elektronen transporteren (bijv. vertegenwoordigers van de *Geobacter* en *Shewanella* families die veel voorkomen in biobrandstofcellen). Dergelijke bacteriële nanodraden (zie afbeelding 4) zijn in staat om de elektron rechtstreeks naar de elektrode te transporteren, maar ook naar de naastgelegen bacteriën die deze overbrengen. Een nog spannendere oplossing zou kunnen zijn om de mogelijkheid toe te passen van bacteriën om moleculen met speciale eigenschappen, die gevonden kunnen worden in het systeem als pendeldienst om elektronen over te brengen naar de acceptator, te ontladen of te gebruiken.

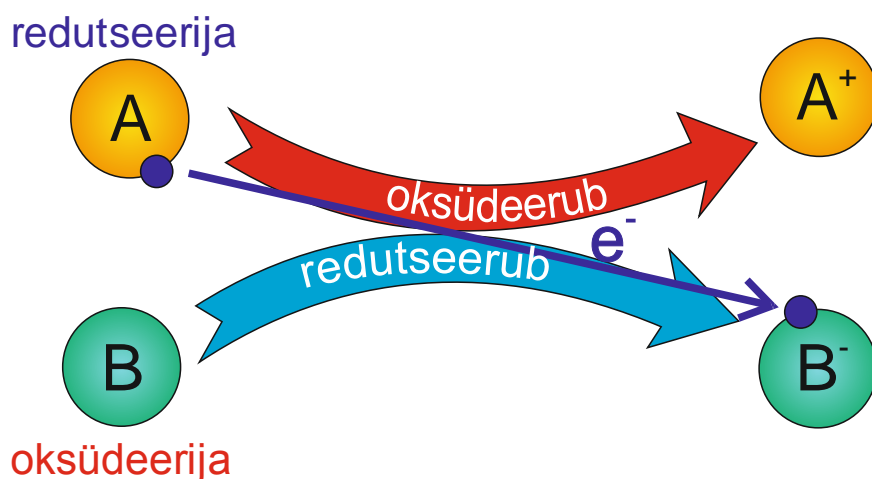


Afbeelding 4. Bacteriën worden bijeen gehouden door nanodraden (aangepaste elektronenmicroscop van BlueTechBlog – <http://bluetechblog.com/2010/06/15/make-electricity-not-sludge/>)

3. Elektrochemie en bio-elektrochemie

3.a Redoxreacties

Voordat u elektrochemie gaat bekijken is het wellicht bruikbaar om een algemeen geheugensteuntje te bieden over reductie-oxidatie reacties (of **redoxreacties**); uiteindelijk maken elektrochemische reacties deel uit van redoxreacties. Redoxreacties zijn processen waarbij een elektron beweegt van één deeltje (molecuul of ion) naar een andere. Reductie en oxidatie gaan altijd hand in hand: Als één deeltje (reductiemiddel) een elektron afstaat (oxideert), dan moet een ander deeltje (oxidator) deze elektron opnemen (reductor). Schematisch gezien kunnen deze overdrachten, en de termen die hier verband mee houden, weergegeven worden zoals in afbeelding 5. Redoxreacties zijn een algemeen voorkomende reactievorm: Altijd wanneer een element verandert in een samenstelling of andersom zullen we een redoxreactie zien. Wanneer de redoxreactie plaatsvindt in een reactie tussen samenstellingen wordt deze beschreven door de verandering van het oxidatieniveau van een bepaald element gedurende de reactie.



Afbeelding 5. Termen voor het beschrijven van redoxreacties. Het reductiemiddel is de stof die de elektron verliest, en daardoor geoxideerd wordt. De elektron wordt opgenomen door een oxidatiemiddel, en wordt daardoor gereduceerd.

3.b Elektrochemie

Elektrochemie behandelt de elektrochemische reacties – dat zijn redoxreacties die alleen plaatsvinden wanneer er een externe stroomketen (elektrolyse) is, of automatische reacties gedurende welke elektrische stroom voorkomt (elektrochemisch element). Elektrochemische reacties worden eveneens gekenmerkt door het feit dat oxidatie en reductie nooit op dezelfde plek kunnen plaatsvinden maar dat deze juist gescheiden worden door een elektrolyt (ionische geleider), terwijl de elektronen bewegen door de externe stroomketen. Al met al draaien de elektrochemische reacties op elektroden die gemaakt zijn van metaal of ander halfgeleidende materiaal.

