

De toekomst van de elektrochemie : naar een groener perspectief

Citation for published version (APA):

Barendrecht, E. (1989). *De toekomst van de elektrochemie : naar een groener perspectief*. Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1989

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

De toekomst van de elektrochemie

naar een groener perspectief

Prof. E. Barendrecht

De toekomst van de elektrochemie

naar een groener perspectief

Prof. E. Barendrecht

Hoogleraar in de Elektrochemie, Faculteit der Scheikundige
Technologie

Afscheidsrede, gehouden op 16 juni 1989 aan de Technische
Universiteit te Eindhoven.

*To be prepared against surprise
is to be trained;
To be prepared for surprise
is to be educated.
(J.P. Carse)*

Dames en Heren, zowel leden van deze universitaire
gemeenschap, als gewaardeerde gasten van deze
gemeenschap,

Onder Amerikaanse economen gaat al sinds de dood van Einstein het volgende gerucht, voor de waarheid waarvan ik uiteraard niet kan instaan. Toen Einstein stierf en tot de hemel werd toegelaten, zag hij aldaar een drietal engelen lopen, met wie hij alras een gesprek aanknoopte. De eerste engel, een aartsengel, blijkt een IQ van om en nabij 200 te hebben. Einstein is zeer verrast en vraagt of hij eens met hem van gedachten kan wisselen over het mysterie van goed en kwaad, of goed en kwaad opgesloten liggen in de erfelijke massa; immers, hun aardse vertegenwoordigers, de theologen uit Rome, Wittenberg en Genève, spreken nog immer over de erfzonde; kennelijk bestaat geen erfgoedheid. De tweede engel blijkt ook over een zodanige IQ te beschikken, dat menige hooggeleerde er zich niet voor zou hoeven te schamen: omstreeks 150! Einstein reageert wederom verheugd en vraagt of hij met hem zou willen discussiëren over enige aspecten van zijn algemene relativiteitstheorie, die hemzelf ook niet helemaal duidelijk zijn. De derde engel blijkt evident minder begaafd te zijn. Voor Einstein echter geen bezwaar om hem te vragen wat hij denkt over de toekomstperspectieven van het internationale kapitalisme en communisme.

Overall ter wereld, het is u bekend, verdienen economen en meteorologen hun brood met het doen van voorspellingen. En hoewel de ervaring leert dat deze voorspellingen ofwel fout, danwel toevalstreffers zijn, belet dit zelfs het denkende deel der natie niet hieraan geloof te hechten. U bent dus gewaarschuwd als ik u nu openbaar dat de titel van mijn afscheidsrede luidt: 'De toekomst van de elektrochemie; naar een groener perspectief'.

Toch denk ik hierover iets zinnigs te kunnen zeggen. Maar eerst enige opmerkingen vooraf. Zoals u weet heeft de mensheid vele wegen beproefd om de toekomst in haar greep te krijgen.

Waarzeggerij, astrologie zijn de bekendste en dus de meest onbetrouwbare. De Delphi-methode heeft onder economen, politici en sociologen bekendheid gekregen, evenals het construeren van scenario's. Het is allesbehalve mijn bedoeling, zoals soms onder natuurwetenschappers gebruikelijk, hierover denigrerend te doen. Want, laten we wel wezen: de mens en de maatschappij zitten wel iets ingewikkelder in elkaar dan een natuurverschijnsel. De kreet: 'kies exact' is eigenlijk een oproep een niet al te moeilijke studie te kiezen: bijv. wiskunde, natuur- en scheikunde. Beta-wetenschappers zijn dan ook bescheiden mensen.

Maar ter zake, want zoals gezegd wil ik een poging wagen iets zinnigs te zeggen over de toekomst van een scheikundige discipline, te weten de elektrochemie. Ik kom er dan ook niet onderuit enkele aspecten van het sociaal-economische (maatschappij) en fysische milieu te schetsen, die voor het onderwerp relevant (kunnen) zijn. Eerst dan zal ik de rol van de elektrochemie in de toekomst, zoals ik die denk, proberen aan te geven. Daarbij zal ik summier, en dus onvolledig, trachten te omschrijven wat elektrochemie voorstelt, met een korte, historische schets. Om u vervolgens mogelijke, toekomstige ontwikkelingen voor te spiegelen, gebaseerd op fundamenteel en toegepast onderzoek. Tenslotte zal ik pogen de balans op te maken en uiteraard eindigen met het onvermijdelijke slotwoord.

Sociaal-economische overpeinzingen en het milieu

Als we een alles vernietigende kernoorlog uitsluiten, of een katastrofale meteorietinslag, zoals die zo'n 66 miljoen jaar geleden plaatsvond (waardoor in korte tijd een enorm broeikas-effect ontstond of juist een afkoeling; daarover zijn de geleerden het nog niet eens), en met de dinosaurus de gehele saurusdynamie plotseling verdween en de mensheid (zij het vele tientallen miljoenen jaren later) kon ontstaan, welnu, dan is het zinvol ons enig idee te vormen van de toestand van het milieu en de (energie-)grondstoffenpositie in de komende eeuwen, zeg over 250 jaar. Ik wil u daarbij niet vermoeien door nogmaals het gat in de ozonlaag, de zure regen, het broeikas-effect, de ontbossing, de enorme en vrijwel altijd zinloze verspilling, enz., met u door te spitten. Oorzaken en gevolgen zijn u bekend. Het zal voor ieder, die niet à te verblind is, duidelijk zijn dat verloedering, respectievelijk uitputting, reële gevaren zijn, in ieder geval een toekomstige, immers een irreversibele bedreiging gaan vormen. In de optiek van de meeste mensen is, krachtens het zondebokprincipe, de chemie de grootste boosdoener. Ten onrechte vinden wij chemici; zelfs economen en reclamemakers, hoewel meestal notoire wegbereiders, stimuleerders en verkeersleiders van het consumentisme, zou ik niet graag het boetekleed willen omhangen. Eerder is het de onstuitbare drang in de mens-zelf naar meer. Maar hoe dan ook, als er van ons chemische produkten gevraagd worden, dan is het minste wat wij kunnen doen deze produktie zo te laten verlopen dat het milieu minimale schade ondervindt. Ik zal straks trachten aan te tonen dat de elektrochemie hierin een imposante bijdrage kan leveren, aan vermindering van het milieuleed, wel te verstaan.

