

Groene chemie

15.1 Atoomeconomie

A 1

$$\mathbf{a} \text{ atoomconomie} = \frac{m_{\text{gewenst product}}}{m_{\text{beginstoffen}}} \times 100\%$$

$$\mathbf{b} \text{ rendement} = \frac{\text{praktische opbrengst}}{\text{theoretische opbrengst}} \times 100 \%$$

$$\mathbf{c} \text{ E} = \frac{\text{massa}_{\text{beginstoffen}} - \text{massa}_{\text{gewenst product}}}{\text{massa}_{\text{gewenst product}}}$$

d De E-factor is de *hoeveelheid* afval per kg product. De Q-factor geeft de *mate van vervuiling* van het afval aan.

e De grenswaarde is de maximaal toegestane hoeveelheid van een stof in mg per m³ lucht op de werkplek.

B 2

$$\mathbf{a} \text{ 125 ppb} = 125 \mu\text{g kg}^{-1}$$

De dichtheid van lucht is 1,293 kg m⁻³.

In 1,293 kg lucht zit dan $125 \times 1,293 = 162 \mu\text{g}$ formaldehyde = 0,162 mg m⁻³ lucht.

De grenswaarde (TGG 8 uur) is 0,15, die wordt hier overschreden.

b De grenswaarde (TGG 15 minuten) is 0,5 mg m⁻³, die wordt niet overschreden.

B 3

a De atoommassa van Fe is 55,85 u, de molecuulmassa van Fe₂O₃ is 159,69 u en de molecuulmassa van CO is 28,010 u.

De atoomconomie van deze reactie is:

$$\text{atoomconomie} = \frac{m_{\text{gewenst product}}}{m_{\text{beginstoffen}}} \times 100\% = \frac{2 \times 55,85 \text{ u}}{159,69 \text{ u} + (3 \times 28,010 \text{ u})} \times 100\% = 45,83\%$$

b IJzererts omrekenen naar mol.

$$250 \text{ ton Fe}_2\text{O}_3 = 250 \cdot 10^6 \text{ g Fe}_2\text{O}_3$$

De molaire massa van Fe₂O₃ is 159,69 g mol⁻¹.

$$250 \text{ ton Fe}_2\text{O}_3 \text{ komt overeen met } \frac{250 \cdot 10^6 \text{ g}}{159,69 \text{ g mol}^{-1}} = 1,566 \cdot 10^6 \text{ mol Fe}_2\text{O}_3.$$

Molverhouding Fe₂O₃ : Fe = 1 : 2

Er ontstaat $2 \times 1,566 \cdot 10^6 = 3,131 \cdot 10^6$ mol Fe.

Omrekenen naar ton ijzer.

Molaire massa Fe is 55,85 g mol⁻¹.

Theoretische opbrengst is $3,131 \cdot 10^6 \text{ mol} \times 55,85 \text{ g mol}^{-1} = 1,75 \cdot 10^8 \text{ g Fe} = 1,75 \cdot 10^2 \text{ ton Fe}$.

$$\mathbf{c} \text{ Rendement} = \frac{\text{praktische opbrengst}}{\text{theoretische opbrengst}} \times 100\% = \frac{141 \text{ ton}}{175 \text{ ton}} \times 100\% = 80,6\%$$

B 4

a 40 g KClO₃ omrekenen naar mol.

Molaire massa KClO₃ is 122,55 g mol⁻¹.

$$40 \text{ g KClO}_3 \triangleq \frac{40,0 \text{ g}}{122,55 \text{ g mol}^{-1}} = 0,326 \text{ mol KClO}_3$$

Molverhouding KClO₃ : O₂ = 2 : 3

$$\text{Er ontstaat } \frac{0,326}{2} \times 3 = 0,490 \text{ mol O}_2.$$

Omrekenen naar g O₂.

Molaire massa O₂ is 32,00 g mol⁻¹.

Theoretische opbrengst = 0,490 mol × 32,00 g mol⁻¹ = 15,7 g O₂

b Je begon met 40,0 g KClO₃, er ontstaat ook 40,0 g aan reactieproducten.

$$\text{E-factor} = \frac{\text{massa}_{\text{beginstoffen}} - \text{massa}_{\text{gewenst product}}}{\text{massa}_{\text{gewenst product}}}$$

$$\text{E-factor} = \frac{40,0 \text{ g} - 15,7 \text{ g}}{15,7 \text{ g}} = 1,55$$

c De werkelijke opbrengst is maar 67%, dat is 0,67 × 15,7 g = 10,5 g.

$$\text{E-factor} = \frac{40,0 \text{ g} - 10,5 \text{ g}}{10,5} = 2,81$$

B 5

a $\text{N}\equiv\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{C}\equiv\text{N} + 4 \text{ H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{N}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{NH}_2$

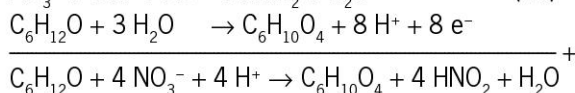
b 1,0 ton butaan-1,4-amine komt overeen met $\frac{1,0 \cdot 10^6}{88,16} = 1,134 \cdot 10^4$ mol.

Het aantal mol H₂ is $1,134 \cdot 10^4 \times 4 = 4,54 \cdot 10^4$ mol.

Het aantal m³ H₂ is dan $4,54 \cdot 10^4 \times 2,45 \cdot 10^{-2} = 1,1 \cdot 10^3$ m³.

c $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O} + 3 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_4 + 8 \text{ H}^+ + 8 \text{ e}^-$

d $\text{NO}_3^- + 3 \text{ H}^+ + 2 \text{ e}^- \rightarrow \text{HNO}_2 + \text{H}_2\text{O} \quad (\times 4)$



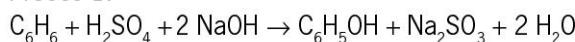
e $\frac{146,14}{82,14 + 4 \times 34,02} \times 100\% = 66,97\%$

f Voorbeelden van juiste argumenten zijn (twee van de volgende):

- De atomeconomie (atoomefficiëntie) van proces 2 is hoger, dus proces 2 verdient de voorkeur.
- In proces 1 wordt salpeterzuur gebruikt. Dit is een sterk zuur / sterke oxidator. Dit is gevaarlijk bij gebruik, dus proces 2 verdient de voorkeur.
- In proces 2 wordt waterstofperoxide gebruikt. Dit levert explosiegevaar als het wordt verhit, dus proces 1 verdient de voorkeur.
- In proces 2 wordt cyclohexeen gebruikt. Cyclohexeen geeft gevaarlijke dampen, dus proces 1 verdient de voorkeur.
- In proces 1 ontstaat NO. Dit geeft gevaarlijke dampen / reageert heftig met brandbare stoffen, dus proces 2 verdient de voorkeur.
- In proces 2 ontstaat alleen water als afval, dus proces 2 verdient de voorkeur.

B 6 ★

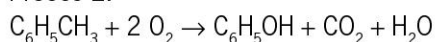
a Proces 1:



Atoommassa C₆H₅OH is 94,12 u, de molecuulmassa van C₆H₆ is 78,11 u van H₂SO₄ 98,079 u en van NaOH 39,997 u.

$$\begin{aligned} \text{De atomeconomie} &= \frac{m_{\text{gewenst product}}}{m_{\text{beginstoffen}}} \times 100\% = \\ &= \frac{94,12 \text{ u}}{78,11 \text{ u} + 98,079 \text{ u} + 2 \times 39,997 \text{ u}} \times 100\% = 36,74\% \end{aligned}$$

Proces 2:



Atoommassa C₆H₅OH is 94,12 u, de molecuulmassa van C₆H₅CH₃ is 92,13 u en van O₂ 32,00 u.

$$\text{De atomeconomie} = \frac{m_{\text{gewenst product}}}{m_{\text{beginstoffen}}} \times 100\% =$$

$$\frac{94,12 \text{ u}}{92,13 \text{ u} + 2 \times 32,00 \text{ u}} \times 100\% = 60,28\%$$

$$\text{E-factor} = \frac{\text{massa}_{\text{beginstoffen}} - \text{massa}_{\text{gewenst product}}}{\text{massa}_{\text{gewenst product}}}$$

Proces 1:

$$\text{E-factor} = \frac{78,11 \text{ u} + 98,079 \text{ u} + 2 \times 39,997 \text{ u} - 94,12 \text{ u}}{94,12 \text{ u}} = 1,718$$

Proces 2:

$$\text{E-factor} = \frac{92,13 \text{ u} + 2 \times 32,00 \text{ u} - 94,12 \text{ u}}{94,12 \text{ u}} = 0,6588$$

b De molecuulmassa van Na_2SO_3 is 126,04 u.

$$\text{De atomeconomie} = \frac{m_{\text{gewenst product}}}{m_{\text{beginstoffen}}} \times 100\% =$$

$$\frac{94,12 \text{ u} + 126,04 \text{ u}}{78,11 \text{ u} + 98,079 \text{ u} + 2 \times 39,997 \text{ u}} \times 100\% = 85,94\%$$

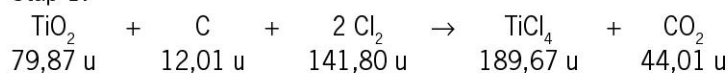
c Proces 1 heeft natriumsulfiet en water als afval en proces 2 koolstofdioxide en water. De Q-factor van water is 0. De Q-factor van natriumsulfiet zal vast groter zijn dan die van koolstofdioxide, dus proces 1 heeft de grootste Q-factor. Soms is het ook mogelijk om de grenswaarden van stoffen te vergelijken om een indruk te krijgen van de Q-factor.

d Handschoenen, beschermende kleding, oogbescherming, gelaatsbescherming dragen. Er is gevaar bij inademen, inslikken, aanraking van de huid.

C 7

a Krollproces:

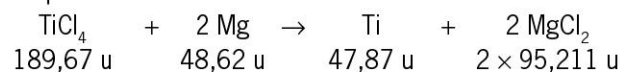
Stap 1:



$$\text{De atomeconomie} = \frac{m_{\text{gewenst product}}}{m_{\text{beginstoffen}}} \times 100\% =$$

$$\frac{189,67 \text{ u}}{79,87 \text{ u} + 12,01 \text{ u} + 141,80 \text{ u}} \times 100\% = 81,17\%$$

Stap 2:



$$\text{De atomeconomie} = \frac{m_{\text{gewenst product}}}{m_{\text{beginstoffen}}} \times 100\% =$$

$$\frac{47,87 \text{ u}}{189,67 \text{ u} + 2 \times 24,31 \text{ u}} \times 100\% = 20,09\%$$

De tweede stap is de meest ongunstige.

- b** Er is vloeibaar magnesium nodig, dat moet gewonnen worden. Er is chloor nodig als beginstof; naast Ti ontstaat er MgCl_2 als bijproduct; het proces kost veel energie en heeft een lage atomeconomie. Misschien kan er iets gewonnen worden door de energie die nodig is op een duurzame manier op te wekken.
- c** Bij hoge temperatuur zal titanium snel kunnen reageren met stikstof en zuurstof uit de lucht.
- d** Er is veel energie nodig om titanium(IV)oxide te smelten.
- e** Tijdens de elektrolyse moet contact van titanium met lucht worden vermeden.

f De molaire massa van TiO_2 is $79,87 \text{ g mol}^{-1}$.

$$580 \text{ kg TiO}_2 = 580 \cdot 10^3 \text{ g} \triangleq \frac{580 \cdot 10^3 \text{ g}}{79,87 \text{ g mol}^{-1}} = 7,261 \cdot 10^3 \text{ mol TiO}_2.$$

Dit levert ook $7,261 \cdot 10^3 \text{ mol Ti}$. Dat komt overeen met:

$$7,261 \cdot 10^3 \text{ mol} \times 47,87 \text{ g mol}^{-1} = 347,62 \text{ kg Ti theoretische opbrengst}$$

Het rendement is 72,5%.

$$\text{Dus de praktische opbrengst is } 0,725 \times 347,62 \text{ kg} = 252 \text{ kg Ti}.$$

15.2 Energiebalans

A 8

- a** Een proces is exotherm als de beginstoffen energie aan de omgeving afstaan. Een proces is endotherm als de beginstoffen energie vanuit de omgeving opnemen.
- b** De wet van behoud van energie houdt in dat bij een proces geen energie verloren gaat. Energie wordt alleen omgezet van de ene vorm in de andere.
- c** De energiebalans van een proces komt erop neer dat voor elk proces geldt: het energie-effect is gelijk aan het verschil in chemische energie, ΔE , van de reactieproducten en de beginstoffen.
- d** Een energiediagram is een grafische weergave van het energie-effect van een proces. Je leest er de activeringsenergie en de reactiewarmte uit af.
- e** De vormingswarmte van een verbinding is de hoeveelheid warmte die nodig is of vrijkomt bij het vormen van één mol van de verbinding uit de elementen. De vormingswarmte van een element is nul.
- f** De reactiewarmte van een reactie bereken je met behulp van de reactievergelijking en de vormingswarmten van alle stoffen uit de reactievergelijking. Je kunt eruit afleiden of een proces exotherm is of endotherm.