Indien een stuk metaal (bijv. een elektrode) neergelaten wordt in een zoutoplossing van hetzelfde metaal, verschijnt er een verschil in potentialen op het punt waar het metaal en de oplossing in contact komen. Gezegd wordt dat de elektrode een bepaald potentieel wint in verhouding tot de oplossing, dat bekend staat als **elektrodepotentiaal**. Metalen met lage activiteit (bijv. koper) krijgen een positieve elektrodepotentiaal in verhouding tot de oplossing omdat koperionen tot op zekere hoogte neerslaan op de elektrode. Tijdens de respectievelijke reactievergelijking (2) verschuift de chemische balans naar de rechterkant (in de richting van de formatie van producten):

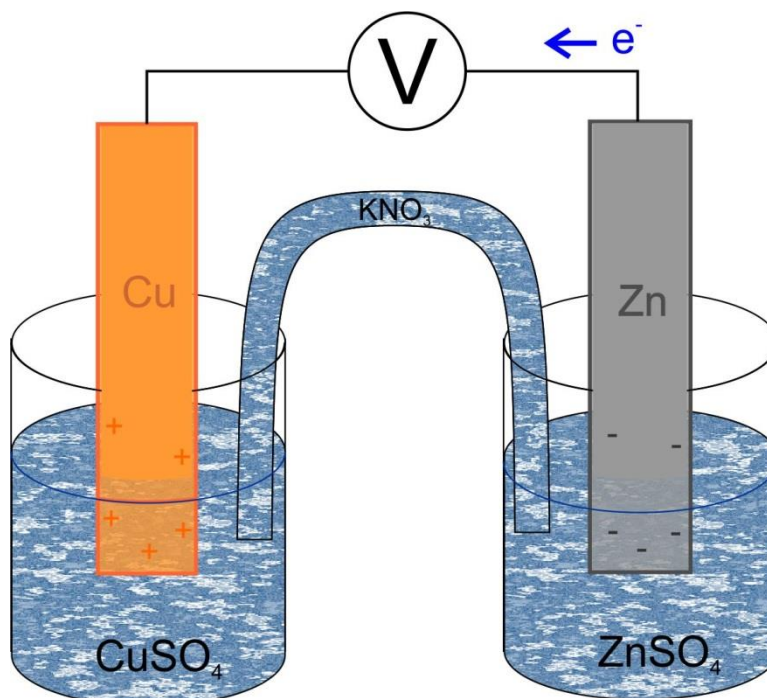


In het geval van een actief metaal (bijv. zink) gebeurt het tegenovergestelde: Het bevorderde proces is de oplossing van het metaal en de elektrode verkrijgt een negatief potentiaal in verhouding tot de oplossing. In de volgende reactievergelijking is de balans verschoven naar links (in de richting van de formatie van primaire materialen):



Het niveau van het potentiaal bereikt is daarom afhankelijk van de eigenschappen van het metaal, maar eveneens van de concentratie van de oplossing en de temperatuur. Allebei de processen kunnen niet heel lang op zichzelf draaien, omdat de elektrode zonder elektronen komt te zitten in het geval van koper, terwijl excessieve elektronen geproduceerd worden in het geval van zink. Als u echter deze twee metalen stukken bijeenbrengt in een stroomketen en ionische conductiviteit genereert tussen de oplossingen (met behulp van een zoutbrug of membraan), heeft u een chemische energiebron

gemaakt (zie afbeelding 6). De elektronen kunnen van de ene elektrode (anode) naar de andere (kathode) bewegen en de elektrodeprocessen kunnen draaien totdat er genoeg stoffen zijn die reageren.



Afbeelding 6. Elektrochemisch (Danielli - Jacob) element, waarbij de totale redoxreactie $\text{Cu}^{2+} + \text{Zn} = \text{Cu} + \text{Zn}^{2+}$ plaatsvindt in individuele elektrodes afgescheiden door ruimte, terwijl de elektronen bewegen via een externe stroomketen van anode (Zn) naar kathode (Cu).

