

Chemische Feitelijkheden

#353

Editie 88

april

2019

Bastienne Wentzel

CO₂

NIVEAU DU GLACIER
LEVEL OF THE GLACIER

1990

Van afvalstof naar grondstof

Dat de mens grotendeels verantwoordelijk is voor de opwarming van de aarde door de enorme uitstoot van CO₂, daarover is vrijwel iedereen het eens. Het is logisch dat de mens daar dan ook een oplossing voor verzorgt, zoals CO₂ afvangen op de plek waar je het maakt, bij energiecentrales of in de industrie. Dit gas kun je weer opbergen in de bodem; in lege olie- of gasvelden. Op korte termijn is dat een haalbare oplos-

sing, maar beter is om zowel minder CO₂ te gaan uitstoten als het geproduceerde CO₂ weer nuttig te gebruiken als grondstof. Dat kan, bijvoorbeeld door het te laten reageren met waterstof tot methaan en water, maar er moet veel energie in die reactie om haar te laten verlopen. CO₂ is namelijk vrij inert. Over de hele wereld is onderzoek gaande om dat dilemma op te lossen, voornamelijk met allerlei vormen van katalyse.

Van afvalstof naar grondstof

CO₂ is een zogenoemd broeikasgas: een teveel in de atmosfeer doet het klimaat opwarmen. Dat komt door de mens, die koolstofdioxide sinds de industriële revolutie overmatig produceert. Maar met enige moeite is CO₂ in de nabije toekomst goedkoop en schoon om te zetten in bruikbare stoffen.

Koolstofdioxide heeft niet zo'n beste naam door zijn rol in de klimaatdiscussie, maar het molecuul heeft ook zijn goede kanten. Zo is het voor alle planten en sommige micro-organismes letterlijk de ademtocht. Zij zetten CO₂ samen met water om in koolhydraten, zoals suikers waarmee ze cellen bouwen. De mens ademt ongeveer 1 kg koolstofdioxide per dag uit. Dat is het verbrandingsproduct van koolhydraten met zuurstof, waarbij energie vrijkomt die nodig is voor de biologische processen in het lichaam.

CO₂ zelf is niet schadelijk, maar het is wel prettig dat je het overschot uitademt. Te veel CO₂ in het lichaam maakt het bloed te zuur, dat heet respiratoire acidose. Daarvan krijg je in het ernstigste geval een hartstilstand. Te weinig CO₂ in het bloed is ook

niet goed, dat veroorzaakt hyperventilatie, waarbij het gebrek aan CO₂ zorgt voor een vernauwing van de bloedvaten waardoor onder meer de hersenen te weinig zuurstof krijgen. Je voelt je benauwd en gaat daarvoor nog sneller en oppervlakkiger ademen.

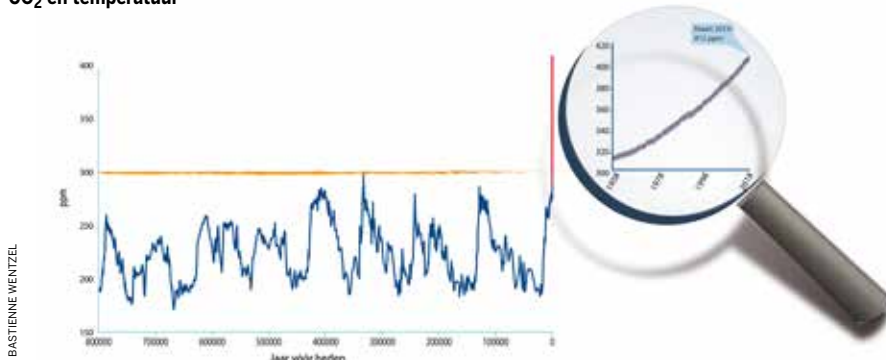
Lekker warm

Er is nog een reden waarom we blij mogen zijn met CO₂. Het houdt onze aarde leefbaar. Zonder CO₂ in de atmosfeer zou de gemiddelde temperatuur op aarde een frisse -18 °C zijn, omdat de warmte van zonnestraling zou terugkaatsen naar de ruimte. CO₂-moleculen absorberen die infraroodstraling en houden zo de warmte vast.