A 9

Tijdens een exotherm proces raken de beginstoffen energie kwijt aan de omgeving. Dat houdt in dat de chemische energie van de beginstoffen groter is dan van de reactieproducten. Daardoor levert het energie-effect $\Delta E = E_{\text{reactieproducten}} - E_{\text{beginstoffen}}$ een negatief getal op. Tijdens een endotherm proces krijgen de beginstoffen er energie uit de omgeving bij. De chemische energie van de reactieproducten is groter dan die van de beginstoffen. Daardoor levert het energie-effect $\Delta E = E_{\text{reactieproducten}} - E_{\text{beginstoffen}}$ een positief getal op.

B 10

- a** $\text{S (s)} + \text{O}_2 \text{ (g)} \rightarrow \text{SO}_2 \text{ (g)}$
 $2 \text{ SO}_2 \text{ (g)} + \text{O}_2 \text{ (g)} \rightarrow 2 \text{ SO}_3 \text{ (g)}$
 $\text{SO}_3 \text{ (g)} + \text{H}_2\text{O (l)} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ (aq)}$
- b** $\text{S (s)} + \text{O}_2 \text{ (g)} \rightarrow \text{SO}_2 \text{ (g)}$

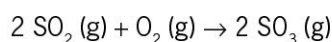
S	= 0 J
O ₂	2 × 0 = 0 J
SO ₂	- 2,97 · 10 ⁵ J

De energiebalans van deze reactie is:

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

$$\Delta E = (-2,97 \cdot 10^5 \text{ J}) - 0 = -2,97 \cdot 10^5 \text{ J}$$

De eerste stap is exotherm omdat de reactiewarmte een negatief getal is.



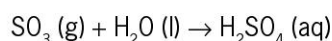
2 SO ₂	2 × -2,97 · 10 ⁵ J = -5,94 · 10 ⁵ J
1 O ₂	= 0 J
2 SO ₃	2 × -3,95 · 10 ⁵ J = -7,90 · 10 ⁵ J

De energiebalans van deze reactie is:

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

$$\Delta E = (-7,90 \cdot 10^5 \text{ J}) - (-5,94 \cdot 10^5 \text{ J} + 0 \text{ J}) = -1,96 \cdot 10^5 \text{ J}$$

De tweede stap is exotherm omdat de reactiewarmte een negatief getal is.



SO ₃	-3,95 · 10 ⁵ J
H ₂ O	-2,86 · 10 ⁵ J
H ₂ SO ₄	-8,11 · 10 ⁵ J

De energiebalans van deze reactie is:

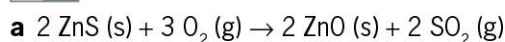
$$\Delta E = \text{vormingswarmte}_{\text{reactieproducten}} - \text{vormingswarmte}_{\text{beginstoffen}}$$

$$\Delta E = (-8,11 \cdot 10^5 \text{ J}) - (-3,95 \cdot 10^5 \text{ J} - 2,86 \cdot 10^5 \text{ J}) = -1,30 \cdot 10^5 \text{ J}$$

De derde stap is exotherm omdat de reactiewarmte een negatief getal is.

- c** Alle drie de stappen zijn exotherm, dus het totale proces voor de bereiding van zwavelzuur is exotherm.

B 11



b De vormingswarmte (Binas tabel 57):

2 ZnS	$2 \times -2,06 \cdot 10^5 \text{ J} = -4,12 \cdot 10^5 \text{ J}$
3 O ₂	$3 \times 0 \text{ J} = 0 \text{ J}$
2 ZnO	$2 \times -3,51 \cdot 10^5 \text{ J} = -7,02 \cdot 10^5 \text{ J}$
2 SO ₂	$2 \times -2,97 \cdot 10^5 \text{ J} = -5,94 \cdot 10^5 \text{ J}$

De energiebalans van deze reactie is:

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

$$\Delta E = -7,02 \cdot 10^5 \text{ J} + (-5,94 \cdot 10^5 \text{ J}) - (-4,12 \cdot 10^5 \text{ J} + 0 \text{ J}) = -8,84 \cdot 10^5 \text{ J}$$

- c** Het energie-effect van deze reactie is een negatief getal. De eerste stap bij de winning van zink is dus een exotherm proces.

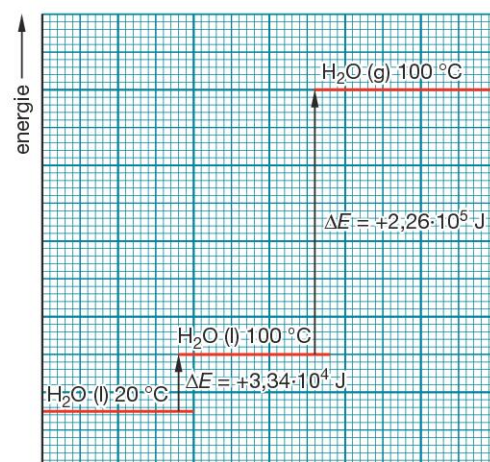
B 12

a $\Delta E = E_{\text{water } 100^\circ} - E_{\text{water } 20^\circ} = +3,34 \cdot 10^4 \text{ J}$

b De verdampingswarmte van water (Binas tabel 11) is $2,26 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$. Voor het verdampen van 100 g water is dan nodig: $2,26 \cdot 10^5 \text{ J}$.

c $\Delta E = E_{\text{waterdamp } 100^\circ} - E_{\text{water } 100^\circ} = +2,26 \cdot 10^5 \text{ J}$

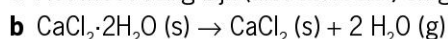
d Zie figuur 15.1.



15.1

B 13

a Het moet veilig zijn (niet corrosief) en goedkoop.



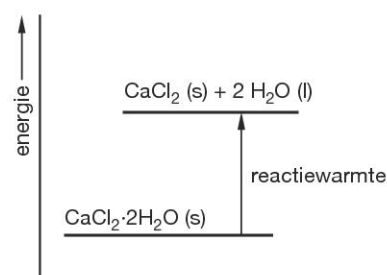
- c** Dit proces is endotherm: de warmte van de zon wordt gebruikt.
d Zie figuur 15.2.
e Het verschil in chemische energie tussen de beginstoffen en de reactieproducten is hetzelfde. Als je beginstoffen en reactieproducten verwisseld is de afstand tussen beide energieniveaus nog steeds hetzelfde, alleen endotherm wordt exotherm.
f $\text{MgSO}_4(\text{s}) + 7 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}(\text{s})$
g exotherm
h De molaire massa van $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}(\text{s}) = 120,37 \text{ u} + (7 \times 18,015 \text{ u}) = 246,48 \text{ g mol}^{-1}$.
 De molaire massa van droog $\text{MgSO}_4(\text{s}) = 120,37 \text{ g mol}^{-1}$.

$$1,00 \text{ kg droog } \text{MgSO}_4(\text{s}) = \frac{1,00 \cdot 10^3 \text{ g}}{120,37 \text{ g mol}^{-1}} = 8,31 \text{ mol } \text{MgSO}_4.$$

De molverhouding is: $\text{MgSO}_4 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 7$

Je hebt nodig: $7 \times 8,31 \text{ mol } \text{H}_2\text{O} = 58,15 \text{ mol } \text{H}_2\text{O}$ (later afronden).

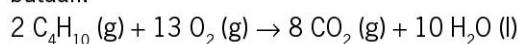
Voor 1,00 kg droog MgSO_4 is dan $58,15 \times 18,015 = 1,05 \cdot 10^3 \text{ g}$ water nodig.



15.2

B 14

- a** De verbrandingswarmte is de reactiewarmte van de volledige verbranding van 1 mol butaan.



2 C_4H_{10}	$2 \times -1,26 \cdot 10^5 \text{ J} = -2,52 \cdot 10^5 \text{ J}$
13 O_2	$13 \times 0 \text{ J} = 0 \text{ J}$
8 CO_2	$8 \times -3,935 \cdot 10^5 \text{ J} = -31,48 \cdot 10^5 \text{ J}$
10 H_2O	$10 \times -2,86 \cdot 10^5 \text{ J} = -28,6 \cdot 10^5 \text{ J}$

De energiebalans van de reactie is:

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

$$\Delta E = -31,48 \cdot 10^5 \text{ J} + (-28,6 \cdot 10^5 \text{ J}) - (-2,52 \cdot 10^5 \text{ J}) = -57,6 \cdot 10^5 \text{ J}$$

De verbrandingswarmte is gegeven in J mol^{-1} . Omdat in de reactievergelijking de coëfficiënt 2 voor butaan staat moet je de reactiewarmte delen door 2 om de verbrandingswarmte te vinden:

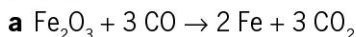
$$\text{De verbrandingswarmte van butaan is dan } \frac{-57,6 \cdot 10^5 \text{ J}}{2} = -28,8 \cdot 10^5 \text{ J}.$$

- b** In Binas tabel 56B staat $-28,75 \cdot 10^5 \text{ J mol}^{-1}$. Dit minimale verschil kan gemakkelijk ontstaan door de onnauwkeurigheid van de getallen die je uit tabel 57B hebt gehaald. Ook door afronden ontstaat er een klein verschil.

B 15

- a** Voor een jaarproductie van 180 000 ton asfalt heeft de centrale $180\,000 \times 327 \text{ MJ} = 5,89 \cdot 10^7 \text{ MJ}$ aan energie nodig. 70% is voor het verwarmen van de steentjes, dat is $0,70 \times 5,89 \cdot 10^7 \text{ MJ} = 4,12 \cdot 10^7 \text{ MJ}$.
 De besparing met het BAM-proces is 51%, dat komt overeen met $0,51 \times 4,12 \cdot 10^7 \text{ MJ} = 2,10 \cdot 10^7 \text{ MJ}$ aan energie.
b De CO_2 -uitstoot per ton asfalt is 17 kg. 70% is afkomstig van de verwarming van de steentjes, dat is $0,70 \times 17 \text{ kg} = 11,9 \text{ kg}$. De vermindering van de uitstoot wordt $0,70 \times 11,9 \text{ kg} = 8,33 \text{ kg}$. Voor de totale productie is dat $180\,000 \times 8,33 \text{ kg} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ kg } \text{CO}_2$.

- c** Bitumen is een aardolieproduct waarin dubbele en enkele covalente bindingen in de moleculen voorkomen. Het uv-licht kan met name dubbele bindingen verbreken waardoor de lijmende werking van het bitumen vermindert. Het lignine heeft een uv-stabiliserende werking, waardoor beschadiging van de bindingen minder snel optreedt. Het asfalt krijgt daardoor minder snel scheurtjes en gaat dus langer mee.

C 16

- b** De gegeven stof is Fe_2O_3 (ijzererts).

De hoeveelheid Fe_2O_3 is 1,00 ton. Dat moet je omrekenen in mol.

De molaire massa van $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 159,69 \text{ g mol}^{-1}$.

Je hebt $1,00 \text{ ton} = 1,00 \cdot 10^6 \text{ g Fe}_2\text{O}_3$.

$$\text{Er is: } \frac{1,00 \cdot 10^6 \text{ g}}{159,69 \text{ g mol}^{-1}} = 6,26 \cdot 10^3 \text{ mol}$$

1,00 ton Fe_2O_3 komt overeen met $6,26 \cdot 10^3 \text{ mol Fe}_2\text{O}_3$.

De molverhouding $\text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{Fe} = 1 : 2$ (zie de coëfficiënten in de reactievergelijking bij a).

Je hebt $6,26 \cdot 10^3 \text{ mol Fe}_2\text{O}_3$.

Hieruit ontstaat $6,26 \cdot 10^3 \times 2 = 1,25 \cdot 10^4 \text{ mol Fe}$.