3.c Bio-elektrochemie

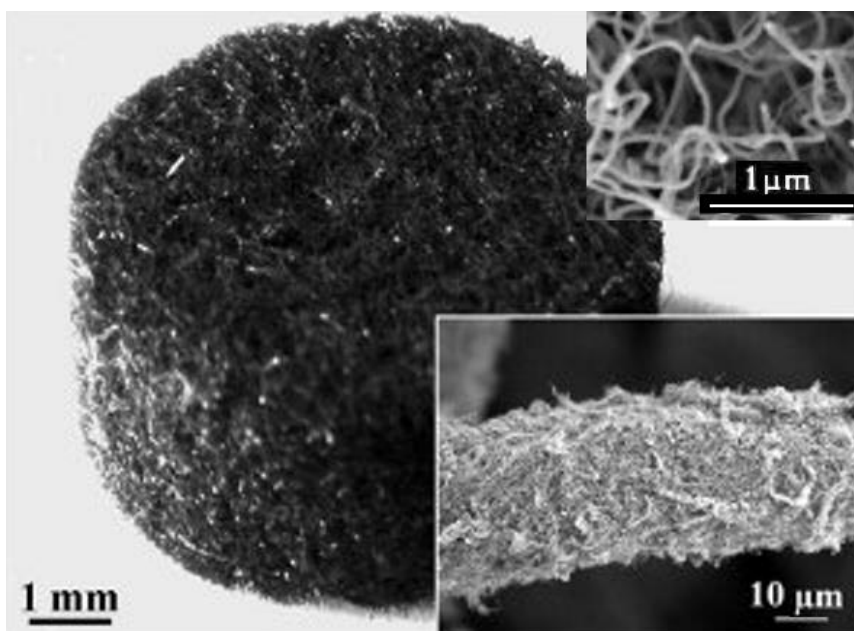
De oorsprong van de elektrochemie en de bio-elektrochemie is terug te leiden tot de beroemde experimenten van A. Volta en L. Galvani in de 18^e eeuw. **Bio-elektrochemie** omarmt het onderzoek naar en het toepassen van biologische transportatieprocessen van een elektron. Vandaag de dag is bio-elektrochemie meer algemeen aanvaard, door verbonden te zijn met geneeskunde, fysiologie en biochemische reactoren (inclusief biobrandstofcellen). De biobrandstofcel is zeker niet het enige gebied waar elektrochemie en (cel-)biologie overlappen. Bijvoorbeeld, wetenschappers bestuderen de mogelijkheden voor het gebruiken van biologisch materiaal op het gebied van elektronica, data-opslag, bionica en nog meer. We zien eveneens snelle ontwikkeling op het gebied van biologische elektrolyse, waar nieuwe stoffen gesynthetiseerd worden met behulp van micro-organismen.

Bekijk om meer te weten te komen over mogelijke toepassingen van bio-elektrochemie het volgende artikel: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/13640321> (Deepak Pant, Anoop Singh, Gilbert Van Bogaert, Yolanda Alvarez Gallego, Ludo Diels, Karolien Vanbroekhoven. *An introduction to the life cycle assessment (LCA) of bioelectrochemical systems (BES) for sustainable energy and product generation: Relevance and key aspects*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15 (2), 2011, 1305–1313).

4. Nanogestructureerde materialen voor de biobrandstofcel

4.a Over nanogestructureerde materialen

Lange tijd werd gedacht dat biobrandstofcellen weinig potentieel hadden, aangezien hun productiviteit en efficiëntie laag was - zeker vergeleken met andere brandstofelementen - en ook omdat het maken dure materialen vereiste. Meer dan de helft van de kosten van een klassieke biobrandstofcel bestaat uit het materiaal voor de kathode (meestal platina of een andere zuurstof reducerende katalysator). De helft van de overgebleven kosten bestaan uit het materiaal voor de membraan. Recentelijk echter zijn er aanzienlijke ontwikkelingen geweest op dit gebied, en één van de belangrijkste is het gebruik van goedkopere nanocomposiet- materialen (vaak gebaseerd op nanogestructureerd koolstof - zie afbeelding 7) om de elektroden te maken. Dergelijke elektrodes hebben betere geleiding, zijn duurzamer en hebben een groot specifiek oppervlak en ze hebben vaak eveneens bruikbare katalytische eigenschappen. Dit is heel belangrijk voor het maken van biobrandstofcellen, aangezien het materiaal gebruikt voor de elektrode de efficiëntie daarvan bepaald. Het materiaal van de anode bepaald de aanhechting van de bacteriën, de snelheid van het elektrontransport en ook van de oxidatie van de voedingsstoffen, hetgeen op zijn beurt de algehele capaciteit van de biobrandstofcel bepaald. Belangrijke functies van de kathode zijn het specifieke oppervlakte van de elektrode en de katalytische eigenschappen voor het versnellen van het proces voor zuurstofreductie.