Rol van de elektrochemie

1. Kenmerken van de elektrochemie

Elektrochemie is een discipline die de interactie tussen elektronen, de dragers van elektriciteit, en stof (als u dat persé wilt: chemische stof) bestudeert. We beperken ons in deze opzet tot verschijnselen die optreden aan het grensvlak tussen elektrode (een elektronengeleider) en elektrolyt (een ionengeleider) en zullen in deze context nauwelijks aandacht besteden aan verschijnselen in de oplossing zelf. Wanneer geen stroom genoemde grenslaag passeert, kan de evenwichtspotentiaal van de elektrode ten opzichte van een referentie-elektrode worden weergegeven met de formule van Nernst; de potentiaal blijkt afhankelijk te zijn van de logaritme van de concentraties van de potentiaalbepalende ionen of moleculen. Gaat een stroom door de eerdergenoemde fasengrens, dan blijkt de logaritme van deze stroom evenredig te zijn met de zogenaamde overpotentiaal, de extra potentiaal die wij t.o.v. de evenwichtspotentiaal moeten aanleggen om de elektrodereactie mogelijk te maken. Ik spreek nu uitdrukkelijk over een elektrolyse, dus voor het geval de vrije enthalpie, ΔG , positief is; bij energieleverende systemen is deze ΔG negatief. Een en ander is toegelicht in figuur 1. In ieder geval zal u duidelijk zijn dat de snelheid van de reactie, dus de stofomzetting, in principe evenredig is met de stroomsterkte en dat deze weer kan worden geregeld door de potentiaal te veranderen. Ik zal hier niet verder op de kinetika van elektrodeprocessen ingaan, maar wil wel uw aandacht vragen voor de rol die de elektrochemische dubbellaag hierin speelt; deze rol is namelijk zéér essentieel. Wanneer de elektrode een zuivere elektronengeleider is, is alleen de structuur aan de elektrolytzijde voor ons van belang: daar vindt een oriëntatie van oplosmiddelmoleculen en ionen van de elektrolyt plaats, die zich meestal slechts over enkele Å, richting oplossing (waarin zich ook de te reduceren of te oxyderen substantie bevindt), uitstrekt. Wordt een potentiaalverschil van om en nabij 1 V over deze dubbellaag ingezet om een elektrodereactie te laten verlopen, bijv. voor de reductie van een waterstofion: $H^+ + e^- \rightarrow H_{(ad)}$, dan injecteren (of onttrekken) we zo'n 1 eV aan het systeem, en dat bij kamertemperatuur. Bij een chemisch proces zou dat overeenkomen met ongeveer 100 kJ per gmol stof, wat al gauw overeenkomt (afhankelijk van de stoffeigenschappen) met enkele honderden graden temperatuursstijging. Vele 'gewone' chemici – ik hoop niet dat ze zich al te gediscrimineerd voelen door deze aanduiding – realiseren zich nauwelijks dat dit de reden is, waarom je ijskoud water kan ontleiden in waterstof en zuurstof, terwijl anders, als je dit proces in één stap thermisch zou willen bewerkstelligen, enkele duizenden graden

Celcius hiervoor vereist zijn. De elektrolyse van water, hoe algemeen bekend ook, blijkt bij nadere bestudering, zeker als we de katalyse erbij betrekken om de energiekosten zo laag mogelijk te houden, niet zo eenvoudig te verlopen als uit de bruto celreactie: $2 \text{H}_2\text{O} + \text{elektrische energie} \rightarrow 2 \text{H}_2 + \text{O}_2$ zou mogen worden afgeleid. Om dezelfde reden worden chloor en aluminium (om de bekendste maar te noemen) al sinds honderd jaar door elektrolyse verkregen, en niet anders. Daarbij komt dat het redoxmedium, de elektronen, een immaterieel reagens is en, als we afzien van de wijze waarop elektrische energie wordt verkregen, in principe dus niet milieubelastend is. In de toekomst kan dit aspect wel eens van doorslaggevende betekenis worden als een keuze tussen een aantal mogelijke alternatieven moet worden gemaakt, zeker als tevens het procesrendement beter is.

2. Historische ontwikkeling

1789! Dit jaar herdenken we de Franse revolutie van tweehonderd jaar geleden. Maar in datzelfde jaar vond een chemische revolutie plaats toen twee Nederlanders, de koopman Adriaan Paets van Troostwijk en de arts en filosoof Joan Rudolph Deiman, *water* elektrolyseerden. Zij deden dat, uiteraard niet met een batterij of accu (want die waren nog niet uitgevonden), maar met een elektriseermachine, zoals deze nog te zien is in het Haarlemse Teyler Museum. Zonder zich dat bewust te zijn, waren zij de eersten in het Westen (en niet Galvani), die een elektrochemisch, tevens belangwekkend, experiment uitvoerden. In eerste instantie echter leverden zij het definitieve bewijs voor Lavoisier's nieuwe zuurstoftheorie [1,2], die de plaats innam van de alchemistische phlogistontheorie. Al spoedig daarna, in 1791, ontdekte *Galvani* de, wat hij noemde, 'dierlijke elektriciteit' (de 'statische elektriciteit' was al langer bekend); zijn experiment staat beter bekend als de 'kikkerproef' en kan worden beschouwd als het eerste bio-elektrochemische experiment. Toch is het *Volta* geweest, die het de elektrochemie mogelijk maakte zich in wetenschappelijke zin te profileren, d.w.z. via doelgerichte vraagstelling met daarop volgend experiment, en wel door zijn vinding, in 1800, van de eerste, weliswaar primitieve, *batterij*, de Volta-zuil genoemd. De ontwikkeling gaat dan snel, want in datzelfde jaar worden reeds de eerste elektrolyses met deze zuil uitgevoerd (water bijv.). De theorievorming wordt vanaf dat moment intensief beoefend. Het is boeiend te lezen [3,4] met welk een fanatisme statische, dierlijke, contact, anorganische, thermische en elektromagnetische elektriciteit van elkaar werden onderscheiden. Het is uiteindelijk het genie van *Faraday* (1791-1867) geweest, dat de diverse typen elektriciteit als uiting van één elektrisch fluidum postuleerde en hiermee de elektrochemie van haar, op één na laatste, sluier (het elektron als

drager van elektrische energie was nog niet gepostuleerd) ontdeed. Deze identiteitsgedachte komt niet zomaar uit de lucht vallen, maar is het resultaat geweest van veel denkwerk. Denkt u zich maar in: elk bovengenoemd type elektriciteit kende een positieve en een negatieve component: een teveel aan elektrische materie en een tekort eraan. Aanvaarding leidde onherroepelijk tot een dualistische stellingname en dat kon niet in die tijd, noch in religieuze, noch in filosofische zin.

Ik zal u verder niet al te zeer vermoeien met jaartallen en hoogtepunten uit de geschiedenis van de elektrochemie en mij beperken tot enkele. Laat ik stellen dat de elektrochemie van cruciale en beslissende betekenis is geweest voor de ontwikkeling van de moderne samenleving, waarin elektrische energie niet meer weg te denken is. Hoezo zult u zeggen? Wel, dan daag ik u hierbij uit mij een scenario aan te reiken, waarbij zonder batterij het elektromagnetisme, de inductie en zelfinductie kon worden ontdekt; sterker nog: zonder elektrochemische batterij zou in 1866 door Werner von Siemens nooit de dynamo zijn uitgevonden en daarmee de grondslag zijn gelegd voor de huidige elektrotechniek en voor alles wat daaruit is voortgekomen (elektronica, computer).