Ten slotte reken je uit hoeveel ton $1,25 \cdot 10^4 \text{ mol Fe}$ is.

De molaire massa van $\text{Fe} = 55,85 \text{ g mol}^{-1}$.

Dit is $1,25 \cdot 10^4 \text{ mol} \times 55,85 \text{ g} = 6,98 \cdot 10^5 \text{ g Fe} = 0,699 \text{ ton Fe}$.

Uit 1,00 ton Fe_2O_3 kun je 0,699 ton Fe maken.

- c**

1 Fe_2O_3	$1 \times -8,24 \cdot 10^5 \text{ J} = -8,24 \cdot 10^5 \text{ J}$
3 CO	$3 \times -1,105 \cdot 10^5 \text{ J} = -3,315 \cdot 10^5 \text{ J}$
2 Fe	$= 0 \text{ J}$
3 CO_2	$3 \times -3,935 \cdot 10^5 \text{ J} = -11,805 \cdot 10^5 \text{ J}$

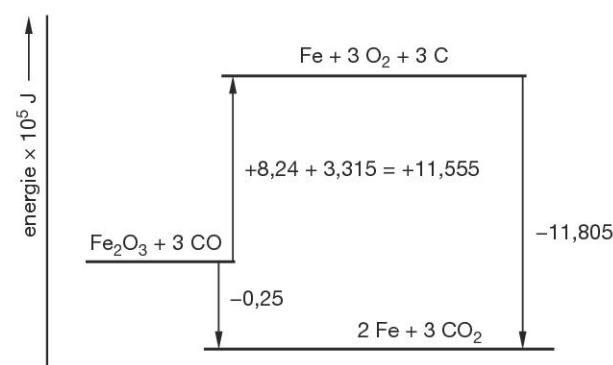
De energiebalans van de reactie is:

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

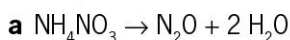
$$\Delta E = -11,805 \cdot 10^5 \text{ J} + 0 \text{ J} - (-8,24 \cdot 10^5 \text{ J} - 3,315 \text{ J}) = -0,25 \cdot 10^5 \text{ J}$$

- d** De reactiewarmte van deze reactie is een negatief getal. De vorming van Fe is dus een exotherm proces.

- e** Zie figuur 15.3.



15.3

C 17

- b**

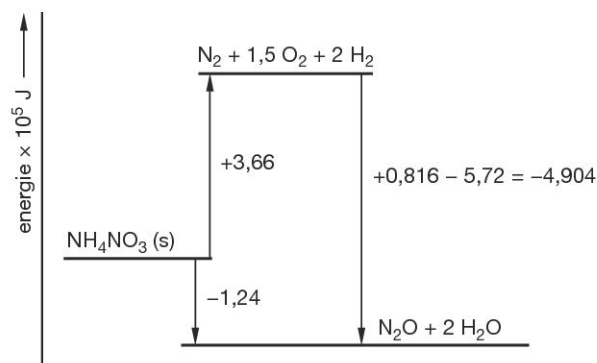
NH_4NO_3	$-3,66 \cdot 10^5 \text{ J}$
N_2O	$+0,816 \cdot 10^5 \text{ J}$
2 H_2O	$2 \times -2,86 \cdot 10^5 \text{ J} = -5,72 \cdot 10^5 \text{ J}$

De energiebalans van de reactie is:

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

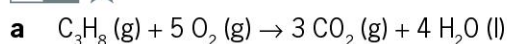
$$\Delta E = (+0,816 \cdot 10^5 \text{ J} - 5,72 \cdot 10^5 \text{ J}) - (-3,66 \cdot 10^5 \text{ J}) = -1,24 \cdot 10^5 \text{ J}$$

c Zie figuur 15.4.



15.4

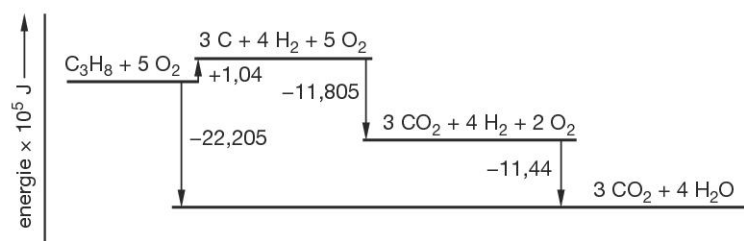
C 18 ★



b,c Zie figuur 15.5.

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

$$\Delta E = (-11,805 \cdot 10^5 \text{ J} - 11,44 \cdot 10^5 \text{ J}) - (-1,04 \cdot 10^5 \text{ J}) = -22,2 \cdot 10^5 \text{ J}$$



15.5

15.3 Reactiesnelheid

A 19 ⊙

a De reactiesnelheid wordt bepaald door vijf factoren:

- 1 de soort stof
- 2 de temperatuur
- 3 de concentratie(s) van de reagerende stof(fen)
- 4 de verdelingsgraad van een stof
- 5 de katalysator

b De reactietijd en de reactiesnelheid zijn omgekeerd evenredig met elkaar.

A 20

a Hier moet je in de berekening delen door 2 omdat de coëfficiënt voor stof A in de reactievergelijking 2 is. De concentratieafname is $0,200 \text{ mol} - 0,166 \text{ mol} = 0,034 \text{ mol}$ $\div 2 = 0,017 \text{ mol L}^{-1}$.

$$s = \frac{0,017 \text{ mol L}^{-1}}{8,40 \times 60 \text{ s}} = 3,37 \cdot 10^{-5} \text{ mol L}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

b De reactiesnelheid zal tijdens dit lange tijdsinterval niet constant zijn. [A] neemt immers af en de temperatuur kan ook veranderen.

B 21 ⊙

$$s = \frac{10,0 \cdot 10^{-3} \text{ mol NO}_2}{10,0 \text{ L} \times 120 \text{ s}} = 8,33 \cdot 10^{-6} \text{ mol L}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

B 22**a** Zie figuur 15.6**b** Zie de tabel.

tijdstip (s)	[NO ₂]	[N ₂ O ₅]	[O ₂]
0	0,00	5,00	0,00
500	2,96	$5,00 - (2,96 : 2) = 3,52$	$2,96 : 4 = 0,74$
1500	6,50	$5,00 - (6,50 : 2) = 1,75$	$6,50 : 4 = 1,63$
2500	8,26	$5,00 - (8,26 : 2) = 0,87$	$8,26 : 4 = 2,07$

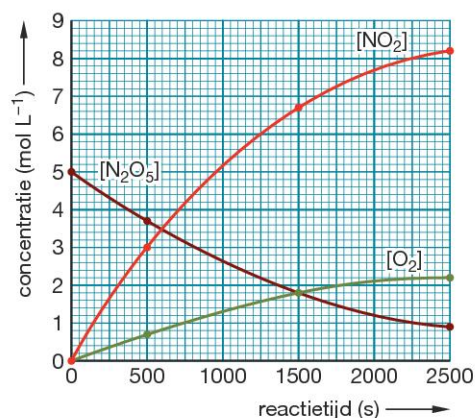
c Zie figuur 15.6.**d** Zie de tabel.

interval (s)	reactiesnelheid vorming O ₂ (gemiddeld) (mol L ⁻¹ s ⁻¹)
0 – 500	$\frac{0,74 \text{ mol O}_2 \text{ L}^{-1}}{500 \text{ s}} = 1,5 \cdot 10^{-3}$
500 – 1500	$\frac{1,63 - 0,74 \text{ mol O}_2 \text{ L}^{-1}}{1000 \text{ s}} = 8,9 \cdot 10^{-4}$
1500 – 2500	$\frac{2,07 - 1,63 \text{ mol O}_2 \text{ L}^{-1}}{1000 \text{ s}} = 4,4 \cdot 10^{-4}$

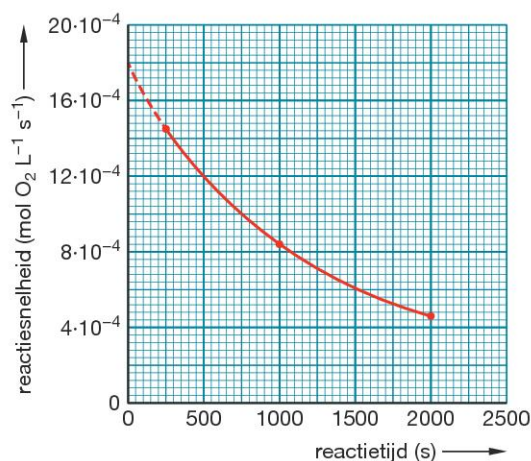
e Zie figuur 15.7. De geschatte reactiesnelheid kun je door extrapoleren aflezen van de verticale as: $18 \cdot 10^{-4} \text{ mol O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

f Je zou de druk kunnen meten. De druk zal tijdens het experiment toenemen, omdat er rechts van de pijl in de reactievergelijking meer gasdeeltjes staan dan links. De druktoename per tijdseenheid is dan een maat voor de reactiesnelheid.

Je zou ook de kleurintensiteit van het gasmengsel kunnen meten. Aangezien NO₂ een bruin gas is en de rest kleurloos, kun je als maat voor de reactiesnelheid de verandering van de kleurintensiteit als functie van de tijd nemen. Daar zijn speciale apparaten voor.



15.6



15.7

C 23

- a** Als $[\text{ClO}_2]$ twee keer zo groot wordt, wordt de reactiesnelheid ook twee keer zo groot.
Als $[\text{F}_2]$ twee keer zo groot wordt, wordt de reactiesnelheid ook twee keer zo groot.
Zowel $[\text{ClO}_2]$ als $[\text{F}_2]$ heeft dus invloed op de reactiesnelheid.
- b** Bij de reactie zijn drie deeltjes betrokken. De kans dat deze drie deeltjes tegelijk botsen is heel klein. De reactie zal dus in meer dan een stap verlopen.
- c** Mogelijke reactiemechanismen:
mechanisme 1: $\text{F}_2 + \text{ClO}_2 \rightarrow \text{ClO}_2\text{F} + \text{F}$
 $\text{F} + \text{ClO}_2 \rightarrow \text{ClO}_2\text{F}$
 Of:
mechanisme 2: $\text{F}_2 + \text{ClO}_2 \rightarrow \text{ClO}_2\text{F}_2$
 $\text{ClO}_2\text{F}_2 + \text{ClO}_2 \rightarrow 2 \text{ClO}_2\text{F}$
- c** Zowel $[\text{ClO}_2]$ als $[\text{F}_2]$ heeft dus invloed op de reactiesnelheid.
Er moeten één deeltje F_2 en één deeltje ClO_2 bij betrokken zijn. Voor allebei de voorgestelde mechanismen is dat dus stap 1.

C 24

- a** Ongeveer 60 dagen

b interval (dag)	afname vit. C (mg)	afname per dag (mg)
0 – 30	700	35,0
30 – 60	400	13,3
60 – 90	200	6,67

- c** De voorraad in het lichaam neemt af, daarmee de concentratie. De verdwijnsnelheid is afhankelijk van de concentratie en die neemt ook af.

d 0 – 30 dagen $\frac{35,0}{1090} \times 100\% = 3,21\%$

30 – 60 dagen $\frac{13,3}{585} \times 100\% = 2,27\%$

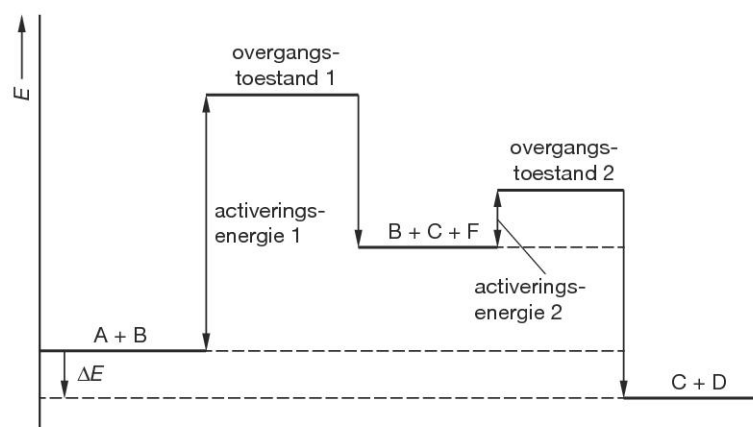
60 – 90 dagen $\frac{6,67}{290} \times 100\% = 2,30\%$

Dat is ongeveer 2,6% per dag.