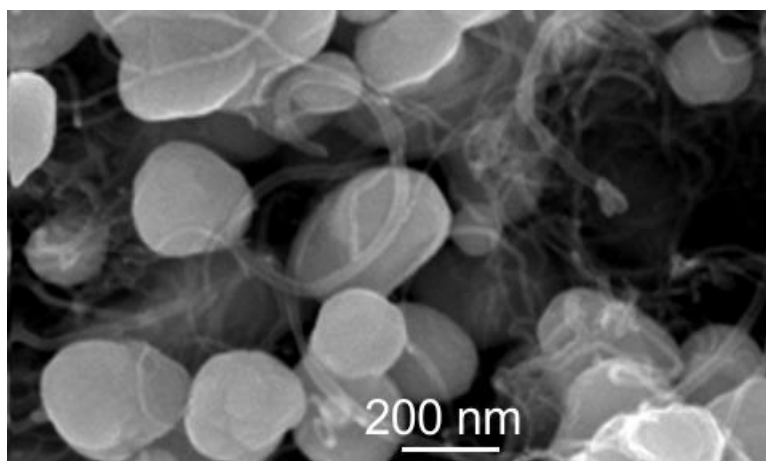
Afbeelding 7. Verschillende lagen koolstofmatten bestaand uit nanogestructureerde koolstofvezel (aangepaste afbeelding van R. Vieira, <http://dx.doi.org/10.5772/8145>)

In de afgelopen jaren heeft de nanotechnologie een revolutie veroorzaakt op vele vlakken binnen de wetenschap en technologie, aangezien de specifieke eigenschappen verkregen door de nanometerschaal aanzienlijke verbeteringen van het gedrag van verschillende materialen mogelijk maken of, meer in het algemeen, het creëren van oppervlakken of materialen met functies die voorheen onmogelijk geacht werden. De prestaties van de nanotechnologie zijn zichtbaar op vele vlakken, bijvoorbeeld in technologieën die verbandhouden met textiel-, plastic en glassamenstellingen en bij het produceren van energiebronnen, optica, geneeskunde, sensoren en een grote verscheidenheid aan andere apparaten en voorwerpen. Naast de buitengewone eigenschappen zijn nanomaterialen vaak relatief goedkoop aangezien ze zeer efficiënt zijn. Daarnaast veroorzaken de productie en het gebruik van deze materialen minder afval en milieuvervuiling. Nanotechnologieën zijn

technologieën waarbij het gebruik van deeltjes die kleiner zijn dan 100 nm leidt tot nieuwe kwalitatieve eigenschappen in vergelijking met materialen met grotere deeltjes. Een paar van de belangrijkste eigenschappen van nanodeeltjes zijn onder andere een bijzonder groot specifiek oppervlak, hogere activiteit (gedeeltelijk verkregen door het specifieke oppervlak) en hogere (chemische) selectiviteit. Zonne-accu, supercondensatoren en andere moderne prestaties in de wetenschap zouden ondenkbaar zijn zonder nanotechnologie. Deeltjes op de nanoschaal hebben eveneens een veel hogere biologische activiteit, ondanks dat dit in sommige gevallen een negatieve eigenschap kan zijn (bijv. wanneer de deeltjes toxisch zijn).

Koolstofnanobuizen zijn ongetwijfeld de meest besproken van de moderne nanogestructureerde materialen. De miljoenvoudige ratio tussen de lengte en diameter van de cilindervormige buizen, evenals hun veerkracht en conductiviteit zijn de belangrijkste eigenschappen die de technologie probeert toe te passen. Tegelijkertijd zijn er verschillende technische problemen die opgelost moeten worden: Ongewijzigde nanobuizen zijn niet oplosbaar, hetgeen het moeilijk maakt om hier dunne en effen lagen van te maken. Het is eveneens lastig om nanobuizen te gebruiken in biologische toepassingen, aangezien deze meestal cytotoxisch zijn (m.a.w. dodelijk voor cellen). Koolstofbuizen die niet aanzienlijk chemisch gemodificeerd zijn om oplosbaarheid te vergroten en toxiciteit te verlagen zijn daarom niet geschikt voor gebruik in biobrandstofcellen of andere microbiële systemen.

Nanocomposietmaterialen zijn multigefaseerde samenstellingen waarvan tenminste één dimensie van een component minder dan 100 nm is (zie afbeelding 8). Dergelijke materialen kunnen een organische of anorganische origine hebben, en het gebruik van beide opties is in snelle opkomst binnen de wetenschap en de technologie. Bijzondere aandacht dient geschonken te worden aan polymerische nanocomposietmaterialen, waarbij een effen opmaak van nanodeeltjes in de polymere matrix het materiaal opvallen verbeterde eigenschappen biedt, terwijl het een laag materiaalverbruik vereist.