Ik beperk me nu tot enkele andere hoogtepunten uit haar geschiedenis. Dit jaar precies 150 jaar geleden, ontdekte William R. Grove de waterstof-zuurstof *brandstofcel*. Meer dan honderd jaar later kon het idee pas worden gerealiseerd, nadat het voornaamste technologische probleem, het driefasencontact, kon worden opgelost in de vorm van de gasdiffusie-elektrode. Tien jaar later, in 1849, voerde Kolbe de eerste *organische elektrolyse* uit; in feite ging het hier om een anodische dimerisatie met gelijktijdige decarboxylatie: er ontstond, onder CO_2 -ontwikkeling, ethaan. Weer tien jaar later, in 1859, vond Planté de *loodaccu* uit. Helaas had je er in die tijd niet veel aan omdat het opladen met een primaire batterij moest gebeuren. Dat veranderde pas toen in 1866 de *dynamo* door Siemens werd uitgevonden. Daarmee werd de grondslag gelegd voor de stormachtige ontwikkeling van de elektrotechniek en van de elektrochemische industrie. Deze elektrochemische industrie neemt in Nederland ca. 7 % van de totale elektriciteitsproductie voor haar rekening. Nog voor *chlor* op commerciële schaal werd geproduceerd (ca. 1890), werd in 1888 *aluminium* op technische schaal bereid. Dat metaal was toen duurder dan goud en bekend is dat koningin Victoria in die tijd een aluminium ring droeg! Nu honderd jaar geleden formuleerde Walther Nernst zijn bekende wet op basis van reeds eerder geformuleerde, thermodynamische principes. Onderzoek naar de basis van elektrodeprocessen stopt dan. Wel formuleerde Tafel in 1905 een empirische relatie tussen

potentiaal en stroom, maar daar blijft het in hoofdzaak toch bij. Vrijwel alle aandacht richt zich dan op de elektrochemie van oplossingen (ook wel ionica genoemd), en op potentiaalmetingen. Het beroemde leerboek van D.A. MacInnes, 'The Principles of Electrochemistry', met 465 pagina's tekst, kon in 1939 nog besluiten met 13 pagina's, gewijd aan de elektrodekinetiek! Zo ontstond een hiaat van een halve eeuw, waarin de thermodynamica de scepter zwaaide; zozeer zelfs dat de in 1922, door Heyrovský ontwikkelde polarografische methode in haar interpretatie aanvankelijk moest uitgaan van evenwichtssituaties. De grote ommekeer voltrekt zich aarzelend en geleidelijk in de dertiger jaren als de Butler-Volmer relatie wordt geformuleerd, die de empirische relatie van Tafel inzichtelijk maakte, zodat de kinetiek van een elektrodereactie kwantitatief kon worden beschreven. Snelle en nauwkeurige meting van de stroom-potentiaal-curve werd pas mogelijk met de door Hickling in 1942 ontwikkelde *potentiostaat*, een instrument waarmee de potentiaal, als proces- en selectiviteitsbepalende grootte, kon worden opgelegd aan de werkelektrode (waaraan de te bestuderen elektrodereactie plaatsvindt). Daarna werd in snel tempo een aantal belangrijke meetmethoden ontwikkeld voor het onderzoek naar mechanisme en kinetiek. Ze kunnen worden onderscheiden in stationaire en niet-stationaire methoden. In de zeventiger jaren werden deze elektrochemische meetmethoden aangevuld met o.a. spectrometrische (hoogvakuüm-)methoden, belangrijk voor de bestudering van elektrokatalytische verschijnselen. Pas dan ontwikkelen zich snel een aantal subdisciplines als de *elektroanalyse* (Kolthoff), de organische *elektrosynthese* (Baizer) en niet te vergeten: de *elektrokatalyse*, die met de dimensioneel stabiele anode, een vinding van Henri Beer, Eindhovens iredoctor, een eerste en definitieve entree maakt in de elektrochemische industrie (chloor-alkali elektrolyse). Terecht is thans de elektrokatalyse een zwaartepuntsdiscipline in de elektrochemie.

Ik sla de minst omstreden toepassingsgebieden van de elektrochemie, te weten de *galvano*, de *corrosie* en *batterijen* nu maar over, evenals de boeiende ontwikkelingen op het terrein van de *foto-* en de *bio-elektrochemie*. Wel wil ik hier belangrijke ontwikkelingen memoreren op het gebied van de *brandstofcellen*, die sinds de ruimtevaart ook in de civiele sector meer aandacht ontvangen. Terecht, en wel vanwege het milieuvriendelijker karakter van de elektrochemische verbranding en het hoge energierendement bij de omzetting van de chemische energie van fossiele brandstoffen (als aardgas) in elektrische energie: komt een thermische centrale op ca. 40 %, bepaalde brandstofcellen zijn in staat dit percentage op 60 % te brengen. Tenslotte zal ik hierna nog terugkomen op het idee van de *waterstofeconomie*, een idee dat

over één of twee generaties wel eens van uitzonderlijk belang kan blijken te zijn.

3. Hedendaagse en toekomstige ontwikkelingen

We zullen aan de hand van enige voorbeelden laten zien welke betekenis de elektrochemie nu reeds heeft, maar in de toekomst verder kan krijgen. Het is onmogelijk om hier maar in de verste verte volledig te zijn. Zo zal ik de rol van corrosie en haar bestrijding, de galvanotechniek en de scheidingstechnieken hier niet verder bespreken, maar alleen de synthese- en energiegeïëerde aspecten.

Synthesegeliëerde aspecten

Ik zal mij, wat deze aspecten betreft, uitsluitend beperken tot de *organische elektrolyse*. Het gaat hierbij om de chemie van elektrochemisch gegenereerde, organische radikaal-ionen en van 'koude' radicalen (in tegenstelling tot die verkregen langs thermische en/of fotochemische weg). Deze organische elektrolyse, nauw verbonden met de disciplines organische synthese en elektrochemie, kan alleen met een gedegen kennis van beide gebieden beoefend worden. Daarbij komt nog dat de synthetici van fijnchemicaliën – waar waarschijnlijk de grootste mogelijkheden liggen voor de organische elektrolyse – in de meeste gevallen niet zo bekend zijn met de mogelijkheden van de homogene en heterogene katalyse [5]. En, zoals u nu wel duidelijk zal zijn, is een elektrochemisch proces een heterogeen katalytisch proces met potentiaalcontrole, waarmee een extra selectiviteitsparameter is ingevoerd.

Ook organische elektrodeprocessen zijn in wezen oxydatie-, dan wel reductieprocessen. In protische oplosmiddelen kan hierbij (de-)protonering optreden van radicalen, van radikaal-anionen en carbanionen (ontstaan bij reductie) en van radikaalkationen en carboniumionen (ontstaan bij oxydatie), terwijl in andere, niet-protische oplosmiddelen andere typen substituties en addities kunnen worden uitgevoerd. Vrijwel alle chemische oxydaties en reducties kunnen ook elektrochemisch worden uitgevoerd, in een niet gering aantal gevallen zelfs met een hoger rendement. Bovendien spelen elektrochemische processen zich vrijwel altijd bij een lagere temperatuur af dan de analoge chemische processen. In het geval van fijnchemicaliën gaat het meestal om ingewikkelder gestructureerde verbindingen dan bij bulkchemicaliën, waarbij lagere temperaturen sowieso de eenduidigheid van een reactie bevorderen. Daarbij is de elektrochemie duidelijk in het voordeel. Omgekeerd kunnen elektrochemische reacties worden bewerkstelligd die chemisch niet mogelijk zijn of zeer moeizaam verlopen, bijv. reducties met kathodisch gegenereerde, gesolvateerde elektronen. Van de

mogelijke reactiekategorieën (conversie, substitutie, additie, eliminatie, koppeling (dimerisatie), splitsing en de indirecte omzetting), zullen we hier slechts een enkel voorbeeld geven; zie ook tabel 1.