- e** $0,026 \times 1000 = 26 \text{ mg per dag}$ (Om je gedachten te bepalen: in een sinaasappel zit ongeveer 50 mg vitamine C.)

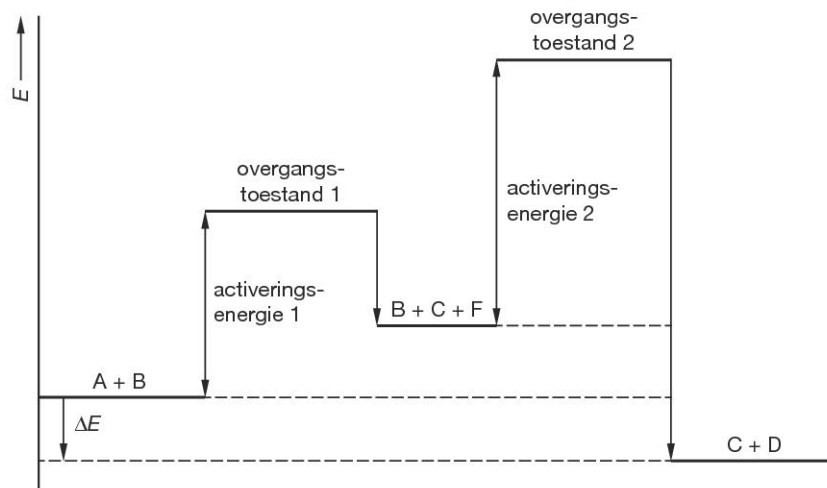
C 25 ★

- a** Zie figuur 15.8
- b** De eerste stap is snelheidsbepalend, die heeft de hoogste activeringsenergie.



15.8

- c Zie figuur 15.9.
- d Voor het omzetten van de tussenproducten (C + F) in C + D is meer energie nodig dan voor het omzetten van de tussenproducten in de uitgangsstof A. In de meeste gevallen zullen daarom de tussenproducten weer worden omgezet in de uitgangsstoffen. De reactie is dus omkeerbaar.
- e Bij sommige reacties komt misschien wel voldoende energie vrij om ervoor te zorgen dat uit de tussenproducten wel de eindproducten worden gevormd, maar er is te veel energie nodig om de eindproducten (C + D) weer om te zetten in de tussenproducten. De tweede stap is daarom onomkeerbaar.



15.9

15.4 Blokschema's

A 26

- a Batch is Engels voor portie of partij. Bij een batchproces wordt steeds een bepaalde portie gemaakt en daarna begint het proces opnieuw.
Continu betekent voortdurend of onophoudelijk. Bij een continuproces wordt voortdurend hetzelfde product gemaakt, waarbij de aanvoer van de beginstoffen en de afvoer van de producten niet wordt onderbroken.
- b Een blok stelt een reactor, een scheidingstoestel of een ruimte voor bewerking voor.
- c De lijnen zijn stofstromen en de pijlen geven de richting aan.
- d Naast de lijnen kun je de namen of formules van de stoffen vermelden.

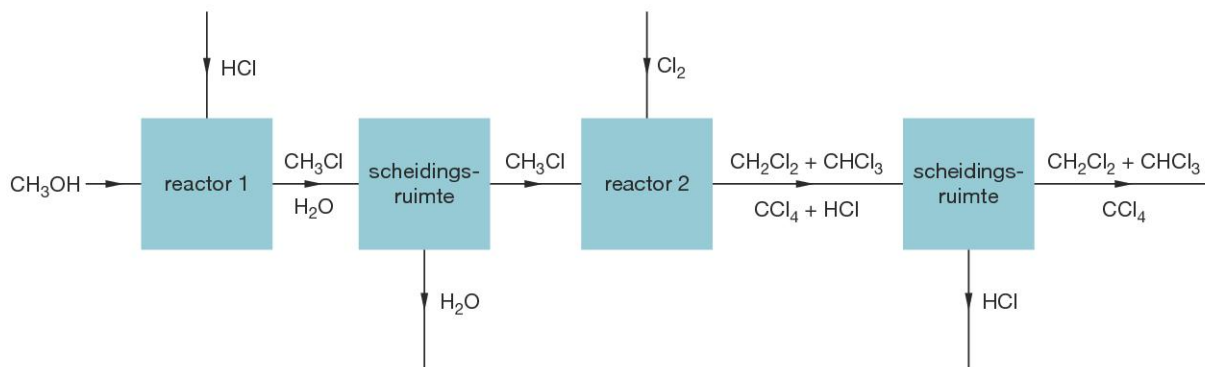
B 27

In reactor 1 (R1) wordt koelwater gebruikt. Dat wil zeggen : er wordt warmte afgevoerd. Die warmte is kennelijk bij de reactie ontstaan : de reactie is exotherm.

B 28

- a $\text{CH}_3\text{OH} + \text{HCl} \rightarrow \text{CH}_3\text{Cl} + \text{H}_2\text{O}$
- b Leid het gasmengsel door water, resten methanol en waterstofchloride die niet gereageerd hebben zullen oplossen in het water. Dit noem je extractie. Chloormethaan is een gas (zie Binas tabel 42B) dat niet oplost in water, omdat het geen H-bruggen kan vormen.
- c Er ontstaan ook dichloormethaan en trichloormethaan.
- d In de eerste stap reageren methanol en waterstofchloride in de molverhouding 1 : 1. Bij stap 2 vindt een substitutiereactie plaats: $\text{CH}_3\text{Cl} + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{CH}_2\text{Cl}_2 + \text{HCl}$
Als uitsluitend dichloormethaan zou ontstaan, wordt er per mol chloormethaan precies 1 mol HCl gevormd. Dit zou genoeg zijn voor stap 1. Maar er ontstaat ook trichloormethaan. Hierbij wordt twee mol HCl gevormd per mol chloormethaan. Het gewenste eindproduct is tetrachloormethaan. Hierbij ontstaat per mol chloormethaan zelfs drie mol HCl.
Er ontstaat meer HCl dan nodig is voor stap 1, dus het antwoord is nee.

- e Zie figuur 15.10. Let op: de HCl kan niet zonder meer teruggevoerd worden naar het eerste blok. Eventueel kun je er een extra blok bijtekenen waar HCl wordt ingeleid en een deel terug naar blok 1 gaat en een deel wordt afgevoerd.



15.10

B 29

- a Ton of kilogram is de massa-eenheid waarin de stoffen worden afgewogen.
 b $\text{N}_2 + 3 \text{H}_2 \rightleftharpoons 2 \text{NH}_3$

hoeveelheid stof (kmol)	N_2	H_2	NH_3
t_0	50	150	0
omgezet	-40	-120	+80
t_{ev}	10	30	80

Aanwezig in evenwichtstoestand:

N_2 : 10 kmol, dit komt overeen met $10 \text{ kmol} \times 28,02 \text{ g mol}^{-1} = 280,2 \text{ kg} = 2,8 \cdot 10^2 \text{ kg}$.

H_2 : 30 kmol, dit komt overeen met $30 \text{ kmol} \times 2,016 \text{ g mol}^{-1} = 60,48 \text{ kg} = 60 \text{ kg}$.

NH_3 : 80 kmol, dit komt overeen met $80 \text{ kmol} \times 17,031 \text{ g mol}^{-1} = 1362,48 \text{ kg} = 1,4 \cdot 10^3 \text{ kg}$.

- c De maximale opbrengst zou 100 kmol zijn.

Het rendement is $\frac{80}{100} \times 100\% = 80\%$.

B 30

- a Het kruis geeft aan dat er in de reactor een katalysator aanwezig is.
 b Eerste blok : mengen van methanol en ethaanzuur
 Tweede blok : verestering en afvoer van water
 Derde blok : scheiding van de ester en het mengsel methanol / ethaanzuur
 c Het kookpunt van methanol (338 K) verschilt weinig van dat van methylethanoaat (330 K).
 d Zuiveren is niet nodig, maar je moet wel weten hoeveel van beide stoffen aanwezig is, want je moet er immers voor zorgen dat de juiste hoeveelheden beginstoffen weer in 'blok' 1 aanwezig zijn.
 e Het gaat om een continu proces, de recirculatielus wijst hierop.
 f De vergelijking voor deze reactie is:
 $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2 + \text{CH}_4\text{O} \rightleftharpoons \text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$

Er ontstaat 1,4 ton water = $1,4 \cdot 10^3 \text{ kg water} \triangleq \frac{1,4 \cdot 10^3 \text{ kg}}{18,015 \text{ kg kmol}^{-1}} = 77,7 \text{ kmol water}$.

De molverhouding ester : water = 1 : 1, dus is er ook 77,7 kmol ester ontstaan.

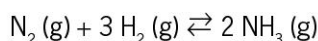
De molaire massa van de ester is $74,08 \text{ kg kmol}^{-1}$.

Er is ontstaan $77,7 \text{ kmol} \times 74,08 \text{ kg kmol}^{-1} = 5,76 \cdot 10^3 \text{ kg} = 5,8 \text{ ton ester}$.

- g** Omdat methanol en ethaanzuur goed oplosbaar zijn in water, is de kans groot dat het water verontreinigd is met deze stoffen.
- h** Er ontstaat 6,2 ton product. Hiervan is 5,76 ton ester.
De zuiverheid is dan $\frac{5,76 \text{ ton}}{6,2 \text{ ton}} \times 100\% = 93 \text{ massa-\%}$.
- i** Bij een industrieel proces moet de massabalans altijd kloppen. Er blijft steeds evenveel ton stof in het proces. Als er 1,4 ton water en 6,2 ton product worden afgetapt verdwijnt er $1,4 + 6,2 = 7,6$ ton stof uit het proces. Er moet aan het begin weer 7,6 ton worden toegevoegd.

C 31 ★

- a** Het inerte argon wordt, samen met de niet omgezette waterstof en stikstof, gerecirculeerd en aangevuld met nieuwe grondstoffen, waarin zich ook een beetje argon bevindt. Zo wordt de argonconcentratie in het gasmengsel steeds groter.
- b** Als per minuut 80 kmol N_2 passeert en de conversie 20% is, wordt per minuut $0,20 \times (2 \times 80 \text{ kmol}) = 32 \text{ kmol NH}_3$ afgetapt na de koeling.



In de tabel is de hoeveelheid (in kmol) van elk gas vermeld die per minuut langs de punten B t/m E passeert.

Bij een omzetting van 20% is bij C over:

$$80\% \text{ N}_2 = 0,80 \times 80 \text{ kmol} = 64 \text{ kmol}$$

$$80\% \text{ H}_2 = 0,80 \times 240 \text{ kmol} = 192 \text{ kmol}$$

$$\text{Ar} = 4,0 \text{ kmol}$$

Bij D wordt 1/16 deel van de gasstroom gespuid, dus 1/16 deel van alle gassen bij C. Deze spui aftrekken van de hoeveelheden stof bij C geeft de hoeveelheden bij E.

	B	C	D	E
$\text{N}_2 (\text{g})$	80	64	4	60
$\text{H}_2 (\text{g})$	240	192	12	180
$\text{Ar} (\text{g})$	4,0	4,0	0,25	3,75

Om in de gasstroom bij B de juiste hoeveelheden te krijgen, moet bij A worden ingevoerd: $(80 - 60) \text{ kmol} = 20 \text{ kmol N}_2$ en $(240 - 180) \text{ kmol} = 60 \text{ kmol H}_2$

- c** De *molverhouding* van de gassen die langs A stromen is gegeven,

$$\text{N}_2 : \text{H}_2 : \text{Ar} = 80 : 240 : 1,0$$

Bij b is berekend dat om een continuproces te krijgen, langs A 20 kmol N_2 en 60 kmol H_2 moet stromen. Dat is $\frac{1}{4}$ van de getallen in de molverhouding, zodat in dit mengsel ook $\frac{1}{4} \times 1,0 = 0,25 \text{ kmol Ar}$ zal voorkomen.

Via punt D wordt (zie de tabel) per minuut 0,25 kmol Ar gespuid. De hoeveelheden zijn gelijk, dus zal het argonpercentage in de reactor niet toenemen.

15.5 Welk proces is groener?

A 32 ●

- a** Meestal zal een fabriek met een continuproces een grotere productiecapaciteit hebben dan een fabriek met een stapsgewijs proces. Om economische redenen kun je voor de productie van grote hoeveelheden beter een continuproces ontwerpen omdat je daarmee veel kunt besparen op de arbeidskosten.
- b** Voor een continuproces zijn de investeringskosten hoger. Er is een duurdere installatie nodig, omdat bijna alles geautomatiseerd is.

