

Accu's en brandstofcellen

18.1 Elektrochemisch cel

A 1

- a Bij een gewone redoxreactie is er contact tussen oxidator en reductor zodat de elektronen rechtstreeks kunnen worden overgedragen. Bij een elektrochemische cel zitten oxidator en reductor in aparte reactievaten en worden de elektronen via een draad overgedragen.
- b De oxidator neemt van de elektrode elektronen op en deze elektrode krijgt daardoor een positieve lading. Het is dus de positieve elektrode.

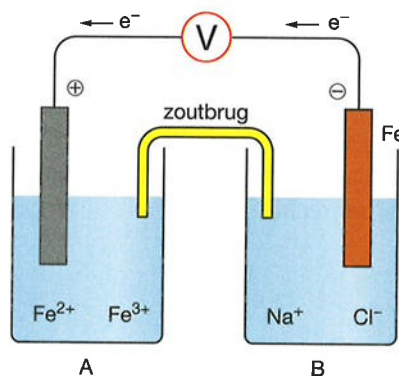
B 2

- a Juist
- b Onjuist: in een elektrochemische cel wordt de gesloten stroomkring gevormd door bewegende elektronen en de bewegende ionen in de zoutbrug.
- c Juist

B 3

- a Er worden elektronen opgenomen, waardoor de elektrode positief wordt.
- b In de halfcel A verdwijnt positieve lading. Dus de Na^+ -ionen bewegen naar A en de Cl^- -ionen bewegen de andere kant op.
- c
$$\begin{array}{l} \text{Fe (s)} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2 \text{e}^- \\ \text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+} \quad (\times 2) \\ \hline \text{Fe (s)} + 2 \text{Fe}^{3+} (\text{aq}) \rightarrow 3 \text{Fe}^{2+} (\text{aq}) \end{array}$$
- d Zie figuur 18.1.
- e In halfcel B moet de vloeistof de stroom ook geleiden. Het natriumchloride is hier dus elektrolyt, onderdeel van de zoutbrug.
- f De bronspanning bij standaardomstandigheden is:

$$\Delta V_0 = V_0 (\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}) - V_0 (\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}) = 0,77 - (-0,45) = 1,22 \text{ V}$$
- g De oxidator Fe^{3+} mag niet worden doorgelaten. De reductor is de vaste stof ijzer, dus die komt niet van zijn plaats. Fe^{2+} kan beter ook worden tegengehouden. Dit ion reageert niet, maar zal naar halfcel A gaan en daar het evenwicht van Fe^{3+} en Fe^{2+} ongunstig beïnvloeden. Na^+ -ionen en Cl^- -ionen mogen er wel door. Na^+ -ionen gaan er al naartoe en Cl^- -ionen gaan er niet naartoe omdat dit een overschot aan negatieve lading zou geven.



18.1

B 4

- a** $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2 \rightarrow 6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$
b $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3 \rightarrow \text{C}_3\text{H}_4\text{O}_3 + 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^-$
c Elektrode A wordt negatief door de elektronen die daar vrijkomen. Elektrode B is de positieve elektrode.
d De elektrode is bedekt met een enzym dat specifiek reageert met melkzuur.
e $[\text{H}^+] = 10^{-\text{pH}} = 10^{-5,1} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$
f De zuurstof in de lucht kan in het zure milieu reageren:
 $\text{O}_2 (\text{g}) + 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} (\text{l})$

C 5

- a** Er is een gesloten stroomkring nodig, het vocht en het zout in de bodem werken als zoutbrug.
b $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 6 \text{CO}_2 + 24 \text{H}^+ + 24 \text{e}^-$
c $\text{O}_2 (\text{g}) + 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} (\text{l})$ (×6)

 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2 \rightarrow 6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$
d De negatieve elektronen lopen van de negatieve elektrode naar de positieve elektrode door de stroomdraad. De positieve H^+ -ionen bewegen in tegengestelde richting rond, dus dat klopt met elkaar.
e De effectieve spanning die een batterij levert, is afhankelijk van de inwendige weerstand. Die is laag bij een goed geleidend elektrolyt, zoals in een batterij. Bij de grond is de geleidbaarheid niet zo groot, omdat er niet zo veel zouten inzitten. Dus de geleidbaarheid van de grond is de beperkende factor. (De effectieve spanning = $V_{\text{bron}} - I \times R_{\text{inwendig}}$)

C 6

- a** $\text{Mg} (\text{s}) \rightarrow \text{Mg}^{2+} + 2 \text{e}^-$
 $\text{CuCl} (\text{s}) + \text{e}^- \rightarrow \text{Cu} (\text{s}) + \text{Cl}^-$
 Opgeteld geeft dit de vergelijking uit de tekst.
b In de magnesiumstrip staan magnesiumatomen elektronen af, dit is dus de negatieve elektrode.
c Er kan pas stroomlevering plaatsvinden als de stroomkring gesloten is. De ionen in het zeewater werken als elektrolyt. Daarom gaat het lampje pas branden als het vest in zee komt, dan wordt de stroomkring gesloten.

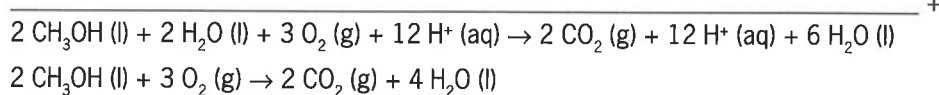
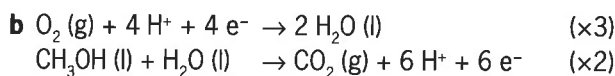
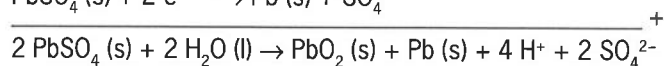
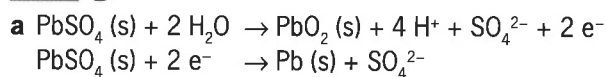
C 7 ★

- a** $\text{Pb}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Pb} (\text{s})$
 $\text{Zn} (\text{s}) \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2 \text{e}^-$

 $\text{Pb}^{2+} (\text{aq}) + \text{Zn} (\text{s}) \rightarrow \text{Zn}^{2+} (\text{aq}) + \text{Pb} (\text{s})$
b Dan komen de loodionen bij de zinkelektrode, waardoor de elektronen direct worden overgedragen.
c $V_{\text{bron}} = V_0 (\text{ox}) - V_0 (\text{red}) = -0,13 \text{ V} - (-0,76 \text{ V}) = 0,63 \text{ V}$ onder standaardomstandigheden
d Zink is de reductor, dus die geeft elektronen af, dus het moet pijl 4 of 2 zijn. Elektronen kunnen niet door een oplossing, maar wel door een metaaldraad. Dus het is pijl 4.
e De elektronen gaan van de reductor naar de oxidator. Zink is de reductor en dan is platina de positieve elektrode.
f In de zinkhalfcel ontstaan positieve ionen. De natriumionen bewegen dus naar links, pijl 2, en de acetaationen naar rechts, pijl 1.

