

7 Duurzaamheid

Inhoud

7.1 Fossiele brandstoffen

Experimenten:

7.1 Verbrandingswarmte

7.2 Kraken van paraffine

7.3 Broeikaseffect

7.2 Biobrandstoffen

Experimenten:

7.4 Bio-ethanol uit suikers

7.5 Biodiesel

7.6 Bio-ethanol uit wc-papier

7.3 Duurzame ontwikkelingen

Experiment:

7.7 Kunststof uit aardappelen

7.4 Evenwichten

Experiment:

7.8 Evenwicht N_2O_4 / NO_2

7.5 Evenwichten beïnvloeden

Experiment:

7.9 Verschuiven evenwicht FeCl_3 / FeSCN -reactie

Afsluiting

Overzicht begrippen



Grown
for
Biofuel



Duurzaamheid

Het tijdperk van de fossiele brandstoffen loopt ten einde. Jaknikkers verdwijnen en koolzaadvelden worden aangelegd. Voor de productie van brandstoffen, energie en materialen wordt gezocht naar duurzame grondstoffen en duurzame productieprocessen.

7

Olieplatforms

Steeds meer olievelden raken uitgeput en de resterende olievelden zijn steeds moeilijker bereikbaar. Door de moeilijke bereikbaarheid nemen de kosten toe, waardoor de bouw van olieplatforms zoals hiernaast worden uitgesteld of zelfs geannuleerd.



Je leert

- waarom fossiele brandstoffen nog steeds belangrijk zijn voor de samenleving;
- hoe we uit aardolie allerlei producten maken;
- welke milieuproblemen er gepaard gaan met het gebruik van fossiele brandstoffen.

7.1 Fossiele brandstoffen



7.1 Bij deze 'boerderij' worden algen gekweekt in netten onder water.

Fossiele brandstoffen

De wereld draait op fossiele brandstoffen. Zonder olie geen transport, geen grootschalige landbouw, geen consumptieartikelen. De wereldwijde olievoorraad is aan het afnemen. Binnen afzienbare tijd zal er niet voldoende aardolie meer zijn om te voldoen aan de nog steeds stijgende vraag naar energie en grondstoffen, waardoor nieuwe olieplatforms zoals hierboven geen oplossing meer bieden. Er wordt dan ook veel onderzoek gedaan naar geschikte alternatieve brandstoffen, zoals olie uit algen (figuur 7.1). Maar aardolie levert ook de grondstoffen voor de productie van bijvoorbeeld kunststoffen en medicijnen en ook daar moeten alternatieven voor worden gevonden.

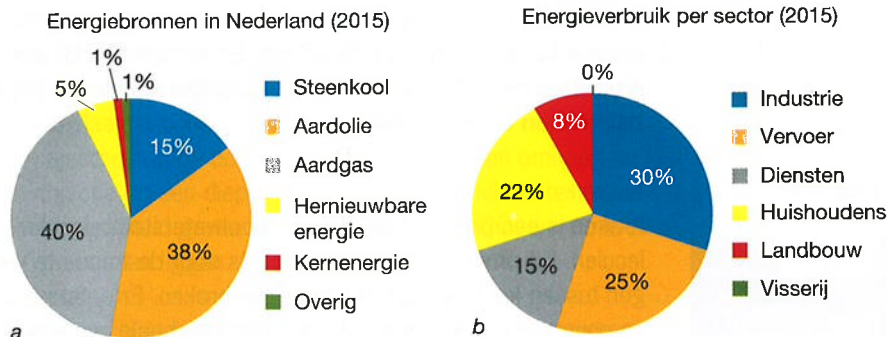
In figuur 7.2 zie je welke energiebronnen in Nederland worden gebruikt en waarvoor we die energie gebruiken. Je ziet dat de fossiele brandstoffen **steenkool**, **aardgas** en **aardolie** nog voor het grootste deel van onze energie zorgen. Steenkool bestaat voornamelijk uit koolstof, vaak verontreinigd met zwavel. Aardgas bestaat voornamelijk uit methaan. Aardolie bestaat uit tienduizenden verschillende stoffen, voornamelijk koolwaterstoffen en aromatische verbindingen, vaak met zwavelverbindingen.

Fossiele brandstoffen worden vooral gebruikt voor warmteproductie en het opwekken van elektriciteit. De **verbrandingswarmte** geeft aan hoeveel warmte er vrijkomt bij de verbranding van een brandstof. De verbrandingswarmte druk je uit in de hoeveelheid warmte in (kilo)joule die vrijkomt bij de verbranding van één kilogram of één kubieke meter brandstof, bij een bepaalde druk en temperatuur. In Binas tabel 28B vind je de verbrandingswarmtes van veelvoorkomende brandstoffen.

● Experiment 7.1

7.2 Energiebronnen (a) en energieverbruik per sector (b) in Nederland

Bron: CBS



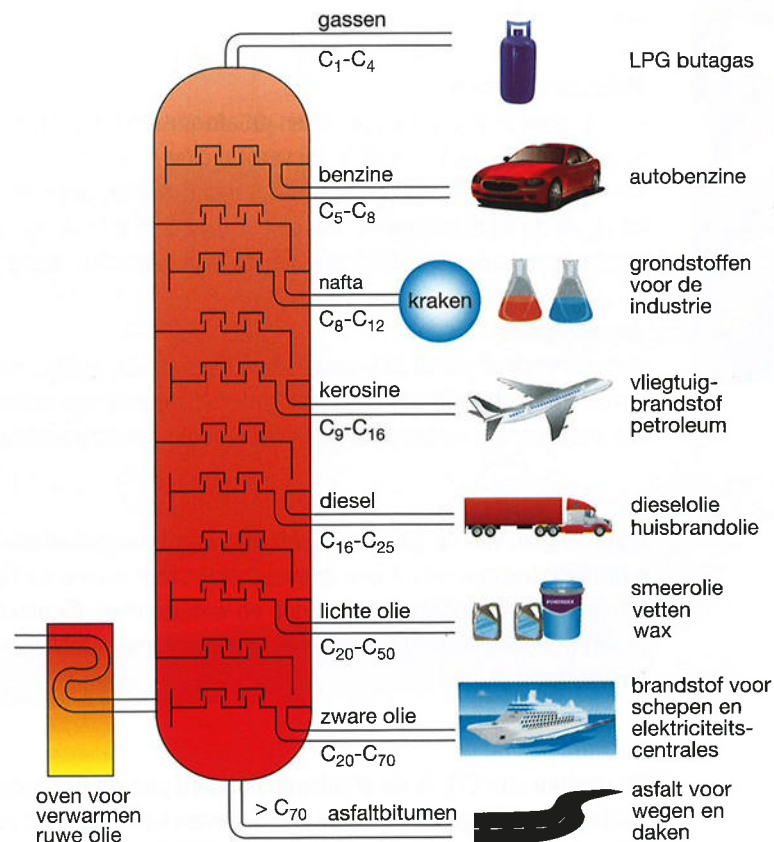
Aardolieverwerking

Aardolie is niet alleen een brandstof, maar levert ook grondstoffen voor de chemische industrie. Aardolie is een mengsel van duizenden verschillende koolwaterstoffen. Om de stoffen in aardolie te kunnen verwerken tot producten, moeten deze eerst worden gescheiden. Door het grote aantal stoffen is het niet mogelijk aardolie te scheiden in zuivere stoffen, in plaats daarvan wordt aardolie gescheiden in **fracties**. Een fractie is een mengsel van stoffen met een kookpunt binnen bepaalde grenzen.

De aardolie wordt eerst verwarmd en dan een destillatiekolom ingeleid. Aangezien elke fractie haar eigen kooktraject heeft, condenseran de fracties op verschillende hoogtes in de kolom. Fracties die bestaan uit stoffen met grote moleculen hebben een kooktraject met hogere temperaturen en condenseran lager in de kolom dan fracties van stoffen die uit kleine moleculen bestaan. Dit proces heet **gefractioneerde destillatie** (figuur 7.3).



7.4 Destillatiekolom in Pernis



7.3 Destillatiekolom voor aardolie

De naftafractie bestaat uit een mengsel van koolwaterstoffen waarvan het aantal koolstofatomen tussen de acht en twaalf ligt. Uit de naftafractie worden verreweg de meeste producten gesynthetiseerd. Twee belangrijke stappen in het bewerkingsproces van nafta zijn **kraken** en **reformen**.

● Experiment 7.2



a

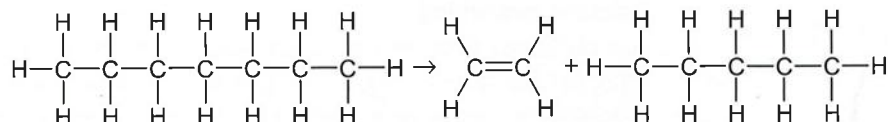


b

7.5a en b Nafta is een grondstof voor bijvoorbeeld lego en een groot aantal medicijnen.

Kraken

Kraken is een proces waarbij grote koolwaterstofmoleculen worden ontleed in kleinere moleculen. Dit proces vindt meestal plaats door de fractie te verhitten, waardoor atoombindingen tussen koolstofatomen worden verbroken. Er ontstaat dan een mengsel van verzadigde en onverzadigde koolwaterstoffen. Een voorbeeld van een kraakreactie is:



In deze reactie wordt heptaan gekraakt tot etheen, C_2H_4 , en pentaan, C_5H_{12} . Omdat de C–C-bindingen op verschillende plekken worden verbroken, ontstaan er ook andere verbindingen, zoals propaan, butaan of pent-1-een. Bij kraken ontstaat dus altijd een mengsel van stoffen, waarvan de moleculen zowel enkele als dubbele bindingen bevatten.

Reformen

Bij een ander proces wordt de nafta onder hoge temperatuur en druk zodanig bewerkt dat onvertakte alkanen en cycloalkanen worden omgezet in onder andere vertakte alkanen en aromaten. Die worden dan als grondstof gebruikt voor bijvoorbeeld kunststoffen en medicijnen (figuur 7.5).

Milieu problemen

Alle fossiele brandstoffen bevatten de atoomsoorten C en H en vaak zijn ze ook nog verontreinigd met de atoomsoort S. Bij verbranding in motoren en elektriciteitscentrales ontstaan dan de oxiden CO_2 , H_2O en SO_2 . De temperatuur bij deze verbrandingen is zo hoog dat N_2 en O_2 uit de lucht eveneens met elkaar reageren en stikstofoxiden vormen. Elk van deze oxiden levert zijn eigen bijdrage aan de milieuverontreiniging.

Zwavel dioxide

In de atmosfeer wordt SO_2 omgezet in zwavelzuur, H_2SO_4 , met als gevolg **zure regen**. Het probleem is grotendeels opgelost door het gebruik van ontzwavelde brandstoffen of door het zuiveren van verbrandingsgassen in rookgasontzwavelingsinstallaties.

Stikstofoxiden

Een mengsel van de gassen NO en NO_2 wordt aangeduid als NO_x en omdat deze gassen giftig zijn, hebben auto's een driewegkatalysator waarin de NO_x in het uitlaatgas wordt omgezet in stikstof, koolstofdioxide en water(damp). Bij elektriciteitscentrales wordt het grootste deel van de stikstofoxiden in zogenaamde DeNO_x-installaties omgezet in stikstof en water.

Koolstofdioxide

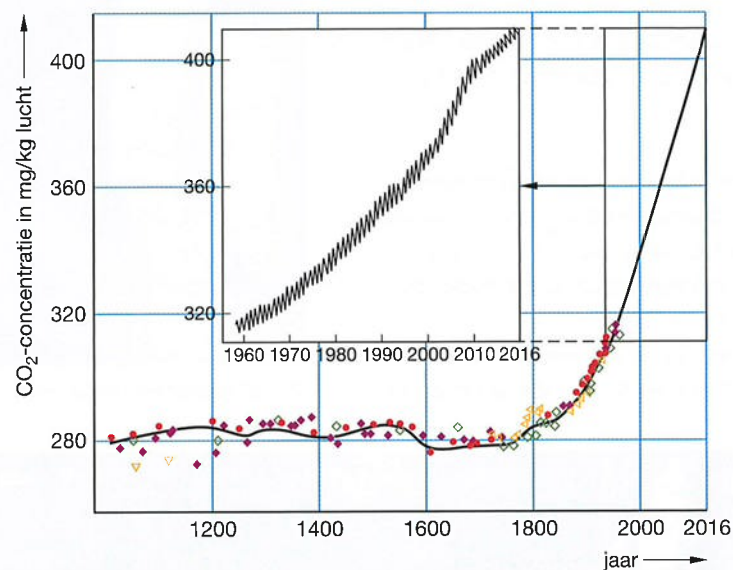
De uitstoot van CO_2 is de afgelopen honderd jaar enorm toegenomen, zie figuur 7.6. De punten in het diagram van vóór 1958 komen van metingen aan luchtballonnen in ijs uit verschillende boommonsters in Antarctica. Vanaf 1958 zijn het directe metingen op Mauna Loa, Hawaii. Het gas CO_2 draagt voor 70% bij aan het versterkte broeikaseffect en daarmee aan de opwarming van de aarde (figuur 7.7).

● Experiment 7.3

Er worden daarom veel maatregelen genomen om de uitstoot ervan te verminderen. Dat kan door energiebesparing, door het ontwikkelen van nieuwe brandstoffen, maar ook door CO_2 op te slaan. Daar zijn diverse mogelijkheden voor, zoals:

- 1 Opslaan in oude gas- en olievelden.
- 2 Injecteren in de oceaan. Het CO_2 borrelt dan omhoog en lost op in het zeewater. Bij injectie op een diepte van meer dan drie kilometer wordt het CO_2 zo samengeperst dat de dichtheid groter wordt dan water. Het CO_2 wordt vloeibaar en blijft op de bodem van de oceaan liggen.

Een duurzamere oplossing is het onderzoeken van productieprocessen die CO_2 als grondstof gebruiken voor de productie van bijvoorbeeld bouwmaterialen en kunststoffen.



7.6 Het verloop van de CO_2 -concentratie in de atmosfeer



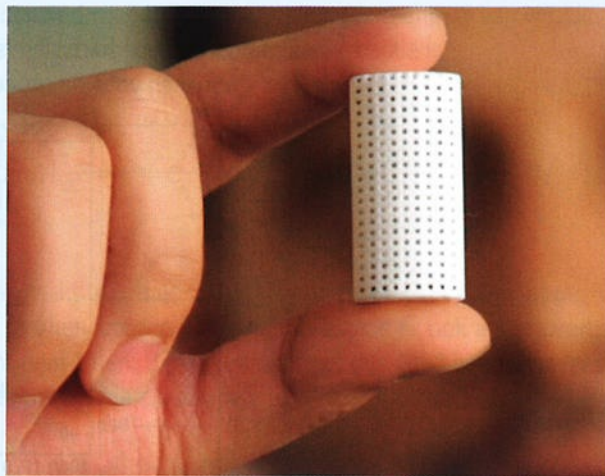
7.7 Koudbloedige dieren zoals hagedissen zullen al snel uitsterven door oververhitting bij een toenemend broeikaseffect.

'Co2ncrete'

Onderzoekers van de universiteit van Californië hebben een nuttige toepassing gevonden voor het overschot aan koolstofdioxide in de atmosfeer, namelijk als printmateriaal voor 3D-printers. Uiteraard kunnen ze het CO₂ niet als gasvormig materiaal gebruiken. In plaats daarvan hebben ze een techniek ontwikkeld om het CO₂ onder druk met onder andere calciumcarbonaat en calciumhydroxide om te zetten in een stof met een structuur die lijkt op beton, of *concrete*, in het Engels. Het materiaal heeft dan ook de toepasselijke naam 'Co2ncrete' gekregen (figuur 7.8).

De hoop van de onderzoekers is dat het materiaal een vervanger wordt voor traditioneel beton. Het Co2ncrete zorgt ook voor een vermindering van de CO₂-uitstoot, want bij de productie van traditioneel beton komt veel CO₂ vrij. Het duurzaamheidsaspect is hiermee tweeledig: niet alleen krijgt het CO₂ in de atmosfeer een nuttige bestemming, ook wordt er voorkomen dat er extra CO₂

in de atmosfeer terecht komt. Wie weet zijn al onze wegen in de toekomst gemaakt van 3D-geprint koolstofdioxide (figuur 7.9).