- c** Bij een stapsgewijs proces is vaak weinig geautomatiseerd. Dus meer handbediening en per eenheid product meer arbeidsplaatsen (stapsgewijze processen hebben meestal een kleinere productiecapaciteit).
- d** Een stapsgewijs proces is vaak veel flexibeler wat betreft aard en hoeveelheid van het product, omdat het niet geautomatiseerd is.

B 33

a Zie in hoofdstuk 1 de scheidingsmethoden, met name destillatie en extractie.

- b** $4 \text{ C}_6\text{H}_5\text{NO}_2 (\text{l}) + 9 \text{ Fe (s)} + 4 \text{ H}_2\text{O (l)} \xrightarrow{\text{FeCl}_2} 4 \text{ C}_6\text{H}_5\text{NH}_2 (\text{l}) + 3 \text{ Fe}_3\text{O}_4 (\text{s})$
 Bij de berekeningen van de molecuulmassa's is gebruikgemaakt van Binas tabel 98 en tabel 40A.

Molecuulmassa's:

$\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	123,12 u	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$	93,126 u
H_2O	18,015 u	Fe_3O_4	231,53 u
Fe	55,845 u	FeCl_2	126,75 u

Molaire massa's:

$\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	123,12 g mol ⁻¹	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$	93,126 g mol ⁻¹
H_2O	18,015 g mol ⁻¹	Fe_3O_4	231,53 g mol ⁻¹
Fe	55,845 g mol ⁻¹	FeCl_2	126,75 g mol ⁻¹

Voor de massaverhouding geldt dan (zie de berekeningen onder de tabel):

	4 $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	9 Fe	4 H_2O	4 $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$	3 Fe_3O_4
in u:	492,48	502,61	72,060	372,50	694,59
in kg:	2000	2041,1	292,64	1512,8	2820,8
in kmol:	16,24	36,55	16,24	16,24	12,18

De hoeveelheid nitrobenzeen, $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$ is gegeven: 2000 kg. Je kunt de hoeveelheden van de andere stoffen die bij het proces betrokken zijn uitrekenen met behulp van kruisproducten:

$$\text{Hoeveelheid Fe} = \frac{2000 \text{ kg} \times 502,61}{492,48} = 2041,1 \text{ kg}$$

$$\text{Hoeveelheid H}_2\text{O} = \frac{2000 \text{ kg} \times 72,060}{492,48} = 292,64 \text{ kg}$$

Door het aantal kg stof te delen door de molaire massa vind je het aantal kmol (zie de tabel).

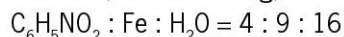
c $\text{Hoeveelheid C}_6\text{H}_5\text{NH}_2 = \frac{2000 \text{ kg} \times 372,50}{492,48} = 1512,8 \text{ kg}$

$$\text{Hoeveelheid Fe}_3\text{O}_4 = \frac{2000 \text{ kg} \times 694,59}{492,48} = 2820,8 \text{ kg}$$

Door het aantal kg stof te delen door de molaire massa vind je het aantal kmol (zie de tabel).

- d** In het blokschema bij d en bij e moeten de massa's in kg van de ingaande en uitgaande stoffen worden gezet. Je moet dan ook uitrekenen hoeveel kg water gerecirculeerd kan worden en hoeveel kg water er in aminobenzeen kan oplossen en andersom.

Aanvoer (mol verhouding):



$$2000 \text{ kg C}_6\text{H}_5\text{NO}_2 \triangleq \frac{2000 \text{ kg}}{123,12 \text{ g mol}^{-1}} = 16,24 \text{ kmol C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$$

Dit komt overeen met $1,624 \text{ kmol FeCl}_2 = 205,8 \text{ kg FeCl}_2$.

Per mol nitrobenzeen is 4 mol water aanwezig, terwijl volgens de reactievergelijking maar 1 mol water reageert. Hieruit kun je afleiden:

$\frac{3}{4}$ van het water wordt gerecirculeerd, dit is $877,92 \text{ kg}$.

$\frac{1}{4}$ van het water wordt verbruikt, dit is $292,64 \text{ kg}$.

Er kan $5,0 \text{ g}$ water oplossen in 100 g aminobenzeen (voor de oplosbaarheid van water in aniline en aniline in water, zie de informatie in het leerboek).

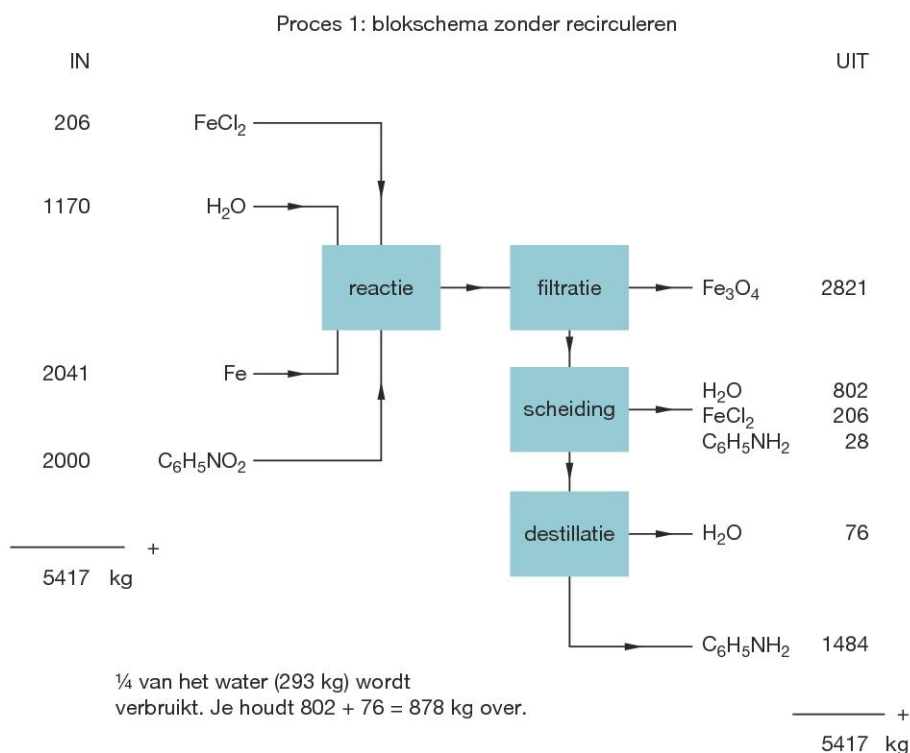
$$1512,8 \text{ kg C}_6\text{H}_5\text{NH}_2 \text{ neemt } \frac{5}{100} \times 1512,8 \text{ kg water} = 75,64 \text{ kg water mee, die er bij de}$$

destillatie weer uitkomt.

Bij de separatie (scheiding) wordt $877,92 - 75,64 = 802,3 \text{ kg}$ water afgescheiden,

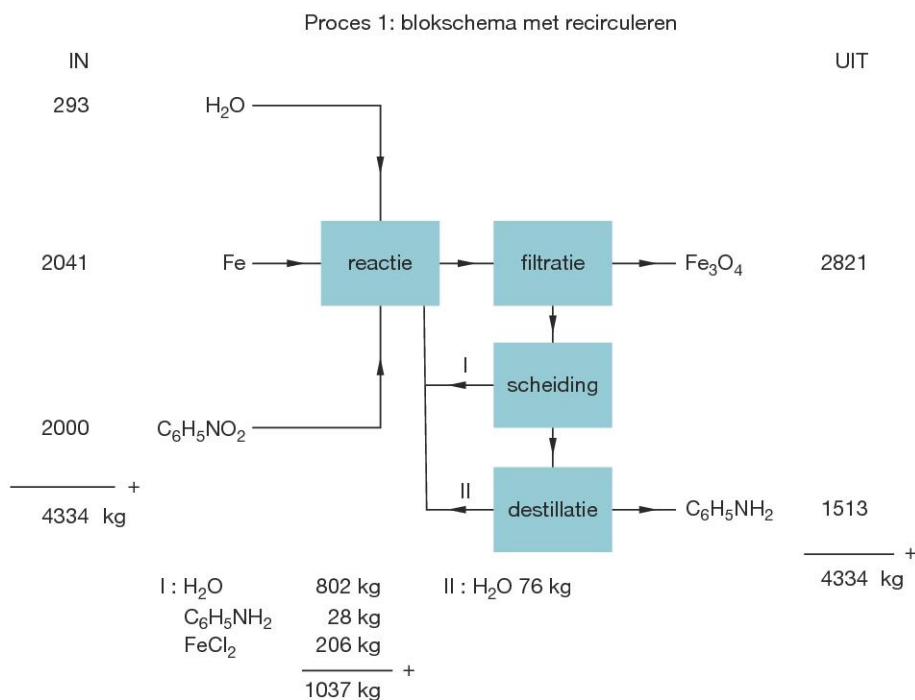
$$\text{waarbij weer } \frac{3,5}{100} \times 802,3 \text{ kg C}_6\text{H}_5\text{NH}_2 = 28,08 \text{ kg C}_6\text{H}_5\text{NH}_2 \text{ meegaat.}$$

In het blokschema zijn de hoeveelheden afgerond omdat dit overzichtelijker is en de gegeven verhoudingen ook niet heel nauwkeurig zijn. Zie figuur 15.11.



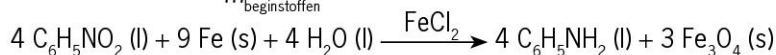
15.11

- e Je ziet in het blokschema met recirculatie dat de hoeveelheid water die wordt ingevoerd is verminderd met de hoeveelheid die wordt gerecirculeerd. Het opslagblok van de katalysator FeCl_2 is verwijderd omdat de katalysator eenmalig wordt toegevoegd en dan voortdurend recirculeert. Zie figuur 15.12.



15.12

f Atoomeconomie = $\frac{m_{\text{aminobenzeen}}}{m_{\text{beginstoffen}}} \times 100\%$



Molverhouding:

4 : 9 : 4 : 4 : 3

Massaverhouding:

492,48 : 502,61 : 72,060 : 372,50 : 694,59

$$\text{Atoomeconomie aniline} = \frac{372,50 \text{ u}}{492,48 \text{ u} + 502,61 \text{ u} + 72,060 \text{ u}} \times 100\% = 34,906\%$$

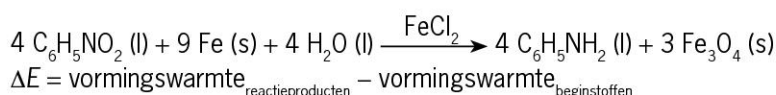
g E-factor = $\frac{\text{massa}_{\text{beginstoffen}} - \text{massa}_{\text{gewenst product}}}{\text{massa}_{\text{gewenst product}}}$

Voor de massa van het gewenst product moet de praktische opbrengst worden gebruikt. Omdat we er in deze opgave van uit zijn gegaan dat het rendement 100% is mag je de massa van het gewenste product (praktijk) gelijkstellen aan de massa van het gewenste product (theoretisch).

$$\text{E-factor} = \frac{492,48 \text{ u} + 502,61 \text{ u} + 72,060 \text{ u} - 372,50 \text{ u}}{372,50 \text{ u}} = 1,8648$$

- h Niet alleen de hoeveelheid afval, maar ook de soort afval is belangrijk. De vervuilingfactor, Q , is bij dit proces gebaseerd op Fe_3O_4 , dat als afval kan worden beschouwd, maar het kan ook worden gebruikt als kleurstof in de verfindustrie. Onder de Q -factor verstaan we de mate waarin een stof vervuילend is. Nu is Fe_3O_4 geen giftige stof, heeft geen grenswaarde, dus de Q -factor zal een laag getal zijn. Als het wordt hergebruikt in de verfindustrie is de Q -factor zelfs 0. De totale invloed van het geproduceerde afval op het milieu krijg je door de E-factor te vermenigvuldigen met de Q -factor.