a. *Aromatische nitroverbindingen* kunnen selectief gereduceerd worden tot het hydroxylamine of tot het amine, afhankelijk van het te gebruiken elektrodemateriaal en de aan te leggen elektrodepotentiaal. Chemisch kan dat uitstekend gebeuren met bijv. zinkpoeder als reductiemiddel. Het grote nadeel van deze methode is echter dat, naast andere bijproducten afkomstig van het organisch substraat, tevens zinkzouten als afvalproduct ontstaan, die de nodige milieuoverlast geven. Als men daarbij bedenkt dat zinkpoeder meestal een produkt is van de zinkelektrolyse, en dat hiervoor evenveel elektrische energie nodig is als voor de directe, kathodische reductie (waarbij geen extra bijproduct ontstaat), dan is – dacht ik – het milieuvoordeel, maar ook het kostenvoordeel, evident.

b. Een tweede voorbeeld is de door Monsanto toegepaste, *kathodische dimerisatie van acrylonitril* tot adiponitril, een grondstof voor de bereiding van nylon, 6-6. Het door Baizer ontwikkelde proces is een aaneenschakeling van slimme vondsten. Belangrijk bij dit proces is dat de concentratie van acrylonitril in het waterige oplosmiddel hoog is, anders wordt teveel van het monomeer, propionitril, gevormd. Maar dat is ook het geval als het elektrodemateriaal niet hydrofoob is en een te lage overpotentialiaal voor waterstof bezit. Een kwestie van serendipiteit (zou men tegenwoordig zeggen) is de toepassing van een organisch zout, dat goed dissociëert (en dus voor voldoende geleidbaarheid zorgt) en door zijn organisch karakter garant staat voor een sterk vergrote oplosbaarheid van acrylonitril in een overigens waterig milieu, en dat voorts een kation heeft (tetra-alkylammonium) dat specifiek aan de kathode adsorbeert en daaraan een hydrofoob karakter verleent. Ook technologisch zijn een aantal slimmigheden geïntroduceerd, o.a. de toepassing van een kationwisselend membraan – bij mijn weten voor het eerst in de organische elektrolyse – waardoor de pH in het kathodecompartiment constant kan worden gehouden, noodzakelijk om de vorming van hydrolyseproducten te voorkomen. Dit proces verloopt selectiever en is economischer dan het voordien gebruikelijke, chemische proces. Het is tevens een voorbeeld van de toepassing van de organische elektrolyse bij de bulkproductie van chemicaliën.

c. *De combinatie van een anode- met een zinvol kathodeproces* (of omgekeerd) is bekend uit de chloor-alkali elektrolyse: aan de anode wordt chloor gevormd en aan de kathode loog. Bij de organische elektrolyse is meestal sprake van, of een anodeproces, of een kathodeproces; aan de hulpelektrode ontstaat dan resp., of waterstof,

of zuurstof als bijproduct (hetgeen zelden de bedoeling is). In een Frans EDF-patent [81.17314, 14 sep. 1981] wordt op fraaie wijze een indirecte oxydatie gekoppeld aan een kathodische reductie. Het gaat hierbij om het tweestapsproces:

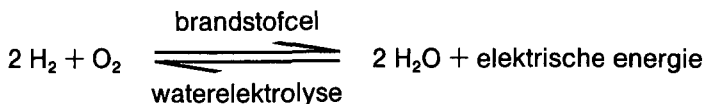
p-nitrotolueen (pNT) \rightarrow [Cr(VI)] p-nitrobenzoëzuur (pNB) \rightarrow [e⁻] p-aminobenzoëzuur (pAB). De chemische oxydatiestap (met chroomtrioxyde in geconcentreerd zwavelzuur), wordt, na filtratie van het gevormde pNB, gevolgd door anodische oxydatie van het gevormde Cr(III) tot Cr(VI). Het ontstane, onoplosbare pNB wordt nu als suspensie verder gereduceerd aan een Pb-kathode tot pAB.

Energiegeleëerde aspecten

Meestal bedoelt men aspecten van de elektrochemie, waarbij de opwekking van elektrische energie centraal staat: batterijen, brandstofcellen en waterstofeconomie (in het laatste geval toegespitst op de elektrolyse van water). [In andere zin bedoelt men hiermee het zoeken naar katalytisch actiever elektrodemateriaal, het verbeteren van de elektrolyse-omstandigheden en het optimaliseren van het reactorontwerp, zodanig, dat het elektrisch energiegebruik minimaal is].

Batterijen. De ontwikkeling op dit terrein is de laatste tien, twintig jaren indrukwekkend geweest. Van belang hierbij zijn zaken als vergroting van de energie- en vermogensdichtheid, speciaal met het oog op tractietoepassingen (de elektrische auto). Elektrische tractie is naar haar aard milieuvriendelijker dan tractie met verbrandingsmotoren, hoe 'groen' de motor ook moge zijn, of hoe schoon de katalytische naverbranding ook moge wezen. Ook in ons laboratorium zijn wij doelbewust hiermee bezig geweest, en nog bezig. Met name de zinkelektrode is het onderwerp van intensief onderzoek geweest, en nog; daarbij kwamen zowel het depositie- en oplosproces, als de meer fysisch-technologische aspecten aan de orde. En misschien zal eens de 'plastic' accu zijn intrede doen.

Brandstofcellen vormen een hoofdstuk apart. Zoals figuur 1 laat zien, kan een brandstofcel, in het geval we te doen hebben met een waterig elektrolyt, worden beschouwd als een omgekeerde waterelektrolyse:



Niet alleen hebben ze in het algemeen een hoger rendement (een gevolg van het ontbreken van de zgn. Carnot-cyclus), ook vindt de verbranding bij een lagere temperatuur plaats, waardoor de NO_x-

uitworp veel geringer is. Andere, evidente voordelen zijn: een veel geringere afhankelijkheid van het rendement van de belasting van de cel en de capaciteit; een veel snellere respons als het systeem 'stand-by' staat. In een aantal gevallen kan het feit, dat het systeem modulair van opbouw is, betekenen dat het brandstofcellensysteem zowel geschikt is voor kleine voorzieningen (tractie, huizenblok, etc.), als voor de civiele elektriciteitsproductie (steden, fabriekscomplexen, etc.). De fabrieksmatige produktie van het systeem garandeert flexibiliteit en een snelle levertijd. Maar bovenal zal een zuiniger brandstofverbruik, en dus een geringere CO₂-uitstoot per geleverde hoeveelheid energie, een aantrekkelijk aspect zijn, in ieder geval worden.

Er bestaan diverse brandstofceltypen, waarvan in de toekomst de gesmolten carbonaatcel en de vaste-oxydecél grote beloften inhouden. Nederland loopt in deze ontwikkeling gelukkig niet achterop. Het blijft echter een zeer te betreuren feit dat onze faculteit, ondanks inspanning mijnerzijds, de boot doelbewust heeft willen missen. Onze vakgroep heeft in het verleden veel en goed onderzoek gedaan aan de elektrokatalyse van de zuurstofreductie met metaalorganische complexen, waaronder de ftalocyaninen en de porfyrienen. Daarbij is ook aandacht geschonken aan de fysisch-technologische problematiek van de gasdiffusie-elektrode. Tenslotte moet worden opgemerkt dat de commercialisering van de brandstofcel in een nabijere toekomst zal plaatsvinden dan die van het MHD- of het thermo-ionische conversiesysteem.