7.8 3D-geprint koolstofdioxide



7.9 Zijn in de toekomst alle wegen gemaakt van 3D-geprint CO₂?

● Opdracht C6

Samenvatting

- Fossiele brandstoffen zijn nog steeds de grootste bron van energie in Nederland.
- Fossiele brandstoffen hebben een hoge verbrandingswarmte. Dat wil zeggen dat er veel warmte vrijkomt bij de verbranding van 1 kg of 1 m³ brandstof.
- Omdat aardolie een mengsel is van duizenden stoffen, wordt de olie eerst gescheiden in mengsels met minder stoffen, die je fracties noemt. Dit scheidingsproces heet gefractioneerde destillatie.
- De naftafractie wordt verder bewerkt door kraken en reformen tot de gewenste koolwaterstoffen ontstaan.
- Bij de verbranding van fossiele brandstoffen ontstaan CO₂, SO₂ en NO_x. Koolstofdioxide levert een grote bijdrage aan het broeikaseffect. Vermindering daarvan kan door opslag of energiebesparing. SO₂ wordt verwijderd met rookgasontzwavelingsinstallaties en NO_x met driefwegkatalysatoren en DeNOx-installaties.

Opdrachten

A 1

- a Uit welke soort stof(fen) bestaat aardgas?
- b Geef aan wat wordt verstaan onder de verbrandingswarmte van aardgas.

A 2 

- a Hoe heet de destillatie van aardolie?
- b Vindt hier een chemische reactie plaats?
- c Leg uit of het kraken van nafta een chemische reactie is.
- d Wat is het verschil tussen het reformen en het kraken van nafta?

A 3

Noem drie maatregelen waardoor er veel minder aardolie en aardgas wordt gebruikt.

B 4

Bij kraken treedt de volgende reactie op:

decaan $\rightarrow$ hept-1-een + propaan

- a Geef de reactievergelijking in molecuulformules.
- b Geef de reactievergelijking in structuurformules.

In bovenstaande reactie is de koolstofketen van decaan op een bepaalde plaats verbroken.

- c Laat de koolstofketen op een andere plaats breken. Geef de reactievergelijking weer in molecuulformules en in structuurformules.

B 5

De meeste auto's gebruiken nog benzine of diesel als brandstof, maar er zijn veel discussies in de media over een duurzamere vorm van transport. Elektrische auto's bijvoorbeeld of bussen op aardgas.

- a Geef de reactievergelijking voor de volledige verbranding van benzine en gebruik daarbij als formule van benzine C_8H_{18} .
- b Leg uit of de verbranding van benzine een exotherm of een endotherm proces is.
- c Teken een energiediagram voor de verbranding van benzine.

De dichtheid van benzine is $0,72 \text{ kg L}^{-1}$ en het zuurstofgehalte van lucht is 21 volume-% bij $T = 293 \text{ K}$ en $p = p_0$.

- d Bereken hoeveel dm^3 lucht nodig is voor het verbranden van 1,00 liter benzine.

- e Bereken hoeveel $\text{dm}^3 \text{ CO}_2$ bij deze verbranding vrijkomt.

C 6

Lees de tekst in het kader 'Co2ncrete' en beantwoord de volgende vragen. Koolstofdioxide heeft bij standaarddruk en 273 K een dichtheid van $1,986 \text{ kg m}^{-3}$. Het type beton dat wordt gebruikt voor de aanleg van wegen heeft een dichtheid van 2400 kg m^{-3} en een dikte van 23 cm .

- a Bereken hoeveel m^3 koolstofdioxide nodig is voor de aanleg van een strook Co2ncrete-wegdek van $1,0 \times 1,0 \text{ m}$. Neem aan dat Co2ncrete dezelfde dichtheid heeft als traditioneel beton en dat het alleen uit CO_2 is gevormd.

De massa van de atmosfeer is naar schatting $5,15 \cdot 10^{18} \text{ kg}$.

- b Bereken hoeveel m^3 Co2ncrete kan worden geproduceerd als het gehalte CO_2 in de atmosfeer wordt teruggebracht van 400 naar 280 ppm. $1 \text{ ppm} = 1 \text{ mg CO}_2$ per kg lucht.
- c Bereken hoeveel km wegdek je hiermee aan kunt leggen van $1,0 \text{ m}$ breed en 23 cm dik.

C 7

De verbrandingswarmte van Gronings aardgas bedraagt $3,2 \cdot 10^7 \text{ J m}^{-3}$. Die van benzine is $3,3 \cdot 10^{10} \text{ J m}^{-3}$.

($T = 273 \text{ K}$; $p = p_0$)

- a Waarom is de verbrandingswarmte van benzine bijna duizend keer zo groot als die van aardgas?
- b Bereken de verbrandingswarmte van aardgas in kJ per mol.
- c De verbrandingswarmte van methaan is 890 kJ per mol . Hoe valt dit te rijmen met je antwoord bij b?

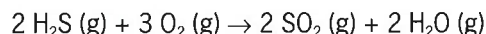
C 8 

Fossiele brandstoffen kun je vóór de verbranding ontzwavelen door een reactie met waterstof. Daarbij ontstaat een gasstroom met daarin het giftige gas waterstofsulfide (H_2S). Dit gas kun je verwijderen met het zogenoemde clausproces, maar alleen als de gasstroom meer dan 20 volume-% H_2S bevat. In afvalgasen van raffinaderijen is het gehalte H_2S lager dan 20%. Om de concentratie te verhogen, leidt men de H_2S -houdende gasstroom door een organisch oplosmiddel. H_2S lost hierin op, de andere gasen niet.

- a Hoe heet deze scheidingsmethode?

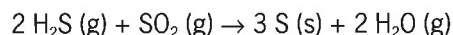
Daarna wordt stoom door de oplossing geblazen, waarbij een gasmengsel ontstaat dat meer dan 20 volume-% H_2S bevat. Dit gasmengsel is geschikt voor het clausproces. Bij de eerste stap in dit proces wordt een deel van het H_2S verbrand.

Stap 1:



Het SO_2 reageert daarna met de rest van het H_2S .

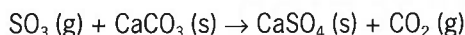
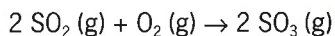
Stap 2:



In stap 1 reageert een deel van het H_2S met zuurstof. De hoeveelheid zuurstof die in stap 1 wordt toegevoegd, wordt zo gekozen dat precies die hoeveelheid SO_2 ontstaat die nodig is om in stap 2 met de rest van het H_2S te reageren. Zo blijft er na stap 2 geen H_2S en geen SO_2 over. Het overgebleven gasmengsel kun je uitstoten (figuur 7.10).

- b** Bereken hoeveel mol O_2 nodig is om 1,0 mol H_2S volledig om te zetten in S en H_2O .

Een andere methode is om na verbranding van de brandstof de afvalgasen te reinigen van SO_2 . Dit is het kalksteengips-procedé en hierbij treden de volgende reacties op:



Zo kan 90% van de SO_2 uit de rookgassen worden verwijderd. Neem aan dat in Nederland per jaar $5,0 \cdot 10^5$ ton SO_2 in de atmosfeer wordt geloosd.

- c** Bereken hoeveel ton CaCO_3 (kalk) jaarlijks nodig is om 90% van de SO_2 -uitstoot onschadelijk te maken.

Naar: CE havo 2001-I

Experimenten

7.1 Verbrandingswarmte

Je meet de verbrandingswarmte van aardgas.

7.2 Kraken van paraffine

In dit demonstratie-experiment onderzoek je het kraken van paraffineolie en toon je het ontstaan van alkenen aan.

7.3 Broeikaseffect

Je bouwt een opstelling waarmee je de temperatuurstijging van lucht ten gevolge van de uitstoot van koolstofdioxide kunt meten.

- Volledige instructie Chemie Overal online



7.10 Een rookgasontzwavelingsinstallatie

Je kunt nu

- het belang uitleggen van fossiele brandstoffen voor de energievoorziening;
- berekeningen uitvoeren met verbrandingswarmte;
- uitleggen hoe aardolie wordt gescheiden in verschillende fracties en toelichten hoe de naftafractie verder wordt bewerkt;
- benoemen wat de milieuproblemen zijn bij het gebruik van fossiele brandstoffen.

Rijden op bloemen

Een brandstof uit de resten van bloemen is de droom van elke milieuwetenschapper. Een veld vol bloemen is snel gezaaid en geoogst en draagt niet bij aan het broeikaseffect. Helaas is het nog niet zo gemakkelijk om plantenresten efficiënt om te zetten in een brandstof.



Je leert

- welke voordelen biobrandstoffen hebben ten opzichte van fossiele brandstoffen;
- welke soorten biobrandstoffen er zijn.

7.2 Biobrandstoffen



a



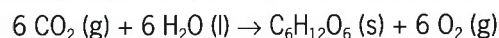
b

7.11 Houtsnippers (a) en koolzaad (b) zijn voorbeelden van biomassa.

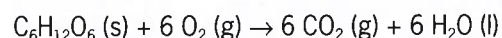
Duurzame alternatieven

Het afnemen van de hoeveelheid beschikbare fossiele brandstoffen en het versterkte broeikaseffect zijn redenen om over te stappen op meer duurzame alternatieven. Als mogelijk alternatief zijn **biobrandstoffen** in opkomst. Dit zijn brandstoffen die worden gemaakt uit **biomassa**, materiaal van organische oorsprong (figuur 7.11). Deze brandstoffen zorgen niet voor een toename van koolstofdioxide in de atmosfeer en biomassa is eenvoudig steeds opnieuw te produceren.

Groene planten en bomen kunnen door **fotosynthese** uit koolstofdioxide en water glucose maken. Het koolstofdioxide uit de lucht fungeert als koolstofbron:



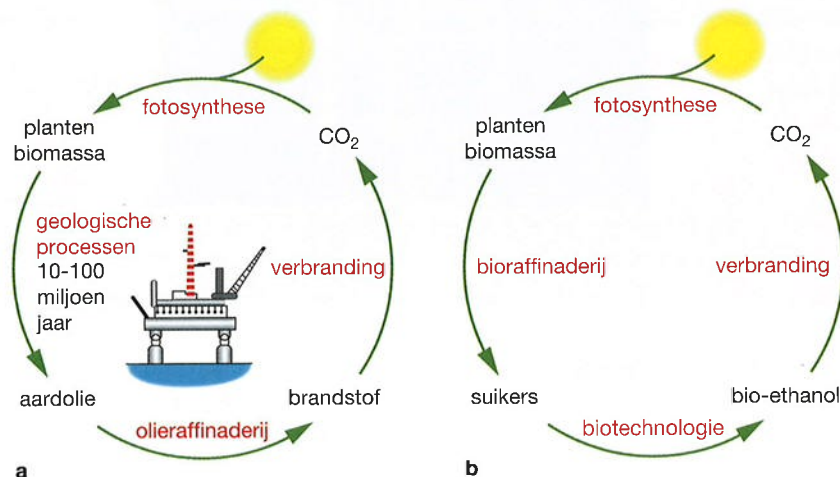
Dit is een endotherme reactie en de zon levert de benodigde energie. De glucose wordt daarna in de plant weer omgezet in andere koolstofverbindingen, zoals cellulose en zetmeel. De koolstof uit koolstofdioxide is dus in deze stoffen opgeslagen. Ook de zonne-energie is in deze stoffen opgeslagen in de vorm van chemische energie. Als de biomassa wordt verbrand, komen koolstof én energie weer vrij.



De energie gebruiken we en koolstof komt weer als CO_2 vrij in de atmosfeer. Daarmee is de **koolstofkringloop** gesloten. De koolstofkringloop is een voorbeeld van een **elementenkringloop**. Je kijkt in deze kringloop naar wat er gebeurt met het element koolstof.

In fossiele brandstoffen zijn C-atomen opgeslagen die in miljoenen jaren door fotosynthese aan de atmosfeer zijn onttrokken. Bij de grootschalige verbranding van de fossiele brandstoffen komen die C-atomen in relatief korte tijd als koolstofdioxide weer terug in de atmosfeer, waardoor de CO₂-concentratie in de atmosfeer stijgt.

De CO₂ die bij de verbranding van biomassa vrijkomt, is gelijk aan de hoeveelheid CO₂ die oorspronkelijk door de plant was opgenomen. Biobrandstoffen die uit biomassa worden geproduceerd zijn daarmee **CO₂-neutraal** (figuur 7.12).

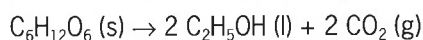


7.12 Een koolstofkringloop, niet CO₂-neutraal (a) en wel CO₂-neutraal (b)

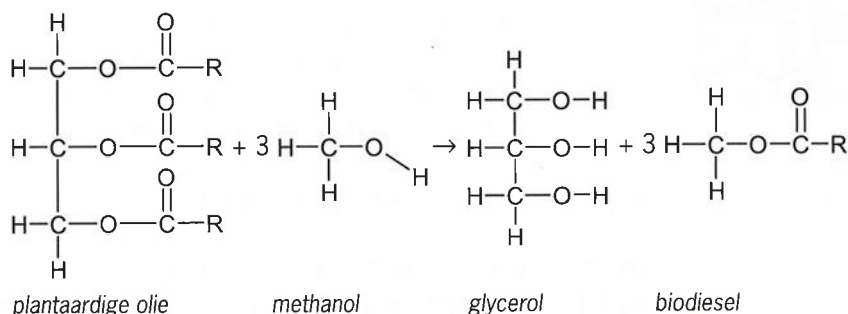
Eerste generatie biobrandstoffen

Bij biobrandstoffen onderscheid je drie generaties. Bij de eerste generatie biobrandstoffen worden voor de productie van **bio-ethanol** voedselgewassen gebruikt, zoals maïs, suikerbiet, suikerriet, tarwe of gerst. Autobenzine wordt gemengd met bio-ethanol om het rijden milieuvriendelijker te maken. In Nederland mag dat maximaal 15% zijn, omdat er tot dit gehalte bio-ethanol geen aanpassingen nodig zijn aan verbrandingsmotoren. In Brazilië rijden auto's al op 100% bio-ethanol.

Via vergisting wordt bio-ethanol uit suikers gemaakt volgens de reactie:



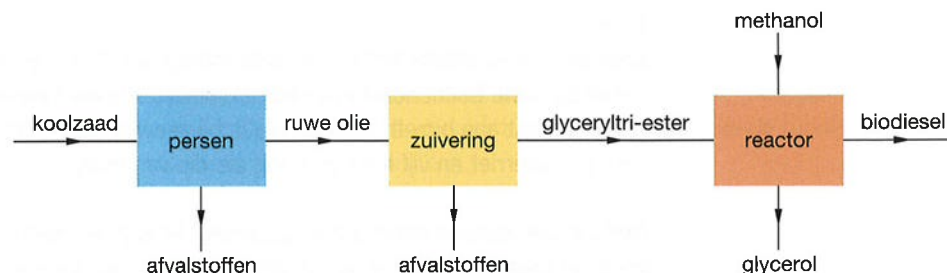
Biodiesel wordt in Europa vooral gemaakt uit koolzaad. Het productieproces verloopt in een aantal stappen. Eerst wordt de olie uit het zaad geperst en gezuiverd. Het omzetten van de gezuiverde olie in biodiesel heet **omestering**. Koolzaadolie bestaat uit glyceryltri-esters (triglyceriden). Bij omestering worden die door toevoeging van methanol en een katalysator omgezet in biodiesel (hoofdproduct) en glycerol (bijproduct). De reactievergelijking van deze omestering zie je in figuur 7.13.



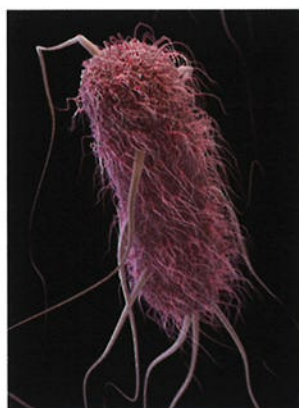
7.13 De reactievergelijking van de omestering van triglyceriden in structuurformules

- Experiment 7.4
- Experiment 7.5
- Experiment 7.6

Het productieproces van biodiesel kun je weergeven in een **blokschema**, zie figuur 7.14. Hierin stellen de pijlen de stoffstromen voor, de buizen waar in een fabriek de grondstoffen doorheen stromen. In de blokken gebeurt er iets met de stoffen, dit zijn de reactoren. Door een blokschema op te stellen kun je in één overzicht zien hoe het productieproces verloopt en welke stoffen erbij betrokken zijn.



7.14 Het blokschema van de productie van biodiesel



7.15 Een met de computer gemaakte afbeelding van de *Escherichia coli*-bacterie

Tweede generatie biobrandstoffen

Voor de eerste generatie biobrandstoffen waren voedselgewassen nodig. Dat veroorzaakte prijsstijgingen van voedsel en leidde tot veel protesten. Voor de tweede generatie biobrandstoffen worden geen voedselgewassen meer gebruikt, maar bijvoorbeeld houtsnippers, stro, maïsstengels, gebruikt frituurvet en ander bioafval. Ook worden er op velden die niet als landbouwgrond geschikt zijn gewassen gekweekt voor de productie van biobrandstoffen, zoals wilgen of olifantsgras.