- i** Je kunt het aminobenzeen uit het water halen door middel van:
- 1 *extractie* met nitrobenzeen; voordat het verse nitrobenzeen in de reactor komt wordt het afvalwater hiermee geëxtraheerd.
 - 2 *destillatie*. In de praktijk wordt geëxtraheerd met nitrobenzeen, omdat destillatie een veel duurdere methode is.
- j** De bijproducten met een kookpunt van boven de 200 °C kunnen gewonnen worden door middel van destillatie. Dit kan het beste onder verminderde druk gebeuren. De kookpunten komen dan lager te liggen, wat twee voordelen heeft:
- 1 Geen kans op ontleding (bij hogere temperatuur gebeurt dit wel, bij lagere temperatuur niet).
 - 2 Er hoeft minder hoog verwarmd te worden, dit spaart energie.
- k** Je kunt het gerecirculeerde water niet rechtstreeks in de reactor leiden. Twee redenen hiervoor zijn:
- 1 Dan wordt de juiste verhouding waarin de batchreactor gevuld is verstoord.
 - 2 Het proces is niet-continu.
- Er moet dus een wachttank aanwezig zijn voor de gerecirculeerde waterfase.
- l** Als de reactor op procescondities is kun je een warmtebalans opstellen. De warmte die bij het proces vrijkomt moet gelijk zijn aan de warmte die door de koeling wordt afgevoerd + de warmte die verloren gaat door opname van de omgeving (lucht). De warmte die bij het proces vrijkomt kun je berekenen door te werken met vormingswarmte.



Voor het energie-effect bij de reactie geldt dus per mol gevormd aminobenzeen:

$$\Delta E = V (\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2 (\text{l})) + \frac{3}{4} V (\text{Fe}_3\text{O}_4 (\text{s})) - V (\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2 (\text{l})) - V (\text{H}_2\text{O} (\text{l}))$$

In bovenstaande relatie gebruiken we V als afkorting voor de vormingswarmte.

B 34

- a** Zie in hoofdstuk 1 de scheidingsmethoden, met name destillatie en extractie.

- b** $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2 (\text{g}) + 3 \text{ H}_2 (\text{g}) \xrightarrow{\text{Cu}_2\text{O}} \text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2 (\text{g}) + 2 \text{ H}_2\text{O} (\text{g})$
 Bij de berekeningen van de molecuulmassa's is gebruikgemaakt van Binas tabel 98 en tabel 40A.

Molecuulmassa's:

$\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	123,12 u	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$	93,126 u
H_2	2,0159 u	H_2O	18,015 u

Molaire massa's:

$\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	123,12 g mol ⁻¹	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$	93,126 g mol ⁻¹
H_2	2,0159 g mol ⁻¹	H_2O	18,015 g mol ⁻¹

Voor de massaverhouding geldt dan (zie de berekeningen onder de tabel):

	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	H_2	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$	H_2O
in u	123,12	6,0477	93,126	36,030
in tonnen:	52,883	2,5976	40	15,476
in kmol:	439,5	1289	429,5	859,1

De hoeveelheid aniline die per dag wordt geproduceerd is gegeven: 40 ton. Je kunt de hoeveelheden van de andere stoffen die bij het proces betrokken zijn uitrekenen met behulp van kruisproducten.

$$\text{Hoeveelheid } \text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2 = \frac{40 \text{ ton} \times 123,12}{93,126} = 52,883 \text{ ton}$$

$$\text{Hoeveelheid } \text{H}_2 = \frac{40 \text{ ton} \times 6,0477}{93,126} = 2,5976 \text{ ton}$$

Door het aantal ton te vermenigvuldigen met 10^3 en te delen door de molaire massa vind je het aantal kmol (zie de tabel).

c $\text{Hoeveelheid } \text{H}_2\text{O} = \frac{40 \text{ ton} \times 36,030}{93,126} = 15,476 \text{ ton}$

Door het aantal ton te vermenigvuldigen met 10^3 en te delen door de molaire massa vind je het aantal kmol (zie de tabel).

- d** In het blokschema bij d en bij e (figuur 15.13) moeten de massa's in kg van de ingaande en uitgaande stoffen worden gezet. Je moet dan ook uitrekenen hoeveel ton waterstof gerecirculeerd kan worden en hoeveel ton water er in aminobenzene kan oplossen en andersom.

Van de waterstof wordt 5% omgezet, dus de input aan waterstof bedraagt

$$\frac{100}{5} \times 2,5976 = 51,95 \text{ ton.}$$

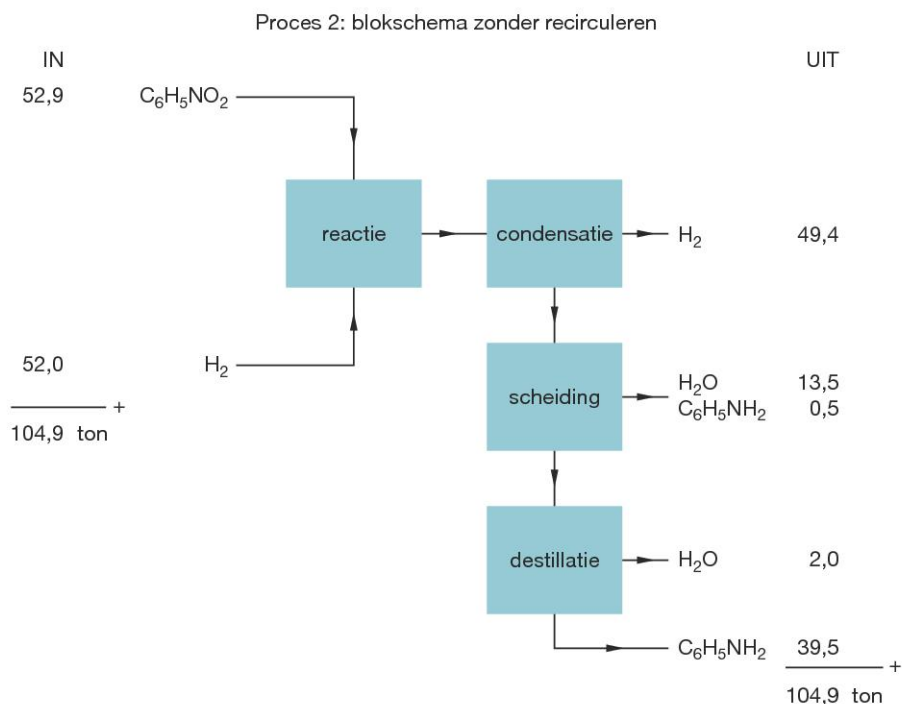
Hiervan wordt 2,5976 ton gebruikt, dus $51,95 - 2,5976 = 49,35 \text{ ton}$ komt weer terug.

40 ton aminobenzene bevat $\frac{5}{100} \times 40 = 2,0 \text{ ton}$ water (voor de oplosbaarheid van water

in aniline en aniline in water, zie informatie in het leerboek).

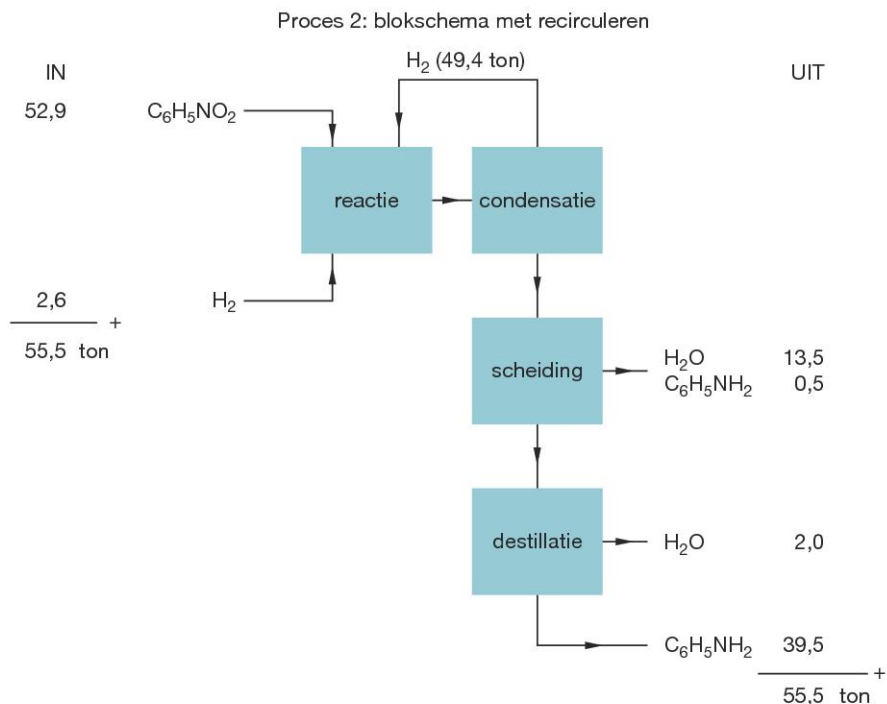
13,5 ton water bevat $\frac{3,5}{100} \times 13,5 = 0,5$ (afgerond) ton aminobenzene.

Dit laatste aminobenzene haal je uit de waterfase door middel van extractie met nitrobenzene van de voeding.

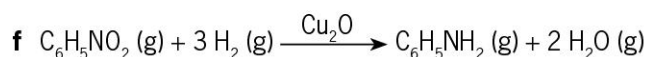


15.13

- e Je ziet in het blokschema in figuur 15.14 met recirculatie dat de hoeveelheid waterstof die wordt ingevoerd, is verminderd met de hoeveelheid die wordt gerecicleerd.



15.14



Molverhouding:

1 : 3 : 1 : 2

Massaverhouding:

123,12 : 6,0477 : 93,126 : 36,030

$$\text{Atoomeconomie} = \frac{m_{\text{aminobenzeen}}}{m_{\text{beginstoffen}}} \times 100\%$$

$$\text{Atoomeconomie aniline} = \frac{93,126 \text{ u}}{123,12 \text{ u} + 6,0477 \text{ u}} \times 100\% = 72,097\%$$

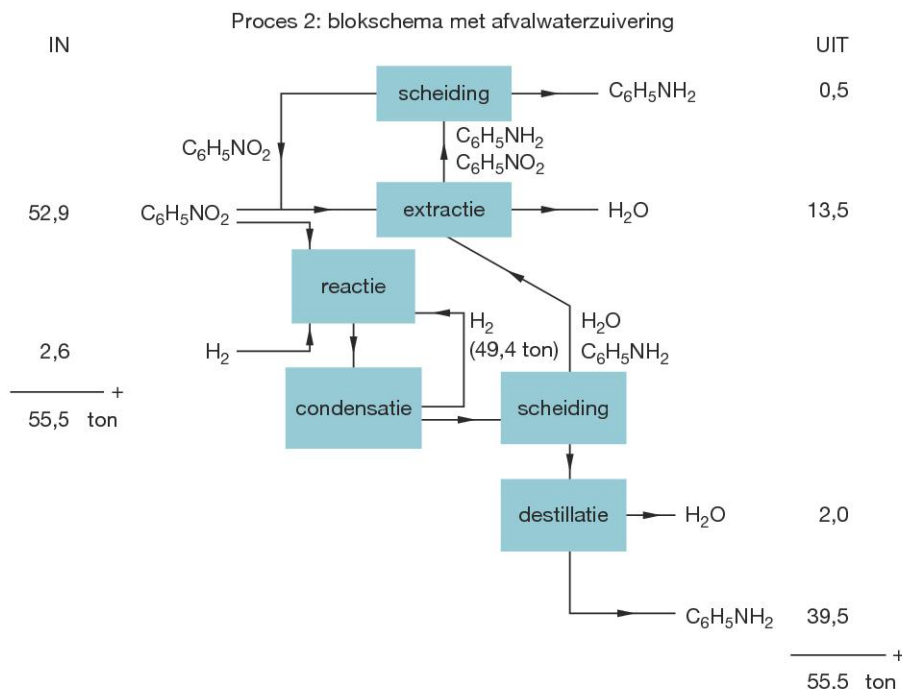
g
$$\text{E-factor} = \frac{\text{massa}_{\text{beginstoffen}} - \text{massa}_{\text{gewenst product}}}{\text{massa}_{\text{gewenst product}}}$$

Voor de massa gewenst product moet de praktische opbrengst worden gebruikt. Omdat we er in deze opgave van uit zijn gegaan dat het rendement 100% is mag je de massa van het gewenste product (praktijk) gelijkstellen aan de massa van het gewenste product (theoretisch).

$$\text{E-factor} = \frac{123,12 \text{ u} + 6,0477 \text{ u} - 93,126 \text{ u}}{93,126 \text{ u}} = 0,38702$$

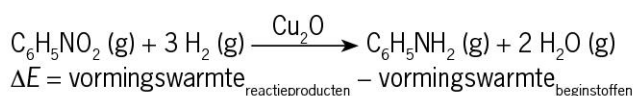
- h Niet alleen de hoeveelheid afval, maar ook de soort afval is belangrijk. De vervuilingfactor, Q, is bij dit proces gebaseerd op water. Onder de Q-factor verstaan we de mate waarin een stof vervuilend is. Voor water is de Q-factor = 0.
- i Je kunt het aminobenzeen uit het water halen door middel van:
- 1 extractie met nitrobenzeen; voordat het verse nitrobenzeen in de reactor komt wordt het afvalwater hiermee geëxtraheerd.
 - 2 destillatie. In de praktijk wordt geëxtraheerd met nitrobenzeen, omdat destillatie een veel duurdere methode is.

j Zie figuur 15.15.