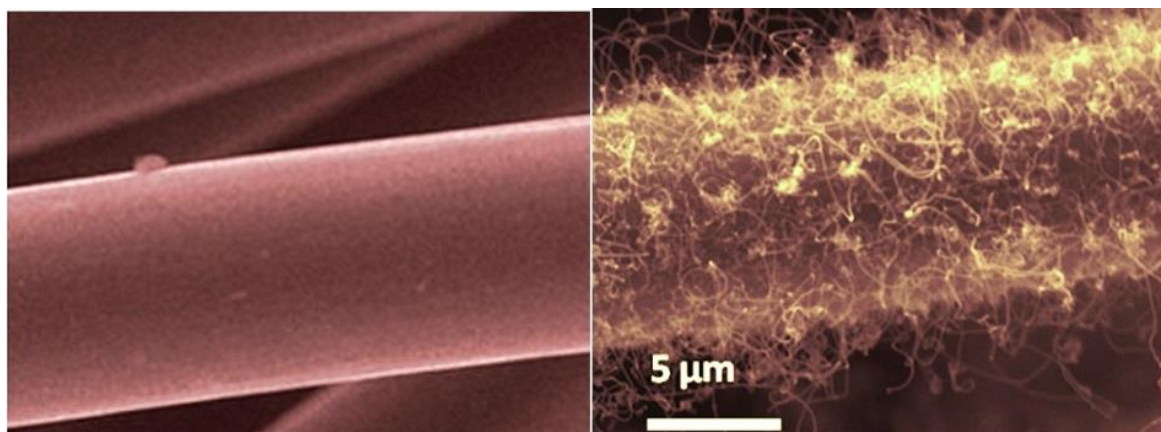
Afbeelding 8. Nanocomposietmateriaal van koolstofnanobuizen en koperen nanodeeltjes (aangepaste afbeelding van Bioneer Corp. <http://nanobio.bioneer.com>)

Verschiede nanogestructureerde materialen worden verder uitgelegd in het leerstation XI: Van kwantummechanica tot nano-natuurkunde

4.b Nanocomposietmaterialen voor de biobrandstofcel

De energie geproduceerd door biobrandstofcellen is direct afhankelijk van het oppervlak van de elektroden. Natuurlijk is het technisch gezien niet logisch om apparaten te maken met elektroden met

oneindige afmetingen. Daarom is het belangrijk om elektrodematerialen te gebruiken met grote specifieke oppervlakken, waarbij het oppervlak per eenheid massa of volume zo groot mogelijk is. Vandaag de dag wordt veel verschillend koolstofmateriaal met grote specifieke oppervlakken (bijvoorbeeld koolstofpapier, koolstofmatten, koolstof-textiel, etc.) gebruikt in anodes van biobrandstofcellen. Er worden vaak pogingen gedaan om het specifieke oppervlak te vergroten en de eigenschappen van het microgestructureerde hoofdmateriaal te verbeteren door nanogestructureerde supplementen of behandelingen toe te voegen (zie afbeelding 9). Naast een groot specifiek oppervlak zijn andere positieve kwaliteiten van veel koolstofmaterialen onder andere het stabiel blijven in een biologische omgeving en het hebben van een acceptabele conductiviteit. In het geval van kathodes is de traditionele maar helaas dure methode om platina toe te voegen aan (koolstof-)materiaal met een groot specifiek oppervlak, om dit in staat te stellen te functioneren als een katalysator in de zuurstofreductiereactie. Geleidende polymeren worden eveneens gebruikt in de kathode als een katalysator, als een bindmiddel van een andere katalysator, of als een bindmiddel voor koolstofmateriaaldeeltjes in de anode of kathode. Dergelijke polymeren hebben andere positieve eigenschappen naast conductiviteit: Ze zijn bio-compatibel, veerkrachtig en hun synthese is gemakkelijk en beheersbaar. Beheersbaarheid is belangrijk wanneer men elektrodes maakt, aangezien de efficiëntie van de biobrandstofcel vaak afhankelijk is van de micro- of nanostructuur van de elektrode. Recentelijk is er een toenemende focus op onderzoek naar goed beheersbare polymere nanocomposieten en hun toepassing als elektrodemateriaal.