18.2 Batterij en brandstofcel

A 8 



B 9

- a** De oxidator en reductor zijn vaste stoffen die op de elektroden blijven zitten en daardoor geen rechtstreeks contact kunnen krijgen.
- b** Als de accu stroom levert, komen aan de negatieve elektrode elektronen vrij, die zich verplaatsen naar de positieve elektrode. Er ontstaat een tekort aan negatieve lading en de negatief geladen sulfaationen bewegen zich naar de negatieve elektrode.
- c** Bij het opladen ontstaat zwavelzuur, zie je antwoord bij opdracht A8a. Een opgeladen accu heeft dus een grotere zwavelzuurconcentratie met een grotere dichtheid.
- d** Positieve elektrode:
 $\text{Pb}(\text{s}) + 2 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{PbO}_2(\text{s}) + 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^-$
 Negatieve elektrode:
 $2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g})$
- e** Bij een te hoge spanning kan aan de negatieve elektrode ook waterstof ontstaan zoals in vraag d. Gemengd met lucht is dit gas explosief.

B 10 

- a** Als er geen H^+ -ionen worden doorgelaten is er geen gesloten stroomkring en kan er dus geen stroom lopen.
- b** Nee, elektronen bewegen niet in waterige oplossing, alleen in metalen.
- c** De H^+ -ionen gaan van de *negatieve elektrode naar de positieve*.
 De elektronen gaan van de *negatieve elektrode naar de positieve*.

B 11

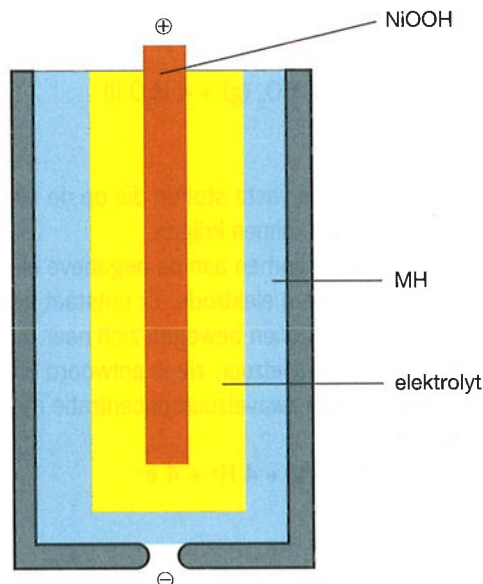
- a** De deeltjes die ontstaan bij de reactie die optreedt bij stroomlevering, blijven bij de elektroden. Er ontstaan namelijk vaste stoffen. De lithiumionen die nodig zijn bij de positieve elektrode worden geleverd door de negatieve elektrode. Die ionen kunnen tussen de elektroden bewegen. Daardoor is de accu oplaadbaar.
- b** Bij opladen verlopen de reacties in tegengestelde richting.
 $\text{C}(\text{s}) + \text{Li}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{LiC}(\text{s})$
 $\text{LiCoO}_2(\text{s}) \rightarrow \text{CoO}_2(\text{s}) + \text{Li}^+ + \text{e}^-$
- c** elektrolyse

B 12

- a** $\text{CO}(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g}) + 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^-$
- b** Er worden elektronen afgegeven, dus deze reactie vindt plaats bij de negatieve elektrode.
- c** $\text{CO}(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g}) + 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \quad (\times 2)$
 $\text{O}_2(\text{g}) + 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}(\text{l})$
- $$\text{2 CO}(\text{g}) + 2 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{O}_2(\text{g}) + 4 \text{H}^+(\text{aq}) \rightarrow 2 \text{CO}_2(\text{g}) + 4 \text{H}^+(\text{aq}) + 2 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \quad +$$
- $$\text{2 CO}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2 \text{CO}_2(\text{g})$$
- d** $V_0(\text{O}_2) = +1,23 \text{ V} \rightarrow V_{\text{bron}} = V_0(\text{ox}) - V_0(\text{red}) = 1,23 \text{ V} - (-0,11 \text{ V}) = 1,34 \text{ V}$
- e** Ja, het is een brandstofcel omdat er aan de ene elektrode zuurstof reageert en aan de andere een brandstof.

B 13

- a** De negatieve ionen zijn O^{2-} en OH^- . Het nikkellion is dus Ni^{3+} .
b Zie figuur 18.2.
c Het nikkel neemt elektronen op en is dus de positieve elektrode.
d De OH^- -ionen stromen van de $NiO(OH)$ naar de buitenkant, naar het MH. De elektronen stromen buitenlangs van de negatieve elektrode naar de positieve elektrode. De negatieve OH^- -ionen stromen in dezelfde richting rond. De K^+ -ionen stromen in omgekeerde richting, dus van de MH naar de binnenkant, de $NiO(OH)$.



18.2

C 14 ★

- a** HCl (Geen $HClO_3$ of Cl_2 , want dan zou het ijzer(III) worden.)
b $Fe^{2+} + 2 e^- \rightarrow Fe(s)$
c $3,0 \cdot 10^5 A = 3,0 \cdot 10^5 C s^{-1} \triangleq \frac{3,0 \cdot 10^5 C s^{-1}}{9,65 \cdot 10^4 C mol^{-1}} = 3,1 mol s^{-1} \text{ elektronen}$
 Dit komt overeen met $3,1 \times \frac{1}{2} = 1,6 mol Fe \triangleq 1,6 mol \times 55,85 g mol^{-1} = 86,8 g Fe$.
 De dichtheid van ijzer bij 293 K is $7,87 \cdot 10^3 kg m^{-3} = 7,87 \cdot 10^6 g m^{-3}$.

$$86,8 g Fe \triangleq \frac{86,8 g}{7,87 \cdot 10^6 g m^{-3}} = 1,1 \cdot 10^{-5} m^3$$

$$V = A (\text{oppervlakte}) \times d (\text{dikte}), \text{ de dikte is: } d = 0,050 mm = 5,0 \cdot 10^{-5} m.$$

$$\text{oppervlakte} = \frac{1,1 \cdot 10^{-5} m^3}{5,0 \cdot 10^{-5} m} = 0,22 m^2$$

C 15

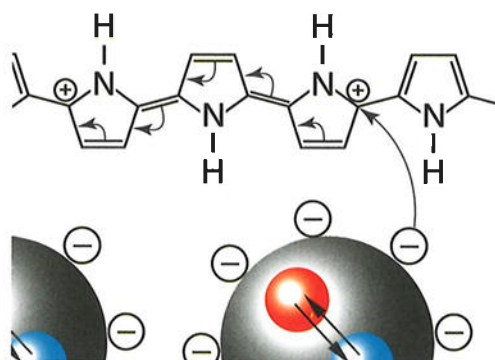
- a** $C_6H_{12}O_6 \rightarrow C_6H_{10}O_6 + 2 H^+ + 2 e^-$
 $O_2(g) + 4 H^+ + 4 e^- \rightarrow 2 H_2O(l)$
b In de linker halfcel worden H^+ -ionen gevormd die vervolgens naar de rechter cel stromen en daar worden opgenomen.