15.15

- k** Als de reactor op procescondities is, kun je een warmtebalans opstellen. De warmte die bij het proces vrijkomt moet gelijk zijn aan de warmte die door de koeling wordt afgevoerd + de warmte die verloren gaat door opname van de omgeving (lucht). De warmte die bij het proces vrijkomt, kun je berekenen door te werken met vormingswarmte.

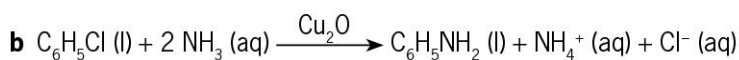


Voor het energie-effect bij de reactie geldt dus per mol gevormd aminobenzeen:
 $\Delta E = V (\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2 (\text{l})) + \frac{1}{2} V (\text{H}_2\text{O} (\text{l})) - V (\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2 (\text{l}))$

In bovenstaande relatie gebruiken we V als afkorting voor de vormingswarmte.

B 35

- a** Zie in hoofdstuk 1 de scheidingsmethoden, met name destillatie en extractie.



Bij de berekeningen van de molecuulmassa's is gebruikgemaakt van Binas tabel 98 en tabel 40A.

Molecuulmassa's:

$\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$	112,56 u	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$	93,126 u
NH_3	17,031 u	NH_4Cl	53,491 u

Molaire massa's:

$\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$	112,56 g mol ⁻¹	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$	93,126 g mol ⁻¹
NH_3	17,031 g mol ⁻¹	NH_4Cl	53,491 g mol ⁻¹

Voor de massaverhouding geldt dan (zie de berekeningen onder de tabel):

	$\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$	NH_3	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$	NH_4Cl
in u	112,56	34,062	93,126	53,491
in tonnen:	24,174	7,3153	20	11,488
in kmol:	214,8	429,5	215	214,8

De hoeveelheid aniline die per dag wordt geproduceerd is gegeven : 20 ton. Je kunt de hoeveelheden van de andere stoffen die bij het proces betrokken zijn uitrekenen met behulp van kruisproducten.

$$\text{Hoeveelheid } \text{C}_6\text{H}_5\text{Cl} = \frac{20 \text{ ton} \times 112,56}{93,126} = 24,174 \text{ ton}$$

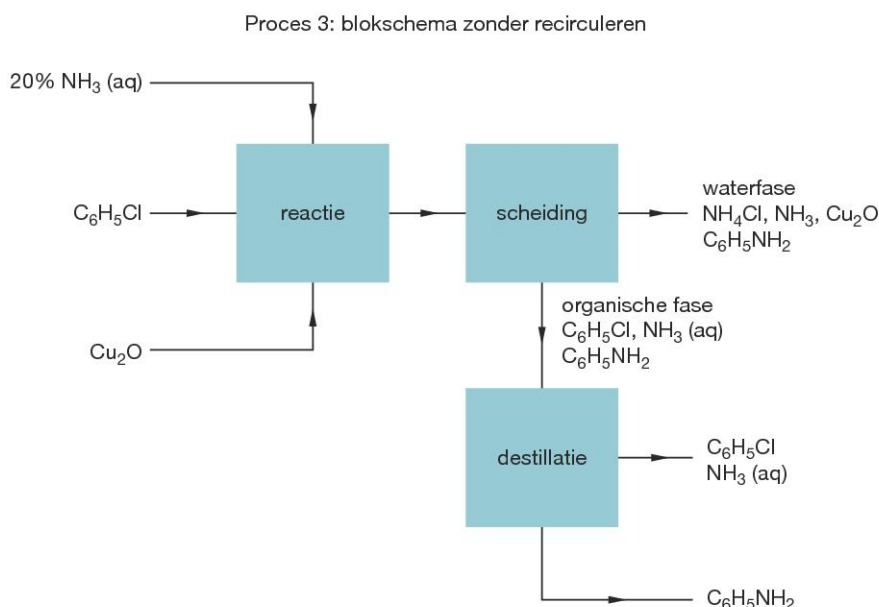
$$\text{Hoeveelheid } \text{NH}_3 = \frac{20 \text{ ton} \times 34,062}{93,126} = 7,3153 \text{ ton}$$

Door het aantal ton te vermenigvuldigen met 10^3 en te delen door de molaire massa vind je het aantal kmol (zie de tabel).

c $\text{Hoeveelheid } \text{NH}_4\text{Cl} = \frac{20 \text{ ton} \times 53,491}{93,126} = 11,488 \text{ ton}$

Door het aantal ton te vermenigvuldigen met 10^3 en te delen door de molaire massa vind je het aantal kmol (zie de tabel).

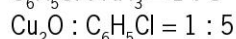
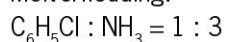
d Zie figuur 15.16.



15.16

- e** In het blokschema bij e moeten de massa's in ton van de ingaande en uitgaande stoffen worden gezet, zie figuur 15.17. Je moet dan ook uitrekenen hoeveel ton chloorbenzeen, ammoniak en water kan worden gerecirculeerd. Het chloorbenzeen wordt voor de helft omgezet. Er wordt dus ook 24,174 ton chloorbenzeen gerecirculeerd.

Molverhouding:



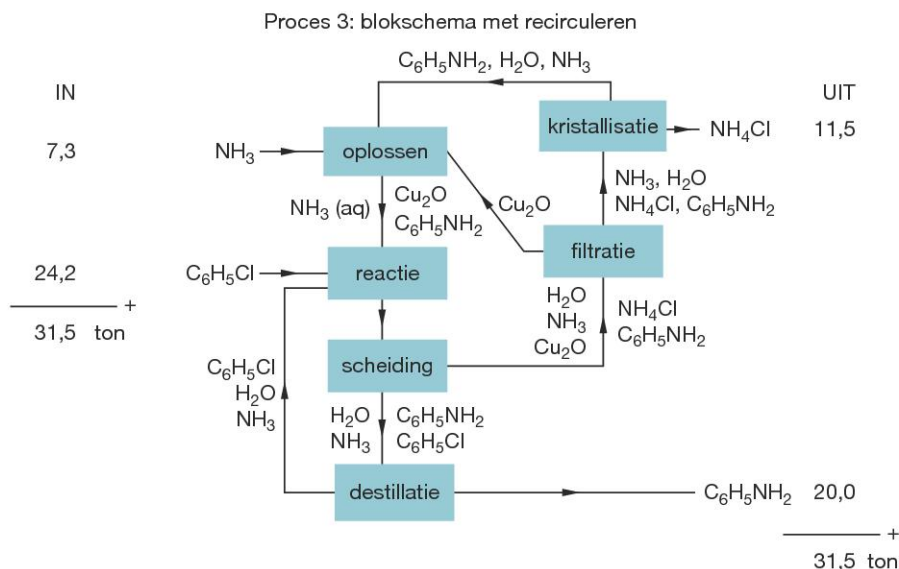
In de reactor wordt steeds 48,348 ton chloorbenzeen gevoerd.

Dit is 429,5 kmol, wat overeenkomt met 1288,5 kmol ammoniak. Dit is 21,946 ton ammoniak, waarvan $21,946 - 7,3153 = 14,631$ ton wordt gerecirculeerd.

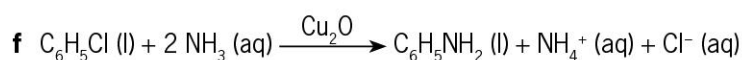
De hoeveelheid koper(II)oxide bedraagt $\frac{214,8}{5} = 42,96$ ton. Deze hoeveelheid blijft onveranderd.

De 14,631 ton ammoniak (recirculatie) is opgelost in 58,52 ton water (het is immers een oplossing van 20 massa-% NH_3).

De 7,3153 ton ammoniak (input) is opgelost in 29,26 ton water.



15.17



Molverhouding:

1 : 2 : 1 : 1

Massaverhouding:

112,56 : 34,062 : 93,126 : 53,491

$$\text{Atoomeconomie} = \frac{m_{\text{aminobenzeen}}}{m_{\text{beginstoffen}}} \times 100\%$$

$$\text{Atoomeconomie aniline} = \frac{93,126 \text{ u}}{112,56 \text{ u} + 34,062 \text{ u}} \times 100\% = 63,514\%$$

$$\text{g } \text{E-factor} = \frac{\text{massa}_{\text{beginstoffen}} - \text{massa}_{\text{gewenst product}}}{\text{massa}_{\text{gewenst product}}}$$

Voor de massa van het gewenst product moet de praktische opbrengst worden gebruikt. Omdat we er in deze opgave van uit zijn gegaan dat het rendement 100% is mag je de massa van het gewenste product (praktijk) gelijkstellen aan de massa van het gewenste product (theoretisch).

$$\text{E} = \frac{112,56 \text{ u} + 34,062 \text{ u} - 93,126 \text{ u}}{93,126 \text{ u}} = 0,57445$$

- h** Niet alleen de hoeveelheid afval, maar ook de soort afval is belangrijk. De vervuilingfactor, Q, is bij dit proces gebaseerd op NH_4Cl , dat als afval kan worden beschouwd. Onder de Q-factor verstaan we de mate waarin een stof vervuילend is. Nu is NH_4Cl geen giftige stof, heeft geen grenswaarde, dus de Q-factor zal een laag getal zijn. De totale invloed van het geproduceerde afval op het milieu krijg je door de E-factor te vermenigvuldigen met de Q-factor.

- i** Mogelijke oplossingen:

1 lozen

nadeel : waterverontreiniging

voordeel : goedkoop

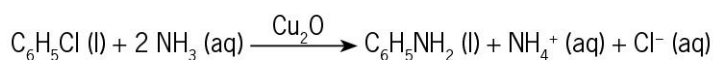
2 proberen te verkopen

voorwaarden:

- nabehandeling om te zuiveren (nadeel : extra investeringskosten)
- aanwezigheid van een afzetmarkt
- verkooporganisatie

voordeel : geen milieuverontreiniging

- j Als de reactor op procescondities is kun je een warmtebalans opstellen. De warmte die bij het proces vrijkomt moet gelijk zijn aan de warmte die door de koeling wordt afgevoerd + de warmte die verloren gaat door opname van de omgeving (lucht). De warmte die bij het proces vrijkomt kun je berekenen door te werken met vormingswarmte.



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

Voor het energie-effect bij de reactie geldt dus per mol gevormd aminobenzeen:

$$\Delta E = V(\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2 \text{ (l)}) + V(\text{NH}_4\text{Cl (l)}) - V(\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl (l)}) - \frac{1}{2} V(\text{NH}_3 \text{ (aq)})$$

In bovenstaande relatie gebruiken we V als afkorting voor de vormingswarmte.

B 36

Dit verloopt in overleg met je docent.

B 37

- a Proces 1: atomeconomie aniline = 34,906%
 Proces 2: atomeconomie aniline = 72,097%
 Proces 3: atomeconomie aniline = 63,514%
 Op grond van de atomeconomie zou je moeten kiezen voor proces 2.
- b Proces 1: E = 1,8648
 Proces 2: E = 0,38702
 Proces 3: E = 0,57445
 Op grond van de E-factor zou je moeten kiezen voor proces 2 : hier ontstaat het minste afval.
- c Proces 1: onder de Q-factor verstaan we de mate waarin een stof vervuילend is. Q, is bij dit proces gebaseerd op Fe_3O_4 , dat als afval kan worden beschouwd, maar het kan ook worden gebruikt als kleurstof in de verfindustrie. Verder is Fe_3O_4 geen giftige stof, heeft geen grenswaarde, dus de Q-factor zal in elk geval laag zijn: als het wordt hergebruikt in de verfindustrie is de Q-factor zelfs 0. De totale invloed van het geproduceerde afval op het milieu krijg je door de E-factor te vermenigvuldigen met de Q-factor.
 Proces 2: er ontstaat als nevenproduct alleen water. Voor water is de Q-factor = 0.
 Proces 3: de vervuilingfactor, Q, is bij dit proces gebaseerd op NH_4Cl , dat als afval kan worden beschouwd, maar het kan ook worden teruggewonnen en hergebruikt. Onder de Q-factor verstaan we de mate waarin een stof vervuילend is. Nu is NH_4Cl geen giftige stof, heeft geen grenswaarde, dus de Q-factor zal laag zijn. De totale invloed van het geproduceerde afval op het milieu krijg je door de E-factor te vermenigvuldigen met de Q-factor.
 Op het eerste gezicht zou je moeten kiezen voor proces 2.