CO₂ heet om die reden een broeikasgas. Het gas bereikt dit effect, net als andere broeikasgassen zoals waterdamp en me-

thaan, al in heel kleine concentraties in de atmosfeer, namelijk op dit moment zo'n 400 volume-ppm, ofwel 0,04 volumeprocent (zie grafiek). In de hele atmosfeer is dat nog altijd 3.000 miljard ton (3.000 Gt) CO₂. De atmosfeer is niet de enige plek waar je koolstofdioxide vindt. In de oceanen zit bijvoorbeeld 39.000 Gt koolstof, het meeste in de vorm van opgelost CO₂ en nog eens ruim 10.000 Gt koolstof in de bodem, voornamelijk resten van afgestorven planten. Door groeien en afsterven van organismes, vulkaanuitbarstingen, veranderingen in oceaanwater – zoals de temperatuur (in warm water lost minder gas op) en zuurgraad – en door verwerking van gesteentes wordt er continu koolstof opgenomen uit de atmosfeer en weer vrijgelaten. Dat proces heet de koolstofkringloop. De CO₂-huishouding heeft een evenwicht dat door invloeden van buitenaf kan verschuiven. In de historie van de aarde zijn er flinke schommelingen geweest in de hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer. Gedurende de geologische periode Midden-Krijt, 90 tot 130 miljoen jaar geleden, was de CO₂-concentratie bijvoorbeeld zo'n 1.000 ppm. Dat is bekend door onder meer Nederlands onderzoek aan chemische fossielen, de chemische overblijfselen van micro-organismes die toen leefden. De gemiddelde temperatuur op aarde was destijds 6 tot 10 °C hoger dan nu. En het water in de Atlantische Ocean was 35 tot 40 °C. De laatste 800.000 jaar is de hoeveelheid CO₂ in de lucht veel lager geweest, namelijk tussen 175 en 280 ppm, en de temperatuur was tot 5 °C lager dan nu.

CO₂ en temperatuur



De afgelopen 800.000 jaar is de CO₂-concentratie in de atmosfeer nooit hoger geweest dan 300 ppm. De afgelopen zestig jaar is zij gestegen van ruim 300 naar 412 ppm. De fluctuaties in de recente metingen rechts zijn het gevolg van de seizoenen. De data links zijn gemeten in ijskernen op Antarctica, de zogeheten Vostok- en Dome C-stations. De data rechts zijn gemeten op Mauna Loa, Hawaii, VS.

Bron: NOAA

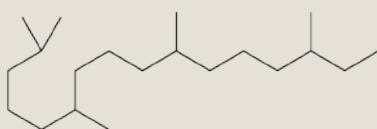


Boven de Muir-gletsjer in Alaska (VS) in 1941, onder in 2004. Op de recente foto is de gletsjer zo'n 7 km landinwaarts gelegen, buiten de foto.

► Chemische fossielen

Om te weten hoeveel CO₂ er in het verre verleden in de aardatmosfeer zat, gebruiken onderzoekers poolijs. Daarin zit nog CO₂ uit de tijd dat het ijs werd gevormd. Het probleem is dat er geen ijskernen zijn ouder dan pakweg een miljoen jaar. Maar sommige stoffen uit de cellen van organismes blijven wel tientallen tot honderden miljoenen jaren bewaard. Dan gaat het bijvoorbeeld om lipides, de vetachtige beschermlaag van cellen. Die stoffen, chemische fossielen genaamd, vertellen iets over de tijd waarin het organisme leefde, bijvoorbeeld over de samenstelling en de temperatuur van de atmosfeer.

Onderzoekers van het NIOZ en de Universiteit Utrecht bepaalden onlangs met grote precisie de hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer tot 500 miljoen jaar terug op basis van zo'n chemisch fossiel uit algen. Het gaat om fytaan, een afbraakproduct van chlorofyl. Bij de opname van CO₂ tijdens de fotosynthese hebben de algen een voorkeur voor lichte koolstofisotopen (¹²C) boven zware (¹³C). Ze gebruiken alleen de zware koolstofisotopen wanneer de CO₂-concentratie in het water of de atmosfeer laag is. De verhouding tussen die twee isotopen in fytaan weerspiegelt daarom de CO₂-concentratie in de omgeving waar de planten en algen groeiden. In theorie kunnen de onderzoekers hiermee twee miljard jaar terug in de tijd.