De *waterstofeconomie* [6,7]. De idee van waterstof als universele energiedrager berust op het feit dat waterstof, met een hoog elektrisch rendement, door elektrolyse van water kan worden verkregen; maar ook – zoals we zojuist gezien hebben – weer met een hoog rendement tot elektrische energie kan worden geconverteerd. Hoe men ook filosofeert over alternatieven, waterstof blijft in dit opzicht onverslaanbaar. *Opslag* van waterstof is mogelijk; zij is daarom een ideale, complementaire energievorm naast de niet-opslaanbare, immateriële elektrische energie. De interconversie waterstof/elektrische energie is dus een essentieel element in deze economie; een economie, die vraagt om een elektrochemische benadering. En, wat minstens zo belangrijk is: waterstof als energiedrager omzeilt het *broeikas-effect* (immers, het eindprodukt van de verbranding, hetzij thermisch of elektrochemisch, is altijd water), mits de opgewekte elektrische energie niet uit koolstofhoudende, fossiele brandstoffen wordt verkregen. [Daarom zou een gelukke, koude, elektrochemische kernfusie een revolutie ten goede hebben betekend; de discussie hierover is echter nog open en het onderzoek zeker nog niet als afgesloten te beschouwen]. Uitdrukkelijk moet

worden gesteld dat waterstof een secundaire, materiële energiedrager is, die alleen uit primaire energiedragers als kolen, olie, aardgas, uraan, zon, wind, geo-energie, enz., kan worden gewonnen, en bovendien gemakkelijk en goedkoop *transporteerbaar* is. De toekomst van de waterstofeconomie is sterk afhankelijk van de internationale, politieke wil om de CO₂-uitstoot drastisch terug te dringen.

Diversa

Energiebesparing spaart ook het milieu. In een aantal gevallen kan op slimme wijze deze besparing bereikt worden door een *gewenst anodisch proces te koppelen met de kathodische reductie van zuurstof*, op de wijze zoals deze plaatsvindt in een brandstofcel, dus met een gasdiffusie-elektrode. Ook zou een *gewenst kathodisch proces (een reductie dus)* kunnen worden gekoppeld met de anodische oxydatie van waterstof, eveneens zoals deze plaatsvindt in een brandstofcel, dus ook met een gasdiffusie-elektrode. Een voorbeeld van de eerste mogelijkheid kan een mogelijk alternatief voor de chloor-alkali elektrolyse worden. Kort samengevat komt het er op neer dat de waterstof, die bij de klassieke uitvoeringswijze aan de kathode ontstaat, en die eventueel in een waterstof-zuurstof brandstofcel onder energielevering zou kunnen worden verbrand, nu wordt 'kortgesloten'; d.w.z. er ontstaat geen waterstof meer, maar aan de kathode wordt nu zuurstof met behulp van een gasdiffusie-elektrode gereduceerd. Theoretisch betekent deze 'kortsluiting' een verlaging van de elektrolysespanning met 1,23 V, een niet te verwaarlozen, ja zelfs als groot te waarden energiewinst. De realisatie ervan is in dit geval voornamelijk een kwestie van het opschalen van het vermogen van de gasdiffusie-elektrode tot de gebruikelijke stroomdichtheden, wat nog niet gelukt is. Bij de meeste *organische syntheses* zijn deze stroomdichtheden niet nodig, meestal zelfs niet *gewenst*, zodat voor oxydatieprocessen deze mogelijkheid zeker nader zal moeten worden bekeken. In een aantal gevallen is het zelfs mogelijk niet alleen een *gewenst oxydatieproces* te bewerkstelligen, maar ook elektrische energie te winnen: het systeem fungeert dan als een normale brandstofcel.

Zoals gezegd, kan hetzelfde procédé worden toegepast bij reductieprocessen; in plaats van zuurstofontwikkeling aan de hulpanode wordt nu waterstof, met behulp van een gasdiffusie-elektrode, anodisch geoxydeerd; eveneens met een belangrijke energiewinst.

Op het terrein van de *anorganische elektrochemie* heeft de *chloor-alkali* industrie in het centrum van de belangstelling gestaan (dimensioneel stabiele anode; toepassing van een kationwisselend

membraan). Bij de fabricage van *aluminium* zou een dimensioneel stabiele anode nog veel meer worden toegejuicht, omdat de thans toegepaste anoden (koolstof) stoichiometrisch worden geoxydeerd tot CO en/of CO₂ en dus zeer regelmatig moeten worden vervangen.

Balans

1. Met betrekking tot de elektrochemie

Zojuist heb ik getracht aan te geven welke *betekenis* de elektrochemische discipline heeft en kan hebben voor een *groener* perspectief. Ik wil daarbij uitdrukkelijk stellen dat elektrochemie niet een alleenzaligmakende functie heeft, of kan laten gelden. Zij moet worden gezien als aanvullend, maar dan wel als een die een wezenlijke bijdrage kan leveren aan het gestelde doel. De concurrentiepositie van een bedrijf eist dat milieumaatregelen economisch verantwoord zijn. Nederland kan niet op zijn eentje gidsland zijn. Maar tenslotte zal het milieu onontkoombaar ook zijn eisen stellen. Realisatie ervan zal dan onvermijdelijk via internationale organen moeten gebeuren en dwingend moeten worden opgelegd. Wat de rol van de elektrochemie betreft, kan worden vastgesteld dat een aantal elektrochemische processen, met name op het terrein van de *fijnchemicaliën*, reeds op commerciële basis is gerealiseerd. De partiële doorbraak van de *elektrische* auto zal niet lang meer op zich laten wachten. Datzelfde geldt voor de *brandstofcellen*. Dat de *waterstofeconomie* zich bij toekomstige generaties onontkoombaar zal aandienen, staat voor mij vast. Tenslotte zal meer en meer blijken dat de elektrochemie ook perspectieven biedt voor recycling van, onder andere, zware metalen.

Uit het voorafgaande moet het u opgevallen zijn hoe breed elektrochemie is haar *toepassingen*: energie, synthese, analyse, corrosie, galvano, geleidende polymeren, bio- en fotochemie. Maar ook in haar basisprincipes onderhoudt zij nauwe relaties met kinetiek en katalyse, de oppervlaktechemie, de fysische chemie van vloeistoffen, de kolloidchemie, etc. Haar bijzondere methoden ter ontrafeling van reactiemechanismen, de (cyclo-)voltammetrie, hydrodynamische elektroden, impedantie- en pulsmethoden, en thans ook de in de chemische katalyse gebruikte (hoogvakuüm-) spectrometrische methoden, vragen om een creatief gebruik. En als we daaraan nog de technologische problematiek [reactorontwerp, gasdiffusie-elektroden, etc.] toevoegen, dan zal niemand kunnen ontkennen dat elektrochemie van alle, aan deze faculteit gedoceerde disciplines de meest fantastische mogelijkheden voor *project-onderzoek* heeft geboden.