C 16

- a** Er wordt maar één halfreactie besproken. Dus geen complete cel.
b De chinongroep, $C_6H_4O_2$, wordt omgezet in de hydrochinongroep, $C_6H_6O_2$.
 $C_6H_4O_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow C_6H_6O_2$
c Bij het opladen wordt de chinongroep omgezet in de hydrochinongroep en hij neemt daarbij elektronen op. Bij stroomlevering verloopt deze reactie in omgekeerde richting. Er komen dan elektronen vrij, het is dus de negatieve elektrode.

d De perchloorzuuroplossing heeft de functie van elektrolyt.

e Zie figuur 18.3.



18.3

18.3 Accu's en duurzaamheid

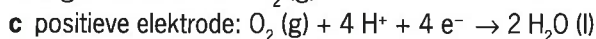
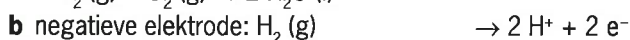
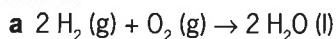
A 17

Bij een accu met lage energiedichtheid is de massa groot bij een bepaalde hoeveelheid energie. Er zijn veel accu's nodig. Je kunt in het vliegtuig dan nog maar weinig andere massa kwijt.

A 18

Hoe hoger de kwaliteit van de energie, des te groter is het rendement van de energieomzetting.

B 19

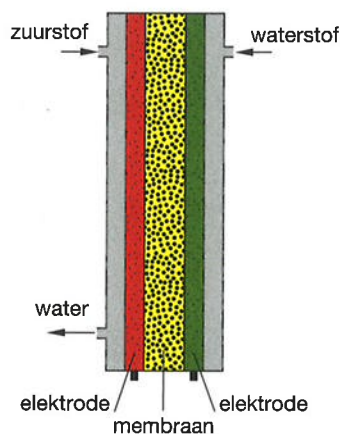


Het optellen van de vergelijkingen van de halfreacties geeft als totale reactievergelijking de verbranding van waterstof uit vraag a.

d Zie figuur 18.4.

e In de brandstofcel komt minder warmte vrij, het rendement is groter, dus de kwaliteit van de energie ook.

f Waterstof moet worden bereid door elektrolyse. Als hier groene stroom uit windmolens of zonne-energie wordt gebruikt, is waterstof een duurzame energiedrager.



18.4

B 20

- a $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6(\text{aq}) + 4 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow 8 \text{H}_2(\text{g}) + 4 \text{CO}_2(\text{g}) + \text{CH}_3\text{COOH}(\text{aq})$
 b $\text{CH}_3\text{COOH}(\text{aq}) + 2 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow 4 \text{H}_2(\text{g}) + 2 \text{CO}_2(\text{g})$
 c Je kunt het mengsel afkoelen tot onder het kookpunt van koolstofdioxide 195 K. Daarbij sublimeert koolstofdioxide en is waterstof nog steeds gasvormig. Die laatste heeft een kookpunt van 20,3 K. De waterstof kun je afzuigen en het koolstofdioxide blijft achter.
 d Je kunt de koolstofdioxide toevoeren aan planten in een plantenkas, die daardoor sneller groeien.

B 21 

- a $2 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow 2 \text{H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$
 b Je kunt zouten toevoegen die voor de stroomgeleiding zorgen, maar zelf niet reageren bij de elektrolyse, bijvoorbeeld natriumsulfaat.
 c Bij een oplossing van een sterk zuur heb je ook voldoende ionen. Bij de negatieve elektrode reageert het H^+ tot waterstof. Bij de positieve elektrode reageert water. Je moet alleen geen zoutzuur gebruiken omdat dan ook de Cl^- -ionen reageren tot chloor.

C 22 

- a Energiedichtheid is de hoeveelheid energie die 1 kg of 1 m³ van een brandstof kan leveren.
 b Bio-ethanol wordt geproduceerd uit gewassen die bij de groei via fotosynthese koolstofdioxide uit de lucht hebben opgenomen. Bij verbranding komt er daarom geen extra CO_2 in de atmosfeer, waardoor het CO_2 -neutraal is.
 c 1 L ethanol heeft een massa 800 g.

$$800 \text{ g C}_2\text{H}_5\text{OH} \triangleq \frac{800 \text{ g}}{46,069 \text{ g mol}^{-1}} = 17,4 \text{ mol ethanol}$$

 De verbrandingswarmte is $-1366 \text{ kJ mol}^{-1}$.
 Bij 17,4 mol ethanol komt dus $1366 \times 17,4 = 2,4 \cdot 10^4 \text{ kJ}$ energie vrij.
 Dat is 24 MJ L^{-1} .

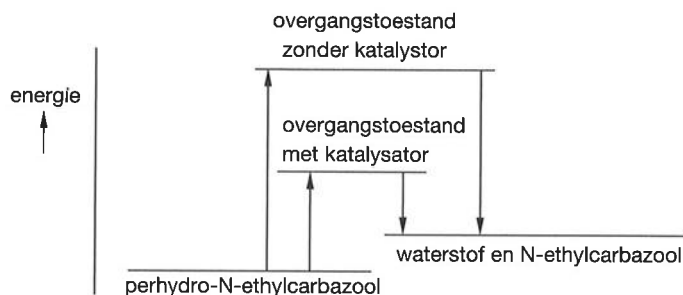
C 23

- a De verbrandingswarmte van waterstof is gelijk aan de vormingswarmte van water (g), Binas tabel 57: -242 kJ mol^{-1} . 1 mol waterstof gas heeft een volume van $5,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$.
 De energiedichtheid is dus $\frac{242 \text{ kJ mol}^{-1}}{5,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ kJ m}^{-3} = 4,6 \cdot 10^3 \text{ MJ m}^{-3}$.
 1 mol waterstof heeft een massa van $2,016 \text{ g} = 2,016 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$.
 De energiedichtheid per kg is dus $\frac{242 \text{ kJ}}{2,016 \cdot 10^{-3} \text{ kg}} = 1,20 \cdot 10^5 \text{ kJ kg}^{-1} = 120 \text{ MJ kg}^{-1}$.
 b Het rendement van de eerste omzetting is $100 - 35 = 65\%$.
 Als je begint met 100 J heb je na de eerste stap nog 65 J over.
 De tweede stap heeft een rendement van 45%.
 45% van 65 J is $0,45 \times 65 \text{ J} = 29 \text{ J}$. Het rendement is dus nog maar 29%.