Fytan.

Snelle veranderingen

Atmosferische schommelingen in CO₂-concentratie en temperatuur zoals je nu waarneemt, voltrokken zich de afgelopen miljoen jaar over zeer lange periodes. De laatste tweehonderd jaar is er echter iets gekks aan de hand. Binnen die tijd steeg de gemiddelde temperatuur op aarde 1 °C en de CO₂-concentratie naar meer dan 400 ppm. Niet toevallig valt die periode samen met de Industriële Revolutie, waarin mensen grote hoeveelheden fossiele brandstoffen verstoken waarbij koolstofdioxide vrijkomt. Het evenwicht van de koolstofkringloop is verstoord geraakt. Je kunt precies uitrekenen hoe groot die verstoring is,



De staalindustrie is wereldwijd verantwoordelijk voor zo'n 7 % van de CO₂-uitstoot.

doordat bekend is hoeveel fossiele brandstoffen we gebruiken. Daarbij komt wereldwijd zo'n 36 Gt CO₂ per jaar vrij. Zou dat allemaal in de atmosfeer blijven, dan brengen wij jaarlijks ruim 4 ppm extra CO₂ in de lucht. Gelukkig neemt de aarde dat CO₂ ook op, ruim 40 %, blijkt uit onderzoek. Dan blijft er zo'n 2 ppm over. En laat dat nou precies de jaarlijkse concentratiestijging zijn van CO₂ in de lucht. Daarnaast is uit isotopenonderzoek gekomen dat het extra CO₂ uit fossiele brandstoffen moet komen en niet uit andere bronnen, zoals vulkanen of oceanen. Het IPCC-klimaatpanel van de Verenigde Naties, dat zo'n 1.300 wetenschappers wereldwijd raadpleegde, concludeert dat de stijging van CO₂ in de lucht met 95 % zekerheid een gevolg is van menselijk handelen. En de tegelijk gemeten temperatuurstijging op aarde, die nu zoveel veranderingen in het klimaat veroorzaakt, schrijft het met 'extreem hoge waarschijnlijkheid' toe aan dit zogeheten antropogeen CO₂.

Besparen en overstappen

De gemiddelde temperatuur op aarde is inmiddels bijna 1,5 °C hoger dan voor de

Industriële Revolutie. Om erger te voorkomen, is er geen andere keus dan minder CO₂ uit te stoten en het liefst ook wat uit de lucht te halen. Nederland stoot jaarlijks rond de 164 megaton (Mt) CO₂ uit, waarvan bijna de helft door de industrie en elektriciteitscentrales, en zo'n 90 Mt door transport, landbouw en de gebouwde omgeving (elk 30 Mt). Dat moet omlaag, dus is het noodzakelijk om te besparen en over te stappen op duurzame bronnen, zoals zon, wind of biomassa.

Maar Nederland produceert nog maar weinig duurzame energie, namelijk slechts 13 % van het totaal. Van de verbruikte energie is maar 6 % hernieuwbaar. Ook het aandeel duurzaam opgewekte elektriciteit is klein: zo'n 13 % van het totale verbruik. Die percentages stijgen maar langzaam.

Daarnaast is het niet voor alle CO₂-producten mogelijk om op korte termijn de CO₂-uitstoot terug te dringen. Denk aan vliegtuigen of containerschepen; die kunnen niet zomaar overstappen op elektriciteit. Ook de staal- en cementindustrie zijn grote boosdoeners, met elk wereldwijd zo'n 7 % van de CO₂-uitstoot. Bij staal-



productie is in de huidige processen koolstof nodig voor de reductie van ijzererts (ijzeroxide) en blijft dus altijd CO₂ ontstaan, zo'n twee ton per ton staal. Onderzoekers ontwikkelen nieuwe processen die minder CO₂ uitstoten, bijvoorbeeld met waterstof of met elektrische ovens. De productie van cement gebeurt met onder meer calciumcarbonaat, door er CO₂ vanaf te halen. Een ander proces is voornamelijk niet voorhanden.