2. Met betrekking tot de universiteit

Een afscheidsrede is een geschikt kader om een balans op te maken van vakgroepsprestaties en van wat mij zelf voor ogen stond, ware het niet dat de resterende tijd mij dwingt tot een slechts fragmentarische presentatie. Allereerst wil ik een paar kanttekeningen plaatsen bij universitair *onderwijs en onderzoek*. De grote verleiding van het onderwijs is de resultaten van de wetenschap te laten memoriseren in plaats van haar bronnen te ontsluiten. Zulk onderwijs is *onder-wijs* en de nekslag voor de verwondering, die het begin van alle wijsheid is [8]. Verrassing gaat vaak aan verwondering vooraf. Carse [9] vatte een en ander bondig als volgt samen: 'to be prepared *against* surprise is to be trained' [daar is dan de (hoge)school voor]; 'to be prepared *for* surprise is to be educated' [en daar is nu juist de universiteit voor: universitair onderwijs is dan ook een wezenlijk onderdeel van universitair onderzoek, en niet omgekeerd, zoals ons wordt aangepreft]. Vergis ik mij, of is de hogeschool, nadat zij tot universiteit is omgedoopt, meer hogeschool geworden dan ooit tevoren? De werkelijkheid – ook de natuurwetenschappelijke – presenteert zich immers zo chaotisch [10], dat deze zeker niet kan worden ontsluitend als niet beide, kennis en kunde, in de zin als boven geschetst, echt present zijn en in symbiose samenwerken. Of vertaald naar een vakgroep: als wetenschappelijke medewerkers en technici (ook wel *niet-wetenschappelijk* personeel genoemd, m.i. een hoogst onbillijke en bovendien knullige benaming) niet in een team samenwerken. Kon vroeger wetenschapsbeoefening een solitaire aangelegenheid zijn, hedentendage is deze nauwelijks meer in deze vorm denkbaar, zeker niet voor de natuurwetenschappen. Er is niemand meer die precies weet wat we *al* weten, terwijl bovendien niemand meer precies weet wat we niet weten. Is het daarom dat tegenwoordig steeds meer wetenschappers op 'safe' gaan spelen? Waarbij bovendien de door geldgebrek geplaagde universiteit hen dwingt al '*ondernemend*' de 'pseudo'-TNO-achtige richting in te slaan. Versta mij goed: op zich is het een goede zaak als studenten weet krijgen van de industriële problematiek – eerder dan wie ook ben ik daar een voorstander van geweest, ook in de tijd van de WUBbocratie – maar de eerste taak van een universiteit blijft het kritisch-geëngageerd beoefenen van de wetenschap, uiteraard ten bate van het maatschappelijk, en industrieel, en milieu-gebeuren. Want de maatschappij, en dus ook de chemische industrie, is uiteindelijk niet gebaat bij korte-termijn denkers, weliswaar alert op het heden, maar de toekomst verwaarlozend. Wonderlijk genoeg blijken de meeste *captains of industry* dit beter te beseffen dan sommige hoogleraren en beheerders van universiteiten. Als vuistregel zou ik willen stellen niet meer dan één kwart van de totale

onderzoeksinspanning te reserveren voor contractresearch, die slechts een minimale bijdrage oplevert aan wetenschappelijk en technologisch inzicht. Risicodragend onderzoek – zoïets als de koude, elektrochemische kernfusie [11,12], ook al zou het achteraf een luchtkasteel blijken te zijn – moet mogelijk blijven. Zonder frustratie mis je ook de verwondering, als bron van nieuwe inspiratie, en vervalt een onderzoeker al snel in het fenomeen van 'thema met cliché-varianties', opgebouwd met steeds dezelfde parameters. Laat ik niet worden misverstaan: een thema aansnijden en daar langdurig en met grote volharding en creativiteit aan werken is een uitstekende zaak. Een echte specialist is niet iemand die steeds méér weet over steeds minder, maar juist iemand die steeds duidelijker greep krijgt op een stuk werkelijkheid en daarin een hele wereld ontdekt [8]. Zoals Johan Sebastiaan Bach dat deed – ik geef maar een willekeurig voorbeeld – met zijn dertig, fijnzinnige Goldberg-varianties [13]. Toch zijn er maar weinigen, die aandacht in genoemde zin langdurig kunnen opbrengen en daarbij creatief blijven. Dat kan wel als je breed blijft oriënteren, niet alleen in je eigen vakgebied en aanverwante chemie, maar ook daarbuiten, op het terrein van de kunsten. Paul Klee zei dat voor de beeldende kunst heel treffend: 'Die Kunst gibt nicht das Sichtbare wieder, sondern macht sichtbar' [14]. Iets dergelijks geldt ook voor de wetenschapsbeoefening, ook een kunst en kunde: zij zoekt eveneens naar zicht op verbanden. Er bestaan allerlei theorieën over *creativiteit* [15]. Het ontwikkelen van een helicopterview, het lateraal leren denken en de brainstorming vormen natuurlijk nuttige componenten in het ontwikkelen van een nieuw concept, of het inslaan van nieuwe wegen. Mensen echter, die in staat zijn ver van elkaar verwijderde punten in hun kennis met elkaar te verbinden en niet op elk punt halt houden, zijn in dit opzicht in het voordeel. Zo was Lorentz veel beter thuis in het geheel van de toenmalige natuurkunde dan Einstein; niettemin was het niet Lorentz – die, achteraf bekeken, dicht in de buurt kwam van de speciale relativiteitstheorie – maar Einstein die haar ontdekte. Maar Einstein had een veel bredere filosofische en artistieke belangstelling [16,17]. In dit verband wil ik gaarne nog een, misschien in uw ogen wat triviale, opmerking maken. De ons allen bekende, optimistische heer Murphy heeft eens gezegd: *'if anything can go wrong, it will'*. Ik zou hier tegenover willen stellen dat, *als één keer iets goed is gegaan, dit altijd moet kunnen* (een soort tegenovergestelde wet van Murphy dus). Hoe vaak wordt niet een onverwacht resultaat verworpen of geëlimineerd, omdat het niet past in een voorgestelde hypothese. Terwijl hier wel eens een sleutel kan liggen voor een nieuwe vondst. Ik denk hierbij aan een experiment dat een verrassend resultaat heeft opgeleverd, maar dat, bij herhaling, faalde. Vaak heeft zo'n verrassend

resultaat zich afgespeeld in de smalle marges van de experimentele omstandigheden; katalyse is hierom beroemd en berucht. Onderzoek zal zich daarom wel eens wat meer moeten richten op het verbreden van deze marges. Misschien dat de koude, elektrochemische kernfusie hiervan ook het slachtoffer is geworden.