C 24

- a N-ethylcarbazon heeft de molecuulformule $\text{C}_{14}\text{H}_{13}\text{N}$ en een molecuulmassa van 195,25 u. Die neemt toe met $6 \times 1,008 = 6,048 \text{ u}$.
 Dit is $\frac{6,048 \text{ u}}{195,25 \text{ u}} \times 100\% = 3,1\%$.
 b Pas bij hoge temperatuur komt de waterstof vrij. Bij opslag en vervoer is daar geen sprake van.

c Zie figuur 18.5.



18.5

18.4 Energietransitie

A 25

- Het verschil tussen een kerncentrale en een brandstofcentrale is alleen de manier waarop stoom wordt gemaakt. Als er eenmaal stoom is, drijft deze stoom in beide centrales de stoomturbines aan en daarna de generators.
- Bij een STEG-centrale is aardgas de brandstof, dat in een gasturbine wordt verbrand. De hete verbrandingsgassen gaan niet rechtstreeks de lucht in, maar produceren ook nog stoom die een tweede turbine aandrijft. Een kolencentrale verbrandt kolen en met de warme gassen wordt stoom gemaakt, dat een stoomturbine aandrijft.
- Het voordeel van een STEG-centrale is het hoge rendement en de schone verbrandingsproducten.

A 26

Hoe kleiner de C/H-verhouding, des te minder CO₂ per kJ aan energie ontstaat.

A 27

De CO₂ die vrijkomt bij biobrandstoffen is pas onlangs door planten uit de lucht opgenomen. Netto is er daardoor geen toename van CO₂ in de atmosfeer.

B 28

Het koelwater dat in figuur 18.25 wordt geloosd, kan worden gebruikt om huizen te verwarmen.

B 29

- $$\text{C (s)} + \text{O}_2 \text{ (g)} \rightarrow \text{CO}_2 \text{ (g)}$$

$$\text{CH}_4 \text{ (g)} + 2 \text{O}_2 \text{ (g)} \rightarrow \text{CO}_2 \text{ (g)} + 2 \text{H}_2\text{O (l)}$$

$$\text{C}_3\text{H}_8 \text{ (g)} + 5 \text{O}_2 \text{ (g)} \rightarrow 3 \text{CO}_2 \text{ (g)} + 4 \text{H}_2\text{O (l)}$$
- $$\text{CH}_4 \text{ massapercentage C is: } \frac{12,01 \text{ u}}{16,042 \text{ u}} \times 100\% = 74,87\%$$

$$\text{C}_3\text{H}_8 \text{ massapercentage C is: } \frac{3 \times 12,01 \text{ u}}{44,094 \text{ u}} \times 100\% = 81,71\%$$
- $$1 \text{ kg CO}_2 \triangleq \frac{1000 \text{ g}}{44,010 \text{ g mol}^{-1}} = 22,72 \text{ mol CO}_2$$

Bij C verbrandt er dus 22,72 mol en dat levert $22,72 \times 393,5 \text{ kJ}$ energie op (Binas tabel 57A). Dit is 8,941 MJ.

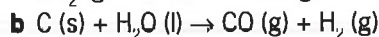
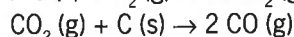
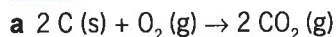
Bij CH₄ verbrandt ook 22,72 mol en dat levert $22,72 \times 890 \text{ kJ}$ energie op (Binas tabel 56). Dit is 20,2 MJ.

Bij C₃H₈ verbrandt $\frac{22,72 \text{ mol}}{3} = 7,574 \text{ mol}$ en dat levert $7,574 \times 2219 \text{ kJ}$ energie op. (Binas tabel 56).

Dit is 16,8 MJ.

Methaan levert dus de meeste energie per kg CO₂ op.

Ofwel: hoe lager het massapercentage C, des te meer energie per kg CO₂.

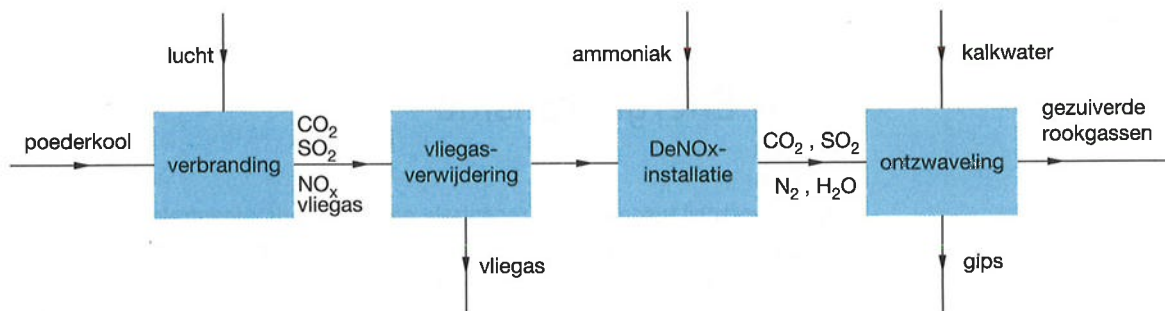
B 30**B 31**

a Zie figuur 18.6.

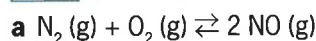
b Vlieggas is een vorm van fijnstof. Vlieggas zorgt voor problemen met ademhaling en bevat zware metalen die anders in het milieu komen.

c,d Zie figuur 18.6.

e Er zit een laag percentage argon in de lucht, die wordt gebruikt bij de verbranding.



18.6

C 32

$$K = \frac{[\text{NO}]^2}{[\text{N}_2][\text{O}_2]}$$

b Bij 500 K geldt $K = 2,6 \cdot 10^{-18}$ en bij 1000 K geldt $K = 7,1 \cdot 10^{-9}$.

c Bij 1000 K is de evenwichtsconstante (veel) groter, waardoor de hoeveelheid stikstofmono-oxide in de teller van de breuk ook (veel) groter is.

d Als er geen stikstof aanwezig is, kan er ook geen stikstofmono-oxide ontstaan. Als er extra stikstof wordt toegevoegd, zal de verbranding minder snel gaan. Het evenwicht verschuift dan naar links.

C 33

a Met voorbereiding wordt onder meer het vermalen van de brandstof bedoeld. (Verder wordt de brandstof gedroogd en onder stikstof bewaard om explosiegevaar te voorkomen.)

b Als er te veel zuurstof aanwezig is zal er koolstofdioxide ontstaan. Dit is niet brandbaar en dus niet te gebruiken in de STEG-eenheid.