Veel experts denken daarom dat het noodzakelijk is om het CO₂ dat we produceren zo snel mogelijk op te ruimen, in plaats van de lucht in te sturen. De snelste manier daarvoor is het gas af te vangen op de plek waar je het produceert. Dat gebeurt al in raffinaderijen en bij aardgaswinning. Sommige gasvelden bevatten ook CO₂. Dat verwijder je voordat het aardgas de leidingen in kan.

Om CO₂ af te vangen, gebruik je vaak amines. Traditioneel leid je het gas door een waterige oplossing van alkanolamines waaraan CO₂ bindt. Dat komt weer vrij na opwarmen, zodat je de oplossing opnieuw kunt gebruiken. Een andere mogelijkheid is amines op een drager van bij-

voorbeeld silica. Het voordeel daarvan is dat de schadelijke amines in dit geval minder snel kunnen vrijkomen. Ook is minder energie nodig bij verhitten voor de regeneratie. Daarnaast bestaan er membranen die selectief CO₂ doorlaten en methaan tegenhouden. Meer recent gebruik je hydrotalciet, een gehydrateerd magnesium-aluminium-hydroxy-carbonaat ($Mg_6Al_2CO_3(OH)_{16} \cdot 4(HH_2O)$), bekend van maagzuurtabletjes. Al die methodes leveren een 99 % zuivere stroom CO₂ op. In de ruimtevaart, zoals op het International Space Station, halen zeolieten het overschot CO₂ uit de lucht die astronauten ademen.

Voor de staalindustrie is een andere oplossing beter geschikt. De gasstroom die vrijkomt bij de staalproductie bevat naast CO₂ ook CO en stikstof. Die laatste twee zijn heel lastig van elkaar te scheiden. De oplossing bestaat uit CO met stoom omzetten naar CO₂ en H₂. Die kun je wel scheiden en bovendien is waterstof een waardevolle verbinding, bijvoorbeeld als brandstof. Zo ontwikkelen onderzoekers voor elke toepassing een specifieke oplossing waarbij CO₂ afvangen niet al te duur is of zichzelf terugverdient.

Onder de grond

Als je eenmaal zuiver CO₂ hebt, dan kun je dat bijvoorbeeld in een leeg gasveld pompen. Die CO₂-opslag is niet nieuw. In Canada en de VS gebeurt het al tientallen jaren. Daar dient het terugpompen van gas in olievelen voornamelijk voor het makkelijker kunnen winnen van de laatste restjes olie. Het gas drijft die restjes uit het gesteente.

De technologie van CO₂-opslag is hierdoor al ver ontwikkeld. Zo is gebleken dat het gas netjes in het gesteente blijft en niet weglekt, of er nou een zoutlaag of een kleilaag als afsluiter boven het veld ligt. Er is kennis opgedaan over verschillende types gesteentes en ondergronden. Bevat het gesteente bijvoorbeeld veel water, dan lost CO₂ daarin op en ontstaat een zuur. Dat kan reacties aangaan met andere stoffen en bijvoorbeeld carbonaten vormen. Als je installaties ontwerpt die CO₂ terugpompen in de grond moet je hiermee rekening houden.

Daarnaast is onderzocht wat er gebeurt als je vloeibaar CO₂ onder hoge druk in een poreuze laag pompt. Het zet dan uit en koelt sterk af, waarbij zelfs ijsvorming kan

ontstaan. In het begin moet je het CO₂ dus langzaam in het gasveld pompen.

Afvoerputje van koolwaterstof

In plaats van onder de grond stoppen, kun je CO₂ ook opnieuw gebruiken. Een probleem hierbij is wel dat het stofje vrij inert is. Het is namelijk, volledig geoxideerd. Welke koolwaterstof je ook verbrandt, je komt uiteindelijk altijd bij CO₂ terecht, vandaar dat het ook wel het afvoerputje van de koolwaterstoffen wordt genoemd. CO₂ activeren kost veel energie. Daarvoor zijn diverse oplossingen.

De klassieke methode voegt die energie toe in de vorm van warmte en hoge druk. Dit is de Sabatier-reactie uit 1897, waarbij CO₂ met waterstof reageert tot methaan en water. De reactie vindt plaats bij enkele honderden graden Celsius en verhoogde druk. Dat is nodig door de hoge activeringsenergie. De reactie zelf is sterk exotherm.