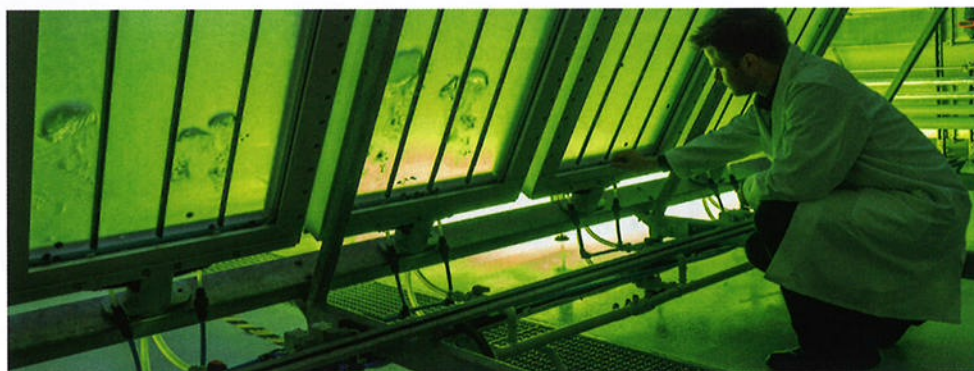
Uit het bioafval kan door vergisting **biogas**, methaan, worden gevormd. Ook kan er ethanol worden gemaakt uit cellulose die is verkregen uit bijvoorbeeld stro. Een probleem van het gebruik van bioafval ten opzichte van voedselgewassen is dat de cellulose in plantenresten niet eenvoudig is af te breken tot bruikbare suikers. Voor oplossingen zoekt men vooral naar bacteriën zoals de *Escherichia coli*-bacterie (figuur 7.15), die met genetische technieken aangepast wordt zodat ze snel en efficiënt cellulose afbreekt.

Derde generatie biobrandstoffen

De derde generatie biobrandstoffen maakt gebruik van organisch materiaal dat geen landbouwafval is. Twee voorbeelden zijn biobrandstof uit algen en uit zeewier.

Algen

Algen groeien in water door zonlicht en mest. De algen worden geoogst, gecentrifugeerd en gedroogd tot een dikke pasta of poeder. De oliën daaruit leveren dan de biobrandstof. Het proces is CO₂-neutraal, want algen gebruiken CO₂ uit de lucht voor hun groei. Een voordeel van algen is ook dat ze in grote bakken industrieel te kweken zijn, zie figuur 7.16.



7.16 Een bioreactor voor algen op de Ludwig Bölkow campus in München

De ideale alg maakt zelf de basisoliën voor biodiesel, gaat efficiënt om met zonlicht, heeft een goede weerstand tegen ziektes en levert voldoende biodiesel. Deze ideale alg is nog niet gevonden. Bij algendiesel zijn de belangrijkste obstakels de hoge kosten bij het scheiden van algen en olie, de lage opbrengst, de dosering van zonlicht en voedingsstoffen en de waterverspilling.

Zeewier

Zeewier is een andere bron voor biobrandstoffen. Ook hierbij kan een genetisch gemanipuleerde bacterie *Escherichia coli* zeewiersuikers afbreken en er direct bio-ethanol van maken. De opbrengst aan bio-ethanol per kilo is bij zeewier naar schatting twee keer zo hoog als die van suikerriet en vijf keer zo hoog als die van maïs.

Werken met zeewier heeft grote voordelen. Er is geen landbouwgrond of kunstmest nodig, geen zoetwaterbronnen en er zijn geen nadelige gevolgen voor de voedselvoorraden. Als het lukt om de productie op te schalen, kan zeewier een grote bijdrage leveren aan de groeiende vraag naar duurzame brandstoffen. Het planten en onderhouden van zeewier voor biobrandstofproductie is nu nog arbeidsintensief werk, wat hoge kosten tot gevolg heeft (figuur 7.17).



7.17 Een zeewierplantage in het vissersdorpje Uroa in Zanzibar

Samenvatting

- De koolstofkringloop is een voorbeeld van een elementenkringloop, daarin zijn alle verbindingen en processen weergegeven waarin een bepaald element in de kringloop voorkomt.
- Een koolstofkringloop is CO₂-neutraal als alle vrijgekomen koolstofdioxide binnen afzienbare tijd weer wordt opgenomen door planten en bomen.
- Biomassa is materiaal van organische oorsprong waaruit verschillende biobrandstoffen worden geproduceerd, zoals bio-ethanol en biodiesel.
- Bij biobrandstoffen kun je drie generaties onderscheiden: de eerste generatie wordt gemaakt uit voedselgewassen, de tweede generatie uit niet-voedselgewassen en de derde generatie maakt geen gebruik van landbouwafval.
- Productieprocessen kun je weergeven in een blokschema waarbij de blokken staan voor reactoren en de pijlen voor stofstromen.

Jatropha, een wonderstruik?

De Jatrophastruik of *jatropha curcas* is een onkruid dat extreme droogte kan overleven en waaraan de purgeernoot groeit (figuur 7.18). Tot het einde van de twintigste eeuw werd de olie uit de noten alleen gebruikt voor het branden van fakkels en als ingrediënt in geneeskrachtige middelen. Aan het einde van de twintigste eeuw ontdekten Indonesische onderzoekers samen met Nederlandse ingenieurs dat ze de olie uit jatrophanoten eenvoudig konden omzetten in biodiesel.

Jatropha werd een hype. Niet alleen zou de armoede in Azië bestreden worden doordat de jatrophastruik naast voedselgewassen geplant kon worden en zo veel winst kon genereren voor de boeren, ook zou de olie als biodiesel een bijdrage leveren aan het klimaatprobleem. Naar de haalbaarheid en succesvoorwaarden voor dit project werd geen onderzoek gedaan, maar door de vele positieve aandacht van de media raakten veel investeerders geïnteresseerd. De olieproducent D1-oils bracht jatropha naar de beurs, wat een investering van 72 miljoen Britse pond opleverde.

Binnen een tijdsbestek van zeven jaar bleek de productie van biodiesel uit jatrophanoten een flop te zijn. De vele miljoenen die waren geïnvesteerd bleken niet naar de daadwerkelijke teelt van Jatropha te gaan of naar het opzetten van een markt keten tussen de jatrophaboeren en bijvoorbeeld de energiecentrales die de biodiesel wilden gebruiken.

De boeren haakten dan ook al snel af toen bleek dat ze de noten niet verkocht kregen. Daarnaast gingen alle optimistische scenario's ervan uit dat jatropha alleen werd geplant op landbouwgrond die ongeschikt is voor andere gewassen, zoals de randen van een akker. In de praktijk werden andere gewassen echter verdrongen door de jatrophastruik.

Het falen van de jatrophanoot als bron van biodiesel ligt uiteindelijk niet eens bij de noot zelf, maar eerder bij een gebrekkig beleid van overheden en subsidiegevers en overspannen verwachtingen.



7.18 De jatrophanoten, een misgelopen bron van biodiesel

Opdrachten

A 9

Geef aan wat de koolstofkringloop is en gebruik daarbij het begrip fotosynthese.

A 10

- a Geef aan waarom het gebruik van aardolie en steenkool als brandstof niet CO_2 -neutraal is.
- b Geef aan waarom het gebruik van brandstoffen uit biomassa wel CO_2 -neutraal is.

A 11

- a Geef de reactievergelijking in molecuulformules van de vorming van biodiesel uit plantaardige olie.
- b Geef aan wat het verschil is tussen eerste en tweede generatie biobrandstoffen.
- c Wat versta je onder derde generatie biobrandstoffen?

Productie van biobrandstof uit algen en zeewieren wordt nog niet op grote schaal toegepast.

- d Noem drie factoren die ervoor zorgen dat opschaling nog niet mogelijk is.

B 12

De stikstofkringloop is belangrijk voor het leven op aarde omdat planten stikstof nodig hebben voor de vorming van eiwitten. Bacteriën in de grond zetten stikstof uit de lucht om in ammoniumionen. Andere bacteriën maken daar eerst nitrietionen van en daarna nitraationen. De planten halen die stikstof uit de nitraten in de bodem. Uiteindelijk worden de nitraten weer omgezet in stikstof.

- a Teken de stikstofkringloop die hier staat beschreven.

Rond 1995 is er een nieuwe groep van bacteriën ontdekt, de Anammox-bacteriën, die zelf in één stap de ammoniumionen en nitrietionen in de bodem omzetten in stikstof en water.

- b Geef de reactievergelijking van de reactie tussen ammoniumionen en nitrietionen.
- c Geef in je tekening bij a aan hoe de stikstofkringloop eruitziet als er Anammox-bacteriën aanwezig zijn.

Naar: CE vwo 2008-I

B 13

Bij de productie van bio-ethanol uit houtafval zetten bacteriën de cellulose in het hout om in suikers. De suikers worden daarna door vergisting omgezet in bio-ethanol en koolstofdioxide.

Geef dit proces in een blokschema weer en geef daarbij ook de stofstromen aan.

B 14 

In de tuinbouw bevordert extra CO_2 de plantengroei. Daarom wordt een deel van de koolstofdioxide die ontstaat bij industriële processen in Pernis naar de kassen in het Westland gevoerd.

- a Leg uit waarom CO_2 de plantengroei bevordert.
- b Leg uit of je denkt dat dit gebruik van CO_2 een bijdrage levert aan het verminderen van de CO_2 -uitstoot.

B 15

In suikerriet en suikerbieten zijn suikers aanwezig. Suikers zijn opgebouwd uit glucose-eenheden ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$). Met behulp van gist kunnen suikers worden omgezet in ethanol ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) en koolstofdioxide. Het zo gevormde ethanol wordt bio-ethanol genoemd.

- a Geef de reactievergelijking voor de vergisting van glucose.
- b Geef de reactievergelijking voor de volledige verbranding van bio-ethanol.

C 16

Gebruik bij deze opgave het blokschema uit figuur 7.14. Een bedrijf krijgt 150 ton koolzaad aangeleverd voor de productie van biodiesel.

Stap 1: koolzaad bevat 42 massa-% olie.

- a Bereken hoeveel ton ruwe olie het koolzaad oplevert.

Stap 2: bij de zuivering van de ruwe olie blijft 85 massa-% zuivere olie over.

- b Bereken hoeveel ton zuivere glyceryltri-ester er overblijft.

Stap 3: de glyceryltri-ester reageert via omestering tot biodiesel. Gebruik de reactievergelijking voor de vorming van biodiesel. De molecuulformule van de glyceryltri-ester is $\text{C}_{57}\text{H}_{104}\text{O}_6$.

- c Bereken hoeveel mol biodiesel er ontstaat.

De molecuulformule van biodiesel is $\text{C}_{19}\text{H}_{36}\text{O}_2$ en de dichtheid van biodiesel is $0,875 \text{ kg L}^{-1}$.

- d Bereken hoeveel liter biodiesel er uit 150 ton koolzaad-olie is gemaakt.

C 17  **Groene diesel**

Bij ECN (Energieonderzoek Centrum Nederland) in Petten maakt men dieselolie uit snippers wilgenhout. ECN noemt

dit groene diesel. Wilgenhout bestaat uit zeer lange ketens C-atomen.

Een mengsel van koolwaterstoffen met een ketenlengte tussen zeven en negentien C-atomen is geschikt als diesel-brandstof. Bij de verwerking van het wilgenhout worden de zeer lange C-ketens eerst iets kleiner gemaakt.

Zo ontstaat bijvoorbeeld het alkaanmolecuul $C_{51}H_{104}$.

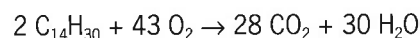
Daarna worden deze alkaanmoleculen gekraakt. Bij een kraakreactie kunnen dan uit één molecuul $C_{51}H_{104}$ drie moleculen ontstaan met elk zeventien koolstofatomen.

a Geef de reactievergelijking van deze kraakreactie.

De vader van Pieter heeft een auto waarmee hij 30 000 km per jaar rijdt. De auto gebruikt 1,0 liter groene diesel per 20 km. Een agrarisch bedrijf produceert daarvoor 11 ton wilgenhout per jaar per hectare. Uit 1,0 ton wilgenhout kan 150 liter groene diesel worden gemaakt.

b Bereken het aantal hectare dat nodig is om de auto een jaar van groene diesel te voorzien.

De reactievergelijking van de volledige verbranding van groene diesel is hieronder weergegeven, waarbij $C_{14}H_{30}$ de 'gemiddelde molecuulformule' van groene diesel is.



c Bereken hoeveel kg koolstofdioxide ontstaat bij de volledige verbranding van 150 liter groene diesel met een dichtheid van $0,79 \text{ kg L}^{-1}$.

Bij verbranding komt er bij groene diesel ongeveer evenveel koolstofdioxide vrij als bij gewone diesel.

d Leg uit waarom je het gebruik van groene diesel toch CO_2 -neutraal mag noemen.

Naar: CE havo 2005-II

C 18

Lees de tekst in het kader 'Jatropha, een wonderstruik?' en beantwoord volgende vragen. Alleen een geschikte grondstof vinden is blijkbaar niet genoeg om succesvol een biobrandstof op de markt te brengen.

a Noem drie voorwaarden – naast een geschikte grondstof – om een biobrandstof succesvol op de markt te brengen.

Het falen van de biobrandstofproductie uit jatrophanoten is niet alleen te wijten aan misplaatste investeringen.

b Wat kunnen overheden doen om ondernemingen te stimuleren over te gaan op biobrandstoffen?

c Wat kunnen overheden doen om consumenten te stimuleren over te gaan op biobrandstoffen?

Tijdens de klimaatop in Parijs in 2015 zijn wereldwijde afspraken gemaakt en doelen opgesteld met betrekking tot de verduurzaming van de industrie. Eén van deze doelen is om in 2030 minstens 15% van 's werelds oliegebruik in de transportsector te laten bestaan uit biobrandstoffen. Dat komt overeen met een vermindering van 1,3 miljoen vaten aardolie per dag. Een nobel doel, gezien het feit dat 60% van alle olie wordt gebruikt door de transportsector.

d Bereken hoeveel vaten biodiesel uit jatrophanoten per dag geproduceerd zou moeten worden om 15% van al het oliegebruik te vervangen. Maak hierbij gebruik van de volgende gegevens.

- Een vat bevat 159 L aardolie of biodiesel.
- De verbrandingswarmte van aardolie is $42,70 \text{ MJ kg}^{-1}$.
- De dichtheid van aardolie is $0,91 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$.
- De verbrandingswarmte van biodiesel is $38,68 \text{ MJ kg}^{-1}$.
- De dichtheid van biodiesel is $0,88 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$.

e Bedenk op basis van je antwoord bij d of jatropha op zichzelf de oplossing kan bieden voor het klimaatprobleem.

Experimenten

7.4 Bio-ethanol uit suikers

In dit experiment maak je via vergisting bio-ethanol uit suikers.

7.5 Biodiesel

Je maakt biodiesel uit zonnebloemolie door omestering van triglyceriden.

7.6 Bio-ethanol uit wc-papier

Zelfs uit wc-papier kun je bio-ethanol produceren. In dit practicum ontdek je hoe.

- Volledige instructie Chemie Overal online

Je kunt nu

- uitleggen wat een elementenkringloop is;
- uitleggen wanneer de koolstofkringloop CO_2 -neutraal is;
- uitleggen wat eerste, tweede en derde generatie biobrandstoffen zijn;
- een blokschema gebruiken.

Duurzaam design

Het kurk waarvan de designstoel hiernaast volledig is gemaakt, is afkomstig van de kurkeik. Het bijzondere van de kurkeik is dat elk onderdeel van deze boom een nuttige toepassing heeft: uit de stam wordt kurk gemaakt, de bladeren dienen als meststof, de eikels zijn voor kookolie en snoeien geeft een niet-giftig brandhout.



Je leert

- wat duurzaamheid is en hoe je rekening kunt houden met duurzaamheid;
- hoe je de efficiëntie van een chemisch proces kunt berekenen.

7.3 Duurzame ontwikkelingen

Duurzame grondstoffen

Onder duurzaamheid valt niet alleen het gebruik van energie uit duurzame energiebronnen. Ook de keuze voor grondstoffen en hoe je omgaat met afval is een belangrijk onderdeel van duurzaamheid. **Duurzaamheid** is een breed begrip, maar kan het best omschreven worden als rekening houden met de behoeften in het heden, zonder de behoeften van toekomstige generaties in gevaar te brengen.

Door gebruik te maken van **duurzame grondstoffen** voorkom je dat grondstoffen op den duur opraken. Een kenmerk van een duurzame grondstof is dat je hem op korte termijn steeds opnieuw kunt produceren. Het kurk uit het openingsbeeld is dan ook een voorbeeld van zo'n grondstof. Naast dat de kurkeik steeds opnieuw geplant kan worden, is kurk te recyclen tot een enorm aantal producten, zoals vloeren of isolatiemateriaal (figuur 7.19). Zijn deze producten versleten, dan kan het resterende kurk nog gebruikt worden als biomassa bij de productie van een biobrandstof.