Afbeelding 9. Aangepaste (links) en niet aangepaste (rechts) vezels van grafiet koolstofmatten (aangepaste SEM elektronenmicroscop van Shen *e.a.* <http://dx.doi.org/10.1155/2014/130185>)

5. Effectiviteit van de biobrandstofcel

Zoals algemeen bekend is over alle energiebronnen, is de beschikbare energie (P) afhankelijk van het potentiaalverschil (ΔE) en de intensiteit van de stroom (I) volgens de vergelijking (4):

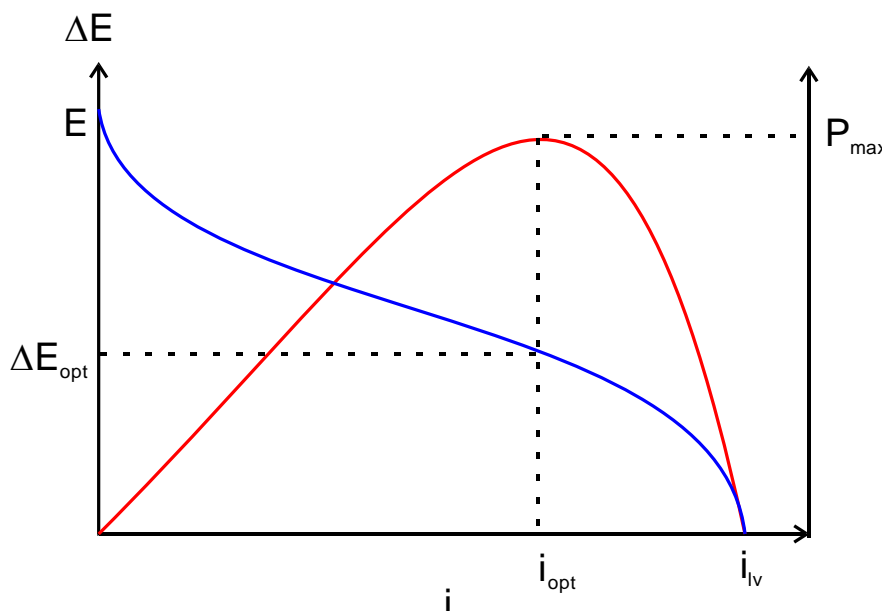
$$P = I(x) \Delta E. \quad (4)$$

De wet van Ohm verbindt de intensiteit van de stroom en het potentiaalverschil middels de waarde van de externe weerstand (R_{ext}) – vergelijking (5):

$$\Delta E = I(x) R_{\text{ext}}. \quad (5)$$

Als de externe weerstand oneindig groter zou zijn en er geen stroom was, zou het potentiaalverschil overeenkomen met de elektromotorische kracht van de bron (E ; termen zoals voltage open stroomkring of ontladingsvoltage worden eveneens gebruikt). Omgekeerd, zou zonder weerstand

(korte stroomkring ; $\Delta E = 0$) de huidige intensiteit overeenkomen met een kortsluitingsstroom (I_{lv}). De relatie tussen de huidige intensiteit (of specifieker de huidige stroomdichtheid) en het potentiaalverschil zijn goed beschreven door de polarisatiecurve (zie afbeelding 10), waar de elektromotorische kracht en stroomketen gemakkelijk geïdentificeerd kunnen worden. Van de maximale energie (of stroomdichtheid) kan men de optimale huidige stroomdichtheid ontleen (I_{opt}) en het optimaal potentiaalverschil (ΔE_{opt}) benodigd voor de biobrandstofcel.



Afbeelding 10. Een typische polarisatiecurve (blauw) en de overeenkomstige energiecurve (rood) van de biobrandstofcel.

De ideale productiviteit van een biobrandstofcel hangt af van de eigenschappen van de elektrochemische processen die plaatsvinden tussen het organische rauwe materiaal en de uiteindelijke acceptator (gewoonlijk zuurstof). De biobrandstofcel zet een geschatte 50-90% van de energie beschikbaar tijdens de oxidatie van een organische voedingsstof om in elektriciteit, de rest wordt gebruikt voor het kweken van microben.