► Opslag in gasvelden

Ook in Nederland bekijken onderzoekers of je de gasvelden op zee (de groene velden op de kaart) nuttig kunt gebruiken voor CO₂-opslag. Vanaf 2023 moet er een leiding vanaf de haven van Rotterdam naar het gasveld genaamd P18 lopen. Bedrijven die zich aansluiten op die leiding kunnen hun CO₂ daarmee opslaan in dit veld. Daarin past in totaal 37 Mt CO₂, dat je er met 2 à 3 Mt per jaar in kunt brengen. Opslag in gasvelden op land stuit voornamelijk op te veel bezwaren van omwonenden. In Barendrecht is een dergelijk project in 2010 afgeblazen door gebrek aan draagvlak.



Diverse bedrijven gebruiken varianten op dit proces om op commerciële schaal nuttige verbindingen uit CO₂ te creëren. Het IJslandse Carbon Recycling International produceert bijvoorbeeld ruim 5.000 ton methanol per jaar voor brandstof. Het benodigde waterstofgas maakt het ter plekke met duurzame, voornamelijk geothermische, elektriciteit. In Frankrijk staat een demonstratiefabriek die 25 m³ methaan per uur produceert uit CO₂ met het Sabatier-proces. En in het Duitse Werlte maakt een fabriek al jaren methaan uit CO₂ en waterstof voor onder meer autofabrikant Audi. Die processen zijn alleen economisch haalbaar als je een geconcentreerde stroom CO₂ gebruikt, een zogeheten puntbron. CO₂ uit de lucht halen (*direct air capture*) is nog te duur vanwege de lage concentratie.

De meeste van die processen werken met een heterogene katalysator, vaak nikkel op een drager, waarover je de gassen leidt. Edelmetalen zoals ruthenium of iridium werken beter, maar die zijn te duur en te zeldzaam om op industriële schaal toe te passen. Daarnaast wil je niet alleen methaan, maar ook meer waardevolle stoffen zoals methanol, ethanol en hogere koolwaterstoffen kunnen maken, en de katalysatoren moeten nog goedkoper worden en langer meegaan. Wetenschappers onderzoeken daarom onder meer verschillende metalen, legeringen en dragers en kijken naar de invloed van de structuur van het oppervlak op de reactie.

Meer mogelijkheden

Een andere manier om CO₂ te activeren, is via een plasma. Daarbij warm je het gas met microgolfstraling lokaal zo sterk op, tot duizenden graden Celsius, dat de moleculen uit elkaar vallen. Zo maak je CO, dat vervolgens in bijvoorbeeld een Fischer-Tropschproces met waterstof kan reageren tot koolwaterstoffen. De grote hoeveelheid energie die nodig is om dat plasma te produceren, zou moeten komen van duurzame elektriciteit. Maar die techniek staat nog in de kinderschoenen.

Je kunt ook biokatalysatoren inzetten. Het project Steelanol gebruikt het micro-organisme *Clostridium autoethanogenum*, dat CO₂ door middel van fermentatie omzet in ethanol. Een proeffabriek in Gent gaat het afvalgas van de staalindustrie benutten. Tot slot is er de mogelijkheid om licht te gebruiken om CO₂ te activeren; de zoge-



ISTOCK/DMITRI MARUTA

Droogijs, korrels zuiver koolstofdioxide van -78 °C, is een onmisbaar hulpmiddel in het lab. Niet alleen om snel iets te bevriezen of bevroren te houden, maar ook om ongein mee uit te halen.