7.19 Kurk heeft enorm veel toepassingen, bijvoorbeeld als vloer (a) of als isolatiemateriaal (b).



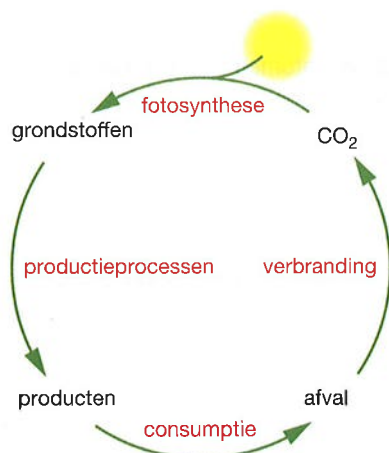
7.20 Deze jurk is gemaakt van gerecyclede plastic flessen.

Recycling

Recyclen is een manier om duurzaam om te gaan met grondstoffen, door afval op een nuttige manier nogmaals te gebruiken in een product of productieproces. Volgens de **Cradle to Cradle**-filosofie (C2C of 'wieg-tot-wieg') moet elke grondstof na gebruik in het ene product weer nuttig gebruikt kunnen worden in een ander product, zonder verlies van kwaliteit. Maar wat is nuttig? Bijvoorbeeld: puin uit de bouw wordt vermalen tot puinkorrels en daarna gebruikt als ophoogmateriaal onder wegen. De kwaliteit gaat daarmee achteruit omdat het te duur is of technisch niet mogelijk om er weer de oorspronkelijke grondstof van te maken. Binnen de C2C-filosofie heet dit **downcyclen**.

Bij **upcyclen** is de gerecyclede grondstof van gelijke kwaliteit als, of zelfs van betere kwaliteit dan de oorspronkelijke grondstof. Bij producten is het gerecyclede product van gelijke kwaliteit als, of van betere kwaliteit dan het oorspronkelijke product. Daarmee is upcyclen het tegenovergestelde van downcyclen. Emma Watson, bekend als Hermelien uit de Harry Potter-films droeg op een gala een jurk van een materiaal dat gemaakt was van gerecyclede plastic flessen (figuur 7.20). Een mooi voorbeeld van upcycling.

De weg die een grondstof aflegt kun je weergeven in een **stoffenkringloop** (figuur 7.21). Dat kan een kringloop van één stof zijn zoals de waterkringloop, maar er kunnen ook meerdere stoffen bij betrokken zijn. Het nadeel van een stoffenkringloop is dat downcycling niet zichtbaar is. Grondstoffen kunnen tijdens de verwerking bijvoorbeeld vervuild raken met andere elementen, waardoor de kwaliteit afneemt. Een voorbeeld van het verlies van kwaliteit is het bij elkaar storten van verschillende kleuren glas, waardoor er alleen nog bruin glas van gemaakt kan worden (figuur 7.22).



7.21 Een niet-duurzame stoffenkringloop



7.22 Om verlies van kwaliteit te voorkomen is het belangrijk om glas na inzameling te sorteren op kleur.

● Experiment 7.7

Duurzaamheid en groene chemie

Niet alleen kleine bedrijven en ontwerpers, maar ook de chemische industrie besteedt sinds de jaren negentig van de vorige eeuw steeds meer aandacht aan de duurzaamheid van productieprocessen. Dit doet ze vanuit zowel maatschappelijke als economische overwegingen. Bedrijven willen geen reputatie hebben als vervuiler en tegelijkertijd levert verduurzaming een besparing op in energiekosten en milieubelasting. Daarmee worden de vaak grote financiële investeringen die nodig zijn om een productieproces duurzamer te maken terugverdiend.



7.23 De groene chemie streeft naar het verduurzamen van productieprocessen.

Dit streven naar verduurzaming in de chemische industrie wordt **groene chemie** genoemd (figuur 7.23). Al in 1993 zijn twaalf uitgangspunten voor groene chemie geformuleerd, die inmiddels wereldwijd geaccepteerd zijn. Je vindt ze in Binas tabel 97F. Samengevat kun je zeggen dat processen die zijn gebaseerd op deze uitgangspunten van de groene chemie:

- veiliger zijn;
- minder grondstoffen en energie gebruiken;
- zo veel mogelijk gebruikmaken van duurzame grondstoffen en energie;
- minder vervuiling geven.

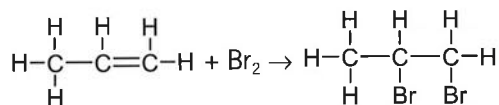
Atoomeconomie en rendement

Hoe duurzaam een chemisch productieproces precies is, kun je beoordelen aan de hand van de uitgangspunten van de groene chemie. Eén van de uitgangspunten is het inperken van de hoeveelheid afval, bijvoorbeeld door chemische reacties te ontwerpen waarbij zo min mogelijk bijproducten ontstaan. Om aan te geven welk percentage van de atomen uit de beginstoffen terugkomen in het gewenste eindproduct is de **atoomeconomie** geïntroduceerd. De atoomeconomie kun je definiëren als:

$$\text{atoomeconomie} = \frac{m_{\text{gewenst product}}}{m_{\text{beginstoffen}}} \times 100\%, \text{ waarin } m \text{ de molecuulmassa is.}$$

Rekenvoorbeeld 1

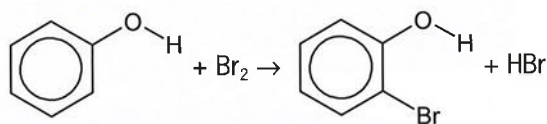
De stof 1,2-dibroompropan wordt gemaakt door additie van broom aan propen.



De reactie heeft een atoomeconomie van 100%, omdat alle atomen van de beginstoffen terugkomen in het reactieproduct. Zie figuur 7.24a.

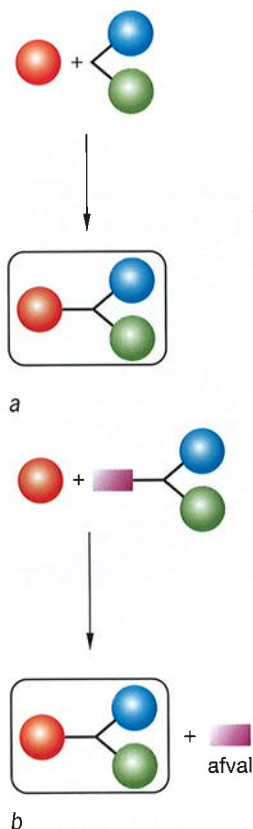
Rekenvoorbeeld 2

De productie van 2-broomfenol verloopt volgens de onderstaande reactievergelijking.



Naast het gewenste 2-broomfenol ontstaat er ook HBr. De atoomeconomie is daardoor kleiner dan 100% (figuur 7.24b).

$$\text{atoomeconomie} = \frac{m_{2\text{-broomfenol}}}{m_{\text{fenol}} + m_{\text{broom}}} \times 100\% = \frac{173,00 \text{ u}}{94,11 \text{ u} + 159,80 \text{ u}} \times 100\% = 68,13\%$$



7.24 Modeltekening van een hoge atoomeconomie (a) en een lagere atoomeconomie (b)

De atoomeconomie is een theoretisch getal dat je voor elke reactie kunt berekenen. Je kunt de atoomeconomie gebruiken wanneer je bij de keuze van een productieproces verschillende reacties met elkaar wilt vergelijken.



7.25 Het ontstaan van chemisch afval wil je zo veel mogelijk voorkomen.

Alleen naar de atomeconomie kijken is echter niet voldoende, aangezien in de praktijk een reactie vrijwel nooit voor 100% verloopt. Zo zijn niet alle beginstoffen even zuiver en treden er vaak nevenreacties op (figuur 7.25). Daarom gebruikt de industrie naast atomeconomie ook het begrip **rendement**. Onder rendement wordt verstaan:

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

De theoretische opbrengst is de massa van het product die volgens een kloppende reactievergelijking zou ontstaan bij een aflopende reactie. De praktische opbrengst is de massa van het product, zoals die bij een bepaalde reactie in een chemische fabriek wordt gevormd.

Rekenvoorbeeld 3

Bij het productieproces van voorbeeldberekening 2 ontstaat er in de praktijk uit 1000 ton fenol 1253 ton 2-broomfenol. Bereken het rendement van dit proces.

De molaire massa van fenol is $94,11 \text{ g mol}^{-1}$ en de molaire massa van 2-broomfenol is $173,00 \text{ g mol}^{-1}$. De molverhouding fenol : 2-broomfenol = 1 : 1.

$1000 \text{ ton fenol} \triangleq \frac{1000 \cdot 10^6 \text{ g}}{94,11 \text{ g mol}^{-1}} = 1,06 \cdot 10^7 \text{ mol fenol}$. Hieruit kan theoretisch $1,06 \cdot 10^7 \text{ mol} \times 173,00 \text{ g mol}^{-1} = 1838 \cdot 10^6 \text{ g} = 1838 \text{ ton 2-broomfenol}$ ontstaan.

Het rendement is dan: $\frac{1253 \text{ ton}}{1838 \text{ ton}} \times 100\% = 68,17\%$.

Bij een productie waar meerdere reacties na elkaar verlopen, moet je de rendementen van alle stappen met elkaar vermenigvuldigen. Als bijvoorbeeld de rendementen van drie achtereenvolgende stappen 65%, 75% en 55% zijn, is het totale rendement nog maar $0,65 \times 0,75 \times 0,55 = 0,27$, dus 27%. Als chemisch ingenieur (figuur 7.26) moet je rekening houden met het rendement van elke stap in het productieproces.

De formules voor de atomeconomie en het rendement vind je terug in Binas tabel 97F.



7.26 Als chemisch ingenieur houd je je bezig met het ontwerpen en onderhouden van chemische productieprocessen.

Van PET naar PEF

PET – of polyethyleentereftalaat – is een kunststof dat veel wordt gebruikt in drankflessen en andere verpakkingen van voedingsmiddelen. De grondstoffen die nodig zijn voor de productie van PET worden uit aardolie gehaald. PEF staat voor polyethyleenfuranoaat en is een 'biobased' kunststof. De grondstof voor PEF zijn furanen: moleculen gebaseerd op koolhydraten die uit voedselgewassen, zoals maïs of suikerriet gehaald kunnen worden, maar ook uit landbouwfal, houtsnippers en zelfs oude kranten.

PEF, gemaakt uit biologisch materiaal, is ook duurzamer dan PET (figuur 7.27). Daarnaast laat PEF minder lucht en water door van buitenaf, waardoor de producten in de fles langer meegaan. Verder is PEF erg sterk, waardoor je de flessen dunner kunt maken en er minder materiaal nodig is. Een groot nadeel is echter dat het op dit moment nog een stuk duurder is om te produceren. Het Nederlandse bedrijf Avantium is de samenwerking aangegaan

met de Duitse chemiegroep BASF om een faciliteit te bouwen voor de productie van furanen in Antwerpen (figuur 7.28).



7.27 Zolang het duurzaam alternatief voor PET nog niet op grote schaal geproduceerd wordt, is inzamelen en recyclen de enige optie voor petflessen.



7.28 Avantium heeft al een contract met coca-cola en Danone voor de productie van PEF-verpakkingen.



● Opdracht B27

Samenvatting

- Duurzaamheid is rekening houden met de behoeften in het heden, zonder de behoeften in de toekomst in gevaar te brengen.
- Bij recyclen maak je onderscheid tussen downcyclen, waarbij de kwaliteit van het materiaal minder wordt, en upcyclen, waarbij de kwaliteit van het materiaal hetzelfde blijft of beter wordt.
- De groene chemie streeft ernaar om de chemische industrie duurzamer te maken. Er zijn hiervoor twaalf uitgangspunten geformuleerd die betrekking hebben op grondstoffenbeheer, milieu en veiligheid.
- De atomeconomie geeft aan hoeveel atomen uit de beginstoffen terugkomen in het reactieproduct. Het rendement is de praktische opbrengst als percentage van de theoretische opbrengst.

Opdrachten

A 19 

- Wat is een duurzame grondstof?
- Wat is recycleren?
- Wat is up- en downcyclen?
- Wat is de centrale gedachte bij de *Cradle to Cradle*-filosofie?

A 20 

Zoek in Binas tabel 97F de twaalf principes van de groene chemie op en maak in je eigen woorden een samenvatting daarvan.

A 21

- Geef aan wat atomeconomie is.
- Geef aan wat het rendement van een reactie is.

B 22

- Teken een stoffenkringloop voor een plastic bekertje zoals in figuur 7.21 is weergegeven.
- Leg uit waarom deze kringloop niet duurzaam is.
- Wat moet je aan deze kringloop veranderen om hem duurzaam te maken?

B 23

Elektrische auto's geven geen uitlaatgassen. Leg aan de hand van de uitgangspunten van de groene chemie uit of deze auto's even milieuvriendelijk zijn als een fiets.

B 24

Bij recycling wordt een mengsel van kunststoffen eerst gescheiden door het verschil in dichtheid te gebruiken. De kunststof wordt in snippers gesneden en met een vloeistof gemengd. Sommige snippers gaan dan drijven en andere niet.

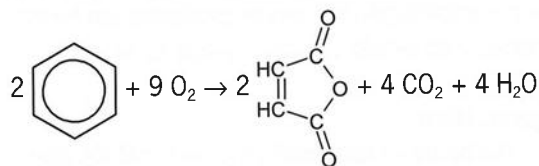
- De dichtheid van polypropreen is $0,91 \text{ g cm}^{-3}$ en die van polystyreen is $1,05 \text{ g cm}^{-3}$. In een bak met vloeistof drijft polypropreen en zinkt polystyreen. Wat kun je zeggen over de dichtheid van de vloeistof?

Recycling is alleen nuttig als het aanbod van gerecyclede materialen aansluit op de vraag. Stel dat de vraag veel lager ligt dan het aanbod.

- Wat zijn dan de gevolgen voor:
 - de prijs die betaald wordt voor de gerecyclede materialen;
 - de voorraad gerecyclede materialen;
 - de kosten van het scheidingsproces?

B 25

Maleïnezuuranhydride is een belangrijk tussenproduct in de fabricage van geneesmiddelen, pigmenten en geur- en kleurstoffen. DSM is een grote producent van deze stof en maakt het volgens onderstaande reactie:



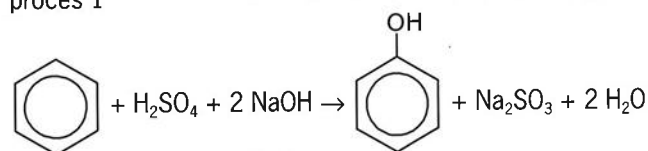
benzeen + zuurstof maleïnezuuranhydride

- Bereken de atomeconomie van deze reactie.
- Bereken het rendement als uit 100 kg benzeen, 85 kg maleïnezuuranhydride ontstaat.
- Leg uit of de productie van maleïnezuuranhydride een duurzaam proces is. Gebruik in je uitleg het rendement en de atomeconomie.

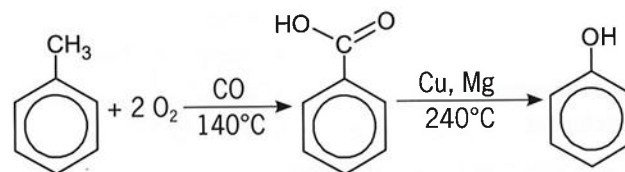
B 26 ★

Fenol ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$), een giftige stof, wordt voor een groot deel gebruikt om kunststoffen mee te maken. Daarnaast is het ook een grondstof voor veel medicijnen, bijvoorbeeld voor aspirine. Hierna staan twee processen voor de productie van fenol.

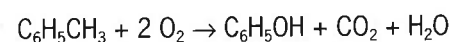
proces 1



proces 2



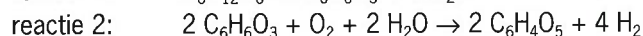
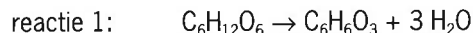
De vergelijking in molecuulformules voor proces 2 is:



- Bereken voor beide processen de atomeconomie. Ga ervan uit dat Na_2SO_3 in proces 1 geen nuttig product is. Ga uit van 100% rendement bij beide processen.
- Bereken de atomeconomie van proces 1 als natriumsulfiet wel kan worden gebruikt

B 27

Lees de tekst in het kader 'Van PET naar PEF' en beantwoord de volgende vragen. Eén van de furanen die worden gebruikt bij de productie van PEF is furaandicarbonzuur. Deze grondstof kan in twee stappen uit glucose worden gemaakt:



- Tel de reactievergelijkingen op zo'n manier op tot één vergelijking dat $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_3$ niet meer voorkomt in de vergelijking.
- Bereken de atomeconomie van de productie van furaandicarbonzuur met behulp van deze totaalreactie.