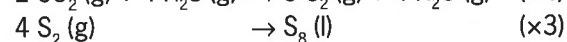
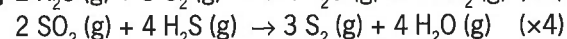
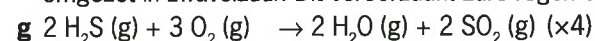
c Dit zijn onbrandbare vaste stoffen met een hoog smeltpunt, voornamelijk zouten die in de brandstof aanwezig waren.

$$\text{d } \text{C/H-verhouding cellulose} = \frac{6n \text{ mol C}}{10n \text{ mol H}} = 0,6$$

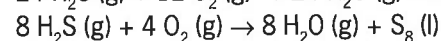
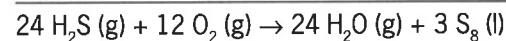
e Deze brandstof kan dus worden weergegeven als $\text{C}_{0,85}\text{H}$.

Bij de onvolledige verbranding van 1 mol $\text{C}_{0,85}\text{H}$ ontstaan 0,85 mol CO en 0,50 mol H_2 , dus koolstofmono-oxide en waterstof ontstaan in de mol verhouding 1,7 : 1,0.

f Bij de verbranding van waterstofsulfide ontstaat zwaveldioxide, dat in de atmosfeer wordt omgezet in zwavelzuur. Dit veroorzaakt zure regen en smog.



+



B 34

- a** Een moderne windmolen levert energie voor minimaal 6 miljoen kWh.
 Het gemiddeld elektriciteitsverbruik in Nederland is 3600 kWh per jaar.
 Dat komt overeen met het energiegebruik van

$$\frac{6 \cdot 10^6 \text{ kWh}}{3600 \text{ kWh per gezin}} = 1667 \text{ woningen/ gezinnen.}$$
 Je zou zo'n windmolen voor een hele wijk of een heel dorp moeten aanschaffen, niet voor een gezin. Wie mag er bovendien een windmolen van 100 m hoog in zijn tuin zetten?
- b** Het totale elektriciteitsverbruik bedraagt 120 miljard kWh per jaar (2017).
 Een moderne windmolen levert 6 miljoen kWh per jaar.
 Er zijn dus $\frac{120 \cdot 10^9 \text{ kWh}}{6 \cdot 10^6 \text{ kWh}} = 20\,000$ molens nodig.
- c** Nee, soms waait het te zacht en wordt er weinig elektriciteit opgewekt, maar ook als het stormt worden windmolens soms stilgezet. Als je alleen windmolens zou gebruiken voor het opwekken van stroom, zou je regelmatig tekorten hebben.
- d** Overlast van geluid en bewegende schaduwen
- e** Sommige mensen beschouwen windmolens als horizonvervuiling.
 Dan gaat het ten koste van het landschap en misschien ook wel van het toerisme.
- f** Als je het produceren van een windmolen zou meenemen in het begrip CO₂-neutraal, dan is windenergie niet helemaal CO₂-neutraal. Windmolens zijn onder meer gemaakt van staal. Bij de productie van staal is veel energie nodig, die meestal niet CO₂-neutraal wordt geproduceerd. Bovendien komt bij de productie van staal zelf CO₂ vrij.
- g** Langs de kust en op zee waait het gemiddeld het hardst en kun je de meeste stroom opwekken.
- h** Eigen invulling van de leerling

B 35

- a** Een hectare wilgenhout levert 11 ton = $11 \cdot 10^3$ kg hout.
 Binas tabel 28B geeft als stookwaarde van hout $4,4 \text{ kWh kg}^{-1}$.
 Een hectare wilgenhout levert per jaar dus $11 \cdot 10^3 \text{ kg} \times 4,4 \text{ kWh kg}^{-1} = 4,8 \cdot 10^4 \text{ kWh}$.
 Hiervan wordt slechts 42% omgezet in elektriciteit: $0,42 \times 4,8 \cdot 10^4 \text{ kWh} = 2,0 \cdot 10^4 \text{ kWh}$
 Een gezin gebruikt jaarlijks ongeveer 3600 kWh aan elektriciteit.
 Hiervoor is $\frac{3600 \text{ kWh}}{2,0 \cdot 10^4 \text{ kWh per hectare}} = 0,18$ hectare nodig.
- b** De totale energieproductie bedraagt 120 miljard kWh per jaar.
 Hiervoor is $\frac{120 \cdot 10^9 \text{ kWh}}{2,0 \cdot 10^4 \text{ kWh per hectare}} = 6,0 \cdot 10^6 \text{ hectare} = 6,0 \cdot 10^4 \text{ km}^2$ nodig.
 Dit komt overeen met $\frac{6,0 \cdot 10^4 \text{ km}^2}{37\,000 \text{ km}^2} \times 100\% = 162\%$ van ons landoppervlak. Dat gaat dus niet lukken.
- c** De koolstofdioxide die wordt uitgestoten is het jaar ervoor door middel van fotosynthese vastgelegd in het hout. Dit levert netto geen bijdrage aan het broeikaseffect. Het winnen en transport van het hout kost ook energie. Het proces is alleen CO₂-neutraal als ook deze energie op een groene wijze is verkregen.
- d** Hout en andere biomassa bevatten zwavelverbindingen. Bij verbranding komt daardoor het schadelijke zwaveldioxide vrij. Bovendien zullen in de verbrandingsketel stikstofoxiden ontstaan. Waarschijnlijk zal er ook fijnstof vrijkomen, dat verwijderd moet worden uit de rookgassen.
- e** Je kunt het wilgenhout vergassen en het gevormde gas in een STEG-eenheid verbranden.
- f** Eigen invulling van de leerling

B 36

- a** Een gezin gebruikt jaarlijks ongeveer 3600 kWh aan elektriciteit.
 Een zonnepaneel van 1 m^2 levert ongeveer 150 kWh per jaar.
 Een gezin heeft dus ongeveer $\frac{3600 \text{ kWh}}{150 \text{ kWh m}^{-2}} = 24 \text{ m}^2$ aan zonnepanelen nodig.

- b** Een eengezinswoning met een schuin dak op het zuiden kan wel 24 m² aan zonnepanelen hebben. Maar met een plat dak heb je al meer oppervlak nodig en met een huis op het westen ook. Schaduw van bomen en andere gebouwen kan roet in het eten gooien. Ook een dakkapel kan aardig in de weg zitten. Bovendien woont niet iedereen in een eengezinswoning. In een flat heb je geen eigen dak. Bovendien moet je een flink bedrag voorschieten. Pas na zeven jaar heb je het terugverdiend. Lang niet iedereen kan zo'n uitgave doen. Tot slot moet je toestemming hebben van de eigenaar van de woning als je de woning huurt in plaats van in eigendom hebt. Samengevat: niet iedereen kan met zonnepanelen voldoende stroom opwekken voor het eigen elektriciteitsgebruik.
- c** De totale energieproductie bedraagt 120 miljard kWh per jaar.

$$\text{Hiervoor is nodig: } \frac{120 \cdot 10^9 \text{ kWh}}{150 \text{ kWh m}^{-2}} = 8,0 \cdot 10^8 \text{ m}^2 = 8,0 \cdot 10^2 \text{ km}^2$$