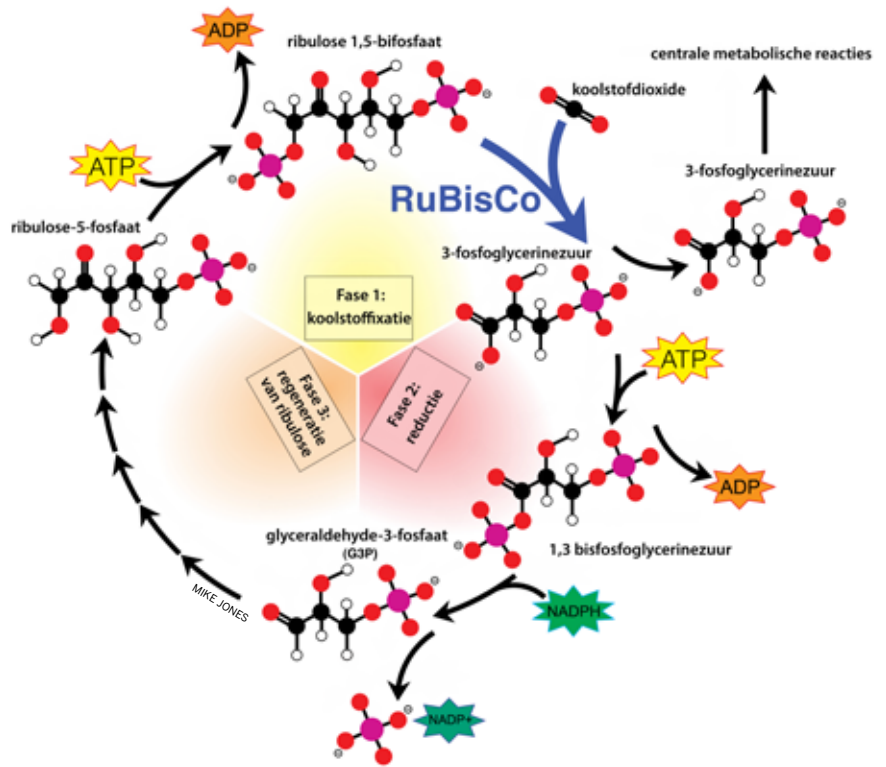
heten fotokatalytische systemen of kunstmatige fotosynthese. Daarbij kijk je naar de natuur, want daar vindt immers op grote schaal omzetting van CO₂ plaats. Om die fotosynthese na te bootsen, gaan onderzoekers vaak uit van een complex van een overgangsmetaal, zoals een porfyriene, een ijzer-zwavelcluster of metaalcomplexen aan een vaste drager. Die ontwikkelingen bevinden zich eveneens nog in het experimentele stadium.

Groene elektronen

De omzetting van CO₂ volgens de Sabatier-reactie is een tweestapsproces: waterstof maak je apart door water met groene stroom te elektrolyseren, waarna je het laat reageren met koolstofdioxide. Een éénstapsproces is ook mogelijk, de zogenoemde elektrokatalyse. Aan de ene elektrode van een elektrochemische cel wordt CO₂ gereduceerd en reageert het met protonen. Aan de andere elektrode wordt water ontleed in protonen en hydroxide-ionen. De elektrodes dienen ook als katalysator voor bijvoorbeeld methaanvorming. Door het elektrolyt (meestal water), de potentiaal en het elektrodemateriaal te variëren, ontstaan andere producten.

Op labschaal vindt veel onderzoek plaats naar de talloze factoren die het proces beïnvloeden. Je kunt bijvoorbeeld variëren met het materiaal en de kristalstructuur van de elektrode. Koper werkt goed voor de vorming van etheen of methaan. Maar ook tin, platina, ijzer, diverse legeringen en zelfs grafeen en koolstofnanobuisjes zijn geschikt als elektrode, afhankelijk van de gewenste reactie.

Daarnaast zijn de optimale condities, zoals de pH van het elektrolyt, voor de reductiereactie vaak anders dan voor de oxidatiereactie. Een bipolair membraan tussen de compartimenten, dat H⁺ en OH⁻ scheidt, is een goede oplossing om verschillende pH's in stand te houden. Het blijkt dat met een goed gekozen



Fotosynthese vindt plaats in de chloroplasten in de bladcellen en bestaat uit een groot aantal stappen in meerdere cycli. Eerst heeft de plant energie nodig in de vorm van het molecuul ATP. Die energierijke ATP-moleculen (linksboven) gaan vervolgens naar de Calvin-cyclus, waar de eigenlijke fotosynthese plaatsvindt: de omzetting van CO₂ en water in uiteindelijk glucose en zuurstof (rechtsboven). Een belangrijk enzym in de Calvin-cyclus is Rubisco (ribulose-1,5-bisphosfaat carboxylase oxygenase) dat verantwoordelijk is voor CO₂-activering. Het is een groot enzym met meerdere functies waarvan de belangrijkste de carboxylering van ribulose-1,5-bisphosfaat is, een grondstof voor suikers.