C 28 Plastic Hero

Begin 2009 startte de campagne Plastic Hero met als doel meer plastic verpakkingsafval apart in te zamelen. Het plastic afval wordt naar een sorteerstation gebracht, waar de plastics op soort worden gescheiden. Voorbeelden van plastics die kunnen worden gerecycled, zijn polyetheen, polypropreen en polystyreen. Die worden dan grondstof voor producten als fleecedekleding, speelgoed en mobiele telefoons. Er zijn twee hoofdtypen polyetheen: LD-polyetheen (LDPE) en HD-polyetheen (HDPE). In tabel 7.29 staat een aantal gegevens van LDPE en HDPE.

- Leg met behulp van twee gegevens uit tabel 7.29 uit welk type polyetheen het meest geschikt is voor plastic draagtassen.

Bij recycling worden de plastics per soort gesmolten, in een vorm geperst en afgekoeld. Daarna wordt het plastic vermalen tot korrels die worden gebruikt voor nieuwe toepassingen.

- Leg uit of je uit bovenstaande tekst kunt afleiden of het hier gaat over upcyclen of over downcyclen.

Wegwerpkoffiebekertjes worden gemaakt van polystyreen. Polystyreen wordt gevormd door het koppelen van styreenmoleculen. Bij de afvalverwerking worden de koffiebekertjes verbrand. Daarbij komt CO_2 in de atmosfeer.

- Hoeveel koolstofdioxidemoleculen ontstaan bij de volledige verbranding van een molecuul styreen? De molecuulformule van styreen is C_8H_8 .

Een wegwerpbekertje van polystyreen weegt 2,8 g, de molaire massa van styreen is $104,1 \text{ g mol}^{-1}$.

- Bereken hoeveel mol styreen in een bekertje is verwerkt.
- Bereken hoeveel dm^3 koolstofdioxide ontstaat bij de volledige verbranding van vijftig wegwerpbekertjes. Het volume van CO_2 is $24,5 \text{ dm}^3 \text{ mol}^{-1}$ bij $p = p_0$ en $T = 298 \text{ K}$.

Door de koffiebekers te recycleren in plaats van te verbranden, wordt de CO_2 -uitstoot verminderd. Toch gaat recycleren ook gepaard met de uitstoot van CO_2 .

- Geef een reden waarom dit zo is.

Bron: CE havo2011-II

Experiment

7.7 Kunststof uit aardappelen

In dit experiment maak je bioplastic van aardappelzetmeel. Je onderzoekt de eigenschappen van deze kunststof en bedenkt er een toepassing voor.

- Volledige instructie Chemie Overal online

	LDPE	HDPE
eigenschappen	• onaantastbaar door andere chemicaliën • goed bewerkbaar • soepel • moeilijk breekbaar	• onaantastbaar door andere chemicaliën • goed bewerkbaar • stijf • minder goed bestand tegen stoten
smeltemperatuur	105 – 125 °C	125 – 135 °C
dichtheid	$0,92 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$	$0,95 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$

7.29 Eigenschappen van polyetheen

Je kunt nu

- uitleggen wat wordt verstaan onder upcyclen, downcyclen en Cradle to Cradle;
- aangeven wanneer er sprake is van een duurzame stoffenkringloop;
- toelichten of een proces duurzaam is aan de hand van de uitgangspunten van de groene chemie;
- de atomeconomie en het rendement van een chemische reactie berekenen.

Synthese van adipinezuur

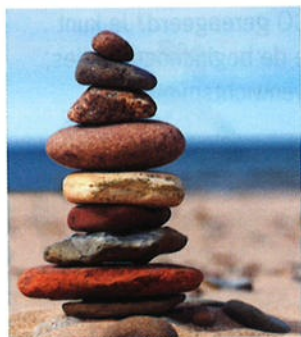
Adipinezuur is de belangrijkste grondstof voor nylon, waar bijvoorbeeld sneakers van worden gemaakt. Er wordt jaarlijks 2,5 miljard kilogram van geproduceerd. Jammer genoeg is de atomeconomie van dit productieproces niet optimaal, de beginstoffen reageren niet volledig met elkaar.



Je leert

- wat een evenwichtsreactie is;
- rekenen aan evenwichtsreacties.

7.4 Evenwichten

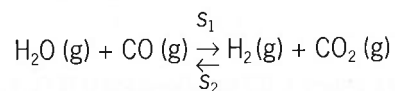


7.30 Dit is ook een evenwicht, maar geen dynamisch evenwicht zoals een chemisch evenwicht dat wel is.

Evenwichtsreacties

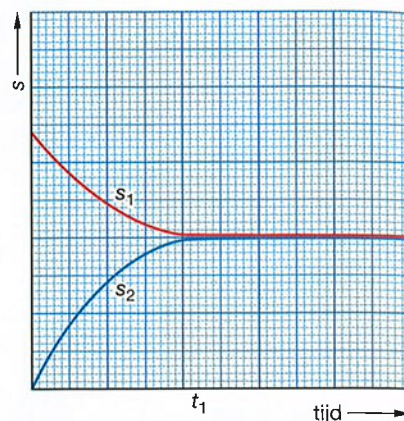
De eerste stap in de synthese van adipinezuur dat als grondstof dient voor de sneakers hierboven, is een **chemisch evenwicht**. In die eerste stap wordt de stof cyclohexanol omgezet in cyclohexanon, maar die omzetting is niet volledig. In paragraaf 5.1 van hoofdstuk 5 heb je al gezien dat je bij een chemisch evenwicht te maken hebt met twee omkeerbare reacties die met dezelfde snelheid verlopen. Bij omkeerbare reacties worden in de ene reactie, de heengaande reactie, de beginstoffen omgezet in de reactieproducten. In de andere reactie, de teruggaande reactie, worden de reactieproducten weer omgezet in de beginstoffen. Als deze reacties tegelijkertijd met dezelfde snelheid verlopen, ontstaat een chemisch evenwicht. De reacties noem je **evenwichtsreacties**.

Een ander voorbeeld van een chemisch evenwicht is de productie van waterstof uit methaan. Waterstof is nodig voor de productie van ammoniak (figuur 7.32). Bij de reactie van methaan met waterdamp ontstaat een mengsel van waterstof en koolstofmono-oxide. Dit mengsel reageert in een volgende stap verder, waarbij uit koolstofmono-oxide met waterdamp nog meer waterstof ontstaat en koolstofdioxide. De evenwichtsreactie die verloopt is:

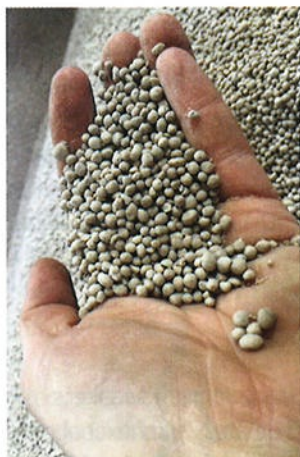


Na enige tijd veranderen de concentraties van de vier stoffen niet meer. De reactiesnelheden van beide reacties zijn nu gelijk. De tijd tussen het begin van de reactie en het intreden van de evenwichtstoestand, noem je de **insteltijd**, zie figuur 7.31.

Als de reagerende stoffen in een evenwicht een homogeen mengsel vormen zoals bij gasmengsels en bij opgeloste stoffen, noem je dat een **homogeen evenwicht**. Bij een homogeen evenwicht verloopt de reactie in één fase. Zijn de stoffen in meerdere fasen aanwezig, dan is er sprake van een **heterogeen evenwicht**. Bij een heterogeen evenwicht is altijd een grensvlak aanwezig. Hoe je aan evenwichten kunt rekenen, zie je in rekenvoorbeeld 1.



7.31 De snelheid van de reactie naar rechts is s_1 en die van de reactie naar links s_2 . t_1 is de insteltijd van het evenwicht.

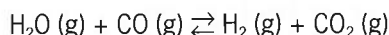


7.32 Voor de productie van deze kunstmest is waterstof nodig. Uit waterstof en stikstof wordt ammoniak gevormd, de grondstof voor kunstmest.

Rekenvoorbeeld 1

In een vat van $1,0 \text{ dm}^3$ breng je $0,40 \text{ mol H}_2\text{O (g)}$ en $0,30 \text{ mol CO (g)}$. Er ontstaat $\text{H}_2 \text{ (g)}$ en $\text{CO}_2 \text{ (g)}$ en er stelt zich een evenwicht in. Van de $0,40 \text{ mol H}_2\text{O (g)}$ bevindt zich nog 50% in het evenwichtsmengsel. Bereken de concentratie van de vier stoffen.

Je begint met de reactievergelijking:



Er is nog 50% H_2O , dus gereageerd heeft 50% van $0,40 \text{ mol} = 0,20 \text{ mol H}_2\text{O}$. De molverhouding $\text{H}_2\text{O} : \text{CO} = 1 : 1$, er heeft dus ook $0,20 \text{ mol CO}$ gereageerd. Je kunt het verloop van de reactie weergeven in een tabel. Bij t_0 zet je de beginconcentraties, dan hoeveel er is omgezet en bij t_{ev} de concentraties in het evenwichtsmengsel.

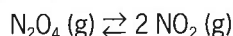
	$[\text{H}_2\text{O}]$	$[\text{CO}]$	$[\text{H}_2]$	$[\text{CO}_2]$
t_0	0,40	0,30	0	0
omgezet	-0,20	-0,20	+0,20	+0,20
t_{ev}	0,20	0,10	0,20	0,20

De concentraties van de vier stoffen zijn: $[\text{H}_2\text{O}] = 0,20 \text{ mol L}^{-1}$, $[\text{CO}] = 0,10 \text{ mol L}^{-1}$, $[\text{H}_2] = [\text{CO}_2] = 0,20 \text{ mol L}^{-1}$.

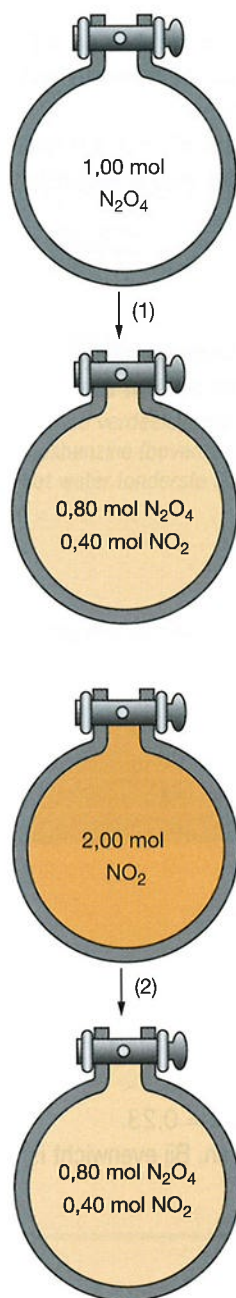
● Experiment 7.8

De evenwichtsvoorwaarde bij een homogeen evenwicht

Bij experiment 7.8 (zie figuur 7.33) kijk je naar de volgende evenwichtsreactie:



Tijdens experiment (1) verandert $1,00 \text{ mol}$ (kleurloos) N_2O_4 in een volume van $1,0 \text{ dm}^3$ in een (lichtbruin) mengsel van $0,80 \text{ mol N}_2\text{O}_4$ en $0,40 \text{ mol NO}_2$. Bij experiment (2) verandert $2,00 \text{ mol}$ (bruin) NO_2 in eenzelfde mengsel van $0,80 \text{ mol N}_2\text{O}_4$ en $0,40 \text{ mol NO}_2$. Beide experimenten leiden tot dezelfde evenwichtstoestand ($T = 100^\circ\text{C}$). Je kunt ook zeggen dat de ligging van het evenwicht voor beide reacties hetzelfde is en onafhankelijk van de begintoestand, zie tabel 7.34.

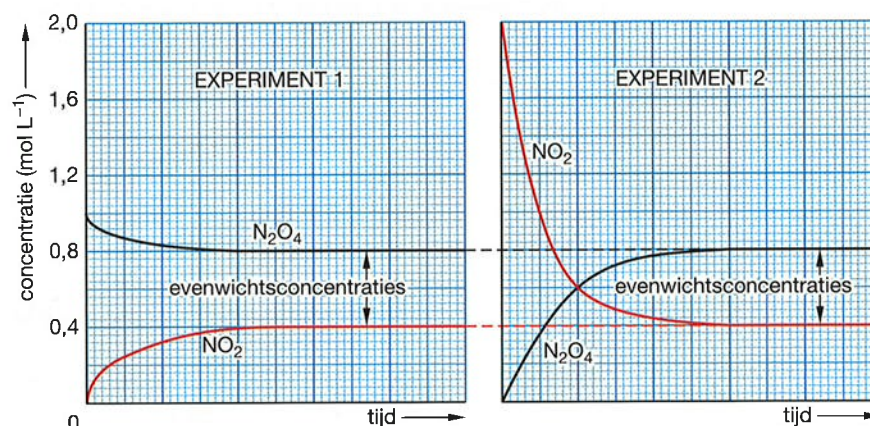


7.33 De experimenten (1) en (2) leiden tot dezelfde evenwichtstoestand.

	experiment (1)		experiment (2)	
	$[\text{N}_2\text{O}_4]$	$[\text{NO}_2]$	$[\text{N}_2\text{O}_4]$	$[\text{NO}_2]$
t_0	1,00	0	0	2,00
omgezet	-0,20	+0,40	+0,80	-1,60
t_{ev}	0,80	0,40	0,80	0,40

7.34 De resultaten van experimenten (1) en (2)

In figuur 7.35 zijn de concentratieveranderingen tijdens de twee experimenten in een diagram uitgezet. Ook hier is te zien dat de experimenten (1) en (2) leiden tot dezelfde evenwichtstoestand. Je ziet in figuur 7.35 dat de concentratie van NO_2 tweemaal zo snel verandert als die van N_2O_4 , doordat twee moleculen NO_2 ontstaan uit één molecuul N_2O_4 .



7.35 De concentratieverandering tijdens de experimenten 1 en 2. Zodra de concentraties niet meer veranderen, is de evenwichtstoestand bereikt.

Concentratiebreuk en evenwichtsvoorwaarde

Voor elke evenwichtsreactie kun je uit de reactievergelijking een **concentratiebreuk** afleiden. Dit doe je op de volgende manier.

- De concentraties van de reactieproducten staan in de teller van de concentratiebreuk. De concentraties van de beginstoffen staan in de noemer.
- Elke concentratie wordt voorzien van een exponent die gelijk is aan de overeenkomstige coëfficiënt in de reactievergelijking.
- In de concentratiebreuk staan alleen de concentraties van die stoffen, waarvan de concentratie kan veranderen. Dat is dus bij gassen of opgeloste stoffen het geval.

Voor het evenwicht $\text{N}_2\text{O}_4 / \text{NO}_2$ is de concentratiebreuk:

$$\frac{[\text{NO}_2]^2}{[\text{N}_2\text{O}_4]}$$

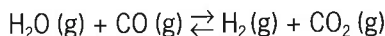
Als zich een chemisch evenwicht heeft ingesteld, veranderen de concentraties van de stoffen niet meer. De concentratiebreuk zal dan een constante waarde hebben. Deze constante waarde noem je de **evenwichtsconstante**, K . Er is pas evenwicht als de concentratiebreuk gelijk is aan de waarde van K .

$$K = \frac{[\text{NO}_2]^2}{[\text{N}_2\text{O}_4]} \text{ wordt de } \textbf{evenwichtsvoorwaarde} \text{ genoemd.}$$

K heet de evenwichtsconstante omdat de waarde van K niet afhangt van de druk en het volume en evenmin van de concentratie van de uitgangsstof(fen) of van de aanwezigheid van een katalysator. De waarde van K hangt alleen af van de temperatuur. In Binas tabel 51 kun je van een aantal reacties zien hoe de waarde van K verandert met de temperatuur. Voor de evenwichtsconstante gebruik je geen eenheid. Hoe je met K kunt rekenen aan evenwichten zie je in rekenvoorbeeld 2.

Rekenvoorbeeld 2

Bij een bepaalde temperatuur heeft de evenwichtsconstante van de onderstaande reactie de waarde 0,75. Je brengt 0,50 mol H_2O en 0,50 mol CO in een vat van $1,0 \text{ dm}^3$. Bereken de concentratie van H_2 (g) in het evenwichtsmengsel.



Je stelt de evenwichtsvoorwaarde op: $K = \frac{[\text{H}_2][\text{CO}_2]}{[\text{H}_2\text{O}][\text{CO}]}$

Stel dat tussen t_0 en t_{ev} x mol H_2O heeft gereageerd, dan kun je het verloop van de reactie in een tabel weergeven.