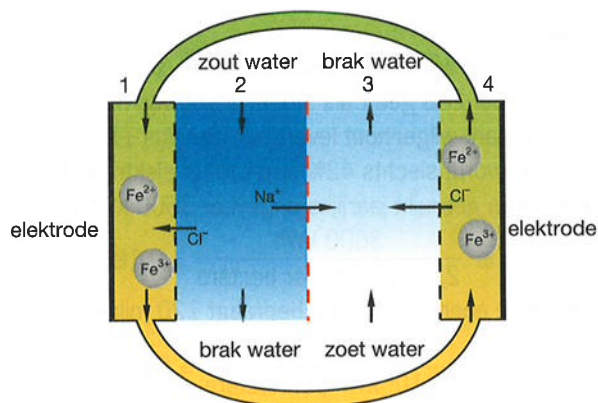
$$\text{Dit komt overeen met } \frac{8,0 \cdot 10^2 \text{ km}^2}{37\,000 \text{ km}^2} \times 100\% = 2,16\% \text{ van ons landoppervlak.}$$

Met bebouwing alleen zullen we het niet redden, maar als wegen ook stroom kunnen opwekken komen we een heel eind.

- d** Nee, 's nachts leveren zonnepanelen geen energie en in de winter ook minder dan in de zomer. Op een zonnige dag ligt de productie hoger dan op een bewolkte dag, al is dit verschil niet zo groot als menigeen denkt. Je zult dus 's nachts en in de winter een tekort aan elektriciteit krijgen als je alle andere centrales sluit.
- e** Eigen invulling van de leerling

B 37

- a** Zie figuur 18.7.



18.7

- b** De elektrode in ruimte 1 hoort bij de halfreactie van een reductor, dit is dus de negatieve elektrode. De elektrode in ruimte 4 hoort bij de halfreactie van een oxidator, dit is dus de positieve elektrode.
- c** De totale energieproductie bedraagt 120 miljard kWh per jaar.

$$\text{Hiervoor is dus } \frac{120 \cdot 10^9 \text{ kWh}}{40 \text{ kWh m}^{-2}} = 3,0 \cdot 10^9 \text{ m}^2 \text{ nodig.}$$

- d** In een zeecontainer past 50 000 m² aan membranen.

$$\text{Je hebt dus } \frac{3,0 \cdot 10^9 \text{ m}^2}{50\,000 \text{ m}^2 \text{ per container}} = 6,0 \cdot 10^4 \text{ containers nodig.}$$

- e** Er is 500 L = 0,500 m³ zoet water (en evenveel zout water) nodig om 40 kWh te produceren.

Dit is dus 80 kWh per m³ zoet water.

De totale energieproductie bedraagt 120 miljard kWh per jaar.

$$\text{Er is dus } \frac{120 \cdot 10^9 \text{ kWh}}{80 \text{ kWh m}^{-3}} = 1,5 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \text{ zoet water per jaar nodig.}$$

Er gaat 365 × 24 uur = 8760 uur in een jaar.

Er is dus $\frac{1,5 \cdot 10^9 \text{ m}^3}{8760 \text{ uur}} = 1,7 \cdot 10^5 \text{ m}^3$ zoet water per uur nodig en evenveel zout water.

Dit is ongeveer 10% van het debiet van de rivier de IJssel.

- f** Dat zijn locaties waar veel zoet water in zee stroomt, bijvoorbeeld in het Rijnmondgebied. Ook de Afsluitdijk is in beeld omdat daar veel zoet en zout water dicht bij elkaar komen. In de afsluitdijk is een proefproject opgestart om te onderzoeken of de techniek is op te schalen naar een volwaardige centrale.
- g** Er moet enorm veel water worden gefilterd omdat de membranen anders verstopt raken. Dit kan ten koste gaan van het waterleven. Er ontstaat ook veel brak water dat geloosd moet worden. Dit kan in de ondiepe Waddenzee ook gevolgen hebben voor het waterleven.
- h** Eigen invulling van de leerling

B 38

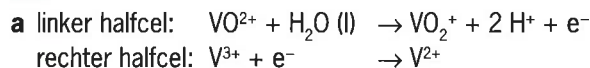
- a** Alle vier de energiebronnen zijn onuitputtelijk. De belasting voor mens en milieu is afhankelijk van de locatie en de schaal waarop wordt gebouwd. Zonnepanelen op daken leveren nog de minste belasting op, maar er zijn onvoldoende daken om heel Nederland te voorzien van zonnestroom. Biomassa levert de meeste schade op, met name als er op grote schaal biomassa wordt verbouwd ten koste van natuurgebieden. Het stoken van organisch afval, bijvoorbeeld snoeihout, levert weinig belasting op, maar hiervan is onvoldoende om heel Nederland te voorzien van groene stroom.
Zonne-energie is het minst betrouwbaar. In de nacht en in de winter heb je veel minder aanbod dan overdag en in de zomer. Ook windenergie laat het nog weleens afweten als energiebron. Blue energy is redelijk flexibel in te zetten als je voldoende zoet en zout water tot je beschikking hebt. Wellicht is de aanvoer van zoet water in de zomer een stuk lager dan in de winter en kun je bijvoorbeeld minder water uit het IJsselmeer gebruiken omdat het waterpeil dan te veel zakt.
Economisch haalbaar is op dit moment alleen zonne-energie. Zolang elektriciteitsbedrijven garanderen dat een overschot aan stroom (overdag) wordt vergoed, kun je de investering in ongeveer zeven jaar terugverdienen. Als er te veel zonnepanelen worden geplaatst, kost dit de bedrijven wel geld omdat hun centrales dan een deel van het jaar stilstaan (vooral overdag en tijdens de zomer). Technologische ontwikkelingen kunnen zorgen dat groene energiebronnen in de toekomst wel concurrerend worden, bijvoorbeeld betere membranen voor blue energy of de kweek van algen als biomassa.
- b** Zonne-energie lijkt economisch het meest aantrekkelijk en levert weinig weerstand in de samenleving op, maar is ook het minst flexibel in te zetten. Je zult dus ook andere bronnen moeten gebruiken als je in Nederland voor 100% groene stroom wilt gebruiken. Blue energie bevindt zich nu nog in een experimenteel stadium, maar kan misschien in de toekomst grootschalig worden ingezet op momenten dat er minder zon is, bijvoorbeeld in de winter. Windmolens zijn economisch nog niet rendabel en de plaatsing op land roept veel weerstand in de samenleving op. Wellicht dat grootschalige windparken op zee, waar het gemiddeld harder waait, in de toekomst wel gebouwd kunnen worden. Biomassa zal waarschijnlijk niet op grote schaal worden gebruikt, tenzij we biomassa uit het buitenland halen, maar dat kost ook energie en gaat wellicht daar ten koste van natuur en milieu. Biomassa is wel aantrekkelijk om in te zetten op momenten dat andere energiebronnen (zon, wind en water) de vraag niet aankunnen, omdat biomassa gemakkelijk kan worden opgeslagen en snel kan worden ingezet als vraag en aanbod naar elektriciteit uit balans raken.
- c** Energie besparen kost niets en levert veel op, bijvoorbeeld ledlampen gebruiken in plaats van halogeenlampen, een droogrek in plaats van een wasdroger en een zonnescherm neerlaten in plaats van de airconditioning aanzetten.