Biologen proberen de efficiëntie van de fotosynthese op allerlei manieren op te voeren, voor meer opbrengst aan gewassen en om meer CO₂ vast te leggen, bijvoorbeeld door andere varianten van rubisco in te bouwen. Rubisco maakt namelijk nog al eens een fout: het zet dan zuurstof om in gifstoffen in plaats van suikers te maken met CO₂. Door die fout te herstellen in bijvoorbeeld tabaksplanten gaan die veel harder groeien.

membraan een veel kleinere overpotentiaal (de 'activeringsenergie') nodig is om de reactie te laten verlopen. Dat scheelt energie. Nog een knelpunt is de oplosbaarheid van CO₂ in water; die is heel laag, wat de reactiesnelheid verlaagt. Beter is een zogeheten gasdiffusie-elektrode waar CO₂ in gasvorm wordt aangevoerd en reageert.

Opschalen niet eenvoudig

Op labschaal en kleine testschaal is dus al veel bekend, maar een elektrochemische cel opschalen tot industriële schaal is niet

eenvoudig. Het belangrijkste obstakel is de trage reactie, uitgedrukt in een lage stroomdichtheid van minder dan 30 mA/ uur. Dat moet omhoog naar 200 tot wel 500 mA/uur om een acceptabele opbrengst te krijgen aan producten. Maar wanneer producten veel sneller vormen aan de elektrodes, veroorzaakt dat bijvoorbeeld transportproblemen. Gas vormt te grote bellen, moleculen blijven te lang plakken aan de katalysator of ionen verstoren de elektrodepotentiaal. Tot slot moet de levensduur van de cellen nog verder omhoog voor toepassing op grotere schaal.

Het Nederlandse e-Refinery-consortium pakt die problemen aan door geïntegreerd en tegelijkertijd zowel op labschaal als op grotere schaal te werken. Zo'n transportprobleem kun je misschien net zo goed oplossen door een ander reactorontwerp dan door alleen de chemie aan te passen. e-Refinery wil over vijf jaar een proeffabriek leveren die zo'n 30 kg etheen per dag maakt uit ruim 200 kg CO₂. Daarvoor is ongeveer 100 kW stroom nodig. ●

Tabel. Reactie sturen met redoxpotentialen

Koolstofmonoxide	$\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	$E_0 = -0,53\text{ V}$
Mierenzuur	$\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{HCO}_2\text{H}$	$E_0 = -0,61\text{ V}$
Formaldehyde	$\text{CO}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow \text{HCHO} + \text{H}_2\text{O}$	$E_0 = -0,48\text{ V}$
Methanol	$\text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	$E_0 = -0,38\text{ V}$
Methaan	$\text{CO}_2 + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^- \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	$E_0 = -0,24\text{ V}$
Zonder protonen	$\text{CO}_2 + \text{e}^- \rightarrow \text{CO}_2^-$	$E_0 = -1,90\text{ V}$

Door de potentiaal te kiezen, kun je de reductie van CO₂ in de aanwezigheid van protonen sturen naar verschillende producten.

De Amerikaanse ruimtevaartorganisatie NASA wil mensen naar Mars sturen. Maar de atmosfeer daar is honderd keer ijler dan die van de aarde en bestaat uit 95 % CO₂, dus waar haal je zuurstof vandaan om mensen in leven te houden? Daarnaast wil je ook weer terug kunnen naar de aarde, waarvoor grote hoeveelheden raketbrandstof nodig zijn. NASA hoopt die problemen op te lossen door onderzoek te stimuleren en financieren naar CO₂-omzetting naar onder meer zuurstof, methaan en andere nuttige verbindingen zoals glucose. Ze heeft er zelfs een prijsvraag voor uitgeschreven. Het voordeel voor onderzoekers is dat het wat mag kosten om dit probleem op te lossen. Ze kunnen daarom de duurste, beste processen en katalysatoren kiezen.