	$[\text{H}_2\text{O}]$	$[\text{CO}]$	$[\text{H}_2]$	$[\text{CO}_2]$
t_0	0,50	0,50	0	0
omgezet	$-x$	$-x$	$+x$	$+x$
t_{ev}	$0,50 - x$	$0,50 - x$	x	x

Ingevuld in de concentratiebreuk geeft dit: $K = \frac{x^2}{(0,50 - x)^2} = 0,75$.

$$0,75 (0,50 - x)^2 = x^2$$

$$0,75 (0,25 - x + x^2) = x^2$$

$$0,25x^2 + 0,75x - 0,1875 = 0$$

Deze vergelijking oplossen met de abc-formule geeft als uitkomst: $x = 0,23$.

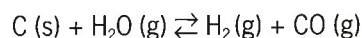
Er heeft 0,23 mol H_2O gereageerd, dus is ook 0,23 mol H_2 ontstaan. Bij evenwicht is: $[\text{H}_2] = 0,23 \text{ mol L}^{-1}$.



7.36 Een Brits bedrijf heeft een milieuvriendelijke methode ontwikkeld om synthesesgas te produceren uit oude autobanden.

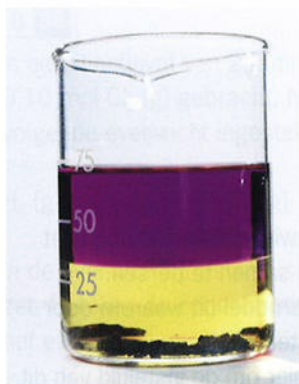
De evenwichtsvoorwaarde bij een heterogeen evenwicht

Een duurzaam voorbeeld van een heterogeen evenwicht is de productie van synthesesgas door biomassa te verhitten met stoom onder hoge druk. Synthesesgas is een mengsel van koolstofmono-oxide en waterstof en kan worden gebruikt om elektriciteit op te wekken (figuur 7.36). Als de biomassa, hier versimpeld weergegeven als $\text{C} (\text{s})$, sterk wordt verhit in de aanwezigheid van stoom, stelt zich het volgende evenwicht in:



De evenwichtsvoorwaarde luidt: $K = \frac{[\text{H}_2][\text{CO}]}{[\text{H}_2\text{O}]}$ en niet: $K = \frac{[\text{H}_2][\text{CO}]}{[\text{C}][\text{H}_2\text{O}]}$, zoals je misschien had verwacht.

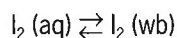
De vaste biomassa is namelijk niet homogeen verdeeld over de beschikbare ruimte en je kunt dus niet spreken over de concentratie van deze stof. De andere stoffen zijn gasen en die zijn daardoor wel homogeen verdeeld over de beschikbare ruimte. Zij komen dus wel voor in de concentratiebreuk. Ook vloeistoffen komen om dezelfde reden als vaste stoffen niet terug in de concentratiebreuk.



7.37 Jood verdeelt zich over de wasbenzine (bovenste laag) en het water (onderste laag).

Oplosevenwicht en verdelingsevenwicht

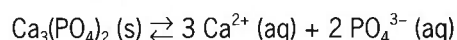
Je hebt al eerder kennisgemaakt met twee heterogene evenwichten: het verdelingsevenwicht en het oplosevenwicht. In paragraaf 3.4 van hoofdstuk 3 is het oplossen van jood in de twee niet-mengbare oplosmiddelen water en wasbenzine (wb) besproken. De stof jood lost in allebei de oplosmiddelen op en verdeelt zich over de twee oplosmiddelen volgens een vaste verhouding, zie figuur 7.37. Dit is geen chemisch evenwicht omdat er geen chemische reactie verloopt. Maar er ontstaat wel een dynamisch evenwicht, **verdelings-evenwicht** genoemd.



Voor dit verdelingsevenwicht kun je een evenwichtsvoorwaarde opstellen. De evenwichtsconstante heet dan de verdelingsconstante K_v . De evenwichtsvoorwaarde wordt dan:

$$K_v = \frac{[I_2 (wb)]}{[I_2 (aq)]}$$

In paragraaf 5.1 van hoofdstuk 5 heb je naar een **oplosevenwicht** gekeken van een slecht oplosbaar zout. Als je bijvoorbeeld een hoeveelheid calciumfosfaat in water doet, lost er heel weinig op. Er ontstaat een heterogeen evenwicht tussen de opgeloste ionen en de vaste stof op de bodem. Bij een oplosevenwicht heet de evenwichtsconstante K_s . Voor de reactie:



is de evenwichtsvoorwaarde $K_s = [Ca^{2+}]^3 [PO_4^{3-}]^2$.

Samenvatting

- Bij een chemisch evenwicht hebben twee tegengesteld lopende reacties dezelfde snelheid. De tijd tussen het begin van de reactie en het intreden van de evenwichtstoestand noem je de insteltijd.
- Evenwichten zijn homogeen als alle stoffen zich in dezelfde fase bevinden en heterogeen als de stoffen zich in verschillende fasen bevinden.
- Voor elke evenwichtsreactie kun je een concentratiebreuk opstellen. In de evenwichtstoestand is de waarde van de concentratiebreuk constant, deze waarde heet de evenwichtsconstante K .
- De waarde van de evenwichtsconstante is alleen afhankelijk van de temperatuur.
- Vaste stoffen en vloeistoffen komen niet terug in de concentratiebreuk van een heterogeen evenwicht.
- Verdelingsevenwichten en oplosevenwichten zijn heterogene evenwichten.

Opdrachten

A 29

Leg uit wanneer er sprake is van een chemisch evenwicht.

B 30 

Als je bij kamertemperatuur een buis vult met het bruine stikstofdioxide wordt de kleur na enige tijd lichter.

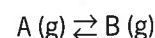
- Leg uit wat er in de buis gebeurt.
- Geef de reactievergelijking van deze evenwichtsreactie.
- Noteer de evenwichtsvoorwaarde van deze reactie.
- Leg uit of de kleur hetzelfde blijft als je de buis in warm water van 100 °C zet.

B 31

- Leg uit wat het verschil is tussen een homogeen evenwicht en een heterogeen evenwicht.
- Leg uit of het verdelingsevenwicht dat ontstaat als jood zich verdeelt over de niet-mengbare vloeistoffen water en wasbenzine een chemisch evenwicht is.
- Geef een voorbeeld van een heterogeen evenwicht.

B 32

In een vat van 10 dm³ breng je 1,00 mol A. Na enige tijd bevindt zich in het vat een evenwichtsmengsel met daarin 0,20 mol A. De evenwichtsreactie is:



- Schets in een diagram het verloop van [A] en [B] en geef hierin ook de insteltijd van het evenwicht aan.
- Schets in een tweede diagram het verloop van de beide reactiesnelheden.

B 33

Noteer de evenwichtsvoorwaarde voor de onderstaande evenwichtsreacties.

- $2 \text{SO}_2(g) + \text{O}_2(g) \rightleftharpoons 2 \text{SO}_3(g)$
- $\text{Co}(s) + \text{Ni}^{2+}(aq) \rightleftharpoons \text{Co}^{2+}(aq) + \text{Ni}(s)$
- $\text{N}_2(g) + 3 \text{H}_2(g) \rightleftharpoons 2 \text{NH}_3(g)$
- $\text{Ag}^+(aq) + 2 \text{NH}_3(aq) \rightleftharpoons \text{Ag}(\text{NH}_3)_2^+(aq)$
- $2 \text{Fe}^{3+}(aq) + \text{Sn}^{2+}(aq) \rightleftharpoons 2 \text{Fe}^{2+}(aq) + \text{Sn}^{4+}(aq)$
- $\text{PbI}_2(s) \rightleftharpoons \text{Pb}^{2+}(aq) + 2 \text{I}^-(aq)$

B 34

Bij zeer hoge temperatuur zijn stikstof en zuurstof in evenwicht met stikstofmono-oxide.

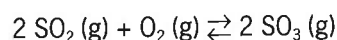
- Geef de reactievergelijking voor dit evenwicht.

Je kunt de insteltijd van het evenwicht bekorten door het gasmengsel tijdens het verhitten samen te persen.

- Leg met het botsende-deeltjesmodel uit waarom door samenpersen de insteltijd korter wordt.
- Beschrijf nog een andere manier om de insteltijd van dit evenwicht te bekorten.

B 35

Bij 900 K is de waarde van de evenwichtsconstante van de onderstaande reactie gelijk aan 13.

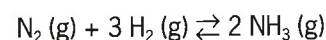


Voorspel in welke richting de reactie zal verlopen naar de evenwichtstoestand, vanuit de twee volgende omstandigheden.

- $[\text{SO}_2] = 0,20 \text{ mol L}^{-1}$
 $[\text{O}_2] = 0,20 \text{ mol L}^{-1}$
 $[\text{SO}_3] = 0,20 \text{ mol L}^{-1}$
- $[\text{SO}_2] = 0,10 \text{ mol L}^{-1}$
 $[\text{O}_2] = 0,20 \text{ mol L}^{-1}$
 $[\text{SO}_3] = 0,20 \text{ mol L}^{-1}$

B 36 

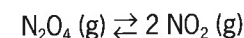
Je brengt bij een bepaalde temperatuur in een vat evenveel mol H₂ als N₂. Het volgende evenwicht stelt zich in:



- Leg uit of de concentratie van NH₃ in het evenwichtsmengsel groter of kleiner zal zijn dan die van H₂. Of kun je daar geen uitspraak over doen?
- Leg uit of de N₂-concentratie in het mengsel groter of kleiner zal zijn dan de H₂-concentratie.

B 37

Bij een bepaalde temperatuur is de waarde van de evenwichtsconstante van de onderstaande evenwichtsreactie gelijk aan 2,0.

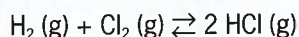


Je doet bij deze temperatuur 0,40 mol N₂O₄ in een vat van 1,0 dm³. Na korte tijd is nog maar 0,20 mol N₂O₄ aanwezig.

- Ga door berekening na of het evenwicht zich dan heeft ingesteld.
- Bereken de concentraties van N₂O₄ en NO₂ in het vat als het evenwicht zich heeft ingesteld.

B 38

In een reactievat van $2,0 \text{ dm}^3$ wordt $0,10 \text{ mol H}_2 (\text{g})$ en $0,10 \text{ mol Cl}_2 (\text{g})$ gebracht. Na enige tijd heeft zich het volgende evenwicht ingesteld:



In de evenwichtstoestand is 60% van de waterstof omgezet. Bereken de concentratie van elk van de drie stoffen in het evenwichtsmengsel.

C 39

Melkzuur is de grondstof voor polymelkzuur, een stof die in de chirurgie wordt gebruikt als hechtdraad en om pinnen en schroeven te maken voor het weer vastzetten van gebroken botten (figuur 7.38).

Melkzuur wordt geproduceerd door melkzuurbacteriën, die in grote reactievaten glucose omzetten in melkzuur. Na filtratie van de inhoud van het reactievat blijft er een waterige oplossing over van melkzuur en een aantal andere stoffen. Om het melkzuur uit het filtratiemengsel te isoleren, wordt als oplosmiddel heptaan met trioctylamine toegevoegd. Een deel van het melkzuur lost daar in op.

- a** Leg uit van welke scheidingsmethode hier gebruik wordt gemaakt.

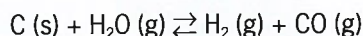
Er ontstaat een verdelingsevenwicht van melkzuur over de waterfase en de heptaan + trioctylamine-fase. Voor dit verdelingsevenwicht geldt de volgende formule:

$$K = \frac{[\text{melkzuur}]_{\text{heptaan-trioctylamine}}}{[\text{melkzuur}]_{\text{water}}}$$

- b** Hoe noem je K in dit melkzuurevenwicht?
c Als de waarde van $K = 0,6$, welk gedeelte van het melkzuur zit dan nog in de waterlaag?
d Wat zou je moeten doen om zo veel mogelijk melkzuur uit de waterige oplossing te halen?

C 40 ★

Synthesegas is een mengsel van $\text{CO} (\text{g})$ en $\text{H}_2 (\text{g})$, dat uit biomassa geproduceerd kan worden. Het is een duurzame brandstof voor het opwekken van elektriciteit. Het omzetten van biomassa tot synthesegas kun je als volgt versimpeld weergeven:



Bij $T = 1000 \text{ K}$ geldt $K = 0,30$ voor dit evenwicht.

- a** Bereken de concentraties van alle stoffen bij evenwicht wanneer je $1,0 \text{ mol H}_2\text{O} (\text{g})$ en een overmaat biomassa in de reactor leidt. Ga ervan uit dat het volume van het vat $1,0 \text{ dm}^3$ is.
b Bepaal het rendement. Neem aan dat de beginstoffen zuiver zijn en dat er geen andere reacties optreden.
c De atomeconomie van deze productie is niet 100%, al zou je dat op basis van de reactievergelijking wel verwachten. Leg uit waarom niet.

Experiment

7.8 Evenwicht $\text{N}_2\text{O}_4 / \text{NO}_2$

Is de reactie waarbij N_2O_4 reageert tot NO_2 omkeerbaar?

- Volledige instructie Chemie Overal online



7.38 Polymelkzuur is ook een veelgebruikt bioplastic voor 3D-printers.

Je kunt nu

- uitleggen wat wordt verstaan onder evenwichtsreacties;
- de begrippen insteltijd en homogeen en heterogeen evenwicht toelichten;
- voor een gegeven evenwichtsreactie de concentratiebreuk en de evenwichtsvoorwaarde opstellen;
- berekeningen aan een evenwicht uitvoeren met behulp van een overzichtstabel;
- uitleggen wat een verdelingsevenwicht en een oplos-evenwicht is.

Microalgen

Hoe breng je het gehalte CO_2 in de atmosfeer weer omlaag? Microalgen kunnen daarbij helpen. CO_2 lost vanuit de atmosfeer op in zeewater, maar er ontstaat een evenwicht tussen het opgeloste CO_2 en het CO_2 in de atmosfeer. De microalgen, waarvan de bloei zelfs vanuit de ruimte is te zien, gebruiken grote hoeveelheden CO_2 tijdens hun leven. Hierdoor kan er meer CO_2 oplossen in de oceanen.

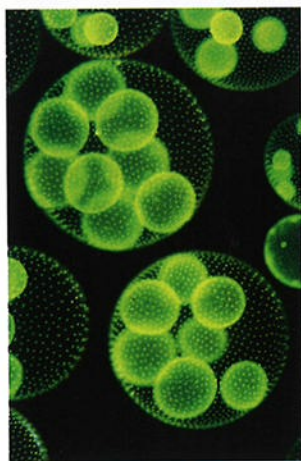


Je leert

- welke factoren invloed hebben op het verloop van een evenwichtsreactie.

7.5 Evenwichten beïnvloeden

● Experiment 7.9



7.39 Sterk vergroot beeld van microalgen

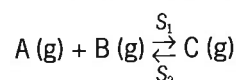
Verschuiving van een chemisch evenwicht

De microalgen uit het openingsbeeld zijn een voorbeeld van het beïnvloeden van evenwichten. Ze zetten het koolstofdioxide in water om in waterstofcarbonaationen, HCO_3^- . De concentratie CO_2 in het water neemt daardoor af, waardoor er een verschuiving van het evenwicht plaatsvindt. Zolang de algen de CO_2 -moleculen om blijven zetten, blijft er meer en meer CO_2 oplossen (figuur 7.39).

Omdat niet alle beginstoffen worden omgezet in reactieproducten, zijn evenwichtsreacties vanuit een duurzaamheidsoogpunt ongunstig. Om een hoger rendement te krijgen, worden bij evenwichtsprocessen in de chemie de reactieomstandigheden zo aangepast, dat evenwichtsreacties toch zo veel mogelijk reactieproduct leveren.

Invloed van de concentratieverandering

Welke invloed heeft een concentratieverandering van één van de stoffen bij gelijkblijvende temperatuur op de ligging van een evenwicht? Stel je hebt het evenwicht:

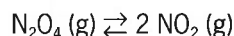


Als je meer stof B toevoegt, neemt [B] toe. Daardoor wordt de reactiesnelheid naar rechts groter dan die naar links. Het evenwicht is verstoord. De concentraties van A en B nemen af en die van C neemt toe. Deze veranderingen zorgen ervoor dat de reactiesnelheid naar links weer toeneemt tot beide snelheden gelijk zijn en er een nieuw evenwicht is ontstaan. In dit nieuwe evenwicht is de concentratie van stof C groter dan eerst.

Op dezelfde manier kun je beredeneren dat de reactie naar links (tijdelijk) de overhand krijgt als je stof B wegneemt: 'het evenwicht verschuift naar links'. Denk eraan dat de termen 'links' en 'rechts' alléén betekenis hebben als de reactievergelijking is gegeven. In figuur 7.40 zijn deze effecten in een diagram weergegeven.