B 39

- a** De STEG-eenheden zijn nog niet afgeschreven, dus goedkoper om aan te passen. STEG-eenheden leveren energie op grote schaal, centraal en passen goed in het huidige elektriciteitsnet. Brandstofcellen zijn op dit moment nog erg duur door de vereiste katalysatoren.
- b** Uitgangspunt 1: er wordt minder CO₂ geproduceerd, minder afval.
Uitgangspunt 6: het is een energie-efficiënt ontwerp.
- c** Elektrolyse
- d** $2 \text{H}_2\text{O} (\text{l}) + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2 \text{OH}^-$
Deze reactie vindt dus aan de negatieve elektrode plaats, die de elektronen levert voor de reactie.
- e** $\text{N}_2 (\text{g}) + 3 \text{H}_2 (\text{g}) \rightleftharpoons 2 \text{NH}_3 (\text{g})$
- f** $4 \text{NH}_3 (\text{g}) + 3 \text{O}_2 (\text{g}) \rightarrow 2 \text{N}_2 (\text{g}) + 6 \text{H}_2\text{O} (\text{l})$

Afsluiting

1



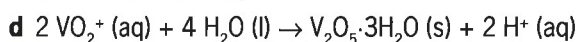
b Tijdens het opladen verandert de totale lading van de positieve ionen in de linker halfcel van 2+ naar 3+. In de rechter halfcel verandert de lading van 3+ naar 2+. Omdat beide oplossingen neutraal moeten blijven, moeten positieve ionen van de linker naar de rechter halfcel gaan. Omdat alleen H^+ -ionen het membraan kunnen passeren, zullen deze van links naar rechts bewegen.

c 100 kWh is 67% van de chemische energie. De hoeveelheid chemische energie is dus $\frac{100}{67} = 149 \text{ kWh}$. Dit is gelijk aan $149 \times 3,6 \cdot 10^6 = 5,37 \cdot 10^8 \text{ J}$.

Het aantal mol elektronen dat overgedragen is, is dus gelijk aan $\frac{5,37 \cdot 10^8}{1,35 \cdot 10^5} = 3,98 \cdot 10^3 \text{ mol}$.

Bij de reactie geeft 1 mol vanadiumionen 1 mol elektronen, er moet dus ook

$3,98 \cdot 10^3 \text{ mol}$ vanadiumionen zijn. Bij een concentratie van 1,7 M is dat $\frac{3,98 \cdot 10^3 \text{ mol}}{1,7 \text{ mol L}^{-1}} = 2,3 \cdot 10^3 \text{ L} = 2,3 \text{ m}^3$.



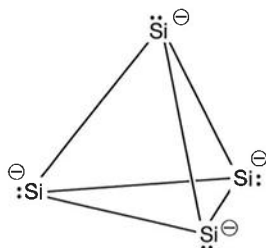
e Bij een hogere concentratie vanadiumionen zijn er per seconde meer effectieve botsingen op het oppervlak van de elektroden. Hierdoor worden per seconde meer elektronen opgenomen/afgegaan, waardoor de maximale stroomsterkte toeneemt.

f

Aanpassing VRFB	veroorzaakt een toename van de	
	opslagcapaciteit (J)	stroomsterkte (C s^{-1})
de concentratie vanadiumionen verhogen	X	X
meerdere elektrochemische cellen op dezelfde tanks aansluiten		X
de tanks en de inhoud vergroten	X	
membranen gebruiken die de ionenstroom beter doorlaten		X
poreuze elektroden gebruiken voor een groter contactoppervlak		X

2

a Zie figuur 18.8. Silicium heeft vier valentie-elektronen en dus nog vier elektronen voor de octetregel. Door de tetraëderstructuur heeft elk siliciumatoom drie bindingen. Elk siliciumatoom heeft dus één valentie-elektron over, plus een elektron door de elektrische lading. Dit geeft het extra elektronenpaar bij elk siliciumatoom. De formele lading vind je door te bedenken dat elk siliciumatoom vijf elektronen om zich heeft waarvan er vier valentie-elektronen zijn en dus één extra elektron dat voor de negatieve lading zorgt.



18.8

$$\mathbf{b} \quad 4,5 \text{ g NaSi} \triangleq \frac{4,5 \text{ g}}{51,08 \text{ g mol}^{-1}} = 0,088 \text{ mol NaSi.}$$

Hieruit kan maximaal $2,5 \times 0,088 = 0,22 \text{ mol H}_2$ ontstaan.

Dit is bij $0,22 \text{ mol} \times 24,5 \text{ L mol}^{-1} = 5,4 \text{ L H}_2$.

Het rendement is $\frac{4,0 \text{ L}}{5,4 \text{ L}} \times 100\% = 74\%$.

c De reactie die in de waterstofbrandstofcel verloopt is $2 \text{ H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{ H}_2\text{O}$. Het water is dus in reactie 1 de beginstof en in reactie 2 het product. Er komt dus geen energie vrij uit de omzetting van water.

d Uitgangspunt 2:

- De atomeconomie voor de bereiding van NaSi uit de grondstoffen zand en zout is geen 100% omdat zand bestaat uit SiO_2 en zout uit NaCl .
- Er ontstaan wel afvalproducten bij de bereiding van Na en Si uit zand en zout.

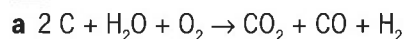
Uitgangspunt 6:

- De vormingswarmten van SiO_2 en NaCl zijn zeer negatief, dus voor de bereiding van Na en Si is veel energie nodig.
- De bereiding van natriumsilicide verloopt niet bij kamertemperatuur.
- Voor het beoordelen van de benodigde energie moet het hele proces worden beoordeeld.

Uitgangspunt 12:

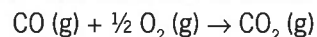
- Met name het tussenproduct natrium is een gevaarlijke stof.
- Natriumsilicide is onveilig omdat het niet in contact mag komen met water.
- Waterstof is een brandbaar explosief gas. Dat kan gevaarlijk zijn.

3



Stoom en zuurstof hebben gereageerd in de verhouding 1 : 1.