Voor op school

- 1 Leg uit wat bedoeld wordt met de zinsnede 'CO₂ is vrij inert'.
- 2 Wat is het broeikas-effect?
- 3 Beschrijf in je eigen woorden het verschil tussen het broeikas-effect en het versterkt broeikas-effect.
- 4 Geef in een reactievergelijking de omzetting weer van CO₂ en water tot glucose.
- 5 Hoe heet die reactie waarbij glucose ontstaat?
- 6 Laat met een reactievergelijking zien dat te veel CO₂ in het lichaam het bloed te zuur maakt.
- 7 Lucht bevat 400 volume-ppm koolstofdioxide. Bereken met dit gegeven het aantal mg CO₂ per m³ lucht bij $p = p_0$ en $T = 273\text{K}$.
- 8 Leg uit hoe een 'normale' koolstofkringloop eruit ziet, dus een kringloop die niet leidt tot een versterkt broeikas-effect. Dit wordt ook wel de 'korte koolstofkringloop' genoemd.
- 9 Wat betekent 'antropogeen'?
- 10 Geef een paar voorbeelden van hernieuwbare energie.
- 11 Geef de reactievergelijking voor omzetting van CO met stoom in CO₂ en H₂.
- 12 Bij verhoogde temperatuur en druk reageert CO₂ met waterstof tot methaan en waterdamp. Laat met een energieberekening zien, dat die reactie exotherm is. Gebruik de BINAS-tabellen 57A+B.
- 13 Op welke wijze kun je een hoge activeringsenergie verlagen?

Meer weten?

- Charlotte Vogt, Matteo Monai, Gert Jan Kramer en Bert M. Weckhuysen, *Nature Catalysis*, Vol. 2, Maart 2019, p188-197.
- climate.nasa.gov, NASA.
- www.ipcc.ch, IPCC: 'AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014' en 'Special Report Global Warming of 1.5 °C', 2018.
- www.ebn.nl, energiein nederland.nl, Energie Beheer Nederland.
- www.nessc.nl, chemische fossielen, Netherlands Earth System Science Center.

Editie

CO₂

editie 88 | nummer 353 | april 2019
www.chemischefeitelijkheden.nl

Coverbeeld: Erwin Voogt

Met dank aan Jaap Vente, sustainable process technology (ECN/TNO), en Filip Neele, TNO applied geosciences. Bernard Dam, hoogleraar materials for energy conversion and storage, Paulien Herder, hoogleraar engineering systems design in energy en Wim Haije, researcher large-scale energy storage (allen TU Delft), en Bert Weckhuysen, hoogleraar anorganische chemie en katalyse, Universiteit Utrecht.

Colofon

Over Chemische Feitelijkheden

Chemische Feitelijkheden is een actuele encyclopedie over moleculen, mensen, materialen en milieu. Het is een losbladige uitgave van de KNCV en verschijnt driemaal per jaar met in totaal tien onderwerpen.

KNCV

Redactie

dr. Erwin Boutsma (hoofdredacteur), drs. Franny Scholte (eindredacteur),
 Bastienne Wentzel (tekst), Henk Ubbels (vragen en correctie)

Vormgeving & Opmaak

Marjke van de Linde/Content Innovators

Uitgever

Roeland Dobbelaer, Vakbladen.com
 Postbus 19949, 2500 CX Den Haag

Abonnementen

088-2266 680

abonnementen@vakbladen.com

Wij hanteren de opzegregels uit het verbintenisrecht. Wij gaan ervan uit dat Chemische Feitelijkheden altijd wordt ontvangen uit hoofde van het beroep. Hierdoor wordt het abonnement automatisch met een jaar verlengd, tenzij twee maanden vóór de einddatum een opzegging is ontvangen. Een abonnement op Chemische Feitelijkheden geeft via de website toegang tot tien nieuwe edities per jaar en het totale onlinearchief. Daarnaast ontvangen abonnees in drie zendingen per jaar de losbladige edities.

Tarieven (2019)

Voor particulieren: online-toegang met inlogcode en papieren editie (inclusief verzamelmap) kost € 87,75*; leden van de KNCV, KVCV en NVON krijgen € 10 korting.

Voor bedrijven en (onderwijs)instellingen: onbeperkt toegang tot de digitale edities op basis van IP-adres en papieren editie in drievoud (inclusief verzamelmap) kost € 262,50*.

Losse nummers kosten € 9,95* per stuk en zijn te bestellen bij Mijntijdschrift.com.

*Bij betaling per acceptgiro wordt € 2,95 administratiekosten in rekening gebracht.