Invloed van de volumeverandering

Wat gebeurt er met de evenwichtsligging als je bij gelijkblijvende temperatuur het volume verandert? We bespreken dit effect aan de hand van het $\text{N}_2\text{O}_4 / \text{NO}_2$ -evenwicht:



De evenwichtsvoorwaarde bij dit evenwicht is: $K = \frac{[\text{NO}_2]^2}{[\text{N}_2\text{O}_4]}$

Stel dat dit evenwicht zich heeft ingesteld in een vat van $1,0 \text{ dm}^3$ met een beweegbare zuiger (figuur 7.41). Als je het volume verdubbelt, worden $[\text{N}_2\text{O}_4]$ en $[\text{NO}_2]$ gehalveerd. De waarde van de concentratiebreuk is nu ingrijpend gewijzigd door de volumeverandering. De teller is $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$ maal zo groot, en de noemer $\frac{1}{2}$ maal zo groot geworden. De waarde van de concentratiebreuk (het quotiënt) is dus gehalveerd en is daardoor niet meer gelijk aan K . Het evenwicht is verstoord. Er is pas weer evenwicht als de concentratiebreuk zijn oorspronkelijke waarde krijgt. De teller moet groter worden en de noemer kleiner, het evenwicht verschuift dus naar rechts, er ontstaat meer NO_2 . Volumevergroting doet dit gasevenwicht dus naar rechts verschuiven, de kant met de meeste gasdeeltjes. Bij volumeverkleining zal dit evenwicht naar links verschuiven.

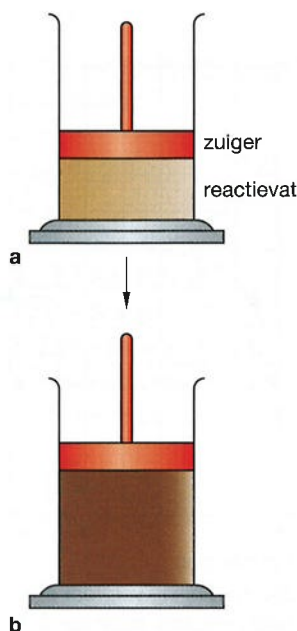
Deze redenering kun je op elk evenwicht toepassen, niet alleen op gasevenwichten, maar ook op evenwichten waarbij opgeloste deeltjes zijn betrokken. Dan kun je het volume vergroten door extra oplosmiddel toe te voegen (verdunnen).

Invloed van een katalysator

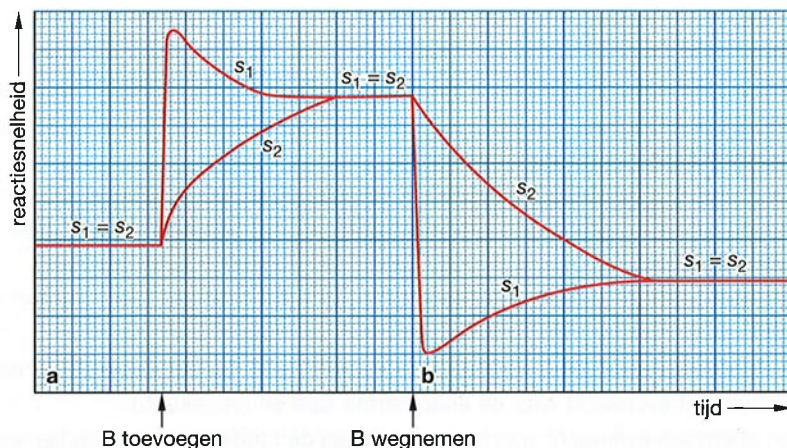
Voeg je een katalysator toe aan een reactiemengsel in evenwicht, dan neemt de snelheid van beide reacties toe, maar nu evenveel. De ligging van het evenwicht zal daarom niet veranderen en de samenstelling van het evenwichtsmengsel blijft hetzelfde. Het voordeel van een katalysator is dat de insteltijd van het evenwicht kleiner wordt, zie figuur 7.42.

Invloed van de temperatuur

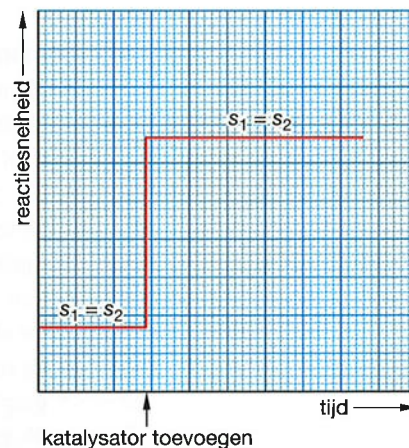
De waarde van K is afhankelijk van de temperatuur, bij verhoging of verlaging van de temperatuur krijgt K een andere waarde. Een mengsel van N_2O_4 en NO_2 in evenwicht heeft bij ongeveer 0°C een lichtbruine kleur.



7.41 De zuiger in reactievat a wordt omhooggetrokken, het evenwicht verschuift. Er ontstaat meer donkerbruin NO_2 .



7.40a Na toename van $[\text{B}]$ geldt voor de snelheid van de reactie naar rechts tijdelijk $s_1 > s_2$. b Als $[\text{B}]$ afneemt, is de reactie naar links tijdelijk sneller ($s_2 > s_1$).



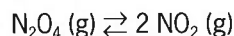
7.42 Een katalysator verhoogt de snelheid van beide reacties evenveel.

Je hebt in experiment 7.8 gezien dat het mengsel donkerder bruin kleurde toen je het verwarmde.

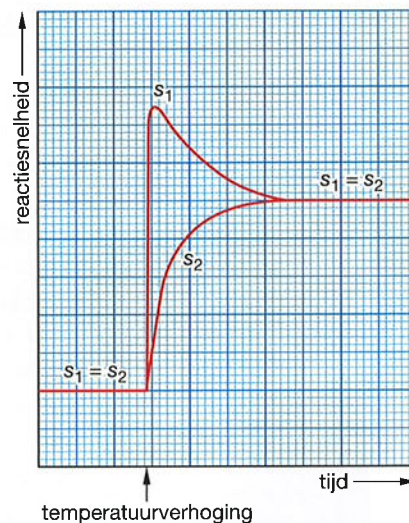
Tijdens het verwarmen wordt er dus meer (kleurloos) N_2O_4 omgezet in (bruin) NO_2 dan er wordt terug gevormd. Bij temperatuurverhoging neemt de snelheid van beide reacties toe, maar kennelijk neemt de snelheid van de ene reactie sterker toe dan die van de andere. In figuur 7.43 is dit in een diagram weergegeven.

De twee reacties van een evenwicht zijn in hun warmte-effect elkaars tegengestelde. Is de ene reactie exotherm, dan is de andere in dezelfde mate endotherm.

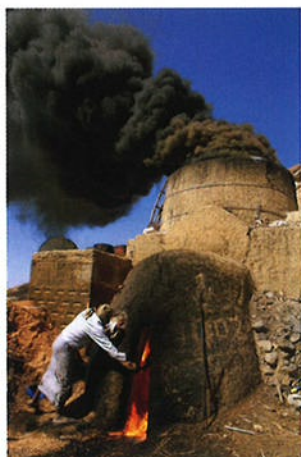
Het evenwicht:



verschuift naar rechts, als er wordt verwarmd. De endotherme reactie is tijdelijk in het voordeel tot de concentratiebreuk gelijk is aan de nieuwe waarde van K . Bij afkoelen verschuift het evenwicht naar links en dan is de exotherme reactie tijdelijk in het voordeel. Ook bij andere evenwichten blijkt de verschuiving bij temperatuurverhoging in de richting van de endotherme reactie te gaan.



7.43 Temperatuurverhoging vergroot de snelheid van beide reacties, maar dan in andere mate.



7.44 Een voorbeeld van een evenwichtsreactie die eenvoudig aflopend gemaakt wordt is de productie van CaO uit CaCO_3 . Hierbij komt ook CO_2 vrij.

$\text{CaCO}_3 (\text{s}) \rightleftharpoons \text{CaO} (\text{s}) + \text{CO}_2 (\text{g})$
Door de koepelvormige oven van boven open te laten ontwijkt het CO_2 .

Aflopen van een evenwicht

Bij het productieproces van stoffen is het optreden van evenwichtsreacties hinderlijk. De heengaande reactie levert het gewenste reactieproduct, maar de teruggaande reactie zet het product weer om in beginstoffen. Dat is op te lossen door het reactieproduct af te voeren. Het evenwicht zal dan zodanig verschuiven, dat meer beginstof wordt omgezet in het reactieproduct. In de praktijk betekent dit dat het evenwicht geheel verschuift naar de kant van de reactieproducten. Je noemt dat een **aflopend evenwicht**. Zo kun je de productie van CaO uit figuur 7.44 aflopend maken door het CO_2 af te voeren, waardoor het evenwicht afloopt naar de kant van het CaO .

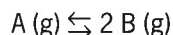
Samenvatting

- Als je stoffen toevoegt aan een evenwicht, veranderen de reactiesnelheden in verschillende mate. Door het toevoegen van beginstoffen verschuift een evenwicht naar de kant van de reactieproducten en omgekeerd.
- De concentraties van de stoffen in evenwicht veranderen bij een volumeverandering. Bij volumeverkleining verschuift het evenwicht naar de kant met het minste aantal deeltjes en omgekeerd.
- Een katalysator heeft geen invloed op de ligging van een evenwicht, maar verkort wel de insteltijd.
- Bij een temperatuurverandering verandert de waarde van K . Bij een temperatuurverhoging verschuift het evenwicht naar de endotherme kant en omgekeerd.
- Als bij een chemisch evenwicht voortdurend één van de stoffen aan het reactiemengsel wordt onttrokken, loopt het evenwicht af naar de kant waar die stof staat.

Opdrachten

A 41

Bekijk het onderstaande evenwicht. De reactie naar rechts is exotherm.

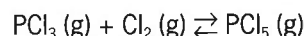


Naar welke kant verschuift dit evenwicht als je:

- a stof A toevoegt;
- b stof A wegneemt;
- c het volume verkleint;
- d een katalysator toevoegt;
- e de temperatuur verlaagt?

B 42

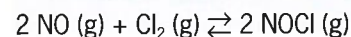
Met onderstaand evenwicht voer je een vijftal experimenten uit.



- 1 toevoegen van $PCl_3(g)$
- 2 verwijderen van $Cl_2(g)$
- 3 verwarmen van het mengsel (gegeven: de reactie naar rechts is exotherm)
- 4 verkleinen van het volume van het reactievat
- 5 toevoegen van heliumgas bij constant volume
- a Bereken voor elk van de vijf experimenten wat de invloed zal zijn op de concentratie van PCl_5 .
- b Leg uit in welk(e) van de vijf gevallen de waarde van de evenwichtsconstante zal veranderen.

B 43

Stikstofmono-oxide en chloor kunnen met elkaar reageren onder vorming van nitrosylchloride, NOCl. Het volgende evenwicht stelt zich in:



De reactie naar rechts is exotherm.

Je brengt 0,200 mol NO en 0,100 mol Cl_2 in een afgesloten ruimte met een volume van 1,0 dm³ en een temperatuur van 500 K. Als het evenwicht zich heeft ingesteld, blijkt 85% van het Cl_2 te zijn omgezet. Alle bij het evenwicht betrokken stoffen zijn gasvormig.

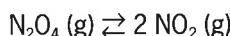
- a Bereken de waarde van de evenwichtsconstante bij 500 K van het bovenstaande evenwicht.

Je herhaalt het bovenbeschreven experiment bij 750 K.

- b Leg uit of in de evenwichtstoestand het percentage Cl_2 dat is omgezet 85% blijft of dat dit groter, dan wel kleiner wordt.
 - c Leg uit naar welke kant het evenwicht verschuift als er NO wordt toegevoegd. Wat gebeurt er met de waarde van K?
- Bron: CE vwo 2004-I

B 44

In experiment 7.8 heb je het onderstaande evenwicht gezien:

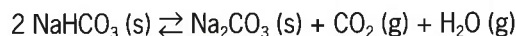


De reactie naar rechts is endotherm.

- a Geef de evenwichtsvoorwaarde voor dit evenwicht.
- b Bereken naar welke kant het evenwicht verschuift bij de onderstaande handelingen.
 - 1 toevoegen van extra N_2O_4
 - 2 verwijderen van NO_2
 - 3 verkleinen van het volume van het reactievat
 - 4 toevoegen van een katalysator
 - 5 verlagen van de temperatuur in het reactievat

B 45

Natriumwaterstofcarbonaat ontleedt bij hoge temperatuur volgens onderstaande evenwichtsreactie:

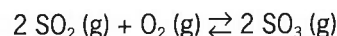


Je brengt een hoeveelheid natriumwaterstofcarbonaat in een luchtdig vat van 1,0 dm³ bij 125 °C. Bij 125 °C is de waarde van de evenwichtsconstante $2,4 \cdot 10^{-4}$. Er stelt zich een evenwicht in.

- a Geef de evenwichtsvoorwaarde.
- b Bereken de concentraties van CO_2 en H_2O in dit evenwichtsmengsel in mol L⁻¹.
- c Hoe kun je het bovenstaande evenwicht geheel naar rechts laten aflopen?

B 46

Gegeven is het volgende evenwicht:



- a Geef de evenwichtsvoorwaarde.
- b Bereken aan de hand van Binas tabel 51 of het ontstaan van zwaveltrioxide uit zwaveldioxide en zuurstof een endotherme of een exotherme reactie is.

Planten halen voedingsstoffen als nitraten en fosfaten uit de bodem. Als de bodem te weinig voedingsstoffen bevat, kan het tekort worden aangevuld met kunstmest. Ammoniak is een van de grondstoffen van de grootschalige kunstmestproductie. Het wordt via het haber-boschproces gemaakt uit waterstof en stikstof uit de lucht. Dit is een evenwichtsreactie.

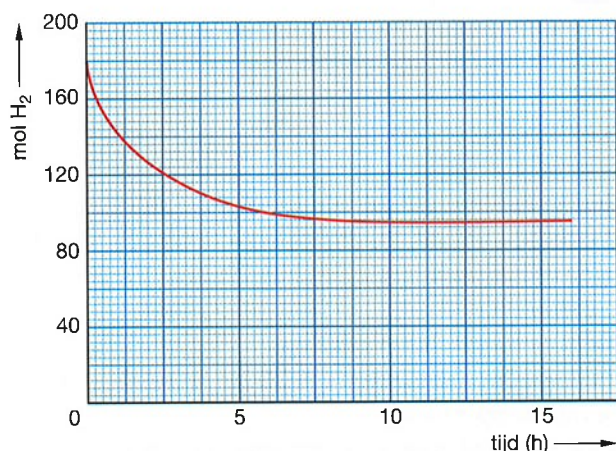
- Geef de reactievergelijking van de vorming van ammoniak uit de stoffen stikstof en waterstof.
- Beredeneer met behulp van Binas tabel 51 welke reactie in dit evenwicht de endotherme reactie is.

Hoewel de opbrengst aan ammoniak bij lage temperatuur hoger is, werkt men toch bij een temperatuur van 450 °C.

- Leg uit waarom het proces niet bij een lagere temperatuur wordt uitgevoerd.

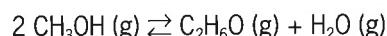
Op het tijdstip $t = 0$ wordt in een reactorvat 75 mol stikstof gebracht en een hoeveelheid waterstof. Na enige tijd heeft het evenwicht zich ingesteld. Het verloop van de hoeveelheid waterstof is in figuur 7.45 weergegeven.

- Op welk tijdstip is er evenwicht bereikt?
- Bereken hoeveel stikstof er in de evenwichtstoestand nog in het reactorvat aanwezig is.
- Bereken hoeveel ammoniak er in het evenwichtsmengsel aanwezig is.
- Neem het diagram over in je schrift en teken hierin het verloop van de hoeveelheden stikstof en ammoniak.



7.45 Diagram van het verloop van de hoeveelheid waterstof.

Biomethanol heeft als nadeel dat het veel minder energie bevat per volume-eenheid dan benzine (figuur 7.46). Een motor die volledig draait op biomethanol heeft daarom een veel hoger verbruik dan een motor die draait op benzine. Om dit op te lossen kun je benzine maken uit biomethanol. Onder hoge druk en temperatuur en in aanwezigheid van een geschikte katalysator wordt biomethanol omgezet in methoxymethaan en waterdamp. Hierbij treedt de volgende evenwichtsreactie op:



Als producent wil je de insteltijd van dit evenwicht zo kort mogelijk houden en tegelijkertijd een zo hoog mogelijk rendement behalen. Om dit te bereiken wordt het volume van de reactor verkleind.

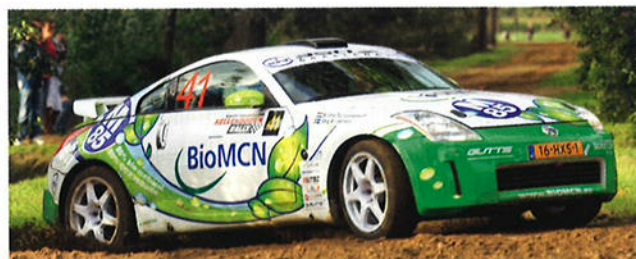
- Leg uit of de volumeverkleining invloed heeft op de insteltijd.
- Leg uit of de volumeverkleining invloed heeft op het rendement.
- De omzetting van biomethanol tot benzine strookt niet met één uitgangspunt van de groene chemie. Leg uit welk uitgangspunt dit is en waarom.