Een andere, voor het heden ernstiger zaak is de enorme *verspilling van talent*, met name van oudere hoofddocenten en hoogleraren (en met 'oudere' bedoel ik dan die boven de 45 jaar). Het onderzoek managen en er fondsen voor zien aan te boren, wordt zo langzamerhand hoofdzaak. Daarentegen moeten promovendi – geen kwaad woord over hen – in minder dan 7000, normatief vastgelegde uren relevante kennis aan het bestaande arsenaal toevoegen; niet op 'safe' spelen wordt onherroepelijk afgestraft. Wij kunnen niet alle schuld naar Zoetermeer dragen. 'Zoet en meer' – ik bedoel *kwaliteit* – dienen we zelf te genereren, te bevechten. Als je je meer schuldig gaat voelen als je te laat bent met het voldoen aan een bureaucratische verplichting (meestal door niemand gelezen), dan aan het verwaarlozen van je eigenlijke taak ten aanzien van onderwijs en onderzoek, dan is er iets grondig mis: er is dan sprake van een aanvaard structureel geweld. Verantwoording van ontvangen gelden moet er zijn. De wijze waarop SON dat tot op heden doet, geeft aan hoe het in redelijkheid kan. Aan (zeer) goede onderzoekers dient meer vrijheid in keuze, met de daarbij behorende *onvoorwaardelijke financiering*, te worden gegeven, met controle achteraf. Iets anders. Moest vroeger het onderzoek *maatschappelijk relevant* zijn (terwijl aan de maatschappij nauwelijks enige relevantie kon worden ontleend), of, in een latere fase, *beleidsondersteunend* zijn (terwijl beleidsmaatregelen de school en ook de universiteit in een permanente staat van herstructurering hielden en nog houden), nu zou onderwijs en onderzoek volledig ten dienste moeten staan van een niet nader gespecificeerde, *economische groei*, die bovendien nodig is, aldus prof. Rutten van EZ [18], om het milieu te kunnen financieren: waar deze stelling op gebaseerd is, blijkt nergens uit! Het is precies andersom: investeren in schonere produktiemethoden levert uiteindelijk economische groei op, die ook het leefmilieu ten goede komt [19]. Voor de chemische bedrijfstak betekent dit allereerst meer aandacht voor fundamenteel katalytisch onderzoek, studies naar mogelijkheden van recycling en onderzoek naar meer optimale (chemische) technologieën. Uiteindelijk zullen de, op basis van dit onderzoek verkregen, verbeterde produktiemethoden de enige acceptabele blijken te zijn, zeker als de expansieve jaren van nu straks echt ten einde lopen en ingehaald worden door een nieuwe schaarste. En juist op deze terreinen kan de elektrochemie wel eens van grote betekenis blijken te zijn. *Milieu*: elektronen als immaterieel

reagens bij syntheses; *energie*: schonere productie van elektrische energie met hoger rendement (brandstofcel), ingebed in een waterstofeconomie.

3. Het aandeel van de vakgroep Elektrochemie

Tabel 2 geeft een indruk van het verrichte onderzoek. We kunnen hieruit concluderen, dat het onderzoek in onze vakgroep, zowel het meer fundamentele als het toegepaste, sterk gestaan heeft in de context van *energie*: accu's voor elektrisch transport; brandstofcellen voor winning van elektrische energie uit fossiele brandstoffen met hoger rendement, ten behoeve van zowel stroomlevering via het net als voor transportdoeleinden. In het laatste geval staat daarbij de elektrische auto, met methanol als brandstof, als lokkend perspectief. En het geheel zo mogelijk te plaatsen in het kader van de *waterstofeconomie* (die er naar mijn vaste overtuiging eens zal komen). Maar ook de *synthese* met elektronen als immaterieel reagens, ten behoeve van de organische fijnchemie met mogelijkheden naar stereo- en enantioselectiviteit, had de speciale aandacht van de vakgroep, ook al vanwege de impliciet geringere milieubelasting. Verbindende schakel is van het begin af aan de *elektrokatalyse* geweest, met daarbij in de laatste jaren veel aandacht voor de gemodificeerde elektroden, met name de polymeer-gemodificeerde elektrode. In deze laatste vorm zie ik nog vele mogelijkheden liggen voor het op maat maken van specifiek-werkende, elektrokatalytisch-actieve elektroden.

Quantumelektrochemische, dus 'ab initio', *benaderingen* zouden aan deze doelstelling wel eens een grote bijdrage kunnen leveren.

De vakgroep elektrochemie heeft – ondanks haar van meet af aan omstreden positie binnen de faculteit – impliciet aan milieuaspecten de nodige aandacht geschonken. Het is daarom triest dat onze vakgroep, als enige vakgroep 'toegepaste elektrochemie' in Nederland, met een landelijk erkende en gewaardeerde functie (zoals blijkt uit de probleemloze toekenning van de zgn. voorwaardelijke financiering), zonder ook zelf ooit gehoord te zijn, moest verdwijnen. Van wat ik geschreven heb over de wijze, waarop dit gebeurd is [20], behoeft ik geen woord terug te nemen. De nauwst betrokkenen binnen de faculteit weten waarom. Ik moet er volledigheidshalve aan toevoegen dat de elektrochemie in heel Nederland een omstreden discipline is; op de oorzaken hiervan ga ik nu niet in. Een positief punt is, dat de harmonie in de verkleinde vakgroep na januari 1988, anders dan wordt gesteld [20f], in versneld tempo weer hersteld is. Op zich allerminst verwonderlijk, omdat toen een werkgroep die zich bezig houdt met scheiding in gepolariseerde velden (in overdrachtelijke zin

een uitgelezen polemologisch onderwerp) van de oude vakgroep is afgesplitst; veel te laat overigens. Maar goed: 'het recht dat dom is, maakt recht wat krom is'.

Slotwoord

Ik kom nu aan het einde van mijn afscheidsvoordracht. In de eerste plaats wil ik mijn dank betuigen aan mijn vrouw, die onder ook voor haar moeilijke omstandigheden mij trouw is geweest. In de tweede plaats geldt deze dank de na januari 1988 overgebleven leden van de vakgroep Elektrochemie; zij hebben, na de opgelegde, demotiverende omstandigheden vòòr genoemde datum, kans gezien kwalitatief de wetenschappelijke output op peil te houden.

Eén en ander heb ik voor mijzelf als volgt samengevat:

*Waarheid is schitterender dan werkelijkheid,
werkelijkheid ongeloofwaardiger dan menselijke verbeelding.
Er is gezegd: in den beginne was het woord;
ja, maar als aan het einde de daad
niet geschraagd wordt door gerechtigheid,
dan zijn waarheid en vrede verdwenen.*

Ik ben met Einstein begonnen en wil ook met hem eindigen. Toen een Amerikaans uitgever hem vroeg een boodschap te schrijven, die in een luchtdichte, metalen kist zou worden bewaard ten behoeve van het verre nageslacht, schreef hij [21; zie ook: 22]:

*'Lief nageslacht,
Als u niet rechtvaardiger, vreedzamer
en in het algemeen verstandiger geworden bent
dan wij zijn, respectievelijk
geweest zijn,
dan moge de duvel u halen.*

*Na deze vrome wens met alle hoogachting geuit te hebben, verblijf ik,
uw (voormalige)
Albert Einstein'.*

Dames en heren,
lemand heeft eens gezegd: 'Er is een tijd van komen en een tijd van gaan'. Wel, de tijd van gaan is nu voor mij gekomen.

Ik dank u voor uw aanwezigheid en aandacht.