B 38

Bij het ontwerpen van een groen proces spelen heel veel factoren een rol, naast de atomeconomie, de E-factor en de Q-factor.

In de genoemde voorbeelden kunnen de 'afvalstoffen' prima worden hergebruikt. Of dat al of niet gebeurt is van invloed op het 'groen' zijn van het proces.

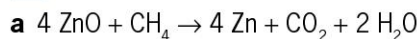
Verder valt te denken aan:

- opbrengst : we zijn in deze voorbeelden uitgegaan van een rendement van 100%, maar dat is niet altijd mogelijk;
- de kostprijs van de beginstoffen;
- de veiligheid bij het werken met de stoffen;
- de benodigde technische voorzieningen;
- het energieverbruik en de prijs voor energie ter plaatse;
- het gemak en de efficiëntie waarmee het reactieproduct kan worden geïsoleerd en gezuiverd.

Het proces waarbij nitrobenzeen in een redoxreactie werd omgezet in aniline (proces 2) kreeg bij een poging om al deze factoren om te zetten in een score maar liefst 64 van de 100 punten toegekend. Daarmee is het een goed acceptabele groene reactie!

Afsluiting

1



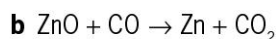
Molverhouding:

4 : 1 : 4 : 1 : 2

Massaverhouding:

325,5 : 16,04 : 261,5 : 44,01 : 36,030

$$\text{Atoomeconomie Zn} = \frac{261,5 \text{ u}}{325,5 \text{ u} + 16,04 \text{ u}} \times 100\% = 76,56\%$$



Molverhouding:

1 : 1 : 1 : 1

Massaverhouding:

81,38 : 28,010 : 65,38 : 44,010

$$\text{Atoomeconomie Zn} = \frac{65,38 \text{ u}}{81,38 \text{ u} + 28,010 \text{ u}} \times 100\% = 59,77\%$$

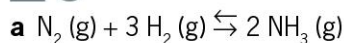
c Proces 1 heeft het hoogste percentage, dus de gunstigste atomeconomie.

d De massa van het geproduceerde zink in de praktijk is 70% van 261,5 g = 183,1 g.

$$E = \frac{325,5 \text{ u} + 16,04 \text{ u} - 183,1 \text{ u}}{183,1 \text{ u}} = 0,8653$$

De E-factor voor reactie 1 met een rendement van 70% = 0,8653.

2



Molverhouding:

1 : 3 : 2

Massaverhouding:

28,02 : 6,048 : 34,062

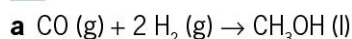
$$\text{Atoomeconomie ammoniak} = \frac{34,062 \text{ u}}{28,02 \text{ u} + 6,048 \text{ u}} \times 100\% = 100\%$$

b 65% van de theoretische opbrengst = $0,65 \times 34,062 = 22,14 \text{ u}$

$$\text{E-factor} = \frac{34,062 \text{ u} - 22,14 \text{ u}}{22,14 \text{ u}} = 0,54$$

c Als het rendement van de reactie hoger wordt, neemt de teller van de breuk af en de noemer toe. De waarde van de breuk neemt dan af: de E-factor wordt kleiner.

3



b Molverhouding: $\text{CO} : \text{CH}_3\text{OH} = 1 : 1$

Massaverhouding: $\text{CO} : \text{CH}_3\text{OH} = 28,010 : 32,042 = 1,0 : x$

$$\text{De theoretische opbrengst bij gebruik van } 1,0 \text{ kg CO} = x = \frac{1,0 \text{ kg} \times 32,042 \text{ kg}}{28,010 \text{ kg}} = 1,14 \text{ kg.}$$

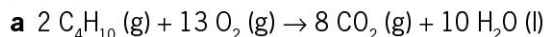
De praktische opbrengst is 0,80 kg.

$$\text{Het rendement van deze reactie} = \frac{0,80}{1,14} \times 100\% = 70\%.$$

$$\text{c E-factor} = \frac{1,14 \text{ kg} - 0,80 \text{ kg}}{0,80 \text{ kg}} = 0,43$$

De massa van de beginstoffen is gelijk aan de massa van het reactieproduct. Je mag hier in de E-factor ook de theoretische opbrengst van 1,14 kg gebruiken, die is gelijk aan de massa van de beginstoffen.

4



b De verbrandingswarmte is de reactiewarmte van de volledige verbranding van 1 mol butaan.

2 C ₄ H ₁₀	$2 \times -1,26 \cdot 10^5 \text{ J} = -2,52 \cdot 10^5 \text{ J}$
13 O ₂	$13 \times 0 \text{ J} = 0 \text{ J}$
8 CO ₂	$8 \times -3,935 \cdot 10^5 \text{ J} = -31,48 \cdot 10^5 \text{ J}$
10 H ₂ O	$10 \times -2,86 \cdot 10^5 \text{ J} = -28,6 \cdot 10^5 \text{ J}$

De energiebalans van de reactie is:

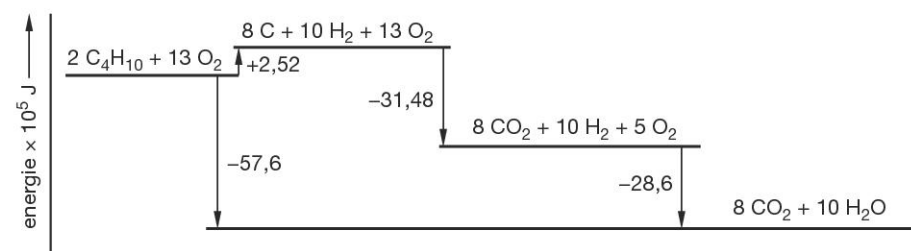
$$\Delta E = \text{vormingswarmte}_{\text{reactieproducten}} - \text{vormingswarmte}_{\text{beginstoffen}}$$

$$\Delta E = -31,48 \cdot 10^5 \text{ J} + (-28,6 \cdot 10^5 \text{ J}) - (-2,52 \cdot 10^5 \text{ J}) = -57,6 \cdot 10^5 \text{ J}$$

De verbrandingswarmte is gegeven in J mol⁻¹. Omdat in de reactievergelijking de coëfficiënt 2 voor butaan staat, moet je de reactiewarmte delen door 2 om de verbrandingswarmte te vinden.

De verbrandingswarmte van butaan is dan $\frac{-57,6 \cdot 10^5 \text{ J}}{2} = -28,8 \cdot 10^5 \text{ J}$.

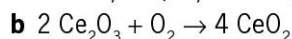
c Zie figuur 15.18.



15.18

5

a $\Delta E = \text{vormingswarmte}_{\text{reactieproducten}} - \text{vormingswarmte}_{\text{beginstoffen}}$
 $\Delta E = 0,5 \times (-1,105 \cdot 10^5) - (-2,42 \cdot 10^5) + (-0,5 \times (-3,935 \cdot 10^5)) = +3,84 \cdot 10^5 \text{ J mol}^{-1}$

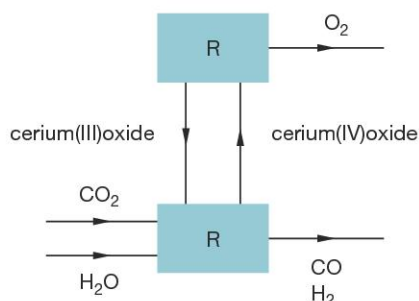


c Uit 2 mol CO₂ ontstaat (in reactie 1) 3 mol O₂.

In reactie 2 wordt 1 mol O₂ gebonden door 2 mol cerium(III)oxide (Ce₂O₃).

Per mol CO₂ is er dus 3 mol cerium(III)oxide (Ce₂O₃) nodig.

d Zie figuur 15.19



15.19

6

a In 50 liter benzine is $50 \cdot 10^{-3} \times 3,3 \cdot 10^{10} = 1,65 \cdot 10^9 \text{ J}$ aan energie aanwezig.

Deze zelfde hoeveelheid energie wordt geleverd door $\frac{1,65 \cdot 10^9}{2 \times 2,42 \cdot 10^5} = 3,409 \cdot 10^3 \text{ mol H}_2$.

Dit komt overeen met $3,409 \cdot 10^3 \times 2,016 \cdot 10^{-3} = 6,9 \text{ kg H}_2$.

- b** Een molecuul N-ethylcarbazool reageert met 6 moleculen H_2 .
De molecuulmassa van N-ethylcarbazool is 195,25 u.
Het gevraagde percentage is dan $\frac{6 \times 2,016}{195,25} \times 100\% = 6,2\%$.
- c** Uit de diagrammen blijkt dat na 400 minuten nog tussenproducten aanwezig zijn. Er is dus (nog) geen volledige omzetting.
- d** Te zien is dat tussenproduct 3 gedurende het experiment de hoogste concentratie van alle tussenproducten heeft. De concentratie van tussenproduct 3 loopt dus hoog op, kennelijk wordt dat product maar langzaam omgezet in tussenproduct 4. Dat betekent dat de reactie waarbij tussenproduct 3 wordt omgezet tot tussenproduct 4 de snelheidsbepalende stap is.

7

- a** Na R2 is het volumepercentage van CO in het gasmengsel lager, dus het evenwicht is naar rechts verschoven. In R2 heerst een lagere temperatuur dan in R1, dus de reactie naar rechts is exotherm.
- b** Door de hoge(re) temperatuur in R1 wordt de reactiesnelheid groter (de insteltijd van het evenwicht korter) en de omzettingssnelheid van CO groter.
- c**
- Koolstofdioxide kan worden afgescheiden van de overige gassen door het gasmengsel af te koelen. Het zal bij een hogere temperatuur condenseren dan de overige gassen.
 - In water opgelost koolstofdioxide gedraagt zich als een zwak zuur. Het CO_2 kan worden afgescheiden van de overige gassen door het gasmengsel door een basische oplossing te leiden. Het opgeloste CO_2 reageert met de oplossing, terwijl de overige gassen niet reageren en ook niet oplossen.
- d** $\Delta E = \text{vormingswarmte}_{\text{reactieproducten}} - \text{vormingswarmte}_{\text{beginstoffen}}$
 $\Delta E = (0,40 \times -3,935 \cdot 10^5) + (-0,459 \cdot 10^5) - (0,40 \times -0,75 \cdot 10^5) - (0,70 \times -2,42 \cdot 10^5) = -0,039 \cdot 10^5 \text{ J mol}^{-1}$
- e** $0,50 \text{ CH}_4 + 0,25 \text{ O}_2 + 0,50 \text{ H}_2\text{O} + 0,50 \text{ N}_2 \rightarrow 0,50 \text{ CO}_2 + 1,0 \text{ NH}_3$
- f** Er ontstaat meer CO_2 voor dezelfde hoeveelheid H_2 wanneer zware stookolie wordt gebruikt. Ook is het energieverbruik bij zware stookolie hoger, dus nafta verdient de voorkeur.

8

- a** Vergelijking: $C_2H_2 + 2,5 \text{ O}_2 \rightarrow 2 \text{ CO}_2 + H_2O$
 Per mol ethyn ontstaat 2 mol CO_2 en 1 mol H_2O .
 Door CO_2 opgenomen: $1,3 \times 2 \times 44,010 = 114,42 \text{ J K}^{-1}$
 Door H_2O opgenomen: $2,8 \times 1 \times 18,015 = 50,442 \text{ J K}^{-1}$
 De temperatuurstijging bedraagt $\frac{-(-1,26 \cdot 10^6)}{114,42 + 50,442} = 7,6 \cdot 10^3 \text{ K}$ (dat is meer dan $7 \cdot 10^3 \text{ K}$).
- b** $C_2H_2 + O_2 \rightarrow 2 \text{ CO} + H_2$
 $\Delta E = 2 \times (-1,105 \cdot 10^5) - (+2,27 \cdot 10^5) = -4,48 \cdot 10^5 \text{ J mol}^{-1}$
- c** Zie figuur 15.20.