Experiment

7.9 Verschuiven evenwicht $\text{FeCl}_3 / \text{FeSCN}$ -reactie

Je onderzoekt de factoren die invloed hebben op de ligging van een evenwicht.

- Volledige instructie Chemie Overal online



7.46 Biomethanol zorgt voor minder CO_2 -uitstoot.

Je kunt nu

- uitleggen hoe een evenwicht verschuift bij concentratieverandering;
- uitleggen hoe een evenwicht verschuift bij volumeverandering;
- uitleggen wat de invloed van een katalysator op het evenwicht is;
- uitleggen wat de invloed van een temperatuurverandering op het evenwicht is;
- uitleggen hoe een evenwicht aflopend kan worden gemaakt.

Oefenopdrachten

1 Algen

Lees de onderstaande tekst goed door en beantwoord daarna de bijbehorende vragen.



7.47 Een van de problemen bij het opschalen van de productie van biobrandstoffen uit algen is het omlaagbrengen van de productiekosten. Bioreactoren van grote plastic zakken is een van de mogelijkheden die worden onderzocht.

Biobrandstof van algen

Inventure Chemical, een productiebedrijf in Washington, heeft bijna twee miljoen dollar aan financiering binnengehaald om een proeffabriek te bouwen voor zijn systeem om van algen biobrandstof te maken. De technologie die het bedrijf gebruikt is volgens directeur Mark Tegen relatief simpel, maar details wil het bedrijf nog niet geven. Volgens Tegen kan zijn systeem in de proeffabriek rond de 500 liter biobrandstof per dag produceren. De daadwerkelijke productie is afhankelijk van de hoeveelheid algen die het bedrijf kan krijgen.

Inventure is in staat verschillende soorten algen met bijvoorbeeld verschillen in vetgehalte en grootte te gebruiken in zijn proces. Het vet wordt omgezet in biodiesel en de rest van de algen (zetmeel en cellulose) wordt afgebroken tot suikers en omgezet in ethanol. Volgens Tegen kan biobrandstof uit algen binnen tien jaar concurreren met olie, en dit zonder subsidies. De algen kunnen ook worden gebruikt om andere afvalstromen te verwerken, zoals afvalwater van een melkfabriek of waterzuiveringsbedrijf.

Bron: www.twanetwerk.nl

- a Teken de koolstofkringloop van bovenstaand proces.
- b Wat kun je in maximaal tien regels (honderd woorden) zeggen over de duurzaamheid van deze kringloop? Motiveer je antwoord.

De molecuulformule van biodiesel is $C_{19}H_{36}O_2$. Biodiesel wordt gemaakt door omestering van olie met methanol.

- c Leg uit wat omestering van een olie is.
- d Leg uit welk vetzuur onderdeel is van deze biodiesel.
- e Geef de reactievergelijking van de volledige verbranding van biodiesel.
- f Geef de reactievergelijking van de omzetting van glucose in bio-ethanol.

- ### 2
- Bij de verbranding van benzine wordt onder andere koolstofdioxide gevormd. Om van Maastricht naar Groningen te rijden, wordt door een bepaalde auto 26 liter benzine verbrand.

- a Geef de vergelijking van de volledige verbranding van benzine. Gebruik als formule voor benzine C_7H_{12} .
- b Bereken hoeveel kg koolstofdioxide ontstaat bij de volledige verbranding van 26 liter benzine. Gebruik Binas tabel 11.
- c Geef de naam van het milieuprobleem dat het gevolg is van de toename van de concentratie van koolstofdioxide in de atmosfeer.

Het Europees Parlement heeft als richtlijn aangenomen dat vanaf 2010 benzine een bepaald percentage biobrandstof (ethanol, C_2H_6O) moet bevatten. Voor de benzine die in Nederland wordt verbruikt, zou dan jaarlijks ongeveer $2,3 \cdot 10^8$ kg ethanol uit bijvoorbeeld suiker (sacharose) moeten worden geproduceerd. Akkerland waarop suikerbieten worden verbouwd, levert per jaar gemiddeld $1,1 \cdot 10^4$ kg suiker per hectare op.

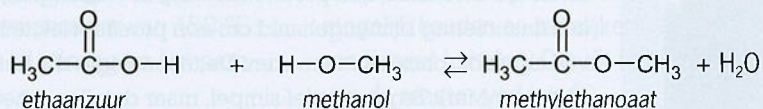
- d** Bereken op hoeveel hectare akkerland suikerbieten moeten worden verbouwd voor de jaarlijkse productie van $2,3 \cdot 10^8$ kg ethanol. Gebruik in je berekening de volgende gegevens:
- per mol suiker ontstaat vier mol ethanol;
 - alle suiker wordt omgezet tot ethanol;
 - de massa van een mol sacharose ($C_{12}H_{22}O_{11}$) bedraagt 342,3 g.

Naar: CE havo 2006-II

- 3** Methylethanoaat is in gebruik als oplosmiddel en als basis voor lakken (figuur 7.48). De productie van methylethanoaat ($C_3H_6O_2$) gebeurt door estervorming uit methanol en ethaanzuur. Als katalysator wordt zwavelzuur toegepast. Deze estervorming is een evenwichtsreactie:



7.48 Methylethanoaat is zowel als oplosmiddel en als basis te gebruiken in verven.



- a** Geef de reactievergelijking in molecuulformules.
b Leg uit wat de invloed van zwavelzuur is op het evenwicht.

In een vat van $1,0 \text{ dm}^3$ wordt $0,40$ mol ethaanzuur en $0,60$ mol methanol gedaan. Na het opstarten van de reactie wordt er evenwicht bereikt bij een temperatuur van 400 K . Bij evenwicht heeft 65% van het ethaanzuur gereageerd.

- c** Geef de evenwichtsvoorwaarde voor dit evenwicht. Gebruik molecuulformules.
d Bereken de waarde van de evenwichtsconstante bij 400 K .
e Bereken hoeveel gram methylethanoaat in het reactiemengsel aanwezig is.

In de jaren tachtig van de vorige eeuw is er een chemisch technologisch proces ontwikkeld, waarin een reactor en een destillatietoren worden gecombineerd. Dit proces heet 'reactieve destillatie'. Door tijdens de reactie het reactiemengsel te verwarmen, verdampt methylethanoaat uit het reactiemengsel.

- f** Leg uit wat de invloed is op de ligging van het evenwicht wanneer methylethanoaat uit het reactiemengsel verdampt.



thiofeen

- 4** In autobenzine komen altijd zwavelverbindingen voor. Bij de verbranding van benzine ontstaat daardoor het schadelijke zwaveldioxide. De zwavelverbinding die het meest voorkomt in autobenzine, is thiofeen (kookpunt 84°C). De structuurformule van thiofeen is hiernaast weergegeven.

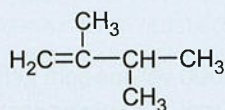
In deze structuurformule zijn de koolstofatomen, de waterstofatomen en de bindingen tussen koolstofatomen en waterstofatomen niet getekend.

- a** Geef de molecuulformule van thiofeen.
b Geef de vergelijking van de volledige verbranding van thiofeen. Gebruik daarbij molecuulformules.

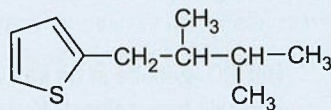
In verschillende landen worden de normen voor het zwavelgehalte in autobenzine aangescherpt. In 2000 bevatten de meeste benzinesoorten nog enkele honderden ppm zwavel. $1 \text{ ppm zwavel} = 1 \text{ mg zwavel per kg benzine}$. In 2005 is dit in de landen van de Europese Unie verlaagd naar maximaal 50 ppm .

Een proces om het zwavelgehalte sterk te verminderen is OATS (Olefinic Alkylation of Thiophenic Sulfur). Onder bepaalde omstandigheden kan thiofeen reageren met alkenen die in de benzinefractie aanwezig zijn.

Bij deze reactie van thiofeen met stof A ontstaat onder andere stof B:



stof A



stof B

Het kookpunt van stof B is hoger dan 180 °C. Daardoor kan stof B gemakkelijk worden verwijderd uit het mengsel.

- c Noem het type binding dat bij het kookpunt wordt verbroken.
- d Geef de naam van de scheidingsmethode die wordt gebruikt om stof B uit het mengsel te verwijderen.

In Nederland wordt per jaar ongeveer $5,1 \cdot 10^9$ liter benzine verbrand. De dichtheid van benzine is $0,72 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$. Wanneer deze benzine een zwavelgehalte heeft van 250 ppm, wordt per jaar via de benzine $9,2 \cdot 10^5 \text{ kg}$ zwavel verbrand. Door een verlaging van het zwavelgehalte van 250 ppm naar 50 ppm zal er veel minder zwaveldioxide ontstaan.

- e Laat door berekening zien dat per jaar in Nederland via de benzine $9,2 \cdot 10^5 \text{ kg}$ zwavel wordt verbrand bij gebruik van benzine met een zwavelgehalte van 250 ppm.
- f Bereken hoeveel kg zwaveldioxide er per jaar minder ontstaat als het zwavelgehalte van benzine 50 ppm is in plaats van 250 ppm.

Naar: CE havo 2003-II

5

Lees de onderstaande tekst.



7.49 Systeem van een gesloten kas voor tomatenteelt

Duurzame ontwikkeling

Tot voor kort gebruikte de glastuinbouw veel energie, onder andere voor het verwarmen van de kassen. Een van de manieren waarop de glastuinbouw het energieverbruik vermindert, is met warmtekruiskoppeling (wkk). Dat zijn kleine installaties die elektriciteit opwekken door het verbranden van aardgas, waarbij de afvalwarmte wordt gebruikt om de kassen te verwarmen. Het teveel aan opgewekte elektriciteit leveren de tuinders weer aan het elektriciteitsnet.

Ook de introductie van de gesloten kas levert energiebesparing op. Als het 's zomers warm is, moeten de ramen van de kassen open om de temperatuur niet te hoog te laten worden. Maar dat betekent ook ongewenste insecten en verlies van warmte, waterdamp en CO_2 (nodig voor de groei).

Als je de kas gesloten wilt houden, moet je de overvloedige warmte van de zomer kunnen afvoeren. Dit kan door in de zomer water te laten verwarmen door warme ventilatielucht en dat op te slaan in ondergrondse waterhoudende zandlagen, aquifers. In de winter wordt dat water opgepompt en verwarmt het de kas. Met die maatregelen bespaart de glastuinbouw 30 tot 40% aan energie.

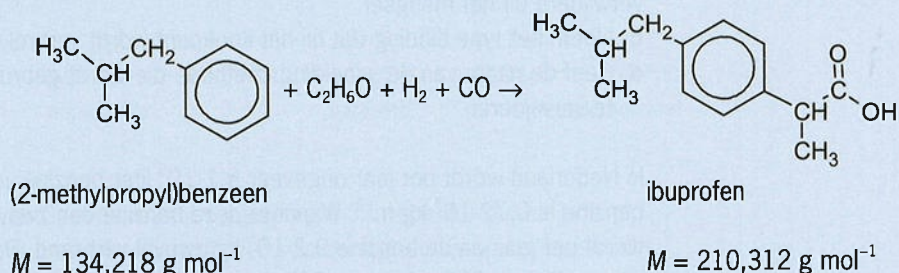
- a De wkk-installaties gebruiken nu aardgas. Leg uit welke duurzame energiebron je ook in de tuinbouw zou kunnen gebruiken.

- De gesloten kas kan voor grote energiebesparingen zorgen. Maar er zijn ook andere voordelen.
- Leg uit wat de voordelen zijn in een gesloten kas met betrekking tot insecten.
 - Leg uit welke andere besparingen in een gesloten kas mogelijk zijn.
 - Leg uit waarom CO₂ nodig is voor de groei.
 - Leg uit hoe tuinders het CO₂-gehalte in de kas verhogen.

Het CO₂-gehalte in de kas wordt op 1000 volume-ppm gehouden, ongeveer drie keer de normale hoeveelheid. $V_m = 24,5 \text{ dm}^3 \text{ mol}^{-1}$. 1 volume-ppm = 1,00 cm³ CO₂ per m³ lucht.

- Bereken hoeveel gram CO₂ per m³ overeenkomt met 1000 volume-ppm.

- 6** De productie van ibuprofen vindt plaats in drie stappen, met als nettoreactie:



Voor elke 1,00 kg ibuprofen die geproduceerd wordt is 0,78 kg (2-methylpropyl)benzeen nodig.

- Bereken het rendement van dit proces.
- Bepaal de atoomeconomie van dit proces.
- Hoe 'groen' is dit proces volgens jou op basis van het rendement en de atoomeconomie?

Keuzeopdrachten

Hieronder staat een korte beschrijving van drie keuzeopdrachten. Op de site staat meer informatie. In overleg met je docent kun je één of meer van deze keuzeopdrachten uitvoeren.

- Een nieuwe auto**

Je vader wil een nieuwe auto. Jij onderzoekt verschillende verbrandingsmotoren en betreft hierbij aspecten als kosten, vermogen, milieu-impact, duurzaamheid van de gebruikte materialen, gebruik van biobrandstoffen, tweedehands waarde.
- Een meevaller in de begroting**

De regering heeft een meevaller van een miljard euro. Dit geld wordt geïnvesteerd in de ontwikkeling van duurzame energiebronnen. Zoek informatie over duurzame energiebronnen. Schrijf een aanbeveling waarin je duidelijk maakt welke duurzame projecten het best gesubsidieerd kunnen worden.
- Biobrandstoffen**

Het Ierse bedrijf Celtic Renewables produceert biobutanol uit het afval van whiskystokerijen. In deze opdracht zoek je uit hoe dat proces verloopt en wat de voordelen van biobutanol zijn als biobrandstof.

Overzicht begrippen

Aflopend evenwicht

Wanneer je de reactieproducten van een evenwichtsreactie constant afvoert, dwing je het evenwicht naar de kant van de reactieproducten te verlopen. Er ontstaat dan een aflopend evenwicht.

Atomeconomie

De atomeconomie geeft aan welk percentage van alle atomen van de beginstoffen terugkomt in het gewenste reactieproduct.

Biobrandstoffen

Biobrandstoffen worden gemaakt uit **biomassa**, materiaal van organische oorsprong. Voorbeelden van biobrandstoffen zijn **bio-ethanol**, **biodiesel** en **biogas**.

Je kunt bij de biobrandstoffen drie generaties onderscheiden: de eerste generatie biobrandstoffen worden geproduceerd uit voedselgewassen, de tweede generatie uit niet-voedselgewassen en de derde generatie maakt geen gebruik van landbouwafval.

Blokschema

Een chemisch productieproces kun je weergeven in een blokschema. Met blokken geef je chemische reactoren aan waarin een reactie of scheiding plaatsvindt. Met pijlen geef je aan hoe de stofstromen lopen.

Chemisch evenwicht

Als bij een omkeerbare reactie zowel de heen- als de teruggaande reactie tegelijkertijd verloopt, heet dit een chemisch evenwicht. De tijd die het kost voordat de reacties even snel verlopen is de **insteltijd** van het evenwicht. Een evenwicht is **homogeen** als alle stoffen zich in dezelfde fase bevinden en **heterogeen** als ze zich in verschillende fasen bevinden.

Concentratiebreuk

Voor elk evenwicht kun je uit de reactievergelijking de concentratiebreuk afleiden. Als de reactie in evenwicht is, is de uitkomst van de concentratiebreuk gelijk aan de **evenwichtsconstante** (K). Je noemt dit de **evenwichtsvoorwaarde**.

Duurzaamheid

Duurzaamheid is voldoen aan de behoeften van het heden, zonder de behoeften in de toekomst in gevaar te brengen. Je kunt dit doen door **duurzame grondstoffen** te gebruiken of te **recyclen**.

Gefractioneerde destillatie

Aardolie wordt op basis van kooktrajecten gescheiden in verschillende **fracties**. Dit proces heet **gefractioneerde destillatie**. Na de scheiding wordt de naftafractie verder verwerkt door de koolstofketens in kortere ketens om te zetten in een proces dat **kraken** heet. De kleinere koolstofketens kun je tot de gewenste koolwaterstoffen vormen met **reformen**.

Groene chemie

De groene chemie is een filosofie die streeft naar een schonere chemische industrie. Om dit te bereiken zijn twaalf uitgangspunten geformuleerd die rekening houden met veiligheid, duurzaamheid en milieu.

Rendement

Het rendement geeft de verhouding aan tussen de praktische en de theoretische opbrengst van een product.