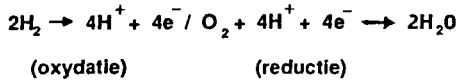
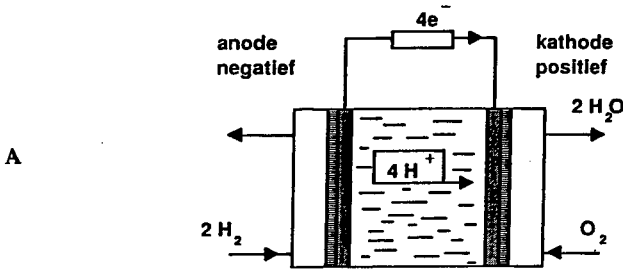
Literatuur

1. A. Paets van Troostwijk. Lezing, gehouden op 8 december 1789: 'Schets der nieuwe ontdekkingen omtrent het WATER', gepubliceerd in 'Algemeen Magazijn van Wetenschappen, Konst en Smaak, 4 (1790) 909-941, deel II'. Experiment, uitgevoerd met J.R.Deiman. Zie ook: Journal de Physique, Novembre 1789.
2. K. van Berkel - In het voetspoor van Stevin - Boom, Meppel (1985), zie p. 95-97.
3. W. Ostwald - Elektrochemie, ihre Geschichte und Lehre - von Veit & Comp. Verlag, Leipzig (1896).
4. L. Dunsch - Geschichte der Elektrochemie - VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig (1985).
5. R.A. Sheldon - Katalyse in de fijnchemie - Inaugurele rede, Technische Universiteit Eindhoven (1988).
6. Waterstof als energiedrager, toekomstige mogelijkheden in Nederland - TNO, s'-Gravenhage (1975).
7. Wasserstofftechnologie, Perspektiven für Forschung und Entwicklung - Dechema, Frankfurt am Main (1986).
8. C. Verhoeven - Inleiding tot de verwondering - Ambo, Utrecht (1967).
9. J.P. Carse - Finite and Infinite Games - Ballantine Books, New York (1986).
10. J. Gleick - Chaos - Penguin Books, New York (1987).
11. M. Fleischmann and S. Pons - Electrochemically induced nuclear fusion of deuterium - J. Electroanal. Chem. 261 (1989) 301-308.
12. K. Ebert - Elektrochemisch induzierte Fusion von Deuterium - Nachr. Chem. Tech. Lab. 37 Nr.5 (1989) 470.
13. B.W.V. 988.
14. Denys Chevalier - Klee - Südwest Verlag, München (1971).

15. S. Dresden - Wat is creativiteit - Meulenhoff, Amsterdam (1987).
16. A. Pais - Subtle is the Lord - Oxford University Press, Oxford (1982).
17. H.F. Cohen - Eruditie - Trouw, woensdag 24 mei 1989, 18.
18. F.W. Rutten - Op weg naar voltooiing van het sociaal-economisch herstel - ESB (1989) 6.
19. A. Heertje - Voor niets gaat de zon op - ESB (1989) 428.
20. Chemisch Weekblad:
 - a. 26 februari 1987, 73
 - b. 26 maart 1987, 117
 - c. 2 juli 1987, 265
 - d. 24 december 1987, 505
 - e. 28 januari 1988, 30
 - f. 11 mei 1989, 194
21. H. Dukas en B. Hoffmann, ed. - Hoogachtend, Albert Einstein - Annex, Amsterdam (1989).
22. M. Ruse - Taking Darwin Seriously (A Naturalistic Approach to Philosophy) - Basil Blackwell Ltd, Oxford (1986). Een studie over ethiek en evolutie.

BATTERIJ, ACCU, BRANDSTOFCEL

LEVERT ENERGIE: ΔG negatief



ELEKTROLYSE

KOST ENERGIE: ΔG positief

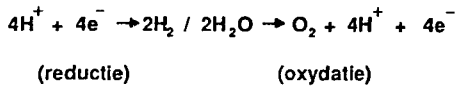
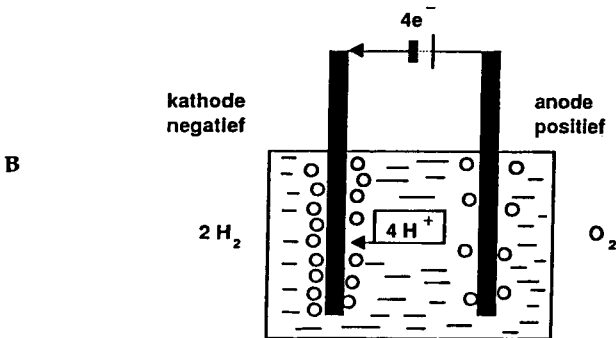
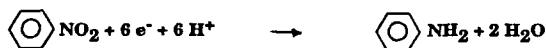


Fig. 1. Energieleverende systemen (A: zure waterstof-zuurstof brandstofcel) en energie verbruikende systemen (B: waterelektrolyse in zure, waterige oplossing).

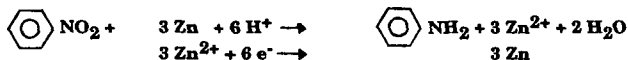
Tabel 1. Voorbeelden organische elektrolyse

a. REDUCTIE AROMATISCHE NITROVERBINDINGEN.

Elektrochemisch:

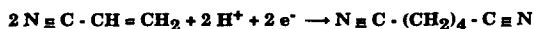


Met zink:

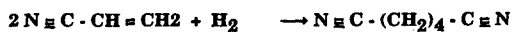


b. DIMERISATIE ACRYLONITRIL TOT ADIPONOTRIL.

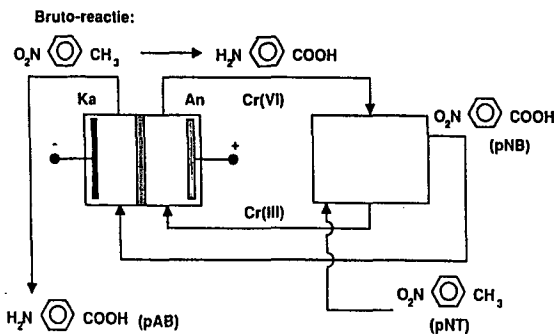
Elektrochemisch:



Chemisch:



c. KOMBINATIE VAN EEN ANODE-MET EEN KATHODEPROCES



Tabel 2. Onderzoek vakgroep Elektrochemie

Energiegeïëerd:

Kathodische zuurstofreductie met metaalorganische complexen, gasdiffusie-elektrode; beide in relatie tot de brandstofcel.
Accu-onderzoek t.b.v. elektrische tractie: zinkelektrode.
Watelektrolyse t.b.v. de waterstofeconomie.

Synthesegeïëerd:

Elektrochemisch gegenereerde, gesolvateerde elektronen.
Chloor-alkali elektrolyse; hypochloriet (Indonesië).
Diverse, organische elektrolysen.
Watelektrolyse, zie boven.

Elektrokatalyse:

Zuurstofreductie, zie boven.
Polymeergemodificeerde elektrode en andere, chemisch en fysisch gemodificeerde elektroden; enzymgemodificeerde elektrode.

Vormgeving en druk:
Reproductie en Fotografie
Technische Universiteit Eindhoven