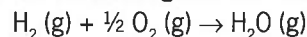
b De stookwaarde van koolstofdioxide is 0 joule kg^{-1} . Het is niet brandbaar.



$$\Delta E_{\text{reactie}} = \text{vormingswarmte}_{\text{reactieproducten}} - \text{vormingswarmte}_{\text{beginstoffen}} =$$

$$-393,5 \text{ kJ} - (-110,5 \text{ kJ}) - 0 \text{ kJ} = -283,0 \text{ kJ}$$

De verbrandingswarmte van koolstofmono-oxide is dus -283 kJ per mol .



$$\Delta E_{\text{reactie}} = \text{vormingswarmte}_{\text{reactieproducten}} - \text{vormingswarmte}_{\text{beginstoffen}} =$$

$$-242 \text{ kJ} - 0 \text{ kJ} - 0 \text{ kJ} = -242 \text{ kJ per mol}$$

De verbrandingswarmte van waterstof is dus -242 kJ per mol .

Een mengsel bestaande uit een mol van elk van de drie gasen heeft een verbrandingswarmte van $0 \text{ kJ} + (-283 \text{ kJ}) + (-242 \text{ kJ}) = -525 \text{ kJ}$ en een massa van

$$44,010 \text{ g} + 28,010 \text{ g} + 2,016 \text{ g} = 74,036 \text{ g.}$$

$$\text{De stookwaarde is } \frac{525 \text{ kJ}}{74,036 \text{ g}} = \frac{525 \text{ kJ}}{74,036 \cdot 10^{-3} \text{ kg}} = 7,09 \cdot 10^3 \text{ kJ kg}^{-1} = 7,09 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}.$$

c Dan ontstaat er meer koolstofmono-oxide en minder koolstofdioxide. De stookwaarde zal dan toenemen.

d De kwaliteit van energie is bij een ondergrondse kolenvergassing kleiner dan bij een bovengrondse kolenvergassing omdat in het laatste geval niet alleen de chemische energie uit het gas gebruikt wordt, maar de warmte die vrijkomt bij het vergassen ook wordt gebruikt om stoom te maken waarmee een turbine wordt aangedreven die is verbonden met een generator (zie onder andere Binas tabel 38 B3). Bij ondergrondse kolenvergassing blijft de meeste warmte ondergronds.

e Er ontstaat onder meer stikstofoxide door een reactie tussen zuurstof en stikstof uit de lucht en waterstofsulfide (eventueel zwaveldioxide) uit zwavelverbindingen in de steenkool.

f Er kan dan smog en zure regen ontstaan.

g Het rendement bij ondergrondse kolenvergassing is lager dan bij bovengrondse kolenvergassing. Hierdoor komt bij ondergrondse kolenvergassing relatief veel koolstofdioxide vrij en dit versterkt het broeikaseffect.

Steenkool is geen onuitputtelijke brandstof en daarom niet duurzaam.

4

a Binas tabel 57A geeft aan dat de vormingswarmte van NO (g) = $+0,913 \cdot 10^5 \text{ J mol}^{-1}$, positief dus. Dit betekent dat de vorming van NO (g) endotherm is en de afbraak exotherm. Bij afkoeling verschuift het evenwicht naar de exotherme kant en wordt er NO (g) afgebroken.

b $2 \text{ CH}_4\text{ON}_2 + 4 \text{ NO} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{ CO}_2 + 4 \text{ N}_2 + 4 \text{ H}_2\text{O}$

c 600 mL ureumoplossing komt overeen met 0,600 L en bevat $0,600 \text{ L} \times 80 \text{ g L}^{-1} = 48 \text{ g ureum}$.

De molaire massa van ureum is $60,06 \text{ g mol}^{-1}$.

Er wordt dus $\frac{48 \text{ g}}{60,06 \text{ g mol}^{-1}} = 0,80 \text{ mol ureum}$ per uur toegevoegd.

Dit reageert met tweemaal zo veel stikstofmono-oxide, dus $2 \times 0,80 \text{ mol} = 1,6 \text{ mol}$ stikstofmono-oxide.

De molaire massa van stikstofmono-oxide is $30,006 \text{ g mol}^{-1}$.

Er reageert dus $1,6 \text{ mol} \times 30,006 \text{ g mol}^{-1} = 48 \text{ g}$ stikstofmono-oxide per uur.

De uitstoot van NO neemt af met $\frac{48 \text{ g}}{53 \text{ g}} \times 100\% = 91\%$.

5

a In een waterstofcel vinden de volgende reacties plaats:

positieve elektrode: $\text{O}_2 (\text{g}) + 4 \text{ H}^+ + 4 \text{ e}^- \rightarrow 2 \text{ H}_2\text{O} (\text{l})$

negatieve elektrode: $\text{H}_2 (\text{g}) \rightarrow 2 \text{ H}^+ + 2 \text{ e}^-$

In cel A zit de negatieve elektrode, dus 1 is waterstof.

In cel B zit de positieve elektrode, dus 2 is zuurstof en 3 is water.

b In cel A worden H^+ -ionen geproduceerd, die naar cel B gaan waar ze worden opgenomen. Op die manier behouden de oplossingen evenveel positieve als negatieve lading. Je kunt ook zeggen: buitenom lopen de elektronen van min naar plus. Dus in de cel lopen de ionen in de omgekeerde richting rond, van A naar B.

c Reactie 1: $\text{C}_3\text{H}_8 + 3 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{ CO} + 7 \text{ H}_2$

Reactie 2: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$

Bij reactie 1 komen per mol propaan 7 mol H_2 en 3 mol CO vrij.

Bij de tweede reactie komt per mol CO nog een extra H_2 vrij.

Dus per mol propaan 3 mol H_2 .

In totaal komen per mol propaan 3 mol CO_2 en $7 + 3 = 10 \text{ mol H}_2$ vrij.

$\text{CO}_2 : \text{H}_2 = 3 : 10$

d De glucose wordt bereid uit gewassen die CO_2 uit de lucht hebben gehaald, zodat er netto geen sprake is van CO_2 -uitstoot. De CO_2 uit propaan is miljoenen jaren geleden uit de lucht gehaald en zorgt nu voor een toename van de CO_2 -concentratie in de lucht, wat leidt tot een ongewenste klimaatverandering.

e $1 \text{ m}^3 \text{ H}_2$ komt bij 298 K en p_0 overeen met $\frac{1000 \text{ dm}^3}{24,5 \text{ dm}^3 \text{ mol}^{-1}} = 40,8 \text{ mol}$.

Hiervoor is $\frac{40,8 \text{ mol}}{12} = 3,40 \text{ mol}$ glucose nodig.

$3,40 \text{ mol glucose} = 3,40 \times 180,16 = 613 \text{ g glucose}$

Dit is 3,0% van de oplossing.

De massa van de oplossing is $\frac{100}{3} \times 613 \text{ g} = 2,04 \cdot 10^4 \text{ g}$.

De dichtheid is $1,0 \cdot 10^3 \text{ g L}^{-1}$. Het volume is dus $\frac{2,04 \cdot 10^4 \text{ g}}{1,0 \cdot 10^3 \text{ g L}^{-1}} = 20,4 \text{ L}$.

3,0 is in twee significante cijfers, het antwoord is dus 20 L.