De uiteindelijke voltage van de elektroden is in feite lager dan deze ideale waarde omdat er altijd tenminste drie soorten energieverlies zijn in biobrandstofcellen. De eerste hiervan, actieve polarisatie, speelt een aanzienlijke rol in het geval van lage stroomdichtheden, en houdt verband met de activatie-energie nodig om de reactie uit te voeren. Dit is inclusief adsorptie van het startmateriaal en desorptie van producten, evenals de energiedrempel van de elektrodetransmissie; dit alles wordt andersom ook beïnvloed door de eigenschappen en het oppervlak van de elektrode, het gebruikte organisme en andere factoren. In het geval van hoger elektrisch vermogen, wordt de bijdrage van actieve weerstand aan energieverlies aanzienlijk. Dit wordt veroorzaakt door beperkte conductiviteit in de elektroden en ionen in verschillende delen van de biobrandstofcel (membraan, elektrolyte, etc.). Het ontwerp van de biobrandstofcel speelt een belangrijke rol bij het verlagen van de actieve weerstand: Elektrolyten en een membraan met goede conductiviteit zijn te prefereren, terwijl de afstand tussen de elektroden zo klein mogelijk zou moeten zijn. Echter, bij de hoogste stroomdichtheden is de belangrijkste factor voor het verlagen van de effectiviteit is concentratiepolarisatie. Dit wordt veroorzaakt door de afname van beschikbare voedingsstoffen, ongeacht of dit te wijten is aan de algemene concentratie van voedingsstoffen of problemen met de klassering. Dit verlies kan beheerst worden door roeren (mechanisch of met gasbellen) en door een goed afgewogen ontwerp van de biobrandstofcel toe te passen.

In het algemeen zijn de meeste experimenten met biobrandstofcellen uitgevoerd onder laboratoriumcondities en met relatief kleine apparaten. Deze experimenten hebben laten zien dat om de energie toe te laten nemen het niet afdoende is om simpelweg een grotere biobrandstofcel te bouwen, aangezien dit de effectiviteit (en in het bijzonder de stroomdichtheid) doet afnemen. Betere resultaten zijn behaald door meerdere, kleinere biobrandstofcellen samen te voegen, zowel achtereenvolgend als parallel, om respectievelijk de uitgangsspanning en de energie te verhogen.

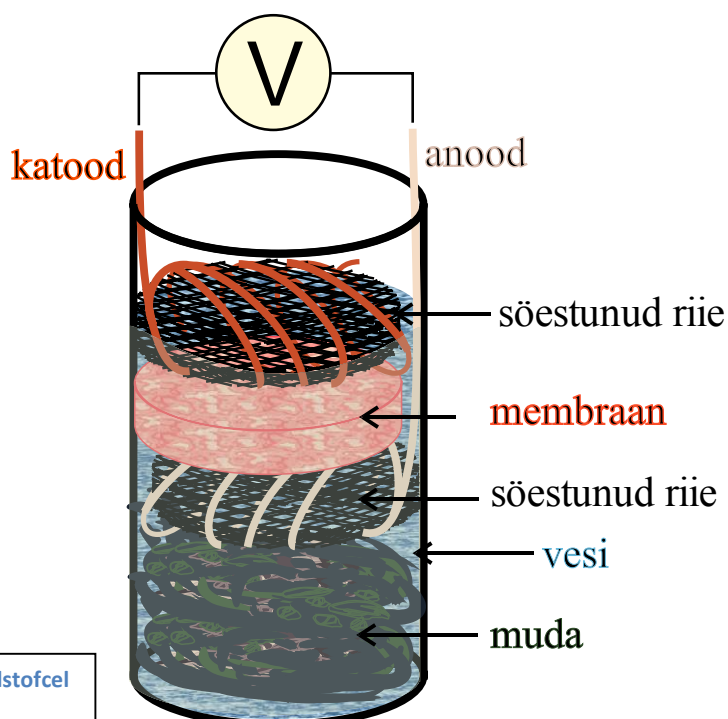
6. Biobrandstofcel met gemakkelijk te krijgen materialen

Iedereen kan een biobrandstofcel maken met gemakkelijk verkrijgbare materialen en relatief weinig moeite. Een dergelijk apparaat is natuurlijk niet een topprestatie binnen de onderzoeksliteratuur, maar het is zeker een spannende en informatieve activiteit. Verschillende kant-en-klare kits en instructies voor het bouwen van een biobrandstofcel kunnen gevonden worden op het internet (bijv. www.mudwatt.com/products/mudwatt?variant=766869483). Hieronder staat één manier om een biobrandstofcel te maken met gemakkelijk verkrijgbare materialen.

Om een biobrandstofcel te maken heeft u het volgende nodig:

- **Modder:** de makkelijkste manier om modder op te graven is van de bodem van een watermassa. U zou er voor moeten zorgen dat de modder niet te veel contact heeft met de lucht, om de anaerobe bacteriën te beschermen.
- **Container:** een doos of potje met een gelijke diameter is prima.
- **Elektroden:** een elektrode met een groot specifiek oppervlak kan gemaakt worden met geschroeid doek. Om dit voor te bereiden plaatst u kleine stukjes katoen (spijkerstof is een goed materiaal) in een metalen doos met een kleine opening. Verhit de doos boven een vlam of houtskool totdat er geen rook meer uit de doos komt. Laat de doos afkoelen. Verwijder de verbrande stukjes stof uit de doos. Meet de weerstand van het materiaal met een multimeter; als de weerstand onder de 200 ohms blijft wanneer deze gemeten wordt op 1 cm afstand is het materiaal geschikt. Als de weerstand meer dan 200 ohms is dient u de stof opnieuw te verbranden. Om een elektrode te maken kunt u de verbrande stof omhullen in plaatgaas of een dun, ijzeren draadje wikkelen rondom de stof (zorg ervoor dat u geen koperdraad gebruikt; koperdraad mag niet in contact komen met de modder aangezien koper giftig is voor veel bacteriën).
- **Membraan:** een eenvoudige membraan kan gemaakt worden met tafelsout, water en gelatine. Plaats 75 gram tafelsout en 5 gram gelatine in een pan samen met 200 ml water. Meng het en breng aan de kook. Giet het in een container met een glad oppervlak (idealiter zou dit dezelfde vorm en diameter moeten hebben als de container waarin u de biobrandstofcel gaat maken). Laat afkoelen, bij voorkeur in de koelkast.

Giet om een biobrandstofcel te maken, de modder in de container, verbind een elektrode (anode) aan een draad en steek deze in de modder. Bedek de modder met de membraan. Verbind de andere elektrode (kathode) met de andere draad en plaats deze op de membraan. Giet water over de membraan, zodat de helft van de kathode boven water blijft (zie afbeelding 11). Nu is uw biobrandstofcel klaar! U kunt de



Afbeelding 11. Een zelfgebouwde biobrandstofcel

voltage gecreëerd door uw biobrandstofcel meten door een voltmeter te plaatsen tussen de draden. Noteer de voltage en meet deze een paar dagen of een week later nogmaals, wanneer het voltage hoger zou moeten zijn aangezien bacteriën zich vermenigvuldigen en verbinding maken met de anode. Voor periode waarin de bacteriën groeien is het handig om weerstand aan te sluiten (bijvoorbeeld: 100Ω tot $1\text{ k}\Omega$) tussen de uiteinden van de biobrandstofcel.

7. Concepten in leerstation XII

In dit leerstation maken wij geen onderscheid tussen klassieke en kwantumconcepten. De belangrijkste begrippen hier behoren immers niet alleen maar tot de fysica, maar ook tot verschillende disciplines en ze maken de verbinding mogelijk tussen de kwantummechanica en andere wetenschappelijke domeinen, zoals biologie en scheikunde.

Terwijl micro-organismen organische stof oxideren, laten ze vrij die, in een MFCs door de elektrode (anode) worden gevangen. Van daar verplaatsen de elektronen zich naar een extern circuit, waar hun energie gebruikt kan worden voor de werking van een elektrische toestel.

Om energie te verwerven, hebben micro-organismen een nodig die de vrijgelaten elektronen in het oxidatieproces zou kunnen opnemen. Als elektronenacceptors kan men verschillende gebruiken wat bacteriën toelaat om in allerlei omstandigheden te overleven (zoals een anaerobe omgeving) die onbewoonbaar zouden zijn voor andere, complexere organismen

Als er geen voldoende elektronenacceptors zijn, kunnen bacteriën ook energie verkrijgen via....., wat aanzienlijk minder efficiënt is dan

In een MFC hebben bacteriën een heel lage kans om te vinden. Om toch oxidatie te gebruiken om energie te verwerven, gebruiken bacteriën buiten de cel elektronenacceptoren – een Bacteriën hebben verschillende strategieën ontwikkeld om elektronen naar de anode te verplaatsen.

Een mogelijke strategie om een elektron te verplaatsen bestaat in het opbouwen van door bepaalde elektrochemische actieve bacteriën, waarmee de elektronen kunnen verplaatst worden. Deze nanodraden kunnen het elektron rechtstreeks naar de elektrode doen verplaatsten, maar ook naar een, die het elektron dan verder zal laten verplaatsen.

Een andere strategie bestaat in de productie of gebruik van bestaande met specifieke eigenschappen om de elektronen naar de acceptoren te verplaatsen.

De energie door een MFC geproduceerd hangt af van de oppervlakte van de elektrodes. Doordat het niet praktisch is toestellen te bouwen met heel grote elektrodes, moeten deze gebouwd worden met materialen die een bezitten. Verschillende organische stoffen met een hoge specifieke oppervlakte worden vandaag gebruikt in de anoden van MFCs en de specifieke oppervlakte daarvan wordt dikwijls nog verhoogd en de kwaliteit verbeterd door middel van